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

Καταγραφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για διαφορετικά σημεία έγχυσης κατά την έμμεση εφαρμογή εκφορτίσεων σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 και επίδραση σε SpaceWire Link

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΟΔΟΣΙΟΣ Κ. ΛΑΜΠΡΙΝΟΣ

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης

Αθήνα, Μάρτιος 2022

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

Καταγραφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για διαφορετικά σημεία έγχυσης κατά την έμμεση εφαρμογή εκφορτίσεων σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 και επίδραση σε SpaceWire Link

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΟΔΟΣΙΟΣ Κ. ΛΑΜΠΡΙΝΟΣ

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης

Τριμελής εξεταστική επιτροπή

……

Ιωάννης Φ. Γκόνος	Φραγκίσκος Β. Τοπαλής	Γέωργιος Ν. Κορρές
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ	Καθηγητής ΕΜΠ	Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2022

.....
Θεοδόσιος, Κ. Λαμπρινός

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

Copyright © Θεοδόσιος, Κ. Λαμπρινός, 2022.Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το φαινόμενο των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (electrostatic discharges, ESD), με σκοπό τη μέτρηση του ρεύματος που προκύπτει από δοκιμές αυτών, εφαρμόζοντας μεθοδολογία που ακόμη μελετάται, και την επιρροή που ασκούν σε ένα σύνδεσμο (link) του SpaceWire. Το κύριο Πρότυπο, με βάση το οποίο πραγματοποιούνται δοκιμές και έλεγχοι ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε επίπεδο ηλεκτρονικών συστημάτων τις τελευταίες δεκαετίες, είναι το IEC 61000-4-2, το οποίο ορίζει αυστηρά την κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και τις βασικές της παραμέτρους. Στο πρώτο μέρος εξετάζεται η περιγραφόμενη στο Πρότυπο διαδικασία έμμεσης εφαρμογής των εκφορτίσεων, και μελετώνται αποκλίσεις στο παραγόμενο ρεύμα, για διαφορετικά σημεία έγχυσης του παλμού στο εργαστήριο και σε διαφορετικά επίπεδα τάσης. Αφού περιγραφεί το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, εξετάζεται το σχετικό Πρότυπο Δοκιμής, γίνεται αναφορά στο πλαίσιο μέσα στο οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα και οι μετρήσεις, με περιγραφή και απεικόνιση του εξοπλισμού, της διάταξης, της προετοιμασίας και της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή των βημάτων της μεθόδου ανακατασκευής ρεύματος που εφαρμόστηκε για την ορθή καταγραφή του εγχεόμενου ρεύματος με τη χρήση αισθητήρα ρεύματος. Έτσι, καθορίστηκε ο τρόπος με τον οποίο η απόσταση των επιλεγμένων σημείων από το σημείο γείωσης του οριζόντιου επιπέδου ζεύξης και η επιλογή του επιπέδου τάσης για κάθε πολικότητα, θετική ή αρνητική, επιδρούν στη μεταβολή των κυματομορφών και των σχετικών παραμέτρων που περιγράφονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 και αναλύθηκε με απεικόνιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με τη μορφή κατάλληλων γραφημάτων και πινάκων και με προσθήκη των απαραίτητων σχολιασμών. Κατόπιν, μελετάται λεπτομερώς το Πρότυπο ECSS-E-ST-50-12C του SpaceWire που ορίζει όλες τις παραμέτρους των στοιχείων που το αποτελούν και τις λειτουργίες που αυτά επιτελούν. Στο τελευταίο σκέλος της εργασίας, γίνεται περιγραφή των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προσομοιωτή iSAFT και εξοπλισμό μη διαθέσιμο σε άλλα εργαστήρια της χώρας και των εξαγόμενων συμπερασμάτων για τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η κίνηση πακέτων σε μια σύνδεση SpaceWire με αναφορά στα σφάλματα και τις απώλειες αυτής.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτροστατική εκφόρτιση, έμμεση εκφόρτιση, πρότυπο IEC 61000-4-2, παράμετροι, ανακατασκευή ρεύματος, κυματομορφή ρεύματος, απόσταση, επίπεδο τάσης, SpaceWire link, iSAFT, πακέτα, σφάλματα

Abstract

The subject of this thesis is the electrostatic discharges (ESD), with the aim of measuring the current resulting from their tests, implementing a method is still under study, and the influence they exert on a SpaceWire link. The main standard, on the basis of which electrostatic discharge tests and tests have been carried out at the level of electronic systems in the last decades, is IEC 61000-4-2, which strictly defines the electrostatic discharge current waveform and its basic parameters. The first part examines the process of indirect application of discharges described in the Standard and studies deviations in the generated current, for different pulse injection points and at different voltage levels. After describing the phenomenon of electrostatic discharge, the relevant test standard is examined, reference is made to the context in which the experiment was performed and the measurements, with a description and illustration of the equipment, the device, the preparation and the experimental procedure followed. Then, a detailed description of the steps of the current reconstruction method applied for the correct recording of the injected current using a current probe is performed. Thus, the way in which the distance of the selected points from the ground point of the horizontal coupling plane and the selection of the voltage level for each polarity, positive or negative, affect the change of the waveforms and the related parameters described in IEC 61000 -4-2 was determined and it was analyzed by displaying the results of the measurements in the form of appropriate graphs and tables and by adding the necessary comments. Next, the SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C standard is studied in detail, which defines all the parameters of the components that make it up and the functions that they perform. In the last part of the work, the tests performed with the help of the iSAFT simulator and equipment not available in most laboratories and the conclusions drawn on how packet traffic on a SpaceWire connection is affected due to electrostatic charges are described with reference to its errors and losses.

Keywords: Electrostatic discharge, indirect discharge, IEC 61000-4-2 standard, parameters, current reconstruction, current waveform, distance, voltage level, SpaceWire link, iSAFT, packets, errors

Ευχαριστίες

Αρχικά, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέπων της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Παπασταμάτη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την πρώτη μας επικοινωνία μέχρι και σήμερα και την άριστη καθοδήγηση και συνεργασία. Επίσης, ευχαριστώ τον καθηγητή μου κ. Γκόνο, για τη διευκόλυνση που μου παρείχε για τη διπλωματική εργασία αλλά και τις γνώσεις και εμπειρία κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, ευχαριστώ από καρδιάς τους γονείς μου, τα αδέρφια μου, τους φίλους μου και κοντινούς μου ανθρώπους για την απεριόριστη στήριξη και ώθηση που μου έδωσαν καθ΄ όλη την ακαδημαϊκή μου πορεία και τα φοιτητικά μου χρόνια.

Περιεχόμενα

Περίληψη 5
Abstract 7
Ευρετήριο Εικόνων 13
Ευρετήριο Πινάκων 16
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση 18
1.1. Περί Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας 18
1.2. Γενικά για το φαινόμενο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 19
1.2.2. Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής 22
1.2.3. Ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό 23
1.2.4. Μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 25
1.3. Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 26
1.4. Ανακατασκευή κυματομορφής ρεύματος ESD 28
Κεφάλαιο 2: Το πρωτόκολλο SpaceWire 31
2.1. Εισαγωγή 31
2.2. Περιγραφή και λειτουργία του Προτύπου ECSS-E-ST-50- 12C 31
2.3. Το φυσικό επίπεδο 36
2.3.1. Καλώδια 36
2.3.2. Σύνδεσμοι 38
2.3.3. LVDS 40
2.4. Επίπεδο κωδικοποίησης 41
2.5. Επίπεδο σύνδεσης δεδομένων 42
2.6. Επίπεδο δικτύου 43
2.7. Συμπεράσματα 45
Κεφάλαιο 3: Διάταξη, εξοπλισμός και διεξαγωγή πειραμάτων 47
3.1. Προετοιμασία 47
3.2. Εξοπλισμός εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 48
3.3. Πειραματική διάταξη και διαδικασία 50
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα μετρήσεων 53
4.1. Επεξεργασία μετρήσεων με πρόγραμμα ανακατασκευής ρεύματος σε Matlab 53
4.2. Αποτελέσματα και συγκριτική παρουσίαση 57
Κεφάλαιο 5: Συσχέτιση με Spacewire link 72
5.1. Σύζευξη πεδίου σε καλώδιο 72

5.2. iSAFT SpaceWire Simulator 76
5.3. Πειραματική διάταξη 79
5.4. Σημεία ελέγχου και διεξαγωγή δοκιμών 80
5.5. Αποτελέσματα μετρήσεων 81
Κεφάλαιο 6: Σύνοψη - Συμπεράσματα *84*
Κεφάλαιο 7: Μελλοντικό έργο *86*
Βιβλιογραφία *89*

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1.	Διαδικασία εκφόρτισης ανθρώπου πάνω σε δάπεδο	σελ.20
Εικόνα 1.2.	Εποπτική απλουστευμένε παρουσίαση φόρτισης εξ επαγωγής	σελ.23
Εικόνα 1.3.	Εξοπλισμός εφαρμογών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε τραπέζι	σελ.25
Εικόνα 1.4.	Παραδείγματα εκφορτίσεων (a,b,c) σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM, αντιστοίχως) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC	σελ.26
Εικόνα 1.5.	Κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2 στα 4kV	σελ.27
Εικόνα 1.6.	Διάγραμμα ροής της μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας , συμπεριλαμβανομένης της βελτιστοποίησης με τις τιμές detrend	σελ.28
Εικόνα 1.7.	Κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από το στόχο Pellegrini (πορτοκαλί χρώμα) και η αρχική κυματομορφή που αποκτήθηκε από τον ανιχνευτή ρεύματο, χωρίς εφαρμογή μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας (πράσινο).	σελ.29
Εικόνα 2.1.	SpaceWire LVDS	σελ.32
Εικόνα 2.2.	Κωδικοποίηση σημάτων Data-Strobe	σελ.33
Εικόνα 2.3.	Τα επίπεδα του SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C	σελ.33
Εικόνα 2.4.	Δομή πακέτου “SpaceWire”	σελ.34
Εικόνα 2.5.	Κωδικοποίηση κωδικού ευρυεκπομπής	σελ.34
Εικόνα 2.6.	Κωδικοποίηση χαρακτήρα ελέγχου “NULL”	σελ.35
Εικόνα 2.7.	Οπτική παρουσίαση αρχιτεκτονικής της θύρας SpaceWire	σελ.36
Εικόνα 2.8.	Εγκάρσια τομή της δομής καλωδίου SpaceWire	σελ.37
Εικόνα 2.9.	Ταυτοποίηση επαφών συνδέσμου SpaceWire	σελ.39
Εικόνα 2.10.	Συναρμολόγηση καλωδίου SpaceWire τύπου AL	σελ.39
Εικόνα 2.11.	Συναρμολόγηση καλωδίου SpaceWire τύπου A	σελ.40
Εικόνα 2.12.	LVDS διαφορικό σήμα εξόδου οδηγού γραμμής	σελ.40
Εικόνα 2.13.	Κωδικοποίηση χαρακτήρα δεδομένων	σελ.41
Εικόνα 2.14.	Κωδικοποίηση χαρακτήρα ελέγχου	σελ.42
Εικόνα 2.15.	Κωδικοποίηση κωδικού χρόνου επιπέδου δικτύου	σελ.43
Εικόνα 2.16.	Κωδικοποίηση διακοπής επιπέδου δικτύου	σελ.43
Εικόνα 2.17.	Συστατικά και χαρακτηριστικά a) ενός κόμβου b) ενός διακόπτη δρομολόγησης SpaceWire	σελ.44-45
Εικόνα 3.1.	Γεννήτρια NSG 438	σελ.48
Εικόνα 3.2.	Ανιχνευτής ρεύματος (probe)	σελ.49
Εικόνα 3.3.	Ο παλμογράφος Tektronix TDS 7254B Digital Phosphor Oscilloscope	σελ.49
Εικόνα 3.4.	Ο εξασθενητής (attenuator)	σελ.50
Εικόνα 3.5.	Σχηματική παρουσίαση πειραματικής διάταξης για τις	σελ.50

δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης
Εικόνα 3.6.α. Εφαρμογή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με τη γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων στο μέσο του τραπεζιού σελ.51
Εικόνα 3.6.β. Κάτοψη του μεταλλικού πεδίου ζεύξης για τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με το πιστόλι ESD, τον ανιχνευτή ρεύματος και το ομοαξωνικό καλώδιο σελ.52
Εικόνα 4.1. Κυματομορφή ρεύματος σε απόσταση 5cm για κάθε επίπεδο τάσης με θετική πολικότητα. σελ.58
Εικόνα 4.2. Κυματομορφή ρεύματος σε απόσταση 80cm για κάθε επίπεδο τάσης με θετική πολικότητα. σελ.58
Εικόνα 4.3. Κυματομορφή ρεύματος σε απόσταση 155cm για κάθε επίπεδο τάσης με θετική πολικότητα. σελ.59
Εικόνα 4.4. Κυματομορφή ρεύματος σε απόσταση 5cm για κάθε επίπεδο τάσης με αρνητική πολικότητα. σελ.60
Εικόνα 4.5. Κυματομορφή ρεύματος σε απόσταση 80cm για κάθε επίπεδο τάσης με αρνητική πολικότητα. σελ.60
Εικόνα 4.6. Κυματομορφή ρεύματος σε απόσταση 155cm για κάθε επίπεδο τάσης με αρνητική πολικότητα. σελ.61
Εικόνα 4.7. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 2kV με θετική πολικότητα σελ.61
Εικόνα 4.8. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 4kV με θετική πολικότητα σελ.62
Εικόνα 4.9. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 6kV με θετική πολικότητα σελ.62
Εικόνα 4.10. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 8kV με θετική πολικότητα σελ.63
Εικόνα 4.11. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 2kV με αρνητική πολικότητα σελ.63
Εικόνα 4.12. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 4kV με αρνητική πολικότητα σελ.64
Εικόνα 4.13. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 6kV με αρνητική πολικότητα σελ.64
Εικόνα 4.14. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 8kV με αρνητική πολικότητα σελ.65
Εικόνα 4.15. Ρεύματα σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 8kV με θετική πολικότητα και μεγεθυνμένη η πρώτη κορυφή σελ.71
Εικόνα 5.1. Πεδίο λόγω ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που επάγεται σε γραμμή μετάδοσης σελ.72
Εικόνα 5.2. Διάταξη δοκιμών ανθεκτικότητας SpaceWire σε εφαρμογές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σελ.73
Εικόνα 5.3. Σχηματική παρουσίαση παραδείγματος ηλεκτρικής σύζευξης πεδίου σε καλώδιο και ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης πεδίου σε βρόχο σελ.75
Εικόνα 5.4. iSAFT SpaceWire Simulator σελ.76
Εικόνα 5.5. Παράθυρο “board configuration” του iSAFT σελ.77

Εικόνα 5.6.	SpaceWire Recorder panel	σελ.78
Εικόνα 5.7.	SpaceWire Simulator Statistics panel	σελ.78
Εικόνα 5.8.α	Τοποθέτηση καλωδίου SpaceWire στο οριζόντιο επίπεδο ζεύξης	σελ.79
Εικόνα 5.8.β.	Διάταξη τραπεζιού και οριζόντιου μεταλλικού πεδίου με εξοπλισμό για δοκιμές ESD μαζί με προσομοιωτή και καλώδιο SpW για δοκιμές	σελ.80

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1.	Τριβοηλεκτρική σειρά	σελ.21
Πίνακας 1.2.	Παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και την εκφόρτιση των υλικών	σελ.21
Πίνακας 1.3.	Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) μέσω επαφής με βάση το IEC 61000-4-2	σελ.27
Πίνακας 1.4.	Τιμές detrend για διαφορετικά επίπεδα τάσης και γεννήτριες ESD	σελ.30
Πίνακας 2.1.	Διαστάσεις American Wire Gauge	σελ.38
Πίνακας 4.1.	Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτρστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 2kV με θετική πολικότητα	σελ.66
Πίνακας 4.2.	Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτρστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 4kV με θετική πολικότητα	σελ.66
Πίνακας 4.3.	Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτρστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 6kV με θετική πολικότητα	σελ.67
Πίνακας 4.4.	Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτρστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 8kV με θετική πολικότητα	σελ.67
Πίνακας 4.5.	Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτρστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 2kV με αρνητική πολικότητα	σελ.68
Πίνακας 4.6.	Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτρστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 4kV με αρνητική πολικότητα	σελ.69
Πίνακας 4.7.	Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτρστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 6kV με αρνητική πολικότητα	σελ.69
Πίνακας 4.8.	Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτρστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 8kV με αρνητική πολικότητα	σελ.70
Πίνακας 5.1.	Χαρακτηριστικά μεγέθη από τα στατιστικά της προσομοίωσης της κίνησης των πακέτων για δοκιμή ESD στα 8kV με θετική πολικότητα στη θύρα 2	σελ.81
Πίνακας 5.2.	Χαρακτηριστικά μεγέθη από τα στατιστικά της προσομοίωσης της κίνησης των πακέτων για δοκιμή ESD στα 8kV με θετική πολικότητα στη θύρα 3	σελ.82
Πίνακας 5.3.	Χαρακτηριστικά μεγέθη από τα στατιστικά της προσομοίωσης της κίνησης των πακέτων για δοκιμή ESD στα 8kV με αρνητική πολικότητα στη θύρα 2	σελ.82
Πίνακας 5.4.	Χαρακτηριστικά μεγέθη από τα στατιστικά της προσομοίωσης της κίνησης των πακέτων για δοκιμή ESD στα 8kV με αρνητική πολικότητα στη θύρα 2	σελ.83

Πρόλογος

Αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. είναι η μελέτη του παραγόμενου ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και η διερεύνηση της επίδρασης των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ένα σύνδεσμο SpaceWire.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται η έννοια της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με τους διαφορετικούς μηχανισμούς που την προκαλούν και τα μοντέλα του φαινομένου. Ακόμη, περιγράφεται το Πρότυπο IEC 61000-4-2 για τον εξοπλισμό , τις μεθόδους μέτρησης και την κυματομορφή ρεύματος ESD και τις παραμέτρους της και παρουσιάζεται η μέθοδος ανακατασκευής ρεύματος.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται αναλυτικά το πρωτοκόλλο SpaceWire και ειδικότερα το Προτύπου ECSS-E-ST-50-12C, με βάση το οποίο καθορίζονται όλα τα χαρακτηριστικά ενός συνδέσμου SpaceWire σχετικά με την οργάνωσή του, τη σηματοδοσία, την κατασκευή του κ.α.. Παρουσιάζονται επίσης τα επίπεδα του πρωτοκόλλου και οι λειτουργίες τους.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρατίθεται η προετοιμασία που απαιτείται για τη διεξαγωγή δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και η διάταξη στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα, όπως ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2, και περιγράφεται η πειραματική διαδικασία.

Στο **Κεφάλαιο 4** αναλύεται λεπτομερώς ο τρόπος με τον οποίο έγινε η επεξεργασία των μετρήσεων ρεύματος με χρήση προγράμματος στο λογισμικό Matlab για την ανακατασκευή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και τον υπολογισμό των παραμέτρων της. Ακόμη, παρουσιάζονται σε διαγράμματα και πίνακες τα μετρούμενα μεγέθη και οι κυματομορφές ρεύματος για μελέτη και σύγκριση αυτών.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται μια περιγραφή του περιβάλλοντος iSAFT όπου προσομοιώθηκε η σύνδεση SpaceWire και η κίνηση των πακέτων σε αυτή, παρουσιάστηκε η διάταξη στο εργαστήριο όπου πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές ESD στο σύνδεσμο και αναδείχθηκαν τα αποτελέσματα των νέων μετρήσεων.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται τα τελικά συμπεράσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές τόσο για τις κυματομορφές ρεύματος ESD ,όσο και για το πώς επηρεάζεται από αυτές ο σύνδεσμος του SpaceWire και πώς ο κάθε παράγοντας επιδρά στα αποτελέσματα.

Στο **Κεφάλαιο 7** αναφέρεται η μελλοντική συνέχεια της έρευνας με βάση τα αποτελέσματα που αναδεικνύονται στην παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση

1.1. Περί Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας

Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC) [1.4] ορίζεται η δυνατότητα μίας διάταξης, συσκευής ή συστήματος να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον, χωρίς να προκαλεί ανεπιθύμητες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές στο περιβάλλον αυτό. Εάν επιτυγχάνεται αυτή η ικανότητα , ένα σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργεί με ικανοποιητικό τρόπο. Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ενός συστήματος σε ένα τμήμα του ή κάποιο άλλο σύστημα, είναι γνωστό από τότε που άρχισε η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων πριν περίπου έναν αιώνα και καθώς η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών διευρύνεται συνεχώς σε κάθε τομέα της ζωής μας, θα αποτελεί όλο και μεγαλύτερη ανησυχία επιστημονικού, τεχνολογικού και περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. Επομένως, η ιδέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αναπτύχθηκε με σκοπό να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης και χειρισμού των σύνθετων συστημάτων και να βοηθηθεί η ανάπτυξη τους.

Για τη μελέτη του πεδίου της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και την εύρεση των τρόπων με τους οποίους επιτυγχάνεται αυτή η αρμονική συνύπαρξη συστημάτων με το περιβάλλον τους είναι αναγκαία η κατανόηση κάποιων όρων [1] του που παρατίθενται παρακάτω:

- Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (Electromagnetic Interference) είναι κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πτώση της απόδοσης μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος (όπως παραδείγματος χάρη ένας θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μία μεταβολή του ίδιου του μέσου διάδοσης) και ατρωσία σε μια διαταραχή είναι η ικανότητα μιας διάταξης συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητάς της/του με την παρουσία αυτής της διαταραχής.
- Ηλεκτρομαγνητική Στάθμη Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Level) ορίζεται ως η καθορισμένη μέγιστη στάθμη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που αναμένεται να εφαρμοστεί σε μία διάταξη, συσκευή ή σύστημα που λειτουργεί σε συγκεκριμένες συνθήκες.
- Όσον αφορά την ατρωσία, στάθμη ατρωσίας (Immunity level) αποκαλείται η μέγιστη στάθμη μίας δεδομένης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που συμβαίνει σε μία συγκεκριμένη διάταξη, συσκευή ή σύστημα για την οποία αυτό παραμένει ικανό να λειτουργήσει στον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης, όριο ατρωσίας (Immunity Limit) είναι η καθορισμένη στάθμη ατρωσίας και το περιθώριο ατρωσίας (Immunity Margin) αποτελεί τη διαφορά μεταξύ του ορίου ατρωσίας μίας διάταξης συσκευής ή συστήματος και της στάθμης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.
- Περιθώριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Elctromagnetic Compatibility Margin) είναι ο λόγος του ορίου ατρωσίας μίας διάταξης συσκευής ή

συστήματος ως προς τη στάθμη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας μιας διαταραχής αναφοράς

- Ακόμη, ηλεκτρομαγνητική επιδεκτικότητα (Electromagnetic susceptibility) είναι η αδυναμία μίας διάταξης ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητας της/του κάτω από την παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής. Με άλλα λόγια, επιδεκτικότητα είναι η έλλειψη ατρωσίας.
- Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (Electromagnetic Interference, EMI) ορίζουμε κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί να μειώσει την επίδοση μίας συσκευής ή ενός συστήματος. Είναι, δηλαδή, κάθε διαταραχή, φυσικής ή ανθρώπινης προέλευσης, στις συχνότητες λειτουργίας του συστήματος, στο οποίο έχει αρνητική επίδραση.

Συνεπώς γίνεται αντιληπτό, ότι είναι απαραίτητη η διεξαγωγή μετρήσεων με σκοπό την επαλήθευση της συμβατότητας ενός συστήματος ή εξοπλισμού. Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που παράγει μία πηγή επάγονται στον δέκτη με τους εξής τρόπους:

- με άμεση ακτινοβόληση του δέκτη από την πηγή
- με ακτινοβόληση μέσω καλωδίου τροφοδοσίας ή μεταφοράς πληροφορίας
- λόγω παραγωγής παρεμβολών από τα ίδια τα καλώδια
- με αγώγιμη παρεμβολή μέσω του δικτύου παροχής χαμηλής τάσης στην πηγή και στον δέκτη.

Έτσι, λοιπόν, οι μετρήσεις EMC ενός συστήματος στοχεύουν στον προσδιορισμό τριών πτυχών αυτού:

- την παραγωγή ανεπιθύμητων εκπομπών αυτού προς το περιβάλλον του
- την ευαισθησία του, δηλαδή κατά πόσο εύκολα μπορεί να δυσλειτουργήσει όταν δέχεται ανεπιθύμητες διαταραχές. (ή την ηλεκτρομαγνητική επιδεκτικότητα που αναφέραμε παραπάνω)
- τον μηχανισμό κατά τον οποίο φτάνει η ανεπιθύμητη παρεμβολή στο σύστημα.

Όσον αφορά την αντιμετώπιση προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, υπάρχει πιθανόν μία περιοχή συχνοτήτων, για την οποία τα προβλήματα θα είναι πιο σοβαρά και σε αυτή την περίπτωση, θα υπάρχει επίσης ένα αντίστοιχο εύρος αποστάσεων μέσα στο οποίο θα γίνονται διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτέλεση των υπολογισμών. Συνεπώς, η συχνότητα και το μέγεθος συνιστούν καθοριστικούς παράγοντες και οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς για σχεδιαστικούς σκοπούς εξαρτώνται από τις φυσικές διαστάσεις του συστήματος σε σχέση με τα μήκη κύματος των βασικών πεδίων που υπάρχουν.

1.2. Γενικά για το φαινόμενο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

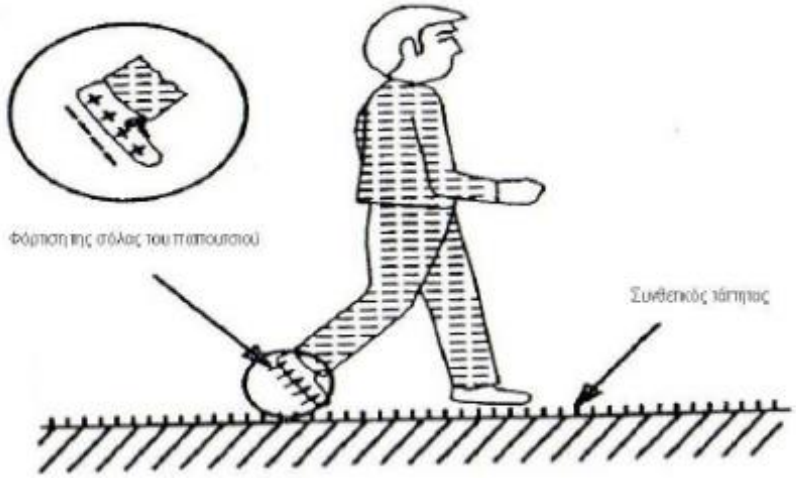
Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση (electrostatic discharge, ESD) είναι ένα από τα πιο συχνά ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα και αποτελεί έναν πολύ διαδεδομένο κίνδυνο για τις ηλεκτρονικές διατάξεις, ενώ μπορεί να βλάψει και τους ανθρώπους. Σε ηλεκτρονικά συστήματα ή εξαρτήματα αυτό μπορεί να λάβει μέρος με δύο

μηχανισμούς και συγκεκριμένα, από άμεσες εκφορτίσεις πάνω στον εξοπλισμό ή από μεταβατικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος, περιπτώσεις που συνιστούν έμμεσες εκφορτίσεις

1.2.1. Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Όταν δύο αντικείμενα έρθουν σε επαφή, η κίνηση των ηλεκτρονίων του ενός σε σχέση με τα ηλεκτρόνια του άλλου οδηγεί στη φόρτισή τους με αντίθετα φορτία [5]. Αυτή η απότομη μεταφορά φορτίου καλείται ηλεκτροστατική εκφόρτιση (άμεση εκφόρτιση) και ο όρος τριβοηλεκτρισμός αφορά φορτίσεις που προκαλούνται από επαφή και τριβή των υλικών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον ενδεχόμενο σχηματισμό μεγάλων δυναμικών (10-25kV) [9], με αποθηκευμένες ενέργειες μερικών mJ, η εκφόρτιση των οποίων δημιουργεί ρεύματα με απότομες διακυμάνσεις, στις οποίες οφείλονται οι επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό που συχνά μεταφράζονται σε βλάβες αυτού (αντίστοιχα στους ανθρώπους).

Όσον αφορά τον άνθρωπο, φαίνεται παρακάτω σε σχηματική απεικόνιση το πώς πραγματοποιείται η ηλεκτροστατική εκφόρτιση του ανθρώπινου σώματος, όταν αυτό κινείται πάνω σε δάπεδο.



Εικόνα 1.1. Διαδικασία εκφόρτισης ανθρώπου πάνω σε δάπεδο[1]

Το αν ένα υλικό θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Στον Πίνακα 1.1. παρατίθεται η τριβοηλεκτρική σειρά υλικών τα οποία κατατάσσονται ανάλογα με το αν αποκτούν θετική ή αρνητική φόρτιση.

Η σχετική θέση του υλικού στην τριβοηλεκτρική σειρά είναι μόνο ένας παράγοντας στη διαδικασία δημιουργίας της φόρτισης. Δυο υλικά τα οποία είναι σε πολύ κοντινή απόσταση μπορούν να δημιουργήσουν μία ευρεία στατική φόρτιση. Εκτός της φόρτισης εξ επαφής, που είναι ο πιο κοινός τρόπος εμφάνισης στατικού φορτίου, δυναμικές πηγές στατικών φορτίσεων μπορεί να συνιστούν και μία δέσμη φορτισμένων ιόντων, spray charging, μια φωτοηλεκτρική φόρτιση ή μια φόρτιση corona. Αυτές οι φορτίσεις παραμένουν στάσιμες (στατικές) σε ένα αντικείμενο για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Όταν δύο φορτισμένα αντικείμενα προσεγγίζουν το ένα το άλλο σε απόσταση μικρότερη μιας οριακής τιμής, συμβαίνει απότομη

μεταφορά φορτίου, που είναι η ηλεκτροστατική εκφόρτιση όπως την ορίσαμε. Στον επόμενο Πίνακα παρουσιάζονται παράγοντες που επηρεάζουν το επίπεδο μιας φόρτισης.

Πίνακας 1.1. Τριβοηλεκτρική σειρά

Πολικότητα φόρτισης λόγω τριβοηλεκτρικού φαινομένου σε διάφορα υλικά	
Υλικά που φορτίζονται θετικά	**Υλικά που φορτίζονται αρνητικά**
Αέρας	Κερί γυαλίσματος
Ανθρώπινο δέρμα	Σκληρό λάστιχο
Γυαλί	Κόλλα συγκόλλησης
Ανθρώπινα μαλλιά	Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι
Νάιλον	Ανοξείδωτο ατσάλι
Μαλλί	Συνθετικό λάστιχο
Γούνα	Ακρυλικό
Μόλυβδος	Αφρός πολυουρεθάνης
Μετάξι	Πολυεστέρας
Αλουμίνιο	Πολυαιθυλαίνιο
Χαρτί	PVC
Πολυουρεθάνη	TEFLON
Βαμβάκι	Λάστιχο σιλικόνης
Ξύλο	
Ατσάλι	

Πίνακας 1.2. Παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και την εκφόρτιση των υλικών

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

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και κυρίως από την υγρασία. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό υγρασίας τόσο πιο συχνές είναι οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, αλλά και πιο ήπιες. Αντίθετα όταν υπάρχει αυξημένη ξηρασία η συχνότητα των εκφορτίσεων είναι μικρότερη, αλλά οι εκφορτίσεις είναι πιο έντονες (και αυτό το διαπιστώνουμε και στις παραμέτρους της κυματομορφής ρεύματος όπου έχουμε μεγάλο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης – μεγάλο χρόνο ανόδου). Επιβλαβείς τάσεις μπορεί να δημιουργηθούν ακόμα και στο 55% σχετικής υγρασίας ή και περισσότερο.

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

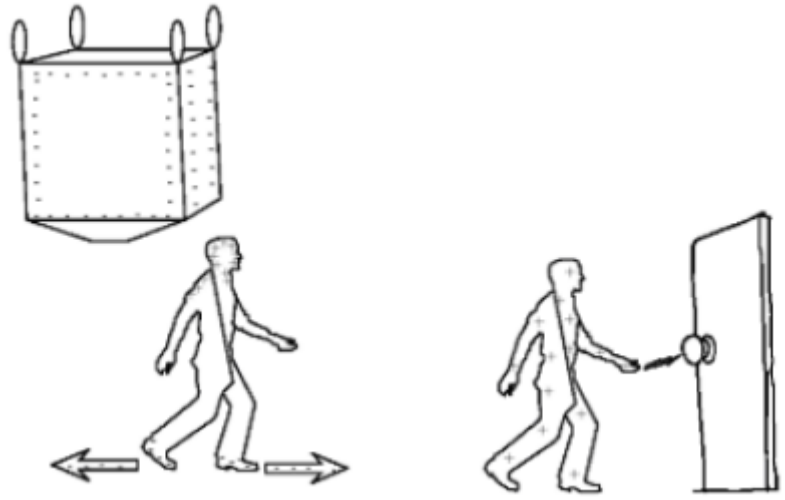
- Εκρήξεις σε υπέρ-δεξαμενόπλοια κατά τη διάρκεια καθαρισμού των δεξαμενών τους.
- Ζημιές και καταστροφές μικροκυκλωμάτων κατά τη διάρκεια της διακίνησής τους.
- Εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας με καύσιμα των αεροσκαφών.
- Βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων.

Πολλές προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας περιλαμβάνουν δοκιμές σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Το μέγεθος ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι στατικό μέγεθος από τη φύση του και έτσι συνήθως καθορίζονται τυπικοί παλμοί και ρεύματα για τις δοκιμές. Η ηλεκτροστατική φόρτιση μπορεί να διαταράξει ή ακόμη και να καταστρέψει, ηλεκτρονικά εξαρτήματα και συστήματα τα οποία βρίσκονται κοντά σε αυτή. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε μέσω άμεσων εκφορτίσεων στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, είτε μέσω των μεταβατικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου φαινομένου.

1.2.2. Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής

Εναλλακτικά, το άλλο είδος εκφόρτισης είναι η έμμεση εκφόρτιση (ή εξ επαγωγής) [3], η οποία συμβαίνει όταν ένα αντικείμενο εκτίθεται στο ηλεκτρικό πεδίο ενός φορτισμένου σώματος [20], όπως στην περίπτωση που βρεθεί δίπλα του. Τα αντίθετα φορτία μέσα στο υλικό θα τείνουν να χωριστούν, κατευθυνόμενα είτε προς αυτό είτε ανάποδα από αυτό. Οποιοδήποτε πλεονάζον φορτίο και της ίδιας πολικότητας με το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα θα διαρρεύσει ανάλογα με την αγωγιμότητα του υλικού και της αγώγιμης σύνδεσης και το αντικείμενο θα αποκτήσει μια περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχει το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα.

Στο σχήμα που ακολουθεί, φαίνεται ένας άνθρωπος που αποτελεί πολύ καλό αγωγό, δίπλα σε μια μεγάλη δεξαμενή η οποία περιέχει ένα μεγάλο φορτίο αρνητικής πολικότητας. Τα αρνητικά με τα θετικά φορτία διαχωρίζονται στο ανθρώπινο σώμα μέσω των υποδημάτων και του δαπέδου. Τελικά το ανθρώπινο σώμα φορτίζεται θετικά αντίθετα από το γειτνιάζον αντικείμενο. Επομένως όταν ο άνθρωπος πλησιάσει την πόρτα και ακουμπήσει το μεταλλικό πόμολο, με το θετικό φορτίο που έχει αποκτήσει, θα δημιουργηθεί μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση.



Εικόνα 1.2. Εποπτική απλουστευμένη παρουσίαση φόρτισης εξ επαγωγής[5]

1.2.3. Ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

Κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάσει υψηλή τιμή, δυνητικά ικανή να προκαλέσει καταπόνηση στη διηλεκτρική αντοχή των ηλεκτρονικών στοιχείων συσκευών με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή τους.

Ενδεικτικά, κατά τη διάρκεια του φαινομένου της εκφόρτισης [35] μπορεί να συμβούν:

- Δημιουργία δευτερεύοντος ηλεκτρικού τόξου εντός του εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει με τη σειρά του την εμφάνιση νέων φαινόμενων.
- Διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των κυκλωμάτων. Η ροή ενός υψηλού ρεύματος μπορεί να διαταράξει τις συνθήκες λειτουργίας των κυκλωμάτων, οδηγώντας σε μεταβολή στο κέρδος (gain) του κυκλώματος, στο εύρος ζώνης (bandwidth), αλλοιώσεις στα σήματα που δημιουργούνται και στη λογική των ψηφιακών κυκλωμάτων, με αποτελέσματα από προσωρινή παρεμβολή έως καταστροφή των εξαρτημάτων.
- Ηλεκτρική επαγωγή από της χωρητική σύζευξη σε μέρη του εξοπλισμού με ανάπτυξη υψηλών τάσεων εξ επαγωγής και με αυτόν τον τρόπο μια προσωρινή κακή λειτουργία των κυκλωμάτων.
- Μαγνητική επαγωγή εξαιτίας της επαγωγικής σύζευξης από τις διαδρομές που ακολουθεί το εκχεόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

Για τη προστασία του εξοπλισμού [18] από ενδεχόμενες ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μπορούν να ληφθούν προληπτικά μέτρα, ή να χρησιμοποιηθούν μέσα που θα ελαχιστοποιήσουν τα δυσμενή αποτελέσματά τους όταν οι εκφορτίσεις αυτές εμφανιστούν.

Τα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνουν:

- Προστασία από την εμφάνιση του τριβοηλεκτρικού φαινόμενου. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα από την τριβή δύο μονωτικών υλικών ή από την τριβή ενός μονωτικού και ενός αγωγού, επομένως για να αποτραπεί η εμφάνιση του

ηλεκτροστατικού φορτίου, επιβάλλεται η θωράκιση μίας ή και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή, με ένα αγώγιμο στρώμα.

- Αποτροπή της ανάπτυξης της τάσης φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι το αναπτυσσόμενο φορτίο στην επιφάνεια του υλικού θα πρέπει να οδηγηθεί στο έδαφος. Σε αυτό μπορούν να βοηθήσουν αντιστατικά υλικά με ιδιαίτερα γνωστές τις αντιστατικές πλαστικές σακούλες. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι Fowler, Klein και Fromm ανέπτυξαν κάποιες προτάσεις σχετικά με τη σχεδίαση των δαπέδων, προκειμένου να αποφεύγεται εξαιτίας τους η δημιουργία ηλεκτροστατικού φορτίου. Τα συμπεράσματά τους συνοψίζονται στο ότι τα δάπεδα θα πρέπει να έχουν αντίσταση ως προς γη μικρότερη των 107 Ω και πως θα πρέπει να έχουν αρκετά καλές μονωτικές ιδιότητες.

Από την άλλη, ορισμένα μέτρα προστασίας που αφορούν τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, όταν αυτές έχουν πλέον συμβεί συνιστούν:

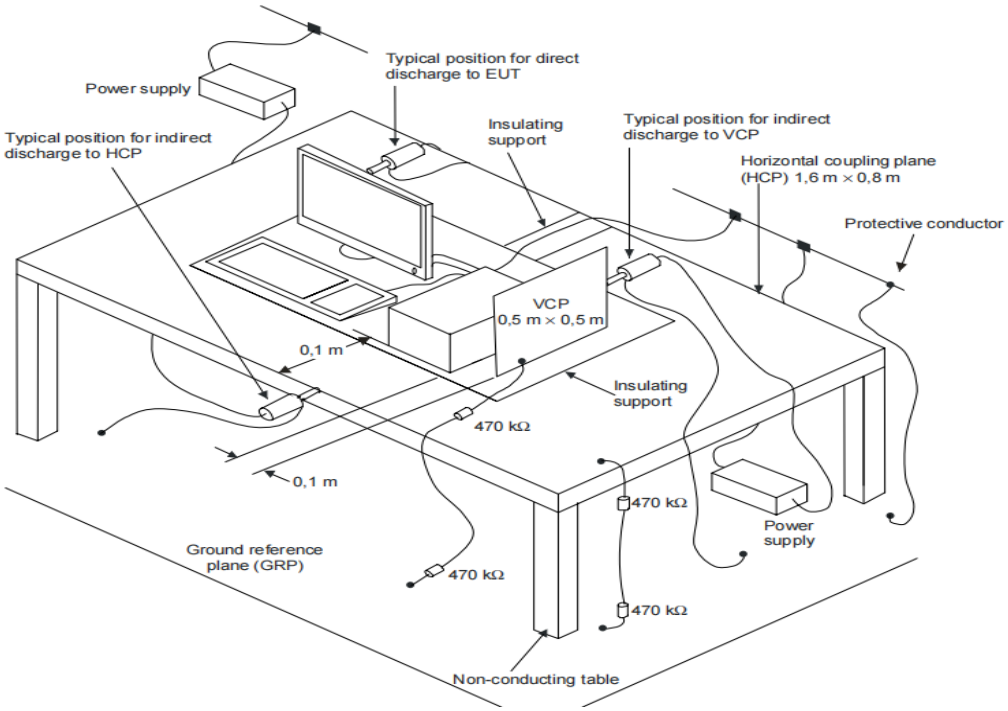
- Η πλήρης ή μερική μόνωση του εξοπλισμού, για αποτροπή δευτερευόντων εκφορτίσεων.
- Θωράκιση ή γείωση των συσκευών, οι οποίες θα εξασφαλίζουν μια εναλλακτική διαδρομή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Θωράκιση κυκλωμάτων εναντίον των πεδίων εξ επαγωγής.
- Εγκατάσταση των συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό.

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

Όσον αφορά τις ίδιες τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, μερικά παραδείγματα αστοχιών στον εξοπλισμό υπό εξέταση λόγω διαφορετικών διαταραχών της δοκιμής ESD είναι:

- Εκκένωση σε ένα pin σύνδεσης προκαλώντας ζημιά σε ένα κύκλωμα, στην οποία η ενέργεια που διαχέεται στο κύκλωμα, το μέγιστο ρεύμα ή το μεταφερόμενο φορτίο πιθανότατα θα καθορίσει το όριο ζημιάς
- Εκκένωση μέσω ενός κενού σε ένα πλαστικό περίβλημα που επιτρέπει σε έναν σπινθήρα να φτάσει σε ένα κύκλωμα
- Εκκένωση σε ένα πλαίσιο της συνολικής διάταξης, με αποτέλεσμα το σύστημα που περιέχεται στο πλαίσιο να αναστατωθεί.

Στην επόμενη Εικόνα φαίνεται χαρακτηριστικά ο εξοπλισμός δοκιμών του ίδιου του φαινομένου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε εργαστήρια με τις κατάλληλες συσκευές, στοιχεία και προστασίες στον εξοπλισμό που προστατεύουν από την εμφάνιση των δυσμενών επιπτώσεων, λόγω των μεγάλων ρευμάτων που αναπτύσσονται. Η διάταξη που απεικονίζεται αποτέλεσε και τη βάση στην οποία στηρίχθηκε η διαμόρφωση της διάταξης στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων για τις πειραματικές διαδικασίες στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κυρίως για την παραγωγή και καταγραφή των ρευμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

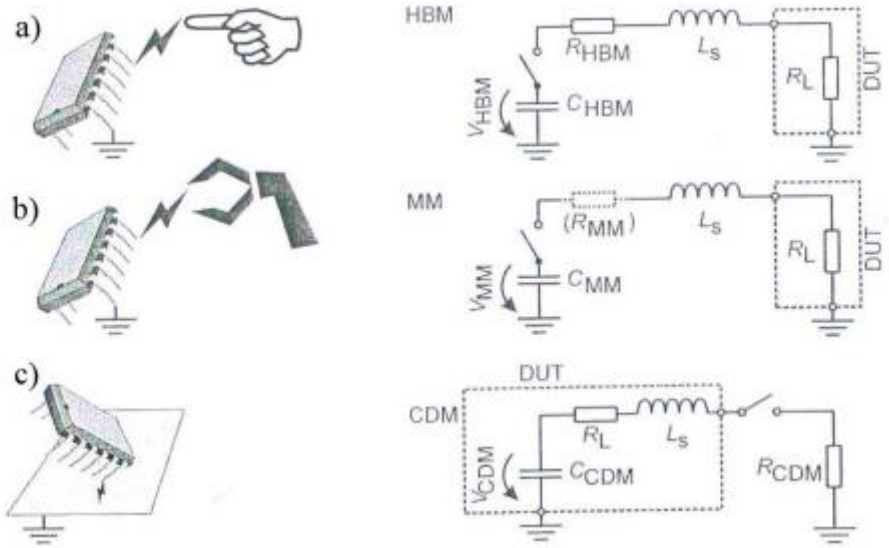


Εικόνα 1.3. Εξοπλισμός εφαρμογών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε τραπέζι [7]

1.2.4. Μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Τα καθημερινά διάφορα είδη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στα οποία εμπλέκονται ποικίλα είδη σωμάτων, μπορούν να ενταχθούν σε ομάδες, που να μπορούν να μοντελοποιηθούν ξεχωριστά, ώστε να εκτιμηθούν οι επιδράσεις που μπορεί να έχουν οι εκφορτίσεις στην πραγματικότητα. Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα είναι: το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model – HBM), που προσομοιώνει τις εκκενώσεις που συμβαίνουν μεταξύ ενός ανθρώπου, χέρι ή δάχτυλο, και αγωγό, το μοντέλο της μηχανής (Machine Model – MM), που προσομοιώνει εκκενώσεις από το μηχάνημα μέσω μιας συσκευής στο έδαφος (δοκιμή σύμφωνα με αυτό το μοντέλο διακόπτεται γρήγορα σε ολόκληρο τον κλάδο) και το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (Charged Device Model – CDM), που προσομοιώνει τις εκφορτίσεις όταν η συσκευή υπό δοκιμή φορτίζεται και εκκενώνεται σε γειωμένο αγωγό.

Απλές κυκλωματικές αναπαραστάσεις των κυκλωμάτων αυτών φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 1.4. Παραδείγματα εκφορτίσεων (a,b,c) σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM, αντιστοίχως) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC[2]

Τα μοντέλα περιγράφονται επίσης από τις δεύτερης τάξης διαφορικές εξισώσεις οι οποίες ισχύουν στα RLC κυκλώματα και συγκεκριμένα έχουμε:

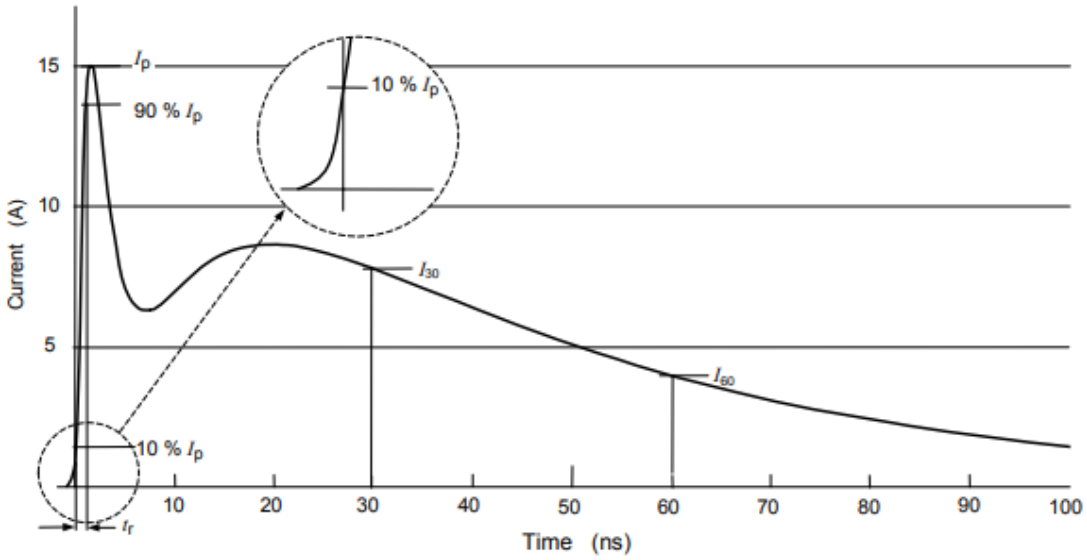
$$L_s \frac{d^2 i}{dt^2} + R_{esd} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_{esd}} i = 0 \qquad [2]$$

Όπου R_{esd} η συνολική ωμική αντίσταση σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα και της ωμικής αντίστασης R_L της υπό εξέτασης συσκευής (Device Under Test), C_{esd} η χωρητικότητα πυκνωτή ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος σε τάση V_c και L_s η αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης

1.3. Το Πρότυπο IEC 61000-4-2

Το κύριο Πρότυπο [7] με βάση το οποίο πραγματοποιούνται δοκιμές και έλεγχοι ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε επίπεδο ηλεκτρονικών συστημάτων τις τελευταίες δεκαετίες είναι το **IEC 61000-4-2** [6,13,7]. Αποτελεί το δεύτερο τμήμα του τέταρτου μέρους του Προτύπου IEC 1000:1995) και μελετά την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και σχετίζεται με την ατρωσία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών στο φαινόμενο, ενώ περιγράφει και τη μέθοδο και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν, τον απαραίτητο εξοπλισμό και τα διάφορα επίπεδα τάσεων για την εκτέλεση δοκιμών ηλεκτροστατικών εκκενώσεων σε ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προιόντα με έμφαση στον οικιακό εξοπλισμό και τα όργανα μέτρησης. Ακόμη, καθορίζει και την τυπική κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με τις βασικές παραμέτρους της.

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που περιγράφεται στο Πρότυπο βασίζεται στο μοντέλου του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model), ενώ η κυματομορφή ρεύματος που ορίζει το πρότυπο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 1.5. : Κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2 στα 4kV. [7]

Η τελευταία διαθέτει τέσσερις παραμέτρους:

- Το μέγιστο ρεύμα (Imax): Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης (αρχική κορυφή)
- Το χρόνο ανόδου tr που είναι το χρονικό διάστημα που χρειάζεται το ρεύμα εκφόρτισης για να αυξηθεί από το 10% της μέγιστης τιμής του στο 90% (μεταξύ 0,7ns και 1ns).
- Ρεύμα στα 30 ns (I_{30}): Η τιμή του ρεύματος 30 ns μετά την χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται για πρώτη φορά κατά τη φάση ανόδου το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.
- Ρεύμα στα 60 ns (I_{60}): Η τιμή του ρεύματος 60 ns μετά την χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται για πρώτη φορά κατά τη φάση ανόδου το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.

Βλέπουμε στον Πίνακα και τις αντίστοιχες τιμές για αυτές τις παραμέτρους σύμφωνα με το πρότυπο.

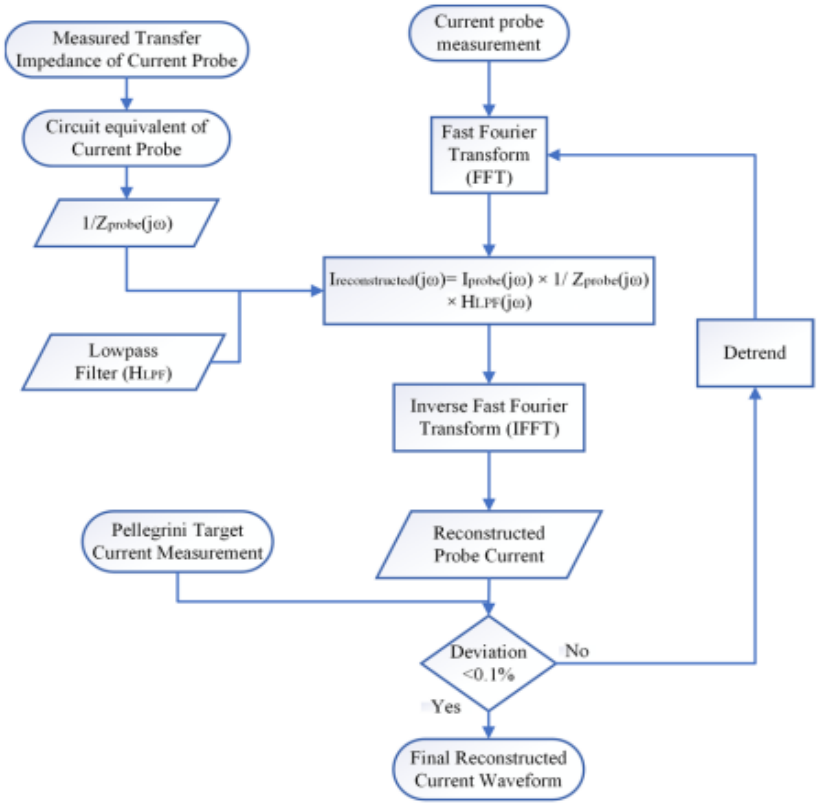
Πίνακας 1.3. Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) μέσω επαφής με βάση το IEC 61000-4-2 [7]

Επίπεδο	**Τάση φόρτισης**	**I_{max}**	**T_{rise}**	**I_{30}**	**I_{60}**
	[kV]	**[A]**	**[ns]**	**[A]**	**[A]**
1	2	7.5	0.8	4	2
2	4	15	0.8	8	4
3	6	22.5	0.8	12	6
4	8	30	0.8	16	8

1.4. Ανακατασκευή κυματομορφής ρεύματος ESD

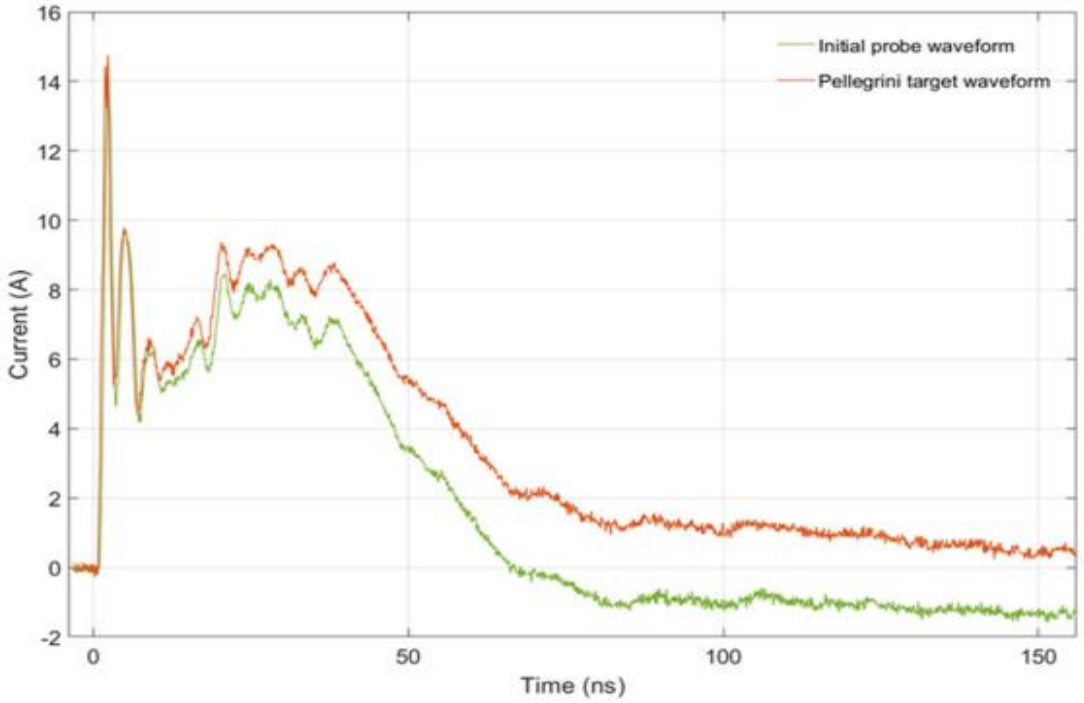
Τα μεγάλα δυναμικά και ρεύματα που δημιουργούνται και παρατηρούνται, παρουσιάζουν διαφορές σε σχέση με τις "αληθείς" κυματομορφές, οι οποίες και είναι εκείνες στις οποίες στοχεύουμε (στόχος Pellegrini) και για αυτό υπάρχει η ανάγκη υλοποίησης μιας μεθόδου ανακατασκευής του ρεύματος, που επιτρέπει έπειτα να είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων.

Οι ανιχνευτές ρεύματος (current probes) [11] έχουν βοηθήσει τους μηχανικούς Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (EMC) στην παρακολούθηση των ρευμάτων common mode και στην αντιμετώπιση προβλημάτων ΗΜΣ. Αποτελούν ηλεκτρικές συσκευές που έχουν σχεδιαστεί για να ανιχνεύουν τη ροή ρεύματος μέσω αγωγού και να τη μετατρέπουν σε αντίστοιχη τάση για μέτρηση με παλμογράφο. Η χρήση αυτών των ανιχνευτών σε συνεργασία με μια σχετικά απλή αντιστάθμιση συχνότητας αποτελούν τη μέθοδο για την ανακατασκευή (reconstruction) [34] της κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) κατά τη δοκιμή ESD σε επίπεδο συστήματος σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2. Η μεθοδολογία ειδικότερα συνιστάται από τρεις ενότητες: μετρήσεις των ρευμάτων ESD με ανιχνευτή ρεύματος και έναν στόχο ρεύματος (στόχος Pellegrini), όπως ορίζεται στη διαδικασία βαθμονόμησης του IEC 61000-4-2, τη διαδικασία αποσυνέλιξης (deconvolution) στον τομέα των συχνοτήτων με το λογισμικό Matlab και η βελτιστοποίηση τους με τις detrend values ανάλογα με το επίπεδο τάσης δοκιμής, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 1.6. Διάγραμμα ροής της μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας , συμπεριλαμβανομένης της βελτιστοποίησης με τις τιμές detrend. [34]

Η αποσυνέλιξη ορίζεται ως η διαδικασία φιλτραρίσματος ενός σήματος για την αντιστάθμιση μιας ανεπιθύμητης συνέλιξης. Στην περίπτωση της προαναφερθείσας διαδικασίας μέτρησης αυτή προκύπτει από το roll off χαμηλής συχνότητας του τρέχοντος αισθητήρα και το περιορισμένο εύρος ζώνης (1GHz). Αυτή η παραμόρφωση μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτή από τη σύγκριση των δύο αποκτηθέντων κυματομορφών πριν εφαρμοστεί καμία μέθοδος αντιστάθμισης, όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα, όπου από πάνω βλέπουμε την κυματομορφή από το στόχο Pellegrini και από κάτω τη μετρούμενη κυματομορφή:



Εικόνα 1.7. Κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από το στόχο Pellegrini (πορτοκαλί χρώμα) και η αρχική κυματομορφή που αποκτήθηκε από τον ανιχνευτή ρεύματος, χωρίς εφαρμογή μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας (πράσινο)[34].

Η διαδικασία αποσυνέλιξης συνοψίζεται στην εξίσωση:

$$I_{reconstructed}(j\omega) = I_{probe}(j\omega) * \frac{1}{Z_{probe}(j\omega)} * H_{LPF}(j\omega) \qquad [34]$$

Όπου ο παράγοντας $I_{probe}(j\omega)$ προκύπτει από το μετασχηματισμό Fourier της κυματομορφής ρεύματος που αποκτήθηκε από τον ανιχνευτή, το $Z_{probe}(j\omega)$ μπορεί να υπολογιστεί από το ισοδύναμο κύκλωμα της διαδικασίας βαθμονόμησης του ανιχνευτή ρεύματος όταν είναι διαθέσιμο το μέγεθος της αντίστασης μεταφοράς (συνήθως παρεχόμενο από τον κατασκευαστή) και ο παράγοντας $H_{LPF}(j\omega)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς ενός απλού βαθυπερατού φίλτρου πρώτης τάξης με συχνότητα αποκοπής ίση με το εύρος ζώνης του probe.

$$H_{LPF}(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega C_{LPF} R_{LPF}} \qquad [34]$$

Οι τιμές των C_{LPF} και R_{LPF}, που χρησιμοποιούνται στο Matlab, επιλέχθηκαν στα 100 Ω και 1,592 pF αντίστοιχα για συχνότητα αποκοπής 1 GHz. Επιλέχθηκε η κατακόρυφη μετάβαση του φίλτρου ως τυπική κλίση −20 dB/δεκαετία. Χρησιμοποιούμε αυτήν την αναπαράσταση του φίλτρου, το οποίο περιλαμβάνει την κατακόρυφη μετάβαση, αντί για μια ιδανική αναπαράσταση φίλτρου (με 100% εξασθένηση πάνω από 1 GHz), για να αντικατοπτρίζει καλύτερα, έστω και ποιοτικά, τη συμπεριφορά του ανιχνευτή πάνω από 1 GHz.

Η ανεπιθύμητη τάση DC που εμφανίζεται στην έξοδο του λειτουργικού ενισχυτή ενός παλμογράφου και επικαλύπτεται με το επιθυμητό σήμα επιδρά στο αρχικό σήμα, αλλά δεν το παραμορφώνει σημαντικά. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας ρεύματος για τη μέτρηση των ρευμάτων ESD, το τελευταίο μέρος της κυματομορφής που αποκτάται παραμορφώνεται σημαντικά. Αυτή η παραμόρφωση μπορεί να αντισταθμιστεί με αποτόνωση (detrending) της κυματομορφής που είχε αρχικά αποκτηθεί, που σημαίνει προσθήκη ή αφαίρεση μιας τιμής DC στο σύνολο της κυματομορφής έτσι ώστε η προκύπτουσα αποκλίνουσα κυματομορφή και η κυματομορφή που αποκτήθηκε από τον στόχο Pellegrini να πλησιάζουν το μηδέν με τον ίδιο τρόπο. Η τιμή που θα προσθεθεί ή θα αφαιρεθεί διαφέρει ανάλογα το επίπεδο τάσης και της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που χρησιμοποιείται σε κάθε δοκιμή, όπως δείχνει ο παρακάτω Πίνακας:

Πίνακας 1.4. Τιμές detrend για διαφορετικά επίπεδα τάσης και γεννήτριες

Επίπεδο τάσης (kV)	**Imax (A)**	**mV/ div**	**Τιμή αποτόνωσης (detrend)**			
			DITO	**NSG 433**	**NSG 438**	**Transient 3000**
2	7.5	100	0.40	0.45	0.38	0.51
4	15	200	0.88	0.96	0.84	0.95
6	22.5	500	1.17	1.39	1.12	1.28
8	30	500	1.52	1.91	1.50	1.45

Κεφάλαιο 2: Το πρωτόκολλο SpaceWire

2.1. Εισαγωγή

Το **SpaceWire** είναι ένα πρότυπο δικτύου διαχείρισης δεδομένων για χρήση σε διαστημόπλοιο, το οποίο συνδέει μαζί όργανα, μαζική μνήμη, επεξεργαστές, τηλεμετρία κατερχόμενης ζεύξης, και άλλα εποχούμενα υποσυστήματα. Παρέχει ρυθμούς ζεύξης 2 Mbps έως 400 Mbps, αμφίδρομες συνδέσεις δεδομένων πλήρους διπλής όψης, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με SpaceWire εξοπλισμό. Προσφέρει υψηλή ταχύτητα, χαμηλή ισχύ, απλότητα, σχετικά χαμηλό κόστος υλοποίησης και η αρχιτεκτονική του ευελιξία το καθιστά ιδανικό για πολλές διαστημικές αποστολές. Τα δίκτυα διαχείρισης δεδομένων μπορούν να κατασκευαστούν για να ταιριάζουν σε συγκεκριμένες εφαρμογές που χρησιμοποιούν συνδέσμους δεδομένων από σημείο σε σημείο και διακόπτες δρομολόγησης. Καθιερώθηκε το Πρότυπο **ECSS-E-ST-50-12C [25]** για να διασφαλιστεί ότι το Πρότυπο ήταν σε συμφωνία με το νέο αριθμητικό σύστημα ονοματοδοσίας προτύπων ECSS, χωρίς να έχει τεχνικές διαφορές με τον προκάτοχό του, ECSS-E-ST-50-12A. Δεδομένου ότι το Πρότυπο SpaceWire δημοσιεύτηκε από την Ευρωπαϊκή Συνεργασία για Διαστημική Τυποποίηση τον Ιανουάριο του 2003, υιοθετήθηκε από την ESA, τη NASA, JAXA και Roscosmos για πολλές αποστολές και χρησιμοποιείται ευρέως σε επιστημονικές, παρατήρησης Γης, εμπορικές και σε άλλα διαστημόπλοια [15].

Πριν το πρωτόκολλο SpaceWire γίνει πρότυπο, για πολλά διαστημικά σκάφη και εξοπλισμούς, οι κατασκευαστές έπρεπε να χρησιμοποιούν ad hoc ή τις δικές τους ιδιόκτητες διεπαφές για επικοινωνίες μεταξύ των μονάδων, π.χ. σύνδεση οργάνων υψηλής ταχύτητας δεδομένων σε μονάδες μαζικής μνήμης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα πολλοί διαφορετικοί τύποι συνδέσεων επικοινωνίας να χρησιμοποιούνται σε ένα διαστημόπλοιο, αυξάνοντας το κόστος και παρατείνοντας τον απαιτούμενο χρόνο για ενσωμάτωση και δοκιμή του διαστημικού σκάφους. Υπήρχε σαφής ανάγκη για μια τυπική επί του σκάφους σύνδεση επικοινωνίας για να απλοποιήσει την ανάπτυξη διαστημικών σκαφών.

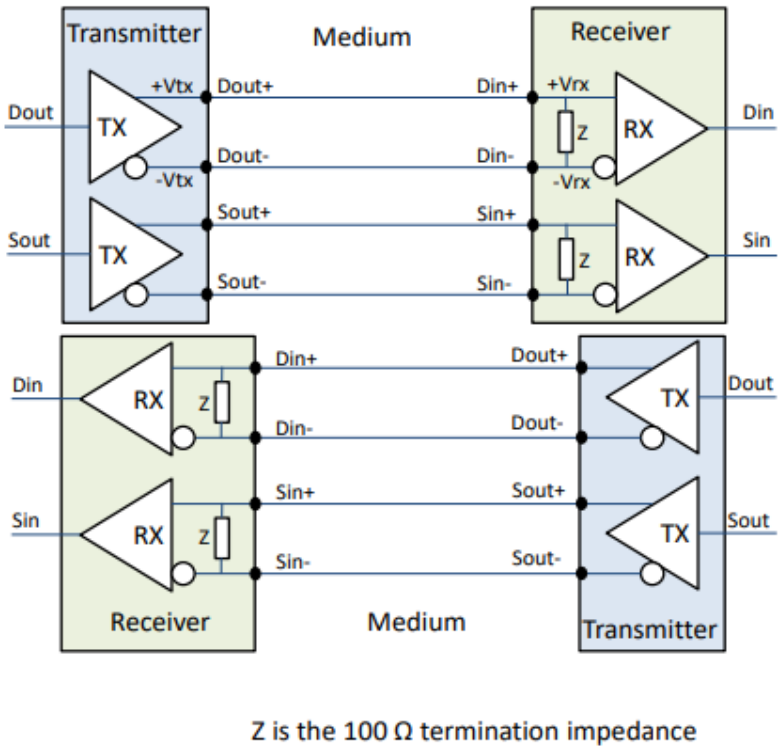
Οι στόχοι του SpaceWire συνοψίζονται στους εξής:

- διευκόλυνση της κατασκευής συστημάτων ενσωματωμένου χειρισμού δεδομένων υψηλής απόδοσης
- συμβολή στη μείωση του κόστους ολοκλήρωσης ενός συστήματος,
- προώθηση της συμβατότητας μεταξύ του εξοπλισμού χειρισμού δεδομένων και των υποσυστημάτων
- να ενθαρρύνει την επαναχρησιμοποίηση εξοπλισμού χειρισμού δεδομένων σε πολλές διαφορετικές αποστολές.

2.2. Περιγραφή και λειτουργία του Προτύπου ECSS-E-ST-50- 12C

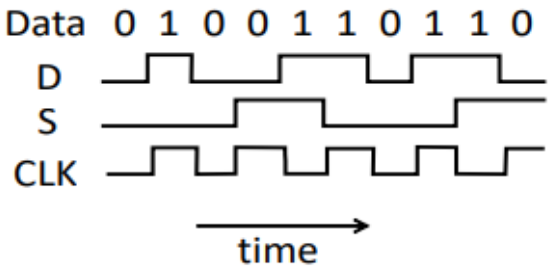
Οι ζεύξεις του SpaceWire είναι ζεύξεις δεδομένων σημείο προς σημείο (point-to-point), οι οποίες συνδέουν έναν κόμβο (node) του Spacewire με έναν άλλο κόμβο ή

με έναν μεταγωγέα (switch). Το Πρότυπο SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C [22] χρησιμοποιεί διαφορική σηματοδοσία χαμηλής τάσης (Low-Voltage Differential Signaling, LVDS), η οποία έχει καθοριστεί στο ANSI/TIA/EIA-644, Electrical Characteristics of Low Voltage Differential Signaling Interface Circuits [12]. Αυτό ισχύει έως το φυσικό επίπεδο λόγω της δυνατότητάς του για σημείο προς σημείο επικοινωνία υψηλής ταχύτητας με χαμηλή ισχύ και μικρό θόρυβο. Η σηματοδοσία LVDS, παρουσιάζεται στην Εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.1. SpaceWire LVDS [25]

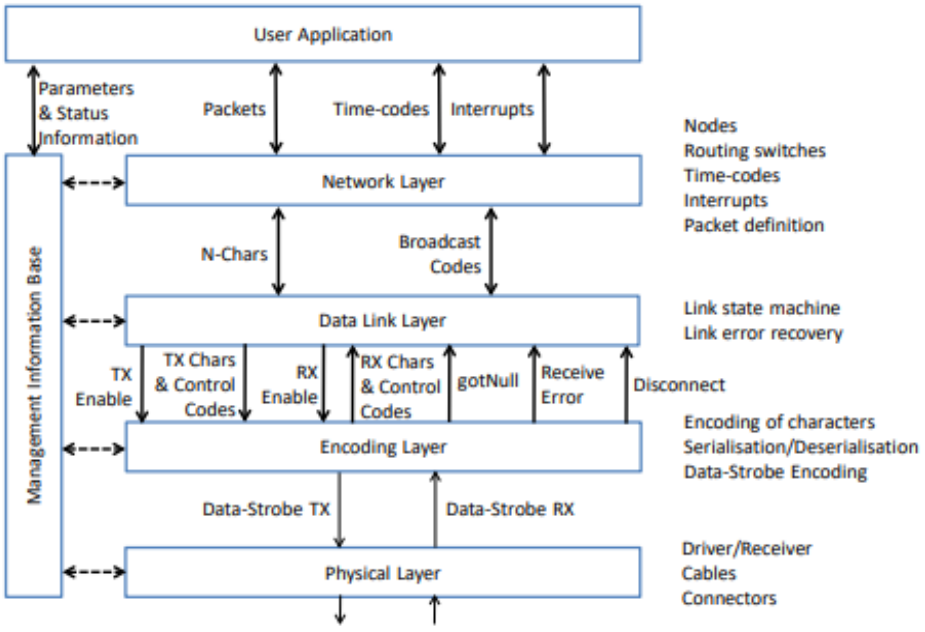
Προκειμένου να επιτευχθεί σωστά η αποκωδικοποίηση του σήματος πληροφορίας που λαμβάνει ο δέκτης, είναι απαραίτητο ο τελευταίος να συγχρονιστεί με τον πομπό. Για αυτό το λόγο, η πληροφορία αποστέλλεται μέσω της ζεύξης ως σειριακή ροή δυαδικών ψηφίων (bits) με τη χρήση δύο σημάτων, των Data (D) και Strobe (S), των οποίων η κωδικοποίηση παρουσιάζεται σχηματικά παρακάτω μαζί και με αυτή του ρολογιού (clock), που είναι κωδικοποιημένο μέσα σε ένα σήμα Strobe, στέλνεται μαζί με τα σειριακά δεδομένα και συμβάλλει στο συγχρονισμό των bits. Το λογικό 0 αντιστοιχίζεται σε χαμηλό επίπεδο τάσης ενώ το λογικό 1 σε υψηλό. Το σήμα «συγχρονισμού» (strobe signal) αλλάζει κατάσταση κάθε φορά που το επόμενο δυαδικό ψηφίο του σήματος πληροφορίας (data signal) έχει ίδια τιμή με το προηγούμενο. Έτσι, το ρολόι του πομπού (clock) μπορεί να ανακτηθεί αν πραγματοποιηθεί μεταξύ των δύο σημάτων η λογική πράξη «αποκλειστικό ή» (XOR). Το πρότυπο ANSI/TIA/EIA-644 απαιτεί και τα δύο σήματα, Data και Strobe, να οδηγούνται μέσω της ζεύξης χρησιμοποιώντας LVDS και να χρησιμοποιούνται δύο καλώδια για κάθε σήμα. Έτσι, το καλώδιο SpaceWire περιέχει τέσσερα μονωμένα καλώδια συνεστραμμένου ζεύγους, ένα για κάθε σήμα (D ή S) και για κάθε κατεύθυνση [15].



Εικόνα 2.2. Κωδικοποίηση σημάτων Data-Strobe [25]

Το πρωτόκολλο SpaceWire αποτελείται από τα εξής επίπεδα (levels) ή στρώματα (layers), τα οποία παρουσιάζονται σχηματικά και στην παρακάτω Εικόνα:

- **Φυσικό Επίπεδο** (Physical Level): Καθορίζει τους συνδέσμους, τα καλώδια, τη συναρμολόγηση καλωδίων κ.α.
- **Επίπεδο Σήματος** (Signal Level): υπεύθυνο για την κωδικοποίηση, τα επίπεδα τάσης, τα όρια θορύβου και τον ρυθμό σηματοδοσίας.
- **Επίπεδο Σύνδεσης Δεδομένων** (Data Link layer): Σε αυτό το επίπεδο έχουμε πολλές λειτουργίες που συνθέτουν ορισμένα υποεπίπεδα. Αναλαμβάνει τον καθορισμό των δεδομένων και ελέγχει τους χαρακτήρες (chars) που χρησιμοποιούνται για να διαχειριστεί τα δεδομένα διαμέσου μιας ζεύξης (επίπεδο χαρακτήρα, character level). Καθορίζει το πρωτόκολλο για τον συγχρονισμό της ζεύξης, ελέγχει τη ροή, ανιχνεύει και επαναφέρει από λάθη της ζεύξης (επίπεδο ανταλλαγής, exchange level). Διαχειρίζεται τη μετάδοση των δεδομένων σε πακέτα μέσω μιας ζεύξης SpaceWire (επίπεδο πακέτου, packet level).



Εικόνα 2.3. Τα επίπεδα του SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C [25]

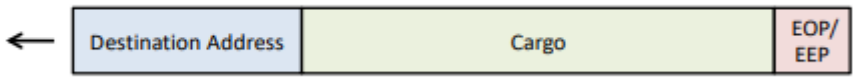
- **Επίπεδο Δικτύου** (Network Level): Διαχειρίζεται τη δομή του δικτύου SpaceWire και τους κόμβους μεταφοράς δεδομένων από την πηγή προς τον

προορισμό, ενώ εντοπίζει τα λάθη της ζεύξης και αντιμετωπίζει τα λάθη του επιπέδου δικτύου.

Η βάση διαχείρισης πληροφοριών SpaceWire είναι υπεύθυνη για τη διαμόρφωση, τον έλεγχο και την παρακολούθηση της λειτουργίας των άλλων επιπέδων Spacewire Έχει άμεση πρόσβαση στις σχετικές παραμέτρους στο επίπεδο δικτύου, το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων, το επίπεδο κωδικοποίησης και το φυσικό επίπεδο και δέχεται επίσης αιτήματα για υπηρεσίες από μια εφαρμογή χρήστη.

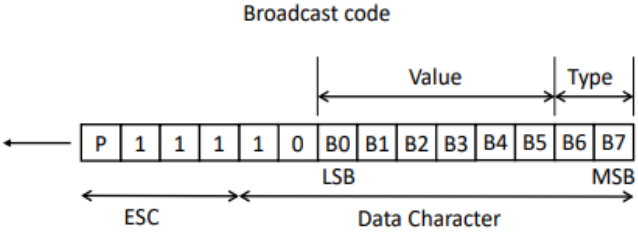
Δύο κατηγορίες χαρακτήρων καθορίζονται στο Πρότυπο ECSS-E-ST50-12C, οι χαρακτήρες δεδομένων και οι χαρακτήρες ελέγχου. Οι χαρακτήρες αυτοί καθορίζονται περαιτέρω ως είτε χαρακτήρες ζεύξης είτε κανονικοί χαρακτήρες. Με χρήση αυτών των δύο ειδών χαρακτήρων δημιουργούνται οι βασικές μονάδες που υλοποιούν τη μετάδοση μέσω μιας SpW ζεύξης. Ειδικότερα, οι μονάδες αυτές, είναι:

- Τα **πακέτα** (packets). Το πακέτο είναι η μονάδα ανταλλαγής πληροφορίας και δομείται όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα. Αποτελείται από τη διεύθυνση προορισμού (Destination Address), η οποία χρησιμεύει για τη δρομολόγηση του πακέτου μέσα σε ένα δίκτυο, το φορτίο του πακέτου (Cargo) και έναν χαρακτήρα τερματισμού μεταξύ των EOP (end of packet) και EEP (error end of packet), που σηματοδοτούν τον λανθασμένο (EEP) ή μη (EOP) τερματισμό ενός πακέτου. Το σύνολο των χαρακτήρων που αποτελούν το πακέτο, δηλαδή οι χαρακτήρες δεδομένων και οι δύο αυτοί χαρακτήρες ελέγχου, ονομάζονται «κανονικοί» χαρακτήρες ή απλώς N-Chars (Normal Characters). Δεν υπάρχει συγκεκριμένο όριο στο μέγεθος ενός πακέτου Spacewire.



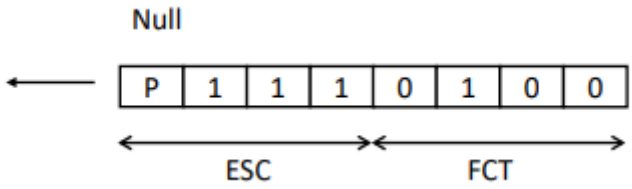
Εικόνα 2.4. Δομή πακέτου "SpaceWire" [25]

- **Κωδικοί ευρυεκπομπής** (broadcast codes) χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά σημάτων με υψηλή προτεραιότητα, σε όλους τους κόμβους ενός δικτύου SpW και η κωδικοποίησή τους είναι ο χαρακτήρας ελέγχου "ESC" ακολουθούμενος από έναν χαρακτήρα δεδομένων, όπως μπορούμε να δούμε χαρακτηριστικά στην επόμενη Εικόνα (τα δύο σημαντικά bit (B7:6) σχηματίζουν το πεδίο τύπου και τα λιγότερο σημαντικά έξι bit (B5:0) σχηματίζουν το πεδίο τιμών). Υπάρχουν δύο είδη τέτοιων κωδικών (time-codes, distributed interrupts), αλλά δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιούνται στην περίπτωση μιας απλής ζεύξης δεν θα αναλυθούν περαιτέρω.



Εικόνα 2.5. Κωδικοποίηση κωδικού ευρυεκπομπής [25]

- **Κωδικοί ελέγχου "NULL"**. Ένας κωδικός ελέγχου "NULL" αποτελείται από τους διαδοχικούς χαρακτήρες ελέγχου ESC-FCT και χρησιμοποιείται για να διατηρεί τη ζεύξη ενεργή όταν δεν υπάρχουν άλλα δεδομένα προς αποστολή, καθώς και για την αρχικοποίησή της (initialization). Τα δύο πιο σημαντικά bits του χαρακτήρα ESC και τα δύο λιγότερο σημαντικά bits του χαρακτήρα FCT συνιστούν το εύρος ισοτιμίας του χαρακτήρα NULL.



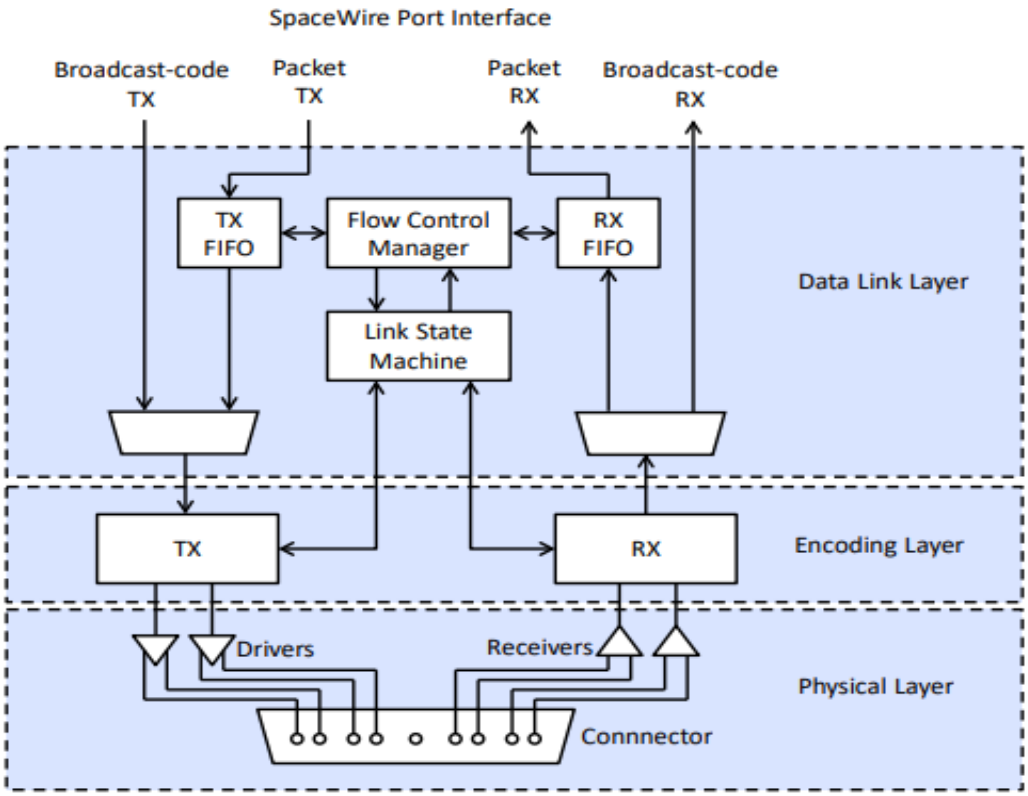
Εικόνα 2.6. Κωδικοποίηση χαρακτήρα ελέγχου "NULL" [25]

- **Χαρακτήρες ελέγχου ροής "FCT"**. Ο χαρακτήρας "FCT", εκτός από τη συμμετοχή του σε κωδικούς ελέγχου, όπως είδαμε παραπάνω, χρησιμοποιείται και σαν μονάδα ελέγχου ροής δεδομένων και συγκεκριμένα αποστέλλεται από το ένα άκρο της ζεύξης ώστε να «ενημερώσει» το άλλο άκρο ότι το πρώτο είναι έτοιμο να δεχθεί επιπλέον δεδομένα. Αυτή η λειτουργία είναι απαραίτητη προκειμένου να αποφεύγεται η συμφόρηση σε ένα δίκτυο, ενώ στην περίπτωση μιας ζεύξης, προστατεύει τον δέκτη από υπερχείλιση.

Υπάρχει σαφής ιεραρχία αποστολής μεταξύ αυτών των τεσσάρων βασικών μονάδων επικοινωνίας σε ένα δίκτυο ή μια ζεύξη SpW που προκύπτει από τη σημαντικότητα κάθε λειτουργίας. Αναλυτικότερα, η σειρά προτεραιότητας από την υψηλότερη στη χαμηλότερη είναι, κωδικοί ευρυεκπομπής, χαρακτήρες ελέγχου ροής (βλέπε FCT), κανονικοί χαρακτήρες N-Chars και τέλος κωδικοί ελέγχου "NULL".

Εν συνεχεία, παρουσιάζεται στην Εικόνα που ακολουθεί η αρχιτεκτονική μιας **θύρας SpaceWire** (port) η οποία αποτελείται αρχικά από δύο ζεύγη οδηγών γραμμής (line drivers) που μετατρέπουν τα δεδομένα και τα σήματα Strobe σε διαφορικά σήματα χαμηλής τάσης (LVDS) και δύο ζεύγη δεκτών γραμμής που δέχονται τα σήματα LVDS και ανακτούν τα δεδομένα (Data) και τα σήματα Strobe, τα οποία οδηγούνται σε όλη τη σύνδεση. Διαθέτει έναν πομπό, που είναι υπεύθυνος για την κωδικοποίηση των χαρακτήρων που θα αποσταλούν μέσω της σύνδεσης σε σύμβολα, για τη σειριοποίηση αυτών των συμβόλων σε μία ροή δυαδικών ψηφίων και την κωδικοποίηση της ροής δυαδικών ψηφίων σε δεδομένα και ζεύγη σημάτων Strobe και αντίστοιχα ένα δέκτη, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αποκωδικοποίηση των λαμβανόμενων δεδομένων και ζευγών σημάτων Strobe σε μία ροή δυαδικών ψηφίων δεδομένων, για την απελευθέρωση της ροής των δυαδικών ψηφίων σε σύμβολα και την αποκωδικοποίηση των λαμβανόμενων συμβόλων σε χαρακτήρες. Ακόμη, περιλαμβάνει μία διεπαφή θύρας SpaceWire για μετάδοση πακέτων, μία διεπαφή για λήψη πακέτων, μία διεπαφή μετάδοσης κωδικού εκπομπής και μία διεπαφή λήψης κωδικού εκπομπής. Στη θύρα SpW , πρέπει να υπάρχει επίσης μία ουρά μετάδοσης (TX FIFO) για να αποθηκεύει τα N-Chars που παρέχονται από την εφαρμογή μέσω της διεπαφής θύρας SpaceWire μέχρι να μπορέσουν να σταλούν μέσω της ζεύξης, μία

ουρά λήψης (RX FIFO) η οποία θα αποθηκεύει τα λαμβανόμενα N-Chars μέχρι αυτά να μπορούν να διαβαστούν από την εφαρμογή μέσω μιας διεπαφής θύρας SpaceWire. Τέλος, στη θύρα εντοπίζεται ένας διαχειριστής ελέγχου ροής δεδομένων (Flow Control Manager), που θα εμποδίζει την αποστολή δεδομένων όταν δεν υπάρχει χώρος στη FIFO λήψης και μία μηχανή κατάστασης σύνδεσης (Link State Machine) η οποία θα είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της εκκίνησης μίας σύνδεσης και την ανάκτηση σφαλμάτων.



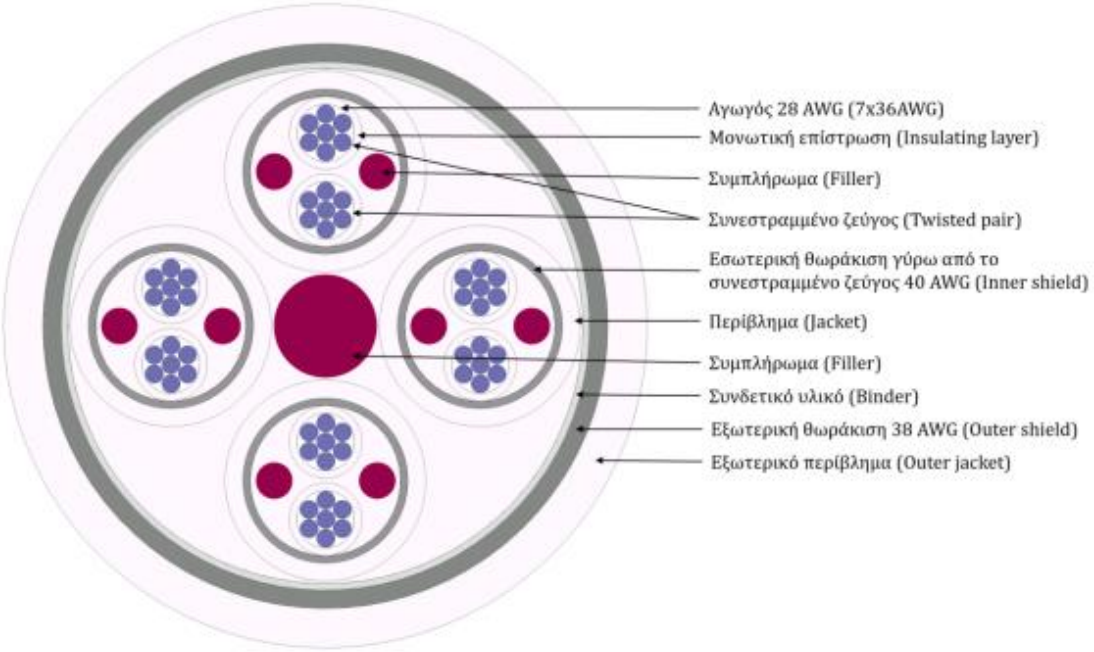
Εικόνα 2.7. Οπτική παρουσίαση αρχιτεκτονικής της θύρας SpaceWire [25]

2.3. Το φυσικό επίπεδο

Οι παροχές του φυσικού επιπέδου του SpaceWire (physical layer) συνοψίζονται στην υπηρεσία μετάδοσης δεδομένων και σημάτων Strobe από το επίπεδο κωδικοποίησης πάνω στο φυσικό μέσο και στην υπηρεσία λήψης δεδομένων και Strobe σημάτων από το φυσικό μέσο, τα οποία μεταδίδει στο επίπεδο κωδικοποίησης. Επίσης, δέχεται αιτήσεις παροχής υπηρεσιών από το επίπεδο κωδικοποίησης και είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση και λήψη δεδομένων και σημάτων Strobe σε συνδέσμους και συγκροτήματα καλωδίων.

2.3.1. Καλώδια

Στην Εικόνα 2.8. αντικατοπτρίζεται το πώς συναρμολογείται ένα καλώδιο [29] SpaceWire με βάση το Πρότυπο ESCC 3902/003 . Επειδή η ζεύξη SpW είναι αμφίδρομη και για κάθε κατεύθυνση απαιτούνται δύο σήματα (σήμα πληροφορίας και σήμα συγχρονισμού), ένα καλώδιο SpW αποτελείται από τέσσερα συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων.



Εικόνα 2.8. Εγκάρσια τομή της δομής καλωδίου SpaceWire

Επειδή η ζεύξη SpW είναι αμφίδρομη και για κάθε κατεύθυνση απαιτούνται δύο σήματα (σήμα πληροφορίας και σήμα συγχρονισμού), ένα καλώδιο SpW αποτελείται από τέσσερα συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων. Κάθε σύρμα μεταφοράς σήματος (signal wire) είναι διαμέτρου 28 AWG (American Wire Gauge), αποτελούμενο από επτά νήματα των 36 AWG κράματος χαλκού μεγάλης αντοχής επιστρωμένα με άργυρο και είναι μονωμένο με λευκό διογκωμένο μικροπορώδες πολυτετραφθοροαιθυλένιο, ή PTFE (insulating layer). Όσο για την εσωτερική θωράκιση, το ECSS-E-ST-50-12C προβλέπει ότι το κάθε ζεύγος διαφορικού σήματος είναι εφοδιασμένο με πλεκτή θωράκιση (braided inner shield), η οποία είναι τύπου push-back και παρέχει κάλυψη άνω του 90%, με διάμετρο 40 AWG, ενώ για την εξωτερική θωράκιση έχουμε αγωγούς 38 AWG. Στον παρακάτω Πίνακα, παρατίθενται οι διαστάσεις κάθε τύπου AWG. Η μέγιστη επιτρεπτή DC αντίσταση του εσωτερικού αγωγού είναι 256 Ω/km. Τόσο σε κάθε ζεύγος καλωδίων, όσο και στο συνολικό καλώδιο χρησιμοποιούνται συμπληρώματα (fillers) εντός των θωρακίσεων ώστε η διάμετρος του συνολικού καλωδίου αλλά και των επιμέρους ζευγών να παραμένει αμετάβλητη. Ένα δεματικό (binder) ίδιου υλικού με το συμπλήρωμα (filler) εφαρμόζεται γύρω από τα τέσσερα διαφορικά ζεύγη σήματος με το κεντρικό συμπλήρωμα για να κρατήσει τα ζεύγη καλωδίων και το συμπλήρωμα μαζί σε σταθερή θέση, τυλιγμένο με μέγιστη επικάλυψη (overlap) 50%.

Η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση κάθε ζεύγους διαφορικών σημάτων πρέπει να είναι 100 ± 6 Ω, με την επιτρεπτή τιμή της λόξωσης (skew) ανάμεσα σε κάθε σήμα για κάθε διαφορικό ζεύγος σήματος να είναι μικρότερη από 0.1 ns/m.

Πίνακας 2.1. Διαστάσεις American Wire Gauge

AWG #	**Διάμετρος σε mm**
26	0.4049
28	0.3211
36	0.1270
38	0.1007
40	0.0799

Η μέση απώλεια εισαγωγής σε ντεσιμπέλ ανά μέτρο μέσω κάθε διαφορικού ζεύγους σε ένα καλώδιο SpaceWire, θα είναι μικρότερη από τις τιμές που καθορίζονται από την εξίσωση:

$$\alpha_{cable} = k1 * \sqrt{f} + k2 * f + \frac{k3}{\sqrt{f}} \frac{dB}{m} \quad [25]$$

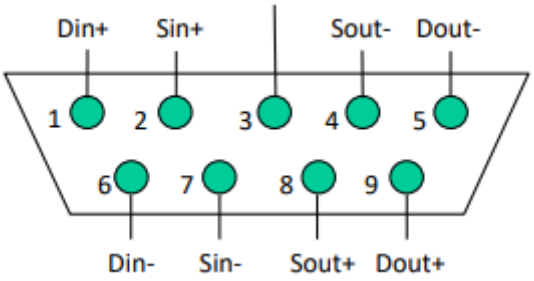
Όπου α_{cable} είναι η μέση τιμή της απώλειας και k1,k2,k3 είναι σταθερές ανάλογα με τον τύπο του καλωδίου που επιλέγουμε

Η τιμή απώλειας εισαγωγής του καλωδίου ανακτάται στη συχνότητα Nyquist που ισχύει στον δέκτη, η οποία π.χ. είναι 100 MHz για μια σύνδεση 200 Mbps ή 200 MHz για μια σύνδεση 400 Mbps

2.3.2. Σύνδεσμοι

Ο σύνδεσμος του SpaceWire [30] μπορεί να είναι τύπου A ή τύπου B. Ο τύπος B 1 χαρακτηρίζεται από ζεύγη επαφών με διαφορική αντίσταση 100 ± 6 Ω, είναι συμβατός με καλώδια ESCC 3902/003 ή ESCC 3902/002 και με το περιβάλλον χώρου όπως ορίζεται στο ESCC 3401. Ο συνήθης τύπος συνδέσμου είναι ο τύπου A μικροσκοπικού τύπου D 9 ακίδων-επαφών, οι οποίες μπορεί να είναι είτε πρεσαριστές (crimp) είτε συγκολλημένες (solder) σύμφωνα με το ESCC 3401/071 και διαχωρίζονται σε θηλυκές και αρσενικές επαφές. Οι σύνδεσμοι με θηλυκές επαφές θα εφαρμόζονται στους υποδοχείς που χρησιμοποιούνται σε πλακέτες κυκλωμάτων και μονάδες συναρμολόγησης, όπου πρέπει να είναι συνδεδεμένα τα καλώδια SpaceWire. Στα βύσματα, τα οποία χρησιμοποιούνται σε συγκροτήματα καλωδίων θα χρησιμοποιούνται σύνδεσμοι με αρσενικές επαφές. Οι αγωγοί SpaceWire πρέπει να συγκολληθούν απευθείας ή να πτυχωθούν στις επαφές. Συμπληρωματικός τύπος συνδέσμου είναι οι σύνδεσμοι ελευθέρων αγωγών (flying leads), για σύνδεση απευθείας πάνω σε πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB).

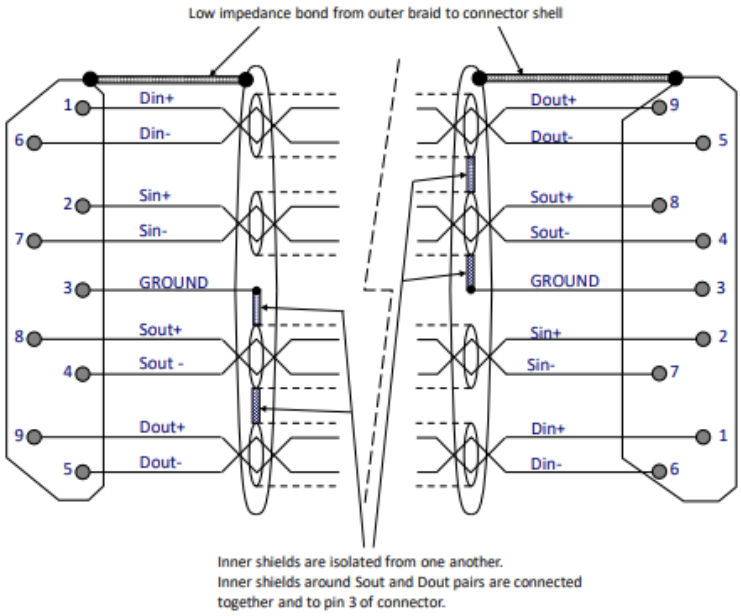
Στο σχήμα της Εικόνας 2.9, φαίνεται η ταυτοποίηση της κάθε σύνδεσης του συνδέσμου, όπως φαίνεται από την πίσω μεριά του θηλυκού ή την μπροστινή του αρσενικού βύσματος



Εικόνα 2.9. Ταυτοποίηση επαφών συνδέσμου SpaceWire [25]

Όσον αφορά το συναρμολόγημα ενός καλωδίου (assembly), αυτό έχει άμεση εξάρτηση από τον τύπο συνδέσμου που χρησιμοποιούμε (εδώ τύπος Α).

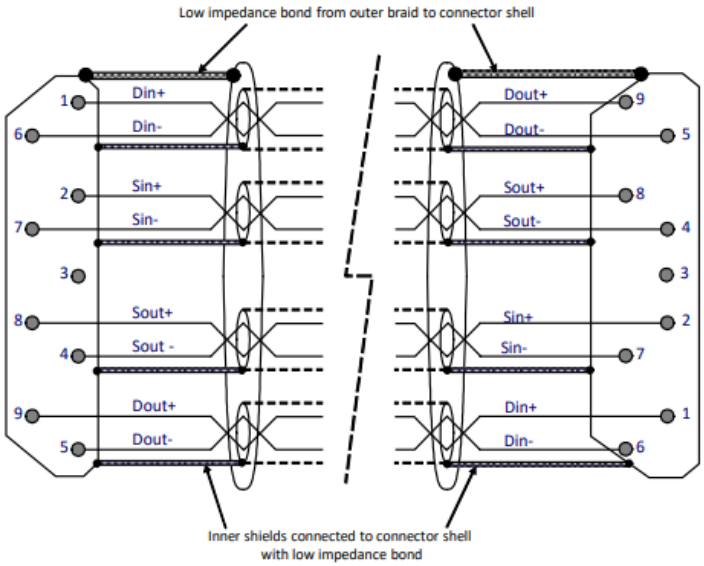
Μέχρι την τελευταία έκδοση του πρωτοκόλλου SpaceWire, η μέθοδος συναρμολόγησης ήταν η τύπου AL, η οποία απεικονίζεται παρακάτω και δεν έχει εφαρμογή σε νέα σχέδια. Οι εσωτερικές θωρακίσεις είναι απομονωμένες η μία από την άλλη και τερματίζονται στο ένα άκρο τους στην ακίδα Γης (επαφή 3, Ground) του αντίστοιχου συνδέσμου.



Εικόνα 2.10. Συναρμολόγηση καλωδίου SpaceWire τύπου AL [25]

Ακολουθεί η Εικόνα του συναρμολογήματος καλωδίου τύπου Α, του πλέον διαδεδομένου μοντέλου, που χρησιμοποιεί συνδέσμους τύπου Α. Φαίνονται και εδώ οι εσωτερικές θωρακίσεις, που σε αυτήν την περίπτωση τερματίζονται με τμήματα καλωδίων στο αγώγιμο κέλυφος του εκάστοτε συνδέσμου και στα δύο άκρα της ζεύξης. Η εξωτερική θωράκιση και στους δύο τύπους τερματίζεται περιμετρικά στα αγώγιμα κελύφη των συνδέσμων.

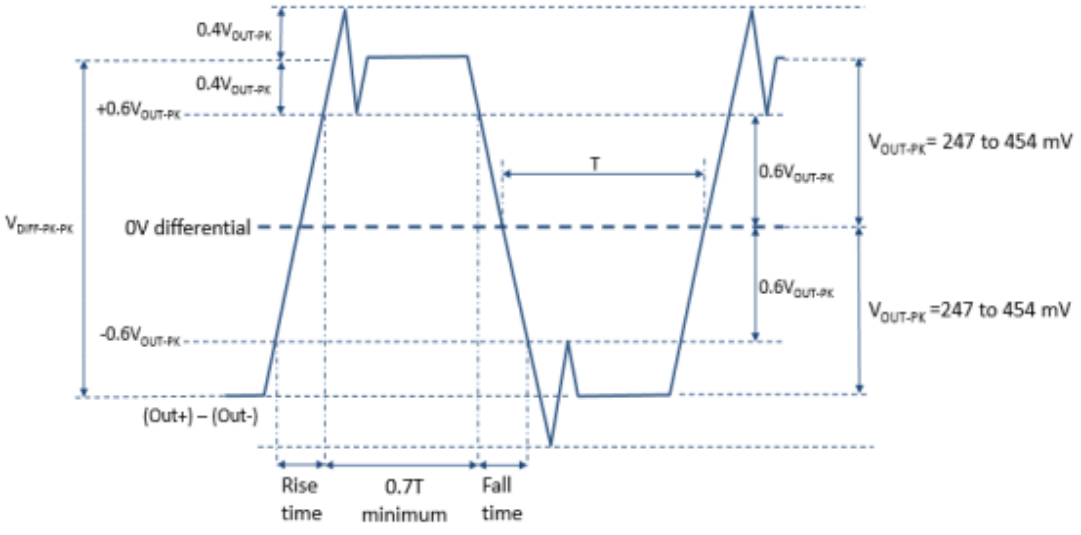
Ο τρόπος με τον οποίο οι αγώγιμες θωρακίσεις ενός καλωδίου τερματίζονται, πολλές φορές παίζει καθοριστικό ρόλο στην ατρωσία του απέναντι σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ή θορύβους και επιδρά στην ένταση των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών που προκαλούνται από τη λειτουργία του καλωδίου.



Εικόνα 2.11. Συναρμολόγηση καλωδίου SpaceWire τύπου A [25]

2.3.3. LVDS

Όπως αναφέρθηκε, η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την οδήγηση των σημάτων μεταξύ των δύο άκρων μιας ζεύξης SpW είναι η σηματοδοσία χαμηλής τάσης (LVDS), η οποία χρησιμοποιεί ισοσταθμισμένα σήματα για να παρέχει πολύ υψηλής ταχύτητας διασύνδεση χρησιμοποιώντας μία ταλάντευση χαμηλής τάσης (350mV τυπικά). Ειδικότερα, μιλάμε για διαφορική σηματοδοσία που δίνει τη δυνατότητα ενίσχυσης της ατρωσίας σε ηλεκτρομαγνητικούς θορύβους και διακυμάνσεων τάσης. Συγκεκριμένα, η μέγιστη διακύμανση της τάσης του διαφορικού σήματος είναι περίπου 700 mV. Οι χαμηλές τάσεις οδηγούν στην ανάπτυξη ρευμάτων χαμηλής έντασης, τα οποία με τη σειρά τους προκαλούν ασθενείς εκπομπές μαγνητικού πεδίου. Η διαφορική σηματοδοσία σημαίνει πως για κάθε σήμα αναπτύσσονται δύο ίσα και αντίθετα ρεύματα, με αποτέλεσμα οι εκπομπές μαγνητικού πεδίου να ελαττώνονται ακόμη περισσότερο. Στην Εικόνα 2.12. ακολουθεί γραφική απεικόνιση του διαφορικού σήματος LVDS.



Εικόνα 2.12. LVDS διαφορικό σήμα εξόδου οδηγού γραμμής [25]

2.4. Επίπεδο κωδικοποίησης

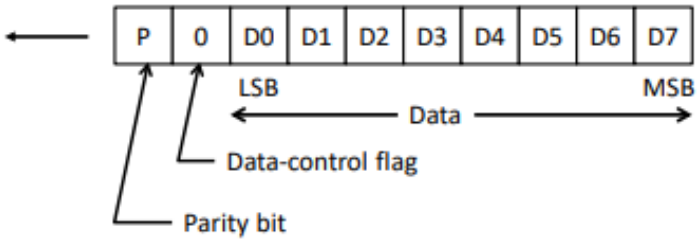
Το επίπεδο κωδικοποίησης (encoding layer) είναι υπεύθυνο για την κωδικοποίηση χαρακτήρων σε σύμβολα, τα οποία είναι έτοιμα προς μετάδοση στο φυσικό επίπεδο αλλά ακόμη ανακτά τις ροές δεδομένων που λαμβάνονται από το φυσικό επίπεδο, ώστε να τις αποκωδικοποιήσει σε χαρακτήρες. Δέχεται επίσης, αιτήματα εξυπηρέτησης από το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων.

Το επίπεδο κωδικοποίησης επιπλέον καθορίζει την σειριοποίηση ή αποσειριοποίηση των κωδικοποιημένων συμβόλων σε μια ροή δυαδικών ψηφίων και την κωδικοποίηση ή αποκωδικοποίηση των σημάτων data-strobe σε μια σειριακή ροή δυαδικών ψηφίων. Οι χαρακτήρες και οι κωδικοί ελέγχου πρέπει να είναι κωδικοποιημένοι, σειριοποιημένοι, κωδικοποιημένοι ως data-strobe και να μεταδίδονται με τη σειρά που λαμβάνονται από το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων, ενώ μεταβιβάζονται στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων με τη σειρά με την οποία λαμβάνονται. Θα πρέπει να διαβιβάζονται μόνο χαρακτήρες και κωδικοί ελέγχου που έχουν ληφθεί χωρίς σφάλμα ισοτιμίας (parity error). Το σφάλμα ισοτιμίας είναι ένα παράδειγμα σφάλματος λήψης.

Η λειτουργία του επιπέδου κωδικοποίησης θα ελέγχεται από το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων χρησιμοποιώντας τις ακόλουθα σημεία ελέγχου:

- Σημαία ενεργοποίησης μετάδοσης που να ενεργοποιεί τον πομπό (κωδικοποίηση χαρακτήρων, σειριοποίηση, κωδικοποίηση data-strobe δεδομένων και πρόγραμμα οδήγησης γραμμής) όταν επιβεβαιώνεται και το επαναφέρει όταν απενεργοποιηθεί.
- Σημαία ενεργοποίησης λήψης, η οποία δίνει τη δυνατότητα στον δέκτη (δέκτης γραμμής, αποκωδικοποιητής data-strobe δεδομένων, αποσειριοποίηση και αποκωδικοποίηση χαρακτήρων) όταν επιβεβαιώνεται και το επαναφέρει όταν απενεργοποιηθεί.
- Ενημέρωση στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων για τις αλλαγές στο επίπεδο κωδικοποίησης που υποδεικνύεται από τις καταστάσεις αποσύνδεσης, που υποδηλώνει ότι η σύνδεση έχει αποσυνδεθεί, σφάλματος λήψης, το οποίο υποδεικνύει ότι έχει εντοπιστεί σφάλμα στο ληφθέν σύμβολο και gotNull, το οποίο υποδεικνύει ότι ο πρώτος κωδικός ελέγχου Null ελήφθη χωρίς σφάλματα ισοτιμίας.

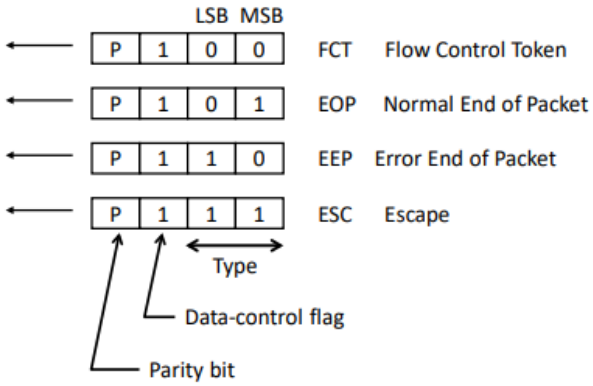
Παρακάτω, παρουσιάζεται η κωδικοποίηση χαρακτήρα δεδομένων που περιλαμβάνει κωδικοποίηση σε 10 bits με τα σύμβολα δεδομένων που προκύπτουν να περιέχουν



Εικόνα 2.13. Κωδικοποίηση χαρακτήρα δεδομένων [25]

ένα bit ισοτιμίας (parity bit), μια σημαία ελέγχου δεδομένων (data control flag) και οκτώ bit δεδομένων. Η σημαία ελέγχου δεδομένων τίθεται στο μηδέν για να υποδείξει ότι το σύμβολο ρεύματος περιέχει ένα χαρακτήρα δεδομένων. Η τιμή δεδομένων των οκτώ bit πρέπει να μεταδίδεται με πρώτο το λιγότερο σημαντικό bit (LSB).

Στην επόμενη Εικόνα, αντίστοιχα, αντικατοπτρίζεται η κωδικοποίηση ενός χαρακτήρα ελέγχου, η οποία πραγματοποιείται σε τέσσερα bit με το προκύπτον σύμβολο ελέγχου να περιέχει ένα bit ισοτιμίας, μια σημαία ελέγχου δεδομένων και ένα τύπο ελέγχου των δύο bit. Η σημαία ελέγχου δεδομένων ορίζεται σε 1 για να υποδηλώνει ότι το σύμβολο ρεύματος περιέχει έναν χαρακτήρα ελέγχου. Ένα διακριτικό ελέγχου ροής (FCT) κωδικοποιείται ως σύμβολο ελέγχου με τον τύπο ελέγχου δύο bit ορισμένο σε 0b00. Ένας δείκτης τέλους του πακέτου (EOP) πρέπει να κωδικοποιείται ως σύμβολο ελέγχου με τον τύπο ελέγχου δύο bit ορισμένο σε 0b10 και ένας δείκτης τέλους σφάλματος του πακέτου (EEP) θα κωδικοποιείται ως στοιχείο ελέγχου με τον τύπο ελέγχου δύο bit ορισμένο σε 0b01. Τέλος, ένας χαρακτήρας απόδρασης (ESC) κωδικοποιείται ως σύμβολο ελέγχου με τον τύπο ελέγχου δύο bit ορισμένο σε 0b11.



Εικόνα 2.14. Κωδικοποίηση χαρακτήρα ελέγχου [25]

Ο ρυθμός σηματοδότησης δεδομένων από μια θύρα εξόδου SpaceWire μετά από επαναφορά ή αποσύνδεση θα λειτουργεί με ταχύτητα 10 ±1 Mb/s μέχρι να τεθεί σε λειτουργία με διαφορετικό ρυθμό σηματοδότησης δεδομένων. Ο ελάχιστος ρυθμός σηματοδότησης δεδομένων με τον οποίο θα λειτουργεί μια θύρα εξόδου είναι 2 Mbps. Ωστόσο, ο μέγιστος ρυθμός σήματος δεδομένων είναι ο υψηλότερος ρυθμός σηματοδότησης δεδομένων που μπορεί να λειτουργήσει μια σύνδεση SpaceWire λαμβάνοντας υπόψη το σήμα εξασθένησης, τη λόξωση και τον τρόμο φάσης (jittering) και καθορίζεται για κάθε ένα από αυτά. Σε κάθε περίπτωση, δεν πρέπει να είναι μικρότερος από τον αρχικό ρυθμό σηματοδότησης δεδομένων. Μία ζεύξη SpaceWire μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε ρυθμό σηματοδοσίας δεδομένων μεταξύ του ελάχιστου και του μέγιστου δυνατού ρυθμού σηματοδοσίας δεδομένων και σε κάθε άκρο της ζεύξης μπορεί να έχουμε και διαφορετικούς ρυθμούς.

2.5. Επίπεδο σύνδεσης δεδομένων

Το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων (data link layer) αποστέλλει και λαμβάνει N-chars (συστατικά των πακέτων) μέσω μίας ζεύξης SpaceWire και κωδικούς (κωδικούς

χρόνου και κωδικούς διανεμημένων διακοπών- interrupt) σε μία διασύνδεση SpaceWire, ενώ καθορίζει και πώς οι επικοινωνίες αποκαθίσταται εκ νέου σε όλη τη σύνδεση αφού παρουσιαστεί ένα σφάλμα. Ακόμη, δέχεται αιτήσεις εξυπηρέτησης από το επίπεδο δικτύου.

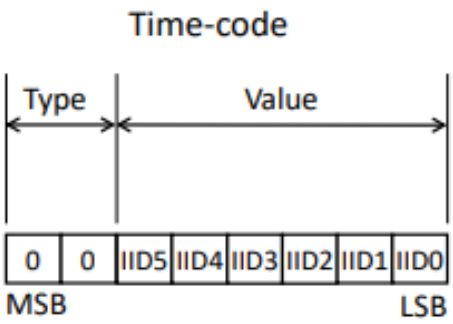
Ο έλεγχος του επιπέδου σύνδεσης δεδομένων διαχειρίζεται με χρήση ορισμένων παραμέτρων. Αυτές περιλαμβάνουν την Ενεργοποίηση, η οποία όταν επιβεβαιωθεί επιτρέπει τη λειτουργία θύρας SpaceWire, το LinkStart, το οποίο όταν επιβεβαιωθεί προκαλεί ενεργοποίηση μίας θύρας SpaceWire για να ξεκινήσει η σύνδεση SpaceWire στέλνοντας Nulls και την αυτόματη εκκίνηση, η οποία όταν επιβεβαιωθεί προκαλεί ενεργοποίηση μίας θύρας SpaceWire για να ξεκινήσει η σύνδεση SpaceWire μόλις ληφθεί ένα Null. Ακόμη, πρέπει να παρέχει τις πληροφορίες της τρέχουσας κατάστασης της μηχανής καταστάσεων επιπέδου σύνδεσης δεδομένων και τις σημαίες λάθους: (α) Αποσύνδεση (β) Σφάλμα ισοτιμίας (γ) Σφάλμα ESC (δ) Σφάλμα πίστωσης

2.6. Επίπεδο δικτύου

Το επίπεδο δικτύου (network layer) αποστέλλει και λαμβάνει πακέτα, κωδικούς χρόνου (time-codes) και διανεμημένες διακοπές (distributed interrupts) σε ένα δίκτυο SpaceWire. Επίσης, δέχεται αιτήσεις παροχής υπηρεσιών από τον χρήστη εφαρμογών.

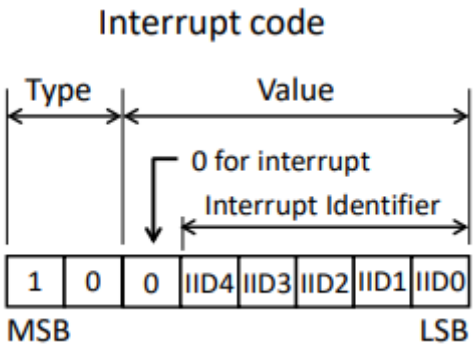
Τα πακέτα, που όπως αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου αποτελούν μια από τις θεμελιώδεις μονάδες επικοινωνίας του SpaceWire εκκινεί είτε ως ο πρώτος χαρακτήρας δεδομένων που αποστέλλεται μετά την αρχικοποίηση ή επανεγκατάσταση μετά από αποσύνδεση μίας σύνδεσης ή ο χαρακτήρας δεδομένων που ακολουθεί αμέσως μετά από EOP ή EEP, δηλαδή ο πρώτος χαρακτήρας δεδομένων μετά το τέλος του προηγούμενου πακέτου.

Οι κωδικοί χρόνου SpaceWire υλοποιούνται προαιρετικά σε κόμβους (nodes) και δρομολογητές. Όταν οι κωδικοί χρόνου δεν υποστηρίζονται από έναν κόμβο ή δρομολογητή, αυτός ο κόμβος ή ο διακόπτης δρομολόγησης (routing switch) αγνοεί τυχόν κωδικούς χρόνου που λαμβάνει. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται χαρακτηριστικά η κωδικοποίηση ενός κωδικού χρόνου. Το πεδίο τιμών ενός χρονικού κώδικα θα περιέχει μια τιμή κώδικα χρόνου 6 bit, η οποία είναι ένας ανυπόγραφος δυαδικός ακέραιος.



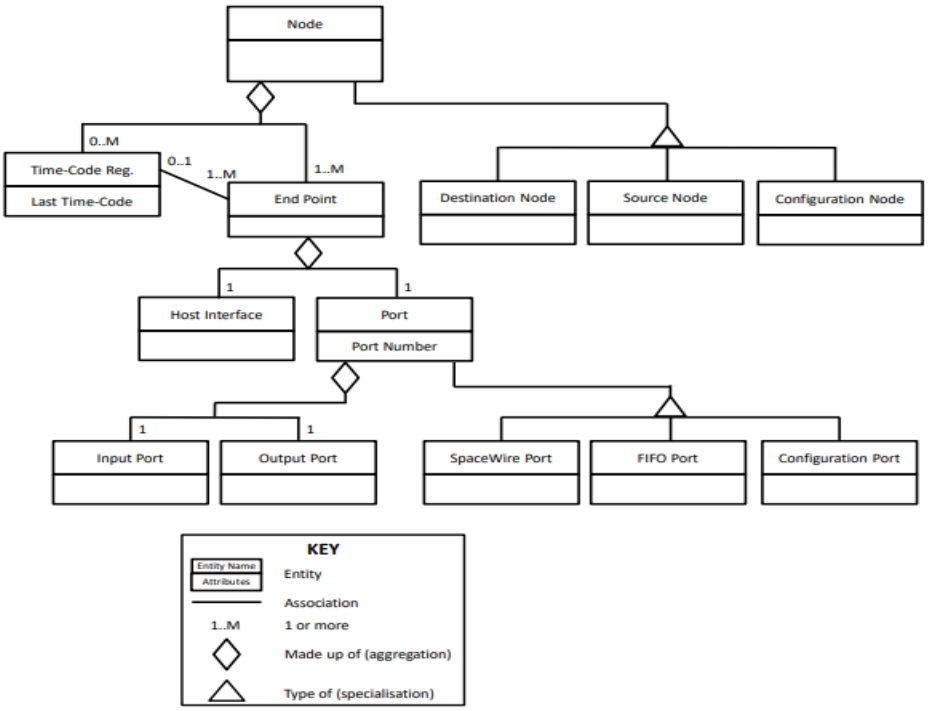
Εικόνα 2.15. Κωδικοποίηση κωδικού χρόνου επιπέδου δικτύου [25]

Παρόμοια, οι διανεμημένες διακοπές του SpaceWire θα εφαρμόζονται προαιρετικά σε κόμβους και δρομολογητές και όταν δεν υποστηρίζονται από κόμβο ή δρομολογητή, αυτός ο κόμβος ή ο διακόπτης δρομολόγησης θα πρέπει να αγνοεί τυχόν κωδικούς διακοπής και να διακόπτει κωδικούς επιβεβαίωσης που λαμβάνει, καθώς και τυχόν αιτήματα αποστολής του κεντρικού υπολογιστή για αποστολή διακοπών και διακοπώ επιβεβαιώσεων.

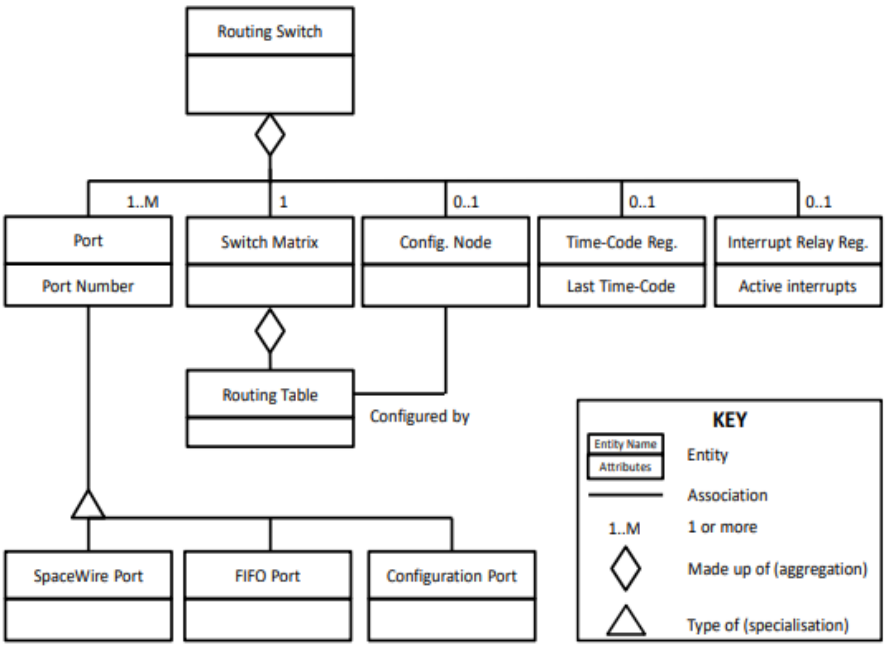


Εικόνα 2.16. Κωδικοποίηση διακοπής επιπέδου δικτύου [25]

Η λειτουργία του κόμβου SpaceWire είναι να δρα ως πηγή πακέτων που αποστέλλονται μέσω ενός δικτύου SpaceWire είτε προορισμός για πακέτα που έχουν ληφθεί μέσω ενός δικτύου SpaceWire ή και ως πηγή και ως προορισμός των πακέτων. Ένας κόμβος SpaceWire μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα ακραία σημεία έκαστο των οποίων παρέχει μία διασύνδεση μεταξύ μίας θύρας και ενός συστήματος κεντρικού υπολογιστή. Από την άλλη, ένας διακόπτης δρομολόγησης SpaceWire προωθεί ένα πακέτο που φτάνει σε μία θύρα προς τον απαιτούμενο προορισμό του, μέσω μίας άλλης θύρας, όπως καθορίζεται από τον πρώτο χαρακτήρα



Εικόνα 2.17a. Συστατικά και χαρακτηριστικά a) ενός κόμβου b) ενός διακόπτη δρομολόγησης SpaceWire [25]



Εικόνα 2.17b. Συστατικά και χαρακτηριστικά ενός διακόπτη δρομολόγησης SpaceWire [25]

δεδομένων του πακέτου και το περιεχόμενο του πίνακα δρομολόγησης. Το δίκτυο SpaceWire περιλαμβάνει δύο ή περισσότερους κόμβους και μηδέν ή περισσότερους διακόπτες δρομολόγησης διασυνδεδεμένους με συνδέσεις SpaceWire. Αποστέλλει πακέτα από κάθε κόμβο πηγής σε έναν ή περισσότερους κόμβους προορισμού. Στην Εικόνα 2.17., φαίνεται σχηματικά η δομή ενός κόμβου και ενός διακόπτη δρομολόγησης SpaceWire.

2.7. Συμπεράσματα

Μετά από μια αναλυτική μελέτη του Προτύπου ECSS-E-ST-50-12C, που καθορίζει όλα όσα εξετάσαμε στο παρόν κεφάλαιο, με σύντομη ανάλυση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου SpaceWire και των επιπέδων που το απαρτίζουν με τα χαρακτηριστικά εκείνα που έχουν άμεση συνάφεια με την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά των ζεύξεων SpaceWire, τέθηκε το απαραίτητο τεχνικό και θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση του πειραματικού μέρους και των αποτελεσμάτων του.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ραγδαία εξέλιξη στον επιστημονικό τομέα, που έχει ως κύριο αντικείμενο μελέτης την τεχνολογία SpaceWire. Εξελίχθηκε πολύ γρήγορα σε παγκόσμιο πρότυπο για δίκτυα δεδομένων υψηλής ταχύτητας σε διαστημικά αεροσκάφη, ενώ μελετώνται νέες τεχνικές για βελτίωση της απόδοσης του SpaceWire, για αποτελεσματικότερη διάγνωση σφαλμάτων, για αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης των δεδομένων αλλά και για οικονομικότερη χρησιμοποίηση των πόρων χωρίς όμως αυξημένες απώλειες. Επίσης, έρχονται στο προσκήνιο νέες τεχνικές για διάγνωση δικτύων SpaceWire με τη χρήση εξομοιωτών μεταδόσεων από κόμβο σε κόμβο χωρίς τη φυσική παρουσία των εξεταζόμενων συσκευών. Ένα βασικό ερώτημα που τίθεται, είναι το εάν είναι δυνατή η μείωση της μάζας του καλωδίου και κατά πόσο είναι δυνατή αυτή, χωρίς να αλλάζουν οι μηχανικές

ιδιότητες, να μειώνονται οι ταχύτητες διάδοσης ή να αυξάνονται οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, αν και για βραχείς συνδέσεις (3-5m) τα παραπάνω προβλήματα δεν προκαλούν σοβαρή ανησυχία. Δεν θα πρέπει εδώ να παραλειφθούν οι συνεχείς προσπάθειες για αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

Μάλιστα, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, αναπτύσσονται εργαλεία προσομοίωσης και παρακολούθησης δικτύων δεδομένων που υποστηρίζουν τη χρήση SpaceWire.. Έτσι, λοιπόν, το αρχικό πρότυπο εξελίσσεται σιγά σιγά στην οικογένεια προτύπων SpaceWire-2, η οποία καλύπτει πλήρως τις τρέχουσες ανάγκες.

Κεφάλαιο 3: Διάταξη, εξοπλισμός και διεξαγωγή πειραμάτων

3.1. Προετοιμασία

Υπάρχουν ορισμένες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται πριν τη διεξαγωγή κάποιας δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [7].

- Στο δάπεδο του εργαστηρίου τοποθετείται επίπεδο αναφοράς εδάφους (GRP). Ακόμη, για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιείται μεταλλικό φύλλο (χαλκός ή αλουμίνιο) ελάχιστου πάχους 0,25 mm. Άλλα μεταλλικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλλά πρέπει να έχουν ελάχιστο πάχος τουλάχιστον 0,65 mm. Το επίπεδο αναφοράς εδάφους (GRP) πρέπει να επεκτείνεται πέρα από τον εξοπλισμό υπό εξέταση (EUT, equipment under test) ή το οριζόντιο (κατά περίπτωση) κατά τουλάχιστον 0,5 m σε όλες τις πλευρές και πρέπει να συνδέεται με το προστατευτικό σύστημα γείωσης.
- Πρέπει πάντα να τηρούνται οι κανονισμοί ασφαλείας. Το EUT τοποθετείται και συνδέεται σύμφωνα με τις λειτουργικές του απαιτήσεις.
- Πρέπει να παρέχεται ελάχιστη απόσταση 0,8 m μεταξύ του EUT και των τοίχων του εργαστήριο και κάθε άλλη μεταλλική κατασκευή.
- Η γεννήτρια EUT και ESD (συμπεριλαμβανομένης οποιασδήποτε εξωτερικής τροφοδοσίας) πρέπει να είναι γειωμένες σύμφωνα με τις προδιαγραφές εγκατάστασής τους. Δεν επιτρέπεται να υπάρχουν πρόσθετες συνδέσεις γείωσης.
- Η τοποθέτηση των καλωδίων ισχύος και σήματος πρέπει να είναι αντιπροσωπευτική της πρακτικής εγκατάστασης. Το καλώδιο επιστροφής εκφόρτισης της γεννήτριας ESD πρέπει να συνδεθεί στο επίπεδο της γείωσης αναφοράς. Μόνο σε περιπτώσεις όπου το μήκος του καλωδίου υπερβαίνει το μήκος που απαιτείται για την εφαρμογή των εκκενώσεων στα επιλεγμένα σημεία, το πλεονάζον μήκος τοποθετείται, όπου είναι δυνατόν, μη επαγωγικά εκτός του επιπέδου αναφοράς του εδάφους. Το καλώδιο επιστροφής εκφόρτισης δεν πρέπει να πλησιάσει από 0,2 m σε άλλα αγώγιμα μέρη στη διάταξη δοκιμής εκτός από το επίπεδο αναφοράς γείωσης.
- Η σύνδεση των καλωδίων γείωσης στο επίπεδο αναφοράς γείωσης και όλες οι συνδέσεις πρέπει να είναι από χαμηλή σύνθετη αντίσταση, για παράδειγμα με χρήση μηχανικών συσκευών σύσφιξης για εφαρμογές υψηλής συχνότητας.
- Όπου καθορίζονται επίπεδα ζεύξης, για παράδειγμα για να επιτρέπεται η έμμεση εφαρμογή μιας εκφόρτισης, πρέπει αυτά να είναι κατασκευασμένα από μεταλλικό φύλλο (χαλκό ή αλουμίνιο) 0,25 mm ελάχιστο πάχος (μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα μεταλλικά υλικά αλλά θα πρέπει να έχουν τουλάχιστον 0,65 mm ελάχιστο σε πάχος) και θα συνδέεται με το GRP μέσω καλωδίου με 470 kΩ αντίσταση που βρίσκεται σε κάθε άκρο. Αυτές οι αντιστάσεις πρέπει να είναι ικανές να αντέχουν την τάση εκφόρτιση. Οι αντιστάσεις και τα καλώδια πρέπει να είναι μονωμένα για να αποφεύγονται βραχυκυκλώματα στο GRP όταν το καλώδιο βρίσκεται στο GRP.

Σχετικά με τις συνθήκες αναφοράς του εργαστηρίου για τη διαδικασία των δοκιμών, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος των περιβαλλοντικών παραμέτρων στα αποτελέσματα των δοκιμών, οι δοκιμές και η βαθμονόμηση πρέπει να πραγματοποιούνται σε κλιματικές και ηλεκτρομαγνητικές συνθήκες αναφοράς όπως καθορίζονται με βάση το Πρότυπο IEC 61000-4-2 και να είναι τέτοιες ώστε να εγγυώνται τη σωστή λειτουργία του εξοπλισμού, για να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών. Στην περίπτωση δοκιμής εκκένωσης αέρα, οι περιβαλλοντικές συνθήκες πρέπει να είναι εντός των ακόλουθων ορίων (άλλες τιμές ενδέχεται να ισχύουν για εξοπλισμό που χρησιμοποιείται μόνο σε συγκεκριμένα κλιματικά περιβάλλοντα) :

- θερμοκρασία περιβάλλοντος: 15 °C έως 35 °C.
- σχετική υγρασία: 30 % έως 60 %.
- ατμοσφαιρική πίεση: 86 kPa (860 mbar) έως 106 kPa (1 060 mbar).

3.2. Εξοπλισμός εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Για τις μετρήσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης απαιτείται υψηλής τεχνολογίας εξοπλισμός, τόσο για πειράματα με γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όσο και για τη διεξαγωγή μετρήσεων σε πραγματικά περιστατικά ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα ταχύτατα και επομένως απαιτείται εξοπλισμός ικανός να καταγράψει τα εμπλεκόμενα μεγέθη. Βέβαια, είναι διαφορετικές οι απαιτήσεις όταν έχουμε πειράματα με γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε αντιδιαστολή με αυτά πραγματικών συμβάντων. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιείται εξοπλισμός παραγωγής και καταγραφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων στους χώρους του διαπιστευμένου εργαστήριου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π περιλαμβάνει (παρατίθενται και αντίστοιχες Εικόνες):

- Μια γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων Schaffner NG 438 [16]

Εικόνα 3.1. Γεννήτρια NSG 438

Η γεννήτρια αυτή παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με τάση φόρτισης μεταξύ -30 kV και +30 kV. Πρέπει να σημειωθεί ότι, η συγκεκριμένη συσκευή διαθέτει οθόνη αφής, μέσω της οποίας γίνονται οι αναγκαίοι χειρισμοί. Η γεννήτρια αποτελείται από:

- Τη βασική μονάδα, η οποία περιλαμβάνει την μπαταρία τροφοδοσίας, τη γεννήτρια και το ρυθμιστή υψηλής τάσης, καθώς και ορισμένες διατάξεις ασφαλείας. Περιλαμβάνει επίσης 3 μπουτόν (Power On, Interlock reset, Emergency Power Off) και 4 λυχνίες (Power, Battery, High Voltage, Interlock).
- Τη γεννήτρια στην οποία βρίσκονται η ακίδα εκφόρτισης (αέρος ή επαφής), ηλεκτρονικά στοιχεία μέτρησης και η οθόνη αφής / εισαγωγής δεδομένων και το καλώδιο γείωσης. Στη λαβή του πιστολιού βρίσκεται το μπουτόν, το οποίο παράγει τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.
- Το DC τροφοδοτικό (CPW1027) το οποίο έχει είσοδο 100-250 Vac, 50-60 Hz, 1 A και δίνει στη βασική μονάδα 24 Vdc, 2,3 A.

- Τον ανιχνευτή ρευμάτων Fischer (FCC) : F-65 RF, Current Monitoring Probe, 10 kHz έως 1 GHz

Εικόνα 3.2. Ανιχνευτής ρεύματος (probe)

- έναν παλμογράφο Tektronix TDS 7254B

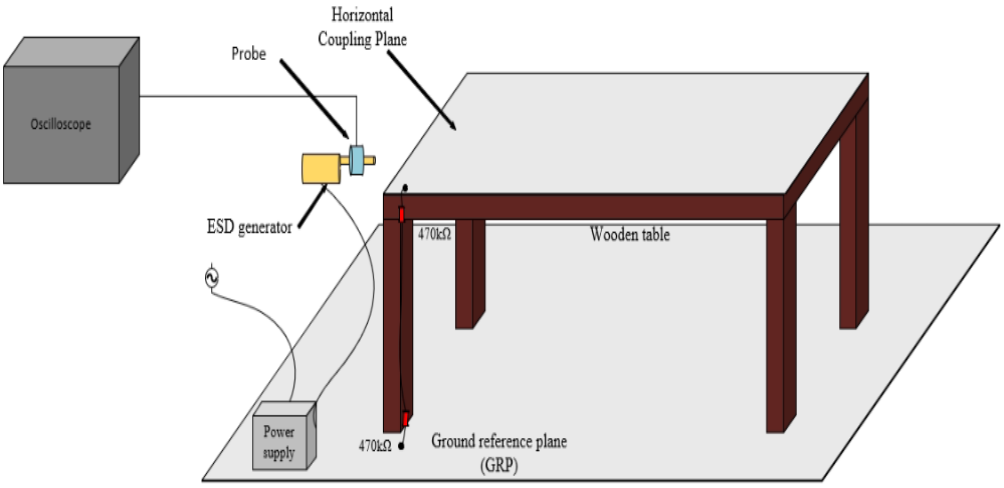
Εικόνα 3.3. Ο παλμογράφος Tektronix TDS 7254B Digital Phosphor Oscilloscope

- Ένα ομοαξωνικό καλώδιο για τη σύνδεση του αισθητήρα ρεύματος με τον παλμογράφο στην κατάληξη του οποίου έχει τοποθετηθεί εξασθενητής ώστε να μη διατρέχει κίνδυνο το κανάλι του παλμογράφου από μεγάλη ένταση ρεύματος. Ο εξασθενητής τοποθετείται μεταξύ του ομοαξονικού καλωδίου και του καναλιού του παλμογράφου

Εικόνα 3.4. Ο εξασθενητής (attenuator)

3.3. Πειραματική διάταξη και διαδικασία

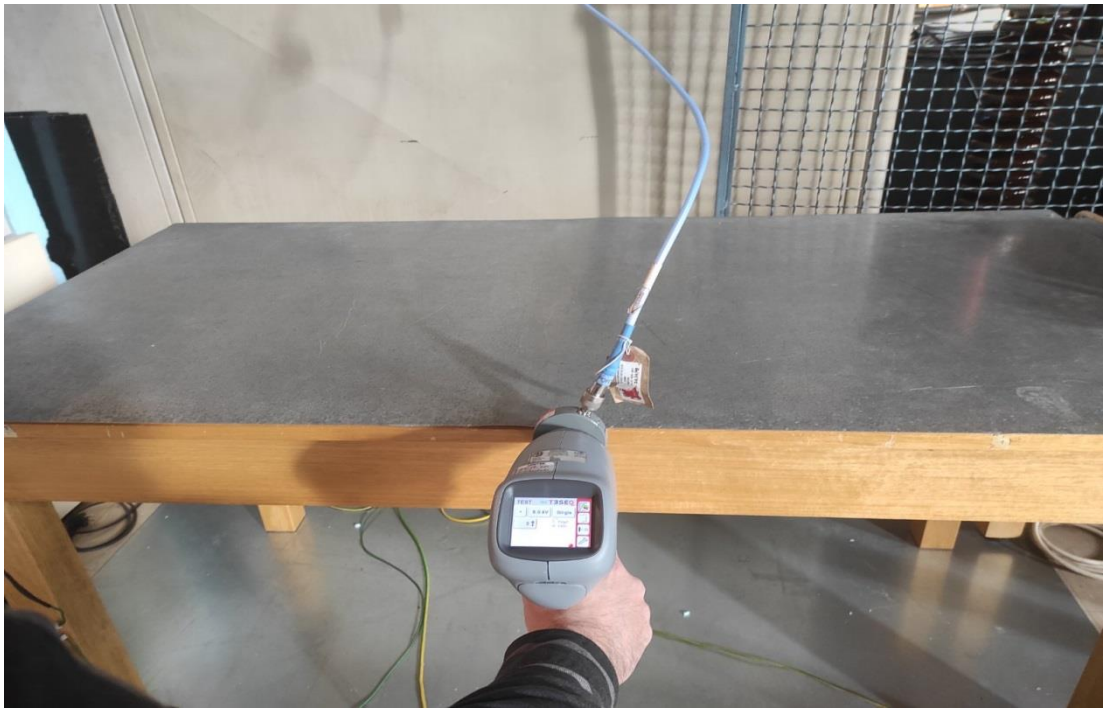
Για τις ανάγκες της διαδικασίας των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, τοποθετήθηκε ένα μεταλλικό φύλλο διαστάσεων 1,60m × 0,8m πάνω σε ένα τραπέζι, τοποθετημένο στο δάπεδο, και αποτέλεσε το πεδίο πάνω στο οποίο έγιναν οι δοκιμές, όπως φαίνεται με το γκρι χρώμα στην παρακάτω Εικόνα. Το επιπέδο αναφοράς γης (GRP), καθώς και το τροφοδοτικό της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτισέων (ESD) συνδέονται στο σύστημα γείωσης του εργαστήριου με τα κατάλληλα καλώδια. Το οριζόντιο επίπεδο ζεύξης (HCP) συνδέεται, εν συνεχεία, μέσω ενός καλωδίου το οποίο περιλαμβάνει τις δύο αντιστάσεις 470kΩ, όπως ορίζεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2, στο επίπεδο αναφοράς γης. Ο αισθητήρας ρεύματος είναι τοποθετημένος κατάλληλα στη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και η έξοδός του οδηγείται στον παλμογράφο μέσω του ομοαξονικού καλωδίου.



Εικόνα 3.5. Σχηματική παρουσίαση πειραματικής διάταξης για τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Στις Εικόνες 6.6., στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου, φαίνεται πιο παραστατικά η διάταξη του πειράματος σε φωτογραφίες από το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές, πέραν του παλμογράφου που στο εργαστήριο βρίσκεται σε διαφορετικό χώρο από το τραπέζι. Στο κάτω μέρος της πρώτης φωτογραφίας εντοπίζονται και οι αγωγοί γείωσης και το καλώδιο της γεννήτριας ESD.

Για τη λήψη των κυματομορφών ρεύματος [19] από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, επιλέχθηκαν 10 σημεία με αποστάσεις 5cm, 10cm, 20cm, 40cm, 60cm, 80cm, 100cm, 120 cm, 140cm, 155cm από το σημείο γείωσης στο οριζόντιο πεδίο ζεύξης, όπου πραγματοποιήθηκαν οι έμμεσες εκφορτίσεις της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, δημιουργώντας το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Σε κάθε σημείο εφαρμογής πραγματοποιήθηκε μέτρηση σε τέσσερα επίπεδα τάσης και συγκεκριμένα στα 2kV, 4kV, 6kV, 8kV όπως ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 για τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι μετρήσεις αυτές διεξήχθησαν για θετική και αρνητική πολικότητα, η οποία ρυθμιζόταν όπως και το επίπεδο τάσης στη γεννήτρια ESD, με αντίστοιχες ρυθμίσεις στον παλμογράφο (edge, trigger) για την ορθή λήψη των κυματομορφών ρεύματος. Για κάθε επίπεδο τάσης και πολικότητα σε κάθε επιλεγμένο σημείο εφαρμόστηκαν 5 δοκιμές και ελήφθησαν 5 μετρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων απεικονίζονταν στο κανάλι 1 του παλμογράφου. Τα δεδομένα του παλμογράφου αποθηκεύτηκαν σε αρχεία .csv, για να πραγματοποιηθεί στη συνέχεια η επεξεργασία τους, όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνες 3.6.α. Εφαρμογή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με τη γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων στο μέσο του τραπεζιού

Εικόνες 3.6.β. Κάτοψη του μεταλλικού πεδίου ζεύξης για τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με το πιστόλι ESD, τον ανιχνευτή ρεύματος και το ομοαξωνικό καλώδιο

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα μετρήσεων

4.1. Επεξεργασία μετρήσεων με πρόγραμμα ανακατασκευής ρεύματος σε Matlab

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Με κατάλληλο κώδικα στο λογισμικό Matlab, φορτώθηκαν τα αρχεία των μετρήσεων ώστε να γίνει η ανακατασκευή του ρεύματος όπως αναφέραμε προηγουμένως και προέκυψαν νέες κυματομορφές [21] για κάθε μέτρηση. Ταυτόχρονα, υπολογίστηκαν και οι τέσσερις παράμετροι που ορίζει το Πρότυπο, I_{max} , t_r , I_{30}, I_{60} και κατόπιν ο μέσος όρος αυτών για τις πέντε μετρήσεις που διεξήχθησαν ανά σημείο, επίπεδο τάσης και πολικότητα. Για κάθε επίπεδο τάσης εφαρμόστηκε ο κατάλληλος συντελεστής detrend για τη γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε, που είναι 0.38 για τα 2kV , 0.84 για τα 4kV, 1.12 για τα 6kV, 1.5 για τα 8kV.

Ακολουθεί ανάλυση του προγράμματος στο Matlab με παράθεση του κώδικα και εξήγηση των λειτουργιών που επιτελεί:

Αρχικά, καλούνται και φορτώνονται αρχεία δεδομένων που περιλαμβάνουν δεδομένα του μετασχηματιστή έντασης ρεύματος και την συνάρτηση μεταφοράς του μετασχηματιστή έντασης ρεύματος. Κατόπιν, γίνεται η αλλαγή του ονόματος του αρχείου .csv από τη μέτρηση που φορτώνεται.

```
clc;
close all;
clear all;
load('clamp.mat','cable_20M','time_pel');
load('probe.mat','COMP');
clamp_current_initial=xlsread('target.csv','E1:E3200'
```

Στη συνέχεια γίνεται ορισμός των χρόνων και καταχωρούνται στις κατάλληλες μεταβλητές δεδομένα ρεύματος. Η τιμή της μεταβλητής ρεύματος πολλαπλασιάζεται επί εκατό που αντιστοιχεί στο λόγο εξασθένησης του εξασθενητή που είναι συνδεδεμένος εν σειρά στον παλμογράφο.

```
time2=(-79:3120)*50e-12;
time3=(0:3199)*50e-12;
time3vert=transpose(time3);
timens=time2*10^9;
L=length(clamp_current_initial);
clamp_current=clamp_current_initial*100;
```

Κατόπιν ,επεξηγείται η διαδικασία της ανακατασκευής (reconstruction).

Αρχικά υλοποιούμε μετασχηματισμό Fourier για το ρεύμα εισόδου και τον υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς ως συνέλιξη των υπολοίπων συναρτήσεων.

```
fftcl=(fft(clamp_current,20000001));
H_cl=fftcl.*COMP.*cable_20M;
```

Για τον υπολογισμό του ρεύματος από την αποσυνέλιξη, γίνεται αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier. Ακόμη, γίνεται η βελτιστοποίηση detrend (προσθήκη detrend values) ανάλογα με το επίπεδο τάσης, με βάση τον πίνακα που παρατέθηκε στην ενότητα 1.4 (1.5 αντιστοιχεί στα 8kV)

```
clamp_current_deconv=ifft(H_cl);
clamp_current_dtr=(ifft(fftcl))+1.5;
```

Έπειτα, επαναλαμβάνεται μετασχηματισμός Fourier για το ρεύμα που έχουμε από τις μετρήσεις. Το ανακατασκευασμένο ρεύμα προκύπτει από τα πρώτα 3200 στοιχεία του πίνακα που προέκυψε από την αποσυνέλιξη.

```
fftcl=(fft(clamp_current_dtr));
H_cl=fftcl.*COMP.*cable_20M;
clamp_current_deconv=ifft(H_cl);
clamp_current_reconstr=clamp_current_deconv(1:3200);
```

Στην πορεία, έχουμε κώδικα για τα «πλοταρίσματα» και την εξαγωγή γραφημάτων κυματομορφών ρεύματος, όπου έχουμε το ρεύμα από τους ανιχνευτές ρεύματος και το ανακατασκευασμένο ρεύμα.

```
plot(timens,clamp_current_reconstr);
hold on;
plot (timens,clamp_current);
hold off;
legend('Reconstructed','initial');
ReconstructedCurrent=[time3vert(:,1) clamp_current_reconstr(:,1)];
```

Οι νέες κυματομορφές αποθηκεύονται σε αρχεία με τις παρακάτω εντολές. Στην πρώτη αλλάζει το όνομα αρχείου του αρχείου .txt που θα βγει και στην επόμενη το όνομα αρχείου του νέου αρχείου .csv.

```
dlmwrite('target_Cor.txt', ReconstructedCurrent, 'precision', '%.15f');
writematrix(ReconstructedCurrent,'target_Cor.csv')´
```

Στο επόμενο μέρος, πραγματοποιείται ο υπολογισμός και η εμφάνιση των χαρακτηριστικών μεγεθών και παραμέτρων των κυματομορφών ρεύματος, δηλαδή του μέγιστου ρεύματος (I_{max}), του χρόνο ανόδου t_r, του ρεύματος στα 30 ns (I_{30}) και του ρεύματος στα 60 ns (I_{60}), σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2.

Πρώτα, υπολογίζεται το φορτίο

```
clamp_current_reconstr=0;
Charge=abs(trapz(clamp_current_reconstr,time2));
```

Μέγιστο ρεύμα:

```
Ip=max(clamp_current_reconstr);
Ipdiv10=Ip/10;
Ip09=Ip*0.9;
```

Για τον υπολογισμό των I_{30},I_{60}:

Εύρεση χρονικής στιγμής t που αντιστοιχεί στο ρεύμα στα 10ns μετά την χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται για πρώτη φορά κατά τη φάση ανόδου το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης. Για την ακρίβεια, το αμέσως μεγαλύτερο.

```
o=1;
while (clamp_current_reconstr(o)<Ipdiv10)
o = o+1;
end
k10plus=o;
k10minus=o-1;
```

Χρησιμοποιείται η διαδικασία γραμμικής παρεμβολής για το χρόνο που αντιστοιχεί στο I_{10}. Η ευθεία ορίζεται από τα σημεία:

(timens(k10minus), clamp_current_reconstr (k10minus)) και
(timens(k10plus) , clamp_current_reconstr (k10plus)).

Το σημείο ενδιαφέροντος αποτελεί το (time10amp, Ipdiv10) όπου ζητείται η μεταβλητή time10amp, άρα:

```
klisi1=(clamp_current_reconstr(k10plus) –
clamp_current_reconstr(k10minus)) / (timens(k10plus) - timens(k10minus));
time10amp=timens(k10minus) + (Ipdiv10-
clamp_current_reconstr(k10minus))/klisi1;
time30ns= time10amp + 30;
time60ns= time10amp + 60;
```

Εύρεση I_{30}:

```
u=1;
while (timens(u)<time30ns)
u=u+1;
end
U_30nsplus=u;
U_30nsminus=u-1;
```

Εδώ πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή αντίστροφα για να υπολογιστεί το ρεύμα που αντιστοιχεί στα 30ns μετά το I_{10}.

Η ευθεία ορίζεται από τα σημεία:

(timens(i_30nsminus),clamp_current_reconstr(i_30nsminus)) και
(timens(i_30nsplus) , clamp_current_reconstr (i_30nsplus).

Το σημείο ενδιαφέροντος αποτελεί το (time30ns, clamp_current_reconstr_30ns) όπου ζητείται η μεταβλητή clamp_current_reconstr_30ns, οπότε:

```
klisi2=(clamp_current_reconstr(U_30nsplus)-
clamp_current_reconstr(U_30nsminus))/(timens(U_30nsplus)-
(timens(U_30nsminus));
clamp_current_reconstr_30ns=klisi2*(time30ns-timens(U_30nsminus))+
clamp_current_reconstr(U_30nsminus);
```

Εύρεση του I_{60}:

```
u=1;
while (timens(u)<time60ns)
u=u+1;
end
u_60nsplus=u;
u_60nsminus=u-1;
```

Ακολουθεί νέα εφαρμογή γραμμικής παρεμβολή για τον υπολογισμό του ρεύματος που αντιστοιχεί στα 60ns μετά το I_{10}. Η ευθεία ορίζεται από τα σημεία: ((timens(i_60nsminus) , clamp_current_reconstr (i_60nsminus)) και (timens(i_60nsplus) , clamp_current_reconstr (i_60nsplus))

Το σημείο ενδιαφέροντος αποτελεί το (time60ns , clamp_current_reconstr_60ns) όπου ζητείται η μεταβλητή clamp_current_reconstr_60ns, συνεπώς:

```
klisi3=(clamp_current_reconstr(u_60nsplus)-
clamp_current_reconstr(u_60nsminus)) / (timens(u_60nsplus) -
timens(u_60nsminus));
clamp_current_reconstr_60ns=klisi3*(time60ns-timens(u_60nsminus))+
clamp_current_reconstr(u_60nsminus);
```

Εύρεση του T_r (χρόνος ανόδου), δηλαδή χρόνος από το 10% στο 90 % του $I_{max}=I_p$:

Αρχικά είναι απαραίτητη η εύρεση της χρονικής στιγμής t που αντιστοιχεί στο ρεύμα στα 90ns μετά την χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται για πρώτη φορά κατά τη φάση ανόδου το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης για το I_{90}, με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκε το t για το I_{10}.

```
o=1;
while (clamp_current_reconstr(o)<Ip09)
o = o+1;
end
o90plus=o;
o90minus=o-1;
```

Με παρόμοιο τρόπο, πραγματοποιούμε γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό του χρόνου που αντιστοιχεί στο I_{90}. Η ευθεία ορίζεται από τα σημεία:

(timens(k90minus) , clamp_current_reconstr (k90minus)) και (timens(k90plus), clamp_current_reconstr (k90plus)).

Το σημείο ενδιαφέροντος αποτελεί το (time90amp,Ip09), στο οποίο ζητείται η μεταβλητή time90amp, επομένως:

```
klisi4=(clamp_current_reconstr(o90plus)-
clamp_current_reconstr(o90minus))/ (timens(o90plus) - timens(o90minus));
time90amp=timens(o90minus) + ( Ip09 -
clamp_current_reconstr(o90minus))/klisi4;
```

Άρα, ο χρόνος ανόδου είναι:

```
rise_time= time90amp - time10amp;
```

Στο τελευταίο κομμάτι του κώδικα χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες εντολές για την εμφάνιση των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν.

```
disp('---------------------------------------------------------------------------------- ')
fprintf('Current Parameters\n');
fprintf('Imin = %g A\n',-Ip);
fprintf('Fall time = %g ns\n',-rise_time);
fprintf('I_30ns = %g A\n',-clamp_current_reconstr_30ns);
fprintf('I_60ns = %g A\n',-clamp_current_reconstr_60ns);
fprintf('Charge transfered = %g C\n',Charge);
disp('---------------------------------------------------------------------------------- ')
```

Σημείωση: Το πρόγραμμα αυτό αφορά τα ρεύματα που μετρήθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων για τάσεις με θετική πολικότητα. Αντίστοιχο είναι το πρόγραμμα για αρνητική πολικότητα με τον πολλαπλασιασμό επί (-1) στις μεταβλητές ρεύματος από τον ανιχνευτή και του ανακατασκευασμένου ρεύματος, όπως βλέπουμε παρακάτω:

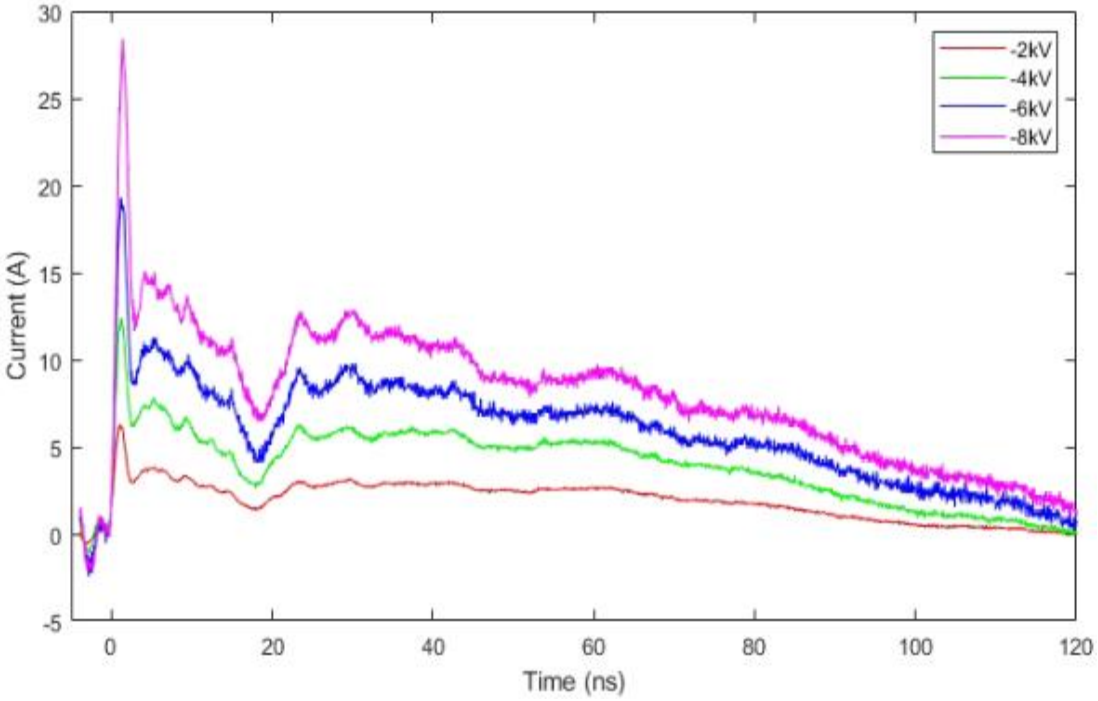
```
clamp_current=-clamp_current_initial*100;
ReconstructedCurrent=[time3vert(:,1) -clamp_current_reconstr(:,1)]
```

4.2. Αποτελέσματα και συγκριτική παρουσίαση

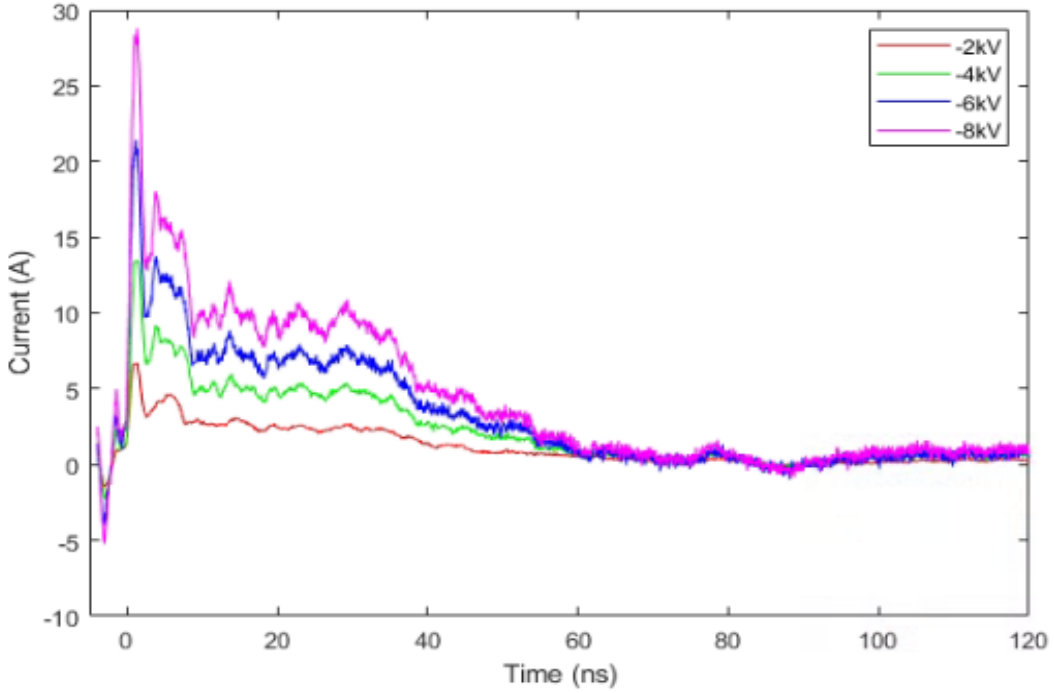
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διεξήχθησαν στο εργαστήριο, μετά τη μέθοδο ανακατασκευής ρεύματος που παρουσιάστηκε αναλυτικά, παρατίθενται εδώ με τη μορφή γραφημάτων και πινάκων. Και πάλι με τη χρήση του λογισμικού Matlab, κατασκευάστηκαν διαγράμματα, στα οποία αναδεικνύεται η μεταβολή των κυματομορφών ρεύματος σε σχέση με την απόσταση από το σημείο γείωσης, το επίπεδο τάσης και την πολικότητα, με σκοπό την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο κάθε παράγοντας επιδρά στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αξίζει να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε όλο το κεφάλαιο συνιστούν τους μέσους όρους των 5 μετρήσεων που αφορούν κάθε σημείο , επίπεδο τάσης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και πολικότητα.

Το πρώτο στοιχείο που εξετάζουμε είναι το επίπεδο τάσης που εφαρμόστηκε. Ενδεικτικά, στα πρώτα γραφήματα απεικονίζονται, για ένα σημείο, οι κυματομορφές ρεύματος για κάθε επίπεδο τάσης με θετική και έπειτα αρνητική πολικότητα:

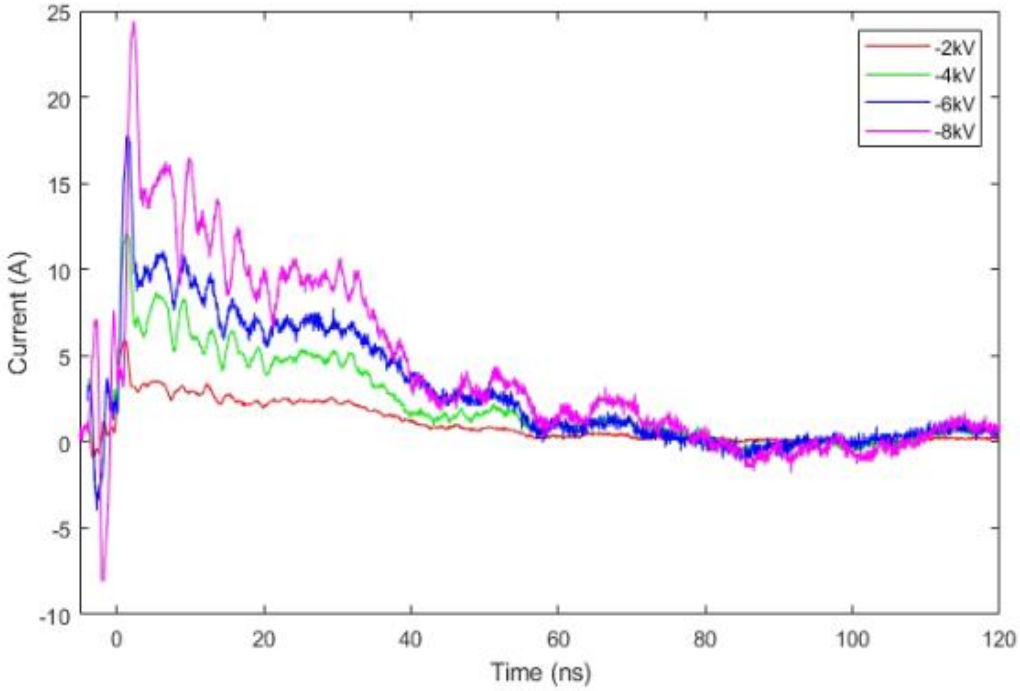
(αποστάσεις 5cm, 80cm και 155cm από το σημείο γείωσης στο οριζόντιο επίπεδο). Έχουν επιλεγεί εδώ οι αποστάσεις που αποτέλεσαν το πιο κοντινό και αντίστοιχα το πιο απομακρυσμένο σημείο, καθώς και το σημείο στο μέσον της ακμής του τραπεζίου, για κατανόηση της μεταβολής των κυματομορφών ρεύματος και των χαρακτηριστικών παραμέτρων σε όλο το φάσμα των αποστάσεων.



Εικόνα 4.1. Κυματομορφή ρεύματος σε απόσταση 5cm για κάθε επίπεδο τάσης με θετική πολικότητα.



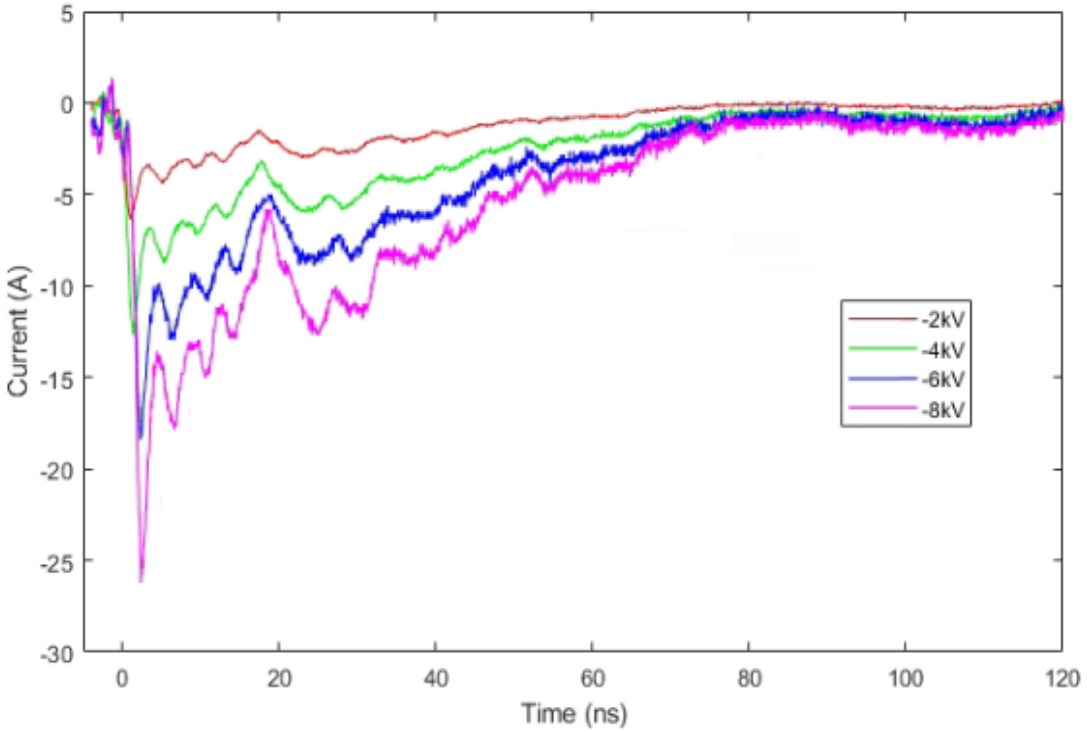
Εικόνα 4.2. Κυματομορφή ρεύματος σε απόσταση 80cm για κάθε επίπεδο τάσης με θετική πολικότητα.



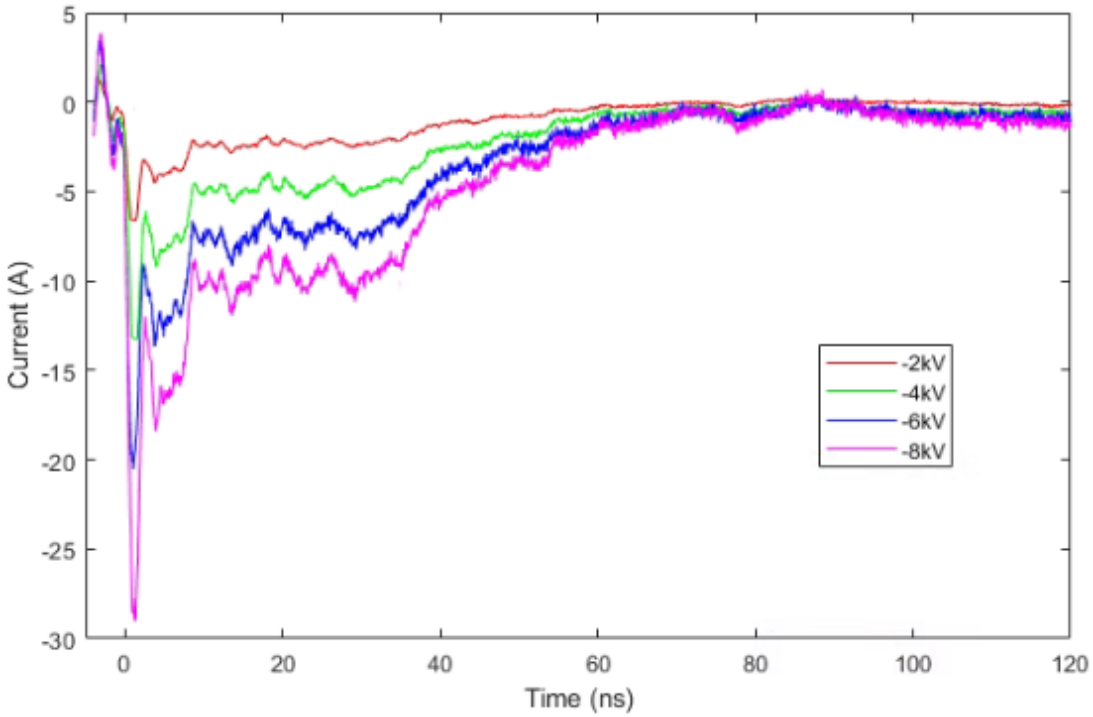
Εικόνα 4.3. Κυματομορφή ρεύματος σε απόσταση 155cm για κάθε επίπεδο τάσης με θετική πολικότητα.

Οι κυματομορφές ρεύματος για τα 2kV παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα, για 4kV με πράσινο, για 6kV με μπλε και για 8kV με μωβ χρώμα. Όπως είναι αναμενόμενο, όσο μεγαλύτερη είναι η τάση με την οποία λαμβάνει χώρα η ηλεκτροστατική εκφόρτιση, τόσο μεγαλύτερο είναι και το παραγόμενο ρεύμα και αυτό αντικατοπτρίζεται καθαρά στα παραπάνω διαγράμματα και σε όσα ακολουθούν, καθώς και στις τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 που θα παρατεθούν στη συνέχεια. Επιπλέον, υπάρχει η προφανής συμμετρία για τις τιμές των παραμέτρων και των κυματομορφών ρεύματος με τη μεταβολή της πολικότητας για ίδιο σημείο και επίπεδο τάσης, γεγονός που αναδεικνύουν στη συνέχεια οι Εικόνες 4.4.,4.5. και 4.6.. Με βάση αυτή τη συμμετρία, τα εξαγόμενα από τις πρώτες κυματομορφές ρεύματος που παρατίθενται και ο σχετικός σχολιασμός για τα διαγράμματα των τάσεων με θετική πολικότητα, αντιστοιχεί με εκείνα για αρνητική πολικότητα. Η μορφή των κυματομορφών σε διαφορετικό επίπεδο τάσης για το ίδιο σημείο είναι σχεδόν πανομοιότυπη και επιπροσθέτως εμφανίζει παρόμοια μεταβολή σε διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο γείωσης στο οριζόντιο επίπεδο ζεύξης. Ωστόσο, σε μικρή απόσταση από το σημείο γείωσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι με την αύξηση του επιπέδου τάσης, έχουμε και αύξηση της "βύθισης" του ρεύματος (όσον αφορά τη θετική πολικότητα, με αντίστοιχο τρόπο για αρνητική πολικότητα) στους παλμούς μετά τη στιγμή το ρεύμα αυξάνεται και φτάνει στην πρώτη κορυφή. Σε σημεία εφαρμογής δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που βρίσκονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο γείωσης πάνω στο μεταλλικό επίπεδο, παρατηρείται μια μικρή ενίσχυση του θορύβου στις κυματομορφές ρεύματος, κυρίως στα μεγαλύτερα επίπεδα τάσης, όπως φαίνεται στα γραφήματα που αφορούν την απόσταση 80cm στο μέσο του τραπεζιού και την απόσταση 155cm στην άλλη άκρη του τραπεζιού. Η παραμόρφωση αυτή

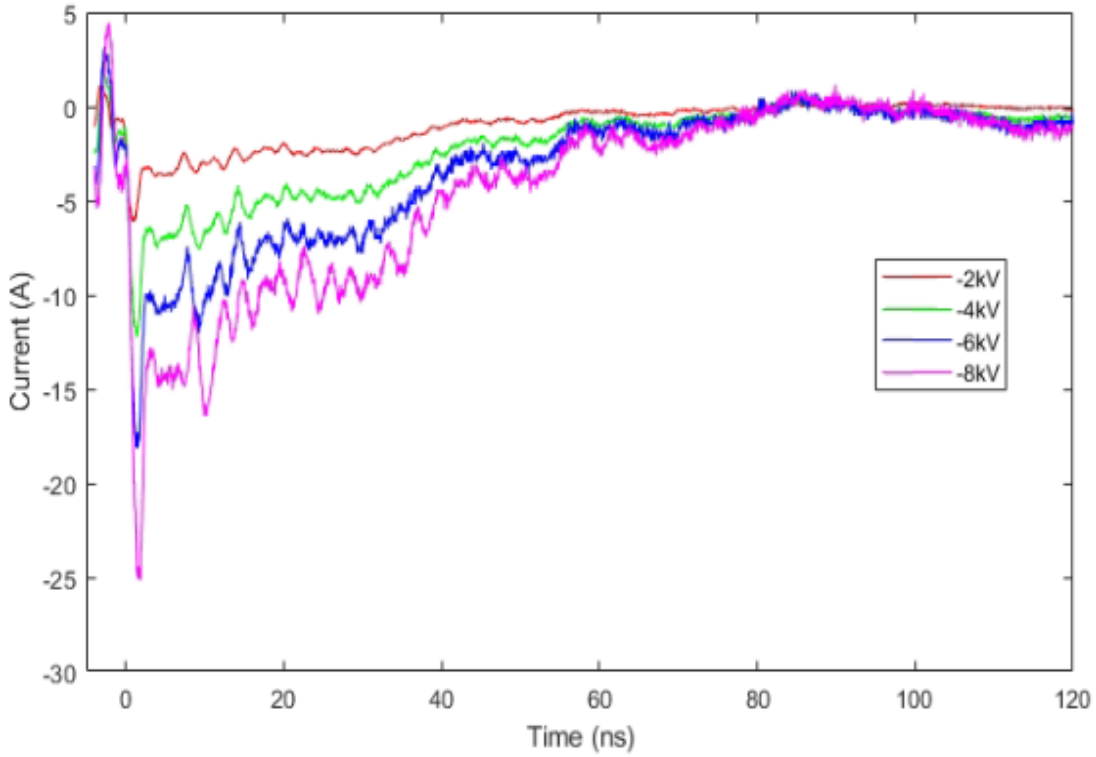
όμως λαμβάνει χώρα σε βαθμό μη ικανό να επηρεάσει τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη μελέτη τους.



Εικόνα 4.4. Κυματομορφή ρεύματος σε απόσταση 5cm για κάθε επίπεδο τάσης με αρνητική πολικότητα.



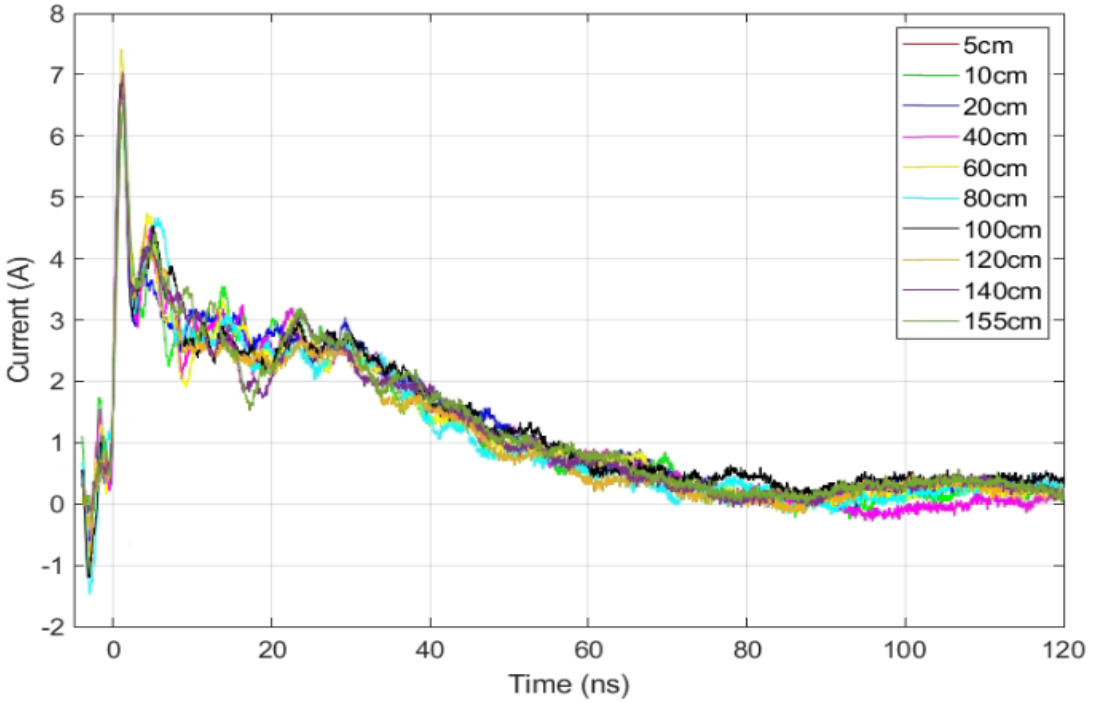
Εικόνα 4.5. Κυματομορφή ρεύματος σε απόστσαη 80cm για κάθε επίπεδο τάσης με αρνητική πολικότητα.



Εικόνα 4.6. Κυματομορφή ρεύματος σε απόσταση 155cm για κάθε επίπεδο τάσης με αρνητική πολικότητα

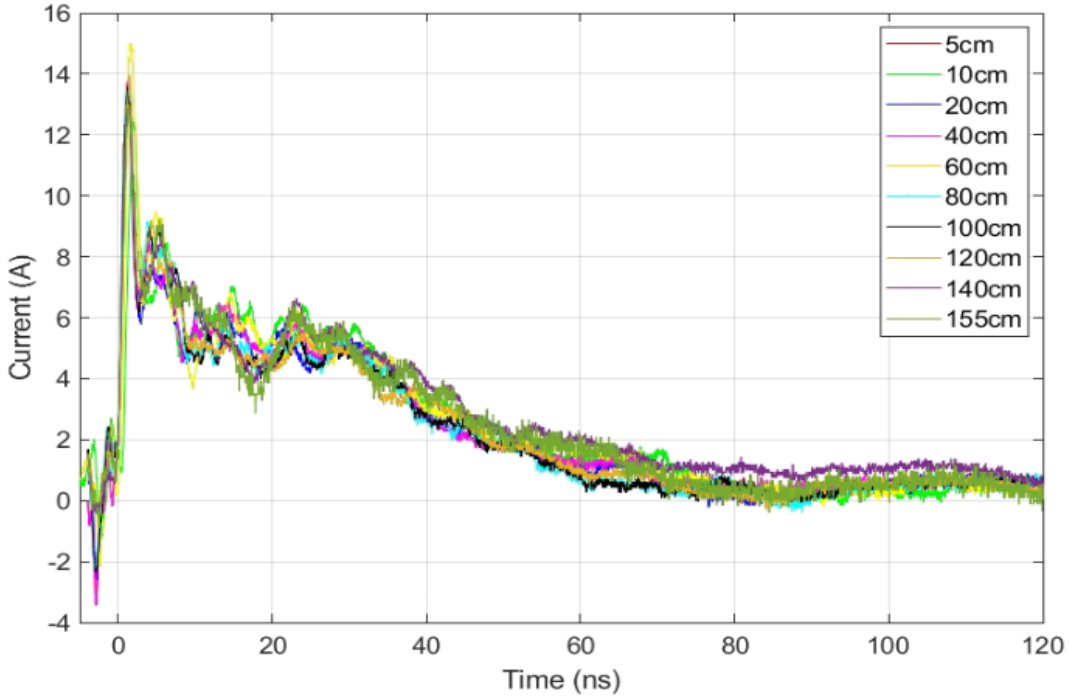
Συνεπώς, μπορούμε να αποφανθούμε πως το επίπεδο τάσης μεταβάλλει τα μεγέθη των παραμέτρων της κυματομορφής ρεύματος, όχι όμως τη μορφή και τη συμπεριφορά της.

Όσον αφορά τον παράγοντα της απόστασης του σημείου έγχυσης της εκφόρτισης

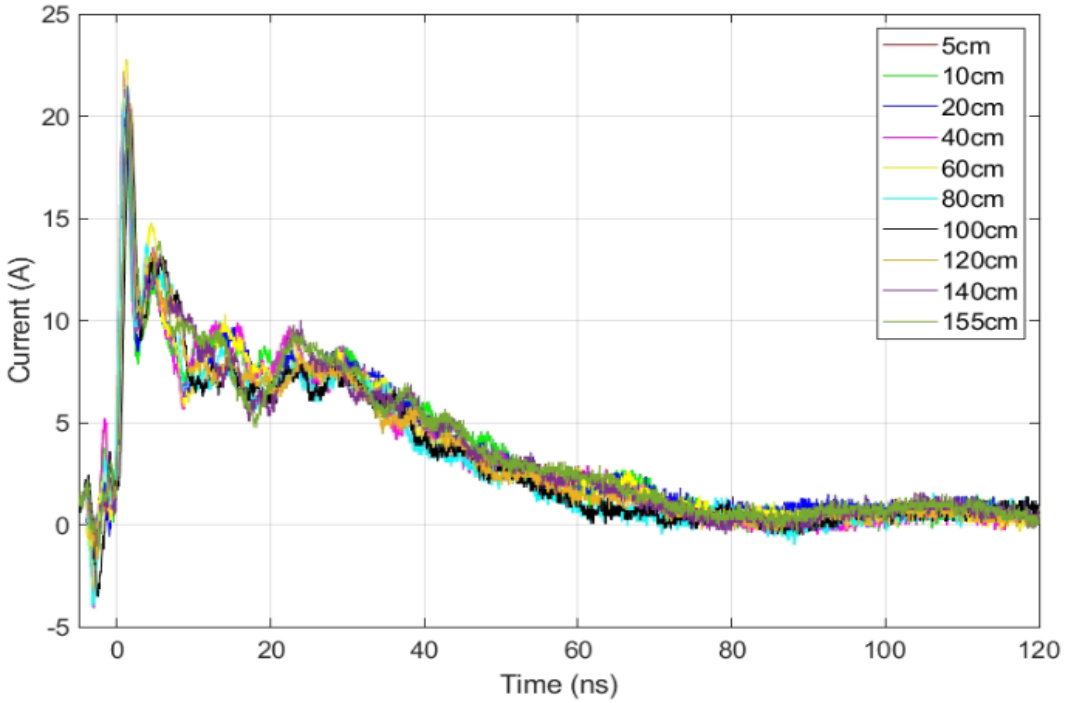


Εικόνα 4.7. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 2kV με θετική πολικότητα

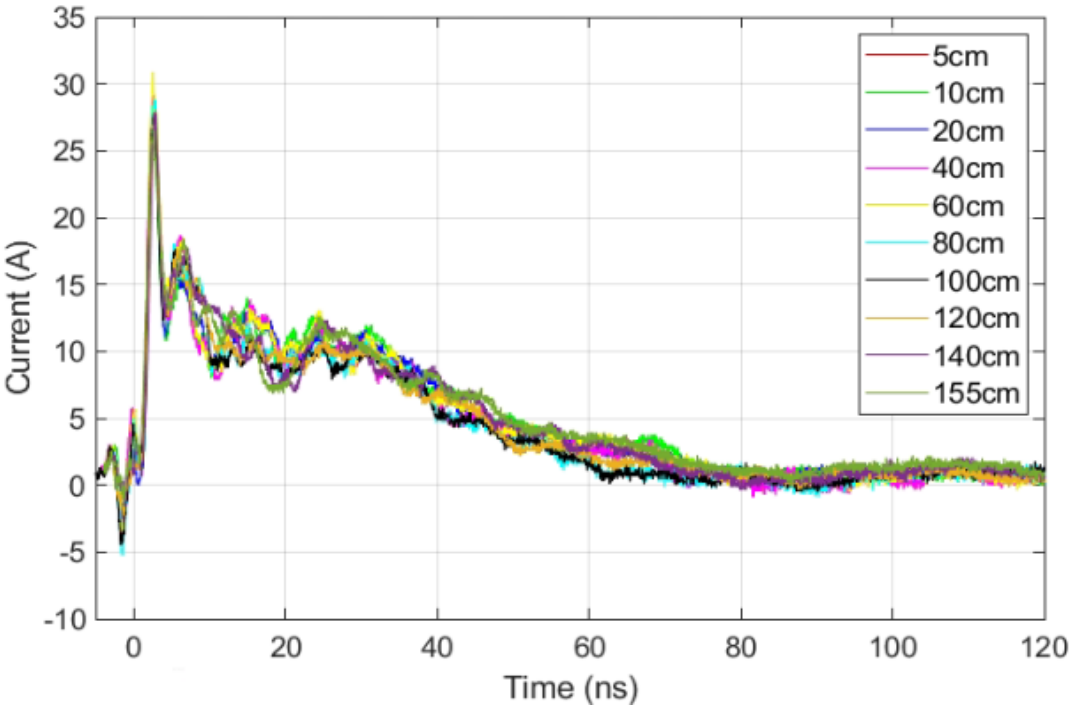
από το σημείο γείωσης, δηλαδή το σημείο του οριζόντιου επιπέδου ζεύξης στο οποίο εφαρμόζεται η ηλεκτροστατική εκφόρτιση μέσω της γεννήτριας, παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα τα αποτελέσματα για όλα τα σημεία στο ίδιο επίπεδο τάσης για θετική και αρνητική πολικότητα στα 2kV,4kV,6kV και 8kV με στόχο την κατανόηση της επίδρασης της επιλογής αυτής στις παραγόμενες κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης:



Εικόνα 4.8. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 4kV με θετική πολικότητα

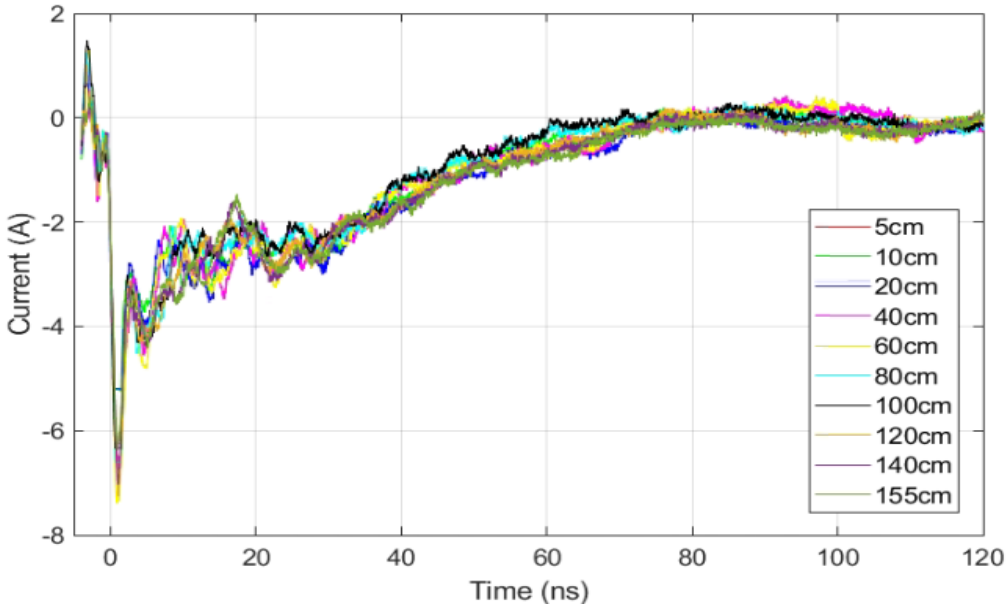


Εικόνα 4.9. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 6kV με θετική πολικότητα

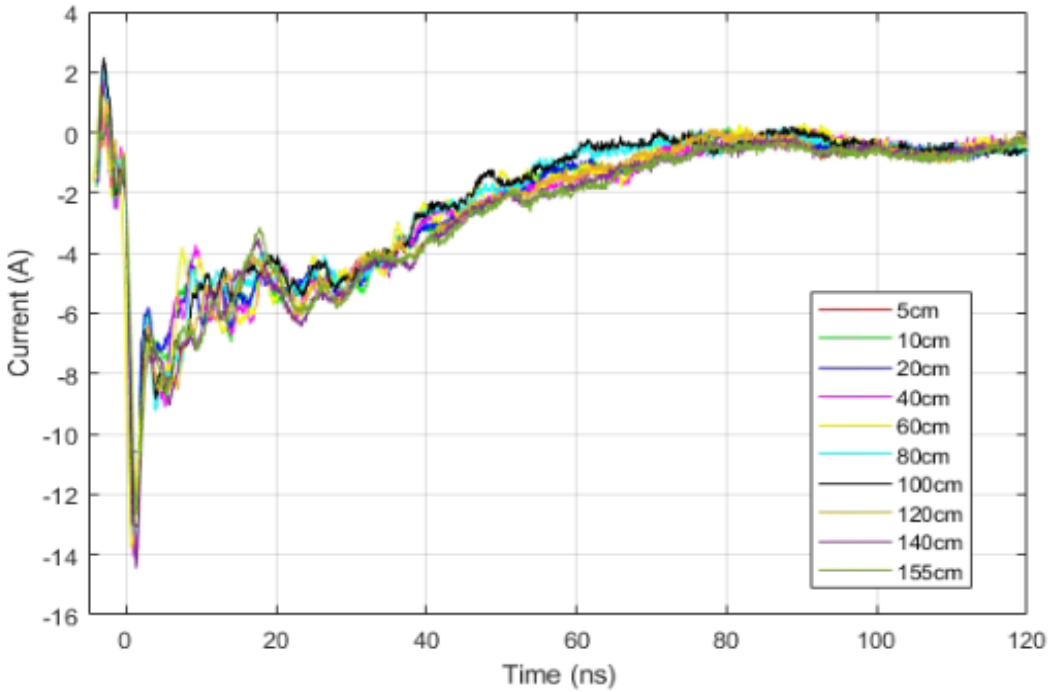


Εικόνα 4.10. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 8kV με θετική πολικότητα

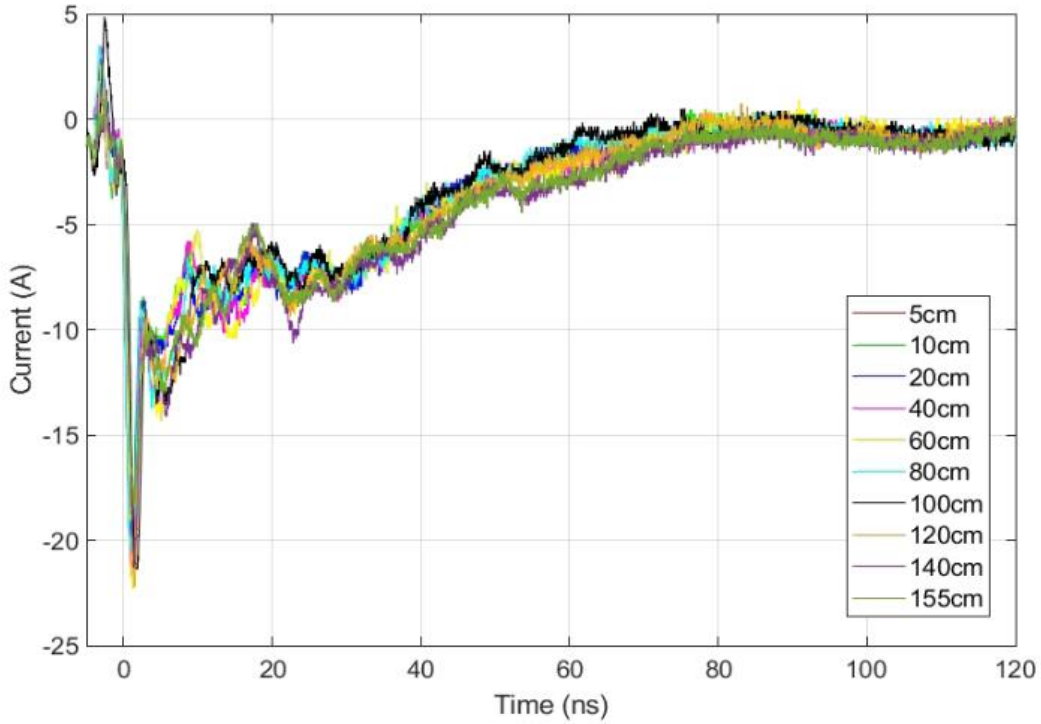
Για το πρώτο σκέλος της κυματομορφής, το οποίο περιλαμβάνει την πρώτη κορυφή, η οποία ευθύνεται για χαμηλής ενέργειας αλλά υψηλής συχνότητας περιεχόμενο μίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι κυματομορφές του ανακατασκευασμένου ρεύματος για τα διάφορα σημεία, είτε αυτά βρίσκονται σε μικρή ή μεγάλη συγκριτικά απόσταση από το σημείο γείωσης του οριζόντιου επιπέδου ζεύξης, είτε κάπου στη στο μέσον της ακμής έγχυσης, δεν διαφέρουν αισθητά.. Παρόμοια συμπεριφορά γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει και για το πιο χαμηλόσυχνο αλλά με μεγάλη ενέργεια σκέλος της κυματομορφής.



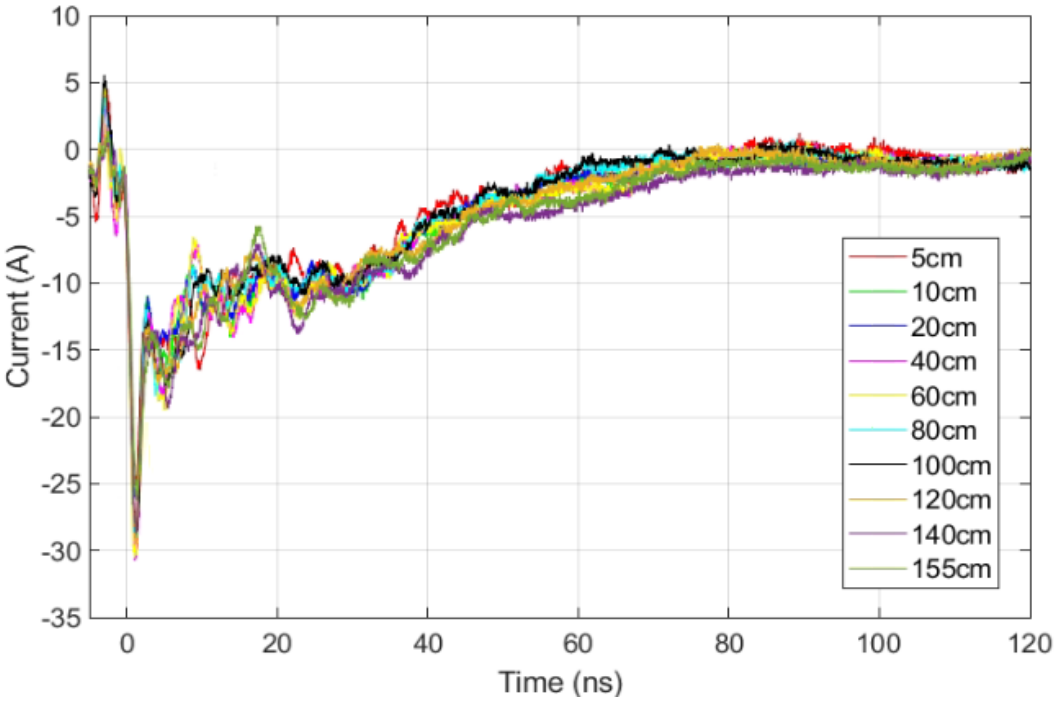
Εικόνα 4.11. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 2kV με αρνητική πολικότητα



Εικόνα 4.12. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 4kV με αρνητική πολικότητα



Εικόνα 4.13. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 6kV με αρνητική πολικότητα



Εικόνα 4.14. Κυματομορφή ρεύματος σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 8kV με αρνητική πολικότητα

Με την αναλυτική αυτή παρουσίαση των αποτελεσμάτων για όλα τα σημεία εφαρμογής, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η απόσταση από το σημείο γείωσης δεν επιδρά σημαντικά στη μορφή των κυματομορφών ρεύματος και στις τιμές των παραμέτρων

Στο υπόμνημα κάθε γραφήματος καταδεικνύεται το χρώμα και η κυματομορφή που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο εφαρμογής δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Όπως αναφέρθηκε και για τα διαφορετικά επίπεδα τάσης, με τον ίδιο τρόπο και για τις αποστάσεις από το σημείο γείωσης στο οριζόντιο μεταλλικό επίπεδο, υπάρχει συμμετρία ανάμεσα στις κυματομορφές για θετική και αρνητική πολικότητα και τα ποιοτικά συμπεράσματα είναι παρεμφερή.

Για την ολοκληρωμένη ωστόσο μελέτη των κυματομορφών ρεύματος, είναι απαραίτητη η εξέταση των χαρακτηριστικών μεγεθών των κυματομορφών αυτών.

Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές που παίρνουν οι τέσσερις παράμετροι ενδιαφέροντος που ορίζονται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2 (I_{max}, t_r, I_{30}, I_{60}) για όλα τα σημεία όπου πραγματοποιήθηκε δοκιμή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και ελήφθησαν μετρήσεις, στα 2kV με θετική πολικότητα. Ακολουθούν οι Πίνακες για κάθε επίπεδο τάσης, για θετική και αρνητική πολικότητα.

Οι διακυμάνσεις στις τιμές αυτές είναι και η ερμηνεία του τρόπου με τον οποίο μεταβάλλονται οι κυματομορφές ρευμάτων ESD, σε σχέση με τους παράγοντες της απόστασης και του επιπέδου τάσης, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω.

Πίνακας 4.1. Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 2kV με θετική πολικότητα

Σημείο εφαρμογής	**Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ESD**			
	Μέγιστο Ρεύμα (I_{max})	**Χρόνος ανόδου (t_r)**	**Ρεύμα στα 30ns (I_{30})**	**Ρεύμα στα 60ns (I_{60})**
	[A]	**[ns]**	**[A]**	**[A]**
5cm	6.2375	1.0187	2.3997	0.7840
10cm	6.4464	1.0694	2.8012	1.0036
20cm	6.7357	1.0040	2.7613	0.9716
40cm	6.8172	0.9472	2.3880	0.8019
60cm	7.2104	1.0632	2.4142	0.9030
80cm	6.8658	0.9469	2.6828	0.9067
100cm	6.7459	1.0042	2.7581	1.0771
120cm	6.7007	1.0173	2.4699	0.8999
140cm	6.6378	1.0087	2.4188	0.8307
155cm	6.4415	1.0552	2.7463	0.9670

Πίνακας 4.2. Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 4kV με θετική πολικότητα

Σημείο εφαρμογής	**Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ESD**			
	Μέγιστο Ρεύμα (I_{max})	**Χρόνος ανόδου (t_r)**	**Ρεύμα στα 30ns (I_{30})**	**Ρεύμα στα 60ns (I_{60})**
	[A]	**[ns]**	**[A]**	**[A]**
5cm	12.5227	0.9706	5.1650	1.9825
10cm	12.9889	1.0202	5.6950	2.4661
20cm	13.8985	1.01187	5.2186	1.8822
40cm	13.7064	1.0275	5.0302	1.9222
60cm	14.9855	0.9635	4.8344	1.5289
80cm	13.7309	0.9656	4.8164	1.6552
100cm	13.5786	1.0012	4.7518	1.8062
120cm	13.3313	1.0340	4.8512	1.6249
140cm	13.1163	1.0385	4.4068	1.7261
155cm	12.7905	1.0395	5.2158	1.9413

Πίνακας 4.3. Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 6kV με θετική πολικότητα

Σημείο εφαρμογής	**Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ESD**			
	Μέγιστο Ρεύμα (Imax)	**Χρόνος ανόδου (tr)**	**Ρεύμα στα 30ns (I30)**	**Ρεύμα στα 60ns (I60)**
	[A]	**[ns]**	**[A]**	**[A]**
5cm	19.2264	0.9580	6.8404	1.2973
10cm	19.8385	0.9985	8.1251	2.5178
20cm	20.4793	1.0294	7.8234	2.1989
40cm	21.4537	0.9559	7.5894	2.3444
60cm	22.1696	0.9744	7.3725	2.4896
80cm	21.4114	1.0150	7.1697	1.6989
100cm	20.9283	1.0136	7.1913	1.7223
120cm	20.6692	1.0378	7.3164	2.3313
140cm	20.4468	1.0275	7.2263	2.4571
155cm	19.7325	1.0135	7.4816	2.4647

Πίνακας 4.4. Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 8kV με θετική πολικότητα

Σημείο εφαρμογής	**Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ESD**			
	Μέγιστο Ρεύμα (I_{max})	**Χρόνος ανόδου (t_r)**	**Ρεύμα στα 30ns (I_{30})**	**Ρεύμα στα 60ns (I_{60})**
	[A]	**[ns]**	**[A]**	**[A]**
5cm	25.3706	1.0104	9.6872	2.0940
10cm	27.0665	0.9708	11.0679	2.5982
20cm	28.2350	1.0523	10.7554	2.9783
40cm	29.1030	0.9909	9.7589	2.7612
60cm	30.8388	0.9862	10.6520	3.5432
80cm	28.9584	1.0107	9.7505	1.3695
100cm	28.0293	1.0392	9.7525	1.1057
120cm	28.0278	1.0443	9.8926	1.8548
140cm	27.7949	1.0074	9.2111	2.9984
155cm	26.4970	1.0160	10.1650	3.5754

Με μελέτη των Πινάκων, κατανοούμε πως οι τιμές των παραμέτρων των ρευμάτων για τα σημεία που πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και μας ενδιαφέρουν εμφανίζουν τη συμπεριφορά και μεταβολή που περιγράφηκε και για τις κυματομορφές ρεύματος, ενώ το εύρος στο οποίο κυμαίνονται τα μεγέθη έρχονται σε συμφωνία με το Πρότυπο IEC 61000-4-2. Συγκεκριμένα, τα μέγιστα ρεύματα παρουσιάζουν μια αρχική σταθερή αύξηση όσο αυξάνεται η απόσταση. Αυτή η αύξηση εντοπίζεται χαρακτηριστικά από τις πολύ κοντινές αποστάσεις μέχρι και τη μέση περίπου του τραπεζιού (μέγιστη τιμή του I_{max} στα 60cm από το σημείο γείωσης στο οριζόντιο επίπεδο), ενώ από εκείνο το σημείο και μετά, μέχρι να φτάσουμε στην πιο απομακρυσμένη απόσταση από το σημείο γείωσης στο οριζόντιο επίπεδο ζεύξης και την άκρη του τραπεζιού, τα μέγιστα ρεύματα μειώνονται και πλησιάζουν στις αρχικές τιμές των πιο κοντινών αποστάσεων. Σε όλα τα σημεία και για όλα τα επίπεδα τάσεων, ο χρόνος ανόδου (ή καθόδου όταν έχουμε αρνητική πολικότητα) είναι περίπου ο ίδιος με τιμές κοντά στο 1ns. Στα 30ns και 60ns, παρατηρούμε για τα διάφορα σημεία παρόμοιο εύρος στην μεταβολή των τιμών των ρευμάτων, ανάλογα με το επίπεδο τάσης, ενώ ανεπαίσθητες είναι και οι μεταβολές στη διαφορά των τιμών ρεύματος ανάμεσα στα I_{30} και I_{60}. Αντίστοιχες είναι οι τιμές στις χαρακτηριστικές παραμέτρους για τις διαφορετικές τιμές των τάσεων και αποστάσεων με αρνητική πολικότητα, με την αναμενόμενη συμμετρία.

Πίνακας 4.5. Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 2kV με αρνητική πολικότητα

Σημείο εφαρμογής	**Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ESD**			
	Μέγιστο Ρεύμα (I_{max})	**Χρόνος ανόδου (t_r)**	**Ρεύμα στα 30ns (I_{30})**	**Ρεύμα στα 60ns (I_{60})**
	[A]	**[ns]**	**[A]**	**[A]**
5cm	6.0928	0.9688	2.3039	0.7606
10cm	6.2340	0.9749	2.6070	0.8809
20cm	6.3010	0.9570	2.4646	0.8823
40cm	6.7467	1.0369	2.4726	0.9880
60cm	7.3826	1.0042	2.4852	0.9039
80cm	6.7210	0.9606	2.3946	0.8472
100cm	6.4475	0.9586	2.2435	0.7702
120cm	6.3521	1.0231	2.3517	0.9355
140cm	6.2264	1.0115	2.3631	0.9390
155cm	6.1686	1.0149	2.7024	1.0297

Πίνακας 4.6. Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 4kV με αρνητική πολικότητα

Σημείο εφαρμογής	**Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ESD**			
	Μέγιστο Ρεύμα (I_{max})	**Χρόνος ανόδου (t_r)**	**Ρεύμα στα 30ns (I_{30})**	**Ρεύμα στα 60ns (I_{60})**
	[A]	**[ns]**	**[A]**	**[A]**
5cm	12.2216	0.94700	4.7305	1.4897
10cm	12.6132	0.9535	5.3609	1.7676
20cm	12.8253	0.9828	5.4317	1.8888
40cm	13.0972	1.0599	4.8606	1.9130
60cm	13.8114	1.0172	4.6694	1.8583
80cm	13.5835	0.9570	4.8630	1.5005
100cm	13.4550	0.9628	4.7241	1.4433
120cm	13.3831	1.0166	4.6252	1.5524
140cm	13.2584	0.9967	5.0182	1.7461
155cm	12.6997	0.9972	5.1669	1.7862

Πίνακας 4.7. Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 6kV με αρνητική πολικότητα

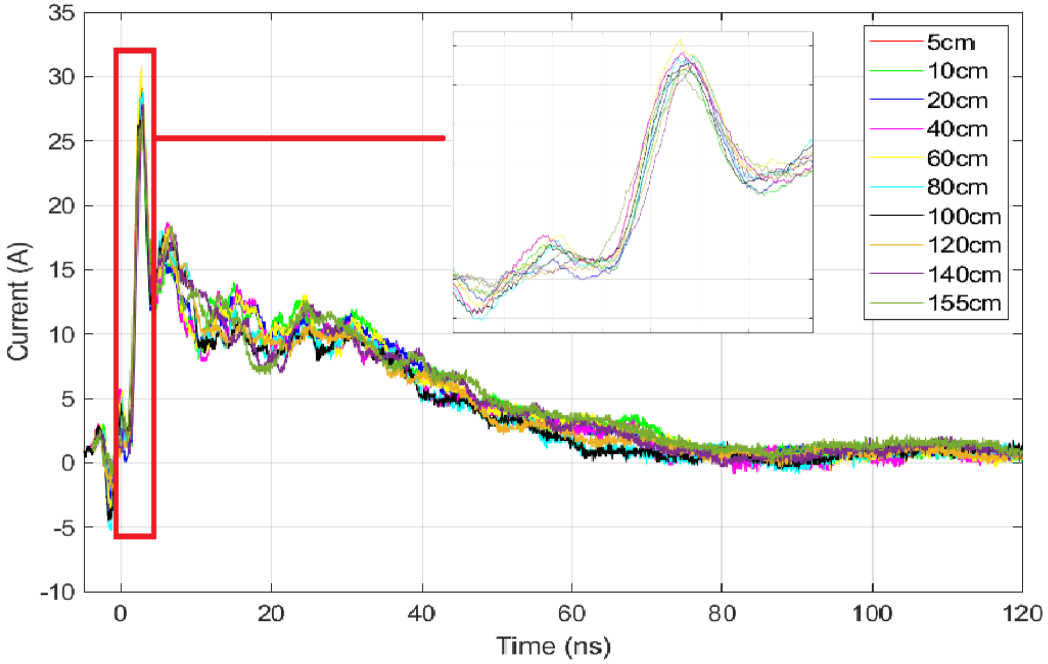
Σημείο εφαρμογής	**Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ESD**			
	Μέγιστο Ρεύμα (I_{max})	**Χρόνος ανόδου (t_r)**	**Ρεύμα στα 30ns (I_{30})**	**Ρεύμα στα 60ns (I_{60})**
	[A]	**[ns]**	**[A]**	**[A]**
5cm	19.1402	1.0044	7.2579	1.7692
10cm	19.9746	1.0179	8.0982	2.5780
20cm	20.5237	1.0385	7.9135	2.2115
40cm	21.6776	0.9982	7.2755	2.2393
60cm	22.3164	1.0336	7.6626	2.5596
80cm	21.5403	0.9729	7.2951	2.0579
100cm	21.3646	1.0291	7.3772	2.0452
120cm	21.0549	1.0239	7.1250	2.1464
140cm	20.5203	1.0241	7.6100	2.8845
155cm	19.5260	0.9887	8.0479	2.9035

Πίνακας 4.8. Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε κάθε σημείο εφαρμογής για τάση 8kV με αρνητική πολικότητα

Σημείο εφαρμογής	**Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος ESD**			
	Μέγιστο Ρεύμα (I_{max})	**Χρόνος ανόδου (t_r)**	**Ρεύμα στα 30ns (I_{30})**	**Ρεύμα στα 60ns (I_{60})**
	[A]	**[ns]**	**[A]**	**[A]**
5cm	25.4421	1.0137	9.7386	2.3263
10cm	26.0311	0.9997	10.1540	1.9158
20cm	26.2305	1.0570	10.3091	2.6125
40cm	29.7125	1.0032	9.2144	3.1084
60cm	30.4631	0.9762	9.7801	2.9010
80cm	29.9996	0.9834	9.8371	1.8240
100cm	29.7778	1.0464	9.9389	1.5545
120cm	29.4508	0.9886	9.8345	2.8320
140cm	28.6675	0.9987	9.9921	3.5943
155cm	26.2280	1.0052	10.9718	3.4904

Στην Εικόνα 4.15. φαίνεται σε μεγέθυνση το πώς συμπεριφέρονται αρχικά οι κυματομορφές ανακατασκευασμένου ρεύματος όλων των σημείων για τάση 8kV με θετική πολικότητα. Μας δίνεται με αυτόν τον τρόπο η δυνατότητα για μια πιο αναλυτική ένδειξη της μη ουσιαστικής επίδρασης της απόστασης από τη γείωση και του σημείου εφαρμογής μιας δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, κατά την έμμεση εφαρμογή εκφορτίσεων σύμφωνα με το Πρότυπο 61000-4-2, στις κυματομορφές ρεύματος ESD. Συγκεκριμένα, γίνεται αντιληπτή η ομοιότητα στις τιμές των παραμέτρων τις οποίες μπορούμε να δούμε και στον αντίστοιχο Πίνακα, και το πώς μέχρι την πρώτη κορυφή των κυματομορφών, και ειδικότερα κατά το χρονικό διάστημα στο οποίο το ρεύμα αυξάνεται από μηδενική τιμή έως τη μέγιστη τιμή του, τα ρεύματα σε κάθε απόσταση από το σημείο γείωσης στο οριζόντιο μεταλλικό επίπεδο ζεύξης εμφανίζουν παρόμοια μεταβολή, ενώ και οι τιμές τους προσεγγίζουν σημαντικά η μία την άλλη. Μικρές διακυμάνσεις φαίνεται πως υπάρχουν από την άλλη στους παλμούς πριν τη χρονική στιγμή 0.

Από την άλλη πλευρά, θα εξηγηθεί στη συνέχεια το πώς το σημείο που πραγματοποιείται μια δοκιμή ESD πάνω στο μεταλλικό επίπεδο ζεύξης, συνιστά παράγοντα που επιδρά στη λειτουργία ενός SpaceWire link.



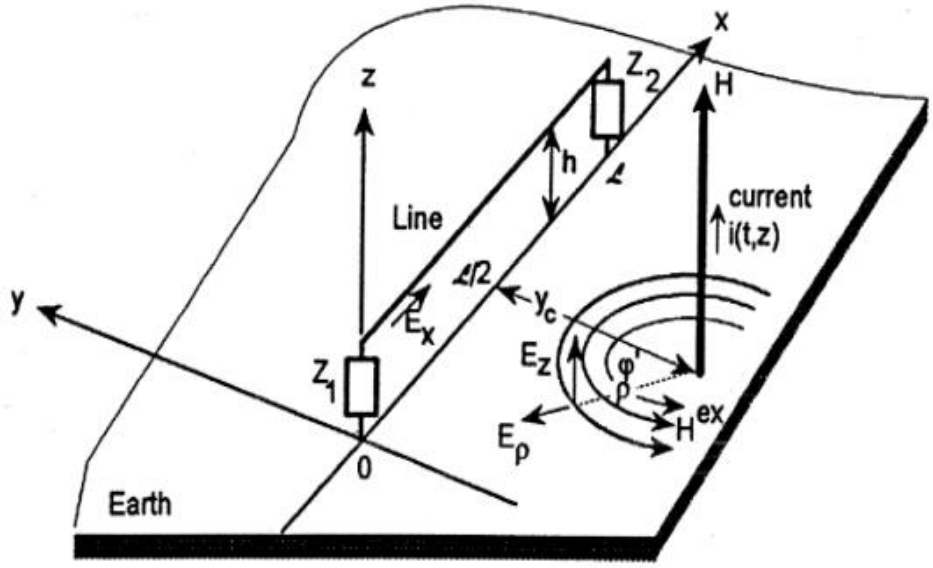
Εικόνα 4.15. Ρεύματα σε κάθε σημείο εφαρμογής για επίπεδο τάσης 8kV με θετική πολικότητα και μεγεθυμένη η πρώτη κορυφή

Κεφάλαιο 5: Συσχέτιση με Spacewire link

5.1. Σύζευξη πεδίου σε καλώδιο

Τα πεδία λόγω ρευμάτων ESD μπορούν να διεισδύσουν στον εξοπλισμό απευθείας ή διεγείροντας ανοίγματα, ραφές, καλώδια εισόδου/εξόδου κ.λπ. Η θωράκιση ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει αυτής τη σύζευξη στις συχνότητες όπου αναμένεται να παρουσιαστούν προβλήματα. Τα πεδία που οφείλονται σε ένα συμβάν ESD εξαρτώνται με πολύπλοκο τρόπο από τη γεωμετρία εισβολέα/δέκτη, την τάση φόρτισης, την ταχύτητα προσέγγισης, την τρέχουσα κυματομορφή και την υγρασία. Κανένα απλό μοντέλο δεν μπορεί να αναμένεται να προβλέψει επακριβώς τα πεδία που προκαλούνται από ESD. Αυτό που δύναται να προσφέρει μια μοντελοποίηση του φαινομένου είναι να υποδείξει τους βασικούς μηχανισμούς με τους οποίους προκαλείται.

Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι από τα πιο συχνά παροδικά γεγονότα που ενδέχεται να λάβουν μέρος και να χρήζουν αντιμετώπισης, όχι μόνο στο περιβάλλον του εδάφους και της γης αλλά και στο διαστημικό περιβάλλον και συγκεκριμένα σε διαστημικά σκάφη όπου χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο SpaceWire. Η ενέργεια ESD, ακόμη και κατά τη διάρκεια μιας μη επανδρωμένης αποστολής όπου η άμεση εκφόρτιση του ανθρώπινου σώματος δεν είναι δυνατή, μπορεί να ζευγαρώσει με τα ευαίσθητα κυκλώματα ενός διαστημοπλοίου και τη σχετική καλωδίωση, με αποτέλεσμα προκαλούμενες διαταραχές ραδιοσυχνοτήτων που με τη σειρά τους μπορεί να υποβαθμίσουν την απόδοση μιας καθιερωμένης σύνδεσης δεδομένων, όπως μια σύνδεση SpW.



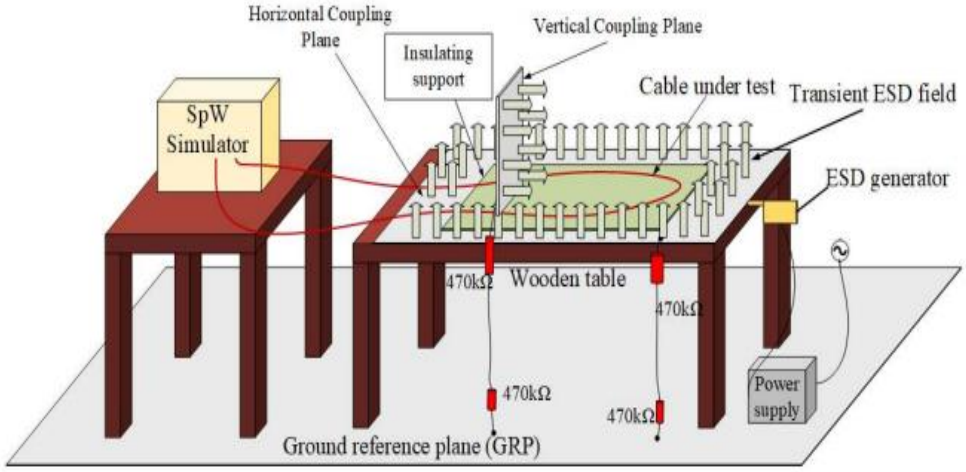
Εικόνα 5.1. Πεδίο λόγω ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που επάγεται σε γραμμή μετάδοσης [39]

Εδικότερα, το συμβάν εκφόρτισης οδηγεί σε μεγάλη ποσότητα ροής ρεύματος για λίγα νανοδευτερόλεπτα, παράγοντας χωράφια υψηλής παροδικής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται κατά τη διάρκεια αυτών των

εκκενώσεων προκαλούν ανωμαλίες στη λειτουργικότητα των διαστημικών σκαφών. Η εκτίμηση των επιπέδων των πεδίων ακτινοβολίας είναι σημαντική κατά σειρά για την αποφυγή καταστροφικών αποτυχιών και τη λήψη προληπτικών μέτρων.

Στην Εικόνα 5.1.παρουσιάζεται σχηματικά το διαμορφωμένο πεδίο από ένα φαινόμενο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε μια γραμμή μετάδοσης γενικότερα και στην Εικόνα 5.2. απεικονίζεται μια πειραματική διάταξη έμμεσων εφαρμογών ESD σε εργαστήριο για μελέτη της ανθεκτικότητας του SpaceWire σε αυτές.

Εάν ένα πηνίο σύρματος τοποθετηθεί σε ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, θα προκληθεί ρεύμα στο καλώδιο και με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η σύζευξη πεδίου σε καλώδιο. Ομοίως, όταν ένα μεταβλητό μαγνητικό πεδίο ρέει μέσω ενός βρόχου, δημιουργεί μια αντίθετη ηλεκτροκινητική δύναμη που παράγει μια τάση μεταξύ των δύο άκρων του βρόχου. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται σύζευξη πεδίου σε βρόχο. Όσον αφορά τις ανάγκες και τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι εφαρμογές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο μεταλλικό επίπεδο ζεύξης, όταν σε αυτό προσεγγιστεί το καλώδιο SpaceWire, ουσιαστικά οδηγούν σε επαγωγή ενός ρεύματος πάνω στη θωράκιση του καλωδίου, με αποτέλεσμα διαταραχή της λειτουργίας του συνδέσμου SpaceWire που έχει σχηματιστεί και επακόλουθα της κίνησης των δεδομένων και των πακέτων, όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια του κεφαλαίου



Εικόνα 5.2. Διάταξη δοκιμών ανθεκτικότητας SpaceWire σε εφαρμογές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [38]

Σε αυτό το σημείο θα παρατεθούν τα διαφορετικά είδη μηχανισμών σύζευξης ηλεκτρικών, μαγνητικών ή ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό, που συναντώνται και μελετώνται στον κλάδο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας:

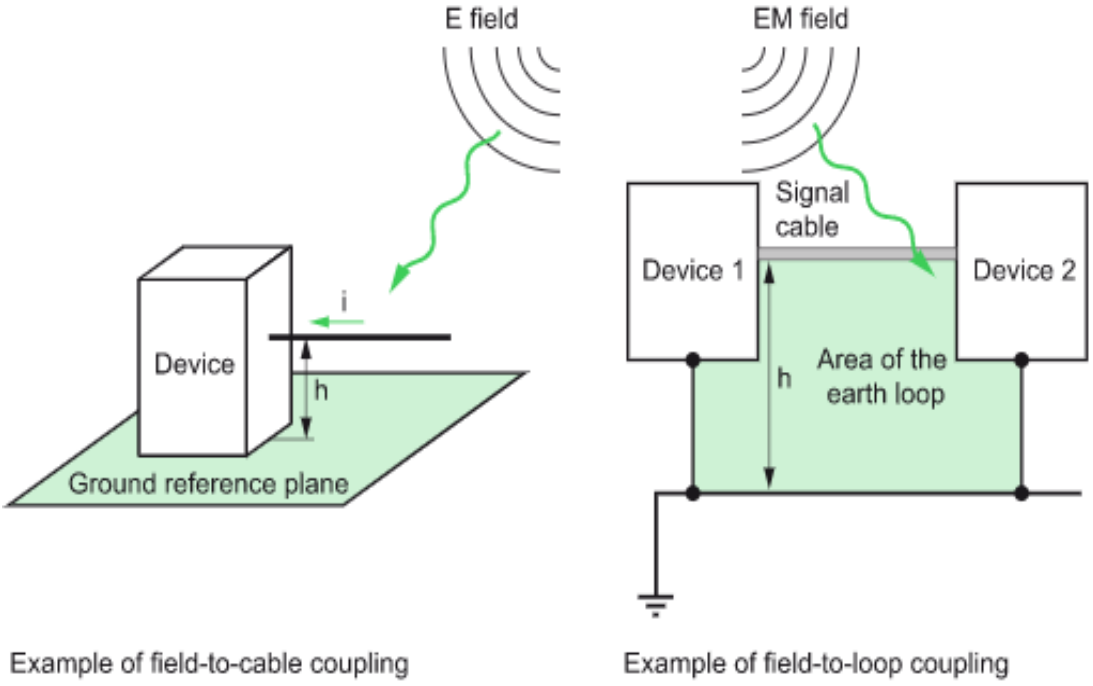
- Σύζευξη σύνθετης αντίστασης κοινού τρόπου λειτουργίας: Δύο ή περισσότερες συσκευές συνδέονται μεταξύ τους με τα καλώδια τροφοδοσίας και επικοινωνίας. Όταν εξωτερικά ρεύματα (κεραυνοί, ρεύματα σφάλματος, διαταραχές) ρέουν μέσω αυτών των σύνθετων αντιστάσεων κοινής λειτουργίας, εμφανίζεται μια

ανεπιθύμητη τάση μεταξύ των σημείων Α και Β που υποτίθεται ότι είναι ισοδυναμικά. Αυτή η αδέσποτη τάση μπορεί να ενοχλήσει τα ηλεκτρονικά κυκλώματα χαμηλής στάθμης. Όλα τα καλώδια, συμπεριλαμβανομένων των προστατευτικών αγωγών, έχουν σύνθετη αντίσταση, ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες.

- Χωρητική σύζευξη (capacitive coupling): Το επίπεδο διαταραχής σε αυτήν την περίπτωση εξαρτάται από τις διακυμάνσεις της τάσης (dv/dt) και την τιμή της χωρητικότητας ζεύξης μεταξύ της πηγής διαταραχής και του θύματος. Η χωρητική σύζευξη αυξάνεται με:
  - Τη συχνότητα
  - Την εγγύτητα του ενοχλητή στο θύμα και το μήκος των παράλληλων καλωδίων
  - Το ύψος των καλωδίων σε σχέση με ένα επίπεδο αναφοράς εδάφους
  - Τη σύνθετη αντίσταση εισόδου του κυκλώματος θύματος (τα κυκλώματα με υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου είναι πιο ευάλωτα)
  - Τη μόνωση του καλωδίου του θύματος (εr της μόνωσης του καλωδίου), ιδιαίτερα για σφιχτά συνδεδεμένα ζεύγη
- Επαγωγική σύζευξη (inductive coupling): Ο «ενοχλητής» και το θύμα συνδέονται με ένα μαγνητικό πεδίο. Το επίπεδο διαταραχής εξαρτάται από τις διακυμάνσεις του ρεύματος (di/dt) και την επαγωγή αμοιβαίας σύζευξης. Η επαγωγική σύζευξη αυξάνεται με:
  - Τη συχνότητα
  - Τη συχνότητα
  - Την εγγύτητα της διαταραχής στο θύμα και το μήκος των παράλληλων καλωδίων
  - Το ύψος των καλωδίων σε σχέση με ένα επίπεδο αναφοράς εδάφους
  - Τη σύνθετη αντίσταση φορτίου του κυκλώματος που προκαλεί τη διαταραχή
- Ακτινοβολούμενη σύζευξη: Ο ενοχλητής και το θύμα συνδέονται με ένα μέσο (π.χ. αέρα). Το επίπεδο διαταραχής εξαρτάται από την ισχύ της πηγής ακτινοβολίας και την αποτελεσματικότητα της κεραίας εκπομπής και λήψης. Ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο περιλαμβάνει και ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Τα δύο πεδία συσχετίζονται. Είναι δυνατή η χωριστή ανάλυση των ηλεκτρικών και μαγνητικών στοιχείων. Το ηλεκτρικό πεδίο (πεδίο Ε) και το μαγνητικό πεδίο (πεδίο Η) συνδέονται στα συστήματα καλωδίωσης μέσω των καλωδίων και των βρόχων. Όμοια με ότι αναφέρθηκε προηγουμένως, όταν ένα καλώδιο προβάλλεται σε μεταβλητό ηλεκτρικό πεδίο, δημιουργείται ρεύμα στο καλώδιο. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται σύζευξη πεδίου-καλωδίου. Ομοίως, όταν ένα μεταβλητό μαγνητικό πεδίο ρέει μέσω ενός βρόχου, δημιουργεί μια αντίθετη

ηλεκτροκινητική δύναμη που παράγει μια τάση μεταξύ των δύο άκρων του βρόχου. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται σύζευξη πεδίου σε βρόχο.

Μέτρα εξομάλυνσης αυτού του τύπου σύζευξης σε καλώδια αφορούν τη μείωση της επίδραση της κεραίας του θύματος μειώνοντας το ύψος (h) του καλωδίου σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς εδάφους, την τοποθέτηση του καλωδίου σε ένα αδιάκοπο, συνδεδεμένο μεταλλικό συρματόσχοινο (σωλήνας, κορμός, δίσκος καλωδίων), χρησιμοποίηση θωρακισμένων καλώδια που είναι σωστά τοποθετημένα και συνδεδεμένα, προσθήκη PEC, τοποθέτηση φίλτρων ή δακτυλίων φερρίτη στο καλώδιο του θύματος Για σύζευξη πεδίου σε βρόχο, συστήνεται μείωση της επιφάνειας του βρόχου του θύματος μειώνοντας το ύψος (h) και το μήκος του καλωδίου, εφαρμογή των λύσεων για τη σύζευξη πεδίου-καλωδίου και χρήση της αρχής του κλωβού Faraday. Η ακτινοβολούμενη σύζευξη μπορεί να εξαλειφθεί χρησιμοποιώντας την αρχή του κλωβού Faraday. Μια πιθανή λύση είναι ένα θωρακισμένο καλώδιο με τα δύο άκρα της θωράκισης συνδεδεμένα στη μεταλλική θήκη της συσκευής. Τα εκτεθειμένα αγώγιμα μέρη πρέπει να είναι συνδεδεμένα για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα στις υψηλές συχνότητες. Η ακτινοβολούμενη ζεύξη μειώνεται με την απόσταση και όταν χρησιμοποιούνται συμμετρικές ζεύξεις μετάδοσης, γεγονός που θα εξεταστεί και στο πειραματικό μέρος του κεφαλαίου [37].



Εικόνα 5.3. Σχηματική παρουσίαση παραδείγματος ηλεκτρικής σύζευξης πεδίου σε καλώδιο και ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης πεδίου σε βρόχο [37]

Γίνεται επομένως κατανοητό πως οι μαγνητικές εκπομπές του συνδέσμου SpW προκαλούνται από επαγόμενα ρεύματα στις θωράκιση του καλωδίου λόγω της λειτουργίας του συνδέσμου. Η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ δύο αγωγών εξαρτάται από τη γεωμετρία τους, τη σχετική τους θέση και τις μαγνητικές ιδιότητες του μέσου μεταξύ τους. Σε ένα καλώδιο SpW, κάθε ζεύγος συρμάτων είναι στριμμένο με τον

εαυτό του και τα τέσσερα ζεύγη καλωδίων είναι επίσης στριμμένα μεταξύ τους. Η πολύπλοκη γεωμετρία οποιουδήποτε ζεύγους αγωγών καθιστά τον ορισμό της αμοιβαίας επαγωγής τους δύσκολη διαδικασία. Αν και είναι δύσκολο να οριστεί πλήρως κάποια από αυτές τις επαγωγές, μπορεί κανείς να καταλάβει ότι η αμοιβαία αυτεπαγωγή μεταξύ οποιασδήποτε αγώγιμης ασπίδας και των δύο αγωγών που φέρουν σήμα ενός συνεστραμμένου ζεύγους, είναι διαφορετική. Ως αποτέλεσμα, ακόμη και αν τα ρεύματα στα δύο καλώδια ενός ζεύγους είναι ακριβώς ίσα με αντίθετες κατευθύνσεις, το συνολικό επαγόμενο ρεύμα σε οποιαδήποτε αγώγιμη θωράκιση από ένα λειτουργικό συνεστραμμένο ζεύγος δεν θα είναι μηδέν.

5.2. iSAFT SpaceWire Simulator

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση και παρακολούθηση των μεταδιδόμενων πακέτων δεδομένων μέσω καλωδίου SpaceWire στο επόμενο πειραματικό κομμάτι είναι ο iSAFT Spacewire Simulator της TELETEL, το περίβλημα του οποίου απεικονίζεται στην Εικόνα που ακολουθεί. Αρχικά, γίνεται μια ανάλυση του περιβάλλοντος iSAFT για καλύτερη κατανόηση των παραμέτρων που εξετάσθηκαν και του τρόπου με τον οποίο μελετήθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Εικόνα 5.4. iSAFT SpaceWire Simulator [31]

Ο iSAFT [26] προσφέρει πλήθος δυνατοτήτων, η κυριότερη των οποίων για την παρούσα εργασία αποτελεί το γεγονός πως μπορεί να υποστηρίξει το SpaceWire καλώδιο για τη διεξαγωγή δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD). Περιλαμβάνει 4 θύρες SpaceWire, οι οποίες λειτουργούν πλήρως αμφίδρομα. Κάθε κόμβος της σύνδεσης SpaceWire ανταποκρίνεται σε μία θύρα του iSAFT και μπορεί να μεταδίδει ή να δέχεται δεδομένα (full-duplex link).

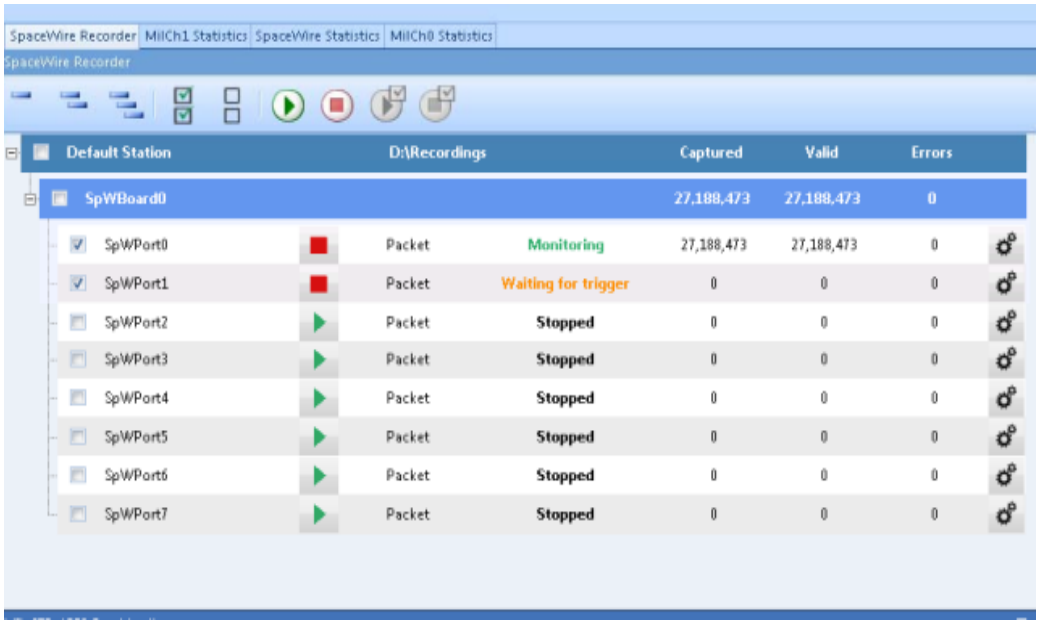
Το πρώτο σημείο που ο χρήστης συναντά στο περιβάλλον του προσομοιωτή [31] είναι το παράθυρο διαμόρφωσης πλακέτας, το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 5.2. Εντοπίζονται οι διαθέσιμες θύρες και με πράσινο χρώμα εκείνες που είναι συνδεδεμένες. Υπάρχει δυνατότητα διαμόρφωσης της κάθε θύρας και των χαρακτη-

Εικόνα 5.5. Παράθυρο "board configuration" του iSAFT [31]

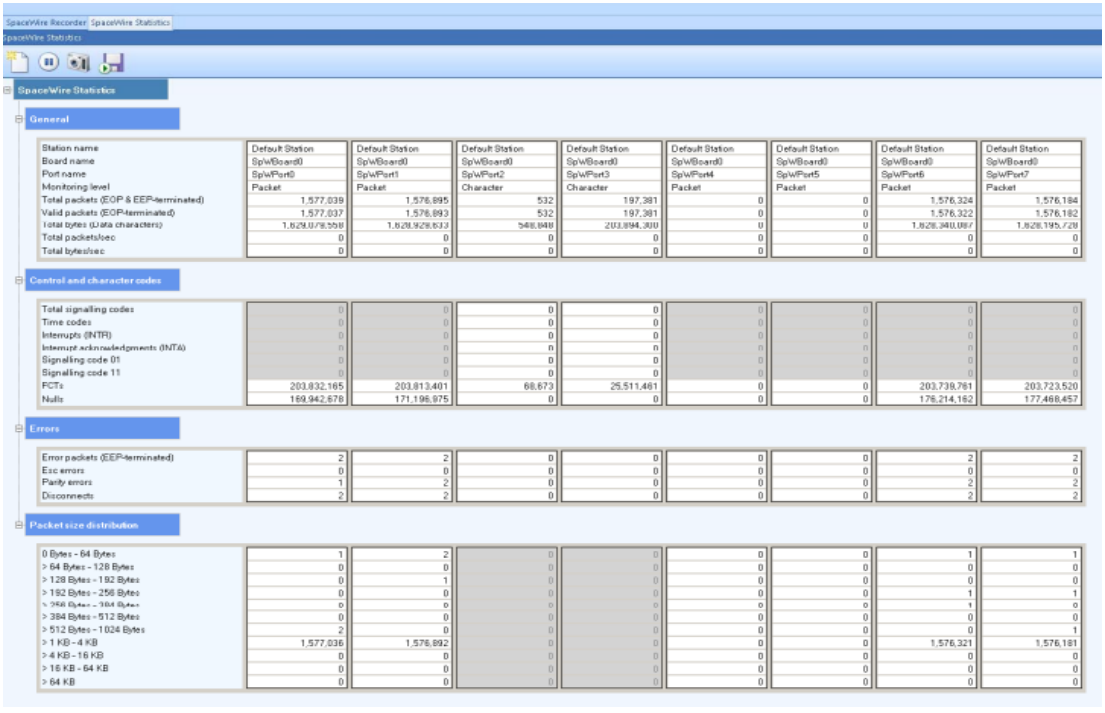
-ριστικών της. Ειδικότερα, μπορεί να ρυθμιστεί η αυτόματη εκκίνηση, (auto start) , ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (rate) , το μέγιστο μήκος πακέτου που μπορεί να αποστέλλει και να λαμβάνει, η βύθιση πακέτων που αναφέρεται στη διαχείριση των ληφθέντων πακέτων από τη θύρα (packet sinking) , η διάρκεια του παλμού σήματος ενεργοποίησης και η πολικότητα. Για τις τροποποιήσεις, χρειάζεται η απενεργοποίηση και μετά πάλι ενεργοποίηση της θύρας. Για τη δημιουργία της σύνδεσης χρειάζονται δύο από τις θύρες, συνδεδεμένες με το καλώδιο, και να δρουν και οι δύο ως πομπός και δέκτης. Από το παράθυρα "Simulation" κάθε θύρας θα δημιουργείται ένα SpaceWire πακέτο και θα προστίθεται στην ουρά. Τα πακέτα προς αποστολή μπορούν να ρυθμιστούν ως προς το όνομά τους, την καθυστέρηση πακέτου σε πακέτο (packet to packet delay time) , τον τύπο τερματισμού (EOP,EEP,Partial) και το μήκος ωφέλιμου φορτίου.

Ακόμη, μπορούν να διαμορφωθούν ως προς το περιεχόμενό τους (zeros, ones, random) και ως προς το μέγεθός τους (έως 2048 bytes). Η ταχύτητα μετάδοσης των πακέτων μπορεί να φτάσει έως 400Mbps. Το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει για να πραγματοποιηθεί μία προσομοίωση είναι η επιλογή των θυρών διαμέσου των οποίων θα γίνει η μετάδοση. Ενεργοποιούνται οι θύρες αυτές και επιλέγεται η επιθυμητή ταχύτητα. Στη συνέχεια, για κάθε θύρα ξεχωριστά διαμορφώνεται το φορτίο που θέλουμε να αποσταλεί, δηλαδή τα χαρακτηριστικά των πακέτων, και επιλέγεται ο τρόπος αποστολής, δηλαδή συνεχόμενα ή άπαξ. Προτού ξεκινήσει η αποστολή των bytes, χρειάζεται να ενεργοποιηθεί για κάθε θύρα η δυνατότητα λήψης αυτών.

Στην παρακάτω Εικόνα, παρουσιάζεται το παράθυρο ενός ακόμη πολύ σημαντικού χαρακτηριστικού του iSAFT , της καταγραφής και αποθήκευσης των δεδομένων στο δίκτυο (SpW Monitoring-> Recorder). Τα πεδία "Triggers" και "Filters" καθορίζουν τα κριτήρια με βάση τα οποία ξεκινά και συμβαίνει η καταγραφή, ενώ η διαδικασία ενεργοποιείται με το "Start" και βλέπουμε την κατάσταση της καταγραφής στον αντίστοιχο δείκτη (stopped, monitoring , waiting for trigger).



Εικόνα 5.6. SpaceWire Recorder panel [31]



Εικόνα 5.7. SpaceWire Simulator Statistics panel [31]

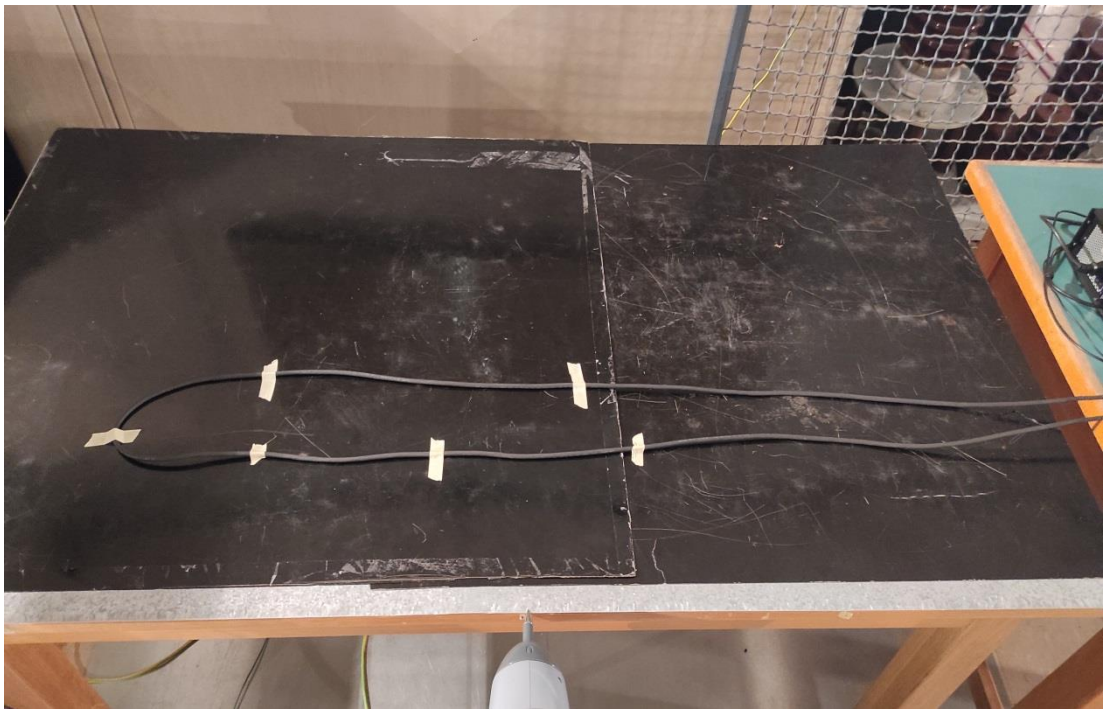
Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης του αριθμού των bytes που αποστέλλονται και λαμβάνονται από κάθε θύρα κάθε στιγμή, καθώς και των μεταφερόμενων πακέτων και έτσι διευκολύνεται ο εντοπισμός πιθανών σφαλμάτων ή παραλείψεων σε μια προσομοίωση, στοιχεία τα οποία επίσης προσφέρει το πλαίσιο στατιστικών του περιβάλλοντος του προσομοιωτή για κάθε θύρα με συνεχή ενημέρωση, ανάλογα με τον τύπο αποστολής που έχουμε επιλέξει (συνεχής ή εφ άπαξ). Συγκεκριμένα, αυτό πραγματοποιείται στο παράθυρο “SpW Simulation Statistics” που βλέπουμε στην παραπάνω Εικόνα. Τα δεδομένα μπορούν να εξαχθούν σε αρχεία .csv , ενώ είναι δυνατή και η λήψη στιγμιότυπου.

5.3. Πειραματική διάταξη

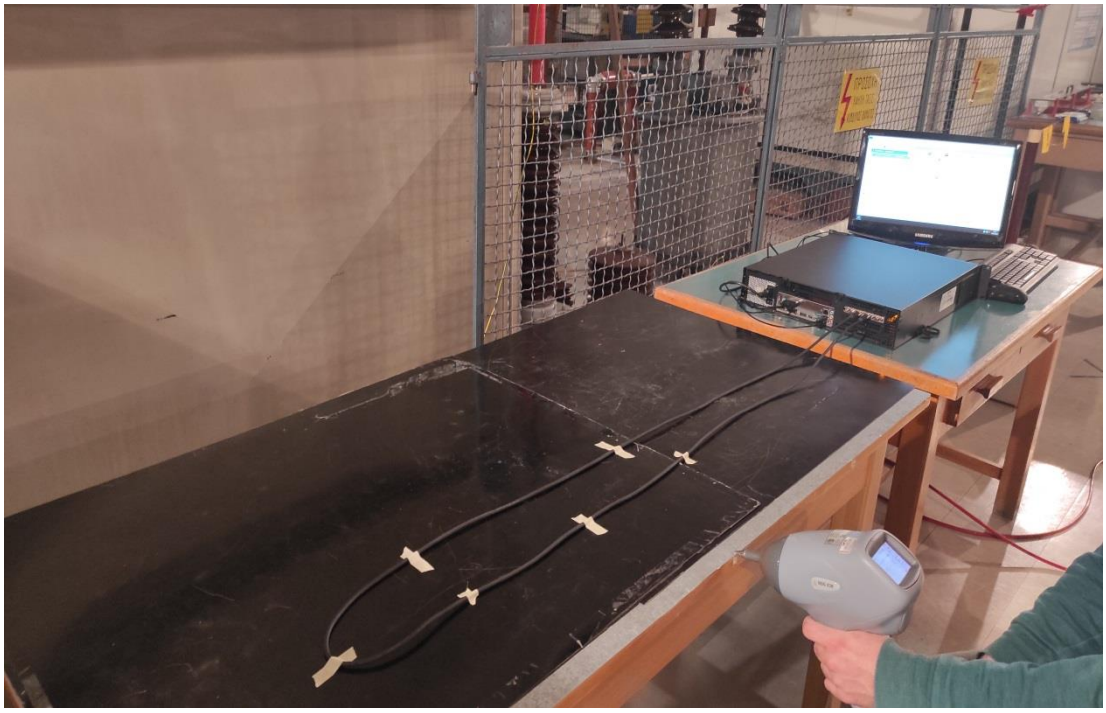
Η διάταξη στην οποία διεξήχθη το πείραμα στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. αποτελούνταν από το τραπέζι στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι αρχικές δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD), με το μεταλλικό κάλυμμα που συνιστούσε το οριζόντιο πεδίο ζεύξης πάνω στο οριζόντιο δάπεδο. Πάνω στο πεδίο τοποθετήθηκαν μαύρα πλαστικά καλύμματα για να ακουμπά το απλωμένο καλώδιο SpaceWire και να παρέχουν την απαραίτητη μόνωση. Οι ακροδέκτες του καλωδίου 3 μέτρων, στο οποίο χρησμοποιήθηκε χαρτοταινία κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων για να διατηρείται η θέση του, συνδέονται σε δύο θύρες του προσομοιωτή SpaceWire, iSAFT, τη λειτουργία του οποίου περιγράψαμε, και με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η σύνδεση που θέλουμε (link).

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για χρήση και διαχείριση του περιβάλλοντος iSAFT, από το οποίο ελήφθησαν τα αποτελέσματα των δοκιμών, περιλαμβάνει οθόνη, ποντίκι και πληκτρολόγιο, συσκευές που θα χρησιμοποιούσαμε και σε οποιονδήποτε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Στις επόμενες Εικόνες, φαίνεται η διάταξη του πειράματος σε φωτογραφίες από το εργαστήριο και συγκεκριμένα στην 5.5.α. παρουσιάζεται το τραπέζι με το πεδίο, τα καλύμματα και το καλώδιο SpaceWire με τη γεννήτρια ESD στο μέσο του τραπεζιού, για εφαρμογή δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με τον ίδιο τρόπο που πραγματοποιήθηκε στο πρώτο μέρος της εργασίας, ενώ στην 5.5.β φαίνεται η σύνδεση και ο προσομοιωτής για κατανόηση του τρόπου με τον οποίο λαμβάνονται τα αποτελέσματα.



Εικόνες 5.8α. Τοποθέτηση καλωδίου SpaceWire στο οριζόντιο επίπεδο ζεύξης



Εικόνες 5.8β. Διάταξη τραπεζιού και οριζόντιου μεταλλικού πεδίου με εξοπλισμό για δοκιμές ESD μαζί με προσομοιωτή και καλώδιο SpW για δοκιμές

5.4. Σημεία ελέγχου και διεξαγωγή δοκιμών

Στην εργασία αυτή, ο iSAFT χρησιμοποιείται ώστε να δημιουργεί την επιθυμητή κίνηση πακέτων στο εξεταζόμενο καλώδιο SpaceWire, ο ένας ακροδέκτης του οποίου συνδέεται στη θύρα 2, ενώ ο άλλος στη θύρα 3 του iSAFT. Αφού επιβεβαιώθηκε η άρτια λειτουργία του καλωδίου μέσω του πλαισίου στατιστικών του iSAFT και έγιναν οι απαιτούμενες ρυθμίσεις στις ιδιότητες των πακέτων και τις προϋποθέσεις παρακολούθησης (monitoring) της ροής των δεδομένων και των πακέτων, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές ESD και οι μετρήσεις.

Σκοπός των δοκιμών ήταν η διαπίστωση της επίδρασης των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στην κίνηση των πακέτων με εξέταση των απωλειών και των σφαλμάτων [36] που προέκυπταν. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στα διάφορα σημεία εφαρμογής όπου είχαμε λάβει τις μετρήσεις για τις κυματομορφές ρεύματος με τη γεννήτρια ESD και στα στατιστικά της κίνησης των SpaceWire πακέτων στο περιβάλλον του προσομοιωτή καταγράφηκαν οι δείκτες που μας ενδιαφέρουν για την κατανόηση των μεταβολών στην αποστολή και λήψη των πακέτων στις δύο θύρες. Επειδή η αποστολή των πακέτων επιλέχθηκε να είναι συνεχής (continuous), για να είναι εφικτή η παρατήρηση και καταγραφή των δεικτών σφαλμάτων και μεταδιδόμενων και ληφθέντων πακέτων και bytes, χρειαζόταν να πραγματοποιείται παύση στην εμφάνιση των στατιστικών, έπειτα από κάθε εφαρμογή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο πεδίο.

Ειδικότερα, μετρήθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά μεγέθη:

- **Parity errors (σφάλμα ισοτιμίας):** Σφάλμα που προκύπτει από ακανόνιστες αλλαγές στα δεδομένα κατά τη μετάδοσή τους και η ένδειξη ενός σημαίνει πως έχει εντοπιστεί σφάλμα κατά τη λήψη ενός συμβόλου.
- **Disconnects (σφάλμα αποσύνδεσης):** Σημαίνει πως ο σύνδεσμος (link) είναι αποσυνδεδεμένος σε μία ή και στις δύο κατευθύνσεις, επομένως δεν λαμβάνονται δεδομένα ή Nulls.
- **Error received packets (σφάλμα λήψης πακέτων)**
- **Απώλειες bytes:** Είναι η απόλυτη τιμή της διαφοράς μεταξύ του αριθμού των bytes που αποστέλλονται (transmitted) από τη μία θύρα και του αριθμό των bytes που λαμβάνονται (received) από την άλλη θύρα.

Το μήκος των πακέτων ρυθμίστηκε στα 32 bytes, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων (link rate) ορίστηκε στα 200Mbps.

5.5. Αποτελέσματα μετρήσεων

Στους Πίνακες που παρατίθενται σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για δοκιμές ESD στα 8kV με θετική και αρνητική πολικότητα και για κάθε μια από τις θύρες 2 και 3, όπου συνδέθηκαν οι ακροδέκτες του καλωδίου SpaceWire. Αναλυτικότερα, φαίνονται οι τιμές των parity errors (σφαλμάτων ισοτιμίας), των disconnect errors (αποσυνδέσεων), των error received packets (σφαλμάτων στη λήψη πακέτων) και των «χαμένων» bytes και μάλιστα ο μέσος όρος αυτών για 5 μετρήσεις σε κάθε σημείο και πολικότητα τάσης, για εφαρμογές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στα 5cm, 80cm και 155cm από το σημείο γείωσης στο οριζόντιο επίπεδο ζεύξης. Παρουσιάζεται όπως γίνεται αντιληπτό, η επίδραση στην κίνηση των πακέτων για έμμεσες εφαρμογές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε σημεία κοντά στο κέντρο του τραπεζιού και στις άκρες αυτού.

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά μεγέθη από τα στατιστικά της προσομοίωσης της κίνησης των πακέτων για δοκιμή ESD στα 8kV με θετική πολικότητα στη θύρα 2

Στατιστικά Προσομοίωσης στη θύρα 2 για κάθε σημείο			
Δείκτες ενδιαφέροντος	**5cm**	**80cm**	**155cm**
Σφάλματα ισοτιμίας	2	3	3
Αποσυνδέσεις	5	5	5
Σφάλματα λήψης πακέτων	1	1	1
Μέσες απώλειες bytes	2	4	3

Σημείωση: Οι απώλειες των bytes αποτέλεσαν το κυριότερο σημείο ελέγχου στο οποίο ήταν δυνατή η αποτελεσματική κατανόηση της επίδρασης των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στη διαμορφωμένη σύνδεση SpaceWire (link) και του

τρόπου με τον οποίο το σημείο εφαρμογής μιας δοκιμής πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ζεύξης μεταβάλλει τις εξαγόμενες τιμές των σφαλμάτων και των απωλειών. Με το ρυθμό μετάδοσης στη σύνδεση ορισμένο στα 200Mbps (δηλαδή 200Megabits ανά δευτερόλεπτο που ισοδυναμεί με 25Megabytes), αναλογικά σε ένα χρονικό διάστημα 120ns, αναμένεται περίπου μετάδοση 3 bytes. Με αυτόν τον τρόπο, είμαστε σε θέση να αντιληφθούμε τη συνάρτηση των μετρούμενων bytes σε σχέση με αυτό που περιμέναμε. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως τα μετρούμενα bytes εμφάνισαν παρόμοιες τιμές και μεταβολή για τις δύο θύρες, για αυτό και βλέπουμε την ίδια τιμή στους Πίνακες, που αποτελεί το μέσο όρο.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις υπόλοιπες αποστάσεις από το σημείο γείωσης στο μεταλλικό πεδίο (10cm,20cm,40cm,60cm,100cm,120cm,140cm) επαληθεύουν τα επακόλουθα για τη μέση και τα άκρα του τραπεζιού, ενώ το ίδιο ισχύει και για τα υπόλοιπα επίπεδα τάσης (2 kV, 4 kV, 6kV).

Πίνακας 5.2. Χαρακτηριστικά μεγέθη από τα στατιστικά της προσομοίωσης της κίνησης των πακέτων για δοκιμή ESD στα 8kV με θετική πολικότητα στη θύρα 3

Στατιστικά Προσομοίωσης στη θύρα 3 για κάθε σημείο			
Δείκτες ενδιαφέροντος	**5cm**	**80cm**	**155cm**
Σφάλματα ισοτιμίας	3	3	2
Αποσυνδέσεις	5	5	5
Σφάλματα λήψης πακέτων	0	1	0
Μέσες απώλειες bytes	2	4	3

Πίνακας 5.3. Χαρατηριστικά μεγέθη από τα στατιστικά της προσομοίωσης της κίνησης των πακέτων για δοκιμή ESD στα 8kV με αρνητική πολικότητα στη θύρα 2

Στατιστικά Προσομοίωσης στη θύρα 2 για κάθε σημείο			
Δείκτες ενδιαφέροντος	**5cm**	**80cm**	**155cm**
Σφάλματα ισοτιμίας	3	3	3
Αποσυνδέσεις	5	6	5
Σφάλματα λήψης πακέτων	1	1	1
Μέσες απώλειες bytes	2	4	3

Πίνακας 5.4. Χαρακτηριστικά μεγέθη από τα στατιστικά της προσομοίωσης της κίνησης των πακέτων για δοκιμή ESD στα 8kV με αρνητική πολικότητα στη θύρα 3

-Στατιστικά Προσομοίωσης στη θύρα 3 για κάθε σημείο			
Δείκτες ενδιαφέροντος	**5cm**	**80cm**	**155cm**
Σφάλματα ισοτιμίας	2	3	3
Αποσυνδέσεις	5	6	6
Σφάλματα λήψης πακέτων	1	2	1
Μέσες απώλειες bytes	2	4	3

Κεφάλαιο 6: Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε εκτενώς το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με σκοπό την πραγμάτευση του τρόπου με τον οποίο ορισμένοι παράγοντες επηρεάζουν την καταγραφή του ρεύματος ESD κατά την έμμεση εφαρμογή ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και πώς αυτές οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις επηρεάζουν την κίνηση πακέτων σε ένα σύνδεσμο SpaceWire.

Πραγματοποιήθηκε λεπτομερής παρουσίαση του θεωρητικού μέρους των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και των εφαρμογών τους με περιγραφή του Προτύπου με βάση το οποίο εκτελέστηκαν οι πειραματικές διαδικασίες και ανάλυση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε. Εξετάστηκε ακόμη ενδελεχώς το πρωτόκολλο SpaceWire και συγκεκριμένα το Πρότυπο ECSS-E-ST-50-12C και οι παράμετροι που ορίζει για το SpaceWire και τα στοιχεία που το απαρτίζουν, που αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο για την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στο δεύτερο σκέλος της παρούσας εργασίας

Με το πέρας της εκτέλεσης όλων των πειραματικών δοκιμών και λήψη μετρήσεων της εργασίας, καταλήγουμε σε ορισμένα αξιοσημείωτα συμπεράσματα σχετικά με τα μετρούμενα ρεύματα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και τις κυματομορφές τους αλλά και ως προς την επίδραση των δοκιμών ESD στη σύνδεση SpaceWire.

Από την παρατήρηση αρχικά των γραφημάτων και των τιμών των χαρακτηριστικών παραμέτρων ρεύματος που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2, είναι δυνατό να αποφανθούμε πως η απόσταση από το σημείο γείωσης πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ζεύξης και το σημείο όπου πραγματοποιείται η δοκιμή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων ούτε ως προς τη μορφή των κυματομορφών ρεύματος ούτε και ως προς τις τιμές των ρευμάτων και των παραμέτρων τους. Οι μεταβολές είναι εμφανείς ωστόσο στα μετρούμενα μεγέθη, ανάλογα με το επίπεδο τάσης που εφαρμόζουμε αν και ο παράγοντας της τάσης έγινε αντιληπτό πως δεν έχει αντίκτυπο στη μορφή και τη συμπεριφορά των κυματομορφών.

Επίσης, όσον αφορά τη σύνδεση του SpaceWire στο τραπέζι πάνω στο πεδίο, μελετώντας τις τιμές στους Πίνακες του προηγούμενου κεφαλαίου, γίνεται κατανοητό πως υπάρχει μια αυξητική τάση στα σφάλματα και τις απώλειες bytes στο σύνδεσμο του SpaceWire καθώς προσεγγίζουμε τη μέση του τραπεζιού, χωρίς όμως οι τιμές να εμφανίζουν μεγάλες διαφορές. Επομένως, η κίνηση των πακέτων στο σύνδεσμο (link) μέσω του καλωδίου SpaceWire επηρεάζεται από το σημείο εφαρμογής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ενώ για διαφορετικά επίπεδα τάσης οδηγούμαστε στα ίδια συμπεράσματα.

Σε όλη τη διάρκεια της μετρητικής διαδικασίας, τόσο για τη μέτρηση του ρεύματος ESD όσο και για τις μετρήσεις με το καλώδιο SpaceWire, προέκυψαν αρκετά προβλήματα, κάτι που μπορεί να συμβεί ωστόσο σε οποιαδήποτε δοκιμή ηλεκτρομαγνητικής φύσης. Η κατάλληλη ή μη τοποθέτηση των αγωγών των γειώσεων και αντιστάσεων στην παροχή δημιούργησε σφάλματα στις δοκιμές

ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ακόμη, το μήκος του καλωδίου SpaceWire για τη δημιουργία της σύζευξης και η αλλοίωσή του είχαν αντίκτυπο στα αποτελέσματα των μετρήσεων από τις δοκιμές, ενώ σημαντικό στοιχείο για την παρατήρηση των αποτελεσμάτων αποτελεί και η ρύθμιση των ιδιοτήτων του πακέτου και του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων (bytes). Γίνεται λοιπόν σαφές ότι είναι αναγκαίος ο έλεγχος όλων των πιθανών παραγόντων, είτε εξωτερικών είτε εσωτερικών της διαδικασίας πριν την εκτέλεση δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και τη λήψη μετρήσεων.

Τα πορίσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε συμβάλλουν στη συνεχή εξέλιξη της έρευνας που λαμβάνει μέρος στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και ειδικότερα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αποτελούν επιπλέον το περιεχόμενο δημοσίευσης του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ για το επικείμενο ευρωπαϊκό συνέδριο ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας EMC Europe και το εθνικό συνέδριο Μετρολογίας.

Κεφάλαιο 7: Μελλοντικό έργο

Όσον αφορά τη μελλοντική επέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του SpaceWire διαθέτει εξαιρετικό ενδιαφέρον για περαιτέρω δοκιμές, ενώ τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από τις εφαρμογές δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ποικίλουν και μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης ή συσχετισμού με διαφορετική έρευνα στο χώρο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

Σχετικά με τις δοκιμές ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD), μπορεί να γίνει περαιτέρω ανάλυση στην αβεβαιότητα των μεθόδων μέτρησης του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το πλήθος των δοκιμών για την τελική διαμόρφωση μιας κυματομορφής ρεύματος ESD και ο υπολογισμός του μέσου όρου των αποτελεσμάτων για τις χαρακτηριστικές παραμέτρους της, οι οποίες εξάγονται από το πρόγραμμα ανακατασκευής ρεύματος, συνδράμουν σε μια αξιόπιστη καταγραφή των παραγόμενων ρευμάτων για εκτίμηση της επίδρασης της τάσης και της απόστασης από το σημείο γείωσης, ωστόσο είναι δυνατό να αποκλίνουν από μέτρηση σε μέτρηση και για αυτό να τίθενται θέματα επαναληψιμότητας για μια μέθοδο μέτρησης.

Όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 3, για την εφαρμογή ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στο μεταλλικό πεδίο και τη λήψη των κυματομορφών ρεύματος χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων Schaffner NG 438 (ESD generator) και ο ανιχνευτής ρεύματος Fischer (FCC) : F-65 RF (current probe). Συνεπώς, ήταν συγκεκριμένος ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και για αυτό το λόγο το μελλοντικό έργο περιλαμβάνει την εκτέλεση πειραμάτων με διαφορετικούς τύπους γεννητριών και ανιχνευτών ρεύματος και σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία με τις νέες μετρήσεις, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση αυτών στις αρχικές μετρήσεις και τις κυματομορφές.

Η αξιοποίηση ενός λογισμικού ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης και οι αποτελεσματικές τεχνικές μοντελοποίησης κυκλωμάτων που έχουν αναπτυχθεί πληρούν τις προϋποθέσεις ώστε να συμβάλουν στην περαιτέρω διερεύνηση της μεθόδου καταγραφής ρευμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που εφαρμόστηκε σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2, για ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάρκειά των δοκιμών και μετρήσεων.

Τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα από την παρούσα εργασία ενθαρρύνουν ακόμη περαιτέρω έρευνα σχετικά με τα αίτια που οδηγούν σε αυτή την κίνηση πακέτων που καταγράφηκε σε μια σύζευξη SpaceWire, για διαφορετικά σημεία του τραπεζιού, υπό το πρίσμα των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Προσομοίωση του καλωδίου SpaceWire σε πρόγραμμα και μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου και διαφορετικών ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών θα προσφέρει απαντήσεις σχετικά με την επαναληψιμότητα των μετρήσεων και θα ενισχύσει τα συμπεράσματα της έρευνας.

Επιπλέον , το καλώδιο που επιλέγεται επηρεάζει σημαντικά την κίνηση των πακέτων και για αυτό το λόγο χρειάζονται δοκιμές με εναλλακτικές διατάξεις συνδέσμων SpaceWire και με ποικίλα χαρακτηριστικά μετάδοσης, είτε αυτά σχετίζονται με τις ιδιότητες των θυρών του προσομοιωτή SpaceWire που χρησιμοποιούνται για να συνδεθούν οι ακροδέκτες του καλωδίου, είτε με τα χαρακτηριστικά των πακέτων που καθορίζονται πριν την ενεργοποίηση της λειτουργίας του συνδέσμου και μπορούν να μεταβληθούν μέσω του προσομοιωτή.

Κρίνεται απαραίτητη για κάθε μελλοντική εργασία σε δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, η άρτια συμμόρφωση με όσα ορίζει το Πρότυπο για τις μεθόδους μέτρησης και αντίστοιχα με τους κανόνες και τις παραμέτρους που ορίζει το Πρότυπο για το πρωτόκολλο SpaceWire, με συνεχή ενημέρωση και μελέτη τους και των αποφάσεων που λαμβάνονται σχετικά με αυτά.

Βιβλιογραφία

[1] ANSI C63.14 – 1998, "Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD)".

[2] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, *"*Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development*"*, Elsevier, 2003

[3] Paul Cartwright, "Electrostatic Hazards in the aerosol industry", διαθέσιμο στη διεύθυνση: http://www.chilworth.co.uk/publications/publications.asp

[4] [Paul A. Chatterton – Michael A. Houlden, "Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό", Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1992

[5] Theodore Dangelmayer, "ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control", Van Noshand Ranhold, New York, 1990

[6] ΕΛΟΤ EN 61000.04.02 2η Έκδοση 2009 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) - Μέρος 4-2: Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων - Δοκιμή ατρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

[7] IEC 61000-6-1, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-1: Generic standards – Immunity for residential, commercial and light-industrial environments

[8] Γ.Π.Φώτης "Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων: Το παραγόμενο ρεύμα και πεδίο", Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2006

[9] Παύλος Σ. Κατσίβελης ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ

[10] RF Field and ESD Immunity Test on Cable Assembly Type AL SpaceWire Link.pdf

[11] Wikipedia: Current Probes

[12] Telecommunications Industry Association, "ANSI/TIA/EIA-644:2001 (R2012), Electrical Characteristics of Low Voltage Differential Signaling (LVDS) Interface Circuits", Arlington, USA, Standards and Technology Department , 2012

[13] IEC 61000-4-2: "Electromagnetic Compatibility (EMC), Part4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication", 2008.

[14] «SpaceWire Conference» Available: http://spacewire-conference.org/

[15] Ανάργυρος Θ. Μπακλέζος Μελέτη & Μοντελοποίηση Εκπεμπόμενης Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας Ζεύξης SpaceWire για Διαστημικές Εφαρμογές

[16] "Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-438", Instruments Schaffner

[17] Schaffner Company, Technical document and product information for the MD 103.

[18] Warren Boxleitner, "Electrostatic Discharge and Electronic Equipment", IEEE Press, New York, 1989.

[19] Zhiyong Yuan, Tun Li, Jinliang He, Shuiming Chen, Weiyuan Chen, Rong Zeng "Simulation and measurement of the transient field of indirect ESD", 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings, pp. 634 - 637, Singapore, 2006.

[20] P.Wilson, M.T.Ma "Fields Radiated by Electrostatic Discharges", IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Volume 33, Issue 1, pp. 10-18, 1991.

[21] David Pommerenke και Martin Aidam "ESD: Waveform calculation, field and current of human and simulator ESD" Journal of Electrostatics 38, pp 33-51 (1996)

[22] ECSS-E-ST-50-12C Rev.1 Space engineering SpaceWire - Links, nodes, routers and networksβ The Netherlands: ECSS Secretariat, ESA-ESTEC, Requirements & Standards Division, 15 May 2019

[23] ECSS-E-HB-20-07 Space engineering - Electromagnetic compatibility (EMC) handbook

[24] ESA Bulletin, Volume 145 S. Parkes, P. Armbruster and M. Suess, "SpaceWire On-Board Data-Handing Network", ESA Bulletin, Volume 145, pp 34-45, February 2011

[25] European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Secretariat, "ECSS-EST-50-12C, Space Engineering – SpaceWire- Links, nodes, routers and networks", ESA-ESTEC Noordwijk, The Netherlands, Requirements & Standards Division, July 2008.

[26] V. Kollias, N. Pogkas, A. Tavoularis and M. Tsagkaropoulos, "Flight equipment validation with iSAFT: The EUCLID Fine Guidance Sensor case," 2014 International SpaceWire Conference (SpaceWire), Athens, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/SpaceWire.2014.6936278

[27] H. W. Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

[28] A. Roberts, S. G. Dykes, R. Klar and C. C. Mangels, "A Link-Layer Broadcast Service for SpaceWire Networks," 2007 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2007, pp. 1-10, doi: 10.1109/AERO.2007.352902.

[29] European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Secretariat, "ECSS-EST-20-07, C Rev. 1, Space engineering, Electromagnetic compatibility", ESAESTEC Noordwijk, The Netherlands, Requirements & Standards Division, February 2012.

[30] K. Enouf and S. Hermant, "Compact, impedance-matched SpaceWire connector development — "MicroMach SpaceWire": SpaceWire components, long paper," 2016 International SpaceWire Conference (SpaceWire), Yokohama, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/SpaceWire.2016.7771640

[31] TELETEL S.A., "iSAFT SpaceWire Simulator Operation Manual Version 1.7", Athens, Greece:, March 2018.

[32] A. T. Baklezos, C. D. Nikolopoulos, I.R. Sigalas and C. N. Capsalis, "Measurement and Modeling of SpaceWire Radiation for Electromagnetic Compatibility Assessment," 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Dubrovnik, Croatia, 2020, accepted.

[33] European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Secretariat, "ECSS-E50-51C, SpaceWire protocol identification", ESA-ESTEC Noordwijk, The Netherlands, Requirements & Standards Division, January 2003

[34] Panagiotis K. Papastamatis , Evangelos A. Paliatsos , Ioannis F. Gonos and Ioannis A. Stathopulos Article: Analysis of the ESD Reconstruction Methodology Based on Current Probe Measurements and Frequency Response Compensation for Different ESD Generators and Severity Test Levels

[35] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, "Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development", Elsevier, 2003

[36] [Ηλεκτρονικό] "Link Error Handling": https://www.star-dundee.com/spacewire/spacewire-users-guide/spacewire-links/exchange-level/link-error-handling/

[37] [Ηλεκτρονικό] https://www.electrical-installation.org/enwiki/EMC_-_Coupling_mechanisms_and_counter-measures

[38] C. D. Nikolopoulos, A. T. Baklezos, P. K. Papastamatis, T. N. Kapetanakis, I. O. Vardiambasis and I. F. Gonos, "RF Field and ESD Immunity Test on Cable Assembly Type AL SpaceWire Link," 2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium, 2021, pp. 840-844, doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559301.

[39] Nandini, N. L., Raghavaiah, V., Sowjanya, P., Varla, A. K., Mini, R. L., Murthy, P. V. N., … Rao, M. N. (2016). Noise coupled to unshielded wire due to

computed transient electromagnetic fields generated by ESD events in spacecraft. 2016 International Conference on ElectroMagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC). doi:10.1109/incemic.2016.7921503