



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

*«Δοκιμή ατρωσίας σε αγόμενες κοινότοπες διαταραχές σε
ναυτιλιακό εξοπλισμό»*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΣΤΕΝΟΓΛΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος
Επιβλέποντες: Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης

Αθήνα, Μάρτιος, 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

*«Δοκιμή απρωσίας σε αγόμενες κοινότοπες διαταραχές σε
ναυτιλιακό εξοπλισμό»*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΣΤΕΝΟΓΛΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29/03/2023

.....
Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής

.....
Χρήστος Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος, 2024

.....
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ν. ΚΩΣΤΕΝΟΓΛΟΥ

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

Copyright © Κωστένογλου Κωνσταντίνος, 2024

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 στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό, πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα, που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο, εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση των φαινομένων ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας σε ηλεκτρολογικά/ηλεκτρονικά τμήματα ναυτιλιακού εξοπλισμού μέσα από τη διεξαγωγή πειράματος βασισμένο σε διεθνή πρότυπα. Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας, πραγματοποιήθηκε, αρχικά, μία γενική εισαγωγή στο φαινόμενο του ηλεκτρομαγνητισμού και περιεγράφηκαν ζητήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), όπως οι φάσεις, τα βήματα, τα προβλήματα που προκύπτουν αλλά και οι πηγές που ευθύνονται για φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) και τα πρότυπα που έχουν δημιουργηθεί ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές για EMC. Έπειτα, αναλύθηκαν οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στη ναυτιλία, εξετάστηκε το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον ενός βαποριού, η λειτουργία της ηλεκτρογεννήτριας και παρατέθηκαν σχετικά παραδείγματα από τη διεθνή βιβλιογραφία για επίλυση προβλημάτων EMC που έχουν προκύψει. Στο εργαστηριακό μέρος της εργασίας, παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας, βάσει του προτύπου IEC 61000-4-16. Στο τέλος, παρουσιάστηκε η διαδικασία της διακρίβωσης και της σύγκρισης των αποτελεσμάτων, από άλλο διαπιστευμένο εργαστήριο, για τη γεννήτρια Frankonia PSG-300/ PSG-300A, καταλήγοντας σε χρήσιμα συμπεράσματα.

Λέξεις-κλειδιά:

Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, ηλεκτρογεννήτρια, ηλεκτρομαγνητισμός, EMC πρότυπα, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, ναυτιλία, ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, φάσεις EMC, προβλήματα EMC, προϋποθέσεις βαποριού

Abstract

The purpose of this thesis is to examine electromagnetic interference phenomena in electrical/electronic components of maritime equipment through conducting experiments based on international standards. In the theoretical part of the study, initially, a general introduction to the phenomenon of electromagnetism was provided, and issues of electromagnetic compatibility (EMC) were described, such as phases, steps, problems arising, as well as sources responsible for electromagnetic interference (EMI) phenomena and the standards created to meet EMC specifications. Subsequently, electromagnetic interferences in shipping were analyzed, the electromagnetic environment of a steamship was examined, the operation of the generator was discussed, and relevant examples from international literature were presented for solving EMC problems that have arisen. In the laboratory part of the study, the design of the experimental procedure was presented, based on the IEC 61000-4-16 standard. Finally, the process of verification and comparison of results was presented, from another accredited laboratory, for the Frankonia PSG-300/ PSG-300A generator, leading to useful conclusions.

Keywords:

Electromagnetic compatibility, electromagnetic generator, electromagnetism, EMC standards, electromagnetic interference, shipping, electromagnetic environment, EMC phases, EMC problems, vessel conditions

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	4
Abstract	5
Πίνακας Εικόνων	8
Πίνακας Εργαστηριακών Αποτελεσμάτων	10
Πρόλογος	11
Ευχαριστίες	12
1. Γενική Εισαγωγή στον Ηλεκτρομαγνητισμό	13
1.1 Εισαγωγή	13
1.2 Ιστορική αναδρομή	13
1.3 Βασικές έννοιες	14
2. Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC)	17
2.1 Ορισμοί	17
2.2 Φάσεις	21
2.3 Βήματα	22
2.4 Προβλήματα	22
2.5 Θόρυβος	26
2.6 Πηγές	27
2.7 Πρότυπα	29
2.8 EMC σε κυκλώματα	32
3. Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα στη Ναυτιλία	34
3.1 Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον του πλοίου	34
3.2 Προϋποθέσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας για τα πλοία	37
3.3 Τεχνικά θέματα	38
3.4 Παραδείγματα στη σχετική βιβλιογραφία	43
4. Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16	46
4.1 Σκοπός	46
4.2 Γενικά	47
4.3 Επίπεδα δοκιμής	48
4.4 Εξοπλισμός δοκιμής	49
4.5 Επαλήθευση των χαρακτηριστικών των γεννητριών δοκιμής	51
4.6 Δίκτυα σύζευξης/αποσύζευξης	52
4.7 Ρύθμιση δοκιμής	54
4.8 Διαδικασία δοκιμής	55
4.9 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων δοκιμής	58
4.10 Έκθεση δοκιμής	59

4.11 Πηγές διαταραχών	59
4.12 Μηχανισμοί σύζευξης	60
4.13 Επιλογή επιπέδων δοκιμής	60
5. Διεξαγωγή δοκιμής ατρωσίας σε αγόμενες κοινότροπες διαταραχές	63
5.1 Σκοπός	63
5.2 Σχετικά Έγγραφα	63
5.3 Εξοπλισμός	63
5.4 Επίπεδα Δοκιμής	64
5.5 Διαδικασία Δοκιμής	65
6. Διακρίβωση εξοπλισμού δοκιμών	70
6.1 Βασικές Αρχές Διακρίβωσης	70
6.2 Εξοπλισμός και Διακρίβωση Γεννήτριας σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16	72
6.3 Παράμετροι προς διακρίβωση	73
7. Συμπεράσματα και η Επόμενη Μέρα	90
7.1 Ανακεφαλαίωση	90
7.2 Θέματα Μελλοντικής Διερεύνησης του Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16	90
7.3 Συμπεράσματα	90
Βιβλιογραφία	92
Ξενόγλωσση	92
Ελληνόγλωσση	94
Ιστότοποι	94

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1. Δυνητική Κατάσταση ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής μεταξύ διακριτών συστημάτων (Πηγή: Violette, 2013).....	21
Εικόνα 2. Παράδειγμα ενδοσυστημικών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (Πηγή: Violette, 2013).....	22
Εικόνα 3. Πηγές ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (Πηγή: https:// www.studiecd.dk / cahiers_techniques/EMC_electromagnetic_compatibility.pdf).....	26
Εικόνα 4. Η τοπολογική μορφή της δομής ενός πλοίου με επίπεδα θωράκισης (τοιχώματα), S, και ηλεκτρομαγνητικές (ΗΜ) πηγές διαταραχών, D, εξοπλισμός υπό δοκιμή (EuT) (Πηγή: Katulski & Namiotko, 2019).....	34
Εικόνα 5. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο πλοίο (Πηγή: https://www.marineinsight.com/marine-electrical/what-is-marine-electricity/).....	38
Εικόνα 6. Παράδειγμα κύριου πίνακα διανομής (Πηγή: https://www.marineinsight.com/marine-electrical/what-is-marine-electricity/).....	40
Εικόνα 7. Παράδειγμα γεννήτριας άξονα (Πηγή: https://www.wartsila.com /marine /products /products /ship-electrification-solutions/shaft-generator).....	42
Εικόνα 8. Ενιαίο θαλάσσιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. (Πηγή Sheludko, Belski & Grigoryev (2017).....	43
Εικόνα 9. Ενιαίο θαλάσσιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. (Πηγή Sheludko, Belski & Grigoryev (2017).....	44
Εικόνα 10. Προφίλ της τάσης δοκιμής(Πρότυπο IEC 61000-4-16).....	46
Εικόνα 11. παράδειγμα της γεννήτριας για δοκιμή τάσης συνεχούς ρεύματος και συχνότητας 15Hz μέχρι και 150kHz (Πρότυπο IEC 61000-4-16).....	49
Εικόνα 12. Παράδειγμα γεννήτριας για δοκιμές στη συχνότητα δικτύου (Πρότυπο IEC 61000-4-16).....	50
Εικόνα 13. Παράδειγμα διαμόρφωσης θυρών εξοπλισμού(Πρότυπο IEC 61000-4-16)..	51
Εικόνα 14. Σχηματικό κύκλωμα για το δίκτυο ζεύξης T για θύρες επικοινωνίας (Πρότυπο IEC 61000-4-16).....	55
Εικόνα 15. Σχηματικό κύκλωμα για δοκιμές τύπου (Πρότυπο IEC 61000-4-16).....	57
Εικόνα 16. Αρμονική τάση δοκιμής για αγωγή παρεμβολή χαμηλής συχνότητας (Lloyd’s Register Type Approval System - Test Specification Number 1).....	64
Εικόνα 17. Συνδεσμολογία Πειραματικής Άσκησης συμπεριλαμβανομένου των προϊόντων του πελάτη, πολυοργάνου και ασφαλειών.....	65
Εικόνα 18. Συνδεσμολογία των Frankonia Generator PSG-300A Coupling CN-M2345-32.....	65
Εικόνα 19. Αρχική μενού λογισμικού.....	66
Εικόνα 20. Επιλογή τύπου δοκιμής.....	66

Εικόνα 21. Μενού για τη δοκιμή “15 Hz - 15 kHz test”.....	66
Εικόνα 22. Μενού επιλογής Προτύπου δοκιμής.....	67
Εικόνα 23. Επιλογή για έναρξη της δοκιμής.....	67
Εικόνα 24. Επιλογή επιπέδου τάσης.....	67
Εικόνα 25. Μενού παρακολούθησης της δοκιμής.....	68
Εικόνα 26. Ενδείξεις τιμών από προϊόντα του πελάτη.....	68
Εικόνα 27. Μενού εισαγωγής στοιχείων δοκιμής.....	68
Εικόνα 28. Ιεραρχία Ιχνηλασιμότητας.....	70
Εικόνα 29. DC Voltage +/V & DC Voltage +/V μέτρηση με τη χρήση πολυμέτρου.....	73
Εικόνα 30. AC Voltage /V μέτρηση με τη χρήση πολυμέτρου και καταμεριστή τάση....	75
Εικόνα 31. DC positive & negative Calculated Impedance μέτρηση με τη χρήση καταμεριστή τάσης.....	79
Εικόνα 32. AC Crest Factor μέτρηση με τη χρήση probe cable.....	81
Εικόνα 33. Στιγμιότυπο ημιτονοειδούς σήματος σε συχνότητα 60 Hz.....	83
Εικόνα 34. Κυματομορφή τάσης για DC τάση εξόδου της γεννήτριας με χρήση AC Coupling.....	85
Εικόνα 35. Κυματομορφή τάσης για DC τάση εξόδου της γεννήτριας με χρήση DC Coupling.....	85
Εικόνα 36. Αποτελέσματα υπολογισμού των παραμέτρων THD και Ripple μέσω του λογισμικού MATLAB.....	88

Πίνακας Εργαστηριακών Αποτελεσμάτων

Πίνακας 1: Επίπεδα Συνεχούς Διαταραχής Πρότυπο IEC 61000-4-16.....	47
Πίνακας 2: Επίπεδα Σύντομης Διαταραχής Πρότυπο IEC 61000-4-16.....	47
Πίνακας 3: Επίπεδα Δοκιμής στο εύρος συχνότητας 15 Hz έως και 150 kHz. (Πρότυπο IEC 61000-4-16).....	48
Πίνακας 4: Τάσης ανοιχτοκύκλωσης (r.m.s.).....	63
Πίνακας 5: Βημάτων δειγματοληψίας.....	73
Πίνακας 6: Παράμετρος DC positive & negative Voltage /V.....	74
Πίνακας 7: Λόγοι Καταμερισμού.....	75
Πίνακας 8: Παράμετρος AC Voltage /V σε φάσμα αντίστοιχων συχνοτήτων.....	76
Πίνακας 9: DC positive/ negative Calculated Impedance.....	77
Πίνακας 10: AC 15 - 15000 Hz Calculated Impedance.....	78
Πίνακας 11: AC 15 - 150000 Hz Crest factor 1V.....	81
Πίνακας 12: Frequency 1Hz - 300kHz.....	83
Πίνακας 13: Κώδικας Matlab για τον υπολογισμό των παραμέτρων THD και Ripple....	85

Πρόλογος

Τον 21ο αιώνα, με την έλευση της συνεχώς εξελισσόμενης τεχνολογίας και τη χρήση ηλεκτρονικών συσκευών που χρησιμοποιούνται σε όλες τις κοινωνικές και οικονομικές δραστηριότητες, η μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC ή ΗΜΣ ελληνιστί) είναι κρίσιμη προκειμένου να αποφευχθούν δυσάρεστα φαινόμενα παρεμβολών μεταξύ συσκευών και συστημάτων, τα οποία έχουν άσχημες συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία και δραστηριότητα. Ιδιαίτερα στην περίπτωση των πλοίων, ο ναυτιλιακός εξοπλισμός υπόκειται σε ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα με έντονες διαταραχές, είτε στην περιοχή πρόωσης, είτε στο κατάστρωμα ή στη γέφυρα. Το περιβάλλον ΗΜΣ σε ένα πλοίο είναι αρκετά διαφορετικό από άλλα περιβάλλοντα ΗΜΣ, για αυτό και επιβάλλεται η χρήση ειδικών προτύπων.

Ένα πλοίο διαθέτει μηχανήματα πρόωσης, ελιγμών και διαχείρισης φορτίου, τα οποία περιλαμβάνουν παροχές σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων και μεγάλης ηλεκτρικής ισχύος. Διαθέτει επίσης εξοπλισμό πλοήγησης, εξοπλισμό επικοινωνίας και εξοπλισμό ελέγχου που σχετίζεται με την λειτουργία του. Οι ραδιοσυχνότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα πλοίο καλύπτουν μια ευρεία ζώνη από 10 kHz έως 9 GHz για το ραντάρ. Η γέφυρα ενός πλοίου διαθέτει μια ιδιαίτερα πυκνή συγκέντρωση εξοπλισμού ραδιοναυτιλίας, ραδιοεπικοινωνίας και ελέγχου των μηχανημάτων, τα οποία πρέπει να συνεργάζονται μεταξύ τους.

Υπό αυτό το πρίσμα, η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη μελέτη φαινομένων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε ηλεκτρογεννήτρια πλοίου και περιλαμβάνει τη διεξαγωγή πειράματος βασισμένο σε πρότυπο. Αρχικά, το πρώτο κεφάλαιο κάνει μια γενική εισαγωγή στον ηλεκτρομαγνητισμό, στο οποίο παρατίθενται μία σύντομη ιστορική αναδρομή και οι βασικές έννοιες του.

Το δεύτερο κεφάλαιο, αφορά την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) που αποτελεί το κυρίαρχο αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται όλες οι πτυχές της EMC, οι ορισμοί, οι φάσεις, τα βήματα, τα προβλήματα, ο θόρυβος – παρεμβολή, οι πηγές, τα πρότυπα της και ο τρόπος που δομούνται τα κυκλώματα.

Στη συνέχεια, το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στον ηλεκτρομαγνητισμό στη ναυτιλία, όπου παρατίθενται τεχνικά θέματα και παραδείγματα στη σχετική βιβλιογραφία.

Παράλληλα, το τέταρτο κεφάλαιο παραθέτει αναλυτικά το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Τεχνικές δοκιμής και μέθοδοι μέτρησης - Δοκιμή ατρωσίας σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κοινής λειτουργίας στη συχνοτική περιοχή από 0 Hz έως 150 kHz.

Ακολούθως, το πέμπτο και έκτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καταγράφουν τη πειραματική διαδικασία, καθώς και τη επιβεβαίωση της πραγματοποιηθείσας διακρίβωσης. Πρεσβεύαν ρόλο στην εκτέλεση και αξιολόγηση του συνόλου της πειραματική διαδικασία, αποτέλεσε η εφαρμογή αμφότερα του πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16 και του πιστοποιητικό διακρίβωσης (Calibration Certificate) του Γερμανικού διαπιστευμένου εργαστηρίου διακρίβωσης Testo.

Καταληκτικά, το έβδομο κεφάλαιο ανακεφαλαιώνει το ποιόν της παρούσης διπλωματικής εργασία, παραθέτοντας τα σημεία μελλοντικής εμβάθυνσης, αλλά και την εργαστηριακή συνεισφορά της.

Ευχαριστίες

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, 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 και Ηλεκτρικών Μετρήσεων για τη συνεργασία και την υποστήριξή του στο πλαίσιο εκπόνησης της εργασίας.

1. Γενική Εισαγωγή στον Ηλεκτρομαγνητισμό

1.1 Εισαγωγή

Ο ηλεκτρομαγνητισμός είναι ένας θεμελιώδης κλάδος της φυσικής που ασχολείται με την αλληλεπίδραση μεταξύ ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Είναι μία από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης, μαζί με τη βαρύτητα, την ισχυρή πυρηνική δύναμη και την ασθενή πυρηνική δύναμη. Η θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού, η οποία ενοποιεί το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο, περιγράφεται από ένα σύνολο εξισώσεων γνωστών ως εξισώσεις Maxwell, που διατυπώθηκαν από τον Σκωτσέζο επιστήμονα James Clerk Maxwell τον 19ο αιώνα.

Στην καρδιά του ηλεκτρομαγνητισμού βρίσκονται τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Τα ηλεκτρικά πεδία παράγονται από φορτισμένα σωματίδια (όπως ηλεκτρόνια και πρωτόνια) και ασκούν δυνάμεις σε άλλα φορτισμένα σωματίδια. Τα μαγνητικά πεδία, από την άλλη πλευρά, παράγονται με κίνηση φορτίων ή αλλαγή ηλεκτρικών πεδίων και ασκούν δυνάμεις σε κινούμενα φορτία ή άλλα μαγνητικά πεδία. Η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των δύο πεδίων προκαλεί ένα ευρύ φάσμα φαινομένων, όπως ο ηλεκτρισμός, ο μαγνητισμός, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (που περιλαμβάνουν το ορατό φως, τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα και άλλα) και την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.

Ο ηλεκτρομαγνητισμός έχει πολλές εφαρμογές στην καθημερινή ζωή, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής και μετάδοσης ενέργειας, των τεχνολογιών επικοινωνίας, των ηλεκτροκινητήρων και πολλών άλλων ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Μια από τις πρώτες ανακαλύψεις στο πεδίο που θεωρείται πρόδρομος του ηλεκτρισμού, είναι στις αρχές του 16^{ου} αιώνα. Ο Γκίλμπερτ, Άγγλος γιατρός, θεωρείται ο πατέρας των ηλεκτρικών και μαγνητικών μελετών. Στο πρωτοποριακό του έργο, "De Magnete" (1600), έδειξε ότι η ίδια η Γη είναι ένας γιγάντιος μαγνήτης και διέκρινε μεταξύ του μαγνητισμού και του στατικού ηλεκτρισμού (Gilbert, 1600). Αρκετά χρόνια αργότερα, ακόμη μια εμβληματική φυσιογνωμία του Ηλεκτρισμού είναι ο Coulomb (1736-1806). Ο Coulomb εφηύρε το ζυγό στρέψης, ο οποίος του επέτρεψε να μετρήσει ποσοτικά τη δύναμη μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων. Διατύπωσε τον νόμο του Coulomb, ο οποίος περιγράφει την ηλεκτροστατική δύναμη μεταξύ δύο φορτισμένων σωματιδίων (Coulomb, 1785) και είναι ως σήμερα βασικός νόμος του Ηλεκτρισμού. Στις αρχές του 18ου αιώνα έρχεται η ανακάλυψη του Ηλεκτρομαγνητισμού. Η ανακάλυψη του ηλεκτρομαγνητισμού έγινε από τον Ørsted, το 1820, όταν παρατήρησε ότι μια βελόνα πυξίδας εκτρέπεται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα που διέρρεε ένα κοντινό σύρμα. Αυτό το πείραμα έδειξε την ύπαρξη μιας σχέσης μεταξύ του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού (Ørsted, 1820). Μερικά χρόνια αργότερα, εμπνευσμένος από το έργο του Ørsted, ο Ampère διεξήγαγε περαιτέρω πειράματα και διαπίστωσε ότι δύο σύρματα που μεταφέρουν ρεύμα ασκούσαν δυνάμεις το ένα στο άλλο, ανάλογα με την κατεύθυνση του ρεύματος. Διατύπωσε το νόμο του Ampère, ο οποίος περιγράφει τη μαγνητική δύναμη μεταξύ δύο αγωγών που μεταφέρουν ρεύμα (Ampère, 1827).

Αρκετά χρόνια αργότερα έρχεται η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και νόμος του Faraday. Η δουλειά του Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή ήταν καθοριστική για την κατανόηση της σχέσης μεταξύ ηλεκτρισμού και μαγνητισμού. Το 1831, ανακάλυψε ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο θα μπορούσε να προκαλέσει ηλεκτρικό ρεύμα σε έναν αγωγό, το οποίο οδήγησε στη διατύπωση του νόμου του Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή (Faraday, 1832). Στα μέσα του 18ου αιώνα έρχεται η ενοποίηση του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού, στις εξισώσεις του Maxwell. Το μνημειώδες επίτευγμα του Maxwell στον ηλεκτρομαγνητισμό ήταν η διατύπωση των εξισώσεων, ένα σύνολο τεσσάρων διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Αυτές οι εξισώσεις ενοποίησαν τα προηγουμένως χωριστά πεδία του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού σε μια ενιαία, συνεκτική θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού (Maxwell, 1865).

1.3 Βασικές έννοιες

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρατεθούν οι βασικές έννοιες που διέπουν την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Το ηλεκτρικό φορτίο είναι μια θεμελιώδης ιδιότητα της ύλης που προκαλεί ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ σωματιδίων και αντικειμένων. Τα φορτία μπορεί να είναι είτε θετικά είτε αρνητικά και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση ακολουθεί την αρχή ότι τα αντίθετα φορτία έλκονται, ενώ τα όμοια φορτία απωθούν το ένα το άλλο. Η μονάδα ηλεκτρικού φορτίου είναι το κουλόμπ (C). Ο ηλεκτρισμός είναι μια δευτερεύουσα πηγή ενέργειας που προκύπτει από την παρουσία και τη ροή ηλεκτρικών φορτίων και συγκεκριμένα ηλεκτρονίων. Είναι η πιο ευέλικτη και ευρέως χρησιμοποιούμενη μορφή ενέργειας που μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε άλλες μορφές όπως το φως, η θερμότητα ή η μηχανική ενέργεια. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ηλεκτρικής ενέργειας:

- Ο στατικός ηλεκτρισμός, ο οποίος είναι το αποτέλεσμα μιας ανισορροπίας ηλεκτρικών φορτίων εντός ή στην επιφάνεια ενός υλικού. Το φορτίο παραμένει στη θέση του έως ότου εξουδετερωθεί, συνήθως εκφορτιζόμενο μέσω επαφής με άλλο αντικείμενο ή με τον αέρα.
- Τρέχων ηλεκτρισμός: Πρόκειται για τη ροή ηλεκτρικού φορτίου μέσω ενός αγωγού, όπως ενός σύρματος ή άλλου υλικού που επιτρέπει την κίνηση των ηλεκτρονίων. Το ρεύμα ρεύματος μπορεί περαιτέρω να ταξινομηθεί σε δύο τύπους:
 - Συνεχές ρεύμα (DC): Η ροή του ηλεκτρικού φορτίου σε μια ενιαία, σταθερή κατεύθυνση. Οι μπαταρίες και οι ηλιακές κυψέλες είναι κοινές πηγές συνεχούς ρεύματος.
 - Εναλλασσόμενο ρεύμα (AC): Η ροή ηλεκτρικού φορτίου που αλλάζει περιοδικά κατεύθυνση. Τα περισσότερα δίκτυα ισχύος και οικιακά ηλεκτρικά συστήματα χρησιμοποιούν εναλλασσόμενο ρεύμα, καθώς μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε διαφορετικές τάσεις και να μεταδοθεί σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες απώλειες.

Το ηλεκτρικό πεδίο είναι μια περιοχή γύρω από ένα φορτισμένο αντικείμενο όπου μπορούν να υποστούν ηλεκτρικές δυνάμεις από άλλα φορτισμένα σωματίδια ή αντικείμενα. Το ηλεκτρικό πεδίο αντιπροσωπεύει τη δύναμη ανά μονάδα φορτίου και είναι διανυσματικό πεδίο, που σημαίνει ότι έχει και μέγεθος και κατεύθυνση. Η ένταση

και η κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου καθορίζονται από την κατανομή του φορτίου και την απόσταση από τα φορτία. Τυπικά γράφεται με το σύμβολο E και μετριέται βολτ ανά μέτρο (V/m). Μία από τις βασικές έννοιες για την κατανόηση των ηλεκτρικών πεδίων είναι ο νόμος του Coulomb, ο οποίος περιγράφει τη δύναμη μεταξύ δύο φορτισμένων αντικειμένων: Η δύναμη μεταξύ δύο φορτίων είναι ευθέως ανάλογη με το γινόμενο των φορτίων τους και αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ τους. Το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να προκύψει από τον νόμο του Coulomb διαιρώντας τη δύναμη με το φορτίο δοκιμής. Τα ηλεκτρικά πεδία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε αντικείμενα και φαινόμενα, όπως οι πυκνωτές, τα διηλεκτρικά υλικά, η ηλεκτροστατική και ο ηλεκτρομαγνητισμός.

Το ηλεκτρικό δυναμικό, γνωστό και ως διαφορά τάσης ή ηλεκτρικού δυναμικού, είναι ένα βαθμωτό μέγεθος που περιγράφει την ποσότητα ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας ανά μονάδα φορτίου σε μια συγκεκριμένη θέση σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Είναι ένα μέτρο του έργου που απαιτείται για τη μετακίνηση ενός φορτίου μονάδας από ένα σημείο αναφοράς σε ένα συγκεκριμένο σημείο του ηλεκτρικού πεδίου χωρίς να παράγει επιτάχυνση. Είναι μια σημαντική έννοια στον ηλεκτρομαγνητισμό και τα ηλεκτρικά κυκλώματα, καθώς βοηθά στην πρόβλεψη της κίνησης των φορτίων και της ενέργειας που μπορούν να αποκτήσουν ή να χάσουν μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Συμβολίζεται με το σύμβολο V και μετράται σε μονάδες βολτ (V), όπου ένα βολτ ισοδυναμεί με ένα τζάουλ ανά κουλόμπ (J/C). Το ηλεκτρικό δυναμικό σε ένα σημείο του χώρου καθορίζεται από τη διαμόρφωση των φορτίων που δημιουργούν το ηλεκτρικό πεδίο και την απόσταση από αυτά τα φορτία.

Η δύναμη Lorentz είναι μια θεμελιώδης έννοια στον ηλεκτρομαγνητισμό, που περιγράφηκε για πρώτη φορά από τον Ολλανδό φυσικό Hendrik Lorentz το 1895. Στο επίπεδο ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), η δύναμη Lorentz περιγράφει τη δύναμη που υφίσταται ένα φορτισμένο σωματίδιο παρουσία ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Η εξίσωση δύναμης Lorentz μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$F = q(E + v \times B) \quad (1)$$

Όπου F είναι η δύναμη Lorentz, q είναι το φορτίο του σωματιδίου, E είναι το ηλεκτρικό πεδίο, v είναι η ταχύτητα του σωματιδίου και B είναι το μαγνητικό πεδίο. Η δύναμη είναι το άθροισμα της ηλεκτρικής δύναμης (qE) και της μαγνητικής δύναμης ($qv \times B$), που επενεργεί στο φορτισμένο σωματίδιο.

Κατά τη μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), η δύναμη Lorentz είναι απαραίτητη για την κατανόηση της συμπεριφοράς των φορτισμένων σωματιδίων παρουσία ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Η ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) διασφαλίζει ότι οι ηλεκτρονικές συσκευές και συστήματα μπορούν να συνυπάρχουν χωρίς να προκαλούν παρεμβολές, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την κανονική λειτουργία άλλων συσκευών. Η δύναμη Lorentz είναι σημαντική στην ανάλυση ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) καθώς μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη της κίνησης φορτισμένων σωματιδίων, όπως τα ηλεκτρόνια, παρουσία εξωτερικών πεδίων, τα οποία μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση της συσκευής (Paul, 2006). Σε μελέτες ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), η δύναμη Lorentz μπορεί να εφαρμοστεί για την κατανόηση διαφόρων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, όπως η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI) και η ηλεκτρομαγνητική ευαισθησία (EMS), τα οποία είναι κρίσιμα για την απόδοση και την ασφάλεια της συσκευής. Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI) είναι η παραγωγή, διάδοση και λήψη ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, η οποία μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες επιπτώσεις στη λειτουργία των ηλεκτρονικών συστημάτων (Ott, 2009).

Η δύναμη Laplace συχνά συγχέεται με τη δύναμη Lorentz, καθώς οι δύο έννοιες σχετίζονται αλλά δεν είναι ίδιες. Η Laplace αφορά τη δύναμη που υφίσταται ένας αγωγός που μεταφέρει ρεύμα παρουσία μαγνητικού πεδίου, ενώ η Lorentz είναι κρίσιμη στο πλαίσιο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) επειδή βοηθά στην κατανόηση της συμπεριφοράς των αγωγών και των ρευμάτων όταν εκτίθενται σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Η δύναμη Laplace μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$F_L = I (L \times B) \quad (2)$$

Όπου F_L είναι η δύναμη Laplace, I είναι το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό, L είναι το διανυσματικό μήκος του αγωγού και B είναι το μαγνητικό πεδίο. Η δύναμη Laplace δρα κάθετα τόσο στην κατεύθυνση του ρεύματος όσο και στο μαγνητικό πεδίο.

Στο πλαίσιο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), η δύναμη Laplace είναι απαραίτητη για την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αγωγών που μεταφέρουν ρεύμα και μαγνητικών πεδίων. Αυτή η κατανόηση είναι κρίσιμη για το σχεδιασμό και την ανάλυση ηλεκτρονικών συστημάτων, καθώς βοηθά στην πρόβλεψη της απόδοσής τους παρουσία εξωτερικών μαγνητικών πεδίων, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την κανονική λειτουργία των συσκευών (Paul, 2006).

Ο Ott (2009) συζητά τον ρόλο της δύναμης Laplace στην ανάλυση της συμπεριφοράς των αγωγών που μεταφέρουν ρεύμα παρουσία μαγνητικών πεδίων, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την πρόβλεψη της απόδοσης των ηλεκτρονικών συστημάτων και τη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας τους. Σε γενικές γραμμές, η δύναμη Laplace διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις μελέτες ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), καθώς βοηθά στην κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αγωγών μεταφοράς ρεύματος και μαγνητικών πεδίων, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη σωστή λειτουργία και την ασφάλεια των ηλεκτρονικών συσκευών.

2. Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC)

2.1 Ορισμοί

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility - [EMC]) εστιάζει στην ικανότητα των ηλεκτρονικών συσκευών και συστημάτων να μπορούν να λειτουργούν αρμονικά στο προβλεπόμενο περιβάλλον τους χωρίς να προκαλούν ή να επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI). Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) είναι ζωτικής σημασίας, για την επιτυχή απόδοση των σύγχρονων ηλεκτρονικών συστημάτων και διασφαλίζει, ότι οι ηλεκτρονικές συσκευές δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους, επιτρέποντάς τους να συνυπάρχουν χωρίς να προκαλούν υποβάθμιση στην απόδοσή τους (Paul, 2006). Ο ηλεκτρικός, ηλεκτρομηχανολογικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός πρέπει να συμμορφώνεται με προδιαγραφές που αποσκοπούν στη διασφάλιση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (ΗΜΣ), η οποία είναι η ικανότητα των υποσυστημάτων, των κυκλωμάτων και των εξαρτημάτων να λειτουργούν όπως έχουν σχεδιαστεί, χωρίς δυσλειτουργία ή απαράδεκτη υποβάθμιση των επιδόσεων λόγω ΗΜΣ εντός του προβλεπόμενου επιχειρησιακού περιβάλλοντος. Ουσιαστικά οποιοσδήποτε εξοπλισμός ή σύστημα δεν θα πρέπει να επηρεάζει δυσμενώς τη λειτουργία οποιουδήποτε άλλου εξοπλισμού ή συστήματος ως αποτέλεσμα ακτινοβολούμενης ή αγωγίμης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και αντίστοιχα δεν πρέπει να επηρεάζεται (Violette, 2013).

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες: εκπομπή και ατρωσία. Η εκπομπή αναφέρεται στην παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών (παρασίτων / θορύβου) από ηλεκτρονικές συσκευές, ενώ η ατρωσία αφορά την ικανότητα αυτών των συσκευών να λειτουργούν σωστά παρουσία ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών (Kaiser, 2009). Μια ολοκληρωμένη ανάλυση EMC περιλαμβάνει τη διερεύνηση και των δύο αυτών πτυχών για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία των ηλεκτρονικών συσκευών και συστημάτων.

- Εκπομπή

Οι εκπομπές διακρίνονται σε αγόμενες (Conductive Emissions - CE) και ακτινοβολούμενες (Radiated Emissions - RE).

- *Αγόμενες εκπομπές:* Οι αγόμενες εκπομπές μετρούνται στους αγωγούς / καλώδια, που είναι συνδεδεμένα με τον υπό δοκιμή εξοπλισμό (Equipment Under Test - EUT). Για το εμπορικό ή/και βιομηχανικό περιβάλλον, στο οποίο χρησιμοποιείται ο ηλεκτρικός / ηλεκτρονικός εξοπλισμός, υπάρχουν διαφορετικά επιτρεπόμενα όρια των εκπομπών: Το εύρος συχνοτήτων συνήθως είναι από 150 kHz έως 30 MHz.
- *Ακτινοβολούμενες εκπομπές:* Στόχος είναι η μείωση της ακτινοβολίας του εξοπλισμού, των εξαρτημάτων, των καλωδίων με σκοπό την αποφυγή των παρεμβολών του γειτονικού εξοπλισμού. Το εύρος συχνοτήτων των μετρήσεων εκπομπών RE, για εμπορικά και βιομηχανικά προϊόντα, είναι συνήθως από 30 MHz έως 6 GHz. Ωστόσο, το εύρος συχνοτήτων εξαρτάται από τη χρήση και μπορεί, υπό ορισμένες συνθήκες, να είναι από 30 Hz έως 40 GHz (π.χ. για αμυντικά / στρατιωτικά προϊόντα).

- Αρμονικές

Στόχος είναι ο περιορισμός των αρμονικών ρευμάτων που εγχέονται στο δημόσιο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Το ρεύμα εισόδου του δικτύου τροφοδοσίας πολλών συσκευών και μηχανών συχνά δεν είναι αρμονικό ημιτονοειδές κύμα.

- Αρμονικές και διαρμονικές διαταραχές

Στα συστήματα AC η παραμόρφωση (όπως εννοείται η αρμονική παραμόρφωση) σχετίζεται με το θεμελιώδες συστατικό της γενικής ποσότητας Q που λαμβάνεται υπόψη (είτε τάση είτε ρεύμα). Σε αυτήν την περίπτωση καθορίζεται η THD (Total Harmonic Distortion).

$$THD = \left[\frac{Q}{Q_1} \right]^{1/2} \quad (3)$$

όπου: (Q₁) είναι η τιμή rms του θεμελιώδους · (Q) είναι η συνολική τιμή rms.

Αυτός ο τύπος περιλαμβάνει επίσης διαρμονικά· αν είναι αμελητέες, αυτή η σχέση γίνεται

$$THD = \left[\sum_{h=1}^H (Q_h / Q_1)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

όπου: (Q₁) είναι η τιμή rms του θεμελιώδους · (Q) είναι η συνολική τιμή rms · (h) είναι η τάξη της αρμονικής · (Q_h) είναι η τιμή rms της αρμονικής συνιστώσας τάξης (h).

Το ανώτερο όριο (H) των αθροισμάτων υποδεικνύεται στο EN 61800-3 ως (H=40) (με ρητή αναφορά στην ειδική απαίτηση του (H=50) που εκφράζεται στο πρότυπο IEEE Std. 519 ένα εκτεταμένο όριο (H=50) απαιτείται ωστόσο, ώστε να πληρούνται όλες οι διεθνείς απαιτήσεις.

- Ripple

Το ripple είναι η μεταβολή της ποσότητας (τάση) γύρω από τη σταθερή τιμή κατά τη λειτουργία σταθερής κατάστασης του ηλεκτρικού συστήματος. Το πρότυπο EN 61000-4-17 δηλώνει ότι οι κύριες πηγές αυτών των μεταβολών τάσης είναι τα συστήματα ανορθωτών που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα διανομής συνεχούς τάσης και στους φορτιστές μπαταριών. Το πρότυπο υποδεικνύει ότι η συχνότητα του ripple είναι η συχνότητα ισχύος ή το πολλαπλάσιο της (2x, 3x ή 6x) υποθέτοντας έναν αναφορικό ανορθωτή φυσικής απόκρουσης, με τη συχνότητα και το πλάτος να εξαρτώνται από την αρχιτεκτονική του ανορθωτή και το βαθμό συμμετρίας του τροφοδοτικού μετασχηματιστή. Ωστόσο, αρκετοί άλλοι ανορθωτές έχουν διαφορετικές αρχές λειτουργίας και στοιχεία με διαφορετικά μοτίβα αγωγών εκπομπών.

- Δείκτης PQ Αρμονικών/Διαμεσοαρμονικών

Για την παραμόρφωση LFSD, ο προτεινόμενος δείκτης D_{LFSD} είναι μια άμεση μετάφραση των δεικτών THD:

$$D_{LFSD} = \left[\sum_{k>0}^{k_{\max}} (Q[k]/Q[0])^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

όπου: $Q[0]$ είναι η τιμή στη σταθερή κατάσταση DC; $Q[k]$ είναι το φάσμα συχνότητας της ποσότητας $q[n]$ (rms); k είναι ο δείκτης συχνότητας μεταξύ 0 και $k_{\max}=F_{\max}/df$; df είναι η ανάλυση συχνότητας για τον καθορισμένο χρόνο παραθύρου και τον χρόνο προς συχνότητα μετασχηματισμό (δηλαδή, DFT).

Η ανώτατη συχνότητα F_{\max} ορίζεται σε 2-3,6 kHz (για να καλύψει το εύρος συχνότητας που καθορίζεται συνήθως από τα σχετικά πρότυπα αρμονικής παραμόρφωσης) ή 15/150 kHz για να καλύψει τα δύο τελευταία υποεύρη του EN 61000-4-16 .

- Δείκτης PQ Ripple

Η τιμή κορυφής προς κορυφή (peak to peak) $q_{pp,T}$ της ακολουθίας $q[n]$ πάνω από kT δειγμάτων (δοσμένη από το χρονικό παράθυρο ripple T πάνω από την περίοδο δειγματοληψίας $dt=1/df$, ώστε $kT=\text{round}(T/dt)$) είναι:

$$q_{pp,T} = \max_{n,k} \{ |q[n] - q[n+k+k_T]| \} \quad (6)$$

όπου η λειτουργία $\max\{\}$ γίνεται πάνω σε επιτρεπτές τιμές του n και του k , θετικοί ακέραιοι, ώστε οι δύο όροι μεταξύ των αγκυλών δεν μπορούν να είναι "πιο κοντά" από kT δείγματα.

- Τρεμοσβήσιμο (Flickering)

Στόχος είναι ο περιορισμός των μεταβολών τάσης, των διακυμάνσεων τάσης και του τρεμοσβήσιματος στα δημόσια συστήματα παροχής χαμηλής τάσης. Το τρεμοσβήσιμο είναι το φαινόμενο που περιγράφει την αντιληπτή διακύμανση στη φωτεινότητα των φωτεινών πηγών λόγω γρήγορων αλλαγών τάσης που προκαλείται από ένα φωτεινό ερέθισμα του οποίου η φωτεινότητα ή η φασματική κατανομή αυξομειώνεται με το χρόνο.

- Ατρωσία

Διακρίνεται σε ατρωσία σε αγωγή ακτινοβολία (Conducted Immunity - CI, Conducted Susceptibility - CS), ατρωσία σε ακτινοβολία (Radiated Immunity - RI, Radiated Susceptibility - RS) και ατρωσία έναντι φαινομένων όπως η ηλεκτροστατική εκκένωση (Electrostatic Discharge - ESD) ή οι ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί (Electromagnetic pulse - EMP).

- Ατρωσία κατά την αγωγή

Οι δοκιμές αγωγιμότητας διεξάγονται σε καλώδια που είναι συνδεδεμένα με το EUT. Για εμπορικό και βιομηχανικό ηλεκτρικό/ηλεκτρονικό εξοπλισμό, διακρίνονται διάφορες πτυχές της ατρωσίας.

- Ατρωσία κατά τη διεξαγωγή RadioFrequency

Στόχος είναι η λειτουργική ατρωσία σε αγώμενες που προκαλούνται από πεδία RF. Το εύρος συχνοτήτων των αγωγίμων RF για εμπορικά και βιομηχανικά προϊόντα κυμαίνεται από 150 kHz έως 80 MHz (IEC 61000-4-6).

- Electrical Fast Transient (EFT)

Στόχος είναι η λειτουργική ατρωσία σε επαναλαμβανόμενες ηλεκτρικές γρήγορες μεταβατικές διαταραχές (EFT, bursts), όπως αυτές που προέρχονται από μεταβατικές διαταραχές μεταγωγής (διακοπή επαγωγικών φορτίων, αναπήδηση επαφής ρελέ κ.λπ.). Οι τάσεις δοκιμής κυμαίνονται από 0,5 kV έως 4 kV (IEC 61000-4-4).

➤ Υπερένταση - Υπερτάση

Στόχος είναι η λειτουργική ατρωσία σε υπερτάσεις και υπερεντάσεις, που προκαλούνται από μεταγωγές διακοπής και μεταβατικά φαινόμενα κεραυνών. Οι τάσεις δοκιμής κυμαίνονται από 0,5 kV έως 4 kV (IEC 61000-4-5).

➤ Βυθίσεις

Στόχος είναι η λειτουργική ατρωσία σε βυθίσεις τάσης, βραχυχρόνιες διακοπές και διακυμάνσεις τάσης στις θύρες τροφοδοσίας. (IEC 61000-4-11 & Keller, 2023).

▪ Ανοχή σε ακτινοβολούμενο πεδίο RF

Στόχος είναι η λειτουργική ατρωσία σε ραδιο-ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο μακρινό πεδίο (80 MHz έως 6 GHz): IEC 61000-4-3).

➤ Ατρωσία σε ακτινοβολούμενα μαγνητικά πεδία

Στόχος είναι η λειτουργική ατρωσία σε μαγνητικά συχνότητες 50 Hz και 60 Hz (IEC 61000-4-8).

➤ Electrostatic Discharge (ESD)

Στόχος είναι η ατρωσία σε εκφορτίσεις στατικού ηλεκτρισμού, από τους χειριστές απευθείας και από το προσωπικό σε παρακείμενα αντικείμενα. Οι τάσεις δοκιμής κυμαίνονται από 1 kV έως 15 kV (IEC 61000-4-2).

➤ Electromagnetic Pulse (EMP)

Στόχος είναι η προστασία από ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς (EMP). Ο ΗΜΠ είναι ένα στιγμιαίο, έντονο ενεργειακό πεδίο, το οποίο μπορεί να προκληθεί από πυρηνική έκρηξη ή άλλες συσκευές που παράγουν παλμούς. Εάν η έκρηξη αυτή συμβεί σε μεγάλο υψόμετρο, ονομάζεται ΗEMP. Οι ΗΜΠ είναι ένα θέμα για αμυντικές και στρατιωτικές εφαρμογές και όχι για εμπορικά και βιομηχανικά προϊόντα.

Ο σχεδιασμός ηλεκτρονικών συστημάτων με γνώμονα την EMC είναι απαραίτητος για τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας των συσκευών σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως οικιακά, βιομηχανικά και αεροδιαστημικά περιβάλλοντα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό λόγω της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των ηλεκτρονικών συστημάτων και της αυξανόμενης εξάρτησης από τις τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών (Montrose & Nakauchi, 2009). Για να επιτύχουν EMC, οι μηχανικοί πρέπει να χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές, όπως θωράκιση, φιλτράρισμα και γείωση.

Η γείωση ενός ηλεκτρονικού συστήματος είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη EMC. Χρησιμοποιείται ως δυναμική αναφοράς και συνδέεται με το μεταλλικό περίβλημα των ηλεκτρονικών συσκευών και εξαρτημάτων που πρέπει να βρίσκονται στο

δυναμικό γείωσης. Για την επίτευξη της γείωσης όλων των στοιχείων του συστήματος πρέπει να διασφαλιστεί η γείωση των επιμέρους υποσυστημάτων, όπως για παράδειγμα μιας πλακέτας (Printed Circuit Board Assembly – PCBA). Η θωράκιση θα πρέπει να βασίζεται στα κριτήρια και τις προδιαγραφές θωράκισης του εκάστοτε στοιχείου (ευαίσθητα κυκλώματα, καλώδια, κλπ) και τελικά με τη σύνδεση των θωρακίσεων των στοιχείων αυτών. Για το φιλτράρισμα θα πρέπει να εξετάζεται ιδιαίτερα τα ESD, EFT (Electrical Fast Transient) και οι υπερτάσεις για τα καλώδια που εξέρχονται από το προϊόν. Το φιλτράρισμα RF θα πρέπει να εξετάζεται για κάθε καλώδιο.

Οι κανονισμοί ΗΜΣ έχουν νομικό καθεστώς και χρησιμοποιούνται από κυβερνητικές υπηρεσίες για τον έλεγχο των ανεπιθύμητων ηλεκτρομαγνητικών (ΗΜ) αλληλεπιδράσεων. Το σήμα CE, που σημαίνει Conformité Européenne, είναι μια υποχρεωτική πιστοποίηση για προϊόντα που πωλούνται εντός του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου (ΕΟΧ) και σημαίνει ότι ένα προϊόν πληροί τα βασικά πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας που ορίζονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση για να διασφαλιστεί ότι δεν θα προκαλέσει ή θα είναι ευαίσθητο σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Άλλες υπηρεσίες της ευρωπαϊκής ένωσης επιβάλλουν επίσης ειδικές απαιτήσεις. Για παράδειγμα, τα μέγιστα επιτρεπόμενα επίπεδα έκθεσης σε ραδιοσυχνότητες για τους εργαζόμενους καθορίζονται από την European Agency for Safety and Health at Work (EU - OSHA).

Σε γενικές γραμμές, η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα είναι μια ζωτική πτυχή των σύγχρονων ηλεκτρονικών, διασφαλίζοντας ότι οι συσκευές μπορούν να συνυπάρχουν και να λειτουργούν βέλτιστα χωρίς να προκαλούν ή να επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

2.2 Φάσεις

Οι φάσεις της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι τρεις: η πηγή, η μετάδοση και η λήψη (Ott, 2009; Paul, 2006).

Πηγή: Η πηγή αναφέρεται στο μέσο (συσκευές ή συστήματα) το οποίο παράγει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Κάθε ηλεκτρική ή ηλεκτρονική συσκευή παράγει κάποιο επίπεδο ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας λόγω της ροής των ρευμάτων και της παρουσίας διακυμάνσεων της τάσης. Ο στόχος στο EMC είναι να ελαχιστοποιηθεί η παραγωγή ανεπιθύμητων ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές σε άλλες συσκευές ή συστήματα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω κατάλληλων τεχνικών σχεδίασης, επιλογής εξαρτημάτων, θωράκισης και φιλτραρίσματος.

Μετάδοση: Η μετάδοση αναφέρεται στη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μέσω του χώρου ή των αγωγίμων διαδρομών, όπως καλώδια ή ίχνη σε μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μπορεί να μεταδοθεί ως ακτινοβολούμενες εκπομπές μέσω του αέρα ή ως αγόμενες εκπομπές μέσω αγωγίμων υλικών. Για να ελαχιστοποιηθεί η μετάδοση ανεπιθύμητης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, οι μηχανικοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν κατάλληλες τεχνικές δρομολόγησης καλωδίων, θωράκισης, φιλτραρίσματος και γείωσης. Επιπλέον, η χρήση ισορροπημένων σημάτων και καλωδίων συνεστραμμένου ζεύγους μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της μετάδοσης παρεμβολών.

Λήψη: Η λήψη είναι η διαδικασία με την οποία συσκευές ή συστήματα δέκτες λαμβάνουν την μεταδιδόμενη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Οι συσκευές μπορούν να επηρεαστούν από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές εάν είναι ευαίσθητες στην ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που λαμβάνουν. Στόχος των δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι να αυξηθεί η ατρωσία συσκευών ή συστημάτων σε εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη βελτίωση της θωράκισης, τη χρήση του κατάλληλου φιλτραρίσματος, την επιλογή εξαρτημάτων με υψηλότερα επίπεδα ατρωσίας και την εφαρμογή στιβαρών τεχνικών σχεδιασμού.

2.3 Βήματα

Τα τρία βασικά βήματα της διαδικασίας EMC είναι (Armstrong, 2007; Ramdani, Boyer and Sicard, 2013):

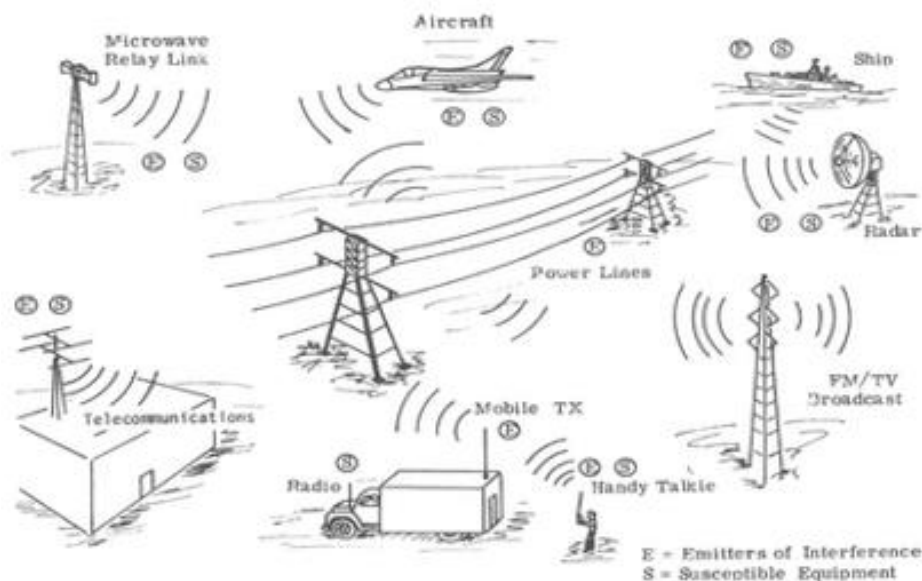
- **Έλεγχος εκπομπών:** Αυτό το βήμα στοχεύει στη μείωση των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών που παράγονται από τη συσκευή ή το σύστημα. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω κατάλληλων τεχνικών σχεδιασμού, θωράκισης, φιλτραρίσματος και κατάλληλης γείωσης. Η διασφάλιση ότι η συσκευή ή το σύστημα παράγει ελάχιστες εκπομπές βοηθά στην αποφυγή παρεμβολών με άλλες κοντινές συσκευές ή συστήματα.
- **Έλεγχος ατρωσίας:** Αυτό το βήμα εστιάζει στη βελτίωση της ικανότητας της συσκευής ή του συστήματος να αντιστέκεται σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από εξωτερικές πηγές. Ο έλεγχος της ατρωσίας μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση θωράκισης, φιλτραρίσματος και γείωσης. Επιπλέον, η επιλογή εξαρτημάτων με κατάλληλα επίπεδα ατρωσίας, στιβαρές τεχνικές σχεδιασμού και κατάλληλη δοκιμή μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της συνολικής ατρωσίας της συσκευής ή του συστήματος.
- **Δοκιμή και συμμόρφωση:** Σε αυτό το βήμα, η συσκευή ή το σύστημα υποβάλλεται σε δοκιμή για να διασφαλιστεί ότι πληροί τα σχετικά πρότυπα και κανονισμούς EMC. Οι δοκιμές έχουν σχεδιαστεί για να επαληθεύουν ότι η συσκευή ή το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει σωστά στο προβλεπόμενο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον χωρίς να προκαλεί παρεμβολές ή να επηρεάζεται από αυτό. Η δοκιμή συμμόρφωσης συνήθως περιλαμβάνει δοκιμές τόσο εκπομπών όσο και ατρωσίας για να διασφαλιστεί ότι η συσκευή ή το σύστημα πληροί τις απαραίτητες απαιτήσεις.

2.4 Προβλήματα

Τα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας προκύπτουν όταν ηλεκτρονικές συσκευές και συστήματα αλληλεπιδρούν ακούσια με αποτέλεσμα την αμοιβαία υπολειτουργία τους. Τέτοια προβλήματα είναι τα παρακάτω:

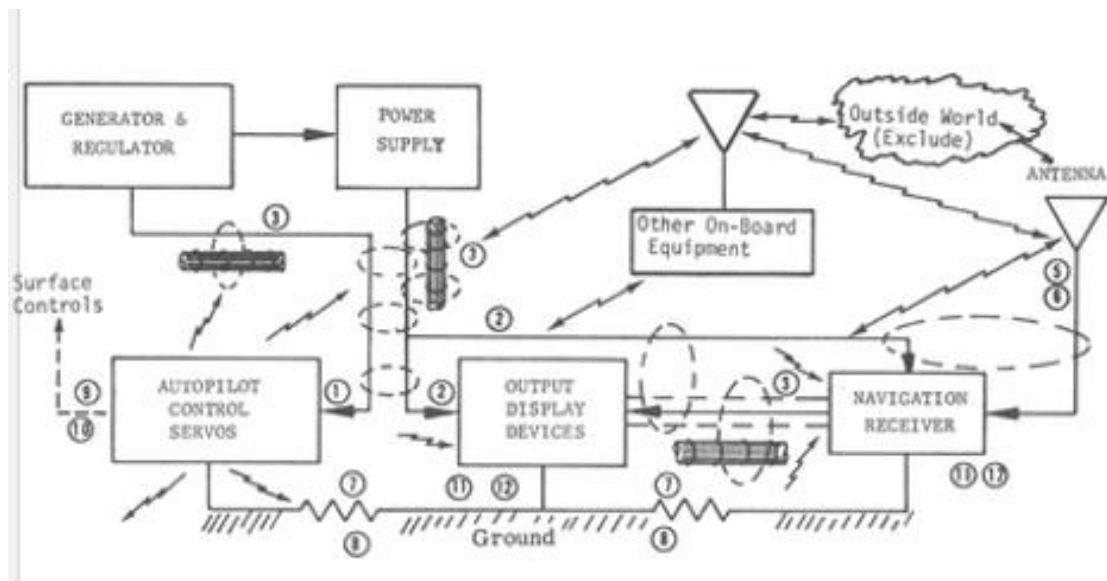
Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI): Το EMI εμφανίζεται όταν μια συσκευή παράγει ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές που διαταράσσουν την κανονική λειτουργία άλλων συσκευών ή συστημάτων. Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) μπορεί να έχει τη μορφή εκπομπών ακτινοβολίας (μέσω του αέρα) ή εκπομπών αγωγών (μέσω καλωδίων ή ιχνών σε μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος). Οι παρεμβολές μπορεί να προκαλέσουν δυσλειτουργίες, υποβάθμιση της απόδοσης ή ακόμη και πλήρη αστοχία των επηρεαζόμενων συσκευών. Οι επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μπορεί να κυμαίνονται από ασήμαντη ενόχληση έως καταστροφικές συνέπειες. Μια

ασήμαντη ενόχληση κρίνεται ότι προκύπτει, για παράδειγμα, όταν η παρεμβολή "χιόνι" εμφανίζεται στιγμιαία στην οθόνη της τηλεόρασης λόγω παράλληλης λειτουργίας άλλης ηλεκτρικής συσκευής, όπως είναι ένα σεσουάρ μαλλιών ή μία ηλεκτρική ξυριστική μηχανή. Από την άλλη μεριά, σοβαρές συνέπειες θα μπορούσαν να προκύψουν σε περίπτωση που ένα σήμα παρεμβολής διαταράξει την κανονική λειτουργία του ιατρικού ηλεκτρονικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της κατάστασης ενός ασθενούς υπό εντατική φροντίδα σε νοσοκομείο. Τα παραδείγματα αυτά είναι ενδεικτικά της φύσης και των δυνητικών συνεπειών της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και της σημασίας του αποτελεσματικού ελέγχου για την επίτευξη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. (Violette, 2013)



Εικόνα 1. Δυνητική Κατάσταση ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής μεταξύ διακριτών συστημάτων (Πηγή: Violette, 2013).

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές μπορεί να είναι μεταξύ διακριτών συστημάτων (inter-system) όπως απεικονίζεται στην **Error! Reference source not found.** ή ενδοσυστημικές (intra-system). Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές εντός ενός συστήματος εμφανίζονται ως αποτέλεσμα αυτοεμπλοκής ή ανεπιθύμητης σύζευξης εκπομπών στοιχείων του εν λόγω συστήματος. Οι παρεμβολές μπορούν να αναπτυχθούν ως αποτέλεσμα παρωδικών αιχμών τάσης ή/και ρεύματος που εμφανίζονται στα καλώδια ισχύος και στις καλωδιώσεις. Αυτές οι αιχμές μπορούν να συζευχθούν ηλεκτρικά (χωρητικά) ή/και μαγνητικά (επαγωγικά) σε γειτονικά ευαίσθητα καλώδια μέσω της αμοιβαίας χωρητικότητας ή/και της αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των καλωδίων, προκαλώντας έτσι την εμφάνιση ανεπιθύμητων σημάτων. Οι ενδοσυστημικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές μπορούν επίσης να συζευχθούν από το ένα μέρος ενός συστήματος στο άλλο ως αποτέλεσμα των πτώσεων τάσης που προκαλούνται στις κοινές αντιστάσεις γείωσης από τα ρεύματα γείωσης. Σε αντίθεση με τις διασυστημικές παρεμβολές, οι ενδοσυστημικές παρεμβολές μπορούν να ελεγχθούν από έναν μόνο διαχειριστή του συστήματος (Εικόνα 2), ο οποίος μπορεί να είναι ο σχεδιαστής του συστήματος ή του εξοπλισμού. (Violette, 2013).



Εικόνα 2. Παράδειγμα ενδοσυστημικών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (Πηγή: Violette, 2013)

Ευαισθησία: Η ευαισθησία μιας συσκευής αναφέρεται στην ευπάθειά της σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από εξωτερικές πηγές. Οι συσκευές με χαμηλά επίπεδα ατρωσίας μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά από το EMI, οδηγώντας σε ακανόνιστη συμπεριφορά, υποβάθμιση της απόδοσης ή πλήρη αστοχία.

Crosstalk: Το Crosstalk είναι η ακούσια σύζευξη ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μεταξύ κυκλωμάτων ή εξαρτημάτων μέσα σε μια συσκευή ή σύστημα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε παρεμβολές και υποβάθμιση της απόδοσης. Οι κατάλληλες τεχνικές σχεδίασης, η θωράκιση και η γείωση μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση της αλληλεπίδρασης.

Βρόχοι γείωσης: Οι βρόχοι γείωσης εμφανίζονται όταν πολλαπλές διαδρομές γείωσης δημιουργούν έναν ακούσιο βρόχο, επιτρέποντας στα κυκλοφορούντα ρεύματα να δημιουργούν EMI. Οι βρόχοι γείωσης μπορεί να είναι μια σημαντική πηγή παρεμβολών και μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα με την ακεραιότητα του σήματος και την απόδοση του συστήματος.

Συμμόρφωση με τα πρότυπα και τους κανονισμούς EMC: Οι ηλεκτρονικές συσκευές και συστήματα απαιτείται να πληρούν διάφορα πρότυπα και κανονισμούς EMC για να διασφαλίζεται ότι μπορούν να λειτουργούν σωστά χωρίς να προκαλούν ή να επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Η συμμόρφωση με αυτά τα πρότυπα μπορεί να είναι δύσκολη και μπορεί να απαιτεί εκτεταμένες δοκιμές και τροποποιήσεις σχεδιασμού.

Προκλήσεις σχεδιασμού: Η επίτευξη EMC σε ηλεκτρονικά σχέδια μπορεί να είναι δύσκολη λόγω της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των συσκευών, των υψηλότερων συχνοτήτων λειτουργίας και της ανάγκης για μικρότερα και πιο συμπαγή σχέδια. Οι σχεδιαστές πρέπει να εξετάζουν προσεκτικά τις απαιτήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού για να αποτρέψουν δαπανηρούς επανασχεδιασμούς και να εξασφαλίσουν την αξιοπιστία του προϊόντος.

Οι κατασκευαστές ημιαγωγών έρχονται αντιμέτωποι με πολυάριθμα ζητήματα συμπεριλαμβανομένων των αυξανόμενων προσδοκιών των πελατών για το σχεδιασμό

ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος ώστε να ανταποκρίνεται σε μια καθορισμένη απόδοση ΗΜΣ, τον έλεγχο των αλλαγών στην απόδοση ΗΜΣ ως αποτέλεσμα της συρρίκνωσης ή της αλλαγής του χώρου κατασκευής και την παροχή υποστήριξης για το σχεδιασμό προϊόντων και την αντιμετώπιση προβλημάτων ΗΜΣ.

Ταυτόχρονα, ο κατασκευαστής ημιαγωγών πρέπει να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς της μεθοδολογίας σχεδιασμού και την απουσία των απαραίτητων εργαλείων σχεδιασμού και πρόβλεψης επιδόσεων ΗΜΣ για να καταστεί δυνατή η συμμόρφωση μέσω σχεδιασμού. Τα ζητήματα ΗΜΣ που αντιμετωπίζουν οι ημιαγωγοί κατασκευαστών περιπλέκονται περαιτέρω από την έλλειψη διεθνών προτύπων μέτρησης ΗΜΣ που απευθύνονται στην αξιολόγηση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Οι χρήστες των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων αντιμετωπίζουν ένα διαφορετικό σύνολο ζητημάτων, συμπεριλαμβανομένης της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς ΗΜΣ σε επίπεδο προϊόντος, του κόστους ανάπτυξης και συμμόρφωσης με την ΗΜΣ, του χρόνου διάθεσης στην αγορά και του τρόπου προσδιορισμού και αξιολόγησης της απόδοσης ΗΜΣ ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Τα εμπορικά, μεταφορικά και στρατιωτικά ηλεκτρονικά συστήματα απαιτείται συνήθως να πληρούν τους σχετικούς κανονισμούς ΗΜΣ σε επίπεδο προϊόντος ή τις απαιτήσεις επιδόσεων. Αυτές οι απαιτήσεις επιδόσεων είναι συχνά υποχρεωτικές. Δεδομένου ότι το ολοκληρωμένο κύκλωμα είναι συχνά η πηγή εκπομπής και το θύμα ευαισθησίας σε μία εφαρμογή, οι κατασκευαστές αρχικού εξοπλισμού (OEM) επιδιώκουν να οδηγήσουν τις απαιτήσεις ΗΜΣ στο επίπεδο του ολοκληρωμένου κυκλώματος για να ελαχιστοποιήσουν τον κίνδυνο συμμόρφωσης με την ΗΜΣ των προϊόντων τους.

Η ΗΜΣ επίσης προσθέτει σημαντικό κόστος σε ένα πρόγραμμα ανάπτυξης προϊόντος σε μορφή έμπειρου προσωπικού μηχανικών ΗΜΣ, εκπομπών και λύσεων ελέγχου ευαισθησίας, αλλαγών στο σχεδιασμό και απώλειας εσόδων λόγω μη συμμόρφωσης. Επιπλέον, η ΗΜΣ μπορεί να επηρεάσει το χρόνο στην αγορά λόγω της συνολικής πολυπλοκότητας της επίτευξης συμμόρφωσης, τη διαθεσιμότητα των εκπομπών και της επιδεκτικότητας και τυχόν καθυστέρηση λόγω μη συμμόρφωσης. Δυστυχώς, η έλλειψη διεθνών μετρήσεων ΗΜΣ προτύπων για την παροχή πληροφοριών επιδόσεων εμποδίζει την έξυπνη επιλογή εξαρτημάτων και αυξάνει τη δυσκολία της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού του προϊόντος για τη συμμόρφωση προς την ΗΜΣ. (Carlton, 2003)

Περιορισμοί κόστους και χρόνου: Η ανάπτυξη ηλεκτρονικών προϊόντων που πληρούν τις απαιτήσεις EMC μπορεί να είναι χρονοβόρα και δαπανηρή, ιδιαίτερα εάν τα προβλήματα ανακαλυφθούν αργά στη διαδικασία σχεδιασμού. Η εξισορρόπηση του κόστους, του χρόνου και της απόδοσης EMC μπορεί να είναι μια σημαντική πρόκληση για τους σχεδιαστές και τους κατασκευαστές.

Τεχνολογικές τάσεις Οι τεχνολογικές τάσεις δεν εξυπηρετούν στην εκπλήρωση των απαιτήσεων ΗΜΣ. Στην πραγματικότητα, οι τεχνολογικές τάσεις αυξάνουν την ΗΜΣ τόσο για τον κατασκευαστή όσο και για τον χρήστη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Για παράδειγμα, οι τεχνολογίες διεργασιών ημιαγωγών συνεχίζουν να συρρικνώνονται σε μια προσπάθεια να μειωθεί το κόστος ανά κύβο, ενώ βελτιώνοντας τις απαιτήσεις λειτουργικής απόδοσης. Αυτές οι διαδικασίες έχουν ως αποτέλεσμα ταχύτερους χρόνους μεταγωγής των τρανζίστορ (δηλ. μεγαλύτερο $dl=dt$) που τείνουν να επηρεάζουν αρνητικά την ΗΜΣ για έναν δεδομένο τύπο πακέτου (δηλαδή τα ίδια παρασιτικά πακέτου). Σε κάθε περίπτωση, οι τεχνολογίες συσκευασίας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων δεν συμβαδίζουν με τις βελτιώσεις της τεχνολογίας διεργασιών, με

αποτέλεσμα να υπάρχουν συσκευασίες με μεγαλύτερη από τη βέλτιστη αυτεπαγωγή ακροδεκτών.

Η τυποποίηση των μεθόδων δοκιμής ΗΜΣ ολοκληρωμένων κυκλωμάτων δεν θα μειώσει την ταχύτητα των τεχνολογικών βελτιώσεων ή της συσκευασίας. Ωστόσο, οι τυποποιημένες μέθοδοι μπορούν να παρέχουν μια συνεπή βάση για την αξιολόγηση των τεχνολογικών βελτιώσεων και των επιδόσεων της συσκευασίας.

2.5 Θόρυβος

Ο θόρυβος είναι οτιδήποτε ηλεκτρικό σήμα πέρα του επιθυμητού που παρεμβάλλεται στο κύκλωμα. Οι βασικοί τρόποι που μεταδίδεται ένας θόρυβος είναι μέσω αγωγίων οδών, όπως καλώδια, καλώδια ή ίχνη σε μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB) και μέσω του αέρα ή άλλων μέσων με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο ακτινοβολούμενος θόρυβος μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές, όπως πομπούς ραδιοφώνου, κεραίες ή ακόμα και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές σε κοντινή απόσταση. Ο ακτινοβολούμενος θόρυβος μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές σε άλλες συσκευές που λειτουργούν στις ίδιες ή σε κοντινές συχνότητες.

Αντίστοιχα, παρεμβολή ονομάζεται το αποτέλεσμα που έχει η δημιουργία θορύβου. Συγκεκριμένα, η παρεμβολή είναι η λανθασμένη λειτουργία ενός κυκλώματος από την τάση που παράγεται εξαιτίας του θορύβου. Όταν μια συσκευή υποβάλλεται σε ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, είτε αγωγίμο είτε ακτινοβολούμενο, μπορεί να προκαλέσει διακοπές, δυσλειτουργίες ή ακόμα και βλάβες. Οι παρεμβολές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο τύπους, EMI & RFI.

Η EMI (Electromagnetic Interference)- Ηλεκτρομαγνητική είναι η διαταραχή ή παρεμβολή που προκαλείται από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από εξωτερική πηγή, όπως ραδιοπομπούς, ηλεκτρονικές συσκευές ή ηλεκτρικό εξοπλισμό. Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή μπορεί να επηρεάσει την απόδοση μιας συσκευής προκαλώντας ανεπιθύμητες τάσεις και ρεύματα στα κυκλώματά της, διακόπτοντας τα σήματα επικοινωνίας ή προκαλώντας καταστροφή δεδομένων. Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή μπορεί περαιτέρω να χωριστεί σε δύο κατηγορίες:

- **EMI στενής ζώνης:** Αυτός ο τύπος παρεμβολής συγκεντρώνεται σε ένα μικρό εύρος συχνοτήτων, που συνήθως σχετίζεται με έναν συγκεκριμένο πομπό ή συχνότητα. Παραδείγματα περιλαμβάνουν σήματα ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών εκπομπών, σήματα κινητών τηλεφώνων και σήματα από συσκευές ασύρματης επικοινωνίας.
- **Ευρυζωνική EMI:** Αυτός ο τύπος παρεμβολής καλύπτει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και μπορεί να δημιουργηθεί από διάφορες πηγές, όπως τροφοδοτικά μεταγωγής, ηλεκτρικούς κινητήρες ή ακόμα και φυσικά φαινόμενα όπως οι κεραυνοί.

Το RFI (Radio Frequency Interference) είναι ένα υποσύνολο του EMI που αναφέρεται συγκεκριμένα σε παρεμβολές που προκαλούνται από σήματα ραδιοσυχνοτήτων (RF). Το RFI μπορεί να διακόψει τη λειτουργία ηλεκτρονικών συσκευών, ιδιαίτερα εκείνων που χρησιμοποιούν ασύρματη επικοινωνία ή λειτουργούν στις ίδιες ή σε κοντινές συχνότητες. Το RFI μπορεί να δημιουργηθεί από συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, δρομολογητές Wi-Fi, ραδιοπομπούς ή ακόμα και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές με ψηφιακά κυκλώματα υψηλής ταχύτητας.

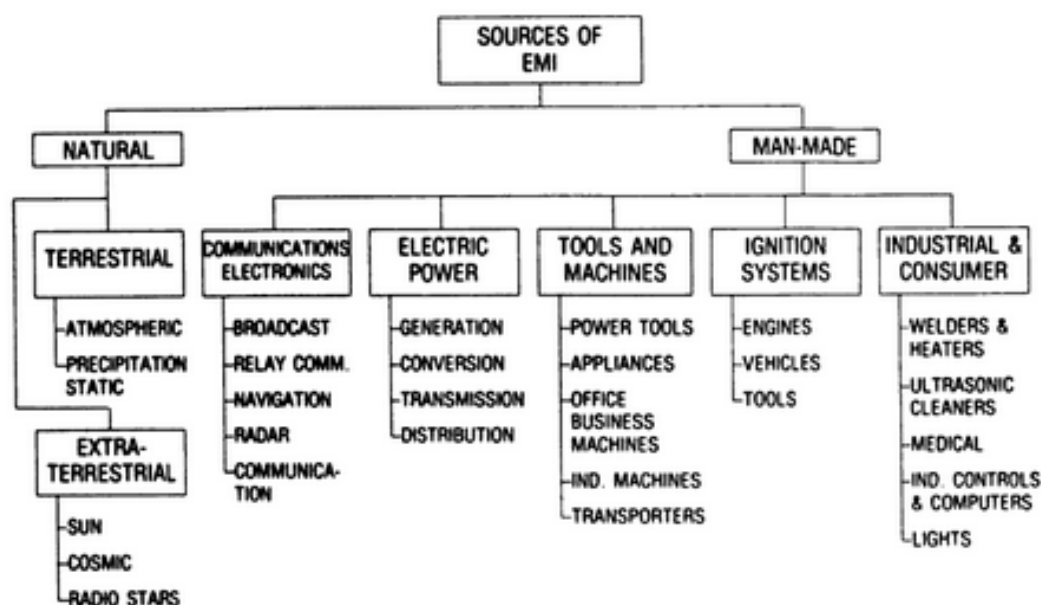
2.6 Πηγές

Οποιαδήποτε συσκευή που μεταδίδει, διανέμει, επεξεργάζεται ή αλλιώς χρησιμοποιεί οποιαδήποτε μορφή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αποτελέσει πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, εάν οποιαδήποτε πτυχή της λειτουργίας της παράγει ηλεκτρομαγνητικά σήματα που μπορούν να προκαλέσουν υποβάθμιση της απόδοσης οποιουδήποτε άλλου εξοπλισμού ή συστήματος που μοιράζεται το ίδιο περιβάλλον. Σήματα που μπορούν να ανιχνευθούν σε ηλεκτρική προέλευση βρίσκονται ουσιαστικά παντού: στην επιφάνεια της γης, σε υπόγειες τοποθεσίες όπως ορυχεία και σήραγγες, υποβρύχια, στην ατμόσφαιρα και στο διάστημα. (Violette, 2013).

Οι πηγές ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: τις φυσικές και τις ανθρωπογενείς πηγές (Εικόνα 3).

Φυσικές πηγές των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών συνιστούν:

- Ατμοσφαιρικός θόρυβος: Αναφέρεται στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο που δημιουργείται από φυσικά φαινόμενα όπως οι κεραυνοί, οι αστραπές, η ηλιακή ακτινοβολία και η κοσμική ακτινοβολία. Αυτές οι πηγές μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές, ιδιαίτερα σε συστήματα ραδιοεπικοινωνίας. Οι ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές που προκαλούν οι κεραυνοί και οι αστραπές είναι το απευθείας χτύπημα σε αγωγούς, η παρουσία φορτισμένων σύννεφων και η απότομη μεταβολή του ρεύματος κατά μήκος ενός καναλιού εκφόρτισης.
- Μαγνητικό πεδίο της Γης: Το μαγνητικό πεδίο της Γης μπορεί να προκαλέσει ρεύματα σε ηλεκτρικούς αγωγούς, οδηγώντας σε παρεμβολές και επηρεάζοντας την απόδοση των ηλεκτρονικών συσκευών.



Εικόνα 3. Πηγές ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών

(Πηγή: https://www.studiecd.dk/cahiers_techniques/EMC_electromagnetic_compatibility.pdf)

Οι ανθρωπογενείς πηγές EMI (Εικόνα 3) ομαδοποιούνται γενικά σε δύο τύπους: εκούσιες και ακούσιες. Στις εκούσιες πηγές εμπίπτει μία κατηγορία πομπών των οποίων η πρωταρχική λειτουργία εξαρτάται από τις ακτινοβολούμενες εκπομπές. Τέτοιες είναι

ηλεκτρονικά συστήματα επικοινωνίας με άδεια χρήσης, συστήματα πλοήγησης, επικοινωνιών και ραντάρ. (Violette, 2013). Πιο συγκεκριμένα:

- Πομποί ραδιοφώνου: Συστήματα ραδιοεπικοινωνίας, όπως σταθμοί εκπομπής, κινητά τηλέφωνα, δρομολογητές Wi-Fi και άλλες συσκευές ασύρματης επικοινωνίας, εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μπορούν να επηρεάσουν τις κοντινές ηλεκτρονικές συσκευές.
- Συστήματα ραντάρ: Τα συστήματα ραντάρ εκπέμπουν ισχυρούς ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς που μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές σε κοντινές ηλεκτρονικές συσκευές.

Η μεταβολή του πλάτους του σήματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ως συνάρτηση της συχνότητας είναι το επόμενο κριτήριο, το οποίο προσδιορίζει τις πηγές ως ευρυζωνικές (broadband) και στενοζωνικές (narrowband). Οι ευρυζωνικές πηγές μπορούν να προσδιοριστούν περαιτέρω ως συνεκτικές ή ασυνεχείς.

Ευρυζωνικές πηγές: Ηλεκτρομαγνητικά διοχετευόμενα και ακτινοβολούμενα σήματα των οποίων η μεταβολή του πλάτους ως συνάρτηση της συχνότητας (συνάρτηση φασματικής πυκνότητας) εκτείνεται σε ένα εύρος συχνοτήτων που είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης ενός συγκεκριμένου δέκτη. Μέσα σε ένα ευρυζωνικό περιβάλλον θορύβου η απόκριση ενός δέκτη είναι ανάλογη του εύρους ζώνης συχνοτήτων του για συνεκτικά σήματα θορύβου και ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του εύρους ζώνης συχνοτήτων για ασυνεπή θόρυβο. (Violette, 2013).

Συνεκτικά και ασυνεπή ευρυζωνικά σήματα: ένα σήμα λέγεται συνεκτικό όταν οι γειτονικές συνιστώσες του σήματος (στο πεδίο της συχνότητας) έχουν μια καλά καθορισμένη σχέση πλάτους, συχνότητας και φάσης. Αντιθέτως, όταν οι γειτονικές συνιστώσες του σήματος (στο πεδίο της συχνότητας) είναι τυχαίες ή ψευδο-τυχαίες (περιορισμένο εύρος ζώνης) στη φάση ή/και στο πλάτος, τότε το σήμα λέγεται ασυνεχές. (Violette, 2013).

Στενοζωνικές πηγές: Ηλεκτρομαγνητικά διοχετευόμενα και ακτινοβολούμενα σήματα των οποίων η μεταβολή του πλάτους ως συνάρτηση της συχνότητας (συνάρτηση φασματικής πυκνότητας) εκτείνεται σε ένα εύρος συχνοτήτων που είναι στενότερο από το εύρος ζώνης ενός συγκεκριμένου υποδοχέα. Μέσα σε ένα περιβάλλον θορύβου στενής ζώνης η απόκριση ενός υποδοχέα είναι ανεξάρτητη από το εύρος ζώνης του, εφόσον το τελευταίο είναι μεγαλύτερο από το εύρος συχνοτήτων του σήματος θορύβου. (Violette, 2013).

Το τελευταίο κριτήριο είναι αν ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα παράγεται εκούσια ή ακούσια. Οι ακούσιες πηγές EMI περιλαμβάνουν:

- Συσκευές μεταγωγής: Συσκευές όπως ρελέ, επαφές και διακόπτες στερεάς κατάστασης παράγουν ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο λόγω της ταχείας εναλλαγής ρευμάτων και τάσεων.
- Τροφοδοτικά: Η εναλλαγή τροφοδοτικών, μετασχηματιστών και άλλων συσκευών μετατροπής ισχύος μπορεί να δημιουργήσει EMI λόγω των απότομων αλλαγών στα επίπεδα τάσης και ρεύματος.
- Ηλεκτροκινητήρες και γεννήτριες: Οι γρήγορες αλλαγές στα μαγνητικά πεδία που προκαλούνται από την περιστροφή αυτών των συσκευών μπορούν να δημιουργήσουν EMI.

- Ψηφιακά κυκλώματα: Τα ψηφιακά κυκλώματα υψηλής ταχύτητας, όπως αυτά που βρίσκονται σε υπολογιστές και άλλες ψηφιακές συσκευές, δημιουργούν EMI λόγω της ταχείας εναλλαγής τρανζίστορ και άλλων εξαρτημάτων.
- Καλώδια και υποδοχές: Ακατάλληλα θωρακισμένα ή γειωμένα καλώδια και σύνδεσμοι μπορούν να λειτουργήσουν ως κεραίες, εκπέμποντας ή συλλέγοντας EMI.

Για να διασφαλιστεί η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, οι ηλεκτρονικές συσκευές και τα συστήματα θα πρέπει να σχεδιάζονται και να δοκιμάζονται με κριτήριο να ελαχιστοποιούν τις εκπομπές EMI και να αυξάνουν την ατρωσία στις παρεμβολές.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω σωστής σχεδίασης κυκλώματος, θωράκισης, φιλτραρίσματος, γείωσης και τεχνικών διαχείρισης καλωδίων. Ο προσδιορισμός και η μέτρηση των πηγών είναι απαραίτητη, καθώς ο τύπος της πηγής θα καθορίσει ποια από τα ακόλουθα μέτρα πρέπει να ληφθούν:

- Περιορισμός των παραγόμενων διαταραχών (π.χ. σε έναν επαφέα, με την εγκατάσταση μιας μονάδας RC που καταστέλλει τις παρεμβολές παράλληλα με το πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος ή μιας διόδου στο πηνίο συνεχούς ρεύματος).
- Αποφυγή διασταυρούμενης σύζευξης (δηλ. φυσικός διαχωρισμός δύο εξαιρετικά ασύμβατων στοιχείων)
- Απευαισθητοποίηση των πιθανών θυμάτων (π.χ. με χρήση θωράκισης)

2.7 Πρότυπα

Τα διεθνή πρότυπα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη ρύθμιση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) ηλεκτρονικών συσκευών και συστημάτων. Αυτά τα πρότυπα θεσπίζουν κατευθυντήριες γραμμές και απαιτήσεις τόσο για τις εκπομπές όσο και για την ατρωσία, διασφαλίζοντας ότι οι συσκευές μπορούν να λειτουργούν χωρίς να προκαλούν ή να αντιμετωπίζουν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI). Οι πρώτοι κανονισμοί εκδόθηκαν από το CISPR, Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (Διεθνής Ειδική Επιτροπή Committee on Radio Interference).

Αυτοί οι κανονισμοί κάλυπταν μόνο το μέγιστο αποδεκτό επίπεδο ισχύος που θα μπορούσε να εκπέμπεται από διάφορων τύπων εξοπλισμού, κυρίως για την προστασία ραδιοφωνικής μετάδοσης και λήψης. Οι εθνικές επιτροπές και η διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) έχουν εκδώσει τεκμηριωμένα πρότυπα που καλύπτουν όλες τις πτυχές της εκπομπής και επιδεκτικότητας ΗΜΣ που συναντώνται στον πολιτικό τομέα.

Τα στρατιωτικά πρότυπα για την ΗΜΣ έχουν συγκεντρωθεί στη σειρά GAM EG 13 στη Γαλλία και στη σειρά MIL-STD στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η αυξανόμενη σημασία της ΗΜΣ και η επικείμενη ενοποίηση της Ευρώπης αλλάζουν το τοπίο των πολιτικών προτύπων. Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο δημοσίευσε τον Μάιο του 1989 μια οδηγία (αναφορά 89/336/ΕΚ) σχετικά με το θέμα αυτό. Αφορά την ενοποίηση της νομοθεσίας για την ΗΜΣ των χωρών μελών. Κάθε χώρα μέλος δεσμεύεται να την συμπεριλάβει στην εθνική της νομοθεσία και να καταστήσει υποχρεωτική τη χρήση και την εφαρμογή της. Το 2014 δημοσιεύθηκε η νεότερη οδηγία 2004/108/ΕΚ.

Η ευρωπαϊκή οδηγία όχι μόνο επιβάλλει όρια στις εκπεμπόμενες διαταραχές αλλά καθορίζει και την ελάχιστη ατρωσία στις ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές. Η οδηγία κάνει

αναφορά σε πρότυπα που καθορίζουν τα μέγιστα επίπεδα διαταραχών. (Delaballe, 2001). Τα πρότυπα ΗΜΣ εφαρμόζονται για:

- Εξασφάλιση ότι τα διάφορα τμήματα ενός συστήματος λειτουργούν χωρίς ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε οποιοδήποτε άλλο τμήμα του ίδιου συστήματος (ενδοσυστημική ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα)
- Εξασφάλιση της λειτουργίας διαφορετικών συστημάτων χωρίς ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές μεταξύ τους (ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα μεταξύ συστημάτων)
- Εξασφάλιση ότι ένα σύστημα δεν υποβαθμίζει το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον και ότι δεν υποβαθμίζεται από το περιβάλλον
- Προσθήκη στη βάση δεδομένων μετρήσεων για την ΗΜΣ
- Βοήθεια στη διαχείριση του φάσματος RF
- Βοηθά στον οικονομικά αποδοτικό σχεδιασμό των συστημάτων, με αποτέλεσμα να μην είναι αναγκαία η δαπανηρή μετασκευή για την επίτευξη της ΗΜΣ
- Συμμόρφωση με την εθνική και διεθνή νομοθεσία σχετικά με τη χρήση του φάσματος
- Εξασφάλιση ότι τα συστήματα/εγκαταστάσεις δεν προκαλούν ή δεν υπόκεινται σε κινδύνους ακτινοβολίας σε λειτουργικά περιβάλλοντα (Carter, 1994)

Στο βαθμό που τα πρότυπα και οι προδιαγραφές ενσωματώνονται στις συμβάσεις μεταξύ του Υπουργείου Άμυνας και των βιομηχανίας, οι διατάξεις τους είναι νομικά δεσμευτικές για τον ανάδοχο (και το Υπουργείο Άμυνας). Πού και πότε εφαρμόζονται τα πρότυπα ΗΜΣ είναι σχεδόν προφανές από τους τύπους των σχετικών προτύπων. Τα πρότυπα του DoD (Department of Defence) ισχύουν για τα στρατιωτικά συστήματα:

- Τα κυβερνητικά πρότυπα και οι κανονισμοί που δεν ανήκουν στο Υπουργείο Άμυνας εφαρμόζονται σε όλο το πολιτικό ομοσπονδιακό σύστημα
- Τα εθνικά πρότυπα ισχύουν για τα ενδιαφερόμενα έθνη

Για τα στρατιωτικά συστήματα, ισχύουν πάντα τα πρότυπα DoD, εκτός εάν αναφέρεται ρητά κάποια άλλη βάση. Κάποια άλλη βάση μπορεί να είναι οι κανονισμοί NTIA, τα εθελοντικού τύπου πρότυπα επαγγελματικών οργανώσεων [Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Society of Automotive Engineers (SAE)], τα πρότυπα ενός συντονιστικού οργανισμού [American National Standards Institute (ANSI)] και τα πρότυπα άλλων εθνικών και διεθνών οργανισμών, του Οργανισμού Βορειοατλαντικού Συμφώνου (NATO), ή της Διεθνούς Ειδικής Επιτροπής για τις Ραδιοπαρεμβολές (CISPR). Από την άλλη πλευρά, οι κανονισμοί της NTIA ισχύουν για όλα τα συστήματα της ομοσπονδιακής κυβέρνησης. Τα πολιτειακά κυβερνητικά και πολιτικά συστήματα συμμορφώνονται με τους κανονισμούς της FCC ή μπορούν να αναπτύξουν τους δικούς τους αυστηρότερους κανονισμούς, όταν απαιτούνται. (Carter, 1994) Ο τομέας EMCS καλύπτει τις απαιτήσεις και τις διαδικασίες για την επίτευξη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε όλες τις περιοχές συχνοτήτων των πλατφορμών, των εγκαταστάσεων, των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων/εξοπλισμού, κυκλωμάτων και εξαρτημάτων. Περιλαμβάνονται πρότυπα για:

- Πρόβλεψη, μέτρηση και επικύρωση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας
- Τεχνικές και διαδικασίες που αφορούν τη γείωση, τη σύνδεση και τη θωράκιση

- Πρόληψη και έλεγχος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο προσωπικό και τον εξοπλισμό (συμπεριλαμβανομένων των επικίνδυνων υλικών και ουσιών)
- Πρόληψη επιβλαβών ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων που προκύπτουν από πυρηνικές εκρήξεις (π.χ, ΗΜΙ και ΗΜΠ) (Carter, 1994)

Μερικοί από τους βασικούς οργανισμούς και τα πρότυπά τους που σχετίζονται με την EMC είναι οι παρακάτω:

Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC): Η IEC αναπτύσσει και δημοσιεύει διεθνή πρότυπα για ηλεκτρικές, ηλεκτρονικές και συναφείς τεχνολογίες. Μερικά πρότυπα της IEC είναι η σειρά IEC 61000. Αυτή η σειρά προτύπων καλύπτει ένα ευρύ φάσμα θεμάτων EMC, όπως τεχνικές δοκιμών και μέτρησης, όρια και οδηγίες για διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές και συστήματα (International Electrotechnical Commission, 2021). Ακόμη, κάποια πρότυπα της IEC είναι τα ευρωπαϊκά πρότυπα (EN) που υιοθετούν τα πρότυπα IEC και τα προσαρμίζουν για χρήση εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η σειρά προτύπων EN 61000 καλύπτει μια σειρά από πτυχές EMC, συμπεριλαμβανομένων τεχνικών δοκιμών και μέτρησης, ορίων και κατευθυντήριων γραμμών. Μερικά από τα πρότυπα αυτά είναι τα εξής:

- EN 61000-2: Αυτή η σειρά προτύπων ορίζει το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον και τα επίπεδα συμβατότητας για διάφορες τοποθεσίες και εγκαταστάσεις, βοηθώντας στον καθορισμό των κατάλληλων απαιτήσεων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας για συγκεκριμένο εξοπλισμό και συστήματα (IEC, 2021a).
- EN 61000-3: Αυτή η σειρά προτύπων καθορίζει όρια για διάφορα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, όπως διακυμάνσεις τάσης, τρεμοσβήσιμο και αρμονικά ρεύματα. Βοηθά τους κατασκευαστές και τους μηχανικούς να σχεδιάσουν εξοπλισμό που πληροί αυτά τα όρια για να διασφαλιστεί η συμβατότητα (IEC, 2021b)
- EN 61000-4: Αυτή η σειρά προτύπων ορίζει τεχνικές δοκιμών και μέτρησης για ΗΜΣ, καλύπτοντας διάφορες πτυχές όπως η ηλεκτροστατική εκφόρτιση (ESD), η ακτινοβολούμενη και αγόμενη ατρωσία και η ποιότητα ισχύος. Αυτές οι δοκιμές βοηθούν στην επαλήθευση ότι ο εξοπλισμός πληροί τα απαιτούμενα κριτήρια απόδοσης EMC (IEC, 2021c).
- EN 61000-5: Αυτή η σειρά προτύπων παρέχει οδηγίες για τη σωστή εγκατάσταση εξοπλισμού και συστημάτων για την ελαχιστοποίηση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) και τη διασφάλιση της EMC. Καλύπτει πτυχές όπως η γείωση, η θωράκιση, το φιλτράρισμα και η διαχείριση καλωδίων (IEC, 2021d).
- EN 61000-6: Αυτή η σειρά προτύπων θεσπίζει γενικές απαιτήσεις EMC για διάφορους τύπους εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένου βιομηχανικού, οικιακού και εμπορικού εξοπλισμού. Καθορίζει απαιτήσεις τόσο εκπομπών όσο και ατρωσίας, διασφαλίζοντας ότι ο εξοπλισμός μπορεί να λειτουργεί χωρίς να προκαλεί ή να αντιμετωπίζει παρεμβολές (IEC, 2021e).

Όπως αναφέρει ο Παλιάτσος (2019), στην εποχή μας έχει υιοθετηθεί η ομάδα προτύπων EN 61000 (European Norms 61000), που βρίσκονται σε πλήρη αντιστοιχία με τα πρότυπα IEC και είναι νομικώς δεσμευτικά για τις χώρες της ΕΕ. Μια σειρά από χώρες έχουν ήδη ολοκληρώσει τη διαδικασία υιοθέτησης προτύπων με νομική ισχύ βασισμένων σε αυτά της IEC.

Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR): Το CISPR είναι ένας διεθνής οργανισμός που αναπτύσσει πρότυπα για τον έλεγχο των

ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε ηλεκτρονικές συσκευές. Ορισμένα ευρέως χρησιμοποιούμενα πρότυπα CISPR EMC περιλαμβάνουν:

- CISPR 11: Βιομηχανικός, επιστημονικός και ιατρικός εξοπλισμός ραδιοσυχνοτήτων (ISM) – Χαρακτηριστικά ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών – Όρια και μέθοδοι μέτρησης.
- CISPR 14: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα – Απαιτήσεις για οικιακές συσκευές, ηλεκτρικά εργαλεία και παρόμοιες συσκευές.
- CISPR 15: Όρια και μέθοδοι μέτρησης των χαρακτηριστικών ραδιοδιαταραχών ηλεκτρικού φωτισμού και παρόμοιου εξοπλισμού.
- CISPR 22: Εξοπλισμός τεχνολογίας πληροφοριών – Χαρακτηριστικά ραδιοδιαταραχών – Όρια και μέθοδοι μέτρησης.
- CISPR 32: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα εξοπλισμού πολυμέσων – Απαιτήσεις εκπομπών (International Special Committee on Radio Interference, 2021).

Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE): Το IEEE είναι μια επαγγελματική ένωση που αναπτύσσει και δημοσιεύει πρότυπα σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένου του EMC. Ορισμένα πρότυπα του IEEE είναι:

- IEEE Std 299: Πρότυπη μέθοδος για τη μέτρηση της αποτελεσματικότητας των περιβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης.
- IEEE Std 1309: Πρότυπο για τη βαθμονόμηση αισθητήρων και ανιχνευτών ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (Εξαιρούνται οι κεραίες) από 9 kHz έως 40 GHz (IEEE, 2021).

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης (CENELEC) είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη και τον καθορισμό προτύπων στον ηλεκτροτεχνικό τομέα εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα βασικά πρότυπα EMC που δημοσιεύονται από τη CENELEC είναι:

- EN 55011: Βιομηχανικός, επιστημονικός και ιατρικός εξοπλισμός ραδιοσυχνοτήτων (ISM) – Χαρακτηριστικά ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών – Όρια και μέθοδοι μέτρησης.
- EN 55022: Εξοπλισμός τεχνολογίας πληροφοριών – Χαρακτηριστικά ραδιοδιαταραχών – Όρια και μέθοδοι μέτρησης (CENELEC, 2021).

2.8 EMC σε κυκλώματα

Η διαδικασία διασφάλισης της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) σε ένα ψηφιακό ή αναλογικό κύκλωμα περιλαμβάνει το σχεδιασμό και τη δοκιμή του κυκλώματος για την ελαχιστοποίηση των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών και τη βελτίωση της ατρωσίας του σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω διαφόρων αρχών σχεδιασμού, θωράκισης, φιλτραρίσματος, γείωσης και τεχνικών διαχείρισης καλωδίων. Ακολουθεί μια περίληψη της διαδικασίας EMC στο ψηφιακό κύκλωμα. Η ακολουθία των βημάτων και των βέλτιστων πρακτικών βελτιώνει την απόδοση ΗΜΣ ενός ψηφιακού κυκλώματος, διασφαλίζοντας αξιόπιστη λειτουργία στο επιδιωκόμενο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον.

Η διαδικασία ξεκινάει με σχεδιαστικά ζητήματα, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις EMC στα αρχικά στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την επιλογή εξαρτημάτων και IC με χαμηλές εκπομπές EMI, κατάλληλες τεχνικές διάταξης πλακέτας κυκλώματος και κατάλληλα σχέδια παροχής ρεύματος για την ελαχιστοποίηση του θορύβου. Επίσης, μια καλά σχεδιασμένη διάταξη πλακέτας κυκλώματος μπορεί να μειώσει σημαντικά το EMI. Μερικές βασικές τεχνικές διάταξης της πλακέτας περιλαμβάνουν την ελαχιστοποίηση περιοχών βρόχου για μείωση των εκπομπών μαγνητικού πεδίου, τη χρήση τεχνικών (ground & power planes) για τη μείωση των εκπομπών ακτινοβολίας και τη βελτίωση της ατρωσίας, διαχωρισμό αναλογικών και ψηφιακών τμημάτων για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ τους, τοποθέτηση ιχνών υψηλής ταχύτητας κοντά στο επίπεδο εδάφους για την ελαχιστοποίηση των εκπομπών, διατήρηση στα κρίσιμα ίχνη όσο το δυνατόν συντομότερα για τη μείωση των εκπομπών ακτινοβολίας και τέλος το σήμα υψηλής ταχύτητας απομακρύνεται από ευαίσθητα εξαρτήματα και συνδέσμους (Paul, 2006).

Στη συνέχεια, η διαδικασία προχωράει με τη γείωση, η οποία είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση των εκπομπών EMI και τη βελτίωση της ατρωσίας. Μερικές τεχνικές γείωσης περιλαμβάνουν τη χρήση γείωσης ενός σημείου για αναλογικά και ψηφιακά τμήματα για την αποφυγή βρόχων γείωσης, την εξασφάλιση σύνδεσης γείωσης χαμηλής σύνθετης αντίστασης για εξαρτήματα υψηλής συχνότητας, τη χρήση μέσων γείωσης για τη σύνδεση διαφορετικών στρωμάτων ενός πολυστρωματικού PCB και την αποφυγή βρόχων γείωσης στα καλώδια θωράκισης. Η θωράκιση περιλαμβάνει τον εγκλεισμό ευαίσθητων εξαρτημάτων ή ολόκληρου του κυκλώματος σε ένα αγωγίμο περίβλημα για την προστασία τους από εξωτερικό EMI. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση μεταλλικών περιβλημάτων ή αγωγίμων επικαλύψεων σε πλαστικά περιβλήματα. Στη συνέχεια το φίλτράρισμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση των εκπομπών και τη βελτίωση της ατρωσίας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση σφαιριδίων φερρίτη, πυκνωτών και επαγωγέων για την καταστολή του θορύβου σε συγκεκριμένες συχνότητες (Ott, 2009).

Αμέσως μετά η διαχείριση καλωδίων, όπου μια σωστή διαχείριση καλωδίων μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών EMI και της ευαισθησίας. Μερικές τεχνικές περιλαμβάνουν τη χρήση θωρακισμένων καλωδίων για ευαίσθητα σήματα και γραμμές δεδομένων υψηλής ταχύτητας, την εξασφάλιση της σωστής απόληξης και γείωσης των θωρακιστηρίων καλωδίων, την αποφυγή δρομολόγησης καλωδίων παράλληλα με ίχνη υψηλής ταχύτητας ή κοντά σε θορυβώδη εξαρτήματα και τη συστροφή σήματος και αγωγών επιστροφής μαζί για μείωση της περιοχής βρόχου και των εκπομπών ακτινοβολίας.

Τέλος, η δοκιμή και επαλήθευση του κυκλώματος όπου πραγματοποιείται δοκιμή και επαλήθευση EMC για να διασφαλιστεί ότι το ψηφιακό κύκλωμα πληροί τα σχετικά πρότυπα και απαιτήσεις EMC. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει δοκιμές εκπομπών ακτινοβολίας και εκπομπών, καθώς και δοκιμές ατρωσίας, όπως δοκιμές ακτινοβολούμενης και διεξαγόμενης ευαισθησίας, ηλεκτροστατικής εκκένωσης (ESD) και παροδικής ατρωσίας.

3. Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα στη Ναυτιλία

3.1 Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον του πλοίου

Ο σχεδιασμός της εσωτερικής δομής ενός πλοίου και η ανάπτυξη ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα λόγω του γεγονότος ότι τα σήματα από αυτές τις συσκευές αλληλοεπηρεάζονται αρνητικά όσον αφορά τις λειτουργίες τους. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη στα πλοία.

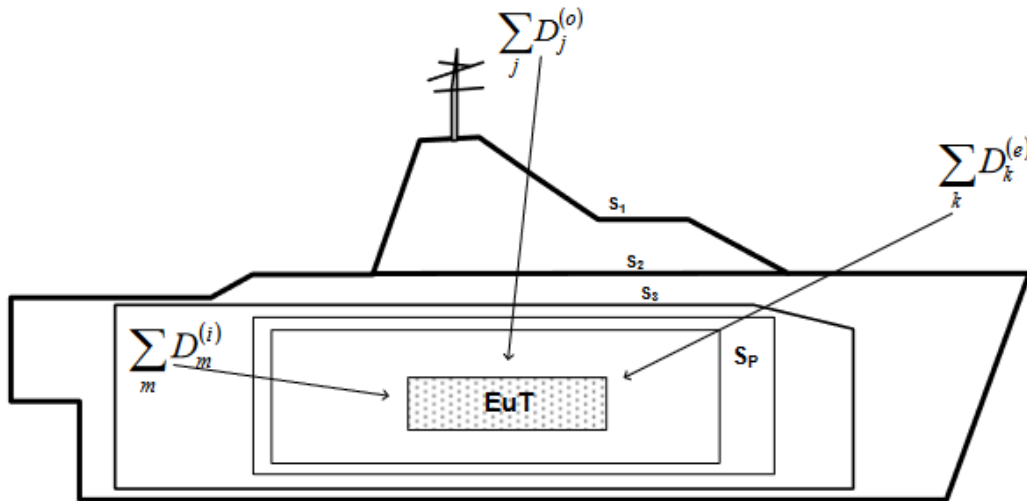
Είναι γνωστό ότι κάθε πλοίο περιέχει διαφορετικές ηλεκτρικές, ηλεκτρονικές συσκευές και ραδιοσυσκευές, συμπεριλαμβανομένου του εξοπλισμού ηλεκτρικής ενέργειας και τις κεραίες εκπομπής, οι οποίες εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία (πιθανές ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές), οι οποίες επηρεάζουν τη λειτουργία και τη λειτουργικότητα του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Επιπλέον, τα πολεμικά πλοία διαθέτουν πολλά συστήματα διοίκησης και διεύθυνσης που αποτελούνται από διάφορα ηλεκτρονικά τμήματα. Λόγω της περίπλοκης μορφής της δομής ενός πλοίου, η οποία αποτελείται από πολλά τοιχώματα ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης, οι έρευνες σχετικά με τις συνθήκες ΗΜΣ του εσωτερικού περιβάλλοντος του πλοίου, δηλαδή κάτω από το κύριο κατάστρωμα, αποτελούν ένα σύνθετο θέμα. (Katulski & Namiotko, 2019).

Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον για τα σκάφη αναψυχής αποτελεί μια ξεχωριστή κατηγορία κυρίως λόγω των μικρών χώρων των σκαφών αυτών. Για παράδειγμα, RF πομποί και δέκτες επικοινωνιών που χρησιμοποιούνται επί του σκάφους είναι σε κοντινή απόσταση από χειριστήρια, καλωδιώσεις και άλλες ασύρματες συσκευές. Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον των εμπορικών πλοίων περιλαμβάνει ασυρμάτους επικοινωνιών υψηλής ισχύος και συσκευές πλοήγησης ραντάρ. Όπως είναι αναμενόμενο, η αξιοπιστία αυτών των συσκευών είναι κρίσιμη για την ασφάλεια του πλοίου και των κοντινών διερχόμενων σκαφών: οι ασύρματοι χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία δυνητικά απειλητικών για τη ζωή συνθηκών και για τη λήψη σημάτων κινδύνου από άλλα σκάφη, οπότε είναι ζωτικής σημασίας ότι οι ραδιοφωνικοί δέκτες επί του σκάφους δεν παρεμποδίζονται από άλλα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα.

Η γνώση της κατάστασης των συνθηκών ΗΜΣ του περιβάλλοντος ενός πλοίου βελτιώνει τις διαδικασίες σχεδιασμού, την αποτελεσματικότητα της εκμετάλλευσης και τις εργασίες εκσυγχρονισμού του πλοίου. (Katulski & Namiotko, 2019).

Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον ενός πλοίου περιλαμβάνει διαφορετικά υποσυστήματα, όπως το σύστημα ραδιοεπικοινωνίας και πλοήγησης, το σύστημα παραγωγής ενέργειας, πρόωσης και μετατροπής, το σύστημα παλμικού ραντάρ με πρόθεση ισχύος, το σύστημα ελέγχου μηχανημάτων και διακοπών, το σύστημα εσωτερικών επικοινωνιών και το ψηφιακό σύστημα, το κύτος, τα μηχανολογικά και ηλεκτρικά συστήματα κ.λπ. Όλα αυτά τα υποσυστήματα διαθέτουν ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό που παράγει σήματα τα οποία μπορούν δυνητικά να επηρεάσουν την κανονική λειτουργία άλλων συστημάτων, να υποβαθμίσουν την απόδοση, να εισάγουν σφάλματα ή λειτουργικές βλάβες, και να προκαλέσουν συνολική αποτυχία. Ως εκ τούτου, η σωστή τοποθέτηση και δοκιμή του εξοπλισμού σε ένα πλοίο είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή καθημερινή λειτουργία του πλοίου και τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων του εξοπλισμού επί του σκάφους. (Omollo, van der Ven, Vogt-Ardatjew & Leferink, 2020).

Μια τυπική δομή πλοίου (Εικόνα 5) αποτελείται από έναν καθορισμένο αριθμό τοιχωμάτων θωράκισης, δηλαδή, επίπεδα θωράκισης, που επηρεάζουν την κατανομή των ΗΜ διαταραχών. Μια αλληλεπίδραση διαταραχής ενός ΗΜ σήματος σχετίζεται με την ηλεκτρική του συνιστώσα E , δηλαδή την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Στην πράξη, η κατανομή των διαταραχών περιγράφεται από τις πραγματικές τιμές της ηλεκτρικής συνιστώσας E του διαδιδόμενου ΗΜ πεδίου, η οποία εξαρτάται κυρίως από τον εντοπισμό και την τιμή της πηγής του και τις ιδιότητες των επιπέδων θωράκισης. Η διάταξη των επιπέδων θωράκισης προκύπτει από την εσωτερική δομή του πλοίου. (Katulski & Namiotko, 2019).



Εικόνα 4. Η τοπολογική μορφή της δομής ενός πλοίου με επίπεδα θωράκισης (τοιχώματα), S , και ηλεκτρομαγνητικές (ΗΜ) πηγές διαταραχών, D , εξοπλισμός υπό δοκιμή (EuT) (Πηγή: Katulski & Namiotko, 2019)

Ο στόχος της αξιολόγησης του περιβάλλοντος ΗΜ ενός συστήματος είναι να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για την τροποποίηση του περιβάλλοντος για την επίτευξη της ΗΜΣ. Γεγονός που αποτρέπεται με τη μείωση ή την εκτροπή των σημάτων που θα μπορούσαν να παρεμβαίνουν στη λειτουργία άλλου ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Αυτό συνεπάγεται τον προσδιορισμό και τη θέσπιση προδιαγραφών για κάθε τύπο ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής ή/και παρεμβολής επί του σκάφους. Αυτές οι παρεμβολές στο σκάφος χαρακτηρίζονται από τάσεις, ρεύματα, μαγνητικά πεδία, ηλεκτρικά πεδία και ΗΜ πεδία, που μεταδίδονται συνεχώς (συμπεριλαμβανομένων των διαμορφωμένων) ή ως μεταβατικά. (Omollo, van der Ven, Vogt-Ardatjew & Leferink, 2020).

Οι ανθρωπογενείς πηγές μπορεί να είναι είτε εκούσιες είτε ακούσιες. Οι σκόπιμες πηγές είναι εκείνες που είναι σχεδιασμένες να εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία ως μέρος της λειτουργικότητάς τους, π.χ. τα ραντάρ, ενώ οι ακούσιες πηγές είναι εκείνες που δεν είναι πρωτίστως σχεδιασμένα να εκπέμπουν αλλά εκπέμπουν λόγω του κυκλώματός τους, π.χ. τροφοδοτικά διακοπτόμενης λειτουργίας. Διαφορετικές ζώνες επί του σκάφους πλοίων χαρακτηρίζονται από διαφορετικά σήματα, ανάλογα με τα υποσυστήματα που είναι εγκατεστημένα στις ζώνες αυτές. Τα όρια μεταξύ αυτών των ζωνών καθορίζουν πόσο διαφορετικά είναι αυτά τα επίπεδα παρεμβολής και, συνεπώς, διαφορετικά είδη μετριασμού. Οι ζώνες αυτές περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, στο εξωτερικό κατάστρωμα περιοχές, για τις οποίες απειλές που προέρχονται από κεραυνούς και ισχυρά ΗΜ πεδία από πομπές μπορεί να παρεμβάλλονται. Άλλες ζώνες περιλαμβάνουν περιοχές πάνω και κάτω από το κατάστρωμα. (Omollo, van der Ven, Vogt-Ardatjew & Leferink, 2020).

Ένα πλοίο, λόγω της δομής του και της εγκατάστασης του εξοπλισμού του, μπορεί να χωριστεί σε διάφορες ζώνες ΗΜ. Οι ζώνες αυτές διαχωρίζονται φυσικά με αγώγιμα υλικά ή απόσταση. Το υλικό που διαχωρίζει δύο διαφορετικές ζώνες μπορεί να καθορίσει τον τρόπο με τον οποίο διαφοροποιείται το ηλεκτρομαγνητικό τους περιβάλλον όσον αφορά τα επίπεδα διαταραχής. Για παράδειγμα, υπάρχει το εξωτερικό κατάστρωμα και το εσωτερικό κατάστρωμα. Η ζώνη του εσωτερικού καταστρώματος χωρίζεται περαιτέρω σε πάνω από το κύριο κατάστρωμα και κάτω από το κύριο κατάστρωμα, τα οποία περιέχει, μεταξύ άλλων συστημάτων, το σύστημα γέφυρας. Όλες αυτές οι ζώνες χαρακτηρίζονται από διαφορετικούς τύπους παρεμβολές που συνδέονται με τα θύματά τους μέσω ενός ακτινοβολούμενου μονοπατιού, αγώγιμου μονοπατιού ή συνδυασμό και των δύο. Χωρίς το μονοπάτι σύζευξης, δεν υφίσταται κατάσταση παρεμβολής. Συνεπώς, η διακοπή αυτής της διαδρομής είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί ότι η ΗΜΣ επιτυγχάνεται. (Omollo, van der Ven, Vogt-Ardatjew & Leferink, 2020).

- Αγόμενες εκπομπές

Οι αγόμενες εκπομπές συνεπάγονται σύζευξη παρεμβολών μέσω καλωδίων και αγωγών. Σε ένα πλοίο, υπάρχουν μετατροπείς συχνότητας που παράγουν ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές στα τμήματα ισχύος τους, ενεργοποιώντας και απενεργοποιώντας υψηλή τάση με αποτέλεσμα απότομες ακμές τάσης και ρεύματος. Αυτό δημιουργεί εκπομπές που μπορούν να μεταφερθούν σε άλλα μέρη του συστήματος, μέσω των συνδεδεμένων καλωδίων ισχύος, άλλων καλωδίων εντός του συστήματος, εάν η συσκευή έχει διαφορετικό δυναμικό στο περιβάλλον. Ο ελεγκτής και άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα των θαλάσσιων μετατροπέων συχνότητας αποτελούνται επίσης από πολύ ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές που πρέπει να προστατεύονται από ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές.

Άλλα παραδείγματα διερχόμενων παρεμβολών επί του σκάφους στα πλοία περιλαμβάνουν τις υπερτάσεις τάσης και ρεύματος ως αποτέλεσμα κεραυνών, ηλεκτρικές γρήγορες μεταβατικές ριπές (EFT-B), που δημιουργούνται από συσκευές μεταγωγής (οι διαδιδόμενες EFT-B μπορούν να αλλοιώσουν τα δεδομένα και να διαταράξουν τις ζεύξεις επικοινωνίας), ηλεκτροστατικές εκκενώσεις (ESD), η οποία είναι η μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου μεταξύ σωμάτων διαφορετικού ηλεκτροστατικού δυναμικού σε γειτνίαση ή μέσω άμεσης επαφής. Είναι βασικό να σημειωθεί ότι η ESD ωστόσο δεν αποτελεί πολύ μεγάλο πρόβλημα στα πλοία. Αυτό οφείλεται στην υψηλή υγρασία που συναντάται στα πλοία, καθιστώντας τα επίπεδα ESD πολύ χαμηλά. (Omollo, van der Ven, Vogt-Ardatjew & Leferink, 2020).

- Ακτινοβολούμενες Εκπομπές

Οι εκπομπές ακτινοβολίας περιλαμβάνουν την εκπομπή και τη λήψη ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μέσω κεραιών και βρόχων ρεύματος που δημιουργούνται από αγόμενες δομές και καλώδια που λειτουργούν ως κεραιές. Λόγω της χρήσης ηλεκτρονικών συστημάτων ταχείας μεταγωγής επί των πλοίων, υπάρχει αύξηση του επιπέδου της ενέργειας RF που προσθέτει θόρυβο στο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, προκαλώντας ενδεχομένως προβλήματα ατρωσίας ή αυξημένο επίπεδο θορύβου σε συστήματα επικοινωνίας, έτσι ώστε αυτά τα ακούσια ακτινοβολούμενες εκπομπές προκαλούν κακή ραδιοφωνική λήψη. Επιπλέον, οι σκόπιμοι πομποί στην επάνω πλευρά ενός πλοίου μπορούν επίσης να αποτελέσουν κύρια αιτία των ραδιοπαρεμβολών, καθώς ένα πλοίο είναι πυκνοκατοικημένο με διαφορετικά σύνολα κεραιών και ηλεκτρομαγνητικών αισθητήρων για επικοινωνία, πλοήγηση, ανίχνευση, εντοπισμό κατεύθυνσης. Τα βασικά

μέτρα ΗΜΣ περιλαμβάνουν την χωρική ποικιλομορφία, τη χρονική ποικιλομορφία και την ποικιλομορφία συχνότητας.

Το περιβάλλον ΗΜΣ ενός θαλάσσιου πλοίου χαρακτηρίζεται από δέκτες σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας πολύ υψηλές συχνότητες (VHF) στα 156-165 MHz, ραντάρ ναυσιπλοΐας υψηλής ισχύος που λειτουργούν στην περιοχή GHz, μεγάλου μήκους πομπούς επικοινωνίας σε υψηλή συχνότητα (HF), και βαριά ηλεκτρομηχανολογικά μηχανήματα. Τα ναυτιλιακά συστήματα επικοινωνίας και τα συστήματα ραντάρ είναι αυτά που ως επί το πλείστον επηρεάζονται κυρίως από προβλήματα ΗΜΙ, λόγω της ευαισθησίας των δεκτών επικοινωνίας. Αυτό έχει μερικές φορές σημαντικές συνέπειες για τον προϋπολογισμό της ζεύξης. (Omollo, van der Ven, Vogt-Ardatjew & Leferink, 2020).

3.2 Προϋποθέσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας για τα πλοία

Στη θαλάσσια εμπορική βιομηχανία, όλα τα πλοία πρέπει να πιστοποιούνται από φορείς πιστοποίησης (νηογνώμονες). Αυτό σημαίνει ότι κάθε μικρό κομμάτι του εξοπλισμού επί του πλοίου πρέπει να πιστοποιείται από τρίτους οργανισμούς, σύμφωνα με τους κανονισμούς που ισχύουν για τον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, και μετά τη σύνταξη ενός πολύπλοκου τεχνικού και διοικητικού φακέλου. Αυτό περιλαμβάνει και τη συμμόρφωση με τους κανόνες για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC).

Ανάλογα με το αν ο εξοπλισμός βρίσκεται στο μηχανοστάσιο ή στο κατάστρωμα, τα επίπεδα ΗΜΣ που πρέπει να τηρούνται δεν θα είναι τα ίδια, καθιστώντας γρήγορα το ζήτημα της ΗΜΣ πολύπλοκο. Πράγματι, δεν χρειάζεται να συμμορφώνονται όλα τα είδη εξοπλισμού με τα ίδια πρότυπα ΗΜΣ. Το επίπεδο των απαιτήσεων θα είναι περισσότερο ή λιγότερο υψηλό ανάλογο με το περιβάλλον χρήσης και το σημείο στο σκάφος όπου πρόκειται να εγκατασταθούν. Για παράδειγμα, ορισμένος ηλεκτρονικός εξοπλισμός μπορεί να είναι πιστοποιημένος από τον νηογνώμονα, αλλά μόνο για εγκατάσταση στα τεχνικά δωμάτια και όχι στην γέφυρα του πλοίου (bridge), όπου βρίσκονται ευαίσθητα ηλεκτρονικά συστήματα πλοήγησης. Στην γέφυρα του πλοίου, οι περιορισμοί ΗΜΣ είναι πράγματι πιο απαιτητικοί: οι συσκευές πρέπει να είναι εξαιρετικά αθόρυβες από άποψη ΗΜΣ, ώστε, για παράδειγμα, να μην ενοχλούν το ραντάρ. (Dolphin charger, 2022)

Θεωρητικά, όλα τα σκάφη πρέπει να διαθέτουν πιστοποίηση Conformité Européenne (CE). Στην πράξη, μπορούν να γίνουν τροποποιήσεις στον αρχικό εξοπλισμό. Η εγκατάσταση μη συμμορφούμενων προϊόντων μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει έλεγχος ΗΜΣ κατά τη διάρκεια της ζωής ενός σκάφους, μπορεί να συμβούν ατυχήματα λόγω ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η εμφάνιση των λαμπτήρων LED. Τα σκάφη εργασίας είδαν τους λαμπτήρες LED ως έναν τρόπο μείωσης του κόστους. Πολλά αλιευτικά σκάφη αντικατέστησαν τους λαμπτήρες πυρακτώσεως με LED για να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, λίγους μήνες αργότερα, συνέβησαν ατυχήματα επειδή αποδείχθηκε ότι αυτοί οι λαμπτήρες LED δεν πληρούσαν τις απαιτήσεις για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και γιαυτό δημιουργούσαν παρεμβολές στον εξοπλισμό πλοήγησης, ιδίως στα κανάλια VHF. Το παράδειγμα αυτό υπενθυμίζει πόσο κρίσιμη είναι η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα για την ασφάλεια των πλοίων.

Η συμμόρφωση με τον ΗΜΣ αυξάνει την τιμή κόστους των προϊόντων. Για να διασφαλιστεί ότι ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός δεν εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (εκτός των ορίων) και δεν είναι πολύ ευαίσθητος σε εξωτερικές διαταραχές, είναι πράγματι απαραίτητο να προστεθούν συστήματα προστασίας, όπως φίλτρα φερρίτη. Από μόνα τους, τα συστήματα αυτά δεν προσθέτουν τίποτα στη λειτουργία του προϊόντος. Από την άλλη πλευρά, εγγυώνται την ορθή λειτουργία του στο περιβάλλον στο οποίο θα λειτουργεί.

Αντιμέτωποι με αυτή την παγίδα και με σκοπό τη μείωση του κόστους, ορισμένοι κατασκευαστές μπορεί να επιλέξουν να κάνουν το ελάχιστο δυνατό από πλευράς ΗΜΣ, κάτι το οποίο μπορεί να είναι επικίνδυνο για την ασφάλεια του πλοίου.

Οι κατασκευαστές μπορούν να λάβουν διάφορα μέτρα για να διασφαλίσουν τη θαλάσσια ΗΜΣ τους όπως:

- Καλός σχεδιασμός και προετοιμασία της δοκιμής

Ένα από τα πρώτα είναι η ανάπτυξη ενός σχεδίου δοκιμών και η επικοινωνία των λεπτομερειών του σχεδίου με τους θαλάσσιους επιθεωρητές, το εργαστήριο δοκιμών και άλλα παρόχους υπηρεσιών αξιολόγησης της συμμόρφωσης. Το σχέδιο δοκιμής πρέπει να παρέχει τις ακόλουθες λεπτομέρειες:

- Λεπτομερή περιγραφή του εξοπλισμού, φωτογραφίες, λογισμικό κ.λπ.
- Καλώδια σήματος, καλώδια εισόδου/εξόδου
- Προσομοιωμένα φορτία εξόδου και ενσύρματες διεπαφές
- Απαιτήσεις ισχύος εισόδου
- Τρόποι λειτουργίας κατά τη δοκιμή
- Επιτρεπόμενα κριτήρια απόδοσης και ανοχές
- Ποσότητες δειγμάτων

Ο κατασκευαστής του εξοπλισμού θα πρέπει να παρέχει κατάλληλες καλωδιώσεις με επαρκή μήκη καλωδίων για να εκτείνονται σε ΗΜΣ θάλαμο. Τα καλώδια επικοινωνίας, όπως το Ethernet ή το CAN πρέπει να διαμορφωθούν με διεπαφή οπτικών ινών. Για τα προϊόντα που περιλαμβάνουν ασύρματη συνδεσιμότητα, η κατασκευαστής θα πρέπει να διαμορφώσει τον πομποδέκτη ώστε να λειτουργεί με τους τρόπους λειτουργίας που καθορίζονται για τη μέτρηση του πομπού και του δέκτη απόδοσης. Απαιτούνται πάντα λεπτομερείς οδηγίες λειτουργίας.

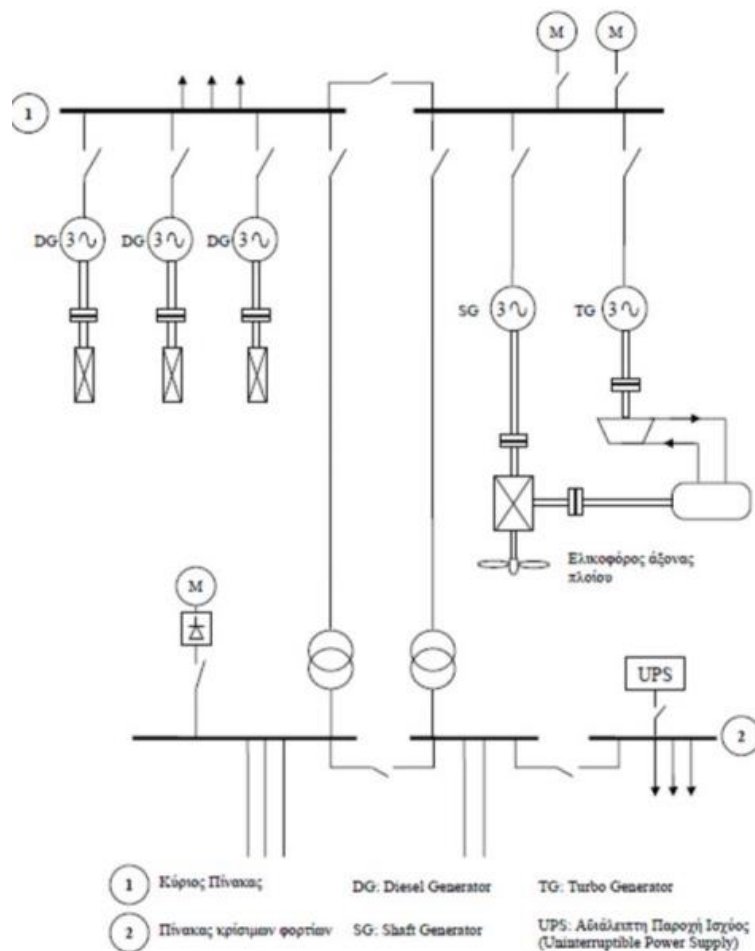
3.3 Τεχνικά θέματα

Η θαλάσσια ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί ζωτικό μέρος της λειτουργίας ενός πλοίου. Χωρίς τη θαλάσσια ηλεκτρική ενέργεια, τα πλοία δεν θα μπορούσαν να λειτουργήσουν κανένα από τα μηχανήματα και δεν θα μπορούσαν να εκτελέσουν τον βασικό τους σκοπό, δηλαδή να ταξιδέψουν από το ένα μέρος στο άλλο. Δεν μπορούμε να ορίσουμε τον όρο «θαλάσσια ηλεκτρική ενέργεια» στο σύνολό του. Για να κατανοήσουμε την έννοιά του, πρέπει πρώτα να τα κατανοήσουμε ξεχωριστά. (marine insight, 2021)

- Θαλάσσια - Εδώ, ο όρος "θαλάσσια" αναφέρεται στα πλοία, τα λιμάνια, τις αποθήκες και άλλες κατασκευές που εξυπηρετούν τη θαλάσσια μεταφορά φορτίων

- Ηλεκτρισμός - Είναι ένα είδος ενέργειας που προκύπτει από την ύπαρξη φορτισμένων σωματιδίων (όπως ηλεκτρόνια ή πρωτόνια), είτε στατικά ως συσσωρευμένο φορτίο είτε ισχυρά ως ρέον ρεύμα

Η κύρια πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας στα συμβατικά εμπορικά πλοία είναι το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z). Όπως φανερώνει και ο ίδιος ο όρος, το H/Z αποτελείται από δύο μέρη. α) Την κινητήρια μηχανή (prime mover) η οποία δίνει μηχανική ισχύ μέσω της περιστροφικής κίνησης του άξονα της και συνήθως είναι μια ντίζελ μεσόστροφη ΜΕΚ. β) Την γεννήτρια η οποία συνήθως είναι τριφασική σύγχρονη γεννήτρια (Σ.Γ.) - ονομάζεται και εναλλακτήρας (alternator)- μέσω του φαινομένου της επαγωγής, μετατρέπει την περιστροφική κίνηση, που λαμβάνει μέσω μηχανικής ζεύξης από την κινητήρια μηχανή, σε εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής τάσης και συχνότητας. Η απαίτηση σταθερής τάσης εξασφαλίζεται από μια συσκευή που ονομάζεται αυτόματος ρυθμιστής τάσης (Automatic Voltage Regulator, AVR) και επενεργεί στην πλευρά του εναλλακτήρα. Η απαίτηση σταθερής συχνότητας εξασφαλίζεται από τον ρυθμιστή στροφών (governor) της κινητήριας μηχανής. Η ηλεκτρική ισχύς και το πλήθος των γεννητριών καθορίζεται από τη μελέτη του ηλεκτρικού ισολογισμού, γενική αρχή αποτελεί το να καλύπτεται σε κάθε περίπτωση η δυσμενέστερη απαίτηση σε ηλεκτρική ισχύ και ταυτόχρονα να υπάρχει τέτοια εφεδρεία ώστε με μία γεννήτρια εκτός λειτουργίας να είναι δυνατή η απρόσκοπτη λειτουργία του πλοίου.



Εικόνα 5. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο πλοίο (Πηγή: <https://www.marineinsight.com/marine-electrical/what-is-marine-electricity/>)

Σε αντίθεση με την ξηρά, η γεννήτρια του πλοίου έχει μονωμένα ουδέτερα σημεία, δηλαδή το ουδέτερο σύστημα δεν είναι γειωμένο ή συνδεδεμένο με το κύτος του πλοίου. Αυτό γίνεται για να διασφαλιστεί ότι όλα τα βασικά μηχανήματα λειτουργούν ακόμη και αν υπάρξει σφάλμα γείωσης.

Τα πλοία που κινούνται στα διεθνή ύδατα έχουν γενικά τριφασική παροχή συνεχούς ρεύματος με μονωμένο ουδέτερο σύστημα 440V. Τα πλοία όπως τα RORO, τα επιβατηγά κ.λπ. που έχουν μεγάλες απαιτήσεις ηλεκτρικού φορτίου εγκαθίστανται με ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη υψηλής τάσης στην περιοχή από 3kV έως 11kV. Στην ξηρά, η συχνότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι 50 ή 60 Hz, ανάλογα με τα διάφορα μέρη του κόσμου. Στα πλοία, η συχνότητα των 60 Hz υιοθετείται ως συνήθης πρακτική, η οποία βοηθά εκατοντάδες κινητήρες σε ένα πλοίο να λειτουργούν με υψηλότερες ταχύτητες, ακόμη και αν είναι μικρότερου μεγέθους. Η παροχή που είναι στα 440V υποβιβάζεται με τη χρήση μετασχηματιστή σε 220V ή 110V για τα φώτα και τον εξοπλισμό σήματος χαμηλής ισχύος. (marine insight, 2021)

Όλος ο ηλεκτρικός εξοπλισμός στα πλοία είναι παρόμοιος με αυτόν της ξηράς, ωστόσο, αναβαθμίζεται για να αντέχει στην σκληρή (λόγω αλμύρας) ατμόσφαιρα της θάλασσας και του κινούμενου πλοίου, ώστε να αντέχει σε υγρό περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, αλμυρή και διαβρωτική ατμόσφαιρα, κραδασμούς κ.λπ.

Τα ηλεκτρικά συστήματα των πλοίων μπορούν να χωριστούν σε πέντε συγκεκριμένα συστήματα:

- Σύστημα γεννήτριας

Το σύστημα γεννήτριας αποτελείται από μια γεννήτρια και έναν οδηγό για την γεννήτρια, ο οποίος μπορεί να είναι πετρελαιοκίνητος ή ατμοκίνητος κινητήρας. Πολλά πλοία είναι εξοπλισμένα με γεννήτρια άξονα όπου η περιστροφή της κύριας μηχανής του πλοίου χρησιμοποιείται για τη λειτουργία της γεννήτριας και την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ισχύς που παράγεται από αυτές τις θαλάσσιες γεννήτριες μεταφέρεται στον κεντρικό πίνακα διανομής με τη χρήση ράβδων μεταφοράς ρεύματος (busbars). Δεν υπάρχουν ηλεκτρικές συνδέσεις καλωδίων στο εσωτερικό των κύριων πινάκων και των πινάκων έκτακτης ανάγκης στα πλοία για τη σύνδεση της παροχής ρεύματος από τις γεννήτριες σε αυτούς τους πίνακες. Όλα τα συστήματα υψηλής τάσης και υψηλού ρεύματος συνδέονται με μπάρες διαύλου.

- Σύστημα κύριου πίνακα διανομής

Ο κύριος πίνακας διανομής θεωρείται ως ο κόμβος διανομής του ηλεκτρικού συστήματος του πλοίου, ο οποίος λαμβάνει ενέργεια από τη γεννήτρια και τη διανέμει στους καταναλωτές ενέργειας που βρίσκονται σε όλο το πλοίο. Παρέχει τροφοδοσία ρεύματος σε όλα τα σημαντικά μηχανήματα του πλοίου με 440V.

Ένα μέρος του κύριου πίνακα διανομής τροφοδοτείται με 220V μέσω ενός μετασχηματιστή υποβιβασμού. Περιλαμβάνει εξοπλισμό γέφυρας, φώτα πλοήγησης, εξοπλισμό ραδιοεπικοινωνίας κ.λπ. Η ισχύς από τον βοηθητικό πίνακα χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της μπαταρίας που χρησιμοποιείται για τα φώτα έκτακτης ανάγκης.

- Σύστημα πίνακα έκτακτης ανάγκης

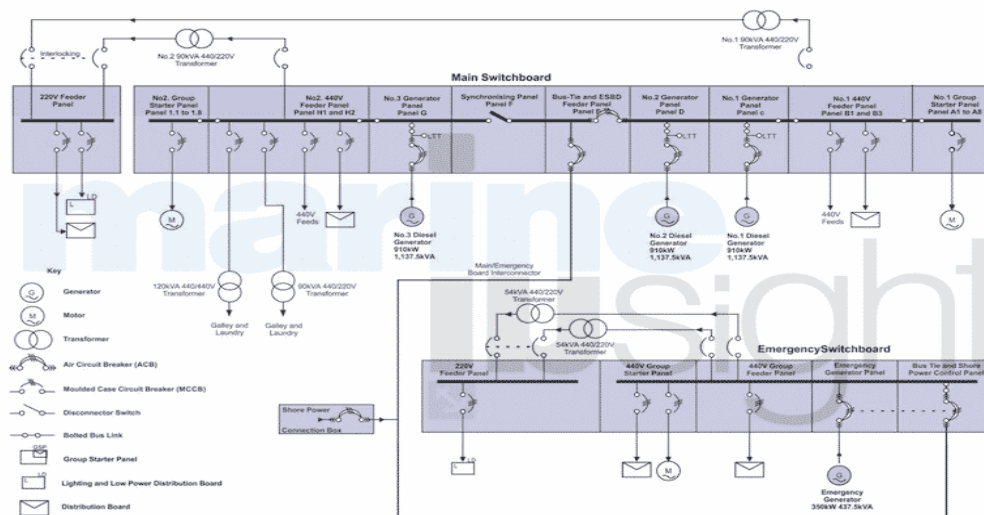
Μια γεννήτρια έκτακτης ανάγκης απαιτείται να είναι λειτουργική ανά πάσα στιγμή όταν η κύρια γεννήτρια αποτύχει. Αυτή η γεννήτρια έκτακτης ανάγκης θα εκκινεί αυτόματα και θα παρέχει ρεύμα στον πίνακα έκτακτης ανάγκης.

Όλος ο εξοπλισμός έκτακτης ανάγκης συνδέεται με τον πίνακα έκτακτης ανάγκης. Ο πίνακας έκτακτης ανάγκης χωρίζεται επίσης σε δύο τμήματα - 440V και 220V, παρέχοντας τροφοδοσία στα κατάλληλα μηχανήματα και εξοπλισμό.

- Σύστημα διανομής

Το σύστημα διανομής ακολουθεί τον πίνακα διανομής και αποτελείται από τα εξής:

- Κουτιά διανομής: Αυτά τα κιβώτια είναι κλειστά και αποτελούνται από μέταλλο για την παροχή ρεύματος σε εντοπιζόμενα μέρη των μηχανημάτων του πλοίου.
- Κουτιά εκκίνησης κινητήρων: Υπάρχουν εκατοντάδες κινητήρες που λειτουργούν διάφορα μηχανικά μηχανήματα στο πλοίο. Κάθε ομάδα κινητήρων είναι εφοδιασμένη με κιβώτια εκκίνησης κινητήρων που περιέχουν το διακόπτη "On & OFF" μαζί με διατάξεις ασφαλείας. Στον πίνακα εκκινήτων τοποθετούνται τοπικά όργανα μέτρησης της έντασης του ρεύματος και της θερμοκρασίας.



www.marineinsight.com

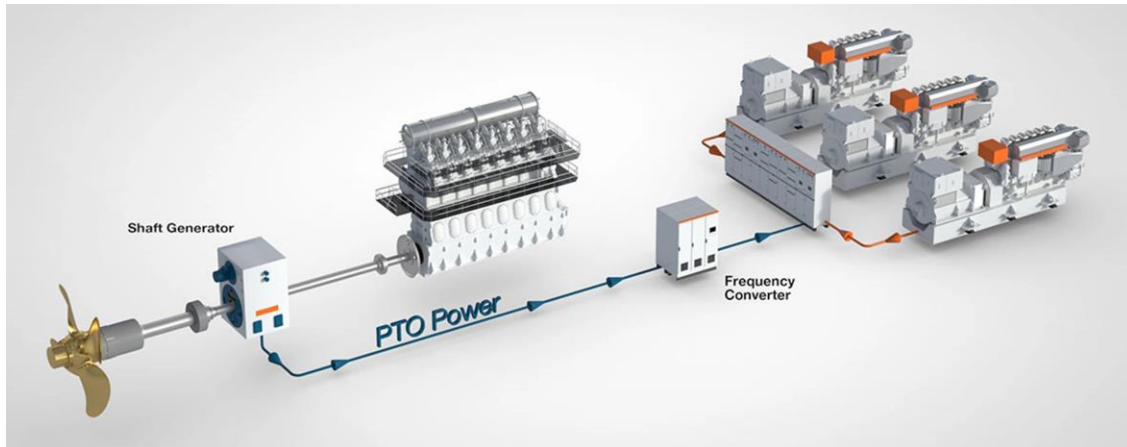
Εικόνα 6. Παράδειγμα κύριου πίνακα διανομής

(Πηγή: <https://www.marineinsight.com/marine-electrical/what-is-marine-electricity/>)

- Πίνακες σύνδεσης ξηράς

Όταν το πλοίο βρίσκεται σε λιμάνι με απαιτήσεις ελέγχου των εκπομπών ή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποξήρανσης, όπου η γεννήτρια του πλοίου δεν μπορεί να λειτουργήσει, λαμβάνεται ρεύμα από την ξηρά για τη λειτουργία των μηχανημάτων του πλοίου. Προβλέπεται πίνακας ξηράς, ο οποίος συνήθως βρίσκεται κοντά στην είσοδο των καταλυμάτων ή κοντά στο σταθμό καυσίμων, ώστε να δέχεται εύκολα καλώδιο τροφοδοσίας ξηράς

- Πίνακας διανομής φωτισμού
Ο πίνακας διανομής φωτισμού τροφοδοτεί με ρεύμα τα συστήματα φωτισμού, τα συστήματα διαμονής, τις μικρές συσκευές θέρμανσης, τα κυκλώματα και τους κινητήρες 1/4 HP ή λιγότερο.
 - Πίνακας απενεργοποίησης έκτακτης ανάγκης
Για τη διασφάλιση των μηχανημάτων του πλοίου και του προσωπικού, παρέχονται διάφοροι πίνακες απενεργοποίησης έκτακτης ανάγκης σε διάφορες θέσεις για τη διακοπή λειτουργίας των μηχανημάτων και του εξοπλισμού σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης.
Ο κύριος στόχος της εγκατάστασης ενός συστήματος διανομής είναι να υπάρχει μια κονσόλα λειτουργίας, συναγερμού και ασφάλειας για μεμονωμένα μηχανήματα ή ομάδες μηχανημάτων. Η παροχή ρεύματος γίνεται μέσω διακοπών σε μεγάλα βοηθητικά μηχανήματα υψηλής τάσης. Για μικρότερες παροχές χρησιμοποιούνται ασφάλειες και μικροδιακόπτες.
 - Αρχή λειτουργίας της θαλάσσιας γεννήτριας
Η γεννήτρια λειτουργεί με βάση την αρχή ότι όταν μεταβάλλεται το μαγνητικό πεδίο γύρω από έναν αγωγό, προκαλείται ρεύμα στον αγωγό. Η γεννήτρια αποτελείται από ένα σταθερό σύνολο αγωγών τυλιγμένων σε πηνία πάνω σε σιδερένιο πυρήνα. Αυτό είναι γνωστό ως στάτης. Ένας περιστρεφόμενος μαγνήτης που ονομάζεται ρότορας περιστρέφεται μέσα σε αυτόν τον στάτη και παράγει ένα μαγνητικό πεδίο. Αυτό το πεδίο τέμνει τον αγωγό, δημιουργώντας μια επαγόμενη ΗΕΔ ή ηλεκτρομαγνητική δύναμη, καθώς η μηχανική εισροή προκαλεί τη στροφή του δρομέα. Το μαγνητικό πεδίο παράγεται με επαγωγή (σε μια γεννήτρια χωρίς ψήκτρες) και από ένα τύλιγμα δρομέα που ενεργοποιείται από συνεχές ρεύμα μέσω δακτυλίων ολίσθησης και ψήκτρων.
- Όλες οι απαιτήσεις του δικτύου του πλοίου ικανοποιούνται απεριόριστα κατά τη λειτουργία της γεννήτριας άξονα:
- Ανεμπόδιστη λειτουργία κατά τη διάρκεια μεταβολών της ταχύτητας του κύριου κινητήρα ως αποτέλεσμα βαριάς θάλασσας και ελιγμών
 - Συνεχής παράλληλη λειτουργία μαζί (εάν προβλέπονται 2 συστήματα γεννητριών άξονα) και με γεννήτριες ντίζελ
 - Παραγωγή της απαιτούμενης ενεργού και άεργου ισχύος
 - Επιλεκτική ενεργοποίηση βραχυκυκλωμάτων χωρίς βλάβη του συνολικού συστήματος
 - Εκκίνηση και απενεργοποίηση μεγάλων καταναλωτών χωρίς ανεπίτρεπτες διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας
 - Λειτουργία, συμπεριλαμβανομένου του συγχρονισμού, με τον ίδιο τρόπο και με τα ίδια χειριστήρια λειτουργίας όπως στα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ντίζελ
 - Απλή ενσωμάτωση σε αυτοματοποιημένα συστήματα παραγωγής ενέργειας (WARTSILA, 2023)



Εικόνα 7. Παράδειγμα γεννήτριας άξονα (Πηγή: <https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions/shaft-generator>)

Η γεννήτρια άξονα εγκαθίσταται στη γραμμή άξονα μεταξύ του κύριου πετρελαιοκινητήρα χαμηλών στροφών και της έλικας. Αυτή η διαμόρφωση έχει ένα μεγάλο διάκενο αέρα μεταξύ του στάτη και του δρομέα και χωρίς πρόσθετα έδρανα έχει αποδειχθεί πολύ επιτυχής ως η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση. Είναι ιδιαίτερα απλή και στιβαρή και απαιτεί ελάχιστη συντήρηση. Σε αντίθεση με άλλες διατάξεις, με αυτή τη διαμόρφωση δεν αναμένονται προβλήματα στρεπτικών δονήσεων που σχετίζονται με το σχεδιασμό και τη λειτουργία. (WARTSILA, 2023)

3.4 Παραδείγματα στη σχετική βιβλιογραφία

Οι Bakkali & Mascarenas-Perez-Inigo (2015) δημιούργησαν ένα σύστημα για τη μέτρηση και επαλήθευση της Ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας βασισμένο στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος σε πραγματικό χρόνο σε συνδυασμό με έναν δέκτη VLF-UHF με προγραμματισμό όλων των αλγορίθμων για τα συστήματα προκειμένου να δημιουργηθεί ένα γνωστό, επεκτάσιμο και διαισθητικό λογισμικό. Προτείνουν λύσεις για τη μείωση του θορύβου με μέτρηση σε στενή ζώνη ώστε να μειωθεί η ποσότητα του περιβαλλοντικού θορύβου που είναι αναμειγμένος με το σήμα. (Bakkali & Mascarenas-Perez-Inigo (2015)

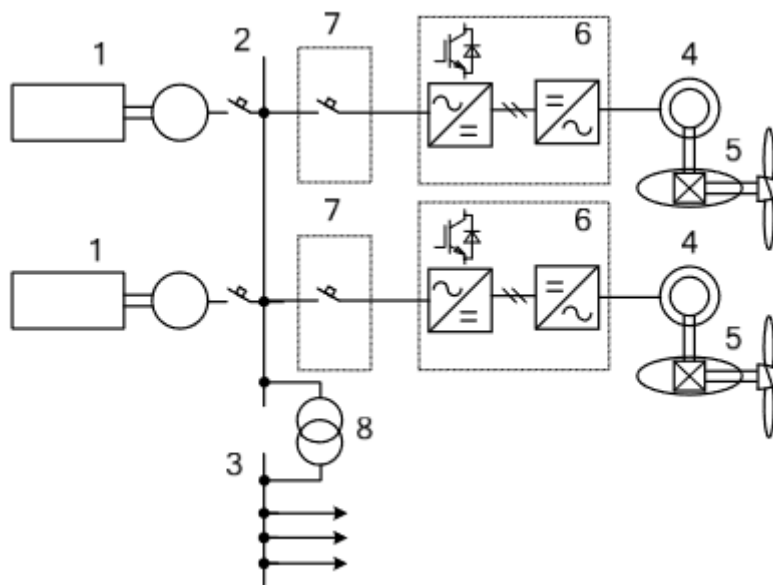
Η έρευνα των Dmitriev, Vorshevskii & Reznichenko (2017) είναι και αυτή προσανατολισμένη στη μείωση του θορύβου και υιοθετεί μια μέθοδο για την καταστολή του θορύβου μέσω της μετατόπισης της συχνότητας μεταγωγής ενός μετατροπέα. Μια αλλαγή στη συχνότητα του μετατροπέα κατά 30% μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του θορύβου κατά περισσότερο από 20 dB. Τα πειράματα έδειξαν ότι ένα επίπεδο θορύβου μειώνεται κατά 10 dB για 20% μετατόπιση της συχνότητας.

Τα πειράματα επιβεβαίωσαν ότι η μέθοδος που εξετάζεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του επιπέδου των των ραδιοπαραεμβολών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν με τη μέθοδο της τυχαίας αλλαγής των συχνότητας, η οποία δίνει καλύτερα αποτελέσματα από ό,τι οι απλές ταλαντώσεις συχνότητας. (Dmitriev, Vorshevskii & Reznichenko, 2017)

Οι Marques Cardoso, Popkov & Korotjaev (2020) πρότειναν μια σειρά τεχνικών λύσεων για τη βελτίωση των συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης πλοίων. Ένα από τα αποτελέσματα της λύσης είναι η απλούστευση του λειτουργικού κυκλώματος του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης, η οποία αντιστοιχεί στη γενική τάση ανάπτυξης -

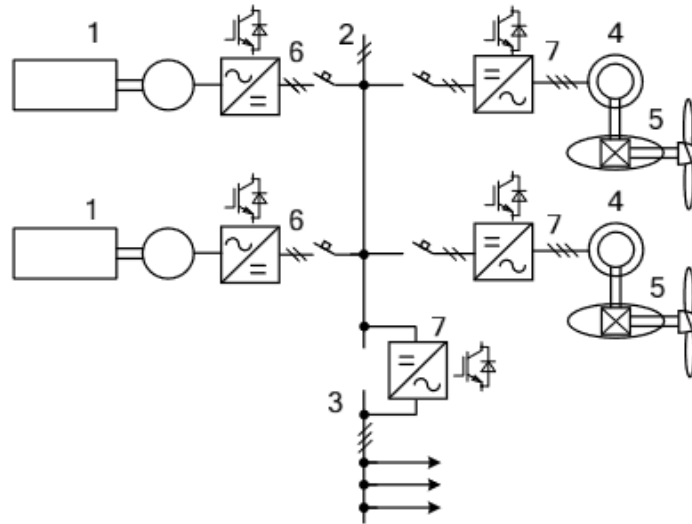
μείωση του αριθμού των λειτουργικών μονάδων και στοιχείων στο δρόμο από την πηγή ενέργειας του πλοίου προς την ηλεκτρική μηχανή. Από τους συγγραφείς αναπτύχθηκε ένα ενοποιημένο θαλάσσιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το σύστημα διαθέτει μια σειρά από θεμελιώδεις διαφορές από τα προηγούμενα γνωστά. Για παροχή ισχύος στα κανάλια του κυκλικού μετατροπέα, ο οποίος περιλαμβάνει τριφασικούς διακόπτες, η ισχύς για τριφασικούς διακόπτες τροφοδοτείται από τους διαύλους του κύριου δικτύου υψηλής τάσης πίνακες. Η καινοτομία που εισήγαγαν είναι η παρουσία διακόπτη στα κυκλώματα τροφοδοσίας των τριφασικών διακοπών, ο οποίος διασφαλίζει την απενεργοποίησή τους σε περίπτωση βλάβης των τρανζίστορ ή πτώσης της μόνωσης της θερμότητας ή σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση. Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι από τη στιγμή που ο βαθμός απόδοσης των μεγάλων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος κυμαίνεται μεταξύ 90- 96%, η βελτίωση του βαθμού απόδοσης κατά τη λειτουργία των ηλεκτρικών των συστημάτων πρόωσης είναι δυνατή μόνο με την εξάλειψη των της ενδιάμεσης μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας. (Marques Cardoso, Popkov & Kortjaev, 2020)

Η εργασία των Sheludko, Belski & Grigoryev (2017) αναλύει ένα ενιαίο θαλάσσιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και λύσεις κυκλωμάτων για τη μείωση του λόγου των αρμονικών στα δίκτυα πλοίων.



Εικόνα 8. Ενιαίο θαλάσσιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. (Πηγή Sheludko, Belski & Grigoryev (2017))

1. κύρια γεννήτρια ντίζελ, κύριος
2. πίνακας διανομής, 3. πίνακας διανομής χαμηλής τάσης,
4. κινητήρας πρόωσης, 5. κίνηση αζιμούθιου, 6. μετατροπέας συχνότητας DC-σύνδεσης,
7. πίνακας πρόωσης, 8. μειωτικός μετασχηματιστής



Εικόνα 9. Ενιαίο θαλάσσιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. (Πηγή Sheludko, Belski & Grigoryev (2017))

1. κύρια γεννήτρια ντίζελ, 2. πρόωση, 3. κύριος πίνακας διανομής, 4. κινητήρας πρόωσης, 5. κίνηση αξιμούθιου, 6. ενεργός ανορθωτής, 7. αντιστροφείας

Υποσχόμενη απόφαση του κυκλώματος στην UEPS (United Electric Propulsion System) είναι η χρήση του τύπου βαλβίδας GS (General Service) και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε απευθείας ρεύματος. Το UEPS αυτού του τύπου έχει ορισμένα πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων η αύξηση της ποιότητας της ισχύος στο πλοίο δικτύων, η βελτίωση των δεικτών μάζας-διάστασης λόγω αποκλεισμού από το σύστημα των μετασχηματιστών πρόωσης και η μείωση της ποσότητας του FC, μια σημαντική αύξηση της απόδοσης. (Sheludko, Belski & Grigoryev, 2017)

Οι Tait & Slocum (2008) αξιολογούν το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον του πλοίου, ως ενός περιορισμένου ανακλαστικού χώρου, του οποίου τα ασύρματα συστήματα δεν προορίζονταν για εκπομπές ραδιοσυχνότητας, και άρα κυοφορεί πιθανούς κινδύνους. Παρουσιάζουν πειραματικά δεδομένα για να καταδείξουν ότι οι χώροι κάτω από το κατάστρωμα σε πλοία του Πολεμικού Ναυτικού μπορούν να χαρακτηριστούν ως σύνθετες αντηχητικές κοιλότητες. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόζουν τεχνικές στατιστικής ηλεκτρομαγνητικής που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των θαλάμων αντήχησης στις μετρούμενες απώλειες παρεμβολής που συναντώνται σε κοιλότητες πλοίων. (Tait & Slocum, 2008).

4. Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16

4.1 Σκοπός

Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 6100-4-16 το οποίο παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό, αποτελεί το θεμέλιο λίθο για τον σχεδιασμό και την διεξαγωγή του πειράματος που περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο, καθώς και την ανάγνωση και μετάφραση των αποτελεσμάτων του πειράματος αυτού.

Το πρότυπο αυτό, περιγράφει απαιτήσεις ατρωσίας και μεθόδους δοκιμής για ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε εύρος από συνεχές ρεύμα έως 150 kHz. Κατά το πρότυπο, η αποτελεσματικότητα του πειράματος κρίνεται με την θέσπιση μια κοινής επαναληπτικής βάσης για τη δοκιμή ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού με την εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών κοινής λειτουργίας σε πηγές τροφοδοσίας, έλεγχο, σήμα και θύρες επικοινωνίας.

Το πρότυπο καθορίζει:

- το είδος της τάσης και του ρεύματος της δοκιμής
- το εύρος των επιπέδων δοκιμής
- τον εξοπλισμό δοκιμής
- την εγκατάσταση (setup) της δοκιμής
- τις διαδικασίες δοκιμής

Για ορισμένους τύπους θυρών, όπως οι θύρες για τις οποίες απαιτείται υψηλό επίπεδο θωράκισης από παρεμβολές, μπορούν να καθοριστούν επιπλέον διατάξεις δοκιμής από τις προδιαγραφές της επιτροπής προϊόντων. Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16 ασχολείται κυρίως με την δοκιμή ατρωσίας ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που προέρχονται από ρεύματα της γραμμής ισχύος και από ρεύματα διαρροής όπως επιστρέφουν στο σύστημα γείωσης. Τέτοιες παρεμβολές είναι σπάνιες, με εξαίρεση τους βιομηχανικούς εξοπλισμούς.

Σημειώνεται πως:

- Παρεμβολές που προκαλούνται από συστήματα δικτύου με συχνότητα 400 Hz δεν αποτελούν αντικείμενο μελέτης του προτύπου,
- Η δοκιμή που περιγράφεται δεν έχει εφαρμογή σε θύρες εξοπλισμού που συνδέονται μέσω καλωδίων μήκους μικρότερο των 20 μέτρων.
- Η ατρωσία σε αρμονικές, όπως των σημάτων δικτύου σε αισθητήρες ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος καλύπτεται από τα πρότυπα IEC 61000-4-13 και IEC 61000-4-19, και όχι το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 6100-4-16 που μελετάται στην παρούσα εργασία. Η ατρωσία σε αγόμενες παρεμβολές που προκαλούνται από πομπούς ραδιοσυχνοτήτων δεν εξετάζεται από το παρόν πρότυπο και καλύπτεται από το IEC 61000-4-6.

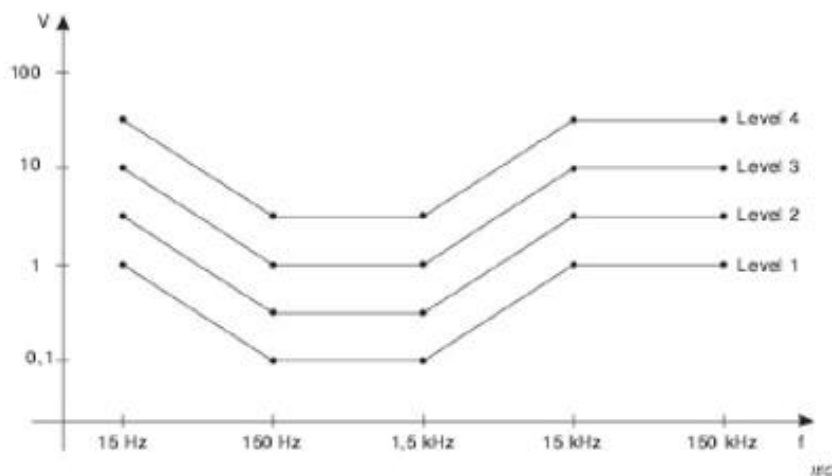
4.2 Γενικά

Οι παρεμβολές κοινής λειτουργίας στη συχνοτική περιοχή από συνεχές ρεύματος έως 150 kHz μπορεί να επηρεάζουν την αξιόπιστη λειτουργία του εξοπλισμού και των συστημάτων που είναι εγκατεστημένα σε κατοικημένες περιοχές, βιομηχανικές περιοχές και ηλεκτρικούς σταθμούς.

Οι παρεμβολές συνήθως προκαλούνται από:

- το σύστημα διανομής ισχύος, με την θεμελιώδη συχνότητά του, σημαντικές αρμονικές και διαρμονικές,
- εξοπλισμό ηλεκτρονικών ισχύος (π.χ. μετατροπείς ισχύος), ο οποίος μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές στους αγωγούς γείωσης και συστήματος γείωσης (μέσω ανεπιθύμητης χωρητικότητας ή φίλτρων) ή να δημιουργήσει παρεμβολές σε γραμμές σήματος και ελέγχου λόγω επαγωγής.

Στη συχνότητα του δικτύου και στις αρμονικές της συχνότητας του δικτύου, οι παρεμβολές συνήθως προκαλούνται από το σύστημα διανομής ισχύος (από σφάλματα και διαρροές ρευμάτων στα συστήματα γείωσης). Σε συχνότητες πάνω από το εύρος των αρμονικών της συχνότητας του δικτύου (έως 150 kHz), οι παρεμβολές συνήθως προκαλούνται από εξοπλισμό ηλεκτρονικών ισχύος, ο οποίος συναντάται συχνά σε βιομηχανικές και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Ο συνδυασμός της πηγής των παρεμβολών με τα καλώδια τροφοδοσίας, σήματος, ελέγχου και επικοινωνίας μεταφέρει αυτές τις παρεμβολές στις θύρες του εξοπλισμού που δοκιμάζεται.



Εικόνα 10. Προφίλ της τάσης δοκιμής(Πρότυπο IEC 61000-4-16)

Καθώς οι παραπάνω καθορισμένοι μηχανισμοί σύζευξης δεν μπορούν να εξαλειφθούν πλήρως, είναι απαραίτητο ο εξοπλισμός να έχει επαρκή ατρωσία στις παρεμβολές.

Ανάλογα με τον τύπο της εγκατάστασης, οι παρεμβολές μπορεί να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- τάση/ρεύμα στην συχνότητα ισχύος: συνεχές ρεύμα, 16 2/3 Hz, 50 Hz και 60 Hz,
- τάση/ρεύμα στην περιοχή των συχνοτήτων 15 Hz έως 150 kHz (συμπεριλαμβανομένων των αρμονικών της συχνότητας του δικτύου)

4.3 Επίπεδα δοκιμής

4.3.1 Γενικά

Για το εύρος επιπέδων δοκιμής που συνίσταται για εφαρμογή σε θύρες του εξοπλισμού για την δοκιμή των διάφορων τύπων και πηγών παρεμβολών, παρουσιάζεται στις ενότητες 4.3.2 και 4.3.3.

Τα επίπεδα για τις δοκιμές δίνονται:

- στη συχνότητα του δικτύου (συνεχές ρεύμα, 16 2/3 Hz, 50 Hz και 60 Hz)
- και στο εύρος συχνοτήτων 15 Hz έως 150 kHz.

Η εφαρμοσιμότητα κάθε δοκιμής πρέπει να καθορίζεται στο πρότυπο προϊόντος.

Η τάση δοκιμής πρέπει να εφαρμόζεται σε κοινή λειτουργία στις θύρες τροφοδοσίας, ελέγχου, σήματος και επικοινωνίας. Η διαφορική τάση λειτουργίας εθα εξαρτηθεί από την ανισορροπία του κυκλώματος.

4.3.2 Επίπεδα δοκιμής στη συχνότητα του δικτύου

Οι πίνακες 1 και 2 καθορίζουν τα προτιμώμενα επίπεδα δοκιμής.

Τα επίπεδα ισχύουν για τη τάση δοκιμής στην συνεχή κατάσταση και στις συχνότητες του δικτύου 16 2/3 Hz, 50 Hz και 60 Hz.

Πίνακας 1: Επίπεδα Συνεχούς Διαταραχής
Πρότυπο IEC 61000-4-16

Επίπεδο	Δοκιμή Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος V r.m.s
1	1
2	3
3	10
4	30
x	Ειδική Τιμή
Σημείωση: Το x αποτελεί ένα επίπεδο που παραμένει ανοικτό. Αυτό το επίπεδο μπορεί να καθοριστεί στην προδιαγραφή του προϊόντος.	

Πίνακας 2: Επίπεδα Σύντομης Διαταραχής
Πρότυπο IEC 61000-4-16

Επίπεδο	Δοκιμή Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος V r.m.s
1	10
2	30
3	100
4	300
x	Ειδική Τιμή
Σημείωση: Το x αποτελεί ένα επίπεδο που παραμένει ανοικτό. Αυτό το επίπεδο μπορεί να καθοριστεί στην προδιαγραφή του προϊόντος.	

Για παρεμβολές με σύντομη διάρκεια, η φυσιολογική διάρκεια για κάθε εφαρμοζόμενη παρεμβολή είναι 1 δευτερόλεπτο. Ωστόσο, τα πρότυπα προϊόντος μπορεί να καθορίζουν διαφορετικές διάρκειες για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Η δοκιμή πρέπει να πραγματοποιηθεί σε μία ή περισσότερες από τις εξής συχνότητες: συνεχές ρεύμα, 16 2/3 Hz, 50 Hz ή 60 Hz, ανάλογα με τη σχετική συχνότητα του δικτύου στη θέση εγκατάστασης του εξοπλισμού. Η δοκιμή στα 16 2/3 Hz εφαρμόζεται, συνεπώς, μόνο όταν ο εξοπλισμός προορίζεται για χρήση κοντά σε συστήματα σιδηροδρόμων σε αυτήν τη συχνότητα.

Το επίπεδο δοκιμής δεν πρέπει να υπερβαίνει την τάση δοκιμής που καθορίζεται στο πρότυπο προϊόντος.

4.3.3 Επίπεδα δοκιμής στο εύρος συχνοτήτων 15 Hz-150 kHz

Ο πίνακας 3 καθορίζει τα προτιμώμενα επίπεδα δοκιμής.

Πίνακας 3: Επίπεδα Δοκιμής στο εύρος συχνότητας 15 Hz έως και 150 kHz. (Πρότυπο IEC 61000-4-16)

Επίπεδο	Προφίλ της Δοκιμής Τάσης (ανοιχτοκύκλωμα) V _{r.m.s.}			
	15 Hz – 150 Hz	150 Hz – 1,5 kHz	1,5 kHz – 15 kHz	1,5 kHz – 15 kHz
1	1 – 0,1	0,1	0,1 – 1	1
2	3 – 0,3	0,3	0,3 – 3	3
3	10 - 1	1	1 – 10	10
4	30 - 3	3	3 - 30	30
x	X	x	x	X

Σημείωση 1: Το x αποτελεί ένα επίπεδο που παραμένει ανοικτό. Αυτό το επίπεδο μπορεί να καθοριστεί στην προδιαγραφή του προϊόντος.

Σημείωση 2: Το προφίλ της δοκιμαστικής τάσης σε σχέση με τη συχνότητα περιγράφεται ως εξής:

- ξεκινώντας από τη συχνότητα των 15 Hz, το επίπεδο μειώνεται έως τα 150 Hz στα 20 dB/δεκαετία
- το επίπεδο παραμένει σταθερό από τα 150 Hz έως τα 1,5 kHz
- το επίπεδο αυξάνεται από τα 1,5 kHz έως τα 15 kHz στα 20 dB/δεκαετία
- το επίπεδο παραμένει σταθερό από τα 15 kHz έως τα 150 kHz

4.4 Εξοπλισμός δοκιμής

4.4.1 Γενικά

Τα χαρακτηριστικά των γεννητριών για κάθε συγκεκριμένη δοκιμή παρουσιάζονται στις παραγράφους 4.4.1.2, 4.4.1.3 και 4.4.1.4.

Οι γεννήτριες πρέπει να παρέχουν μέτρα για την αποτροπή της εκπομπής παρεμβολών που, εάν εισαχθούν στο δίκτυο τροφοδοσίας, μπορεί να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της δοκιμής.

4.4.2 Χαρακτηριστικά και απόδοση της γεννήτριας για δοκιμές συνεχούς παρεμβολής

Η γεννήτρια αποτελείται συνήθως από μια μονάδα παροχής εναλλασσόμενου ρεύματος με μεταβλητή τάση εξόδου και ένα χρονορυθμισμένο διακόπτη για τη δοκιμή σύντομης διάρκειας.

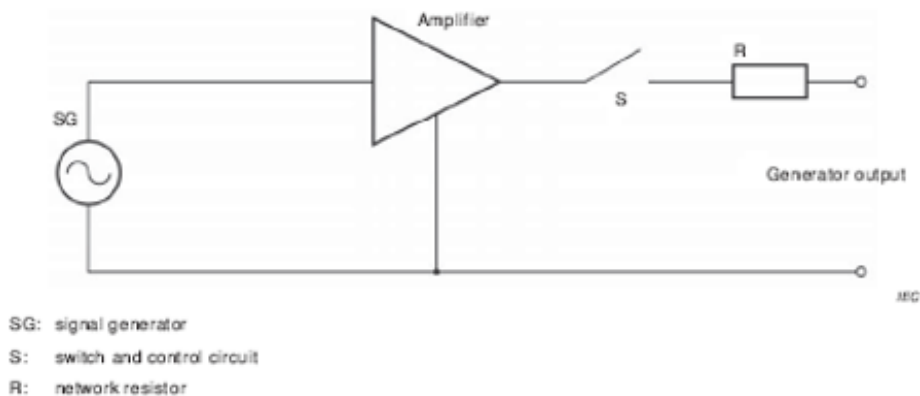
Για δοκιμές συνεχούς παρεμβολής, η γεννήτρια πρέπει να έχει τις ακόλουθες ρυθμίσεις:

- μορφή κύματος: συνεχές ρεύμα, με ανοχή αρπαγής μικρότερη του 5%;
- εύρος τάσης εξόδου σε ανοιχτό κύκλωμα (r.m.s.): από 1 V, με σχετική ανοχή - 10% έως 30 V, με σχετική ανοχή +10%;
- αντίσταση πηγής: $V_{oc}/I_{sc} = 50 \Omega$, με σχετική ανοχή $\pm 10\%$.

Ενώ για διακυμάνσεις σύντομης διάρκειας η γεννήτρια ρυθμίζεται με:

- μορφή κύματος: συνεχές ρεύμα, με ανοχή αρπαγής μικρότερη του 5%
- εύρος τάσης εξόδου σε ανοιχτό κύκλωμα: από 10 V, με σχετική ανοχή -10% έως 300 V, με σχετική ανοχή +10%
- αντίσταση πηγής: $V_{oc}/I_{sc} = 50 \Omega$, με σχετική ανοχή $\pm 10\%$
- χρόνος ανόδου και πτώσης της τάσης εξόδου κατά την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση: μεταξύ 1 μs και 5 μs .

Η σχηματική αναπαράσταση του δοκιμαστή στην αρχή δίνεται στην εικόνα No. 15.



Εικόνα 11. παράδειγμα της γεννήτριας για δοκιμή τάσης συνεχούς ρεύματος και συχνότητας 15Hz μέχρι και 150kHz (Πρότυπο IEC 61000-4-16)

4.4.3 Χαρακτηριστικά και απόδοση της γεννήτριας για δοκιμές στη συχνότητα της τροφοδοσίας: 16 2/3 Hz, 50 Hz και 60 Hz.

Εδώ η γεννήτρια αποτελείται συνήθως από:

- ένα μεταβλητό μετασχηματιστή (συνδεδεμένο στο κύριο δίκτυο διανομής),
- ένα μετασχηματιστή απομόνωσης
- ένα χρονορυθμισμένο διακόπτη για τη δοκιμή σύντομης διάρκειας ο διακόπτης πρέπει να είναι συγχρονισμένος στο 0° της κυματομορφής της τάσης της τροφοδοσίας.

Για δοκιμή συνεχούς παρεμβολής:

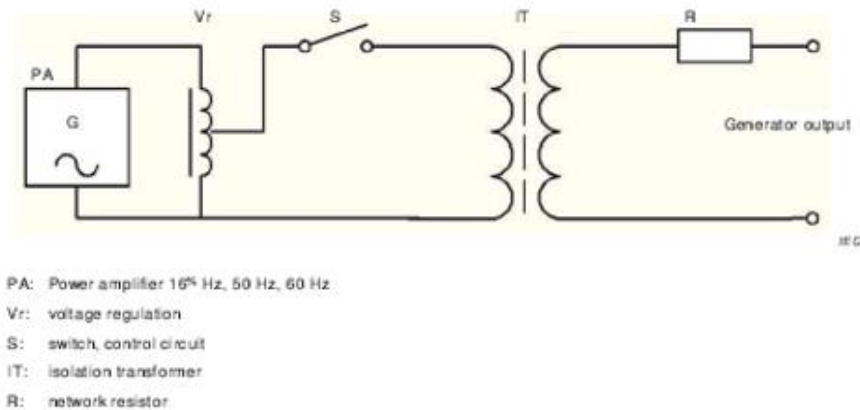
- μορφή κύματος: ημιτονοειδές, συνολική αρμονική παραμόρφωση μικρότερη του 10%
- εύρος τάσης εξόδου σε ανοιχτό κύκλωμα (R.M.S.): από 1 V, με σχετική ανοχή -10% έως 30 V, με σχετική ανοχή +10%
- αντίσταση πηγής: $V_{oc}/I_{sc} = 50 \Omega$, με σχετική ανοχή $\pm 10\%$
- συχνότητα: επιλεγμένη συχνότητα τροφοδοσίας

Ρυθμίσεις γεννήτριας για διακύμανση σύντομης διάρκειας:

- μορφή κύματος: ημιτονοειδές, συνολική αρμονική παραμόρφωση μικρότερη του 10%
- εύρος τάσης εξόδου σε ανοιχτό κύκλωμα: από 10 V, με σχετική ανοχή -10% έως 300 V, με σχετική ανοχή +10%

- αντίσταση πηγής: $V_{oc}/I_{sc} = 50 \Omega$, με σχετική ανοχή $\pm 10\%$
- συχνότητα: επιλεγμένη συχνότητα τροφοδοσίας
- ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της τάσης εξόδου: συγχρονισμένη με την παράληψη της τάσης ($0^\circ \pm 5\%$).

Η σχηματική αναπαράσταση του δοκιμαστή στην αρχή δίνεται στην εικόνα Νο. 16.



Εικόνα 12. Παράδειγμα γεννήτριας για δοκιμές στη συχνότητα δικτύου (Πρότυπο IEC 61000-4-16)

4.4.4 Χαρακτηριστικά και απόδοση της γεννήτριας για δοκιμές στο εύρος συχνοτήτων 15 Hz έως 150 kHz

Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται σε δοκιμές αυτού του εύρους αποτελείται συνήθως γεννήτρια κυματομορφών στη ζώνη συχνοτήτων που ενδιαφέρει. Πρέπει να έχει τη δυνατότητα αυτόματης μεταγωγής με βήματα 1×10^{-2} ανά δευτερόλεπτο ή πιο αργά, ή, στην περίπτωση ενός synthesizer, να μπορεί να προγραμματιστεί με συχνοτικά εξαρτώμενα βήματα της τάξης του 10% της προηγούμενης συχνότητας. Πρέπει επίσης να μπορεί να ρυθμιστεί χειροκίνητα με

- μορφή κύματος: ημιτονοειδές, συνολική αρμονική παραμόρφωση μικρότερη του 1%
- εύρος τάσης εξόδου σε ανοιχτό κύκλωμα (R.M.S.): από 0,1 V, με σχετική ανοχή -10% έως 30 V, με σχετική ανοχή +10%
- αντίσταση πηγής: $V_{oc}/I_{sc} = 50 \Omega$, με σχετική ανοχή $\pm 10\%$
- εύρος συχνοτήτων: 15 Hz, με σχετική ανοχή -10% έως 150 kHz, με σχετική ανοχή +10%

4.5 Επαλήθευση των χαρακτηριστικών των γεννητριών δοκιμής

Για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν διάφορες γεννήτριες δοκιμών, αυτές πρέπει να βαθμονομηθούν ή να επαληθευθούν για τα πιο ουσιώδη χαρακτηριστικά.

Τα ακόλουθα χαρακτηριστικά των γεννητριών πρέπει να επαληθευθούν:

- Μορφή κύματος τάσης εξόδου
- Αντίσταση πηγής (V_{oc} τάση εξόδου ανοιχτού κυκλώματος / I_{sc} ρεύμα σύντομου κυκλώματος). Η αντίσταση πηγής πρέπει να επαληθευθεί τόσο στο υψηλότερο όσο

και χαμηλότερο επίπεδο δοκιμής για όλες τις κυματομορφές (συνεχές ρεύμα, εναλλασσόμενο ρεύμα, σάρωση)

- Για τη γεννήτρια σάρωσης σε συχνότητες: 15 Hz, 1,5 kHz, 15 kHz, 150 kHz.

Για την επαλήθευση της αντίστασης πηγής της γεννήτριας διακύμανσης σύντομης διάρκειας, τα πρώτα 50 ms μπορούν να αγνοηθούν:

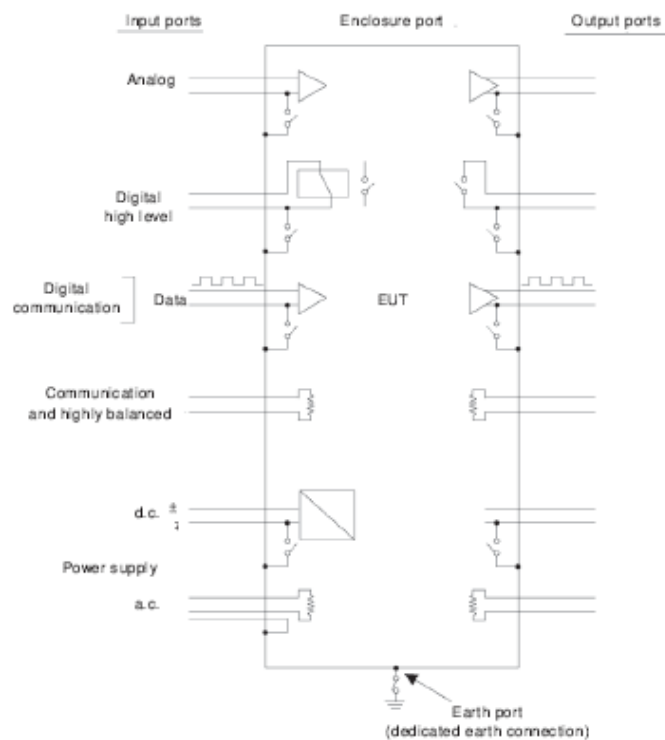
- Ακρίβεια συχνότητας;
- Ακρίβεια τάσης εξόδου ανοιχτού κυκλώματος
- Χρόνος ανόδου και πτώσης της τάσης εξόδου κατά την εναλλαγή on/off (όπου είναι εφαρμοστέο).

Οι επαληθεύσεις πρέπει να πραγματοποιηθούν με αισθητήρες τάσης και ρεύματος μαζί με έναν αντίστοιχο εξοπλισμό μέτρησης με ελάχιστη ζώνη ζώνης 1 MHz. Η ακρίβεια του εξοπλισμού μέτρησης πρέπει να είναι καλύτερη από $\pm 5\%$.

4.6 Δίκτυα σύζευξης/αποσύζευξης

4.6.1 Γενικά

Τα δίκτυα σύζευξης επιτρέπουν την εφαρμογή της τάσης δοκιμής, σε κοινή λειτουργία, στην τροφοδοσία ενέργειας, τις θύρες εισόδου/εξόδου (σήμα και έλεγχο) και τις θύρες επικοινωνίας του EUT (εξοπλισμού υπό δοκιμή). Τα δίκτυα αποσύζευξης αποτρέπουν την εφαρμογή της τάσης δοκιμής στον παρεχόμενο εξοπλισμό που χρειάζεται για τη διεξαγωγή της δοκιμής.



NOTE The switch position is related to the possible configuration of the ports: single-ended, isolated, etc.

Εικόνα 13. Παράδειγμα διαμόρφωσης θυρών εξοπλισμού (Πρότυπο IEC 61000-4-16)

4.6.2 Δίκτυα σύζευξης

4.6.2.1 Δίκτυο σύζευξης για τροφοδοσία ενέργειας και θύρες εισόδου/εξόδου

Για την τροφοδοσία ενέργειας και τις θύρες εισόδου/εξόδου, το δίκτυο σύζευξης για κάθε αγωγό αποτελείται από έναν αντιστάτη και έναν πυκνωτή σε σειρά. Τα δίκτυα σύζευξης κάθε αγωγού συνδέονται παράλληλα για το δίκτυο σύζευξης της θύρας.

Ο Πίνακας 6 δείχνει ένα σχηματικό κύκλωμα για ένα δίκτυο σύζευξης, με την τιμή του πυκνωτή $C = 1,0 \mu\text{F}$ και του αντιστάτη $R = 100 \times n \Omega$, όπου n είναι ο αριθμός των αγωγών (n είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 2). Οι πυκνωτές και οι αντιστάτες για κάθε από τους αγωγούς στο δίκτυο σύζευξης μιας θύρας πρέπει να είναι ταιριασμένοι με ανοχή 1%. Για τη δοκιμή εναλλασσόμενης τάσης συνεχούς ρεύματος, οι πυκνωτές $1,0 \mu\text{F}$ πρέπει να συντονίζονται.

4.6.2.2 Δίκτυα σύζευξης για θύρες επικοινωνίας

Για θύρες επικοινωνίας και άλλες θύρες που προορίζονται για σύνδεση με ζεύγη (μονά ή πολλαπλά ζεύγη), το δίκτυο σύζευξης είναι ένα δίκτυο T.

Η Εικόνα 17 δείχνει ένα σχηματικό κύκλωμα για ένα δίκτυο T. Η τιμή του πυκνωτή είναι $C = 4,7 \mu\text{F}$, ο αντιστάτης είναι $R = 200 \Omega$ και το πηνίο είναι $L = 2 \times 38 \text{ mH}$ (διπλής συρματοστρεψής).

Τα στοιχεία του δικτύου T πρέπει να είναι ταιριασμένα με μια ανοχή έτσι ώστε το δίκτυο T να μην επηρεάζει σημαντικά το CMMR (Common mode rejection ratio) του δοκιμίου (EUT). Μπορεί να είναι δυνατή η παραγωγή δικτύων T που είναι κατάλληλα για χρήση με CMMR μεγαλύτερου από 80 dB, όπου σε αυτή την περίπτωση το πρότυπο προϊόντος πρέπει να καθορίζει μια εναλλακτική μέθοδο σύζευξης.

4.6.3 Συσκευές αποσύνδεσης

4.6.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η λειτουργία της συσκευής αποσύνδεσης είναι να απομονώνει το βοηθητικό εξοπλισμό (AE – Auxiliary equipment) και/ή τον προσομοιωτή από τη θύρα που υπόκειται σε δοκιμή και έτσι να αποτρέπει την εφαρμογή της δοκιμαστικής τάσης στο βοηθητικό εξοπλισμό και/ή τον προσομοιωτή.

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό μιας συσκευής αποσύνδεσης είναι η απόσβεση κοινής λειτουργίας στο εύρος συχνοτήτων από 0 Hz έως 150 kHz. Υπάρχουν διαθέσιμες τόσο ενεργές όσο και παθητικές συσκευές απομόνωσης. Παραδείγματα ενεργών συσκευών περιλαμβάνουν ενισχυτές και οπτοαπομοιωτές, ενώ παραδείγματα παθητικών συσκευών περιλαμβάνουν μετασχηματιστές απομόνωσης.

4.6.3.2 Προδιαγραφές

Οι προδιαγραφές απομόνωσης και αποσύνδεσης, εφαρμόσιμες σε όλες τις συσκευές για όλους τους τύπους σήματος λειτουργίας, είναι:

- Ικανότητα αντοχής σε μόνωση εισόδου σε έξοδο και εισόδου/εξόδου σε γείωση: 1 kV, 50/60 Hz, 1 λεπτό.
- Απόσβεση κοινής λειτουργίας (ατεννοποίηση) στο εύρος συχνοτήτων 15 Hz έως 150 kHz: 60 dB.

Συσκευές αποσύνδεσης με μειωμένη ικανότητα αντοχής μόνωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν γίνεται δοκιμή σε επίπεδα κάτω από το επίπεδο 4. Η απόρριψη κοινής λειτουργίας της συσκευής αποσύνδεσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επιδείνωση του λόγου απόρριψης κοινής λειτουργίας της θύρας της Μονάδας Υπό Δοκιμής. Οι απαιτήσεις του 6.3.3.2 ισχύουν επίσης και για πολύπλοκες συσκευές, όπως μια μονάδα τροφοδοσίας που αποτελείται από ένα μετασχηματιστή απομόνωσης και ένα μετατροπέα εναλλασσόμενου σε συνεχές ρεύματος. Για ισορροπημένες γραμμές, το δίκτυο T παρέχει αποτελεσματική αποσύζευξη στο εύρος συχνοτήτων 10 kHz έως 150 kHz. Ωστόσο, για συχνότητες κάτω από 10 kHz, ακόμα απαιτείται μια συσκευή αποσύζευξης.

4.7 Ρύθμιση δοκιμής

4.7.1 Γενικά

Οι προδιαγραφές της ρύθμισης δοκιμής δίνονται για:

- συνδέσεις γείωσης.
- εξοπλισμός υπό δοκιμή
- γεννήτρια δοκιμής
- δίκτυα σύζευξης και αποσύζευξης (συσκευές αποσύζευξης/μονωτικές συσκευές)

4.7.2 Συνδέσεις γείωσης

Οι απαιτήσεις ασφαλείας γείωσης του δοκιμίου, του βοηθητικού εξοπλισμού (BE) και του εξοπλισμού δοκιμής πρέπει να τηρούνται πάντοτε.

Το δοκίμιο πρέπει να συνδεθεί στο σύστημα γείωσης σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Η γεννήτρια δοκιμής, τα δίκτυα σύζευξης και οι συσκευές αποσύζευξης πρέπει να συνδεθούν με ένα επίπεδο αναφοράς γείωσης (EAG) ή με ένα κοινό ακροδέκτη γείωσης. Η σύνδεση γείωσης με το EAG ή τον κοινό ακροδέκτη γείωσης πρέπει να είναι μικρότερη από 1 μέτρο σε μήκος.

4.7.3 Εξοπλισμός υπό δοκιμή

Ο εξοπλισμός υπό δοκιμή πρέπει να τοποθετηθεί και να συνδεθεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές εγκατάστασης του εξοπλισμού. Οι πηγές τροφοδοσίας, οι θύρες εισόδου/εξόδου και οι θύρες επικοινωνίας πρέπει να συνδεθούν στις πηγές τροφοδοσίας, ελέγχου και σήματος μέσω των συσκευών αποσύζευξης/μονωτήρων. Τα λειτουργικά σήματα για την δοκιμή της ΜΥΔ μπορούν να παρέχονται από τον βοηθητικό εξοπλισμό ή τον προσομοιωτή.

Πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα καλώδια που προδιαγράφει ο κατασκευαστής του εξοπλισμού. Στην απουσία προδιαγραφών, πρέπει να χρησιμοποιηθούν μη θωρακισμένα Φκαλώδια, κατάλληλου τύπου για τα σήματα που εμπλέκονται. Το μήκος του καλωδίου δεν είναι σημαντικό για τη δοκιμή, εκτός από την περίπτωση θωρακισμένων καλωδίων. Για τα θωρακισμένα καλώδια, όπου ο κατασκευαστής προδιαγράφει ένα μέγιστο μήκος καλωδίου, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί αυτό το μήκος· σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, το μήκος του καλωδίου πρέπει να είναι 20 μέτρα.

4.7.4 Γεννήτριες δοκιμής

Η γεννήτρια δοκιμής πρέπει να συνδεθεί στο δίκτυο σύζευξης ή στον αντίστατη σύζευξης, όπως προδιαγράφεται στην Παράγραφο 4.8.

4.7.5 Συσκευές αποσύνδεσης/απομόνωσης (Decoupling/isolation devices)

Οι συσκευές αποσύνδεσης/απομόνωσης πρέπει να συνδεθούν μεταξύ όλων των θυρών του δοκιμίου που πρόκειται να δοκιμαστούν και της αντίστοιχης πηγής σήματος ή ισχύος. Δεν απαιτούνται ειδικές συσκευές αποσύνδεσης/απομόνωσης εάν ο βοηθητικός εξοπλισμός ή οι πηγές ισχύος είναι απομονωμένοι. Οι συσκευές αποσύνδεσης/απομόνωσης πρέπει να τοποθετούνται στην πλευρά των καλωδίων κοντά στη θύρα του βοηθητικού εξοπλισμού, ώστε να χρησιμοποιούνται οι κανονικές τερματικές συνδέσεις που παρέχονται με τα καλώδια χωρίς να απαιτείται η αποκοπή τους.

4.8 Διαδικασία δοκιμής

4.8.1 Γενικά

Η διαδικασία δοκιμής περιλαμβάνει προκαταρκτική επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του εξοπλισμού και εκτέλεση της δοκιμής.

4.8.2 Συνθήκες αναφοράς εργαστηρίου

4.8.2.1 Γενικά

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των περιβαλλοντικών επιδράσεων στα αποτελέσματα των δοκιμών, οι δοκιμές πρέπει να πραγματοποιούνται σε ελεγχόμενες κλιματικές και ηλεκτρομαγνητικές συνθήκες, όπως καθορίζονται στις παραγράφους 4.8.2.2 και 4.8.2.3.

4.8.2.2 Κλιματικές συνθήκες

Εκτός αν ορίζεται διαφορετικά από την επιτροπή που είναι υπεύθυνη για το γενικό πρότυπο, οι κλιματικές συνθήκες στο εργαστήριο πρέπει να παραμένουν εντός των ορίων που ορίζονται για τη λειτουργία του εξοπλισμού υπό δοκιμή και του εξοπλισμού δοκιμής από τους αντίστοιχους κατασκευαστές τους. Οι δοκιμές δεν πρέπει να πραγματοποιούνται εάν η σχετική υγρασία είναι τόσο υψηλή ώστε να προκαλεί συμπύκνωση στον εξοπλισμό υπό δοκιμή ή στον εξοπλισμό δοκιμής.

4.8.2.3 Ηλεκτρομαγνητικές συνθήκες

Οι ηλεκτρομαγνητικές συνθήκες του εργαστηρίου δεν πρέπει να επηρεάζουν τα αποτελέσματα των δοκιμών. Για το λόγο αυτό οι δοκιμές μπορούν να γίνονται εντός κλωβού Faraday.

4.8.3 Εκτέλεση της δοκιμής

Ο εξοπλισμός υπό δοκιμή πρέπει να ρυθμιστεί για τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας του. Οι δοκιμές πρέπει να πραγματοποιούνται σύμφωνα με ένα σχέδιο δοκιμής που πρέπει να προσδιορίζει

- τον τύπο της δοκιμής

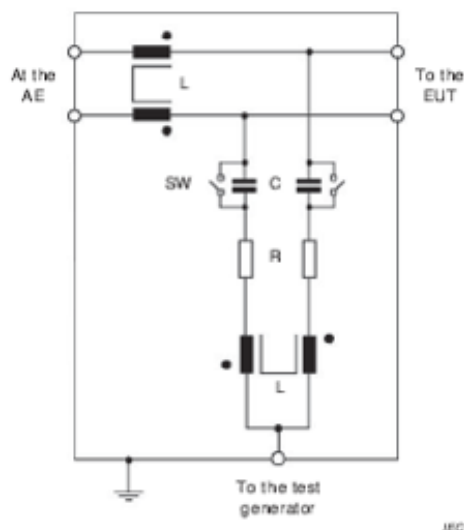
- το επίπεδο της δοκιμής
- τη διάρκεια της δοκιμής
- τις θύρες του εξοπλισμού υπό δοκιμή που πρέπει να ελεγχθούν
- τις αντιπροσωπευτικές λειτουργικές συνθήκες του εξοπλισμού υπό δοκιμή
- τον βοηθητικό εξοπλισμό

Οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας, του σήματος και οι υπόλοιπες λειτουργικές ηλεκτρικές ποσότητες πρέπει να εφαρμόζονται εντός του εύρους τιμών που ορίζουν οι κατασκευαστές τους. Εάν οι πραγματικές πηγές λειτουργικού σήματος δεν είναι διαθέσιμες, μπορούν να προσομοιωθούν.

Οι κύριες βήματα της διαδικασίας δοκιμής είναι ως εξής:

- προκαταρκτικός έλεγχος της απόδοσης του εξοπλισμού
- σύνδεση των δικτύων σύζευξης και των συσκευών αποσύζευξης στις θύρες του εξοπλισμού υπό δοκιμή που πρέπει να ελεγχθούν
- έλεγχος της απόδοσης των εισερχόμενων σημάτων, εάν είναι απαραίτητο
- εφαρμογή της δοκιμαστικής τάσης

Η διάταξη δοκιμής μπορεί να επηρεάσει τις λειτουργικές συνθήκες των θυρών I/O του εξοπλισμού υπό δοκιμή. Αυτές οι νέες συνθήκες πρέπει να ληφθούν υπόψη ως αναφορές κατά την αξιολόγηση της επίδρασης της δοκιμαστικής τάσης.



- R: 200 Ω
 C: 4,7 μF, to be short-circuited for d.c. voltage test (SW)
 L: 2 × 38 mH (bifilar winding)

Εικόνα 14. Σχηματικό κύκλωμα για το δίκτυο ζεύξης T για θύρες επικοινωνίας (Πρότυπο IEC 61000-4-16)

Η τάση δοκιμής πρέπει να εφαρμόζεται για μια περίοδο χρόνου επαρκή για να επιτραπεί μια πλήρης επαλήθευση της λειτουργικής απόδοσης του εξοπλισμού υπό δοκιμή. Για δοκιμές μικρής διάρκειας (συνήθως διάρκεια 1 δευτερολέπτου), η τάση δοκιμής πρέπει να εφαρμόζεται επανειλημμένα μέχρι να εκπληρωθεί αυτό το κριτήριο. Η δοκιμή στο εύρος συχνοτήτων 15 Hz έως 150 kHz ξεκινά από τα 15 Hz· ο ρυθμός μεταβολής δεν

πρέπει να υπερβαίνει το 1×10^{-2} δεκαδικά/δευτερόλεπτο. Εάν η συχνότητα αυξάνεται σταδιακά, το μέγεθος του βήματος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 10% της αρχικής τιμής και στη συνέχεια το 10% της προηγούμενης τιμής συχνότητας.

Η απόδοση του εξοπλισμού υπό δοκιμή πρέπει να παρακολουθείται συνεχώς, και οποιαδήποτε απόκλιση πρέπει να καταγράφεται στην έκθεση δοκιμής. Ο δοκιμαστικός γεννήτορας πρέπει να συνδεθεί με κάθε θύρα δοκιμής με τη σειρά. Οι θύρες που δεν υπόκεινται σε δοκιμή πρέπει να έχουν τους εισαγωγικούς τερματικούς τους του συστήματος σύζευξης συνδεδεμένους με τη γείωση (βλέπε εικόνα 17). Εάν το σύστημα έχει ένα μεγάλο αριθμό παρόμοιων θυρών, τότε πρέπει να επιλεγεί αρκετός αριθμός ώστε να καλύπτονται όλοι οι διαφορετικοί τύποι τερματισμού.

Οι θύρες που παρέχονται από μη θωρακισμένα καλώδια πρέπει να ελεγχθούν εφαρμόζοντας τη τάση δοκιμής απευθείας στα τερματικά της θύρας. Στην περίπτωση θωρακισμένων γραμμών (π.χ. ομοαξονικά καλώδια), η έξοδος του γεννήτορα πρέπει να συνδεθεί απευθείας με την οθόνη (χωρίς επιπλέον αντιστάσεις σειράς και πυκνωτές που απαιτούνται).

Για τη δοκιμή θυρών με περισσότερα από δύο τερματικά (π.χ. ομαδοποίηση), η τάση δοκιμής πρέπει να εφαρμόζεται ταυτόχρονα μεταξύ όλων των τερματικών της θύρας και της γείωσης (κοινής λειτουργίας). Για θύρες που προορίζονται να συνδεθούν με καλιμπραρισμένες από παρεμβολές γραμμές, η τάση δοκιμής πρέπει να εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας το δίκτυο T που προδιαγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο

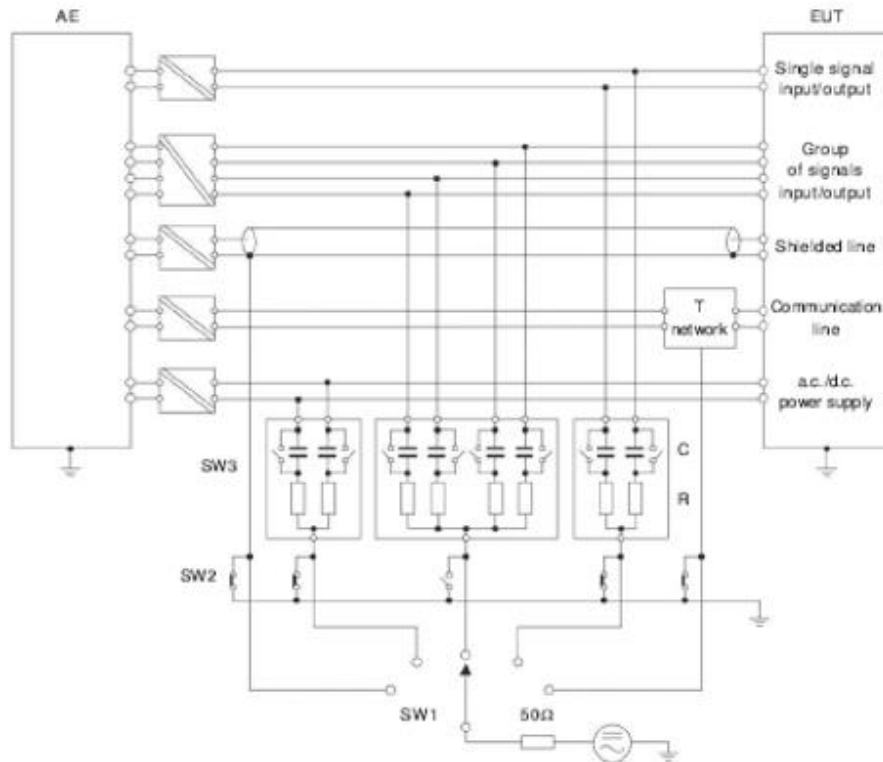
4.8.4 Κατά τη δοκιμή με εφαρμογή συνεχούς τάσης, η πολικότητα της τάσης δοκιμής πρέπει να αντιστραφεί.

Ένα γενικό σχήμα για την εφαρμογή της τάσης δοκιμής δίνεται στην εικόνα 15.

Η τάση δοκιμής πρέπει να εφαρμόζεται σε κοινή λειτουργία στις ακόλουθες θύρες:

- παροχή ισχύος
- εισαγωγή και έξοδος
- επικοινωνία

Δεν απαιτείται συγκεκριμένη δοκιμή για την θύρα γείωσης. Οι αποδόσεις του εξοπλισμού υπό δοκιμή πρέπει να επαληθεύονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του σχεδίου. Η δοκιμή μπορεί να προκαλέσει επικίνδυνες καταστάσεις λόγω της δοκιμαστικής τάσης που εμπλέκεται ή του διαρροής ρεύματος προς τη γείωση: είναι απαραίτητες κατάλληλες προφυλάξεις ασφαλείας για να αποφευχθούν κινδύνοι για τους χειριστές



IEC

C = 1,0 μF, to be short-circuited for d.c. voltage test (SW3)

R = 100 Ω × x conductors belonging to the port concerned

Example for x = 4: R = 400 Ω

NOTE Switch SW2 is used to connect all input terminals to ground, other than under test (see 8.3).

Εικόνα 15. Σχηματικό κύκλωμα για δοκιμές τύπου (Πρότυπο IEC 61000-4-16)

4.9 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων δοκιμής

Τα αποτελέσματα των δοκιμών πρέπει να ταξινομούνται ως προς την απώλεια λειτουργίας ή την υποβάθμιση της απόδοσης του εξοπλισμού υπό δοκιμή, σε σχέση με ένα επίπεδο απόδοσης που καθορίζεται από τον κατασκευαστή ή από τον αιτών της δοκιμής, ή συμφωνείται μεταξύ του κατασκευαστή και του αγοραστή του προϊόντος. Η συνιστώμενη ταξινόμηση είναι η εξής:

- κανονική απόδοση εντός των ορίων που καθορίζονται από τον κατασκευαστή, τον αιτούντα ή τον αγοραστή.
- προσωρινή απώλεια λειτουργίας ή υποβάθμιση της απόδοσης που παύει μετά την παύση της διαταραχής και από την οποία ο εξοπλισμός υπό δοκιμή ανακτά την κανονική του απόδοση χωρίς παρέμβαση του χειριστή.
- προσωρινή απώλεια λειτουργίας ή υποβάθμιση της απόδοσης, η διόρθωση της οποίας απαιτεί παρέμβαση του χειριστή.
- απώλεια λειτουργίας ή υποβάθμιση της απόδοσης που δεν είναι αναστρέψιμη λόγω ζημιών στο υλικό ή το λογισμικό, ή απώλειας δεδομένων.

Οι προδιαγραφές του κατασκευαστή μπορεί να καθορίζουν επιπτώσεις στον Εξοπλισμό υπό δοκιμή που θα μπορούσαν να θεωρηθούν ασήμαντες και, συνεπώς, αποδεκτές. Αυτή η ταξινόμηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καθοδήγηση για τον καθορισμό κριτηρίων απόδοσης από επιτροπές που είναι υπεύθυνες για γενικά, προϊόντα και οικογένειες προϊόντων, ή ως πλαίσιο για τη συμφωνία για κριτήρια απόδοσης μεταξύ κατασκευαστή και αγοραστή, για παράδειγμα όταν δεν υπάρχει κατάλληλο γενικό, προϊόντος ή οικογενειακό πρότυπο.

4.10 Έκθεση δοκιμής

Η έκθεση δοκιμής πρέπει να περιέχει όλες τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για να αναπαραχθεί η δοκιμή. Συγκεκριμένα, πρέπει να καταγράφονται τα εξής:

- τα στοιχεία που προδιαγράφονται στο σχέδιο δοκιμής, που απαιτείται από το Άρθρο 8, του προτύπου ΕΛΟΤ EN 61000-4-16
- ταυτοποίηση του εξοπλισμού δοκιμής, για παράδειγμα, εμπορική ονομασία, τύπος προϊόντος, αριθμός σειράς.
- οποιοσδήποτε ειδικές περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες πραγματοποιήθηκε η δοκιμή, για παράδειγμα, θωρακισμένη θάλαμος.
- οποιοσδήποτε συγκεκριμένες συνθήκες που είναι απαραίτητες για τη διενέργεια της δοκιμής.
- το επίπεδο απόδοσης που καθορίζεται από τον κατασκευαστή, τον αιτούντα ή τον αγοραστή.
- το κριτήριο απόδοσης που καθορίζεται στο γενικό, προϊόντος ή οικογενειακό πρότυπο.
- οποιοσδήποτε επιδράσεις, στον υπό δοκιμή Εξοπλισμό, παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια ή μετά την εφαρμογή της δοκιμαστικής διαταραχής και η διάρκεια για την οποία αυτές οι επιδράσεις παραμένουν.
- ο λόγος για την απόφαση επιτυχίας/αποτυχίας (βασισμένη στο κριτήριο απόδοσης που καθορίζεται στο γενικό, προϊόντος ή οικογενειακό πρότυπο ή συμφωνηθεί μεταξύ του κατασκευαστή και του αγοραστή).
- οποιοσδήποτε συγκεκριμένες συνθήκες χρήσης, για παράδειγμα, μήκος και τύπος καλωδίου, θωράκιση ή γείωση, ή συνθήκες λειτουργίας του Εξοπλισμού υπό δοκιμή, που απαιτούνται για την επίτευξη συμμόρφωσης

4.11 Πηγές διαταραχών

Οι αγωγήμες, κοινής λειτουργίας διαταραχές στη συχνότητα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και οι αρμονικοί τους μπορεί να προκληθούν από βλάβες στο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και διαρροές ρευμάτων που κυλούν προς το γείωσης σύστημα. Το δίκτυο τροφοδοσίας εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές, ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και κέντρα τηλεπικοινωνιών μπορεί επίσης να δημιουργήσει διαταραχές κοινής λειτουργίας σε συνθήκες όπου η θετική ή η αρνητική πόλη είναι συνδεδεμένη με τη γείωση. Η ηλεκτροδότηση των σιδηροδρόμων παράγει επίσης διαταραχές στη συχνότητα λειτουργίας τους (συνήθως 16 2/3 Hz).

Οι επηρεαζόμενες διαταραχές περιγράφονται λεπτομερώς στο IEC 61000-2-3 και στο IEC TR 61000-2-5. Οι διάφοροι τύποι διαταραχών μπορεί να είναι παρόντες ταυτόχρονα αλλά σε διαφορετικά επίπεδα. Επιπλέον, εάν το σύστημα ισχύος παρουσιάσει βλάβη, τα επίπεδα των διαταραχών μπορεί να φτάσουν μέχρι και 10 φορές τα αναφερόμενα επίπεδα για φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας, ωστόσο οι διαταραχές από καταστάσεις βλάβης συνήθως παρουσιάζονται για σύντομα χρονικά διαστήματα μόνο (έως περίπου 1 s).

Οι διαταραχές στη συχνότητα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και οι αρμονικοί τους μπορεί να επηρεάσουν τις θύρες σήματος του εξοπλισμού όπου δεν είναι διαθέσιμη επαρκής απόρριψη κοινής λειτουργίας. Οι διαταραχές έως 1 kHz έως 2 kHz οφείλονται κυρίως στις αρμονικές της ισχύος του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Σε υψηλότερες συχνότητες, οι διαταραχές σχετίζονται κυρίως με ηλεκτρονικό εξοπλισμό ισχύος, ο οποίος μπορεί να παράγει ρεύματα εναλλαγής που συμπεριλαμβάνουν το σύστημα γείωσης, προκαλώντας αγωγιμές διαταραχές κοινής λειτουργίας.

4.12 Μηχανισμοί σύζευξης

Οι μηχανισμοί σύζευξης που εξετάζονται ανωτέρω περιλαμβάνουν τη χωρητική, την επαγωγική και την ωμική σύζευξη. Λεπτομέρειες για τους διάφορους μηχανισμούς σύζευξης αναφέρονται στο IEC 61 000-2-3. Η χωρητική σύζευξη δεν είναι σχετική όταν οι γραμμές σήματος έχουν αναφορά στη γείωση, π.χ. λόγω τερματισμού στη γείωση ή λόγω της παρουσίας χωρητικών φίλτρων. Ενώ, η επαγωγική σύζευξη, λόγω των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από την πηγή διαταραχών (π.χ. γραμμή ισχύος, κυκλώματα γείωσης), συχνά προκαλεί σημαντικές διαταραχές σε καλώδια σήματος.

Η ωμική σύζευξη μπορεί να επηρεάσει απευθείας τις γραμμές σήματος, όπως στην περίπτωση επίγειας πηγής σήματος, ή μπορεί να εισάγει ρεύμα στην θωράκιση ενός καλωδίου σήματος. Αυτός ο τύπος σύζευξης μπορεί να θεωρηθεί ο πιο σημαντικός και μερικές φορές μπορεί να θεωρηθεί συμπεριληπτικός των επιδράσεων των χωρητικών και επαγωγικών μηχανισμών σύζευξης. Η ισοδύναμη αντίσταση των μηχανισμών σύζευξης μπορεί να έχει μια ευρεία ποικιλία τιμών, ανάλογα με τη διάταξη της πηγής.

Εμπειρικά οι δοκιμές ατρωσίας στις διάφορες θύρες του εξοπλισμού μπορούν να πραγματοποιηθούν αποτελεσματικά με μια μόνο αντιπροσωπευτική αντίσταση πηγής με τιμή 150 Ω. Αυτή η τιμή μπορεί επίσης να αντιπροσωπεύει τη χαρακτηριστική αντίσταση κοινής λειτουργίας μιας γραμμής ισχύος ή σήματος στο πεδίο, και είναι σύμφωνη με την προσέγγιση που ακολουθείται από άλλα βασικά πρότυπα της σειράς IEC 61 000-4.

4.13 Επιλογή επιπέδων δοκιμής

Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16 περιγράφει διάφορες δοκιμές. Η εφαρμοσιμότητα κάθε δοκιμής, το επίπεδο δοκιμής και τα σχετικά κριτήρια αποδοχής πρέπει να καθοριστούν στα πρότυπα προϊόντος. Τα επίπεδα δοκιμής πρέπει να επιλέγονται σύμφωνα με τις πιο ρεαλιστικές συνθήκες εγκατάστασης και περιβαλλοντικές συνθήκες.

Οδηγίες για την εφαρμοσιμότητα των δοκιμών και την επιλογή των επιπέδων για διάφορες εγκαταστάσεις δίνονται στο IEC TR 61000-2-5. Το παραπάνω παρέχει ένα εύρος επιπέδων διαταραχών για διάφορες τοποθεσίες. Με βάση τις κοινές πρακτικές

εγκατάστασης, οι ακόλουθοι πρακτικοί κανόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταξινόμηση του περιβάλλοντος:

Επίπεδο 1: Καλά προστατευμένο περιβάλλον

Η εγκατάσταση χαρακτηρίζεται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- απομόνωση του εσωτερικού δικτύου τροφοδοσίας ισχύος από το δίκτυο
- κεντρικής τροφοδοσίας, για παράδειγμα με ειδικούς μετασχηματιστές απομόνωσης
- εκτεταμένη γείωση ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε έναν αφιερωμένο συλλέκτη γείωσης, συνδεδεμένο με το σύστημα γείωσης (γείωση) της εγκατάστασης

Ένας χώρος υπολογιστών μπορεί να αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτού του περιβάλλοντος.

Επίπεδο 2: Προστατευμένο περιβάλλον

Η εγκατάσταση χαρακτηρίζεται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- άμεση σύνδεση στο δίκτυο χαμηλής τάσης κεντρικής τροφοδοσίας
- εκτεταμένη γείωση ηλεκτρονικού εξοπλισμού στο σύστημα γείωσης της εγκατάστασης

Ένας χώρος ελέγχου ή ένας χώρος τερματικού σταθμού που βρίσκεται σε ένα αφιερωμένο κτίριο βιομηχανικών εγκαταστάσεων και κεντρικών εργοστασίων ισχύος μπορεί να αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτού του περιβάλλοντος.

Επίπεδο 3: Τυπικό βιομηχανικό περιβάλλον

Η εγκατάσταση χαρακτηρίζεται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- άμεση σύνδεση στο δίκτυο χαμηλής ή μέσης τάσης κεντρικής τροφοδοσίας
- εκτεταμένη γείωση ηλεκτρονικού εξοπλισμού στο σύστημα γείωσης της εγκατάστασης (γείωση)
- χρήση μετατροπέων ισχύος που προκαλούν περιττούς ρεύματα στο γείωσης δίκτυο

Βιομηχανικές εγκαταστάσεις και εργοστάσια ισχύος μπορεί να αποτελούν αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αυτού του περιβάλλοντος.

Επίπεδο 4: Σοβαρό βιομηχανικό περιβάλλον

Η εγκατάσταση χαρακτηρίζεται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- άμεση σύνδεση στο δίκτυο χαμηλής ή μέσης τάσης κεντρικής τροφοδοσίας
- ηλεκτρονικός εξοπλισμός συνδεδεμένος στο σύστημα γείωσης της εγκατάστασης (γείωση), κοινό για HV εξοπλισμό και συστήματα
- χρήση μετατροπέων ισχύος που προκαλούν περιττούς ρεύματα στο γείωσης δίκτυο

Οι υποσταθμοί κλειστού τύπου (GIS) και οι υποσταθμοί υψηλής τάσης σε ανοιχτό χώρο, καθώς και τα εργοστάσια παραγωγής ρεύματος, μπορεί να αποτελούν αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αυτού του περιβάλλοντος.

Επίπεδο 5: Ειδικές καταστάσεις, προς ανάλυση

Ειδικές συνθήκες εγκατάστασης μπορούν να αναλυθούν ή να ερευνηθούν, και αντίστοιχες απαιτήσεις ατρωσίας υψηλότερες ή χαμηλότερες από τις προδιαγραφές για τις διάφορες κατηγορίες που μπορούν να καθοριστούν.

5. Διεξαγωγή δοκιμής ατρωσίας σε αγόμενες κοινότροπες διαταραχές

5.1 Σκοπός

Σκοπός του πειράματος αυτής να περιγράψει τις δραστηριότητες που σχετίζονται με τη διεξαγωγή της δοκιμής ατρωσίας σε αγόμενες κοινότροπες διαταραχές στην περιοχή συχνοτήτων 0 Hz έως 150 kHz, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16.

5.2 Σχετικά Έγγραφα

- ΕΛΟΤ EN 61000-04-16 E2:2016: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) - Μέρος 4-16: Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων - Δοκιμή ατρωσίας σε αγόμενες κοινότροπες διαταραχές στην περιοχή συχνοτήτων 0 Hz έως 150 kHz
- IEC 60533 E3:2015: Electrical and electronic installations in ships - Electromagnetic compatibility (EMC) - Ships with a metallic hull
- ΕΛΟΤ IEC 60092-504: Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις σε πλοία - Μέρος 504: Αυτοματοποίηση, έλεγχος και οργάνωση
- Lloyd's Register Type Approval System - Test Specification Number 1
- DNV-CG-0339
- IACS UR E10

5.3 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι:

- Γεννήτρια/Ενισχυτής Frankonia PSG-300/ PSG-300A
- Πολύμετρο Fluke 289
- Δικτύωμα σύζευξης και απόζευξης (CDN – Coupling and Decoupling network) Frankonia M2345/32-16: για έως και πέντε γραμμές ισχύος (κύριες) χωρίς θωράκιση (DC ή AC μονοφασική ή τριφασική τροφοδοσία)
- Ηλεκτρονικός Υπολογιστής με εγκατεστημένο το πρόγραμμα “IEC/EN 61000-4-16 Application Software” v. 3.13.0
- Δοκιμαστικός εξοπλισμός μετρητικού οργάνου βαποριού από πελάτη
- Ρελέ ασφαλείας
- Καλώδια

5.4 Επίπεδα Δοκιμής

Τα τυπικά επίπεδα δοκιμής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα του Προτύπου IEC/EN 61000-4-16., αλλά δεν είναι δεσμευτικά και δύνανται να αντικατασταθούν από διαφορετικά τα οποία ορίζονται στο εκάστοτε Πρότυπο Προϊόντος.

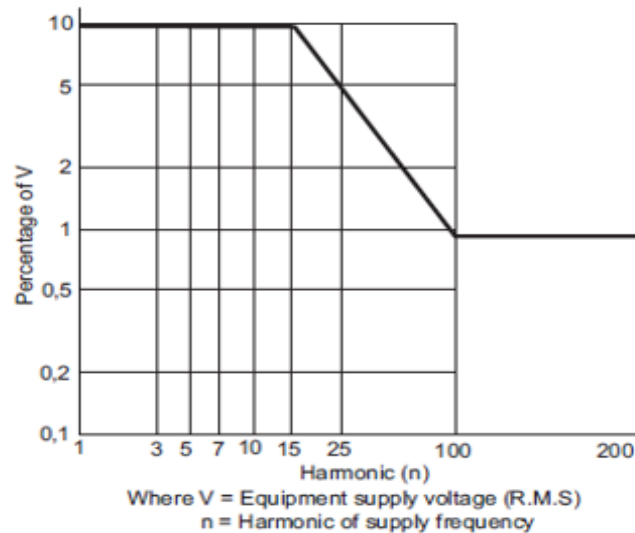
Πίνακας 4: Τάσης ανοιχτοκύκλωσης (r.m.s.)

Επίπεδο	Τάσης ανοιχτοκύκλωσης (r.m.s.)			
	15 Hz – 150 Hz	150 Hz -1,5kHz	1.5 kHz – 15 kHz	15 kHz – 150 kHz
1	1 – 0.1	0,1	0,1 – 1	1
2	3 – 0.3	0,3	0,3 – 3	3
3	10 – 1	1	1 – 10	10
4	30 – 3	3	3 – 30	30
X*	X	X	X	X
*Ελεύθερο επίπεδο, το οποίο μπορεί να καθορίζεται από τις προδιαγραφές του προϊόντος				

5.4.1 Εξοπλισμός Τροφοδοτούμενος με Εναλλασσόμενο Ρεύμα (AC)

Χαμηλές τάξεις παρεμβολών στην τροφοδοσία θα πρέπει να προσομοιωθούν εφαρμόζοντας μια αρμονική τάσης με απόλυτη τιμή θορύβου (r.m.s.) που έχει την παρακάτω διαμόρφωση:

- Εύρος πλάτους/συχνότητας: 10% της ονομαστικής τάσης τροφοδοσίας έως την 15^η αρμονική της συχνότητας τροφοδοσίας
- Μειώνεται σε 1% στην 100^η αρμονική, και στη συνέχεια διατηρείται σε αυτό το επίπεδο έως την 200^η αρμονική, όπως φαίνεται στην εικόνα 18
- Αρμονική/ τάση δοκιμής για οδηγούμενες παρεμβολές χαμηλής συχνότητας
- Εφαρμοζόμενη ισχύς: Έως 2,0 W στις γραμμές τροφοδοσίας, όταν η αντίσταση είναι πολύ χαμηλή για να διατηρηθεί ένα επίπεδο σήματος 3V r.m.s.



Εικόνα 16. Αρμονική τάση δοκιμής για αγωγή παρεμβολή χαμηλής συχνότητας (Lloyd's Register Type Approval System - Test Specification Number 1)

Το κατάλληλο επίπεδο σήματος θα πρέπει να διατηρηθεί από την 1η έως την 200^η αρμονική της συχνότητας τροφοδοσίας, που θα επικαλύπτεται στις γραμμές τροφοδοσίας προς τον εξοπλισμό. Η συχνότητα θα πρέπει να ρυθμιστεί στο καθορισμένο εύρος συχνοτήτων με μια χαμηλή ταχύτητα, έτσι ώστε να ανιχνεύεται οποιαδήποτε δυσλειτουργία του προϊόντος υπό δοκιμή.

5.4.2 Εξοπλισμός Τροφοδοτούμενος με Συνεχές Ρεύμα (DC)

Μια αρμονική τάσης με απόλυτη τιμή θορύβου (r.m.s.) θα πρέπει να επικαλυφθεί στις γραμμές τροφοδοσίας και να έχει την παρακάτω διαμόρφωση:

- Εύρος πλάτους/συχνότητας: 10% της ονομαστικής τάσης τροφοδοσίας στο εύρος από 50 Hz έως 10 kHz
- Εφαρμοζόμενη ισχύς: Έως 2,0 W στις γραμμές τροφοδοσίας, όταν η αντίσταση είναι πολύ χαμηλή για να διατηρηθεί ένα επίπεδο σήματος 3V r.m.s.

Το επίπεδο του σήματος θα πρέπει να διατηρηθεί καθώς η συχνότητα προσαρμόζεται στο καθορισμένο εύρος συχνοτήτων με μια ταχύτητα αρκετά χαμηλή για να ανιχνεύεται οποιαδήποτε δυσλειτουργία του προϊόντος υπό δοκιμή.

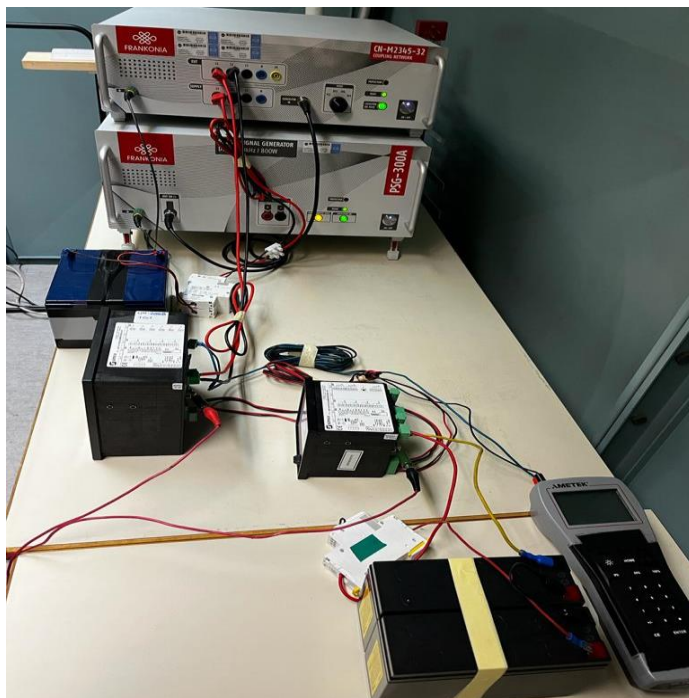
5.5 Διαδικασία Δοκιμής

Στο πρωτόκολλο της δοκιμής σημειώνουμε:

- Την ημερομηνία και τις ώρες έναρξης - λήξης της δοκιμής
- Τις περιβαλλοντικές συνθήκες
- Το τρόπο λειτουργίας του δοκιμίου (Ο τρόπος λειτουργίας, μπορεί να προκύπτει είτε από το εγχειρίδιο λειτουργίας του δοκιμίου, είτε από τις οδηγίες του πελάτη)
- Τις παραμέτρους της δοκιμής σύμφωνα με το αντίστοιχο Πρότυπο

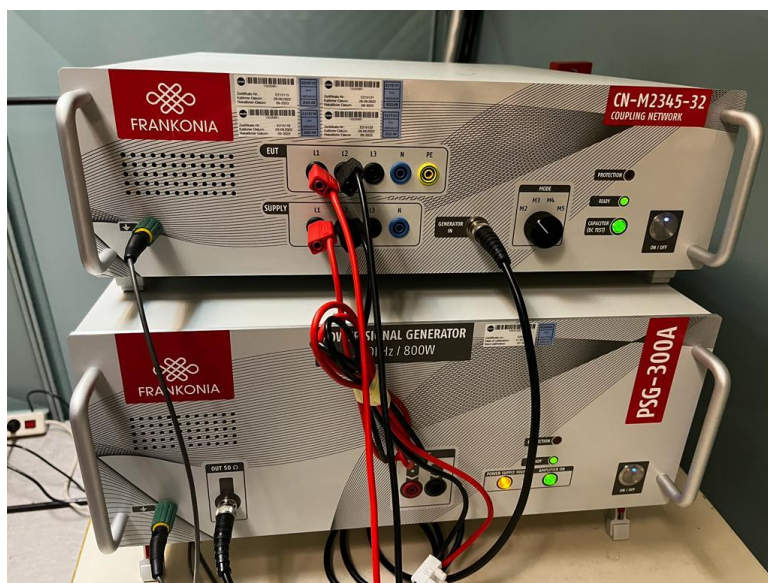
- Τα όργανα τα οποία χρησιμοποιούμε

Πραγματοποιούμε την εξής (Εικόνες 17 & 18) συνδεσμολογία:



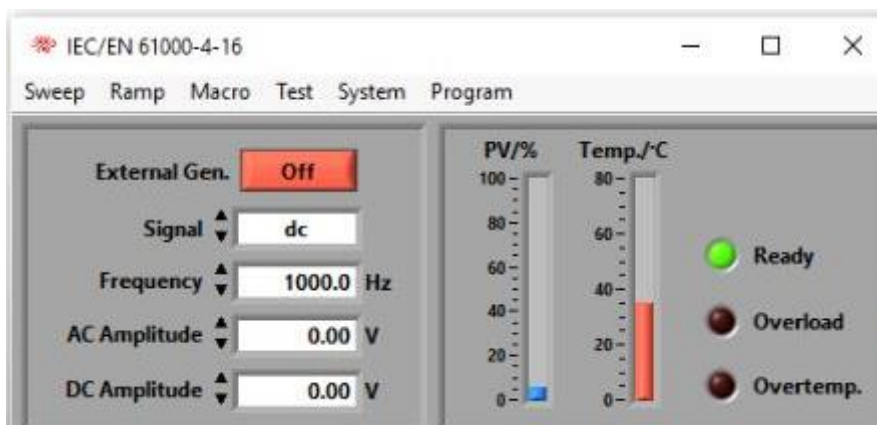
Εικόνα 17. Συνδεσμολογία Πειραματικής Άσκησης συμπεριλαμβανομένου των προϊόντων του πελάτη, πολυοργάνου και ασφαλειών

Θέτουμε σε λειτουργία και τις δύο συσκευές μέσω των αντίστοιχων κομβίων (Στην περίπτωση διεξαγωγής της δοκιμής με τάση DC θα πρέπει να ενεργοποιηθεί η επιλογή CAPACITOR (DC TEST) στην μπροστινή πλευρά του δικτύματος CN-M2345-32). Ο επιλογέας (L1, L2, L3, L4) στην μπροστινή πλευρά του δικτύματος CN-M2345-32 τοποθετείται στην αντίστοιχη θέση.



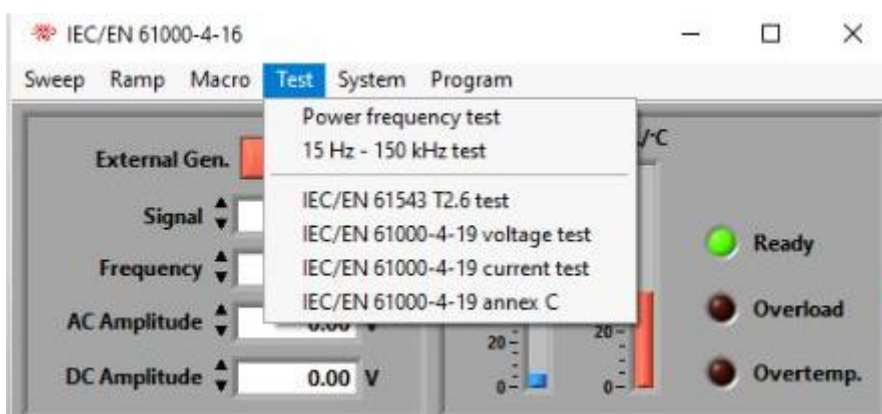
Εικόνα 18. Συνδεσμολογία των Frankonia Generator PSG-300A Coupling CN-M2345-32

Ανοίγουμε στον υπολογιστή το πρόγραμμα “IEC/EN 61000-4-16” ως administrator και εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνας 19.



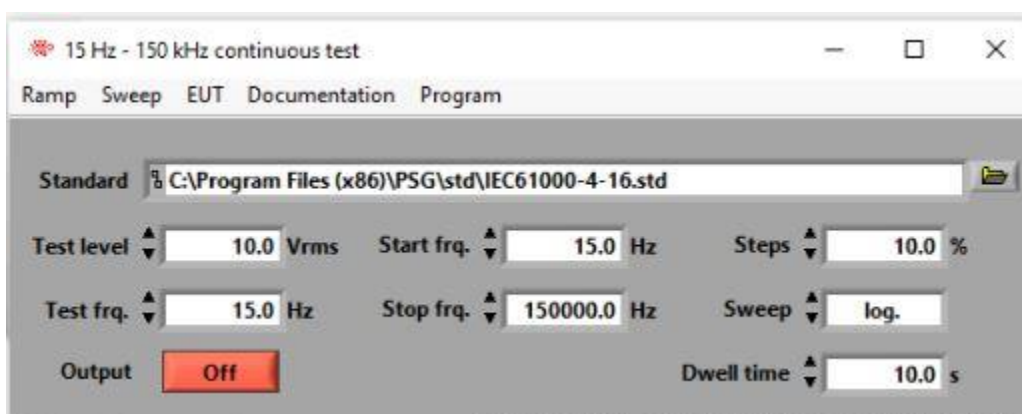
Εικόνα 19. Αρχική μενού λογισμικού

Πατώντας την επιλογή “Test” εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνας 20:



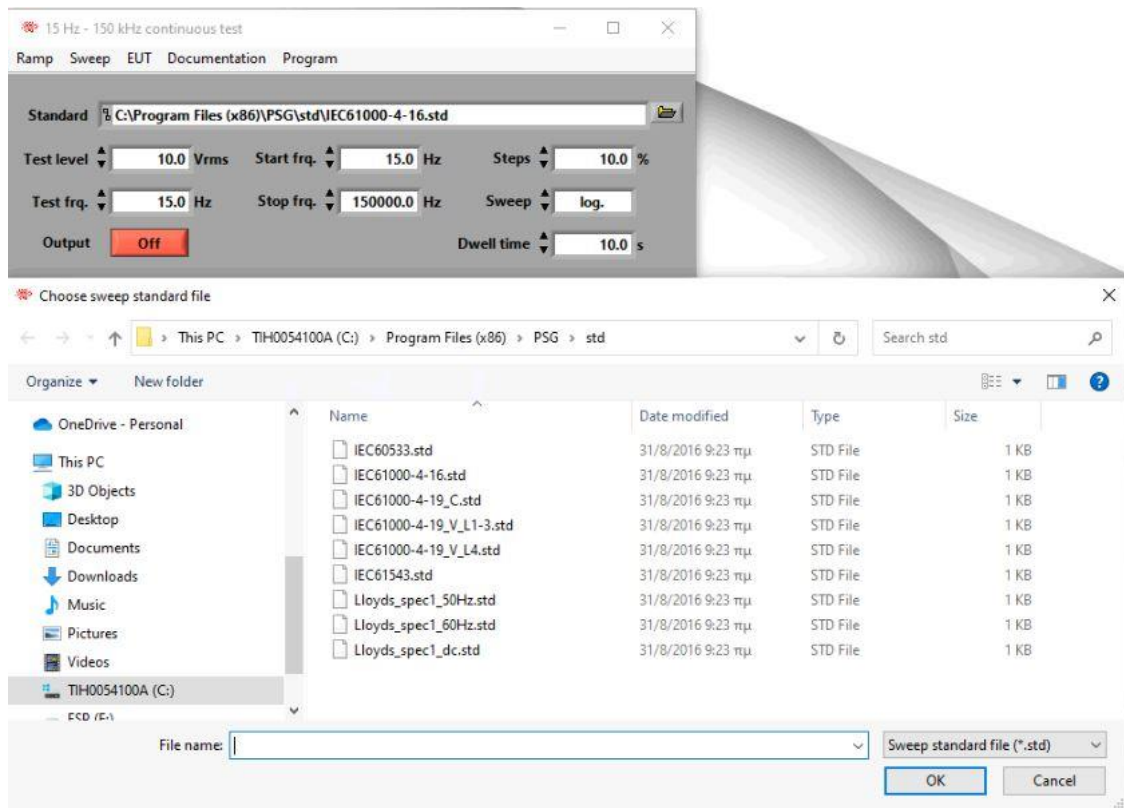
Εικόνα 20. Επιλογή τύπου δοκιμής

Εδώ γίνεται επιλογή από τον χειριστή της απαραίτητης δοκιμής σύμφωνα με το Πρότυπο το οποίο ακολουθείται. Η συνηθέστερη επιλογή είναι η δοκιμή “15 Hz - 15 kHz test”. Πατώντας το αντίστοιχο πεδίο εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνας 21:



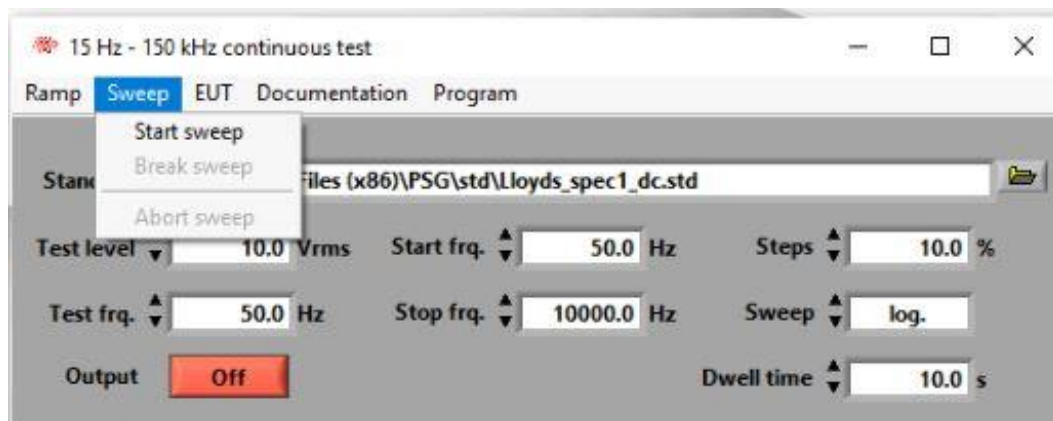
Εικόνα 21. Μενού για τη δοκιμή “15 Hz - 15 kHz test”

Με την χρήση του εικονιδίου με το φάκελο εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνας 22, στο οποίο γίνεται επιλογή του σχετικού Προτύπου με στόχο να μεταφορτωθούν στο λογισμικό οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων.



Εικόνα 22. Μενού επιλογής Προτύπου δοκιμής

Επιλέγουμε (τυχαία) για τις ανάγκες της οδηγίας το Πρότυπο “Lloyds_spec1_dc”. Πατώντας την επιλογή Sweep εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνας 23:



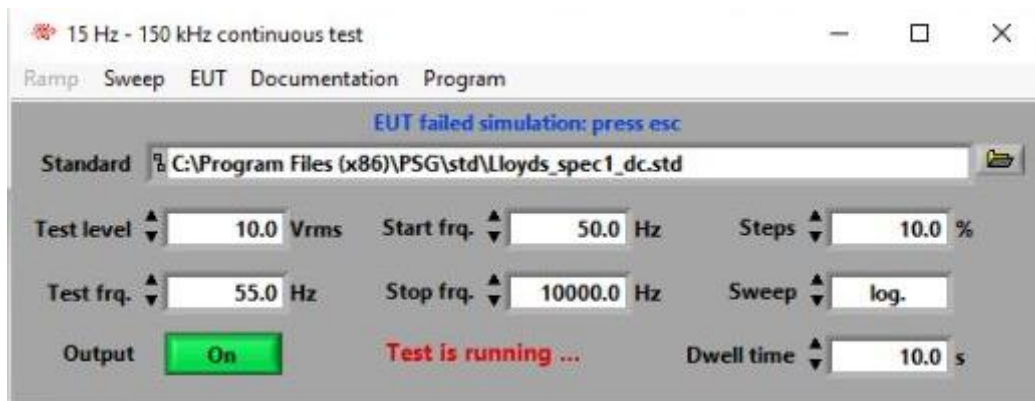
Εικόνα 23. Επιλογή για έναρξη της δοκιμής

Διαλέγοντας την επιλογή “Start sweep” εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνας 24, όπου ζητείται από τον χειριστή να εισάγει το επίπεδο τάσης στα 50Hz (αρχικό επίπεδο τάσης):



Εικόνα 24. Επιλογή επιπέδου τάσης

Με την επιλογή “Start” η δοκιμή ξεκινά και εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνας 25:



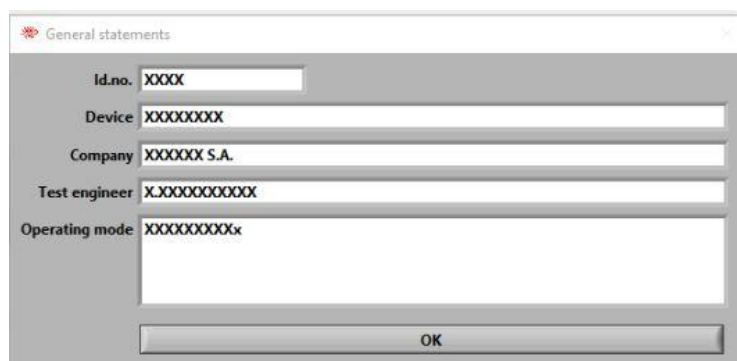
Εικόνα 25. Μενού παρακολούθησης της δοκιμής

Στα πεδία “Test level” και “Test freq.” παρακολουθεί ο χειριστής το επίπεδο τάσης για την εκάστοτε συχνότητα.



Εικόνα 26. Ενδείξεις τιμών από προϊόντα του πελάτη

Με την ολοκλήρωση της δοκιμής και διαλέγοντας την επιλογή “Documentation” → “General statements” ο χειριστής εισάγει τα στοιχεία της δοκιμής (Εικόνα 27) και τα αποθηκεύει με την επιλογή OK.



Εικόνα 27. Μενού εισαγωγής στοιχείων δοκιμής

6. Διακρίβωση εξοπλισμού δοκιμών

6.1 Βασικές Αρχές Διακρίβωσης

Η ποιότητα των προϊόντων και των υπηρεσιών συνδέεται άμεσα με την αξιοπιστία των μετρήσεων και με την ποιότητα σε μετρήσεις του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στην εκάστοτε παραγωγική διαδικασία. Για το λόγο αυτό σε πρότυπα σειρών προβλέπονται συγκεκριμένες απαιτήσεις που αφορούν τον έλεγχο, τη συντήρηση και τη διακρίβωση του εξοπλισμού μετρήσεων και δοκιμών (Electromagnetic Compatibility).

Διακρίβωση είναι η σύγκριση των μετρήσεων που δίνουν δύο συσκευές, από τις οποίες η μια είναι γνωστής ακριβείας και καλείται πρότυπη, και η άλλη είναι υπό έλεγχο, με σκοπό να ανιχνευθεί, να διορθωθεί αν χρειαστεί, και να πιστοποιηθεί η ακρίβεια της (ISO international vocabulary, 1993)

Όλες οι συσκευές μέτρησης απαιτούν διακρίβωση, ακόμη και οι καινούργιες. Ο λόγος είναι η βεβαιότητα ότι η εκάστοτε συσκευή παρέχει ακριβή ένδειξη ή σήμα εξόδου όταν τίθεται σε λειτουργία. Ο χειριστής των συσκευών μέτρησης δεν πρέπει να σταματήσει να ενδιαφέρεται για την ποιότητα των μετρήσεων ακόμα και όταν το όργανο λειτουργεί σωστά και συνεχίζει να παρέχει την αναμενόμενη ένδειξη, διότι υπάρχουν πολλοί παράγοντες που δημιουργούν σφάλματα στα όργανα μέτρησης, όπως για παράδειγμα η σκόνη, το περιβάλλον, η παροχή ρεύματος, οι παρεμβολές σημάτων στην έξοδο ακόμα και η αλλαγή χρήσης του συγκεκριμένου οργάνου. Τα σφάλματα αναγνωρίζονται όταν εκτελείται η διακρίβωση, συγκρίνοντας ή εφαρμόζοντας ένα γνωστό σήμα στο υπό εξέταση όργανο. Σαν σφάλμα ορίζεται η αλγεβρική διαφορά μεταξύ μιας ένδειξης και της πραγματικής τιμής της μετρηθείσας μεταβλητής

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.



Εικόνα 28. Ιεραρχία Ιχνηλασιμότητας

Η ιχνηλασιμότητα επιτυγχάνεται εξασφαλίζοντας ότι τα πρότυπα που χρησιμοποιούμε διακριβώνονται περιοδικά από πρότυπα αναφοράς υψηλότερης ακρίβειας. Ο ρόλος του τεχνικού διακριβωσης 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 διακριβωσης, το οποίο παρέχεται από το εργαστήριο διακριβωσης.

6.1.2 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 (Μαθιουλάκης Αβεβαιότητα μέτρησης).

6.1.3 Τεχνική Διακρίβωση

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση ενός εργαστηρίου διακρίβωσης είναι και οι επαγγελματικές δεξιότητες του προσωπικού του. Ακόμη και αν διατίθεται ο καλύτερος εξοπλισμός διακρίβωσης, χωρίς τις απαραίτητες γνώσεις δεν μπορεί να υλοποιηθεί μια διακρίβωση από κάποιον που δεν έχει εξειδικευθεί σε αυτό.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας, βέβαια, έχει απλοποιήσει τις διαδικασίες διακρίβωσης, με αποτέλεσμα να μπορούν να εκτελεστούν από μεγαλύτερο εύρος επαγγελματικών ομάδων. Αυτό, όμως, δεν σημαίνει ότι η εργασία των τεχνικών της διακρίβωσης μπορεί να αντικατασταθεί από άλλες μη εξειδικευμένες επαγγελματικές ομάδες. Αυτό συμβαίνει διότι στη διακρίβωση ενός ολόκληρου οργάνου, όχι μόνο κάποιου εξαρτήματός του, πρέπει ο τεχνικός να λάβει υπόψη του τη συνάρτηση πολλών παραμέτρων. Ο χειριστής του οργάνου μπορεί εύκολα να διαγνώσει ότι αυτό δεν λειτουργεί σωστά, ο τεχνικός όμως που γνωρίζει τον τρόπο λειτουργίας του οργάνου είναι ικανός να αναγνωρίσει το πρόβλημα βάσει των ενδείξεων (Διακρίβωση Οργάνων, Παπάζογλου).

Το προσωπικό του εργαστηρίου διακρίβωσης θα πρέπει καταρχήν να είναι άρτια εκπαιδευμένο πάνω στο αντικείμενο του, να έχει πολύ καλές γνώσεις μηχανικής και ηλεκτρονικής. Όσο απαραίτητο είναι το γνωστικό υπόβαθρο, εξίσου σημαντική είναι και η συνεχής εκμάθηση και ενημέρωση του προσωπικού, ώστε να μπορεί να παρακολουθεί τις εξελίξεις της τεχνολογίας και να καλύπτει τις απαιτήσεις διακρίβωσης νέων συσκευών (Electromagnetic Compatibility).

Ακόμα, το προσωπικό διακρίβωσης θα πρέπει να προσέχει και την παραμικρή λεπτομέρεια. Κάθε διαφορετικό μοντέλο οργάνου είναι ξεχωριστό και συνδέεται διαφορετικά, έχει άλλες σταθερές, και συνεπώς άλλη συμπεριφορά. Επομένως, ο τεχνικός θα πρέπει και για λόγους ασφαλείας να δίνει σημασία ακόμα και στη παραμικρή λεπτομέρεια. Η ορθή και αναλυτική σύνταξη των πιστοποιητικών διακρίβωσης είναι η βάση για ένα εργαστήριο διακρίβωσης, οποιαδήποτε αλλαγή ή ρύθμιση πραγματοποιηθεί θα πρέπει να σημειώνεται, και αν απαιτείται να ανανεώνονται τα εγχειρίδια και οι βάσεις δεδομένων του εργαστηρίου.

6.2 Εξοπλισμός και Διακρίβωση Γεννήτριας σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16

Η διαδικασία της διακρίβωσης της γεννήτριας βασίζεται στο **πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16**, καθώς και στο Calibration Certificate της Testo (με αριθμό πιστοποιητικού: 4556579), στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή του ο εξής εξοπλισμός:

- Πολύμετρο Fluke 289 TRMS
- Γεννήτρια/Ενισχυτής Frankonia PSG-300/ PSG-300A

- Παλμογράφος Tektronix MDO3054 200Mhz
- Ομοαξονικά Καλώδια
- Καταμεριστής Τάσης Teseq MD200A (HV Differential Probe)
- Αμπεροτσιμπίδα PR 30
- Ηλεκτρονικός Υπολογιστής με εγκατεστημένο το πρόγραμμα “IEC/EN 61000-4-16 Application Software” v. 3.13.0

Για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων, που αφορούν διάφορες γεννήτριες δοκιμών, αυτές πρέπει να βαθμονομηθούν ή να επαληθευθούν για τα πιο ουσιώδη χαρακτηριστικά.

Τα ακόλουθα χαρακτηριστικά των γεννητριών πρέπει να επαληθευθούν:

- Μορφή κύματος τάσης εξόδου
- Αντίσταση πηγής (V_{oc} τάση εξόδου ανοιχτού κυκλώματος / I_{sc} ρεύμα βραχυκυκλώματος). Η αντίσταση πηγής πρέπει να μετρηθεί τόσο στο υψηλότερο όσο και στο χαμηλότερο επίπεδο δοκιμής για όλες τις κυματομορφές (συνεχές ρεύμα, εναλλασσόμενο ρεύμα, σάρωση)
- Για τη γεννήτρια σάρωσης στις συχνότητες: 15 Hz, 1,5 kHz, 15 kHz, 150 kHz

Για την επαλήθευση της αντίστασης πηγής της γεννήτριας διακύμανσης σύντομης διάρκειας, τα πρώτα 50 ms μπορούν να αγνοηθούν:

- Ακρίβεια συχνότητας
- Ακρίβεια τάσης εξόδου ανοιχτού κυκλώματος
- Χρόνος ανόδου και πτώσης της τάσης εξόδου κατά την εναλλαγή on/off (όπου είναι εφαρμοστέο)

Οι επαληθεύσεις πρέπει να πραγματοποιηθούν με αισθητήρες τάσης και ρεύματος μαζί με έναν αντίστοιχο εξοπλισμό μέτρησης με ελάχιστη ζώνη ζώνης 1 MHz. Η ακρίβεια του εξοπλισμού μέτρησης πρέπει να είναι καλύτερη από $\pm 5\%$.

6.3 Παράμετροι προς διακρίβωση

Η διαδικασία της διακρίβωσης της γεννήτριας διερευνάται μέσω επιμέρων παραμέτρων, οι οποίοι στηρίζονται στο πιστοποιητικό Testo. Πιο αναλυτικά, γίνεται μια σύγκριση των τιμών που απαιτούνται από τις προδιαγραφές (επιτρεπτά όρια) με αυτές που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης στη δοκιμή ατρωσίας σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κοινής λειτουργίας στη συχνοτική περιοχή από 0 Hz έως 150 kHz. Οι μετρήσεις αυτές χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Θετική & Αρνητική συνεχής τάση (DC positive & negative Voltage \pm /V)
- Εναλλασσόμενη τάση /V (AC Voltage /V) για συγκεκριμένες συχνότητες
- Θετική & Αρνητική Υπολογισμένη Αντίσταση συνεχής τάσης (DC positive & negative Calculated Impedance)
- Υπολογισμός Αντίστασης εναλλασσόμενης τάσης (AC Calculated Impedance) για συγκεκριμένες συχνότητες

- Συντελεστής Κορυφής εναλλασσόμενης τάσης (AC Crest factor 1V) για συγκεκριμένες συχνότητες
- Συχνότητες 1Hz - 300kHz (Frequency 1Hz - 300kHz) για συγκεκριμένες συχνότητες
- Συνολική Αρμονική Διαστροφή (THD) και Κυμάτωση (Ripple)

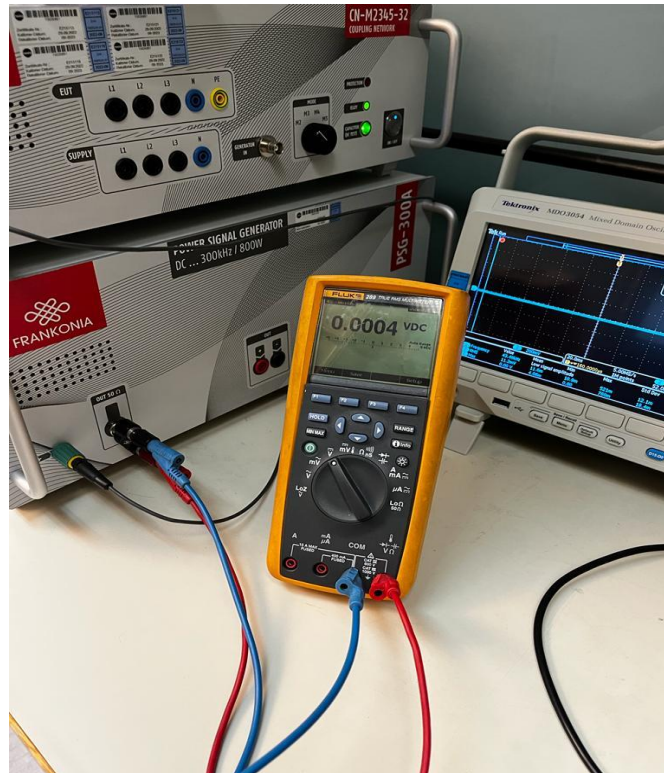
Ο παλμογράφος ρυθμίζεται έτσι ώστε να λαμβάνει μετρήσεις συχνότητας και RMS τιμές τάσης. Μάλιστα, συνδέεται παράλληλα με το κύκλωμα μας το πολύμετρο Fluke και μέσω του λογισμικού επιλέγεται η δοκιμή “Lloyds_spec1_dc”, το οποίο θα αποτελέσει το βασικό όργανο ρύθμισης και εποπτείας της γεννήτριας μας καθόλη τη διάρκεια της διαδικασίας της διακρίβωσης.

6.3.1 Παράμετρος DC Voltage \pm /V

Αρχικά, η πρώτη δειγματοληψία έχει πέντε βήματα για τις θετικές και για τις αρνητικές τιμές της DC Voltage. Τα βήματα αυτά καταχωρούνται στο πρόγραμμα μας IEC/ EN 61000-4-16 και όπως φαίνονται παρακάτω είναι τα εξής:

Πίνακας 5: Βημάτων δειγματοληψίας

Στάδιο	Επίπεδο
1	1 V
2	3 V
3	10 V
4	30 V
5	75 V



Εικόνα 29. DC Voltage +V & DC Voltage +V μέτρηση με τη χρήση πολυμέτρου

Πίνακας 6: Παράμετρος DC positive & negative Voltage /V

DC positive Voltage /V			
1V έως 75V Informative	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (V)	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου (V)	Απόκλιση (%)
1	1.001105	1.0013	0.019
3	2.998550	2.9988	0.008
10	9.999757	10.0010	0.012
30	29.963972	29.9700	0.020
75	74.928585	74.9400	0.015

DC negative Voltage /V			
-1V έως -75V Informative	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (-V)	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου (-V)	Απόκλιση (%)
1	0.999533	0.9998	0.027
3	2.997098	2.9973	0.007
10	9.997353	9.9980	0.006
30	29.963972	29.9510	0.043
75	69.922695	69.9910	0.098

6.3.2 Παράμετρος AC Voltage /V

Στο δεύτερο κομμάτι της πειραματικής μας διαδικασίας, η οποία υλοποιείται με τη χρήση του καταμεριστή τάσης, έχουμε τρία (3) βήματα ανά συγκεκριμένη αναγραφόμενη συχνότητα, όπως φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες τιμών. Ειδικότερα, τα βήματα για την AC Voltage κατηγορία ορίζονται ως τα 10 V_{rpp}, 30 V_{rpp} και 75 V_{rpp}, των οποίων οι τιμές προέκυψαν από το γινόμενο του κλάσματος $\frac{\sqrt{2}}{2}$ και την εκάστοτε τιμή της μέτρησης (V_{rpp}). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η μετατροπή των τιμών διακρίβωσης σε r.m.s..

Αξίζει μάλιστα να σημειωθεί ότι με το ανοιχτοκύκλωμα τα αποτελέσματα του καταμεριστή τάσης Teseq MD200A προκύπτει σε millivolt και πολλαπλασιάζονται με τον εκάστοτε λόγο καταμερισμού. Ο συντελεστής αυτός επιλέγεται με βάση το ποιόν της τιμής του διερχόμενου ρεύματος σε RMS τιμή, την κλίμακα, καθώς και το φάσμα της εκάστοτε εφαρμοζόμενης συχνότητας του πειράματος μας, γεγονός που αποτυπώνεται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7: Λόγοι Καταμερισμού

Set Range	Applied Frequency	Applied Voltage V _{rms}	Measured Output	Calculated Ratio	Specified Limits		Uncertainty
					Lower	Upper	
1/100	50 Hz	10.00 V	0.1005 V	99.5	98.0	102.0	0.25 %
1/100	50 Hz	50.00 V	0.5026 V	99.5	98.0	102.0	0.21 %
1/100	50 Hz	100.0 V	1.005 V	99.5	98.0	102.0	0.24 %
1/100	100 Hz	100.0 V	1.005 V	99.5	98.0	102.0	0.24 %
1/100	1 kHz	100.0 V	1.003 V	99.7	98.0	102.0	0.25 %
1/100	10 kHz	100.0 V	1.010 V	99.0	98.0	102.0	0.33 %
1/100	100 kHz	100.0 V	1.019 V	98.2	98.0	102.0	1.10 %
1/100	50 Hz	200.0 V	2.010 V	99.5	98.0	102.0	0.43 %
1/100	50 Hz	400.0 V	4.004 V	99.9	98.0	102.0	0.22 %
1/100	50 Hz	500.0 V	4.988 V	100.2	98.0	102.0	0.22 %



Εικόνα 30. AC Voltage /V μέτρηση με τη χρήση πολυμέτρου και καταμεριστή τάσης

Πίνακας 8: Παράμετρος AC Voltage /V σε φάσμα αντίστοιχων συχνοτήτων

AC Voltage /V (Frequency 16 2/3 Hz)			
10Vpp - 75Vpp	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (V)	Τιμές Εργαστηρίου (mV) * Λόγος καταμερισμού = Τελική μέτρηση (V)	Απόκλιση (%)
$10*\sqrt{2}/2 = 7.0710678$	7.062083	$71.8*99.50 = 7.14410$	1.161
$30*\sqrt{2}/2 = 21.2132034$	21.1847342	$211*99.50 = 20.9945$	0.898
$75*\sqrt{2}/2 = 53.0330086$	52.9022263	$521*99.50 = 51.8395$	2.009

AC Voltage /V (Frequency 50 Hz)			
10Vpp - 75Vpp	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (V)	Τιμές Εργαστηρίου (mV) * Λόγος καταμερισμού = Τελική μέτρηση (V)	Απόκλιση (%)
$10*\sqrt{2}/2 = 7.0710678$	7.0683235	$70.1*99.50 \% = 6.97495$	1.321
$30*\sqrt{2}/2 = 21.2132034$	21.191744	$212*99.50 \% = 21.0940$	0.461
$75*\sqrt{2}/2 = 53.0330086$	52.9422733	$527*99.50 \% = 52.4365$	0.955

AC Voltage /V (Frequency 60 Hz)			
10Vpp - 75Vpp	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (V)	Τιμές Εργαστηρίου (mV) * Λόγος καταμερισμού = Τελική μέτρηση (V)	Απόκλιση (%)
$10*\sqrt{2}/2 = 7.0710678$	7.0734488	$71.3*99.50 \% = 7.0944$	0.296
$30*\sqrt{2}/2 = 21.2132034$	21.2054131	$211*99.50 \% = 20.9945$	0.995
$75*\sqrt{2}/2 = 53.0330086$	52.9799662	$525*99.50 \% = 52.2375$	1.401

AC Voltage /V (Frequency 1500 Hz)			
10Vpp - 75Vpp	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (V)	Τιμές Εργαστηρίου (mV) * Λόγος καταμερισμού = Τελική μέτρηση (V)	Απόκλιση (%)
$10*\sqrt{2}/2 = 7.0710678$	7.0717045	$70.6*99.70 \% = 7.0388$	0.465
$30*\sqrt{2}/2 = 21.2132034$	21.2005718	$211*99.70 \% = 21.0367$	0.069
$75*\sqrt{2}/2 = 53.0330086$	52.9699529	$525*99.70 \% = 52.3425$	0.383

AC Voltage /V (Frequency 15 kHz)			
10Vpp - 75Vpp	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (V)	Τιμές Εργαστηρίου (mV) * Λόγος καταμερισμού = Τελική μέτρηση (V)	Απόκλιση (%)
$10*\sqrt{2}/2 = 7.0710678$	7.0751996	$72.2*99.00 \% = 7.1478$	1.026
$30*\sqrt{2}/2 = 21.2132034$	21.2103873	$214*99.00 \% = 21.1860$	0.115
$75*\sqrt{2}/2 = 53.0330086$	53.0139156	$533*99.00 \% = 52.7670$	0.466

AC Voltage /V (Frequency 150 kHz)			
10Vpp - 75Vpp	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (V)	Τιμές Εργαστηρίου (mV) * Λόγος καταμερισμού = Τελική μέτρηση (V)	Απόκλιση (%)
$10*\sqrt{2}/2 = 7.0710678$	7.0446913	$73*98.20 \% = 7.1686$	1.759
$30*\sqrt{2}/2 = 21.2132034$	21.1172703	$219*98.20 \% = 21.5058$	1.840
$75*\sqrt{2}/2 = 53.0330086$	52.7266896	$548*98.20 \% = 53.8136$	2.061

6.3.3 Παράμετρος DC positive & negative Calculated Impedance

Στη συνέχεια, για το DC positive & negative Calculated Impedance πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλες αλλαγές τόσο στο πρόγραμμα IEC/ EN 61000-4-16 όσο και στη διάταξη μας, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 29. Η χρήση του πολύμετρου Fluke 289 TRMS ανοιχτοκυκλώνοντας τη σύνδεσης της γεννήτριας συνέβαλαν στη λήψη της τάσης (V_{oc}). Ο υπολογισμός της τιμής της αντίστασης (R) προέκυψε από το λόγο της τάσης προς την ένταση, στην οποία ένταση χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του πρώτου σκέλους του πειράματος DC Voltage.

Πίνακας 9: DC positive/ negative Calculated Impedance

DC positive Calculated Impedance			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
V(V)	10.0025	10.0010	
I(A)	0.1951	0.1990	
Ω (Ohm)	51.2690	50.2563	1.975

DC negative Calculated Impedance			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
V(V)	9.9972	9.9980	
I(A)	0.1950	0.1994	
Ω(Ohm)	51.2681	50.1404	2.200

DC positive Calculated Impedance			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
V(V)	29.9622	29.9700	
I(A)	0.5845	0.5971	
Ω(Ohm)	51.2640	50.1926	2.090

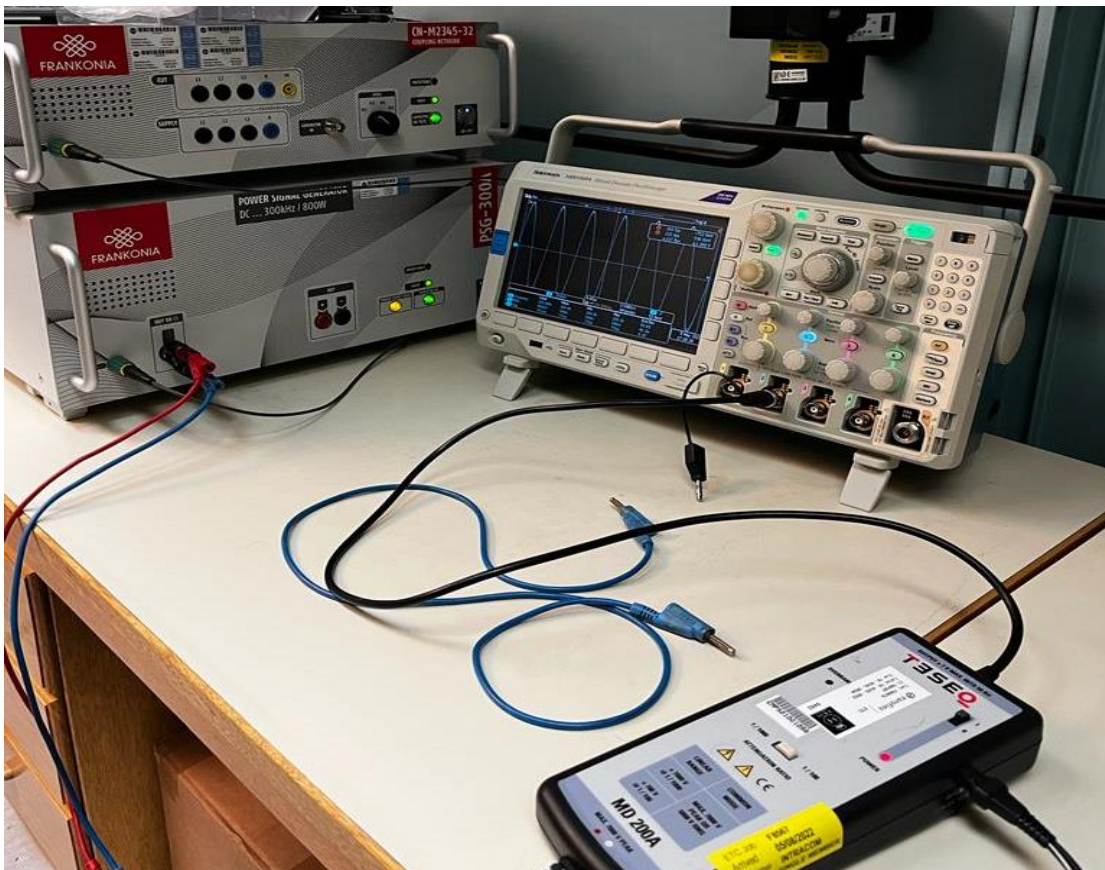
DC negative Calculated Impedance			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
V(V)	29.9503	29.9510	
I(A)	0.5844	0.5973	
Ω(Ohm)	51.2508	50.1440	2.160

DC positive Calculated Impedance			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
V(V)	74.9236	74.9400	
I(A)	1.4944	1.4989	
Ω(Ohm)	50.1370	49.9967	0.280

DC negative Calculated Impedance			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
V(V)	74.9016	69.9910	
I(A)	1.4952	1.4993	
Ω (Ohm)	50.0943	46.6825	6.811

6.3.4 Παράμετρος AC Calculated Impedance

Αναφορικά με το σκέλος του AC Calculated Impedance συνδέσαμε την έξοδο της γεννήτριας το probe cable απευθείας στην είσοδο του παλμογράφου, ανοιχτοκυκλώνοντας συγχρόνως το κύκλωμα μας έτσι ώστε με την εφαρμογή του καταμεριστή να λάβουμε τις αποτελέσματα των τιμών του λόγου της αντίστασης (αντίστοιχη διαδικασία με την προηγούμενη μέτρησή μας για το DC). Αξίζει να υπογραμμίσουμε πως η παροχή της τάσης (V) ήταν σταθερή στα 30 V και η συχνότητα της εκάστοτε δοκιμής μεταβαλλόταν όπως φαίνεται και παρακάτω:



Εικόνα 31. AC Calculated Impedance μέτρηση με τη χρήση καταμεριστή τάσης

Πίνακας 10: AC 15 - 15000 Hz Calculated Impedance

AC 15 Hz Calculated Impedance			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
V(V)	29.8635	20.9945	
I(A)	0.5826	0.4220	
Ω(Ohm)	51.2590	49.7500	2.944

AC 50 Hz Calculated Impedance			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
V(V)	29.886	21.0940	
I(A)	0.5836	0.4250	
Ω(Ohm)	51.2097	49.6329	3.079

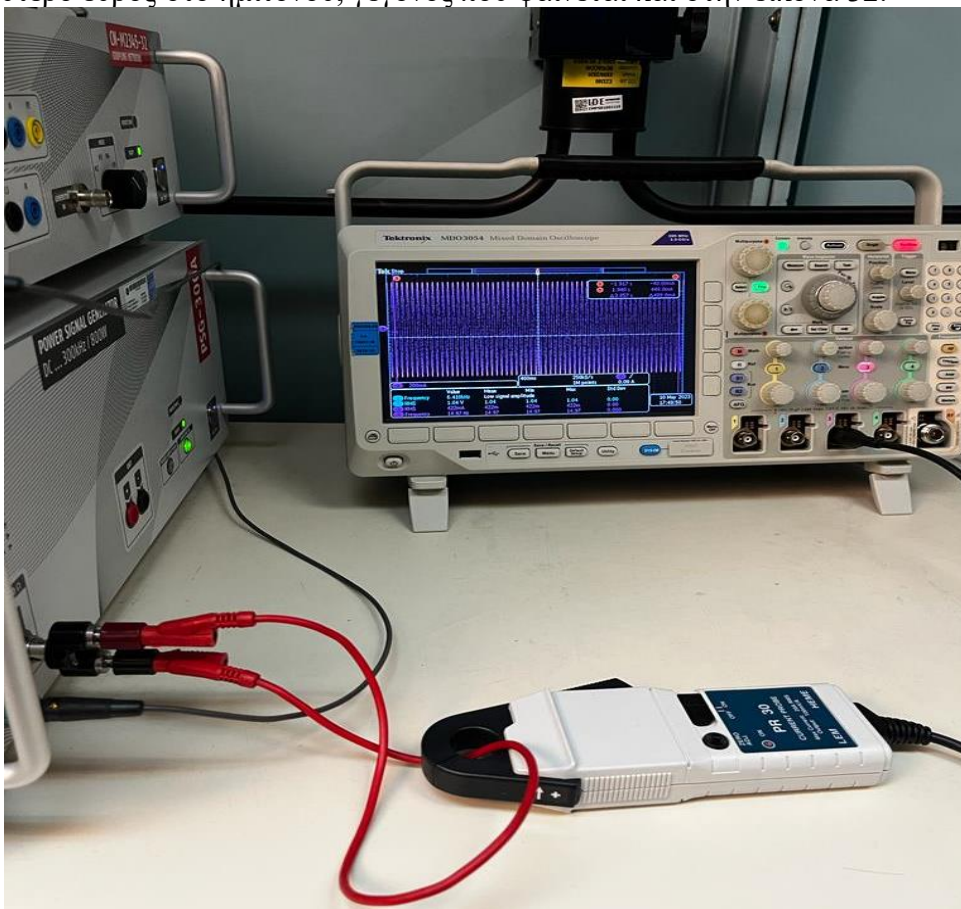
AC 60 Hz Calculated Impedance			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
V(V)	29.8888	20.9945	
I(A)	0.5837	0.4230	
Ω(Ohm)	51.2058	49.6324	3.073

AC 1500 Hz Calculated Impedance			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
V(V)	29.9068	21.0367	
I(A)	0.5845	0.4040	
Ω(Ohm)	51.1665	52.0710	1.768

AC 15000 Hz Calculated Impedance			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
V(V)	29.7097	21.1860	
I(A)	0.585	0.4170	
Ω(Ohm)	50.7858	50.8058	0.039

6.3.5 Παράμετρος AC Crest factor 1V

Στο κομμάτι AC Crest factor υλοποιείται μια απευθείας σύνδεσης με αμπεροτσιμπίδα PR 30 (από την έξοδο της γεννήτριας στην είσοδο του παλμογράφου). Στον παλμογράφο γίνεται κατάλληλη ρύθμιση ώστε να επιτευχθεί ο συγχρονισμός στο αντίστοιχο εύρος συχνότητας συμβάλλοντας στον υπολογισμό του λόγου του Crest factor = Maximal Value @ 1V / RMS Value @ 1V. Ιδιαίτερα σημαντικό για την καλύτερη δειγματοληψία είναι η κατάλληλη κλίμακα (scale) και μεγέθυνση (zoom), έτσι ώστε να υπάρχει μεγαλύτερο εύρος στο ημιτόνου, γεγονός που φαίνεται και στην εικόνα 32.



Εικόνα 32. AC Crest Factor μέτρηση με τη χρήση αμπεροτσιμπίδας

Πίνακας 11: AC 15 - 150000 Hz Crest factor 1V

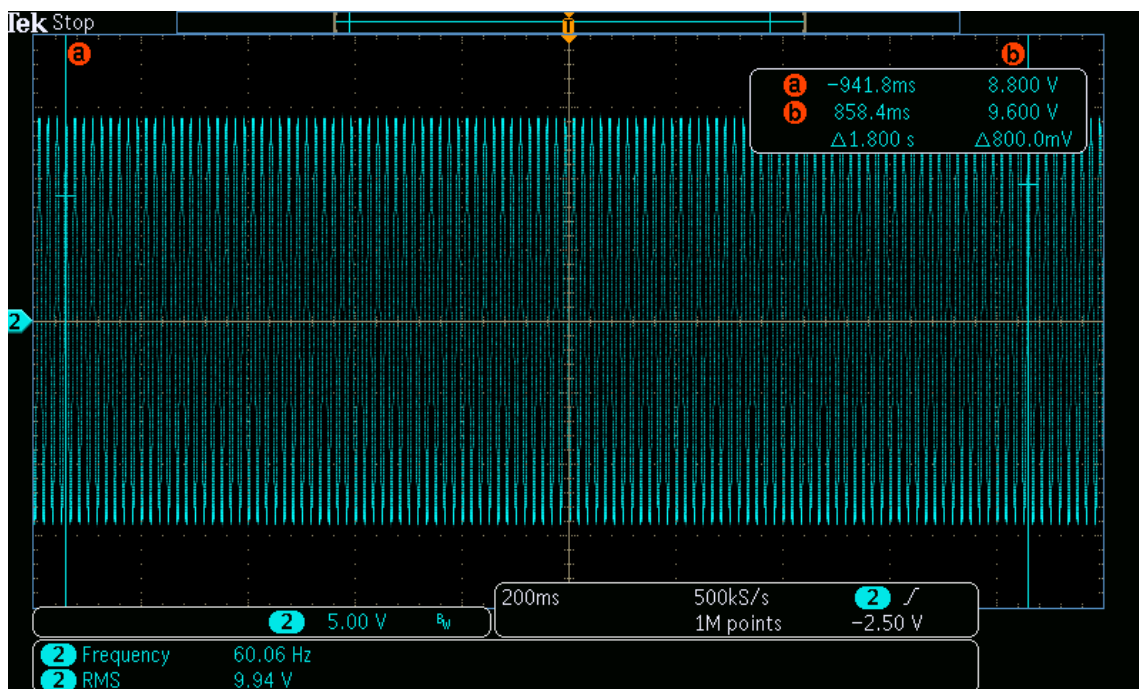
AC 15 Hz Crest factor 1V			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (V)	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
Maximal Value @ 1V	0.4800 V	0.5040	5.000
RMS Value @ 1V	0.3550 V	0.3530	0.563
Crest factor @ 15Hz 1V sine wave	1.3530	1.4278	5.526

AC 1,5 kHz Crest factor 1V			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (V)	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
Maximal Value @ 1V	0.4920 V	0.4960	0.806
RMS Value @ 1V	0.3550 V	0.3520	0.852
Crest factor @ 15Hz 1V sine wave	1.3880	1.4091	1.497

AC 15 kHz Crest factor 1V			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (V)	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
Maximal Value @ 1V	0.4960 V	0.5040	1.613
RMS Value @ 1V	0.3550 V	0.3540	0.282
Crest factor @ 15Hz 1V sine wave	1.3980	1.4237	1.840

AC 100 kHz Crest factor 1V			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (V)	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
Maximal Value @ 1V	0.4960 V	0.4960	0.000
RMS Value @ 1V	0.3550 V	0.3560	0.282
Crest factor @ 15Hz 1V sine wave	1.3960	1.3933	0.196

AC 150 kHz Crest factor 1V			
	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo (V)	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
Maximal Value @ 1V	0.4960 V	0.4970	0.202
RMS Value @ 1V	0.3540 V	0.3570	0.847
Crest factor @ 15Hz 1V sine wave	1.4010	1.3922	0.631



Εικόνα 33. Στιγμιότυπο ημιτονοειδούς σήματος σε συχνότητα 60 Hz

6.3.6 Παράμετρος Ρυθμισμένης Συχνότητας 1Hz - 300kHz

Διατηρώντας τη συνδεσμολογία του κυκλώματος μας και αλλάζοντας τις καταχωρήσεις του προγράμματος με βάση την εικόνα 32-33, επιτυγχάνεται η υλοποίηση του παρακάτω πίνακα συχνοτήτων για το εύρος δοκιμών 1Hz - 300kHz. Με τον τρόπο αυτό, πραγματοποιήθηκε και το τελευταίο στάδιο του πειράματος διακρίβωσης τιμών με βάση αμφότερα το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16 και το πιστοποιητικό διακρίβωσης της Testo (4556579).

Πίνακας 12: Frequency 1Hz - 300kHz

Frequency 1Hz - 300kHz			
Amplitude=1V, Amplitude=1V Tolerance +/-10% Informative			
Στάδια Μέτρησης	Τιμές από Πιστοποιητικό της Testo	Τιμές από την μέτρηση του Εργαστηρίου	Απόκλιση (%)
1Hz	1.00142 Hz	1.002 Hz	0.058
10Hz	9.99983 Hz	10.01 Hz	0.102
16.7Hz	16.69919 Hz	16.69 Hz	0.055
50Hz	49.99752 Hz	49.95 Hz	0.095
60Hz	59.99867 Hz	59.91 Hz	0.148
100Hz	99.99544 Hz	99.97 Hz	0.025
400Hz	399.98535 Hz	399.9 Hz	0.021
800Hz	799.97206 Hz	798.8 Hz	0.147
1kHz	0.99996 kHz	1.001 kHz	0.104
1.6kHz	1.5999 kHz	1.597 kHz	0.181
10kHz	9.99964 kHz	9.987 kHz	0.126
100kHz	99.99645 kHz	99.98 kHz	0.016
300kHz	299.99036 kHz	300.01 kHz	0.007

6.3.7 Παράμετρος THD & Ripple

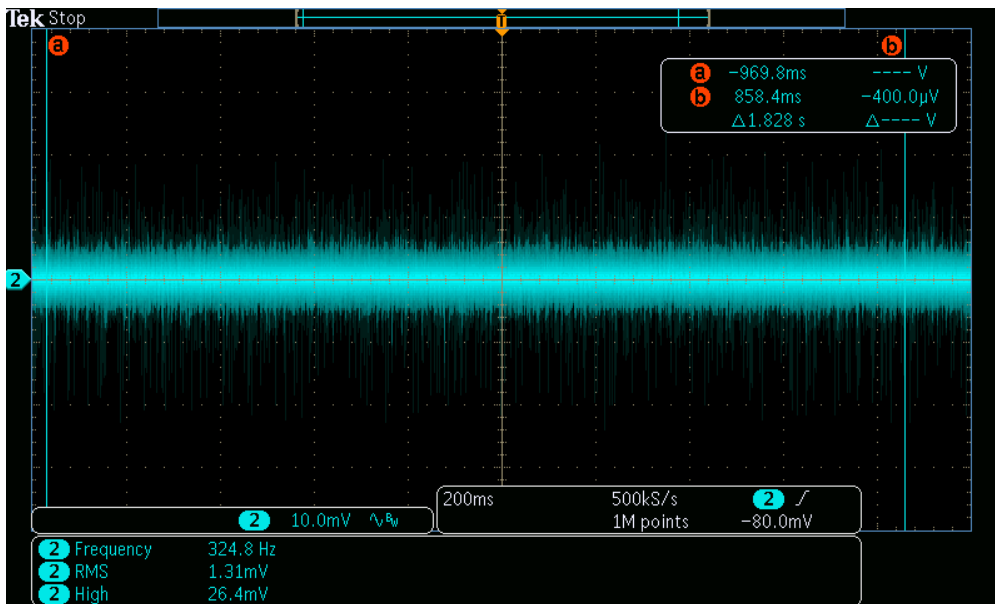
Όπως παρουσιάστηκε και στις ενότητες 4.4.2 – 4.4.4, στο Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-04-16 E2:2016 καθορίζονται απαιτήσεις σχετικά με την μορφή της τάσης εξόδου της γεννήτριας, οι οποίες είτε αναφέρονται στην παράμετρο Ripple (Κυμάτωση) για DC συχνότητα της τάσης είτε στην συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) για συχνότητες AC αυτής. Και για τις δύο περιπτώσεις καθορίζονται σχετικά όρια στο προαναφερθέν Πρότυπο:

- Για τις διακριτές συχνότητες 16 2/3 Hz, 50 Hz και 60 Hz, το THD της κυματομορφής εξόδου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 10%
- Για το εύρος συχνοτήτων 5 Hz έως 150 kHz, το THD της κυματομορφής εξόδου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 1%
- Αντίστοιχα, για κυματομορφές εξόδου συνεχούς τάσης, η τιμή της παραμέτρου Ripple δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 5%

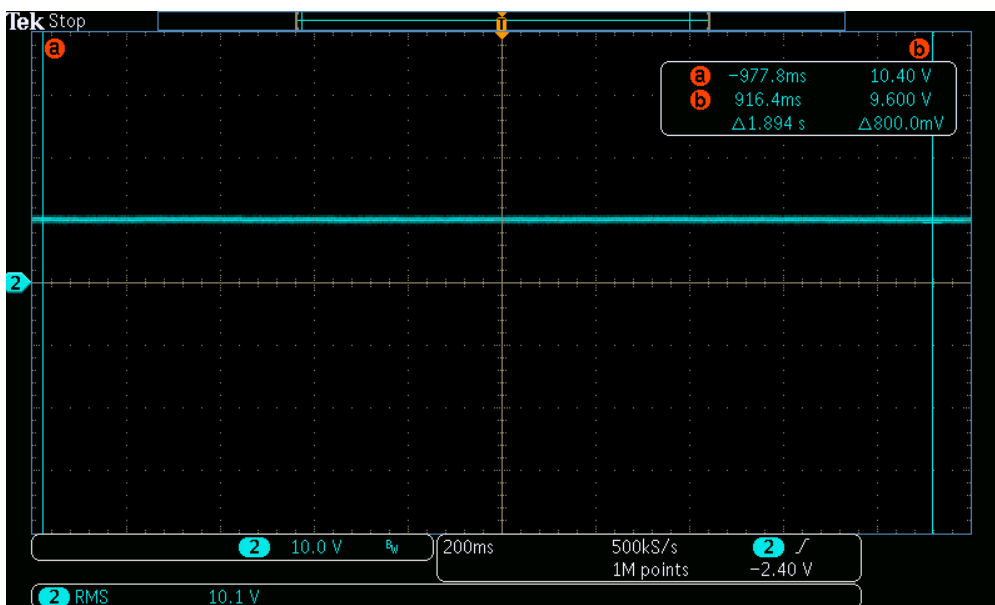
6.3.7.1 Καταγραφή μετρήσεων με τη χρήση παλμογράφου

Με τη χρήση του παλμογράφου της Tektronix MDO3054 πραγματοποιήθηκε καταγραφή και αποθήκευση, σε μορφή .csv, κυματομορφών της τάσης εξόδου για τις συχνότητες: 5Hz, 15Hz, 16.7Hz, 50Hz, 60Hz (Εικόνα 33), 1.5kHz, 15kHz, 100kHz και 150kHz. Επίσης πραγματοποιήθηκε καταγραφή της κυματομορφής της συνεχούς τάσης εξόδου για ρύθμιση AC Coupling (Εικόνα 34) και DC Coupling (Εικόνα 35) του παλμογράφου με στόχο τον υπολογισμό, μέσω της εξίσωσης (7) που ακολουθεί, της τιμής της παραμέτρου Ripple.

$$V_{Ripple}(\%) = \frac{V_{rms}(AC\ Coupling)}{V_{dc}(DC\ Coupling)} * 100\% \quad (7)$$



Εικόνα 34. Κυματομορφή τάσης για DC τάση εξόδου της γεννήτριας με χρήση AC Coupling



Εικόνα 35. Κυματομορφή τάσης για DC τάση εξόδου της γεννήτριας με χρήση DC Coupling

6.3.7.2 Υπολογισμός των παραμέτρων THD και Ripple με χρήση του λογισμικού Matlab

Για τον υπολογισμό των συγκεκριμένων παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB και ο σχετικός κώδικας (Πίνακας 13), καθώς και τα αποτελέσματα των υπολογισμών (Εικόνα 37), παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 13: Κώδικας Matlab για τον υπολογισμό των παραμέτρων THD και Ripple

<p>Αρχικοποίηση:</p>	<pre>clc; close all; clear all; nharm=80; %Αριθμός αρμονικών για τον οποίο θα πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός</pre>
<p>Εισαγωγή κυματομορφών σε μορφή .csv και υπολογισμός THD:</p>	<pre>Fs5=500000; %Συχνότητα δειγματοληψίας για τον υπολογισμό του THD (σκέλος FFT) TIME5=xlsread('5Hz.csv','A1:A1000000'); % Εισαγωγή κυματομορφών (χρόνος) x5=xlsread('5Hz.csv','B1:B1000000'); % Εισαγωγή κυματομορφών (τάση) [thd_db5,harpow5,harmfreq5] = thd(x5,Fs5,nharm); % Υπολογισμός THD percent_thd_5 = 100*(10^(thd_db5/20)); % Μετατροπή THD σε ποσοστό Fs15=500000; TIME15=xlsread('15Hz.csv','A1:A1000000'); x15=xlsread('15Hz.csv','B1:B1000000'); [thd_db15,harpow15,harmfreq15] = thd(x15,Fs15,nharm); percent_thd_15 = 100*(10^(thd_db15/20)); Fs16_7=500000; TIME16_7=xlsread('16_7Hz.csv','A1:A1000000'); x16_7=xlsread('16_7Hz.csv','B1:B1000000'); [thd_db16_7,harpow16_7,harmfreq16_7] = thd(x16_7,Fs16_7,nharm); percent_thd_16_7 = 100*(10^(thd_db16_7/20)); Fs50=500000; TIME50=xlsread('50Hz.csv','A1:A1000000'); x50=xlsread('50Hz.csv','B1:B1000000'); [thd_db50,harpow50,harmfreq50] = thd(x50,Fs50,nharm); percent_thd_50 = 100*(10^(thd_db50/20)); Fs60=500000; TIME60=xlsread('60Hz.csv','A1:A1000000'); x60=xlsread('60Hz.csv','B1:B1000000'); [thd_db60,harpow60,harmfreq60] = thd(x60,Fs60,nharm); percent_thd_60 = 100*(10^(thd_db60/20)); Fs1500=5000000; TIME1500=xlsread('1_5kHz.csv','A1:A1000000'); x1500=xlsread('1_5kHz.csv','B1:B1000000'); [thd_db1500,harpow1500,harmfreq1500] = thd(x1500,Fs1500,nharm); percent_thd_1500 = 100*(10^(thd_db1500/20)); Fs15000=50000000; TIME15000=xlsread('15kHz.csv','A1:A1000000'); x15000=xlsread('15kHz.csv','B1:B1000000'); [thd_db15000,harpow15000,harmfreq15000] = thd(x15000,Fs15000,nharm); percent_thd_15000 = 100*(10^(thd_db15000/20)); Fs100000=500000000; TIME100000=xlsread('100kHz.csv','A1:A1000000'); x100000=xlsread('100kHz.csv','B1:B1000000'); [thd_db100000,harpow100000,harmfreq100000] = thd(x100000,Fs100000,nharm); percent_thd_100000 = 100*(10^(thd_db100000/20)); Fs150000=500000000;</pre>

	<pre> TIME150000=xlsread('150kHz.csv','A1:A1000000'); x150000=xlsread('150kHz.csv','B1:B1000000'); [thd_db150000,harpow150000,harmfreq150000] = thd(x150000,Fs150000,nharm); percent_thd_150000 = 100*(10^(thd_db150000/20)); </pre>
<i>Εισαγωγή από τον χρήστη των παραμέτρων για τον υπολογισμό του Ripple και υπολογισμός του:</i>	<pre> prompt = "DC Voltage Measurement (in V): "; % Εισαγωγή DC τάσης από χρήστη DC_voltage = input(prompt); prompt = "AC Voltage RMS Measurement (in mV): "; % Εισαγωγή AC τάσης από χρήστη AC_voltage_mV = input(prompt); AC_voltage_V=AC_voltage_mV/1000; % Υπολογισμός Ripple Ripple = (AC_voltage_V/DC_voltage)*100; </pre>
<i>Παρουσίαση των αποτελεσμάτων:</i>	<pre> X10=["Total Harmonic Distortion at 5HZ: ',num2str(percent_thd_5),'%']; disp(X10); X1=["Total Harmonic Distortion at 15HZ: ',num2str(percent_thd_15),'%']; disp(X1); X6=["Total Harmonic Distortion at 16.7HZ: ',num2str(percent_thd_16_7),'%']; disp(X6); X7=["Total Harmonic Distortion at 50HZ: ',num2str(percent_thd_50),'%']; disp(X7); X8=["Total Harmonic Distortion at 60HZ: ',num2str(percent_thd_60),'%']; disp(X8); X2=["Total Harmonic Distortion at 1.5kHz: ',num2str(percent_thd_1500),'%']; disp(X2); X3=["Total Harmonic Distortion at 15kHz: ',num2str(percent_thd_15000),'%']; disp(X3); X4=["Total Harmonic Distortion at 100kHz: ',num2str(percent_thd_100000),'%']; disp(X4); X5=["Total Harmonic Distortion at 150kHz: ',num2str(percent_thd_150000),'%']; disp(X5); X9=["DC Voltage Ripple: ',num2str(Ripple),'%']; disp(X9); </pre>
<i>Γραφική απεικόνιση των καταγεγραμμένων κυματομορφών:</i>	<pre> figure(1) plot(TIME5,x5); figure(2) plot(TIME15,x15); figure(3) plot(TIME16_7,x16_7); figure(4) plot(TIME50,x50); figure(5) plot(TIME60,x60); figure(6) plot(TIME1500,x1500); figure(7) plot(TIME15000,x15000); figure(8) plot(TIME100000,x100000); </pre>


```
figure(9)
plot(TIME150000,x150000);
```

```
125 - figure(9)
126 - plot(TIME150000,x150000);
127
128
```

```
Command Window
DC Voltage Measurement (in V): 10.1
AC Voltage RMS Measurement (in mV): 1.31
Total Harmonic Distortion at 5HZ: 0.71476%
Total Harmonic Distortion at 15HZ: 0.71945%
Total Harmonic Distortion at 16.7HZ: 0.50142%
Total Harmonic Distortion at 50HZ: 0.5062%
Total Harmonic Distortion at 60HZ: 0.50337%
Total Harmonic Distortion at 1.5kHz: 0.71451%
Total Harmonic Distortion at 15kHz: 0.69762%
Total Harmonic Distortion at 100kHz: 0.63074%
Total Harmonic Distortion at 150kHz: 0.59189%
DC Voltage Ripple: 0.01297%
```

Εικόνα 36. Αποτελέσματα υπολογισμού των παραμέτρων THD και Ripple μέσω του λογισμικού MATLAB

Συνοψίζοντας, τη συγκεκριμένη ενότητα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο συγκεκριμένος υπολογισμός δεν παρουσιάζεται στο πιστοποιητικό διακρίβωσης (Testo – Certificate number: 4556579) το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διαδικασίας διακρίβωσης και κατά συνέπεια αποτελεί συνεισφορά στην, όσο το δυνατόν, πληρέστερη κάλυψη των απαιτήσεων του Προτύπου ΕΛΟΤ EN 61000-04-16 E2:2016.

7. Συμπεράσματα και η Επόμενη Μέρα

7.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δόθηκαν οι ορισμοί της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας και της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Παρατάθηκαν ζητήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), όπως οι φάσεις, τα βήματα, τα προβλήματα που προκύπτουν αλλά και οι πηγές που ευθύνονται για φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI). Μάλιστα, εξετάστηκε ενδελεχότερα το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον ενός βαποριού με έμφαση στην ηλεκτρογεννήτρια, όντας ζωτικής λειτουργίας, γεγονός που επιβεβαιώνει την ανάγκη της συνεχούς αναθεώρησης των Προτύπων για τον έλεγχο της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας ηλεκτρολογικού / ηλεκτρονικού ναυτιλιακού εξοπλισμού.

Επιπροσθέτως, για καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών που περιγράφονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-16 δόθηκαν αναλυτικά οι διαδικασίες που απαιτούνται τόσο για την διεξαγωγή του πειράματος της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας όσο και για τη διακρίβωση του εξοπλισμού. Κατά την πειραματική διεξαγωγή της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε η διακρίβωση όλων των παραμέτρων που παρουσιάζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-16, οι οποίες είναι: μορφή κύματος τάσης εξόδου, η αντίσταση πηγής (V_{oc} τάση εξόδου ανοιχτού κυκλώματος / I_{sc} ρεύμα σύντομου κυκλώματος), η οποία έγινε τόσο στο υψηλότερο όσο και στο χαμηλότερο επίπεδο δοκιμής για γεννήτριες συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος σε συχνοτικό φάσμα 0 Hz έως 150 kHz.

7.2 Θέματα Μελλοντικής Διερεύνησης του Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16

Υλοποιώντας επιτυχώς τόσο το πειραματικό κομμάτι της δειγματοληψίας όσο και της διακρίβωσης του ναυτιλιακού εξοπλισμού, και ειδικότερα της γεννήτριας Frankonia PSG-300/ PSG-300A καταλήξαμε στην εξής παρατήρηση. Ανατρέχοντας, λοιπόν, στο σκέλος της διακρίβωσης, στην οποία συνδυάσαμε με ικανοποιητικό τρόπο το περιεχόμενο του πρότυπου ΕΛΟΤ EN 61000-4-16 και του πιστοποιητικό διακρίβωσης (Calibration Certificate) Testo, εντοπίστηκε πως, λόγω έλλειψης κατάλληλου εξοπλισμού, αδυνατούσαμε να εξετάσουμε την παράμετρο **AC Calculate Impedance** για συχνότητες άνω των **100kHz**.

Συνεπώς, οι ελλείψεις αυτές θα μπορέσουν να καλυφθούν με την αγορά ειδικού εργαστηριακού εξοπλισμού, που να τηρεί τις προδιαγραφές δοκιμής ατρωσίας σε αγόμενες κοινότοπες διαταραχές σε ναυτιλιακό εξοπλισμό. Πιο συγκεκριμένα, απαραίτητη είναι η ύπαρξη κατάλληλου πολυμέτρου και probe cable, των οποίων τα χαρακτηριστικά θα πρέπει να μπορούν να λειτουργήσουν τουλάχιστον με Bandwidth το 1MHz, μετρώντας ρεύμα από 20mA έως 1A και σφάλμα μικρότερο του 5%.

7.3 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία δύναται να αποτελέσει τη βάση για τη συγγραφή μιας τεχνικής οδηγίας για τη διακρίβωση ναυτιλιακού εξοπλισμού δοκιμών και ειδικότερα μιας ηλεκτρογεννήτριας, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-16 στο πλαίσιο της διαπίστευσης του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων κατά

ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025. Με τον τρόπο αυτό το εργαστήριο μπορεί να εκτελεί με διαπιστευμένο τρόπο το σύνολο των ελέγχων ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας ηλεκτρολογικού / ηλεκτρονικού ναυτιλιακού εξοπλισμού, κάτι το οποίο θα φέρει μεγάλη εισροή ναυτιλιακών εταιριών, έχοντας πολλαπλά οικονομικά και εργαστηριακά οφέλη, εντός του γενικότερου κλίματος συνεργασίας.

Αξίζει να υπογραμμιστεί ότι, στο σύνολο της παρούσας διπλωματικής εξετάστηκε αναλυτικώς η διεξαγωγή δοκιμής ατρωσίας σε αγόμενες κοινότροπες διαταραχές, η οποία στηρίχθηκε στην πειραματική οδηγία του διαπιστευμένου κατά ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025 Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του ΕΜΠ.

Αναφορικά με το κομμάτι της διακρίβωση της γεννήτριας σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-16, συμπεριλαμβάνοντας και το πιστοποιητικό διακρίβωσης (Calibration Certificate) Testo, εξετάστηκαν επιτυχώς όλο το σύνολο των παραμέτρων με μεγαλύτερη ακρίβεια από τα επιτρεπόμενα όρια τιμών διαπίστευσης. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να επισημανθεί πως παρατηρήθηκαν ορισμένα τεχνικού τύπου εμπόδια, τα όποια εξαιτίας της έλλειψης κατάλληλου μετρητικού εξοπλισμού ήταν αδύνατον να πραγματοποιηθεί το κομμάτι της διακρίβωσης της λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας, της παραμέτρου AC Calculate Impedance για συχνότητες άνω των 100kHz.

Εν κατακλείδι, κατόπιν συνεργασίας των επιβλεπόντων της παρούσας διπλωματικής, υλοποιήθηκε επιτυχώς ο αναλυτικός υπολογισμός των παράμετροι διακρίβωσης Total Harmonic Distortion (THD) και Ripple, κάτι που δεν γινόταν στο πιστοποιητικό Testo (4556579). Η συνεισφορά αυτή, υλοποιήθηκε με την συγγραφή κώδικα στο πρόγραμμα MATLAB(Ενότητα 6.3.7 *Παράμετρος THD & Ripple*), το οποίο εξετάζει με ακρίβεια της τάξης του 1% την προσομοίωση των παραμέτρων THD & Ripple, κατόπιν εισαγωγής σε μορφή .csv, κυματομορφών της τάσης εξόδου για τις συχνότητες: 5Hz, 15Hz, 16.7Hz, 50Hz, 60Hz (Εικόνα 35), 1.5kHz, 15kHz, 100kHz και 150kHz.

Βιβλιογραφία

Ξερόγλωσση

- [1] Armstrong, K. (2007). *A Handbook of EMC Design Techniques for Electromagnetic*
- [2] Bakkali, M., & Mascareñas-Perez-Iñigo, C. (2015, July). Real time digital signal processing and measurement method for electromagnetic compatibility verification into the ships. In *2015 IEEE International Conference on Information and Digital Technologies* (pp. 28-34).
- [3] Cardoso, A. J. M., Popkov, E., & Koptjaev, E. (2020, September). Evolution and development prospects of electric propulsion systems of large sea ships. In *IEEE 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)* (pp. 296-303).
- [4] Carter, W. C. (1994). *Electromagnetic Compatibility (EMC) Standards Handbook*. ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ANALYSIS CENTER ANNAPOLIS MD.
- [5] Coulomb, C. A. (1785). Premier mémoire sur l'électricité et le magnétisme. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, 569-577.
- [6] Delaballe, J. (2001). *EMC: electromagnetic compatibility*. Cahier technique, (149).
- [7] Dmitriev, B. F., Vorshevskii, P. A., & Reznichenko, V. V. (2017). Methods and Equipment to Provide Electromagnetic Compatibility in Marine Power-Supply Systems. *Russian Electrical Engineering*, 88, 795-799.
- [8] Faraday, M. (1832). *Experimental Researches in Electricity*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 122, 125-162.
- [9] Gilbert, W. (1600). *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*. Peter Short.
- [10] Kaiser, K. L. (2009). *Electromagnetic Compatibility Handbook*. CRC Press.
- [11] Katulski, R. J., & Namiotko, R. (2019). Topological Model of an Electromagnetic Environment Inside a Ship for Electromagnetic Compatibility (EMC) Analysis. *Applied Sciences*, 9(20), 4293.
- [12] Keller, R. B. (2023). *Design for Electromagnetic Compatibility--In a Nutshell: Theory and Practice* (p. 416). Springer Nature.
- [13] Maxwell, J. C. (1865). *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155, 459-512.
- [14] Montrose, M. I., & Nakauchi, E. (2009). *Testing for EMC Compliance: Approaches and Techniques*. John Wiley & Sons.

- [15] Omollo, N., van der Ven, J. K., Vogt-Ardatjew, R., & Leferink, F. (2020, July). Determining the electromagnetic environment on board ships for risk-based approach, "2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI) "
- [16] Ott, H. W. (2009). *Electromagnetic Compatibility Engineering*. John Wiley & Sons. Ørsted, H. C. (1820). *Experimenta Circa Effectum Conflictus Electrici in Acum Magneticam*. *Journal für Chemie und Physik*, 29, 275-280.
- [17] Paul, C. R. (2006). *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. John Wiley & Sons. Ramdani, M., Boyer, A., & Sicard, E. (2013).
- [18] V. N. Sheludko, G. V. Belskii and A. V. Grigoryev, "Issues of electromagnetic compatibility of electric equipment on ships with electric propulsion systems," 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 1-4
- [19] Tait, G. B., & Slocum, M. B. (2008, August). Electromagnetic environment characterization of below-deck spaces in ships. In 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (pp. 1-6).
- [20] Violette, N. (2013). *Electromagnetic compatibility handbook*. Springer. IEC 60381-2, Analogue signals for process control systems – Part 2: Direct voltage Signals
- [21] Ott, H. W. (2009). *Electromagnetic Compatibility Engineering*. John Wiley & Sons
- [22] Ørsted, H. C. (1820). *Experimenta Circa Effectum Conflictus Electrici in Acum Magneticam*. *Journal für Chemie und Physik*, 29, 275-280
- [23] IEC 61000-4-16 (2015), *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-16: Testing and measurement techniques – Test for immunity to conducted, common mode disturbances in the frequency range 0 Hz to 150 kHz*
- [24] Lloyd's Register Type Approval System - Test Specification Number 1 (2021) Lloyd's Register Type Approval System – Test Specification Number 1
- [25] IEC TR 61000-2-3 (1992), *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 3: Description of the environment – Radiated and non-network-frequency-related conducted phenomena*
- [26] IEC TR 61000-2-5 (2017), *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-5: Environment – Description and classification of electromagnetic environments*
- [27] IEC 61000-4-6 (2023), *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-6: Testing and measurement techniques – Immunity to conducted disturbances, induced by radiofrequency fields*
- [28] IEC 61000-4-13 (2015), *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-13: Testing and measurement techniques – Harmonics and interharmonics including mains signaling at a.c. power port, low frequency immunity tests*

- [29] IEC 61000-4-19 (2014), Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-19: Testing and measurement techniques – Test for immunity to conducted, differential mode disturbances and signaling in the frequency range 2 kHz to 150 kHz at a.c. power ports
- [30] IEC 60068-1 (2013), Environmental testing – Part 1: General and guidance
- [31] IEC 60050-161 (2021), International Electrotechnical Vocabulary – Part 161: Electromagnetic compatibility
- [32] IEC 61000-4 (all parts) (2012), Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-XX: Testing and measurement techniques

Ελληνόγλωσσα

- [33] Παλιάτσος, Ε.Η. (2019) Διακρίβωση συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου και ανάλυση μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας σε μετασχηματιστές έντασης ρεύματος. Διπλωματική Εργασία. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ.

Ιστότοποι

- [34] Compatibility. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 7(2), 8-16.
- [35] CENELEC. (2021). European Committee for Electrotechnical Standardization. Retrieved from <https://www.cenelec.eu/>
- [36] IEEE. (2021). IEEE Standards Association. Retrieved from <https://standards.ieee.org/>
- [37] International Electrotechnical Commission. (2021). IEC 61000: Electromagnetic compatibility (EMC) standards. Retrieved from <https://www.iec.ch/emc>
- [38] International Electrotechnical Commission. (2021a). EN 61000-2: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment. Retrieved from <https://www.iec.ch/emc>
- [39] International Electrotechnical Commission. (2021b). EN 61000-3: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3: Limits. Retrieved from <https://www.iec.ch/emc>
- [40] International Electrotechnical Commission. (2021c). EN 61000-4: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques. Retrieved from <https://www.iec.ch/emc>
- [41] International Electrotechnical Commission. (2021d). EN 61000-5: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines. Retrieved from <https://www.iec.ch/emc>

- [42] International Electrotechnical Commission. (2021e). EN 61000-6: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6: Generic standards. Retrieved from <https://www.iec.ch/emc>
- [43] International Special Committee on Radio Interference. (2021). CISPR Standards.
- [44] Retrieved from <https://www.iec.ch/cispr>
- [45] Marine insight (2021) <https://www.marineinsight.com/marine-electrical/what-is-marine-electricity/>
- [46] Integrated Circuits: Techniques for Low Emission and Susceptibility. Springer Science & Business Media.WARTSILA. (2023). Ανάκτηση May 20, 2023, from <https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions/shaft-generator>
- [47] Dolphin charger. (2022, December 5). Ανάκτηση May 20, 2023, από <https://www.dolphin-charger.com/news/electromagnetic-interference-marine-vessels>