

**ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ειδικά θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας:

Ανάλυση - Μετρήσεις

Αντώνης Παπούλης

Εισηγητής: Παναγιώτης Δροσινόπουλος, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2017

Ειδικά θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας: Ανάλυση-Μετρήσεις

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ειδικά θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας: Ανάλυση-Μετρήσεις

**Αντώνης Δ. Παπούλης
Α.Μ. 39186**

Εισηγητής: Παναγιώτης Δροσινόπουλος, Καθηγητής

Εξεταστική Επιτροπή: Έλληνας Ιωάννης, Ματιάτος Σπυρίδων

Ημερομηνία εξέτασης: 8/12/2017

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αντώνης Παπούλης, του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 39186 φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ Συστημάτων Τ.Ε. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε., ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφαση της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού 6μήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ολοκληρώθηκε μετά από επίμονες προσπάθειες, σε ένα ενδιαφέρον αντικείμενο, όπως αυτό της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και των παρεμβολών. Στην προσπάθειά μου αυτή υποστήριξε και με καθοδήγησε ο επιβλέπων καθηγητής μου κ. Δροσινόπουλος, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την σημαντική βοήθεια και στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος ευχαριστώ και τους φίλους μου που υποστήριξαν την προσπάθεια μου ώστε να τελειώσω τις σπουδές μου!

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η μελέτη και η ανάλυση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας EMC που εφαρμόζεται σε σύνθετα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα. Ορίζεται ο θόρυβος όπου αποτελεί το βασικό πρόβλημα της EMC όταν υπάρξει μέσα σε ένα σύστημα. Αναφέρονται είδη, πηγές θορύβου και τρόποι ανάσχεσης τους. Αναφέρονται, ο ορισμός της EMC και άλλων εννοιών που σχετίζονται με την EMC όπως η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή EMI. Η γείωση ενός συστήματος αποτελεί μια από τις κύριες μεθόδους ελαχιστοποίησης θορύβων. Παρουσιάζονται είδη και πρακτικές μέθοδοι γείωσης των συστημάτων. Επίσης αναλύεται η πιο βασική τεχνική για τον έλεγχο της EMC που είναι η θωράκιση μιας πηγής ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής από έναν δέκτη. Γίνεται ανάλυση της θεωρίας θωράκισης και αναφέρονται είδη και μέθοδοι της. Στην συνέχεια μελετάται η σωστή σχεδίαση τυπωμένων κυκλωμάτων PCB με σκοπό την επίτευξη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Η τοποθέτηση των εξαρτημάτων, η δρομολόγηση των σχισμών και η γείωση των πλακετών έχουν βασικό ρόλο για τον καθορισμό της EMC στα τυπωμένα κυκλώματα. Παρουσιάζονται τεχνικές διάταξης και δομής σε αναλογικά και ψηφιακά κυκλώματα ώστε να είναι ηλεκτρομαγνητικά συμβατά. Τέλος παρουσιάζονται τεχνικές και συστήματα μετρήσεων EMI στο πεδίο χρόνου και συχνότητας και γίνεται αναφορά στα πρότυπα και τις βασικές αρχές μετρήσεων.

Abstract

In this diploma thesis is presented the study and analysis of the electromagnetic compatibility EMC, applied to complex electrical and electronic systems. It defines the noise that is EMC's main problem when it is detected within a system. There are mentioned kinds, sources of noise and ways of inhibiting them. Definitions of EMC and other related concepts, such as electromagnetic interference EMI are mentioned. Grounding of a system is one of the main methods for minimizing noise. Types and practical grounding methods are presented. It also analyzes the most basic technique for controlling EMC, which is the shielding of a source of electromagnetic disturbance from a receiver. An analysis of the theory of shielding is made and its types and methods are mentioned. Then the proper design of printed circuits PCBs is studied to achieve electromagnetic compatibility. The placement of the components, the trace routing and the grounding of the boards are essential for the determination of EMC in the printed circuits. Layout and structure techniques are presented in analog and digital circuits to be electromagnetically compatible. Finally, EMI measurement techniques are presented in the time and frequency domain and reference is made to standards and measurement principles.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Ηλεκτρομαγνητισμός, σήματα και συστήματα, τυπωμένα κυκλώματα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: EMC(Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα), EMI(ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή), γείωση, θωράκιση, κυκλώματα PCB

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα | 12 |
| 1.1 Ιστορική αναδρομή | 12 |
| 1.2 Παραδείγματα προβλημάτων της EMC..... | 13 |
| Κεφάλαιο 2: Θόρυβος και ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα | 16 |
| 2.1 Θόρυβος, είδη και πηγές | 16 |
| 2.2 Ορισμοί και έννοιες ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) | 21 |
| Κεφάλαιο 3: Γείωση | 26 |
| 3.1 Ορισμός και κατηγορίες γείωσης | 26 |
| 3.2 Μέθοδοι και τύποι γειώσεων..... | 33 |
| 3.3 Αντίσταση της Γης και η επιρροή της στην γείωση | 37 |
| 3.4 Τρόποι γείωσης συστημάτων | 42 |
| 3.5 Παραδείγματα γείωσης συστημάτων | 47 |
| Κεφάλαιο 4: Θωράκιση | 49 |
| 4.1 Εφαρμογές και αποτελεσματικότητα θωράκισης | 49 |
| 4.2 Βασική αρχή θωράκισης από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές EMI | 52 |
| 4.3 Ανάλυση θεωρίας και μέθοδοι θωράκισης..... | 54 |
| 4.4 Ασυνέχειες της θωράκισης..... | 63 |
| 4.6 Θωράκιση καλωδίων | 69 |
| 4.6 Μέθοδοι μέτρησης αποτελεσματικότητας μιας θωράκισης | 71 |
| Κεφάλαιο 5: EMC σχεδιασμός τυπωμένων κυκλωμάτων PCB | 75 |
| 5.1 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα πλακετών pcb..... | 75 |
| 5.2 Δομή και συστήματα γείωσης πλακετών..... | 77 |
| 5.3 EMC σε ψηφιακά κυκλώματα | 87 |
| 5.4 EMC σε αναλογικά κυκλώματα | 91 |
| Κεφάλαιο 6: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών EMI | 93 |

| | |
|---|-----|
| 6.1 Μετρήσεις EMI στο πεδίο του χρόνου | 93 |
| 6.2 Βασικές αρχές και πρότυπα μετρήσεων EMI | 94 |
| 6.3 Μετρήσεις EMI στο πεδίο της συχνότητας | 95 |
| 6.4 Σύγχρονα συστήματα μέτρησης ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στο πεδίο του χρόνου | 101 |
| 6.5 Τεχνικές ακύρωσης θορύβου περιβάλλοντος | 110 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 113 |

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα

1.1 Ιστορική αναδρομή

Το πεδίο μελέτης της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility), εμφανίστηκε πριν από έναν αιώνα περίπου από τότε που άρχισε η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων. Σύμφωνα με ιστορικά στοιχεία η έννοια της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής εμφανίστηκε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα όταν ο Marconi με χρήση διάταξης χάλκινων καλωδίων πραγματοποίησε την πρώτη υπερατλαντική μετάδοση. Αρχικά οι μόνοι δέκτες ήταν οι ραδιοφωνικοί, ο αριθμός τους ήταν μικρός και η απόσταση μεταξύ τους ήταν μεγάλη οπότε η αντιμετώπιση του προβλήματος της παρεμβολής ήταν σχετικά απλή. Οι κεραιές βρίσκονταν σε μια ακατέργαστη μορφή με αποτέλεσμα να είναι ευαίσθητες σε παρεμβολές είτε από εξωτερικές πηγές είτε από εσωτερικές αλλά με βελτιώσεις στην τεχνολογία σχεδίασης αντιμετώπισαν το πρόβλημα. Αργότερα οι ράδιο-παρεμβολές από ηλεκτρικό εξοπλισμό όπως ηλεκτρικές μηχανές, ηλεκτρικοί σιδηρόδρομοι άρχισαν να αποτελούν μεγαλύτερο το πρόβλημα της παρεμβολής. Μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο η χρήση των ηλεκτρικών συσκευών επιταχύνθηκε ραγδαία έτσι τα φαινόμενα παρεμβολών άρχισαν να αυξάνονται. Επίσης η εφεύρεση του διπολικού τρανζίστορ το 1950, του ολοκληρωμένου κυκλώματος το 1960 και των μικροεπεξεργαστών το 1970 έφερε σημαντική κλιμάκωση των φαινομένων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Σημαντικό γεγονός που οδήγησε στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα ήταν η εισαγωγή της ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων και υπολογισμού. Η τάση για αντικατάσταση της αναλογικής επεξεργασίας σήματος με την ψηφιακή άρχισε να επιταχύνεται και σχεδόν όλες οι ηλεκτρονικές λειτουργίες εφαρμόζονταν ψηφιακά με αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας των πηγών θορύβου σε φασματικό περιεχόμενο. Αυτό είχε ως συνέπεια την εμφάνιση όλο και περισσότερων προβλημάτων λόγω ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI). Λόγω της αυξανόμενης εμφάνισης παρεμβολών ψηφιακών συστημάτων με καλώδια και ράδιο-εκπομπές η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) στις Η.Π.Α δημοσίευσε ρυθμιστικό πλαίσιο το 1979 όπου καθόριζε συγκεκριμένα επιτρεπτά όρια ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών όλων των ψηφιακών συσκευών. Σκοπός του πλαισίου αυτού ήταν ο περιορισμός της “ηλεκτρομαγνητικής ρύπανσης” ώστε να αποφευχθεί και να μειωθεί ο αριθμός περιπτώσεων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Έτσι καμία συσκευή δεν μπορούσε να πουληθεί χωρίς να εφαρμόζει τις προϋποθέσεις που είχαν τεθεί από την

FCC και το θέμα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας προκάλεσε ιδιαίτερο ενδιαφέρον ανάμεσα στους κατασκευαστές εμπορικών ηλεκτρονικών συστημάτων. Αρκετές χώρες της Ευρώπης έθεσαν παρόμοιες απαιτήσεις στις συσκευές. Το 1933 η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) στο Παρίσι πρότεινε την δημιουργία της Διεθνούς Ειδικής Επιτροπής (ISC) σε ράδιο-παρεμβολές (CISPR) για την αντιμετώπιση του διαφαινόμενου προβλήματος των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI). Η επιτροπή συνέταξε ένα έγγραφο με λεπτομερή περιγραφή του εξοπλισμού την διαπίστωση πιθανών EMI εκπομπών. Το 1946 η CISPR συγκλήθηκε εκ νέου στο Λονδίνο. Μια επιπλέον πτυχή των ρυθμιστικών πλαισίων ήταν η εφαρμογή της απαίτησης ευαισθησίας. Ο εξοπλισμός θα πρέπει να λειτουργεί κανονικά σε παρεμβολές σημάτων ενώ συνυπάρχουν. Έτσι ένα ηλεκτρονικό σύστημα δεν αρκεί να είναι σύμφωνο με τις απαιτήσεις για τις εκπομπές του αλλά πρέπει να είναι ικανό να μην επηρεάζεται από άλλες εκπομπές άλλων συσκευών. Οι απαιτήσεις εκπομπών έχουν σκοπό τον περιορισμό της ηλεκτρονικής ρύπανσης, ενώ οι απαιτήσεις ευαισθησίας έχουν στόχο την εξασφάλιση της ηλεκτρομαγνητικά συμβατής λειτουργίας όλου του εξοπλισμού. Εάν ένα προϊόν δεν πληροί αυτές τις προϋποθέσεις των πλαισίων δεν μπορεί να πουληθεί στη συγκεκριμένη χώρα ακόμα και εάν οι πελάτες είναι διαθέσιμοι να το αγοράσουν.

1.2 Παραδείγματα προβλημάτων της EMC

Παρακάτω αναφέρονται κάποιες περιπτώσεις προβλημάτων της EMC από το πρόσφατο παρελθόν ώστε να κατανοηθούν τα είδη αυτών που συναντώνται στην πράξη. Ένα παράδειγμα είναι όταν μια διεθνής εταιρεία κατασκεύασε τηλέφωνα με κερματοδέκτες και είχε πουλήσει με επιτυχία συσκευές σε μια περιοχή. Όμως, διεισδύοντας σε μια καινούργια αγορά, βρέθηκε ότι η τοποθέτηση των τηλεφωνικών συσκευών σε κάποιες περιπτώσεις γινόταν σε μέρη όπως κορυφές ουρανοξυστών όπου αυτές βρισκόντουσαν στην έκθεση μικροκυματικής ακτινοβολίας από γειτονικά συστήματα επικοινωνιών. Σε αυτές τις περιπτώσεις η λειτουργία των τηλεφώνων ήταν κατώτερη των προδιαγραφών τους και αυτό οφειλόταν στο ότι βρισκόντουσαν να λειτουργούν σε ένα ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον για το οποίο δεν είχαν δοκιμαστεί.

Ένα ακόμη παράδειγμα υπήρξε πριν από μερικά χρόνια σε ένα χαλυβουργείο, όταν ένας τηλεχειριζόμενος γερανός που είχε δεχθεί πρόσφατα κάποιες τροποποιήσεις, άδειασε χωρίς κανείς να το περιμένει ένα φορτίο λειωμένου ατσαλιού πάνω σε κάποιους εργάτες, σκοτώνοντας έναν και τραυματίζοντας τους υπόλοιπους. Μετά από έρευνα που έγινε, έδειξε ότι σε κάποιες περιπτώσεις το νέο σύστημα ραδιοζεύξης δεχόταν παρεμβολές από τον αρχικό ελεγκτή που λειτουργούσε με διακόπτες, προκαλώντας έτσι το ατύχημα. Η μεταβολή των συνθηκών που προκάλεσε το μοιραίο ατύχημα αποδόθηκε σε κάποια περιστασιακή σκαλωσιά η οποία ενίσχυε το ράδιο-σήμα σε κάποιες περιοχές προκαλώντας έτσι το πρόβλημα.

Ένα τρίτο παράδειγμα υπήρξε στο χώρο των ηλεκτρονικών αυτοκίνησης, όπου τα όργανα απεικόνισης χρησιμοποιούν λογικά σήματα υψηλών συχνοτήτων έτσι η ανάλυση Fourier των εμπλεκόμενων επαναλαμβανόμενων κυματομορφών έδειξε ότι τα ρεύματα και οι τάσεις περιλαμβάνουν συνιστώσες μεγαλύτερες από τη δέκατη αρμονική με αξιοσημείωτα πλάτη ικανά για παρεμβολές στο ραδιόφωνο του αυτοκινήτου και στα συστήματα επικοινωνιών. Η προσεκτική προδιαγραφή της επιτρεπτής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι δύσκολη, επειδή αν το σύνθετο σύστημα θα προκαλέσει προβλήματα εξαρτάται από ένα πλήθος παραμέτρων, όπως τη θέση των κεραιών, τον ηλεκτρομαγνητικό σχεδιασμό του εσωτερικού και του εξωτερικού του αυτοκινήτου και την έξοδο θορύβου του οργάνου απεικόνισης. Αυτό κάνει ιδιαίτερα δύσκολο το ταίριασμα ενός οργάνου απεικόνισης σε πολλά διαφορετικά μοντέλα αυτοκινήτων, εάν οι προδιαγραφές εκπομπών του δεν είναι πολύ χαμηλές.

Παρακάτω αναφέρονται κάποιες από τις συνηθέστερες κατηγορίες οι οποίες αποτελούν έκταση των προβλημάτων και είναι σημερινά θέματα προς επίλυση:

(1) *Στρατιωτικά συστήματα*: Τα προβλήματα εδώ περιλαμβάνουν την προστασία έναντι των EMP και των ηλεκτρονικών αντίμετρων συμπεριλαμβανομένων της προτεινόμενης ανάπτυξης μικροκυματικών όπλων και της τεχνολογίας Stealth. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η μελέτη της συμπεριφοράς των συστοιχιών κεραιών των στρατιωτικών επικοινωνιών και των ραντάρ σε συνθήκες μάχης.

(2) *Ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις*: Στην περιοχή αυτή μεγάλο πρόβλημα παρουσιάζει η καταστροφή των μικροκυκλωμάτων (microchips) κατά τη διάρκεια της διακίνησης τους.

Επίσης, οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις στα αεροπλάνα και τα αυτοκίνητα αποτελούν πηγή επικίνδυνων προβλημάτων και πρέπει να αντιμετωπίζονται με το σωστό τρόπο.

(3) *Σηματοδοσία μέσω του δικτύου διανομής:* Η χρήση του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για τη μετάδοση RF σημάτων στην περιοχή 3-8.5 KHz και 40-150 KHz αυξάνεται συνεχώς και μαζί με αυτό και η πιθανότητα εμφάνισης κάθε συσχετιζόμενου προβλήματος παρεμβολής.

(4) *Διατάραξη του δικτύου διανομής*

(5) *Χρήση του φάσματος συχνοτήτων:* Η συνεχής αύξηση των νόμιμων και παράνομων χρηστών του περιορισμένου φάσματος ραδιοσυχνοτήτων οδηγεί σε πολλά προβλήματα RFI.

(6) *Κίνδυνοι ανάφλεξης και έκρηξης:* Οι εκπομπές των ράδιο-σταθμών μπορούν να αποτελέσουν αφορμή για επικίνδυνες καταστάσεις σε βιομηχανίες πετροχημικών και άλλων παρόμοιων βιομηχανικών εγκαταστάσεων (π.χ. ανεφοδιασμού αεροσκαφών) όπου ελευθερώνονται ή υπάρχουν εύφλεκτα αέρια. Μια πιθανή αιτία κινδύνου για το μέλλον αποτελούν οι χρήσεις των ράδιο-CB ειδικά εάν υπερβαίνουν τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής, σε πρατήρια βενζίνης και κοντά σε λατομεία όπου χρησιμοποιούνται ηλεκτρικοί πυροκροτητές σε επιχειρήσεις ανατινάξεων.

(7) *Κακή λειτουργία:* ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων ως αποτέλεσμα διαφόρων ειδών ηλεκτρικών παρεμβολών .

(8) *Ασφάλεια δεδομένων:* Στα μοντέρνα υπολογιστικά συστήματα η γρήγορη μεταφορά δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αρμονικών υψηλών συχνοτήτων, οι οποίες όταν εκπέμπονται είναι δυνατόν να ανιχνευτούν από μεγάλη απόσταση, θέτοντας σε κίνδυνο τα υποτιθέμενα ασφαλή συστήματα. Για παράδειγμα, δεν είναι δύσκολο να πιάσει κανείς την ακτινοβολία την προερχόμενη από τα κυκλώματα εικόνας μέσα σε μια απομακρυσμένη οθόνη, για να ανακαλύψει τι απεικονίζει.

Κεφάλαιο 2: Θόρυβος και ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα

2.1 Θόρυβος, είδη και πηγές

Θόρυβος (noise) ορίζεται κάθε ανεπιθύμητο ηλεκτρικό σήμα που υπάρχει μέσα σε ένα σύστημα πέραν του επιθυμητού σήματος, και παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά γνωρίσματα που βοηθάνε να αναγνωρίζεται η πηγή του. Κάθε σύστημα στο οποίο υπάρχουν ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία μεταβαλλόμενα με το χρόνο μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρική παρεμβολή. Εξαιρείται η παραμόρφωση που παράγεται στο σύστημα λόγω φαινομένων μη-γραμμικότητας, διότι παρόλο που είναι ανεπιθύμητο δεν θεωρείται θόρυβος εκτός και αν συζευχθεί με κάποιο άλλο κομμάτι του κυκλώματος του συστήματος. Γενικά οι πηγές θορύβου διακρίνονται σε δύο κύρια είδη, τις φυσικές και τις ανθρωπογενείς πηγές.

Φυσικές πηγές:

(1) Αστραπές-Κεραυνοί. Οι ηλεκτρικές εκφορτίσεις μεταξύ φορτισμένων σύννεφων και μεταξύ σύννεφων και εδάφους μπορούν να προκαλέσουν σε πολλές περιπτώσεις σοβαρή ηλεκτρική παρεμβολή. Έτσι, οι σχεδιαστές συσκευών θα πρέπει να έχουν πάντα στο νου τους ότι τα προϊόντα τους μπορεί να βρεθούν να λειτουργούν σε μέρη όπου οι θύελλες και καταιγίδες είναι πιο σφοδρές και συχνές από ότι στη χώρα τους. Το σχήμα της κυματομορφής, το σχετικό μέτρο και η συχνότητα των χτυπημάτων σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία είναι όλα από τη φύση τους στατιστικά μεγέθη με μεγάλες μεταβολές στις παραμέτρους τους. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος ο σχεδιασμός γίνεται συνήθως για κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο, (ας πούμε, στην πράξη μια φορά στα 20 χρόνια). Η πιθανότητα όμως να συμβούν πιο συχνά χτυπήματα παραμένει. Η προστασία των κτιρίων έναντι των κεραυνών γίνεται ως γνωστόν με τα αλεξικέραυνα, τα οποία όμως σπάνια προφυλάσσουν από ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα. Γενικά οι αστραπές και οι κεραυνοί έχουν ως αποτέλεσμα τριών ειδών ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές:

(α) Ένα απευθείας χτύπημα σε κάποιο αγωγό, όπως μια εναέρια γραμμή μεταφοράς ισχύος, θα προκαλέσει έναν πολύ μεγάλο παλμό σε όλο το σύστημα. Σ' αυτήν την περίπτωση είναι πολύ δύσκολη η προστασία των τμημάτων του συστήματος που βρίσκονται πολύ κοντά στο σημείο που έγινε το χτύπημα επειδή δημιουργούνται τάσεις

της τάξης των 100-200 kV σε σχέση με τη γη, ανάλογα με την ενεργή σύνθετη αντίσταση που παρουσιάζει το έδαφος (ωμική και επαγωγική). Τα ρεύματα επίσης που αναπτύσσονται στο έδαφος από πτώσεις κεραυνών, μπορούν να περάσουν μέσω σύζευξης σε οποιοδήποτε σύστημα καλωδίων που βρίσκεται στο έδαφος.

(β) Η παρουσία φορτισμένων σύννεφων μιας καταιγίδας συνοδεύεται πάντοτε από ένα ηλεκτρικό πεδίο της τάξης των 1-10 kV/m στο επίπεδο του εδάφους. Με τις αστραπές και τους κεραυνούς γίνεται η μερική ή πλήρης εκφόρτιση των σύννεφων και η συνεπαγόμενη μεταβολή του πεδίου επάγει μεταβατικά σήματα σε γειτονικούς αγωγούς. Αυτές οι μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου, εκτός του ότι προκαλούν παρεμβολές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την ανίχνευση επερχόμενων επικίνδυνων καταιγίδων.

(γ) Η απότομη μεταβολή του ρεύματος κατά μήκος του καναλιού εκφόρτισης έχει ως συνέπεια την εκπομπή ενός RF σήματος ευρείας ζώνης έως τα 50-100 MHz. Η ακτινοβολία αυτή αποτελεί την κύρια αιτία του ατμοσφαιρικού θορύβου αλλά χρησιμοποιείται επίσης και για την ανίχνευση και την παρακολούθηση των καταιγίδων. Επομένως οι αστραπές και οι κεραυνοί μπορούν να θεωρηθούν μια πηγή ευρείας ζώνης εν δυνάμει καταστροφική, η οποία έχει βρεθεί ότι μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην τηλεφωνία, στα συστήματα διανομής ισχύος, στα αεροπλάνα και στα δίκτυα υπολογιστών που βρίσκονται αναπτυγμένα σε περιοχές μεγάλης έκτασης.

(2) Πηγές ηλιακής και κοσμικής ακτινοβολίας. Οι αλλαγές στην ιονόσφαιρα που οφείλονται στη δραστηριότητα του ήλιου, μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στη διάδοση ραδιοκυμάτων, εξαιτίας των διακυμάνσεων της ιονοσφαιρικής ανάκλασης στην περιοχή συχνοτήτων 2-30 MHz και στις δορυφορικές επικοινωνίες λόγω της μεταβολής της ιονοσφαιρικής διάδοσης στα 150-500 MHz. Η ακτινοβολία από άλλες κοσμικές πηγές παράγει ένα RF υπόστρωμα θορύβου το οποίο είναι σημαντικό για την περιοχή των 100-1000 MHz.

Ανθρωπογενείς πηγές:

(1) Ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις (Electrostatic discharges, ESD). Κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο ενώ βρίσκονται σε επαφή (π.χ. ένα αέριο που κινείται

ως προς ένα στερεό ή ένα στερεό σε επαφή με ένα άλλο στερεό) συμβαίνει ανταλλαγή ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα τη φόρτιση των δύο υλικών με αντίθετα φορτία. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10-25 KV, με αποθηκευμένες ενέργειες μερικών mJ. Η εκφόρτιση αυτής της ενέργειας παράγει απότομους παλμούς ρεύματος οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους και να βλάψουν ηλεκτρικές συσκευές. Μερικά σοβαρά προβλήματα που έχουν προκληθεί τα τελευταία χρόνια από *ESD*, είναι οι:

- (α) εκρήξεις σε υπερδεξαμενόπλοια κατά τη διάρκεια καθαρισμού των δεξαμενών τους
- (β) ζημιές και καταστροφές μικροκυκλωμάτων κατά τη διάρκεια της διακίνησης τους
- (γ) εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας με καύσιμο των αεροσκαφών
- (δ) βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων.

Πολλές *EMC* προδιαγραφές περιλαμβάνουν δοκιμές σε *ESD*. Το μέγεθος ενός παλμού *ESD* είναι στατιστικό μέγεθος από τη φύση του και έτσι συνήθως καθορίζονται οι τυπικοί παλμοί και τα ρεύματα για τις δοκιμές.

2) EMP (ή μερικές φορές NEMP) είναι ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός που προκαλείται από πυρηνική έκρηξη. Αυτή η πηγή θορύβου παρουσιάζει βασικά ενδιαφέρον για τους σχεδιαστές στρατιωτικών συστημάτων, αλλά όπως θα φανεί σύντομα μπορεί να έχει επίσης σοβαρές επιπτώσεις και σε πολιτικές εφαρμογές, ακόμη και σε χώρες χωρίς πυρηνικές εγκαταστάσεις. Όταν συμβαίνει μια πυρηνική έκρηξη δημιουργείται ένας τεράστιος ηλεκτρομαγνητικός παλμός. Το μέγεθος του παλμού και η περιοχή που δέχεται τις επιπτώσεις παρουσιάζουν σοβαρό ενδιαφέρον μόνον για έξω-ατμοσφαιρικές εκρήξεις, όπως εκείνη τον Ιούλιο του 1962 από μια βόμβα 1.4 μεγατόνων περίπου 250 μίλια πάνω από το νησί Johnson, στον Ειρηνικό ωκεανό, σε μια πυρηνική δοκιμή με την επωνυμία Starfish, που έγινε ορατή σε απόσταση 3500 μιλίων μακριά, στην Αυστραλία.

Όταν μια συσκευή εκρήγνυται πέρα από την ατμόσφαιρα, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία των ακτινών -γ και -χ ταξιδεύει σε ευθεία διαδρομή μέχρι να συναντήσει την κορυφή της ατμόσφαιρας, όπου κατά την πρόσκρουση διεγείρονται ισχυρά ρεύματα, σε δύο διαφορετικές διευθύνσεις λόγω του ιονισμού. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια σχηματίζουν ρεύματα που κινούνται με την ταχύτητα του φωτός, τα οποία δημιουργούν μια εκτεταμένη

ράδιο-πηγή. Το μέτρο του παρατηρούμενου ηλεκτρομαγνητικού παλμού σε ένα συγκεκριμένο σημείο εξαρτάται σημαντικά από το ποσό των ακτινών γ και x που παράγονται από την έκρηξη, την απόσταση από το σημείο της έκρηξης, τη θερμοκρασία της έκρηξης και τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.

Η ράδιο-πηγή μπορεί να έχει διάμετρο μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα και να δημιουργεί ηλεκτρικά πεδία στην επιφάνεια της γης με ένταση μέχρι 50.000 V/m. Τέτοια ισχυρά πεδία μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές παρεμβολές με πολύ μεγάλα επαγόμενα ρεύματα σε εκτεθειμένους αγωγούς. Συστήματα όπως μεταφοράς ισχύος και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μπορούν να πάθουν μεγάλες ζημιές από τέτοια συμβάντα. Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα τέτοιο πεδίο δεν μπορεί να γίνει αισθητό σε όλη την περιοχή, αφού η απαιτούμενη ενέργεια θα ήταν τεράστια. Η έκταση μιας ράδιο-πηγής φτάνει πολλές εκατοντάδες χιλιόμετρα από το σημείο της έκρηξης με αποτέλεσμα περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση και δεν επηρεάζονται από το θερμικό ή το ωστικό κύμα, να δέχονται σοβαρό EMP. Γι' αυτό αμφότερες οι στρατιωτικές και οι πολιτικές αρχές πρέπει να συμπεριλάβουν την αντιμετώπιση EMP στα σχέδια τους. Μια σχετική περιοχή, αλλά με περιορισμένο ενδιαφέρον για τις πολιτικές εφαρμογές, είναι ο SGEMP (System Generated EMP) ο οποίος δημιουργείται από πυραύλους ή δορυφόρους που εκτίθενται στην πυκνή ακτινοβολία ακτινών- γ μιας πυρηνικής έκρηξης. Σ' αυτήν την περίπτωση η αλληλεπίδραση των ακτινών- γ με το περίβλημα των αντικειμένων αυτών μπορεί να δημιουργήσει στο εσωτερικό τους καταστάσεις παρόμοιες με EMP, δημιουργώντας προβλήματα στα ηλεκτρονικά τους εξαρτήματα.

(3) Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά υποσυστήματα. Αυτά αποτελούν τις περισσότερες διαδεδομένες πηγές παρεμβολής μέσα στο συνηθισμένο περιβάλλον. Μπορούν να ταξινομηθούν με σειρά σπουδαιότητας ανάλογα με την ηλεκτρομαγνητική ρύπανση που δημιουργούν γενικά στο περιβάλλον, αλλά κάτω από ειδικές συνθήκες κάθε συσκευή μπορεί να αποδειχθεί κρίσιμη. Μια τυπική ταξινόμηση δίνει την παρακάτω γενική σειρά:

(α) πηγές θορύβου αυτοκινήτων: σύστημα ανάφλεξης, εναλλάκτες, ηλεκτρικά μοτέρ,

(β) συστήματα διανομής ισχύος: γραμμές μεταφοράς, υποσταθμοί ΑΟ και ΟΟ, σταθμοί παραγωγής

(γ) βιομηχανικές εγκαταστάσεις: μηχανές συγκόλλησης, επαγωγικοί θερμαντήρες, μηχανήματα κοπής, μικροκυματικοί θερμαντήρες, γερανοί, μεταβλητής ταχύτητας οδηγοί που χρησιμοποιούν αντιστροφείς κίνησης με διαμορφωμένους κατά πλάτος παλμούς, τοπικοί ταλαντωτές, ψηφιακές συσκευές συμπεριλαμβανομένων και των υπολογιστών.

Μέσα σε ένα τμήμα μιας συσκευής, η πραγματική πηγή μεταβατικών τάσης και ρεύματος μπορεί να οφείλεται γενικά σε τρεις πηγές:

- σε ακολουθίες παλμών υψηλής συχνότητας στα ψηφιακά συστήματα,
- σε κυκλώματα ταλαντωτών υψηλών συχνοτήτων
- σε μεταβατικές καταστάσεις κυκλωμάτων που προκαλούνται από απλές λειτουργίες διακοπών.

(4) Μεταβολές της τάσης του δικτύου διανομής. Οι μεταβολές αυτές προκαλούνται από τη φύση του δικτύου, το σύστημα διανομής και τις οποιεσδήποτε συσκευές που είναι συνδεδεμένες, μπορούν δε να υποδιαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

(α) Μεταβολές χαμηλής συχνότητας. Η τάση ενός τροφοδοτικού ισχύος πάντα παρουσιάζει μια πτώση όταν συνδέονται φορτία με μη μηδενική αντίσταση. Αν και το δημόσιο δίκτυο είναι σχεδιασμένο να ελαχιστοποιεί το φαινόμενο αυτό, μικρές μεταβολές είναι δύσκολο να αποφευχθούν (για το σύστημα της Μεγάλης Βρετανίας επιτρέπονται μεταβολές της τάξης του $\pm 6\%$). Επειδή μέσα σε μια εγκατάσταση μπορούν να συμβαίνουν και άλλες πτώσεις τάσης, ένας σχεδιαστής θα πρέπει να θεωρήσει ότι αυξομειώσεις της τάξης του $\pm 10\%$ είναι πολύ πιθανές για περιόδους μερικών ωρών. Εάν τα φορτία μεταβάλλονται πιο γρήγορα, τότε προφανώς οι διακυμάνσεις της τάσης αυξάνουν επίσης σε συχνότητα. Όποτε συμβαίνει ένα μεγάλο σφάλμα, εμφανίζεται μια απότομη βηματική τάση πριν γίνουν οι απαραίτητες διορθωτικές διακοπές. Παραμορφώσεις της κυματομορφής ενός καθαρού ημιτονοειδούς κύματος μπορούν επίσης να συμβούν λόγω συνήθως μη γραμμικών φορτίων. Οι τυπικοί κανόνες σχεδιασμού για οικιακές συσκευές επιτρέπουν αρμονική παραμόρφωση μέχρι 6% ενώ οι βιομηχανικοί χρήστες θα πρέπει να αναμένουν τιμές μέχρι 10% . Τα μεταβαλλόμενα φορτία στα τριφασικά συστήματα μπορούν να οδηγήσουν σε ασυμμετρίες προκαλώντας προβλήματα σε τριφασικούς κινητήρες, κτλ.

(β) Μεταβολές υψηλής συχνότητας. Κάθε διαδικασία ανοίγματος ή κλεισίματος διακοπών σε ένα σύστημα ισχύος οδηγεί στη δημιουργία γρήγορων μεταβατικών. Αν και δεν είναι δυνατόν να δοθεί μια ακριβής σχέση μεταξύ του μέγιστου πλάτους και της συχνότητας εμφάνισης, έχει βρεθεί ότι αιχμές με διπλάσιο από το μέγιστο πλάτος είναι δέκα φορές περίπου λιγότερο συχνές από αιχμές μικρότερου πλάτους.

Είναι προφανές ότι θεωρείται αναμενόμενη για το δίκτυο διανομής των 220 V μια αιχμή τάσης με τιμή μεταξύ 1 και 6 kV, μια φορά το χρόνο. Τέλος, επειδή τα καλώδια του δικτύου παροχής μπορούν να συμπεριφέρονται ως κεραίες, μπορούν να συλλέγουν RF σήματα καθώς και να αποτελούν το μέσο μετάδοσης για τη σηματοδότηση του δικτύου.

(5) Ασύρματοι πομποί. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χρησιμοποιείται εκτεταμένα για τηλεπικοινωνίες και γι' αυτό το περιβάλλον ακτινοβολίας υποβάθρου πρέπει να συμπεριλαμβάνει όλους αυτούς τους χρήστες, νόμιμους και μη. Ένας πλήρης κατάλογος των διαφόρων διαθέσιμων συχνοτήτων στη Μεγάλη Βρετανία υπάρχει σε μια πρόσφατη δημοσίευση του IEEE ενώ υπάρχουν παρόμοιες, αλλά όχι απαραίτητα ίδιες διαθέσεις συχνοτήτων και σε άλλα κράτη. Είναι σημαντικό να γίνει αντιληπτό ότι όλο το φάσμα είναι συνωστισμένο από χρήστες και η υπέρβαση έξω από την επιτρεπόμενη περιοχή συχνοτήτων μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες. Οι σχεδιαστές μηχανημάτων θα πρέπει να θυμούνται ότι η παρεμβολή από τις παραπάνω πηγές μπορεί να είναι ιδιαίτερα σοβαρή κοντά στους πομπούς.

2.2 Ορισμοί και έννοιες ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC)

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) αποτελεί ένα πεδίο μελέτης του πώς εφαρμόζεται η βασική φυσική σε σύνθετα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα, με σκοπό τη δυνατότητα αυτών να συνυπάρχουν αρμονικά χωρίς να υπάρχουν προβλήματα στην λειτουργία τους. Εάν επιτυγχάνεται αυτό, τότε τα συστήματα θεωρείται ότι εκτελούν τις λειτουργίες τους με ικανοποιητικό τρόπο και λέμε ότι είναι ηλεκτρομαγνητικά συμβατά. Παρακάτω αναφέρονται απαραίτητοι ορισμοί και έννοιες για την κατανόηση της EMC.

Αρχικά ο όρος παρεμβολή (interference) που αργότερα αντικαταστάθηκε από τον όρο διαταραχή (disturbance) χρησιμοποιείται για να περιγράψει φαινόμενα που προκαλούν

επιδείνωση και χειροτέρευση της λειτουργίας όπως είναι ο θόρυβος και τα ανεπιθύμητα σήματα.

Ηλεκτρομαγνητική Διαταραχή (Electromagnetic Interference) είναι κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πτώση της απόδοσης μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος, ή να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωνική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή μπορεί να είναι θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μια μεταβολή αυτού καθεαυτού του μέσου διάδοσης.

RFI (Radio-Frequency Interference), σημαίνει παρεμβολή ράδιο-συχνότητας και ορίζεται ως η χειροτέρευση της λήψης ενός επιθυμητού σήματος εξαιτίας της διαταραχής από μια άλλη ράδιο-συχνότητα. Επίσης είναι η ηλεκτρομαγνητική διαταραχή που έχει συνιστώσες στη ζώνη των ράδιο-συχνοτήτων.

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η διάδοση στο χώρο ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η οποία συνεχίζει να διαδίδεται και μετά τον τερματισμό της λειτουργίας της αρχικής πηγής. Κατ' επέκταση ο όρος "ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία" χρησιμοποιείται συχνά για να καλύψει φαινόμενα αντίδρασης μεταξύ πολύ κοντά τοποθετημένων κυκλωμάτων εξαιτίας των παραγομένων από ρεύματα και φορτία μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων, που συνήθως περιγράφονται με τις έννοιες της αυτεπαγωγής και της χωρητικότητας.

Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή EMI (Electromagnetic Interference) είναι η οποιαδήποτε ηλεκτρομαγνητική διαταραχή που διακόπτει, παρακωλύει ή με άλλο τρόπο υποβαθμίζει ή περιορίζει την αποτελεσματική απόδοση των ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συσκευών. Μπορεί να επάγεται σκόπιμα, όπως σε ορισμένες μορφές ηλεκτρονικού πολέμου ή ακούσια, ως αποτέλεσμα των παρασιτικών εκπομπών και αποκρίσεων, προϊόντων αλληλοδιαμόρφωσης κτλ.

Η EMI προκαλείται όταν εμφανίζονται ανεπιθύμητες τάσεις ή ρεύματα, με αποτέλεσμα να υπάρχει δυσμενή επίδραση στην απόδοση μιας ηλεκτρικής συσκευής ή ηλεκτρονικού συστήματος. Αυτές οι τάσεις/ρεύματα παρουσιάζονται στο κύκλωμα ή συσκευή, μέσω αγωγιμότητας ή μη ιονίζουσας ακτινοβολίας. Σε όλες τις περιπτώσεις, η EMI συμβαίνει εξαιτίας ενός συνδυασμού τριών παραγόντων:

α. Μίας πηγής.

β. Μίας διαδρομής μετάδοσης.

γ. Μίας απόκρισης (τουλάχιστον μία απόκριση δεν είναι σχεδιασμένη). Ο έλεγχος EMI αναφέρεται στη διαδικασία της πραγματοποίησης αλλαγών στο σχεδιασμό ή προσαρμογών των επιπέδων σήματος ή θορύβου με σκοπό να επιτευχθεί η EMC.

Οι σχεδιαστές δεν προγραμματίζουν και σχεδιάζουν τον εξοπλισμό τους με την πρόθεση να είναι πηγές παρεμβολών. Ωστόσο, ένα επιθυμητό σήμα σε μία διαδρομή μετατρέπεται ακούσια σε ένα ανεπιθύμητο σήμα (θόρυβος) σε μια ακούσια σύζευξη. Πηγές παρεμβολών μπορεί να θεωρηθούν η εκκένωση ηλεκτρικού τόξου, η ακτινοβολία από κεραυνό, η εκκένωση κορώνας από γραμμές μεταφοράς ενέργειας ή ο θόρυβος που προκαλείται από μια ξαφνική αλλαγή στη ροή ρεύματος σε αγωγό, η παρενόχληση γειτονικού καναλιού, οι αρμονικές και τα παρασιτικά σήματα, η αλληλοδιαμόρφωση, η υψηλή ισχύς, ο θόρυβος κτλ.

Οι λειτουργικές παρεμβολές συχνά περιλαμβάνουν ημιτονοειδή κύματα, παλμούς ρολογιού του υπολογιστή, ηλεκτρομαγνητικά κύματα ομιλίας ή βίντεο, ή παλμοί που αποτελούν σειρές δεδομένων, καθώς και ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός (EMP) που ακολουθεί μια πυρηνική έκρηξη.

Η EMI αρχίζει πάντα με ροή ρεύματος μέσω ενός αγωγού και επίσης εμφανίζεται επάνω στον εξοπλισμό θύμα με τη μορφή ενός ρεύματος ή τάσης. Η διαδρομή ζεύξης (συμπεριλαμβανομένου ενός αγωγίμο αερίου ή αέρα) μπορεί να είναι μία διαδρομή αγωγιμότητας ή ακτινοβολίας. Οι πραγματικές διαδρομές μπορούν να περιλαμβάνουν κοινή καλωδίωση, χωρητικότητα μεταξύ των συσκευών, αμοιβαία επαγωγή μεταξύ γειτονικών καλωδιώσεων, μη ιονίζουσα ακτινοβολία ή καλώδια σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αυτό το είδος της συνδέσεως υποβοηθείται από το γεγονός ότι όλοι οι αγωγοί παρουσιάζουν αντίσταση και αυτεπαγωγή.

Ο κυριότερος λόγος που εμφανίζονται προβλήματα EMI είναι η αδυναμία/αποτυχία να:

α. Καθορισθούν επαρκώς τα περιβάλλοντα.

β. Αξιολογηθούν οι EMI επιπτώσεις στις βασικές παραμέτρους απόδοσης του συστήματος.

Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) (electromagnetic compatibility): είναι η ικανότητα μιας διάταξης συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε σε αυτό το περιβάλλον.

Ηλεκτρομαγνητικά συμβατό σύστημα χαρακτηρίζεται αυτό που:

- Δεν προκαλεί παρεμβολές με κάποιο άλλο σύστημα.
- Δεν είναι ευαίσθητο στις εκπομπές άλλων συστημάτων.
- Δεν προκαλεί παρεμβολές με τον εαυτό του (ακεραιότητα σήματος) .

Γύρω από κάθε ηλεκτρική ή ηλεκτρονική διάταξη, συσκευή ή σύστημα, διαπιστώνεται η παρουσία ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων που διαδίδονται με αγωγιμότητα ή ακτινοβολία. Για να είναι επομένως οι διατάξεις, συσκευές ή συστήματα ηλεκτρομαγνητικά συμβατά, πρέπει να λειτουργούν σύμφωνα με τις προ-διαγραφές τους στο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον που βρίσκονται και ταυτόχρονα να μην δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές στις υπόλοιπες διατάξεις, συσκευές ή συστήματα που βρίσκονται στο ίδιο περιβάλλον.

Οι κυριότεροι λόγοι που η EMC έχει γίνει μια σημαντική πτυχή του σχεδιασμού της ηλεκτρονικής συσκευής και εξοπλισμού είναι:

α. Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός και οι συσκευές γίνονται όλο και πιο παραγωγικοί συντελεστές του σύγχρονου περιβάλλοντος.

β. Οι τωρινές και οι μελλοντικές ηλεκτρονικές συσκευές θα λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες και θα χρησιμοποιούν υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων.

γ. Οι τωρινές και μελλοντικές ηλεκτρονικές συσκευές θα χρησιμοποιούν χαμηλότερες τάσεις που μειώνουν την κατανάλωση ρεύματος και καταστούν τον εξοπλισμό πιο ευάλωτο στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI).

δ. Τα περισσότερα σήματα δεδομένων και οι συνδέσεις δεδομένων σήμερα είναι ψηφιακά και σχεδιάζονται ώστε να περιλαμβάνουν όσο το δυνατόν περισσότερα κανάλια, χρησιμοποιώντας το εύρος ζώνης και περιορισμένο φάσμα.

Για τον ακριβή προσδιορισμό της EMC το IEEE έχει εισάγει για χρήση στα έντυπα της EMC και άλλους ορισμούς, που συναντώνται συχνά στη βιβλιογραφία καθώς και προδιαγραφές, κάποιες από τις οποίες είναι οι εξής:

- Ηλεκτρομαγνητική επιδεκτικότητα (Electromagnetic susceptibility) είναι η αδυναμία μιας διάταξης, συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητας της/του κάτω από την παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής. Δηλαδή επιδεκτικότητα είναι η έλλειψη ανοσίας.
- Ανοσία ή Ατρωσία (Immunity) σε μια διαταραχή είναι η ικανότητα μιας διάταξης, συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητας της/του με την παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής.
- Ηλεκτρομαγνητική Στάθμη Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Level) είναι η καθορισμένη μέγιστη στάθμη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που αναμένεται να εφαρμοστεί σε μια διάταξη, συσκευή ή σύστημα που λειτουργεί σε συγκεκριμένες συνθήκες.
- Στάθμη Ανοσίας (Immunity margin) είναι η μέγιστη στάθμη μιας δεδομένης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που συμβαίνει σε μια συγκεκριμένη διάταξη, συσκευή ή σύστημα για την οποία αυτό παραμένει ικανό να λειτουργήσει στον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.
- Όριο Ανοσίας (Immunity level) είναι η καθορισμένη στάθμη ανοσίας.
- Περιθώριο Ανοσίας (Immunity Margin) είναι η διαφορά μεταξύ του ορίου ανοσίας μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος και της στάθμης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.
- Περιθώριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Margin): είναι ο λόγος της στάθμης ανοσίας μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος ως προς μια στάθμη διαταραχής αναφοράς.

Κεφάλαιο 3: Γείωση

3.1 Ορισμός και κατηγορίες γείωσης

Γείωση είναι η σύνδεση ενός συστήματος με τη γη, η οποία θεωρείται ότι έχει δυναμικό μηδέν. Έτσι η γείωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς όταν ένας θέλει να αναφερθεί στο δυναμικό κάποιου σημείου του συστήματος.

Γενικά ως γείωση δεν θεωρείται μόνο η σύνδεση με τη Γη, αλλά οποιοδήποτε σημείο έχει δυναμικό ίσο με μηδέν. Η σύνδεση με τη Γη είναι απαραίτητη, διότι παρέχει μια διέξοδο χαμηλής αντίστασης για τα ρεύματα που πιθανόν να δημιουργηθούν στο σύστημα. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό, επειδή ανεπιθύμητες εξάρσεις στα ρεύματα αυτά μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα σε κυκλώματα, να προκαλέσουν σπινθήρες με κίνδυνο πυρκαγιάς, να προκαλέσουν ακόμη και ηλεκτροπληξία. Επιπλέον οι εξάρσεις στα ρεύματα προκαλούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία μπορεί να προκαλέσει παρεμβολή σε κάποιο άλλο κύκλωμα. Έτσι λοιπόν η σωστή μελέτη της γείωσης είναι σημαντικό θέμα και καθιστά απαραίτητη.

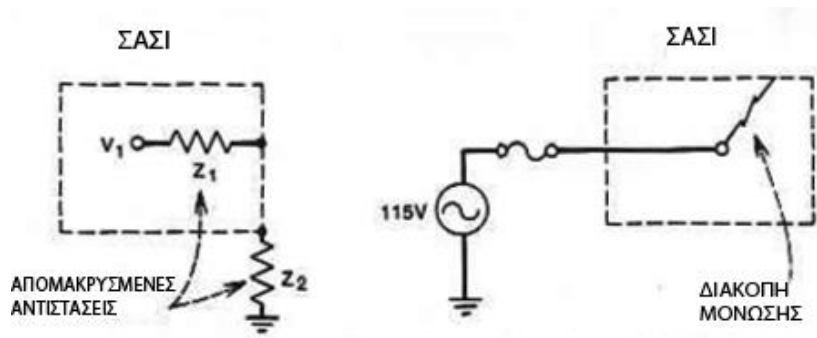
Η γείωση είναι μια από τις κύριες μεθόδους ελαχιστοποίησης των ανεπιθύμητων θορύβων. Η ορθή χρήση γείωσης και καλωδίωσης, σε συνδυασμό, μπορεί να λύσει ένα μεγάλο ποσοστό του συνόλου των προβλημάτων θορύβου. Ένα καλό σύστημα γείωσης πρέπει να είναι σχεδιασμένο, είναι ανώφελο να αναμένεται ένα σύστημα γείωσης να εκτελείται καλά, αν δεν έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία κατά τον σχεδιασμό του. Ένα πλεονέκτημα ενός καλά σχεδιασμένου συστήματος γείωσης είναι ότι μπορεί να παρέχει προστασία έναντι ανεπιθύμητων παρεμβολών και εκπομπών, χωρίς επιπλέον κόστος ανά μονάδα προϊόντος. Το μόνο κόστος είναι ο χρόνος που απαιτείται για το σχεδιασμό του συστήματος. Σε σύγκριση, το λάθος σχεδιασμένο σύστημα γείωσης μπορεί να αποτελεί πρωταρχική πηγή των παρεμβολών και της εκπομπής και ως εκ τούτου απαιτεί σημαντικό χρόνο μηχανικής για να εξαλείψει το πρόβλημα. Ως εκ τούτου, τα κατάλληλα σχεδιασμένα συστήματα γείωσης είναι πραγματικά αποδοτικά. Οι γειώσεις χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: 1) Γειώσεις ασφάλειας και 2) Γειώσεις λειτουργίας. Εάν η γείωση είναι συνδεδεμένη με τη γη μέσω ενός μονοπατιού χαμηλής σύνθετης αντίστασης, μπορεί να ονομάζεται γείωση. Οι γειώσεις ασφαλείας είναι συνήθως στο δυναμικό της γης. Σε πολλές περιπτώσεις, μια γείωση ασφαλείας απαιτείται σε ένα σημείο που είναι

ακατάλληλη για μια γείωση σήματος, και αυτό μπορεί να περιπλέξει το πρόβλημα του θορύβου.

Γειώσεις ασφαλείας

Τα ζητήματα ασφάλειας απαιτούν το σασί ή το περίβλημα του ηλεκτρικού εξοπλισμού για να γειωθεί. Γιατί συμβαίνει αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.1. Στο σχήμα αριστερά η Z1 είναι η απομονωμένη αντίσταση μεταξύ ενός σημείου στο δυναμικό V1 και στο σασί και η Z2 είναι η απομονωμένη αντίσταση μεταξύ σασί και της γείωσης. Το δυναμικό στο σασί καθορίζεται από τις σύνθετες αντιστάσεις Z1 και Z2 ενεργώντας ως διαιρέτης τάσης. Το δυναμικό του σασί είναι :

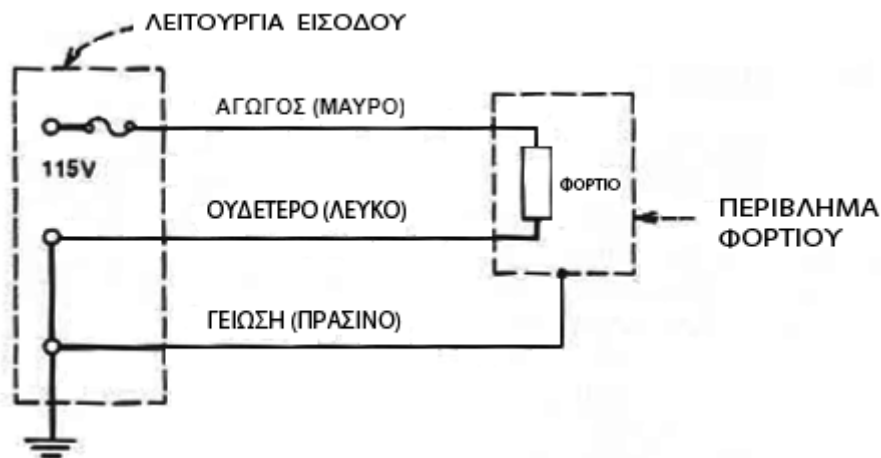
$$V_{chassis} = \left(\frac{z}{z_1 + z_2} \right) \cdot V1 \quad (3.1)$$



Σχήμα 3.1 Το σασί πρέπει να είναι γειωμένο για ασφάλεια. Διαφορετικά, μπορεί να φθάσει σε ένα επικίνδυνο επίπεδο τάσης μέσω των αντιστάσεων (αριστερά) ή μια βλάβη μόνωσης (δεξιά).

Το σασί θα μπορούσε να έχει ένα σχετικά υψηλό δυναμικό και να αποτελεί κίνδυνο ηλεκτροπληξίας, καθώς το δυναμικό της καθορίζεται από τις σχετικές τιμές των απομονωμένων σύνθετων αντιστάσεων στις οποίες δεν υπάρχει πολύ έλεγχος ,εάν ωστόσο το πλαίσιο είναι γειωμένο, το δυναμικό της είναι μηδέν μέχρι η Z2 να γίνει μηδέν. Στο σχήμα 3.1 στην δεξιά πλευρά του δείχνει μια δεύτερη και πολύ πιο επικίνδυνη κατάσταση, μια συγχωνευμένη γραμμή AC εισέρχεται σε μια περίφραξη .Εάν θα πρέπει να υπάρχει μια βλάβη μόνωσης έτσι ώστε η γραμμή AC να έρχεται σε επαφή με το σασί, το σασί θα είναι τότε σε θέση να παρέχει όλη τη χωρητικότητα του ρεύματος του

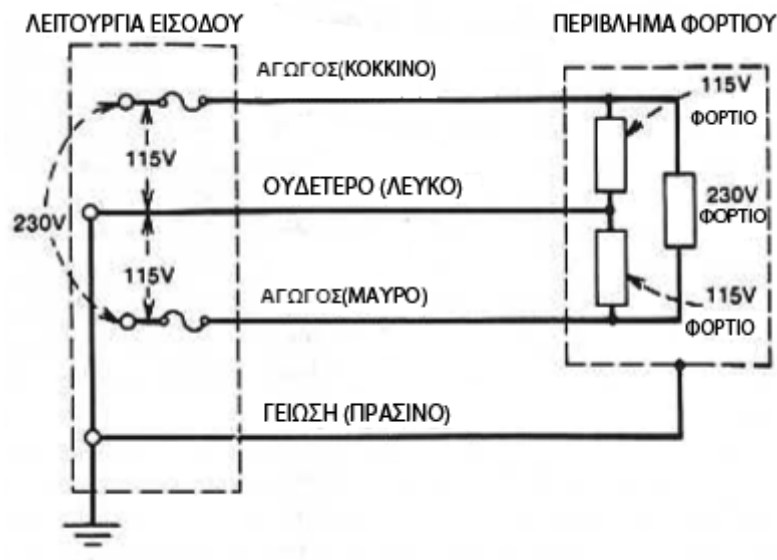
συγχωνευμένου κυκλώματος. Οτιδήποτε έρχεται σε επαφή με το σασί και τη γείωση θα συνδέεται άμεσα απέναντι από τη γραμμή του εναλλασσόμενου ρεύματος. Αν ωστόσο το σασί είναι γειωμένο, μια τέτοια μόνωση θα έλκει ένα μεγάλο ρεύμα από τη γραμμή εναλλασσόμενου ρεύματος και θα προκαλέσει την ασφάλεια να καεί, απομακρύνοντας έτσι την τάση από το σασί. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, τα πρότυπα διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος και καλωδίωσης περιέχονται στο Εθνικό Ηλεκτρικό Κώδικα. Μία απαίτηση του κώδικα αυτού διευκρινίζει ότι η διανομή εναλλασσόμενου ρεύματος 115-V σε σπίτια και κτίρια πρέπει να είναι ένα σύστημα τριών καλωδίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Ένα φορτίο ρεύματος ρέει διαμέσου του αγωγού (μαύρο), το οποίο συγχωνεύεται και επιστρέφει μέσω του ουδέτερου καλωδίου (λευκό). Επιπλέον, ένα καλώδιο γείωσης ασφαλείας (πράσινο) πρέπει να συνδέεται με όλα τα περιβλήματα εξοπλισμού και υλικού. Η μοναδική φορά που το πράσινο καλώδιο μεταφέρει ρεύμα είναι κατά τη διάρκεια μιας βλάβης, και έπειτα μόνο στιγμιαία μέχρι την ασφάλεια ή τον διακόπτη που ανοίγει το κύκλωμα. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει φορτίο ρεύματος ρέει στο δυναμικό γείωσης ασφαλείας



Σχήμα 3.2 Πρότυπο κύκλωμα διανομής ρεύματος 115V AC με τρία καλώδια.

Ο Εθνικός Ηλεκτρικός Κώδικας ορίζει ότι το ουδέτερο καλώδιο και η ασφάλεια γείωσης θα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους σε ένα μόνο σημείο, και αυτό το σημείο πρέπει να είναι η κύρια είσοδος. Το αντίθετο θα επιτρέψει σε μέρος του ουδέτερου ρεύματος να επιστρέφει στον αγωγό γείωσης. Ένα σύστημα συνδυασμού 115 / 230 V είναι παρόμοιο, εκτός από ένα επιπλέον καλώδιο αγωγού (κόκκινο) που προστίθεται όπως φαίνεται στο

σχήμα 3.3. Εάν το φορτίο απαιτεί μόνο 230 V το ουδέτερο (λευκό) καλώδιο που φαίνεται δεν απαιτείται.



Σχήμα 3.3 Συνδυασμός κυκλώματος διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος 115/230-V με τέσσερις καλώδια.

Γειώσεις λειτουργίας

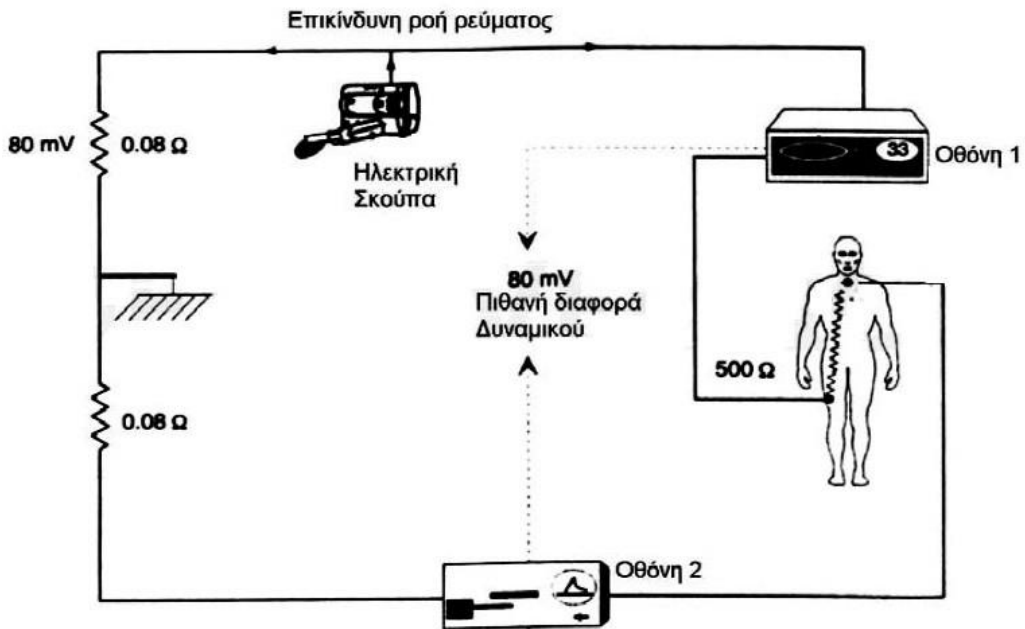
Μια γείωση συνήθως ορίζεται ως ένα ισοδυναμικό σημείο ή επίπεδο που χρησιμεύει ως μια αναφορά δυναμικού για ένα κύκλωμα ή σύστημα. Ο ορισμός αυτός, ωστόσο, δεν αντιπροσωπεύει τα πρακτικά συστήματα γείωσης επειδή δεν είναι ισοδυναμικά. Επίσης, δεν τονίζουν τη σημασία της πραγματικής διαδρομής που έλαβε το ρεύμα επιστροφής στην πηγή. Είναι σημαντικό για το σχεδιαστή να γνωρίζει την πραγματική διαδρομή ρεύματος, προκειμένου να προσδιοριστεί η ακτινοβολούμενη εκπομπή ή η ευαισθησία ενός κυκλώματος. Για να κατανοήσουμε τους περιορισμούς και τα προβλήματα του «πραγματικού κόσμου» συστημάτων γείωσης, θα ήταν καλύτερο να χρησιμοποιήσουμε έναν ορισμό πιο αντιπροσωπευτικό της πραγματικής κατάστασης. Ως εκ τούτου, ένας καλύτερος ορισμός για μια γείωση λειτουργίας είναι μια διαδρομή ρεύματος χαμηλής αντίστασης για να επιστρέψει στην πηγή. Αυτή η έννοια ρεύματος της γείωσης τονίζει τη σημασία της ροής του ρεύματος. Συνεπάγεται ότι, δεδομένου ότι το ρεύμα ρέει μέσα από κάποια πεπερασμένη αντίσταση, θα υπάρχει μια διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο φυσικά

διαχωρισμένων σημείων. Η ισοδυναμική έννοια αυτή ορίζει τι θα πρέπει να είναι ιδανική γείωση, ενώ η έννοια ρεύματος ορίζει τι πραγματικά είναι μια γείωση. Η πραγματική διαδρομή που λαμβάνεται από την γείωση ρεύματος είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της μαγνητικής σύζευξης μεταξύ των κυκλωμάτων. Η μαγνητική ή επαγωγική σύζευξη είναι ανάλογη με την περιοχή βρόχου. Αλλά τι είναι η περιοχή βρόχου του συστήματος που περιέχει πολλαπλές διαδρομές γείωσης; Η περιοχή είναι το συνολικό εμβαδόν που περικλείεται από την πραγματική ροή του ρεύματος. Μία σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό αυτής της περιοχής είναι η διαδρομή γείωσης που λαμβάνεται από το ρεύμα επιστροφής στην πηγή. Συχνά αυτό δεν είναι η διαδρομή που προορίζεται από τον σχεδιαστή. Κατά το σχεδιασμό της γείωσης είναι σημαντικό να ρωτήσετε: Πώς είναι η ροή του ρεύματος; Η πορεία που ακολούθησε η γείωση ρεύματος πρέπει να προσδιορίζεται. Στη συνέχεια, αφού κάθε αγωγός που μεταφέρει ρεύμα θα έχει μια πτώση τάσης, πρέπει να θεωρηθεί το αποτέλεσμα αυτής της πτώσης τάσης σχετικά με την απόδοση των άλλων κυκλωμάτων που συνδέονται με την γείωση. Το κατάλληλο σύστημα γείωσης λειτουργίας προσδιορίζεται από τον τύπο του κυκλώματος, την συχνότητα λειτουργίας, το μέγεθος του συστήματος, και άλλους περιορισμούς, όπως η ασφάλεια. Κανένα σύστημα γείωσης δεν είναι κατάλληλο για όλες τις εφαρμογές. Οι γειώσεις λειτουργίας συνήθως εμπίπτουν σε μία από τις τρεις κατηγορίες: 1) Γείωση ενός σημείου 2) Γείωση πολλών σημείων και 3) τις υβριδικές γειώσεις. Υπάρχουν δύο υποκατηγορίες γειώσεων μονού σημείου: Αυτές που οι συνδέσεις τους είναι σε σειρά και αυτές με παράλληλες συνδέσεις.

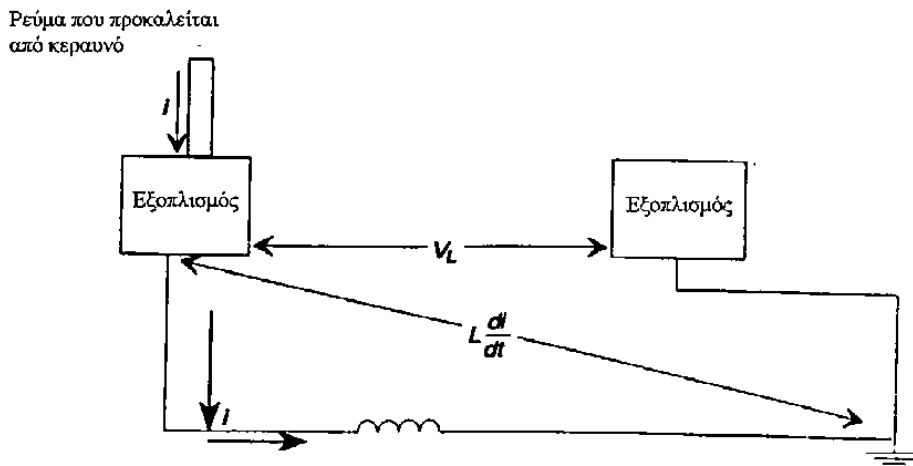
Περιπτώσεις λανθασμένης γείωσης

Τα αποτελέσματα της διαρροής του ρεύματος είναι ποικίλα και εξαρτώνται κυρίως από την ένταση και τη συχνότητά του (σε εναλλασσόμενο). Γενικά, η εξάρτηση της συχνότητας σχετίζεται με το επιδερμικό φαινόμενο. Για υψηλές συχνότητες, το ρεύμα δεν μπορεί να διαδοθεί σε μεγάλο βάθος και έτσι δεν προκαλεί μεγάλη ζημιά. Στα παρακάτω σχήματα παριστάνονται δυο παραδείγματα λανθασμένης γείωσης. Στην πρώτη περίπτωση (σχήμα 3.4) η ηλεκτρική σκούπα έχει κάποιο πρόβλημα και προκαλεί στο κύκλωμα ροή ρεύματος που διέρχεται από τον άνθρωπο με πιθανά θανατηφόρα αποτελέσματα. Στη δεύτερη περίπτωση (σχήμα 3.5) υπάρχει ανομοιομορφία στο σημείο

που βρίσκεται η γείωση. Έτσι το δυναμικό αναφοράς (η γείωση) δεν είναι το ίδιο και για τις δυο επιμέρους συσκευές και το ρεύμα που προέρχεται από έναν κεραυνό δε διοχετεύεται αποτελεσματικά στη Γη.



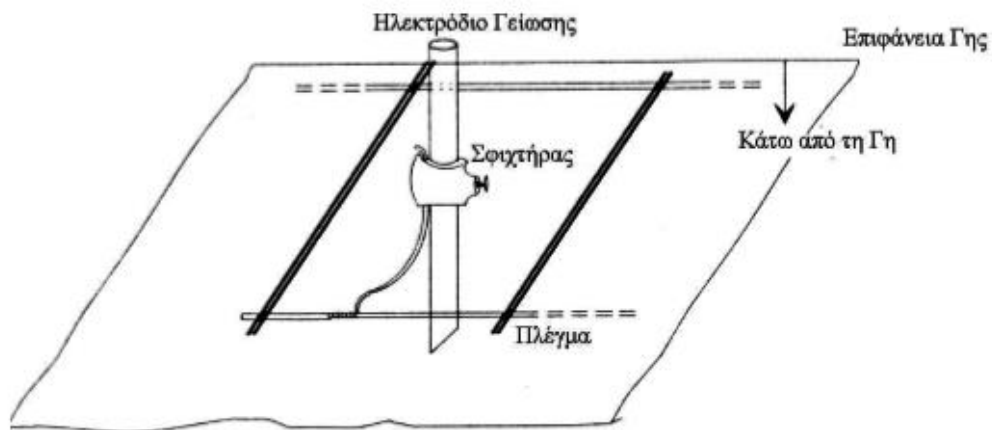
Σχήμα 3.4 Επικίνδυνη ροή ρεύματος μέσα από τον ασθενή εξαιτίας κακής γείωσης



Σχήμα 3.5 Ροή ρεύματος από κεραυνό , εξαιτίας κακής γείωσης

Εμπέδηση γης

Τα φαινόμενα, που παρουσιάστηκαν παραπάνω, δεν θα υπήρχαν αν η γείωση ήταν ιδανική, δηλαδή παρείχε στα ρεύματα μηδενική αντίσταση. Στην πράξη, μια καλή προσέγγιση μηδενικής αντίστασης είναι μια μεγάλη επιφάνεια από έναν καλό αγωγό κάτω από το έδαφος. Έτσι, τα ανεπιθύμητα φορτία μπορούν να διοχετεύονται επαρκώς στη Γη. Όμως αυτή η μέθοδος είναι πολυέξοδη και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη. Κάποιες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην πράξη θα αναπτυχθούν παρακάτω.



Σχήμα 3.6. Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο γείωσης και υπόγειο αγωγίμο πλέγμα.

Η καλύτερη προσέγγιση του προαναφερθέντος υπόγειου επιπέδου, είναι η χρήση ενός πλέγματος από αγωγούς, που θα καλύπτουν αρκετά μεγάλη επιφάνεια κάτω από τη Γη (σχήμα 3.6). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή των υλικών των αγωγών καθώς και στο πάχος τους. Πρέπει οι αγωγοί να αντέχουν σε μεγάλες θερμοκρασίες, που πιθανόν να αναπτυχθούν σε εξαιρετικές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα κατά την πτώση ενός κεραυνού. Η αντίσταση ενός μέσου, γενικά, δίδεται από τη σχέση

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{V}{I} \quad (3.2)$$

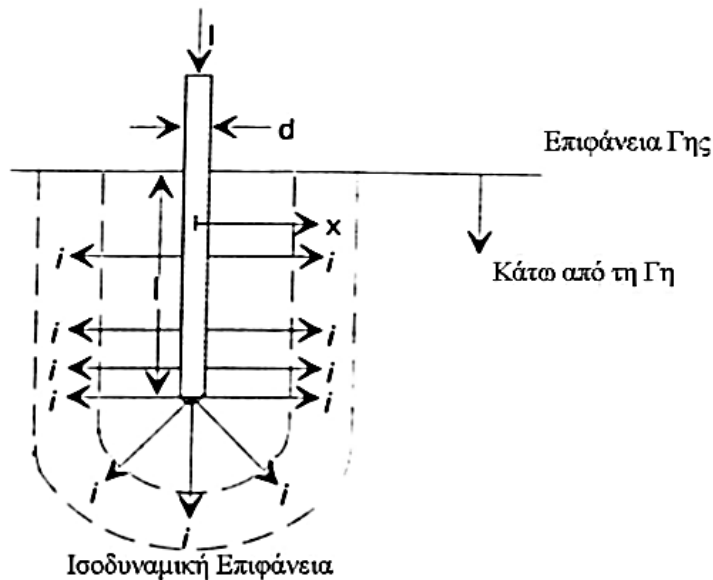
όπου ρ : η ειδική αντίσταση του μέσου, l : το μήκος, A : η διατομή του, I : είναι η ένταση του ρεύματος που διαπερνάει το μέσο, V : η διαφορά δυναμικού στα άκρα του.

Η αντίσταση που παρουσιάζει η Γη εξαρτάται ισχυρά από τη χημική της σύνθεση καθώς και από τις υπάρχουσες συνθήκες. Η υγρασία για παράδειγμα παίζει σημαντικό ρόλο. Έτσι, πριν σχεδιαστεί η γείωση για κάποιο σύστημα, είναι απαραίτητο να γίνουν μετρήσεις επί του εδάφους στο οποίο θα καταλήξει το ηλεκτρόδιο της.

3.2 Μέθοδοι και τύποι γειώσεων

Γείωση με ηλεκτρόδιο ενός άκρου

Έστω ένα ηλεκτρόδιο βυθισμένο στη Γη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7 . Για να βρεθεί η αντίσταση, πρέπει να γίνουν οι παρακάτω ενέργειες. Η πυκνότητα του ρεύματος σε απόσταση x από τον άξονα του ηλεκτροδίου είναι :



Σχήμα 3.7 Γείωση με ένα ηλεκτρόδιο

$$j = \frac{I}{2\pi l x} \tag{3.3}$$

όπου $2\pi l x$ η επιφάνεια κυλίνδρου ύψους l και διαμέτρου x . Η αντίσταση από το ηλεκτρόδιο μέχρι το σημείο x υπολογίζεται από τη σχέση

$$R_0 = \frac{V}{I} = \frac{l}{I} \int_d^x \frac{\rho I}{2\pi l x} dx = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{x}{d} \quad (3.4)$$

όπου d : η διάμετρος του ηλεκτροδίου.

Θεωρείται εμπειρικά, ότι σε απόσταση $x = 3l$ δεν υπάρχουν πλέον ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του ηλεκτροδίου και της Γης. Άρα η αντίσταση για το ηλεκτρόδιο είναι:

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{3l}{d} \right) \quad (3.5)$$

Από αυτή τη σχέση προκύπτει, ότι το μήκος του ηλεκτροδίου υπερισχύει της διαμέτρου του. Η επιφάνεια που ορίζεται σε απόσταση x μπορεί να θεωρηθεί ισοδυναμική. Η αντίσταση που παρουσιάζεται μεταξύ του σημείου x και του απείρου είναι

$$R_x = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{1}{x} + \sqrt{1 + \left(\frac{1}{x} \right)^2} \right) \quad (3.6)$$

Ο λόγος

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{\ln \left(\frac{1}{x} + \sqrt{1 + \left(\frac{1}{x} \right)^2} \right)}{\ln \left(\frac{3l}{d} \right)} \quad (3.7)$$

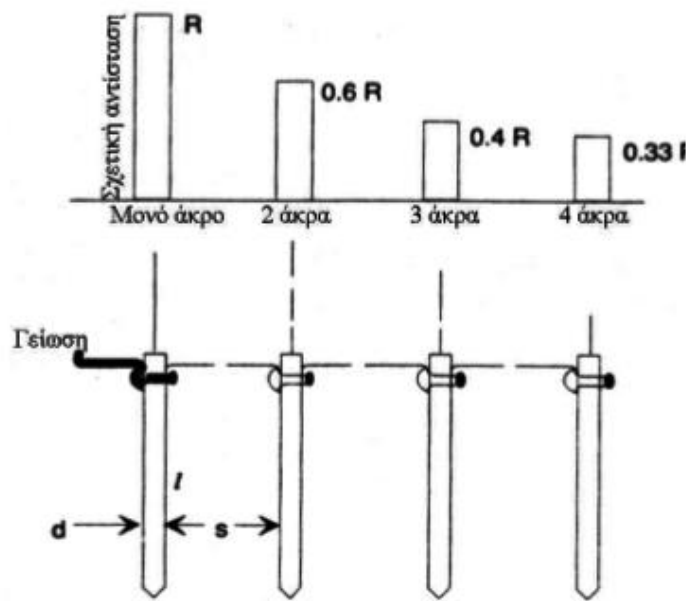
δίνει την περιοχή επίδρασης του ηλεκτροδίου. Το μεγαλύτερο ποσοστό της αντίστασης παρουσιάζεται κοντά στο ηλεκτρόδιο, γεγονός λογικό, εφόσον εκεί υπάρχει η μεγαλύτερη διοχέτευση ηλεκτρικών φορτίων. Για ένα ηλεκτρόδιο μήκους 3m και διαμέτρου 0.5 cm, ο παραπάνω λόγος σε μια απόσταση ίση με τη μισή του μήκους του ηλεκτροδίου ($x = 0.5l$) είναι

$$\frac{R_x}{R_0} = 0.245 \quad (3.8)$$

Όπως προκύπτει το 24.5% της συνολικής αντίστασης παρουσιάζεται από το σημείο x μέχρι το άπειρο και το υπόλοιπο 75.5% από το x μέχρι το ηλεκτρόδιο (περίπου 1.5m).

Γείωση με συστοιχία από παράλληλα ηλεκτρόδια

Μια καλή λύση για μείωση της αντίστασης της Γης χωρίς μεγάλη αύξηση του κόστους κατασκευής, είναι η τοποθέτηση πολλών ηλεκτροδίων συνδεδεμένων μεταξύ τους παράλληλα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται η μείωση της αντίστασης όσο αυξάνεται ο αριθμός των τοποθετημένων ηλεκτροδίων.



Σχήμα 3.8 Συστοιχία από κατακόρυφα ηλεκτρόδια

Αν N ο αριθμός των ηλεκτροδίων, l το μήκος τους, d η διάμετρος τους και s η απόσταση μεταξύ τους, τότε η αντίσταση αυτής της συστοιχίας δίδεται από τη σχέση

$$R_N = \frac{\rho}{2\pi N l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 + \frac{2l}{s} \ln \frac{2N}{\pi} \right) \quad (3.9)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δεν πρέπει να είναι πολύ μικρή για να μην επάγει το ένα ηλεκτρόδιο φορτία στο άλλο (ηλεκτρομαγνητική επίδραση).

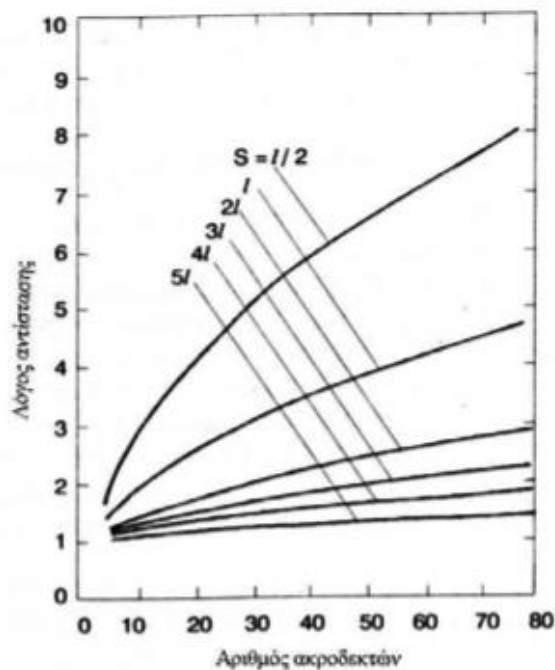
Γείωση με ορθογωνική συστοιχία από ηλεκτρόδια

Η αντίσταση N ορθογώνια τοποθετημένων ηλεκτροδίων που βρίσκονται σε απόσταση s μεταξύ τους, δίδεται από τη σχέση

$$R_A = \frac{R_0}{N} R_R \quad (3.10)$$

Όσον αφορά τον συντελεστή RR αυτός φαίνεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα

(σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9 Λόγος αντίστασης σε σχέση με την ιδανική αντίσταση N παράλληλων ηλεκτροδίων

Γείωση με οριζόντιο πλέγμα

Ένα οριζόντιο πλέγμα τοποθετημένο κάτω από το έδαφος είναι μια πολύ καλή λύση για γείωση. Παρέχει αρκετά μεγάλη «διαδρομή» στα φορτία για να μπορούν να βρουν διέξοδο στη Γη, χωρίς να αυξάνεται πολύ το κόστος της κατασκευής. Εάν A η συνολική επιφάνεια του πλέγματος και L το συνολικό μήκος των αγωγίμων καλωδίων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του, τότε η αντίσταση της διάταξης είναι

$$R_g = \rho \left[\frac{\sqrt{\pi}}{4\sqrt{A}} + \frac{1}{L} \right] \quad (3.11)$$

Γείωση με συνδυασμό κατακόρυφων ηλεκτροδίων και πλέγματος

Ο συνδυασμός κατακόρυφων ηλεκτροδίων συνδεδεμένων με ένα οριζόντιο πλέγμα είναι η ιδανικότερη λύση για τη γείωση. Μια τέτοια διάταξη φαίνεται στο σχήμα 3.6. Η αντίσταση που επιτυγχάνεται είναι

$$R_t = \frac{R_g R_A - R_m^2}{R_g + R_a - R_m} \quad (3.12)$$

όπου R_m η αντίσταση που προκύπτει από την αλληλεπίδραση των ηλεκτροδίων και του πλέγματος και η οποία δίδεται από τη σχέση

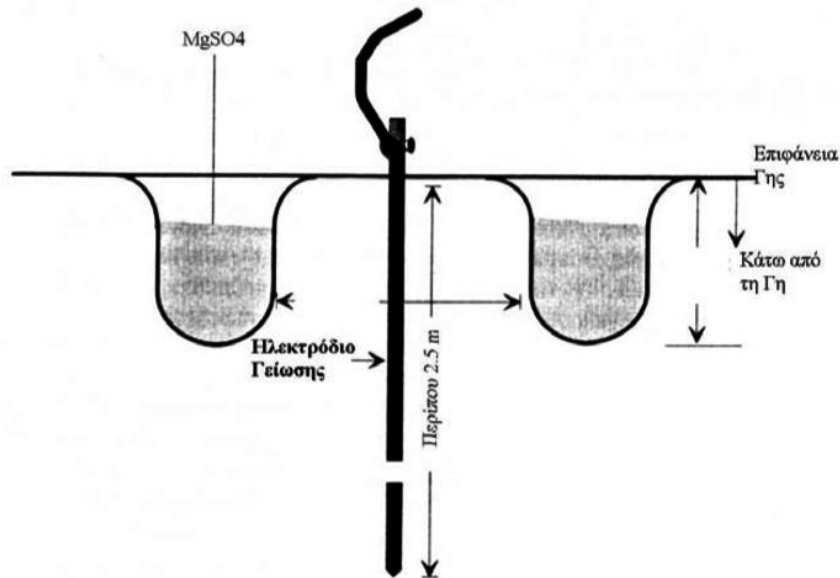
$$R_m = \frac{0.73}{L} \log \frac{2L}{\sqrt{2r_g h}} \quad (3.13)$$

Σε αυτή τη σχέση r_g είναι η ακτίνα του σύρματος, με το οποίο κατασκευάζεται το πλέγμα και h το βάθος κάτω από τη Γη στο οποίο βρίσκεται το πλέγμα.

3.3 Αντίσταση της Γης και η επιρροή της στην γείωση

Ένας τρόπος για να μειώνεται ακόμη περισσότερο η αντίσταση της Γης είναι η κατάλληλη επέμβαση στη χημική της σύσταση. Αρχικά, κάτι που μπορεί εύκολα να γίνει, είναι να διατηρείται υγρό το μέρος στο οποίο καταλήγουν τα ηλεκτρόδια. Η υγρασία μπορεί να μειώσει μέχρι και 30 % την αντίσταση της Γης. Κάτι άλλο που αυξάνει την αγωγιμότητα του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο είναι ο εμπλουτισμός του με κάποια χημική ένωση. Χρησιμοποιούνται συνήθως είναι θειούχο μαγνήσιο ή θειούχος χαλκός

($MgSO_2$, $CuSO_2$), χλωριούχο νάτριο ($NaCl$) ή νιτρίδιο του καλίου (KNO_2). Το $NaCl$ δε συνιστάται γιατί προκαλεί διάβρωση στα ηλεκτρόδια. Η τυπική διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό είναι η δημιουργία ενός καναλιού (σχήμα 3.10) που περιέχει το χημικό και το οποίο περιβάλλει κυκλικά το ηλεκτρόδιο κάτω από το έδαφος.



Σχήμα 3.10 Εμπλουτισμός Γης με χημικές ενώσεις.

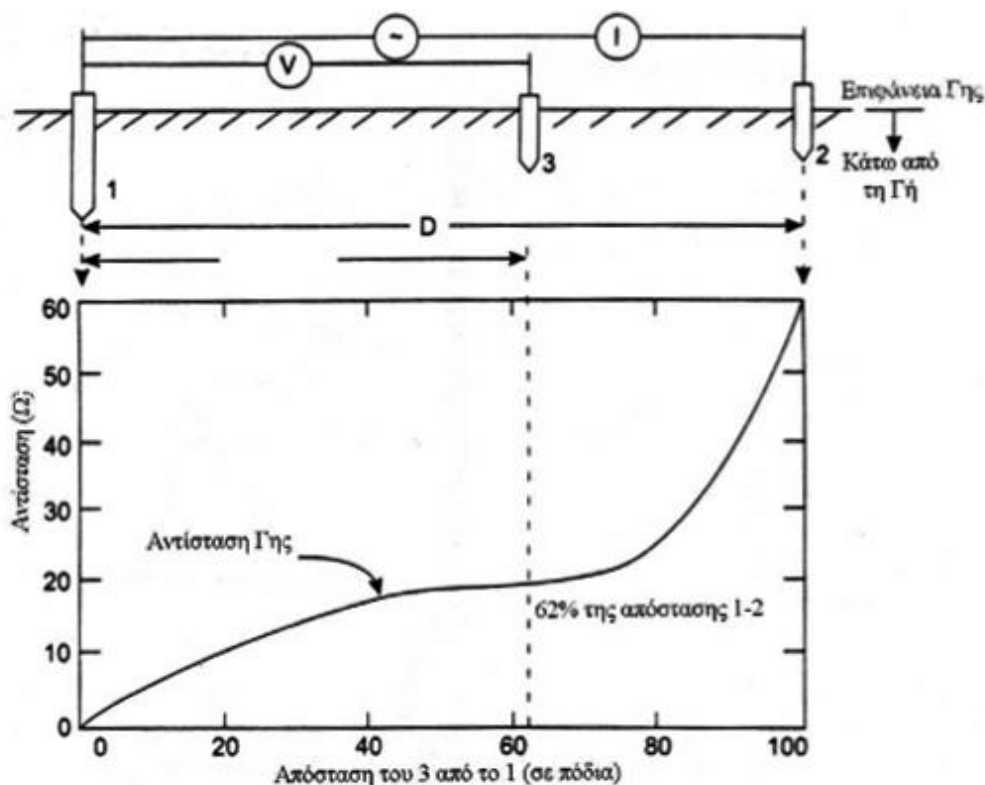
Τα υπόγεια ηλεκτρόδια είναι ευαίσθητα σε διαβρώσεις. Πολλές διαβρωτικές χημικές αντιδράσεις βρίσκουν πρόσφορο έδαφος, αφού η υγρασία επιδρά ως καταλύτης. Εάν χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των ηλεκτροδίων μέταλλα με χαμηλό ηλεκτροχημικό δυναμικό (δείκτης τάσης για αντίδραση), τότε ελαχιστοποιείται η διάβρωση. Ο χαλκός είναι μια καλή επιλογή διότι συνδυάζει τη μικρή διάβρωση με τη μεγάλη αγωγιμότητα. Στον παρακάτω πίνακα δίδονται οι τιμές ηλεκτροχημικών δυναμικών για ορισμένα μέταλλα.

Ηλεκτροχημικά Δυναμικά

| Μέταλλο | EMF (V) | Μέταλλο | EMF (V) |
|------------|---------|----------|---------|
| Αλουμίνιο | +1.60 | Μόλυβδος | +0.13 |
| Σίδηρος | +0.76 | Χαλκός | -0.35 |
| Νικέλιο | +0.25 | Άργυρος | -0.80 |
| Κασσίτερος | +0.14 | Χρυσός | -1.50 |

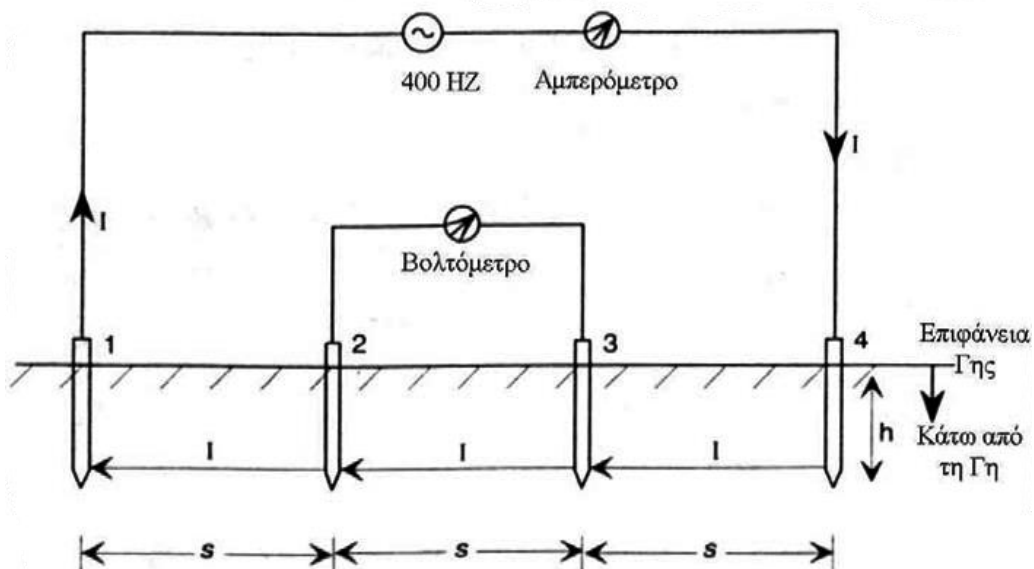
Σχήμα 3.11 Τιμές ηλεκτροχημικών δυναμικών συγκεκριμένων μετάλλων.

Για να γίνει σωστή μελέτη του τρόπου με τον οποίο θα γίνει η γείωση ενός συστήματος πρέπει να μετρηθεί η αντίσταση του εδάφους, στο οποίο θα καταλήξουν τα ηλεκτρόδια. Η τιμή αυτής της αντίστασης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το ποσοστό της υγρασίας και η θερμοκρασία. Η αρχή μέτρησης της αντίστασης της Γης φαίνεται στο σχήμα 3.12:



Σχήμα 3.12 Αρχή λειτουργίας για τη μέτρηση αντίστασης της Γης

Για τον υπολογισμό της αντίστασης Γης χρησιμοποιούμε σύστημα τριών ηλεκτροδίων. Το ηλεκτρόδιο 1 χαρακτηρίζεται ως ηλεκτρόδιο μέτρησης, τα 2 και 3 ως ηλεκτρόδια αναφοράς ρεύματος και τάσης αντίστοιχα. Η ζητούμενη αντίσταση ισούται με τον λόγο της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων 1 και 3 προς το ρεύμα μεταξύ των ηλεκτροδίων 1-2. Το ηλεκτρόδιο 3 τοποθετείται στο 62% της απόστασης από το ηλεκτρόδιο 2. Αυτό γίνεται διότι, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.13, σε εκείνη την περιοχή η αντίσταση είναι σχεδόν σταθερή.



Σχήμα 3.13 Διάταξη 4 ακροδεκτών για τη μέτρηση αντίστασης Γης

Μια απλή πρακτική διάταξη για τη μέτρηση της αντίστασης της Γης φαίνεται στο σχήμα 10. Εάν s η απόσταση μεταξύ των ακροδεκτών της διάταξης, h το βάθος κάτω από την επιφάνεια της Γης στο οποίο βρίσκονται και I το ρεύμα μεταξύ των ακροδεκτών 1 και 4, τότε η μετρούμενη διαφορά δυναμικού μεταξύ των 2 και 3 είναι

$$V = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{s} + \frac{2}{\sqrt{s^2 + 4h^2}} - \frac{2}{\sqrt{4s^2 + 4h^2}} \right) = \frac{\rho I}{2\pi s} \quad \text{εάν } h < s \quad (3.14)$$

Άρα η αντίσταση είναι:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi s} \quad (3.15)$$

Η επιλογή της συχνότητας των 400 Hz, έγινε διότι σε χαμηλότερες συχνότητες (50-60 Hz) υπάρχουν ρεύματα διασποράς, τα οποία αλλοιώνουν τις μετρήσεις. Επίσης στο dc είναι πιθανό να εμφανιστούν ανεπιθύμητα φαινόμενα πόλωσης.

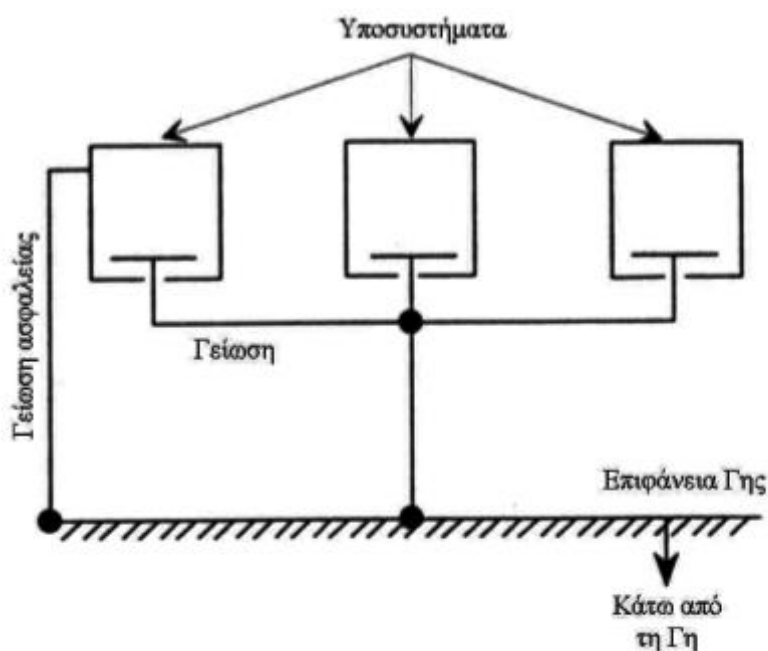
3.4 Τρόποι γείωσης συστημάτων

Σε ένα σύστημα, η γείωση είναι απαραίτητη σε δυο επίπεδα: σε επίπεδο συστήματος και σε επίπεδο εσωτερικών υποσυστημάτων. Παρακάτω θα αναφερθούν μερικές μέθοδοι γειώσεων σε πραγματικά συστήματα.

Σε ένα δίκτυο από συστήματα, η γείωση μπορεί να γίνει ξεχωριστά για τα κυκλώματα που λειτουργούν σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες. Τα πρώτα μπορούν να γειωθούν με απλά καλώδια ενώ για τα δεύτερα απαιτείται μια διέξοδος χαμηλής αντίστασης προς τη Γη. Αυτή μπορεί να είναι ένα ομοαξονικό καλώδιο ή ένα καλώδιο που καταλήγει σε ένα αγωγίμο επίπεδο τοποθετημένο μέσα στη Γη.

Γείωση μονού σημείου

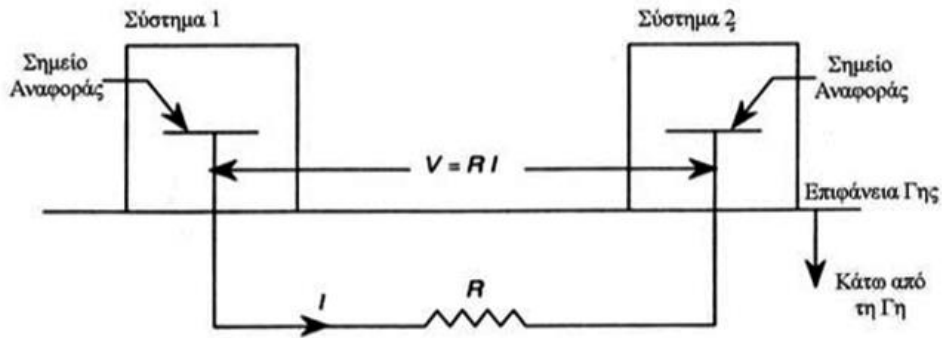
Ο τρόπος αυτός γείωσης φαίνεται στο σχήμα 3.13. Όλα τα υποσυστήματα γειώνονται χωριστά και κατόπιν όλες οι γειώσεις συνδέονται μεταξύ τους και καταλήγουν στη γείωση του συστήματος.



Σχήμα 3.13 Γείωση μονού σημείου.

Το πρόβλημα αυτού του συστήματος γείωσης είναι εμφανές στο σχήμα 3.14. Επειδή η Γη δεν έχει ποτέ μηδενική αντίσταση, υπάρχει ροή ρεύματος από το ένα σύστημα στο

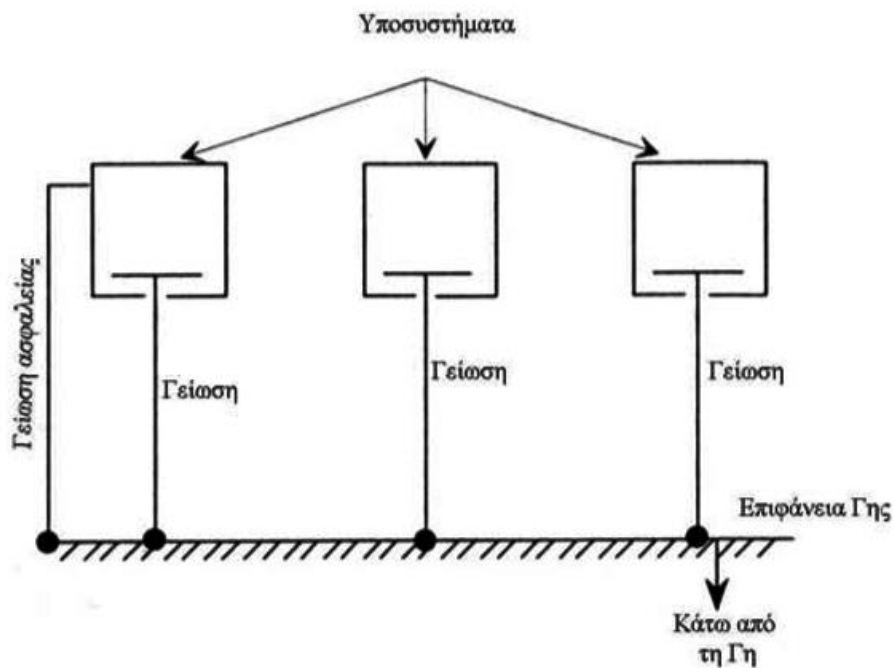
άλλο. Έτσι τα συστήματα αλληλεπιδρούν και υπάρχει παρεμβολή. Η αλληλεπίδραση είναι ελάχιστη σε χαμηλές συχνότητες ρευμάτων, οπότε η παραπάνω διάταξη θεωρείται ικανοποιητική.



Σχήμα 3.14 Αλληλεπίδραση λόγω μη μηδενικής αντίστασης της Γης

Γείωση πολλαπλών σημείων

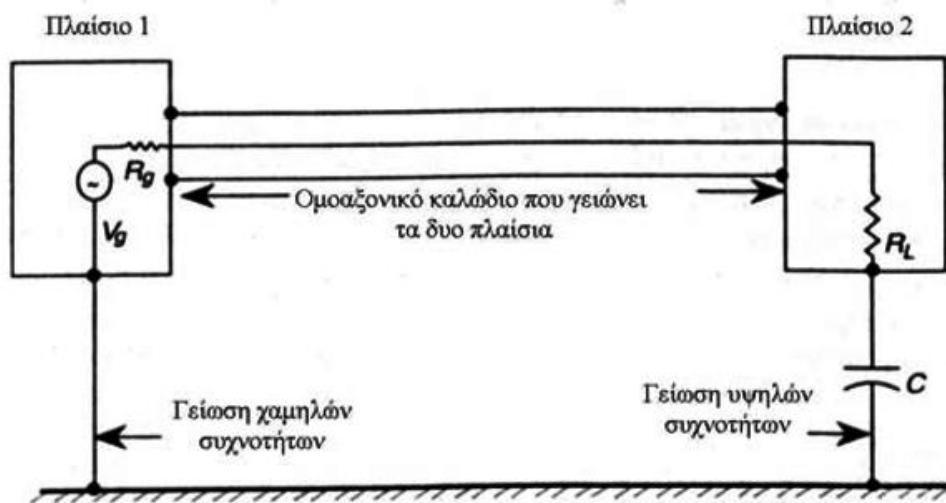
Αυτός ο τρόπος γείωσης φαίνεται στο σχήμα 3.15. Κάθε υποσύστημα γειώνεται χωριστά και ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα, στο έδαφος. Η μέθοδος αυτή ελαχιστοποιεί τις ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υποσυστημάτων. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να λειτουργήσει και σε υψηλές συχνότητες. Σε αυτή την περίπτωση, είναι δυνατό να δημιουργηθούν επαγωγικά ρεύματα, τα οποία προκαλούν αύξηση της αντίστασης και δημιουργία διαφορών στα δυναμικά αναφοράς (γείωσης).



Σχήμα 3.15 Γείωση πολλαπλών σημείων

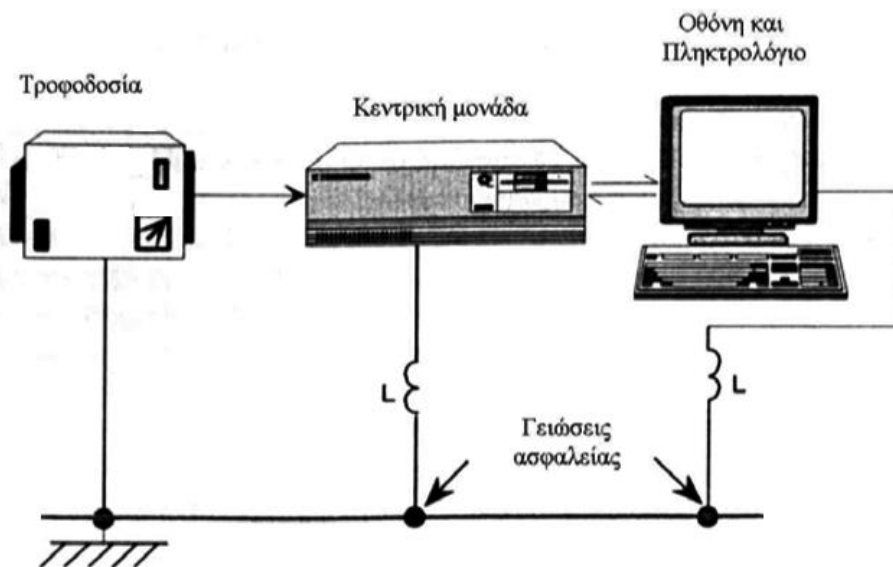
Υβριδικό σύστημα γείωσης

Μια χρήσιμη διάταξη γείωσης, είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 3.16. Εδώ, οι χαμηλές συχνότητες οδηγούνται στη Γη μέσω μιας διαδρομής ενώ οι υψηλές συχνότητες μέσω μιας άλλης. Ο πυκνωτής παίζει το ρόλο του «τροχονόμου» και αποτρέπει τις χαμηλές συχνότητες να περάσουν από αυτόν.



Σχήμα 3.16 Υβριδικό σύστημα γείωσης

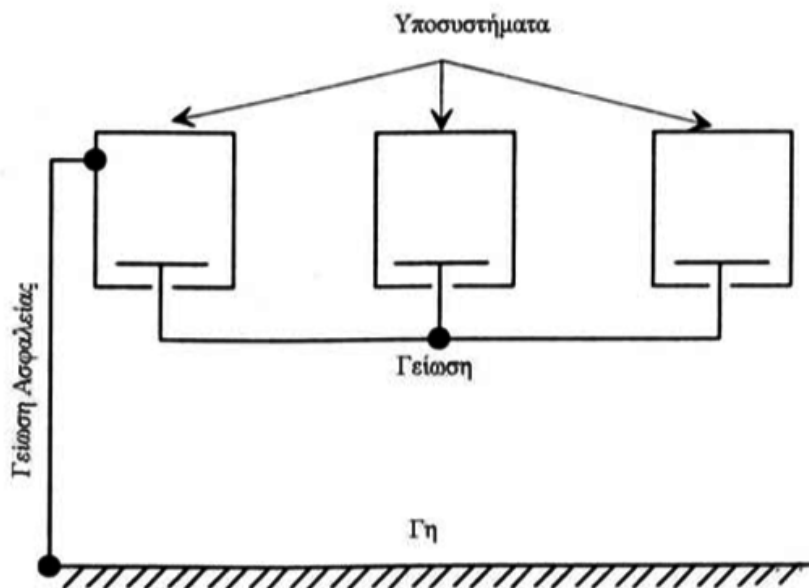
Τα υβριδικά συστήματα γείωσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στους υπολογιστές. Εκεί πρέπει τόσο η κεντρική μονάδα όσο και τα περιφερειακά να είναι γειωμένα στην γείωση της τροφοδοσίας για λόγους ασφάλειας των χρηστών από ηλεκτροπληξία. Κατά κανόνα όμως, τέτοιες γειώσεις δημιουργούν πολύ θόρυβο, ο οποίος μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την υπολογιστική ικανότητα του συστήματος. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάθε συσκευή μια άλλη γείωση για τα υψίσυχνα ac σήματα. (σχήμα 3.17).



Σχήμα 3.17 Εφαρμογή υβριδικής γείωσης σε υπολογιστές

Αιωρούμενη γείωση

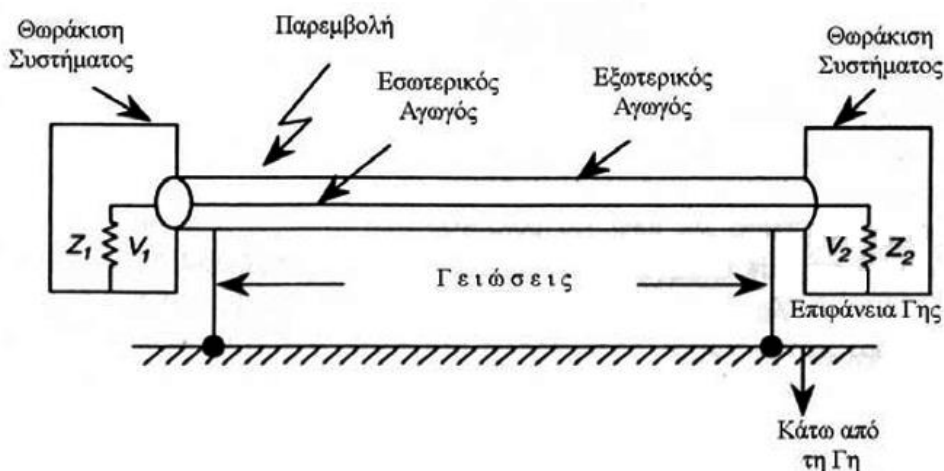
Στο σχήμα 3.18 φαίνεται ένα τέτοιο είδος γείωσης. Τα επιμέρους υποσυστήματα συνδέονται μεταξύ τους για να δημιουργήσουν ένα κοινό δυναμικό αναφοράς, το οποίο όμως είναι αποκομμένο από άλλα στοιχεία. Με τη σύνδεση αυτή αποφεύγονται ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις.



Σχήμα 3.18 Διάταξη αιωρούμενης Γης

Γείωση καλωδίων

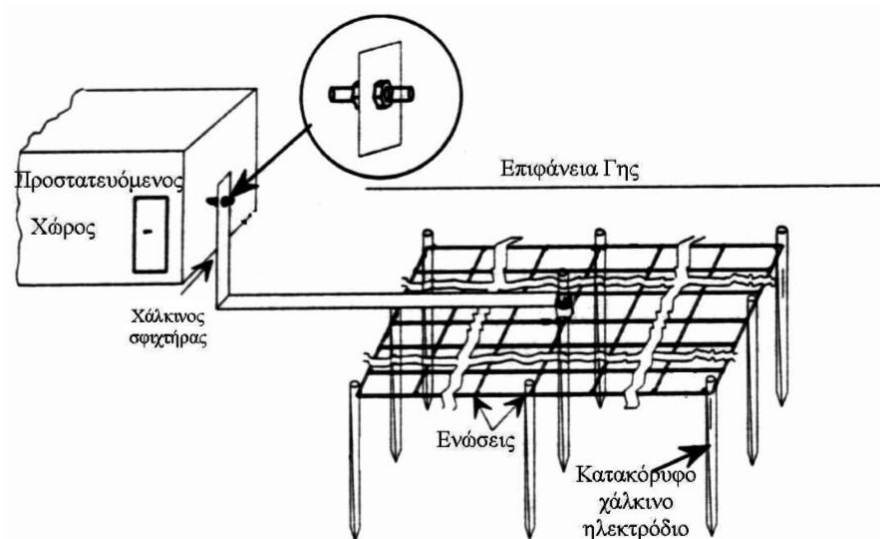
Ένα ομοαξονικό καλώδιο θωρακισμένο από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, πρέπει να έχει γείωση για να «απαλλάσσεται» από τα φορτία που επάγονται στη θωράκισή του. Ένα τέτοιο καλώδιο φαίνεται στο σχήμα 3.19. Ο σχεδιαστής πρέπει να λαμβάνει υπόψη του διάφορες παραμέτρους, όπως το είδος των πιθανών παρεμβολών, το ηλεκτρικό μήκος του καλωδίου και άλλα, για να αποφασίσει αν θα γειώσει το καλώδιο στο ένα άκρο (ασύμμετρα) ή και στα δυο άκρα (συμμετρικά).



Σχήμα 3.19 Διάταξη γείωσης καλωδίου

3.5 Παραδείγματα γείωσης συστημάτων

Εφαρμογή των προαναφερθέντων είναι η κατασκευή της γείωσης για μια εγκατάσταση μετρήσεων EMC. Οι προδιαγραφές της εγκατάστασης απαιτούν δημιουργία γείωσης με αντίσταση μικρότερη του 1Ω.



Σχήμα 3.20 Σύστημα γείωσης θωρακισμένου δωματίου μετρήσεων

Το σύστημα της γείωσης φαίνεται στο σχήμα 3.20. Αποτελείται από ένα σύμπλεγμα αγωγίμου καλωδίου, το οποίο είναι τυλιγμένο σε σχήμα μικρών βρόχων διαστάσεων 1m x 1m. Το πλαίσιο πάνω στο οποίο είναι τυλιγμένοι οι βρόχοι έχει συνολικό μήκος 21m x 21m. Υπάρχουν ακόμη 16 κατακόρυφα τοποθετημένα ηλεκτρόδια διαμέτρου 12.5 mm και μήκους 3m, τα οποία ενώνονται με το χάλκινο καλώδιο. Γύρω από κάθε ηλεκτρόδιο υπάρχει ένα κανάλι εμποτισμένο με MgSO₄ (θειικό μαγνήσιο). Η συνολική αντίσταση υπολογίστηκε 0.97Ω. Πρακτικά μετρήθηκε 1.1Ω. Η διαφορά αυτή πιθανόν να οφείλεται σε παραμέτρους που έχουν να κάνουν με το έδαφος. Ακόμη, οι αντιστάσεις των κατακόρυφων ηλεκτροδίων, υπολογίστηκαν με βάση την υπόθεση ότι η Γη είναι ομογενής και ισότροπη, γεγονός που δεν αληθεύει πλήρως.

Εκτυπωτής ακίδων

Σε διάφορα σημεία ενός εκτυπωτή εφαρμόστηκε ηλεκτροστατικός παλμός (ESD). Όταν η ένταση του παλμού ήταν 6 kV, η συσκευή δε λειτουργούσε σωστά. Η λύση δόθηκε όταν γειώθηκαν ξεχωριστά το κυρίως σώμα της συσκευής, το σημείο σύνδεσης υποδοχής της

κάρτας και η τροφοδοσία του χαρτιού. Τότε η συσκευή μπορούσε να λειτουργήσει σωστά ακόμη και με παλμούς που έφταναν τα 10 kV.

Εκτυπωτής υπολογιστή

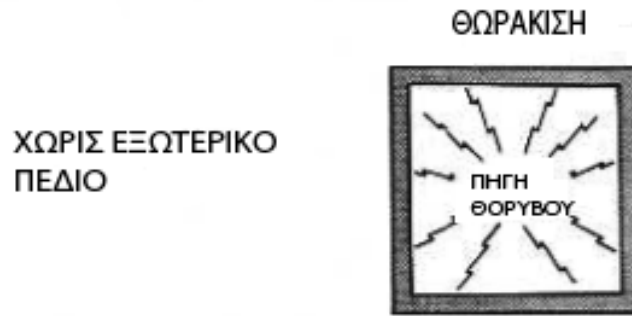
Σε έναν εκτυπωτή παρατηρήθηκε σπινθήρας, όταν εφαρμόστηκε παλμός ESD έντασης 8 kV και ο εκτυπωτής χάλασε. Αυτό συνέβη διότι η ακίδα της εκτύπωσης είναι κατασκευασμένη από μέταλλο και ηλεκτρικά μονωμένη από τα υπόλοιπα κομμάτια της συσκευής. Ο σπινθήρας παρατηρήθηκε μεταξύ του ενός άκρου της ακίδας και του μεταλλικού σώματος του εκτυπωτή. Το πρόβλημα λύθηκε όταν δημιουργήθηκε διέξοδος για τα επαγόμενα φορτία διαμέσου της ακίδας στο μεταλλικό σώμα του εκτυπωτή. Αυτό έγινε με τη βοήθεια μιας μεταλλικής επαφής. Με αυτόν τον τρόπο, ο εκτυπωτής μπορούσε να δουλεύει ακόμη και με παλμούς των 15 kV.

Κεφάλαιο 4: Θωράκιση

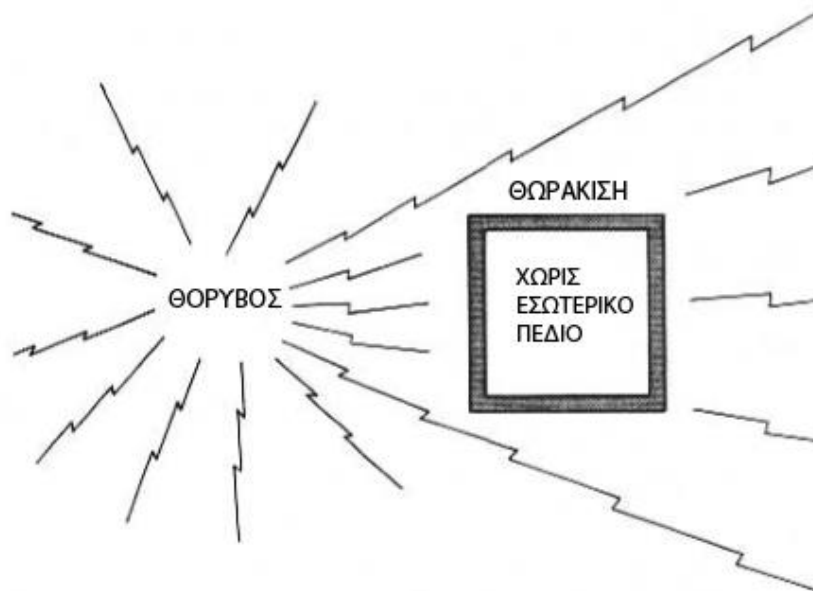
4.1 Εφαρμογές και αποτελεσματικότητα θωράκισης

Η πιο βασική τεχνική στον έλεγχο της EMC αποτελεί η θωράκιση μια πηγής ηλεκτρικής διαταραχής από ένα δέκτη. Θωράκιση μπορεί είναι ένα οποιοδήποτε περίβλημα τοποθετημένο μεταξύ των δύο περιοχών του χώρου που χρησιμοποιείται για να περιορίσει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μέσα ή έξω από τον περικλειόμενο χώρο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της διάδοσης των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων της μιας περιοχής από την άλλη. Τέτοιες θωρακίσεις μπορεί να είναι μεγάλες και στερεές όπως ολόκληρα κτίρια από ατσάλινες γραμμές όπου γίνονται δοκιμές εξοπλισμού (στρατιωτικού) ή για να προστατεύονται ευαίσθητα υπολογιστικά συστήματα. Αυτή η ρύθμιση παρέχει προστασία για όλο τον ευπαθή εξοπλισμό που βρίσκεται έξω από την θωράκιση. Μια θωράκιση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να κρατήσει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έξω από μια περιοχή, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Αυτό παρέχει προστασία μόνο για το συγκεκριμένο εξοπλισμό που περιέχεται εντός της θωράκισης. Από μια άποψη για τα συστήματα, η θωράκιση της πηγής θορύβου είναι πιο αποτελεσματική από τη θωράκιση του δέκτη. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες πρέπει να επιτρέπεται στην πηγή να εκπέμπει (όπως ραδιοφωνικοί σταθμοί) και η θωράκιση των επιμέρους υποδοχείς μπορεί να είναι απαραίτητη.

Είναι ανώφελο να δημιουργηθεί μια θωράκιση, ασχέτως πόσο καλά είναι σχεδιασμένη, και στη συνέχεια να επιτρέψει στην ηλεκτρομαγνητική ενέργεια να εισχωρήσει μέσα (ή να βγει) από το περίβλημα μέσα από ένα εναλλακτικό μονοπάτι, όπως οι καλωδιακές διεισδύσεις. Τα καλώδια θα πάρουν το θόρυβο από τη μία πλευρά της θωράκισης και θα την διεξάγουν στην άλλη πλευρά, όπου θα γίνει εκ νέου ακτινοβολία. Προκειμένου να διατηρηθεί η ακεραιότητα του περιβλήματος θωράκισης, οι τάσεις θορύβου θα πρέπει να φιλτράρονται από όλους τους αγωγούς που διαπερνούν την θωράκιση. Αυτό ισχύει για τα καλώδια τροφοδοσίας, καθώς και τα καλώδια σήματος. Οι θωρακίσεις των καλωδίων που διαπερνούν ένα θωρακισμένο περίβλημα πρέπει να συνδέονται με αυτό το περίβλημα, ώστε να αποφευχθεί σύζευξη του θορύβου πέρα από το όριο.



Σχήμα 4.1 Εφαρμογή θωράκισης όπου περιβάλετε μια πηγή θορύβου για την προστασία του εξοπλισμού εκτός της θωράκισης από παρεμβολές.



Σχήμα 4.2 Εφαρμογή θωράκισης από παρεμβολές με την τοποθέτηση μιας θωράκισης γύρω από έναν υποδοχέα ώστε να αποφευχθεί η διείσδυση του θορύβου.

Υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις οι οποίες δίνουν καλά αποτελέσματα και μια απλή φυσική εικόνα, όταν χρησιμοποιούνται στις αντίστοιχες περιοχές εφαρμογής τους. Αυτές είναι οι εξής:

1) Το μοντέλο “ducting” οδήγηση πεδίου που εφαρμόζεται για στατικά (ή σχεδόν στατικά) ηλεκτρικά και μαγνητικά.

2) Το μοντέλο του “ισοδύναμου κυκλώματος” το οποίο εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου οι διαστάσεις της θωράκισης είναι σημαντικά μικρότερες από το μήκος κύματος των πεδίων πρόσπτωσης. Αυτό το μοντέλο δείχνει καθαρά την διαφορά μεταξύ της θωράκισης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, τονίζοντας τη σπουδαιότητα της ροής του επαγόμενου ρεύματος στη συνολική δομή της θωράκισης. Από αυτό μπορούν να ληφθούν εκτιμήσεις τόσο για τις χαμηλές όσο και για τις υψηλές συχνότητες, συμπεριλαμβανομένων και των επιδράσεων του βάθους διείσδυσης.

3) Το μοντέλο “επίπεδου κύματος ή γραμμής μεταφοράς” το οποίο εφαρμόζεται για θωράξεις σημαντικά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος των πεδίων πρόσπτωσης και όταν αυτά τα πεδία μπορούν να θεωρηθούν ως επίπεδα κύματα. Αυτό υποδηλώνει ότι η θωράκιση θα πρέπει να είναι μακριά από την πηγή. Εδώ γίνεται χρήση των εξισώσεων μετάδοσης, ανάκλασης και του βάθους διείσδυσης για τα επίπεδα κύματα.

Πολλές σχέσεις σχεδιασμού προέρχονται από την τρίτη προσέγγιση. Η επίδοση μιας θωράκισης εξετάζεται συνήθως με την βοήθεια ενός δείκτη ποιότητας που καλείται αποτελεσματικότητα ή απόδοση θωράκισης (shielding effectiveness $SE(f)$), η οποία είναι συνάρτηση της συχνότητας. Για χαμηλές συχνότητες ή συστήματα σχεδόν στατικά, η ηλεκτρική και η μαγνητική αποτελεσματικότητα θωράκισης μπορούν να θεωρηθούν χωριστά. Έτσι η αποτελεσματικότητα θωράκισης ορίζεται σε decibels ως :

$$SE(f) = 20 \log_{10} \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \quad (4.1)$$

Ή

$$SE(f) = 20 \log_{10} \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (4.2)$$

Όπου :

H_1 = το μαγνητικό πεδίο χωρίς την θωράκιση,

H_2 = το μαγνητικό πεδίο με την θωράκιση,

E_1 = το ηλεκτρικό πεδίο χωρίς την θωράκιση,

E_2 = το ηλεκτρικό πεδίο με την θωράκιση.

Σε υψηλότερες συχνότητες τα E και H δεν μπορούν να θεωρηθούν χωριστά και η SE ορίζεται με την βοήθεια της ροής ισχύος,

$$SE(f) = 20 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (4.3)$$

Όπου P_1 = η ροή ισχύος χωρίς την θωράκιση,

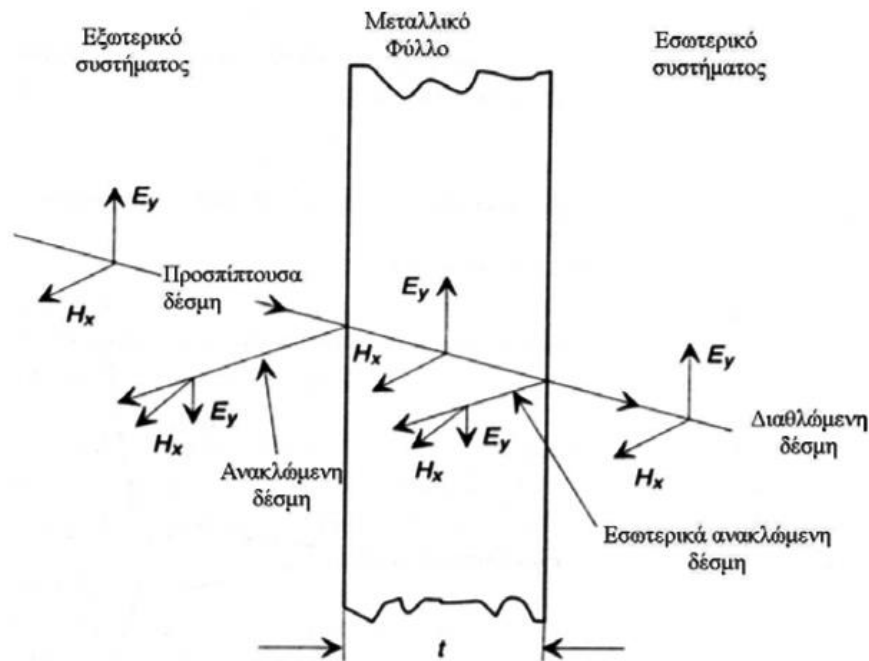
P_2 = η ροή ισχύος με την θωράκιση

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις η πηγή θεωρείται σε κάποια σταθερή θέση και οι διάφορες παράμετροι ($H_1, H_2, E_1, E_2, P_1, P_2$) αναφέρονται σε τιμές οι οποίες μετρώνται σε μια άλλη σταθερή θέση.

4.2 Βασική αρχή θωράκισης από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές EMI

Σε όλες σχεδόν τις συσκευές και κυρίως στα καλώδια που μεταφέρουν δεδομένα είναι απαραίτητο να υπάρχει θωράκιση από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η δημιουργία για την απαραίτητη θωράκιση διαφέρει κατά περίπτωση, διότι οι παρεμβολές ποικίλουν σε μορφή και συχνότητα. Η βασική αρχή της θωράκισης είναι η τοποθέτηση ενός μεταλλικού περιβλήματος ανάμεσα στο ευαίσθητο κύκλωμα ενός συστήματος ή διάταξης και στις πηγές της παρεμβολής. Τα κύματα που εισέρχονται στη μεταλλική επιφάνεια θα υποστούν στη διαδρομή τους μια αντίσταση η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \left(\frac{\omega \mu_0}{2\sigma} \right)^{1/2} (1 - j) \quad (4.4)$$



Σχήμα 4.3 Μηχανισμός θωράκισης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής

Στο παραπάνω σχήμα 4.3 φαίνεται ένα κύμα, το οποίο προσπίπτει σε ένα μεταλλικό φύλλο θωράκισης. Ένα ποσοστό του κύματος ανακλάται, από το υπόλοιπο κύμα, ένα τμήμα απορροφάται από το υλικό της θωράκισης, ένα τμήμα ανακλάται στο εσωτερικό τοίχωμα της και το υπόλοιπο διοχετεύεται στο εσωτερικό της συσκευής. Από το κύμα που ανακλάται εσωτερικά, ένα ποσοστό υφίσταται δεύτερη ανάκλαση στο εξωτερικό τοίχωμα και ένα ποσοστό διαθλάται προς τα έξω, έτσι ώστε υπάρχει μια διαδοχή από εσωτερικές ανακλάσεις. Η ολική ικανότητα της θωράκισης εκφράζεται με τη μείωση της έντασης του παρασιτικού πεδίου που τη διαπερνά σε σχέση με το προσπίπτον σε dB. Κάθε ένας από τους προαναφερθέντες μηχανισμούς δηλαδή απορρόφηση, ανάκλαση και εσωτερικές ανακλάσεις συνεισφέρει κατά ένα παράγοντα απωλειών. Έτσι, η ολική ικανότητα θωράκισης εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$SE = a_R + a_A + a_{IR} \quad \text{σε db.} \quad (4.5)$$

όπου a_R , a_A , a_{IR} οι συντελεστές απωλειών για τους τρεις μηχανισμούς.

4.3 Ανάλυση θεωρίας και μέθοδοι θωράκισης

Η απόδοση μιας θωράκισης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Μια θωράκιση που έχει σχεδιαστεί για να είναι αποτελεσματική σε ένα συγκεκριμένο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, μπορεί να μην είναι ικανή σε ένα άλλο. Παράμετροι όπως η συχνότητα της ακτινοβολίας, η πόλωση και το είδος της, όπως αν το μαγνητικό πεδίο υπερισχύει του ηλεκτρικού ή αντίστροφα, έχουν σημαντικό ρόλο. Η εμπέδηση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ορίζεται ως ο λόγος των εφαπτομενικών συνιστωσών των εντάσεων των πεδίων

$$Z = \frac{|E_t|}{|H_t|} \quad (4.6)$$

Σε μεγάλη απόσταση από την πηγή τα κύματα μπορούν να θεωρηθούν επίπεδα και τότε η έκφραση για την εμπέδηση γίνεται :

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad (4.7)$$

Στο κενό, για συχνότητες κάτω του οπτικού είναι:

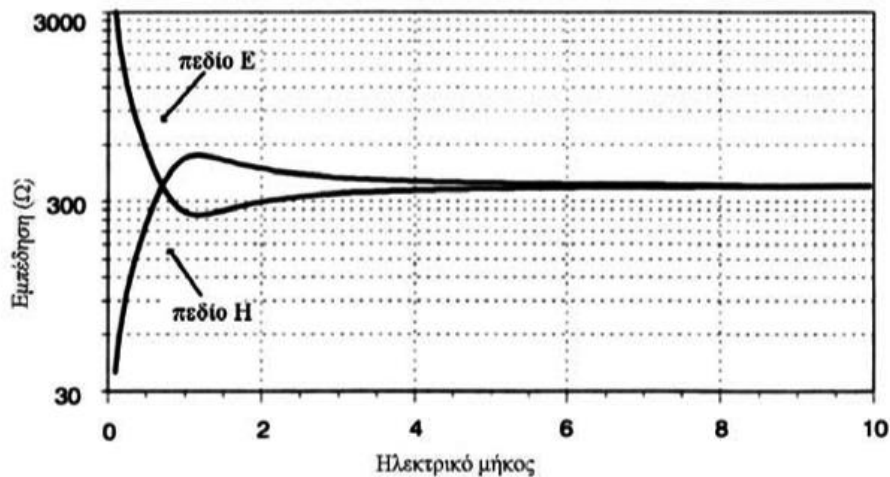
$$Z = Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (4.8)$$

Ένα μικρό ηλεκτρικό δίπολο μπορεί να θεωρηθεί σαν μια στοιχειώδης πηγή ηλεκτρικού πεδίου. Για το μαγνητικό πεδίο, η πηγή αυτή είναι ένας μικρός βρόχος ρεύματος. Κοντά στις πηγές θα ισχύουν οι παρακάτω εκφράσεις για ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα:

$$Z_E = \frac{Z_0 \lambda_0}{2\pi r} \gg n_0 \quad (4.9)$$

$$Z_H = \frac{Z_0 2\pi r}{\lambda_0} \gg n_0 \quad (4.10)$$

Στο παρακάτω σχήμα 4.4 φαίνονται οι μεταβολές των εμπεδήσεων σε σχέση με την απόσταση. Όπως είναι γνωστό και από άλλα φαινόμενα, στο κοντινό πεδίο υπάρχουν έντονες μεταβολές ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις οι μεταβολές ελαχιστοποιούνται.



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα μεταβολής της εμπέδησης σε συνάρτηση της απόστασης από την πηγή

Η σχέση που εκφράζει την αποτελεσματικότητα της θωράκισης, για κάθε είδος πεδίου μπορεί να γραφεί με τη μορφή :

για επίπεδα κύματα :
$$SE(dB) = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (4.11)$$

για ηλεκτρικά πεδία :
$$SE(dB) = 10 \log\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \quad (4.12)$$

για μαγνητικά πεδία :
$$SE(dB) = 10 \log\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \quad (4.13)$$

Μονή θωράκιση

Είναι γνωστό από τις βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού ότι όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε έναν αγωγό, τότε ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις.

$$\text{σταθερά διάδοσης} : k = \left(\frac{1}{2} \omega \mu \sigma \right)^{1/2} (1 - j) \quad (4.14)$$

$$\text{σταθερά εξασθένησης} : a = \left(\frac{\omega \mu \sigma}{2} \right)^{1/2} \quad (4.15)$$

$$\text{επιδερμικό βάθος} : \delta = \left(\frac{\omega \mu \sigma}{2} \right)^{-1/2} \quad (4.16)$$

$$\text{ταχύτητα φάσης} : u = c \sqrt{\frac{\omega \varepsilon}{\sigma}} \quad (4.17)$$

Η σχέση για τις απώλειες από απορρόφηση είναι:

$$a_A (dB) = 20 \log \frac{|E_t|}{|E_i|} \quad (4.18)$$

Με δείκτη i συμβολίζονται τα προσπίπτοντα πεδία, με δείκτη t τα διερχόμενα και με δείκτη r τα ανακλώμενα. Είναι γνωστό ότι

$$\frac{|E_t|}{|E_i|} = e^{-at} \quad (4.19)$$

Συνεπώς

$$a_A (dB) = 20 \log(e^{-at}) \Leftrightarrow a_A (dB) = 8.68at \quad (4.20)$$

Έστω $Z(t)$ η εμπέδηση της θωράκισης και Z_0 η αντίστοιχη του αέρα. Εάν οι δύο ποσότητες είναι διαφορετικές, τότε στο όριο της θωράκισης πραγματοποιείται ανάκλαση. Λόγω συνέχειας, ισχύουν οι σχέσεις:

$$E_i + E_r = E_t \quad H_i + H_r = H_t \quad E_i = Z_0 H_i \quad (4.21)$$

Ακόμη ισχύει

$$E_i = Z_0 H_i \quad E_r = -Z_0 H \quad E_t = Z(t) H_t \quad (4.22)$$

Από τις σχέσεις (4.21) στις (4.22) προκύπτουν για τους συντελεστές ανάκλασης οι σχέσεις:

$$q_E = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z(t) - n}{Z(t) + n} = \frac{\lambda - 1}{\lambda + 1}, \quad q_H = \frac{H_r}{H_i} = \frac{n - Z(t)}{n + Z(t)} = \frac{1 - \lambda}{1 + \lambda} \quad (4.23)$$

και για τους συντελεστές διάδοσης:

$$P_E = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z(t)}{n + Z(t)} = \frac{2\lambda}{1 + \lambda} = 1 + q_E, \quad P_H = \frac{H_t}{H_i} = \frac{2n}{n + Z(t)} = \frac{2}{1 + \lambda} = 1 + q_H \quad (4.24)$$

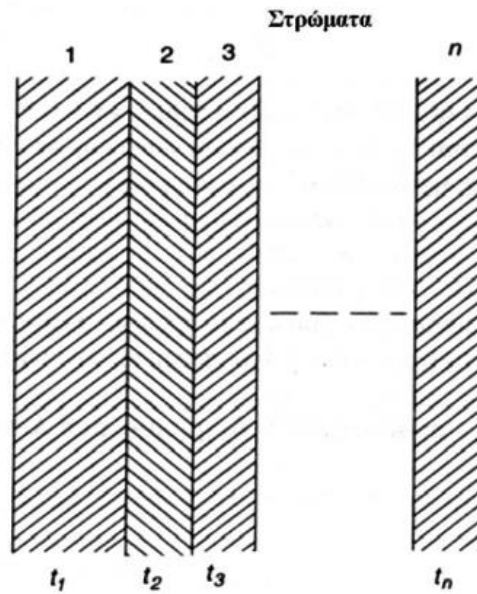
όπου $\lambda = Z(t)/Z_0$. Οι απώλειες από ανάκλαση δίδονται εξ' ορισμού από τη σχέση:

$$a_R (dB) = -20 \log(|P_E \cdot P_H|) = 20 \log \left(\frac{|1 + \lambda|^2}{4|\lambda|} \right) \quad (4.25)$$

Συνήθως η απορρόφηση είναι μεγάλη (>15dB) και ο παράγοντας των εσωτερικών ανακλάσεων μπορεί να παραληφθεί. Το κύμα έχει εξασθενήσει αρκετά για να μπορεί να προκαλέσει αξιόλογες εσωτερικές ανακλάσεις. Εάν όμως αυτό δεν συμβαίνει, οι εσωτερικές ανακλάσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη. Παρακάτω δίνεται η τελική σχέση που προκύπτει για τον παράγοντα εσωτερικών ανακλάσεων.

$$a_{IR} (dB) = 20 \log \left| 1 - \frac{(\lambda - 1)^2}{(\lambda + 1)^2} \exp \left[-2t(1 + j) \sqrt{\pi f \mu \sigma} \right] \right| \quad (4.26)$$

Θωράκιση πολλαπλών στρωμάτων



Σχήμα 4.5 Θωράκιση πολλαπλών στρωμάτων

Εάν χρησιμοποιηθούν περισσότερα από ένα στρώματα από υλικό θωράκισης όπως στο σχήμα 4.5, τότε τα αποτελέσματα θα είναι καλύτερα. Εάν n το πλήθος των στρωμάτων και Z_m η εμπέδηση του m -ιστού στρώματος τότε οι συντελεστές απωλειών για την ανάκλαση, την απορρόφηση και τις εσωτερικές ανακλάσεις είναι:

$$a_R(dB) = 20 \log \left[\frac{1}{2^n} \left(1 + \frac{Z_{m1}}{Z_0} \right) \left(1 + \frac{Z_{m2}}{Z_{m1}} \right) \dots \left(1 + \frac{Z_0}{Z_{m(N-1)}} \right) \right] \quad (4.27)$$

$$a_A(dB) = 8.68(a_1 t_1 + a_2 t_2 + \dots + a_n t_n) \quad (4.28)$$

$$a_{IR}(dB) = 20 \log \left| (1 - \lambda_1 e^{-2L_1 t_1}) (1 - \lambda_2 e^{-2L_2 t_2}) \dots (1 - \lambda_n e^{-2L_n t_n}) \right| \quad (4.29)$$

Όπου:

$$\lambda_n = \frac{(Z_n - Z_m)}{(Z_n + Z_m)} \quad (4.30)$$

$$L_n = (1 + j) \sqrt{f \pi \mu_n \sigma_n} \quad (4.31)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει, ότι κάθε στρώμα συνεισφέρει στον παράγοντα της απορρόφησης ανάλογα με το πάχος του και τη σταθερά εξασθένησής του. Ακόμη, όσον αφορά στις εσωτερικές ανακλάσεις, ο συντελεστής δεν είναι απλώς το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών κάθε στρώματος, αλλά μια δυναμική αλληλο-σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων.

Διπλή θωράκιση με ενδιάμεσο μονωτή

Μια καλή θωράκιση επιτυγχάνεται με την παρεμβολή μεταβολές μεταξύ δυο αγωγών ενός μονωτή, όπως για παράδειγμα ενός απόλυτα στεγνού ξύλου (σχήμα 4.6). Η απόδοση της θωράκισης μπορεί να βελτιωθεί μέχρι και κατά 6 dB σε σχέση με τη χρησιμοποίηση ενός μόνο αγωγού θωράκισης με συνολικό πάχος ίσο με το άθροισμα των δυο. Η εξήγηση είναι απλή. Παρόλο ότι η σταθερά εξασθένησης του ξύλου είναι αμελητέα (το κύμα διαδίδεται διαμέσου αυτού χωρίς αξιόλογη αντίσταση), η ανάκλαση είναι διπλή, εφόσον υπάρχουν δυο απομονωμένα στρώματα αγωγού.



Σχήμα 4.6 Διπλή θωράκιση με ενδιάμεσο μονωτή

Για τα 3 στρώματα θα γίνουν 4 ανακλάσεις. Για τις απώλειες λόγω ανάκλασης , απορρόφησης και εσωτερικής ανάκλασης ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις.

$$a_R = 20 \log \left| \frac{1 + \frac{Z_1}{Z_0}}{2} \right| + 20 \log \left| \frac{1 + \frac{n_2}{Z_1}}{2} \right| + 20 \log \left| \frac{1 + \frac{Z_3}{n_2}}{2} \right| + 20 \log \left| \frac{1 + \frac{Z_0}{Z_3}}{2} \right| \quad (4.32)$$

$$a_A = 8.68(a_1 t_1 - a_2 t_2 + a_3 t_3) \quad (4.33)$$

$$a_{IR} = 20 \log \left| 1 - k_1 e^{-2L_1 t_1} \right| + 20 \log \left| 1 - k_2 e^{-2L_2 t_2} \right| + 20 \log \left| 1 - k_3 e^{-2L_3 t_3} \right| \quad (4.34)$$

Οι μονωτές έχουν σταθερά εξασθένησης που τείνει στο μηδέν άρα $a_2 \rightarrow 0$. Για να γίνει κατανοητή η υπεροχή της διπλής θωράκισης με ενδιάμεσο μονωτή σε σχέση με μονή θωράκιση ίδιου συνολικού πάχους, υπολογίζεται η διαφορά στην αποτελεσματικότητα. Καταρχήν ισχύουν για τους επιμέρους παράγοντες:

$$\Delta a_R = a_{Rdouble} - a_{Rsingle} = 20 \log \frac{\left| 1 + \frac{Z}{Z_0} \right|}{4 \left| \frac{Z}{Z_0} \right|} \quad (4.35)$$

Επειδή για καλούς αγωγούς ισχύει $Z/Z_0 \ll 1$, η ((4.35) γίνεται

$$\Delta a_R = -20 \log \frac{4|Z|}{|Z_0|} \quad (4.36)$$

Για το συντελεστή απορρόφησης δεν υπάρχει διαφορά, διότι το συνολικό πάχος είναι ίδιο.

Για τις εσωτερικές ανακλάσεις ισχύει:

$$\Delta a_{IR} = 20 \log \left| 1 + j \frac{\frac{\pi t_2}{\lambda_0}}{\frac{Z}{Z_0}} \right| \quad (4.37)$$

Για μεγάλο πάχος θωράκισης είναι:

$$\frac{\pi t_2}{\lambda_0} \gg \left| \frac{Z}{Z_0} \right| \quad (4.38)$$

Οπότε

$$\Delta(SE) = 20 \log \frac{\frac{\pi t_2}{\lambda_0}}{\frac{Z}{Z_0}} \quad (4.39)$$

Τέλος η έκφραση για τις απώλειες από ανάκλαση για επίπεδα κύματα γράφεται με τη μορφή:

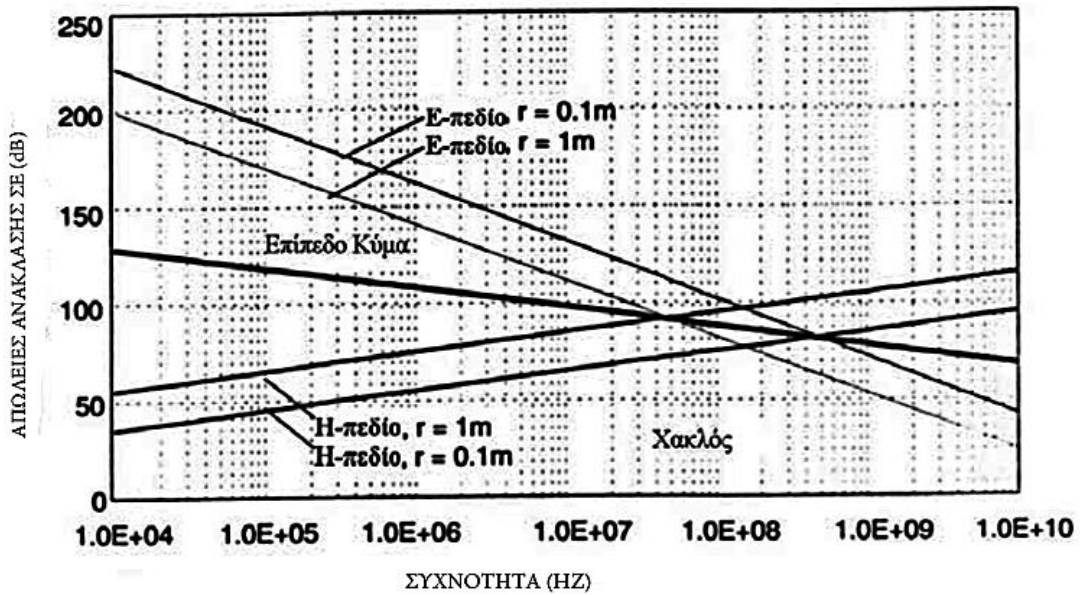
$$a_r (dB) = 168.2 - 10 \log \left(\frac{\mu_r f}{\sigma_r} \right) \quad (4.40)$$

Και οι απώλειες από απορρόφηση είναι:

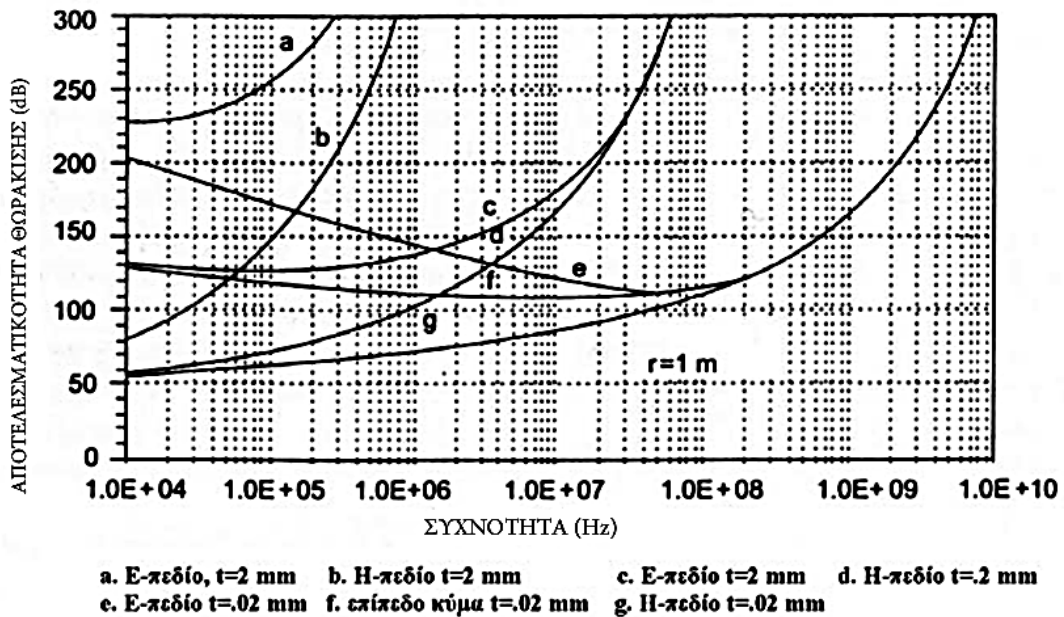
$$a_A (dB) = 1.314 (\mu_r \sigma_r f)^{1/2} \quad (4.41)$$

όπου μ_r η σχετική διαπερατότητα σε σχέση με τον αέρα, σ_r η σχετική αγωγιμότητα σε σχέση με το χαλκό, R η απόσταση από την πηγή, f η συχνότητα

Στα παρακάτω διαγράμματα (σχήματα 4.7,4.8) φαίνονται οι διακυμάνσεις της αποτελεσματικότητας της θωράκισης (σε dB) σε σχέση με τη συχνότητα και το είδος των κυμάτων για υλικό θωράκισης χαλκό.



Σχήμα 4.7 Απώλειες ανάκλασης για θωράκιση από χαλκό ($\mu_r=1$, $\sigma_r=1$)



Σχήμα 4.8: Συνολική αποτελεσματικότητα για θωράκιση από χαλκό

Μελετώντας τα διαγράμματα και τις εξισώσεις, παρατηρεί κανείς τα εξής: οι απώλειες από απορρόφηση αυξάνονται (αυτό συνεπάγεται βελτίωση της θωράκισης) με αύξηση της συχνότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, αύξηση του πάχους της θωράκισης και τέλος με αύξηση της αγωγιμότητας και της διαπερατότητας του υλικού της. Όσον αφορά

στην ανάκλαση, ο γενικός κανόνας είναι ότι αυξάνεται με αύξηση της αγωγιμότητας του υλικού της θωράκισης και μείωση της διαπερατότητάς του.

Υλικά θωράκισης

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε τύπος πεδίου έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά. Έτσι, για την αποτελεσματική προστασία από αυτά, η θωράκιση πρέπει να αποτελείται από υλικά με συγκεκριμένες μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Ένα μαγνητικό πεδίο, που προσπίπτει επάνω σε έναν αγωγό, δεν υφίσταται σημαντική ανάκλαση. Έτσι, προκειμένου να μειωθεί η ένταση της ακτινοβολίας που προσβάλλει μια συσκευή, πρέπει να αξιοποιηθεί ο μηχανισμός απορρόφησης από τα υλικά της θωράκισης. Για αυτό το σκοπό είναι απαραίτητο για μαγνητικά πεδία να επιλέγονται υλικά με μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Όσον αφορά στο ηλεκτρικό πεδίο, η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας αυξάνει τόσο την ανάκλαση όσο και την απορρόφηση. Έτσι πρέπει να επιλέγονται υλικά με μεγάλη αγωγιμότητα. Το πάχος των υλικών θωράκισης πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερο από το επιδερμικό βάθος, δεδομένου ότι σε μεγαλύτερο βάθος δεν υπάρχει διάδοση. Στον παρακάτω Πίνακα φαίνονται ορισμένα υλικά με τις ιδιότητες τους και τις συνήθεις χρήσεις τους.

Υλικά θωράκισης και ιδιότητες αυτών

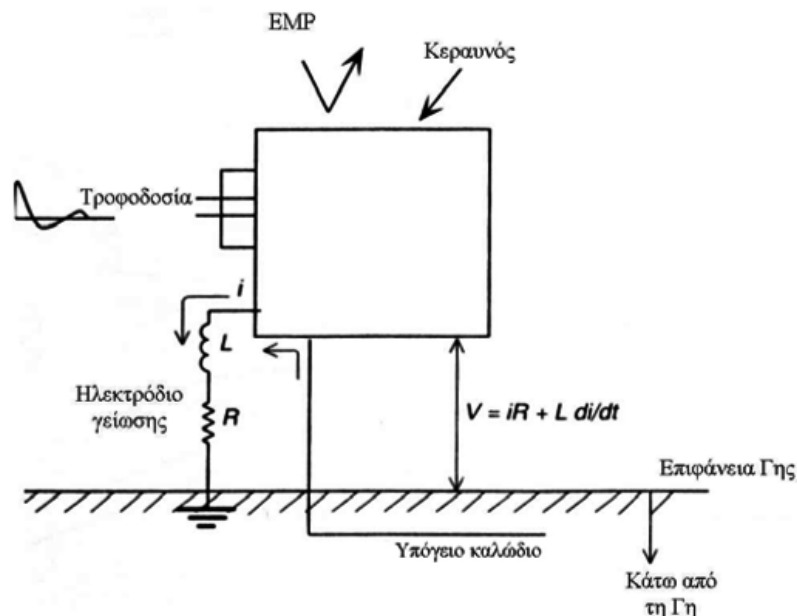
| Υλικό | Σχετική αγωγιμότητα (σε σχέση με το χαλκό) | Σχετική διαπερατότητα (σε σχέση με τον αέρα) | Χρήση |
|-------------|--|--|-----------------|
| Σίδηρος | 0.17 | 1000 | Θωράκιση |
| Χάλυβας | 0.1 | 1 | Θωράκιση |
| Άργυρος | 2.05 | 1 | Επαφή |
| Χαλκός | 1 | 1 | Θωράκιση |
| Χρυσός | 0.7 | 1 | Επαφή |
| Αλουμίνιο | 0.61 | 1 | Θωράκιση |
| Ψευδάργυρος | 0.29 | 1 | Φύλλο θωράκισης |
| Ορείχαλκος | 0.26 | 1 | Φλάντζα |

$$\text{Αγωγιμότητα χαλκού} = 5.8 \times 10^7, \text{ S/m} \quad \text{Διαπερατότητα αέρα} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

4.4 Ασυνέχειες της θωράκισης

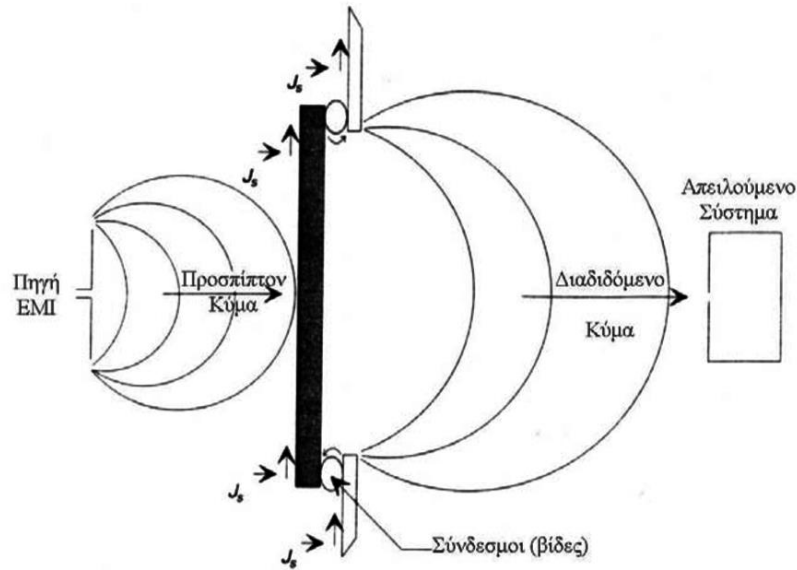
Ένας καλός αγωγός, που περιβάλλει ένα σύστημα, αποτελεί μια καλή θωράκιση. Τα ανεπιθύμητα ηλεκτρομαγνητικά πεδία ανακλώνται ή απορροφώνται. Τα φορτία που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του αγωγού, διοχετεύονται στη Γη μέσω ενός συστήματος

γείωσης. Στο σχήμα 27 φαίνεται ένα σύστημα θωράκισης με γείωση. Η σημασία της γείωσης είναι μεγάλη, διότι πρέπει να υπάρχει μια διέξοδος προς τη Γη για τα φορτία που αναπτύσσονται επάνω στη θωράκιση. Στο σχήμα 27 φαίνεται η ανεπιθύμητη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται εξαιτίας της μη μηδενικής αντίστασης της Γης.

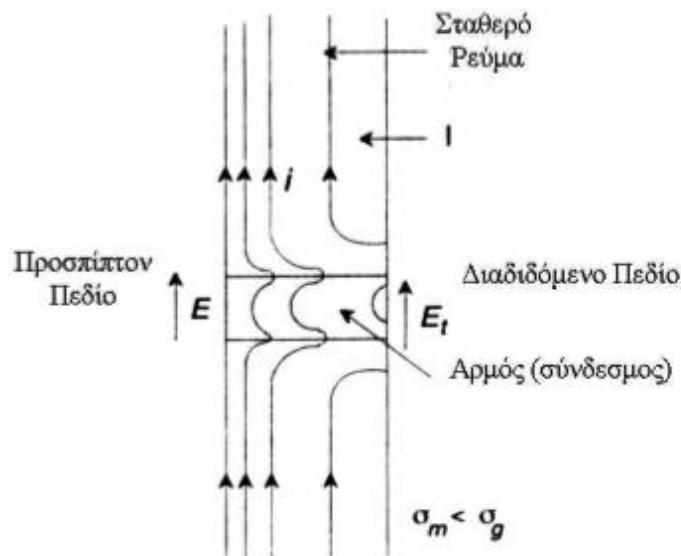


Σχήμα 4.9 Διαφορά δυναμικού εξ' αιτίας μη μηδενικής αντίστασης της γείωσης.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι σχεδιαστές των συστημάτων είναι οι ασυνέχειες στη θωράκιση. Όλα τα συστήματα χρειάζονται συνδέσεις με το εξωτερικό περιβάλλον τους, όπως τροφοδοσία, διατάξεις εξαερισμού, οθόνες ή όργανα για διάφορες ενδείξεις κτλ. Αυτές οι συνδέσεις, συνιστούν ασυνέχειες και μειώνουν την αποτελεσματικότητα της θωράκισης. Ασυνέχεια συνιστούν ακόμη και οι σύνδεσμοι της θωράκισης με το σύστημα (βίδες), που δεν είναι φτιαγμένες από το ίδιο ακριβώς υλικό. Στα σχήματα 4.10 και 4.11 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή «διαρρέει» εξαιτίας ασυνεχειών στη θωράκιση.

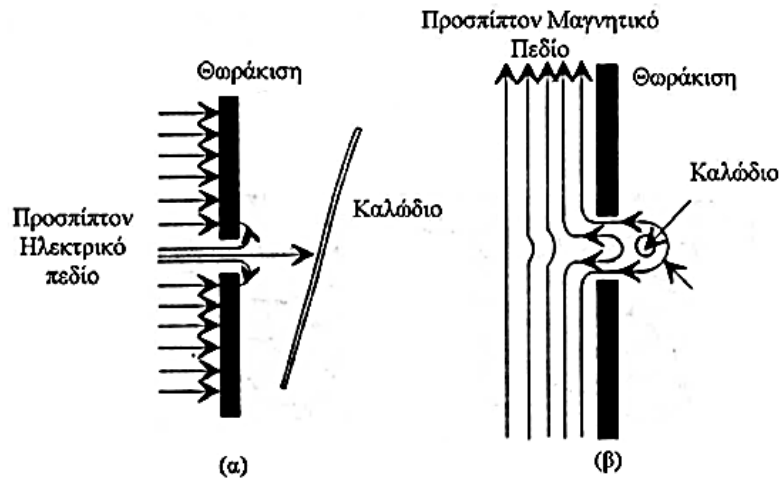


Σχήμα 4.10 Διαρροή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τους συνδέσμους της θωράκισης



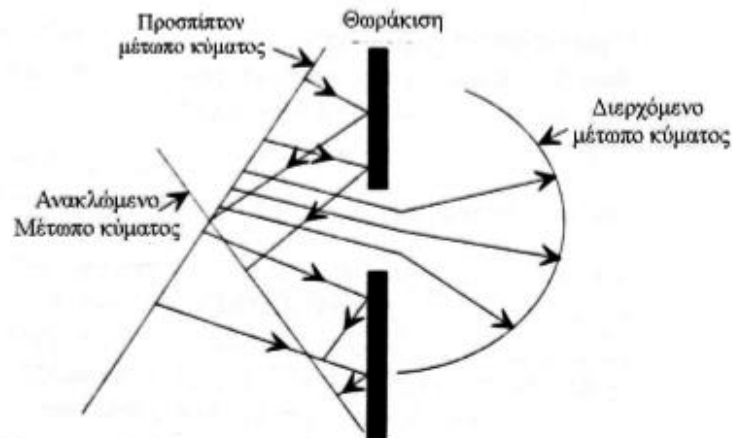
Σχήμα 4.11 Ρεύμα διαρροής εξαιτίας μιας βίδας (αρμού) κάθετα τοποθετημένης ως προς το πεδίο.

Οι ασυνέχειες στη θωράκιση μπορούν συνήθως να διαχωριστούν ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα τους. Το σχετικό μέγεθος της ασυνέχειας ως προς το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας παίζει σημαντικό ρόλο. Εάν το μέγεθος αυτό είναι μικρό, τότε η διάδοση των κυμάτων μέσα από την ασυνέχεια γίνεται όπως δείχνει το σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων διαμέσου μικρών οπών α) για ηλεκτρικό β) για μαγνητικό πεδίο.

Εάν το άνοιγμα της ασυνέχειας είναι μεγάλο σε σχέση με το μήκος κύματος, τότε η διάδοση μέσα στο θωρακισμένο χώρο γίνεται εύκολα (σχήμα 4.13) και η αποτελεσματικότητα της θωράκισης μειώνεται σημαντικά.



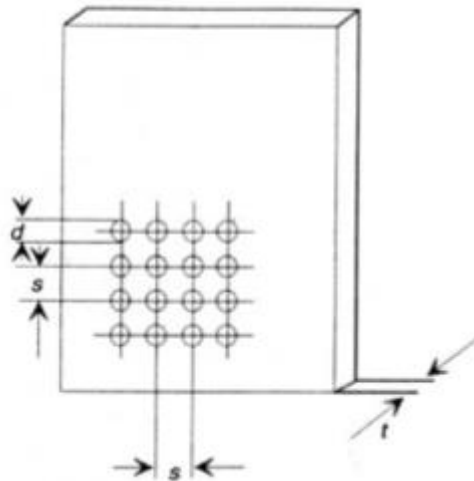
Σχήμα 4.13: Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων διαμέσου μεγάλης οπής.

Περιπτώσεις ασυνέχειας θωράκισης

Έστω μια μικρή οπή διαμέτρου d σε έναν αγωγό πάχους t . Εάν $d > t$ (προσέγγιση λεπτής θωράκισης) τότε η αποτελεσματικότητα της θωράκισης δίδεται από τη σχέση:

$$SE(dB) = 20 \log \left(\frac{\lambda}{2d} \right) \quad (4.42)$$

Εάν η διάμετρος της οπής έχει τιμές εκτός της περιοχής $\lambda/50$ με $\lambda/20$, τότε η αποτελεσματικότητα της θωράκισης είναι ανεκτή.



Σχήμα 4.14 Πολλές οπές για τον εξαερισμό ενός συστήματος.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται πολλές μικρές οπές για τον εξαερισμό ενός συστήματος (σχήμα 4.14), τότε η μείωση της αποτελεσματικότητας εξαρτάται κυρίως από την απόσταση δυο γειτονικών οπών και από το συνολικό πλήθος τους. Εάν η το συνολικό πλήθος των οπών, η αποτελεσματικότητα της θωράκισης είναι:

$$SE(dB) = 20 \log \left(\frac{\lambda}{2d} \right) - 10 \log n \quad (4.43)$$

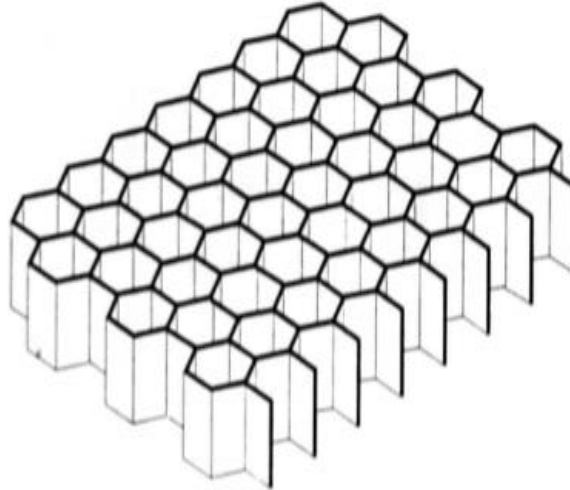
Εάν η θωράκιση έχει σημαντικό πάχος, τότε μια οπή μοιάζει με κυματοδηγό για το προσπίπτον κύμα. Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης είναι τότε

$$SE(dB) = 20 \log \left(\frac{\lambda}{2d} \right) + 27.3 \frac{t}{2d} \quad (4.44)$$

όπου ο συντελεστής 27.3 προκύπτει από τη μελέτη της θεωρίας κυματοδηγών. Η καλύτερη λύση για συστήματα εξαερισμού είναι η δημιουργία πολλών κυψελοειδούς

σχήματος οπών (σχήμα 4.15). Η εξασθένηση ενός προσπίπτοντος πεδίου μπορεί να φτάσει και τα 100dB. Η σχέση για τη θωράκιση είναι η παρακάτω

$$SE(dB) = 20 \log \left(\frac{f_c}{f} \right) + 2.73 \frac{t}{2d} - 10 \log n \quad (4.45)$$

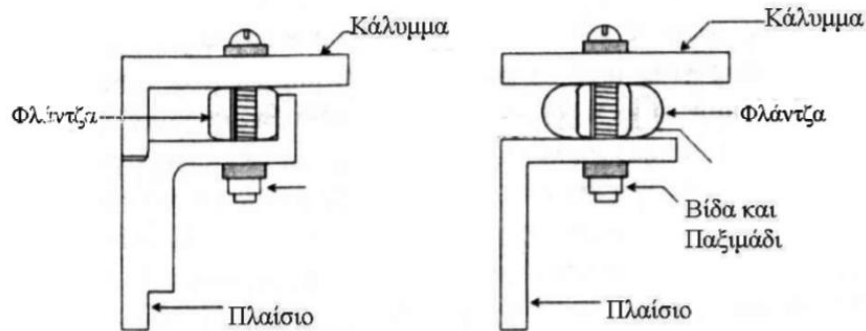


Σχήμα 4.15: Κυψελοειδείς οπές για σύστημα εξαερισμού.

Συνδέσεις

Οι συνδέσεις (βίδες, αρμοί) της θωράκισης με το κυρίως σύστημα, είναι μια πολύ σημαντική πηγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, διότι το ρεύμα που επάγεται σε αυτές μπορεί και ρέει μέσα στο σύστημα, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της θωράκισης. Πρέπει να γίνει προσεκτική μελέτη του υλικού των συνδέσεων που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και του τρόπου με τον οποίο θα τοποθετηθούν. Για να μειωθεί η επίδραση των συνδέσεων, πρέπει αυτές να είναι όσο το δυνατόν όμοιες με τη θωράκιση. Πρέπει να επιλέγονται αγώγιμα υλικά κατασκευής με παρόμοιες ηλεκτρικές ιδιότητες. Ακόμη είναι καλό να έχουν τη μέγιστη δυνατή επικάλυψη με τη θωράκιση. Έτσι η αλληλεπίδραση γίνεται μέγιστη και τα επαγόμενα ρεύματα στις συνδέσεις θα αφομοιώνονται καλύτερα από την υπόλοιπη θωράκιση. Τέλος πρέπει να δίνεται προσοχή στον προσανατολισμό των συνδετικών αρμών. Αν είναι παράλληλοι με το προσπίπτον κύμα, επηρεάζονται περισσότερο παρά αν ήταν κάθετοι. Όταν το προσπίπτον είναι κυκλικά πολωμένο, οπότε έχει και κάθετη και παράλληλη συνιστώσα, πρέπει ο αρμός να έχει την ίδια αποτελεσματικότητα και προς τις δυο κατευθύνσεις. Πρακτικά, τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι βίδες επικαλυμμένες με κασσίτερο, χαλκό ή αλουμίνιο.

Τα υλικά αυτά αφενός παρέχουν υψηλή αγωγιμότητα αφετέρου (πολύ σημαντικό) δεν διαβρώνονται εύκολα. Η διάβρωση από καιρικές συνθήκες ή απλά με το χρόνο, μειώνει την αποτελεσματικότητα της θωράκισης. Στο σχήμα 4.16 φαίνονται δυο τρόποι ένωσης του καλύμματος με το κυρίως πλαίσιο, με τη χρήση φλάντζας.

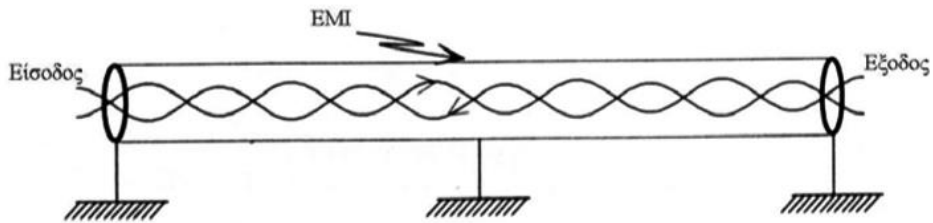


Σχήμα 4.16 Τρόποι ένωσης με χρήση φλάντζας

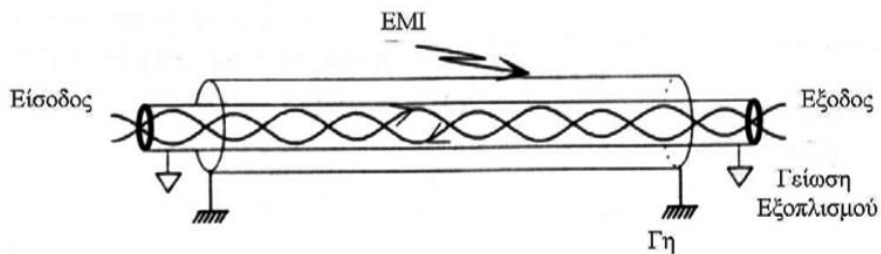
4.6 Θωράκιση καλωδίων

Σε όλα τα καλώδια που μεταφέρουν σήματα χρειάζεται θωράκιση. Η ανάγκη αυτή γίνεται ακόμη πιο επιτακτική, διότι τα περισσότερα σήματα έχουν μεγάλο εύρος ζώνης, συνεπώς αυξάνεται η πιθανότητα παρεμβολής σε ορισμένες συχνότητες από το εξωτερικό πεδίο. Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για μια εφαρμογή πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε να πληρούν τις προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το είδος της μεταδιδόμενης πληροφορίας, καθώς και το περιβάλλον στο οποίο θα εκτεθεί το καλώδιο. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο είδος καλωδίου είναι το δίκλωνο (σχήμα 4.17). Αυτό έχει ένα στρώμα θωράκισης από έξω και μέσα πλεγμένα δυο σύρματα από χαλκό. Το καλώδιο είναι κατάλληλο για σήματα μέχρι και 10MHz. Ένα άλλο είδος καλωδίου είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.18. Αυτό χρησιμοποιεί δυο στρώματα θωράκισης, τα οποία είναι γειωμένα. Μέσα από τη θωράκιση ο χάλκινος αγωγός είναι σε σχήμα πλεξούδας. Τέλος ένα είδος καλωδίου που μπορεί να μεταφέρει σήματα με μεγάλο εύρος ζώνης (από 20 KHz - 50 GHz) φαίνεται στο σχήμα 4.19. Αυτό έχει στρώμα θωράκισης στη μέση, που είναι ανεξάρτητο από το εξωτερικό

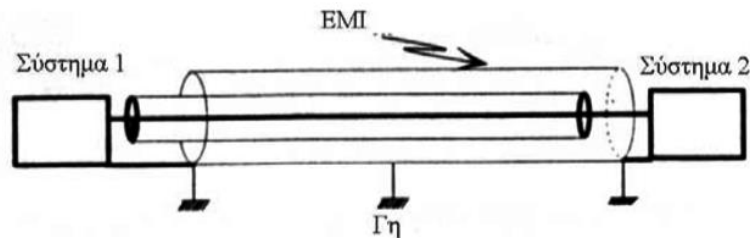
στρώμα από το οποίο γυρίζει το σήμα. Σε αυτή τη διάταξη, είναι αναγκαίο να δοθεί προσοχή στις γειώσεις, ώστε να μην υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους



Σχήμα 4.17: Δίκλωνο καλώδιο με απλή θωράκιση



Σχήμα 4.18 Δίκλωνο καλώδιο με διπλή εξωτερική θωράκιση



Σχήμα 4.19 Καλώδιο με εσωτερική και εξωτερική θωράκιση

Αποτελεσματικότητα θωράκισης καλωδίων

Επειδή είναι σχεδόν αδύνατο να μετρηθεί το πεδίο μέσα στο καλώδιο δεν ακολουθείται η συνήθης μέθοδος για τον ορισμό της αποτελεσματικότητας στα καλώδια, δηλαδή ο υπολογισμός του λόγου των εντάσεων των πεδίων μέσα και έξω από τη θωράκιση. Επιπλέον, ο λόγος των τάσεων που αναπτύσσονται με και χωρίς τη θωράκιση δεν είναι σωστός, διότι οι τάσεις εξαρτώνται από τον τρόπο τερματισμού των γραμμών στο

σύστημα. Έτσι, για να μετρηθεί η αποτελεσματικότητα της θωράκισης, συνήθως χρησιμοποιείται η εμπέδηση του καλωδίου. Η εμπέδηση δίδεται από τη σχέση

$$Z = V/I \quad (4.46)$$

όπου V η τάση που αναπτύσσεται κατά μήκος της θωράκισης και I το ρεύμα που τη διαπερνά. Όσο μικρότερη είναι η Z , τόσο καλλίτερη θεωρείται η θωράκιση. Η εμπέδηση Z , για χαμηλές συχνότητες είναι ουσιαστικά ίδια με την ωμική αντίσταση στο dc. Σε υψηλές συχνότητες αρχίζουν και παρουσιάζονται παρασιτικές χωρητικότητες και επαγωγικά ρεύματα. Για ένα ομοαξονικό καλώδιο με εσωτερική ακτίνα αγωγού a και πάχος θωράκισης t , η εμπέδηση είναι:

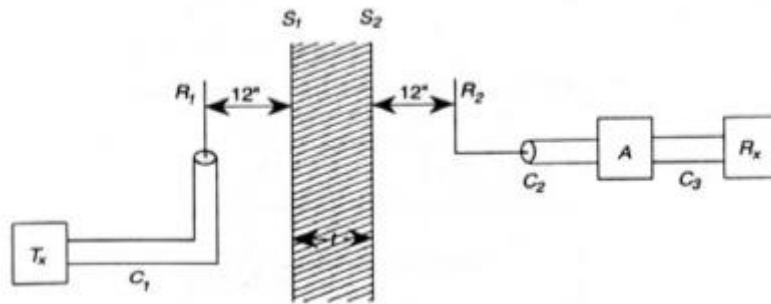
$$Z = \frac{1}{2\pi a s t} \frac{(1+j)\frac{t}{\delta}}{\sinh\left[(1+j)\frac{t}{\delta}\right]} \quad (4.47)$$

όπου δ το επιδερμικό βάθος της θωράκισης. Για χαμηλές συχνότητες $t/\delta \ll 1$, συνεπώς

$$Z = \frac{1}{2\pi a s t} = R_{dc} \quad (4.48)$$

4.6 Μέθοδοι μέτρησης αποτελεσματικότητας μιας θωράκισης

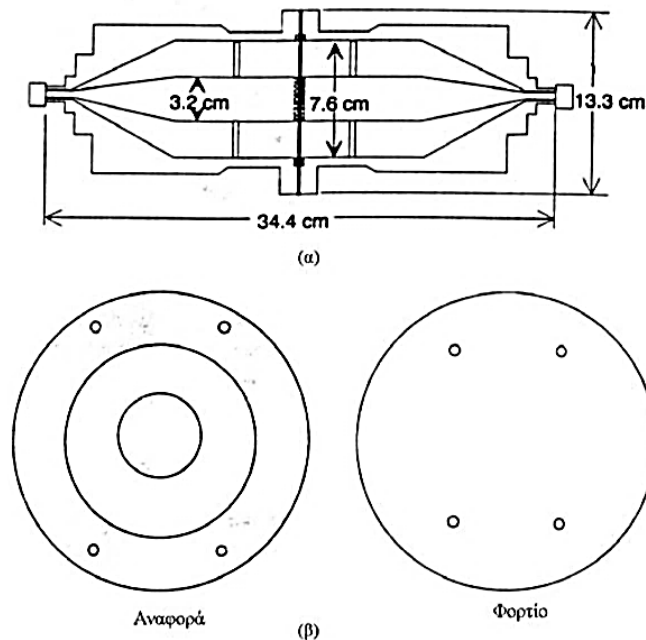
Ένας απλός τρόπος μέτρησης είναι αυτός που η βασική του λειτουργία φαίνεται στο σχήμα 4.20 βάσει των προδιαγραφών MIL STD 285. Υπάρχουν δυο κεραίες, μια για εκπομπή και μια για λήψη. Οι μετρήσεις γίνονται μια φορά με τη θωράκιση και μια χωρίς αυτήν, οπότε και προκύπτουν οι λόγοι των εντάσεων που συνιστούν την αποτελεσματικότητα σε dB. Η μέθοδος αυτή μπορεί να καλύψει ένα εύρος από 100 KHz έως και 10 GHz. Για να είναι ολοκληρωμένη η αξιολόγηση, πρέπει οι μετρήσεις να γίνονται σε διάφορα πεδία, δηλαδή σε μαγνητικό, ηλεκτρικό και επιπέδων κυμάτων. Προσοχή πρέπει να δίνεται σε υψηλές συχνότητες (μεγαλύτερες των 400MHz), για τις οποίες η απόσταση της κεραίας από τη θωράκιση δεν πρέπει να είναι πολύ μικρή, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία παρασιτικών χωρητικοτήτων.



Σχήμα 4.20 Αρχή λειτουργίας της μεθόδου μέτρησης αποτελεσματικότητας. TX, RX πομπός και δέκτης αντίστοιχα και C1, C2, C3 τα προστατευμένα καλώδια.

Μέθοδος ομοαξονικού κελύφους

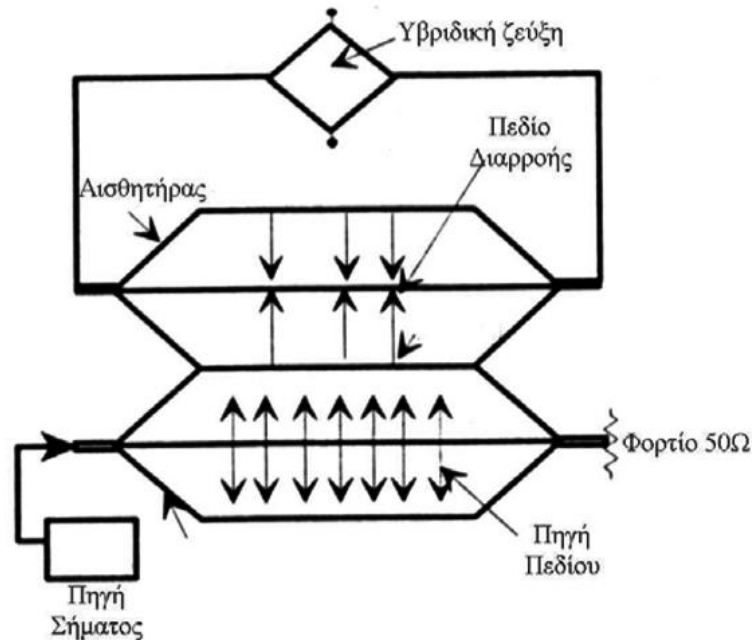
Η διάταξη αυτής της μεθόδου (σχήμα 4.21) μοιάζει με ένα ομοαξονικό καλώδιο. Είναι κυλινδρική και υπάρχει χώρος στο κέντρο για να εισαχθεί το προς εξέταση δείγμα. Εκτός από το δείγμα το οποίο έχει σχήμα δίσκου, υπάρχει και ένας δίσκος αναφοράς. Οι μετρήσεις γίνονται μια φορά με το δείγμα στη θέση του και μια εκτός αυτής.



Σχήμα 4.21: (α) Ομοαξονικός κύλινδρος για μετρήσεις (β) Δίσκος αναφοράς και φορτίου

Μέθοδος TEM κελύφους

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για μετρήσεις κοντινού πεδίου. Η διάταξη που την υλοποιεί φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



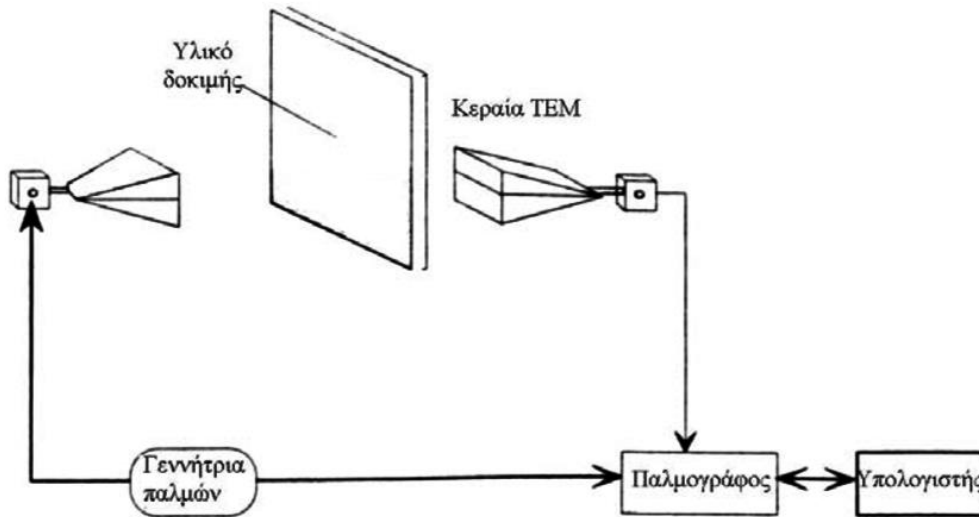
Σχήμα 4.22 Διάταξη TEM για μετρήσεις.

Μέθοδος στην Περιοχή του Χρόνου

Αυτή η μέθοδος υπερτερεί των υπολοίπων για τις υψηλές συχνότητες. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου είναι απλή και φαίνεται στο σχήμα 4.23. Το υλικό που πρόκειται να εξεταστεί είναι σε μορφή φύλλου και τοποθετείται ανάμεσα σε δυο κεραίες εκπομπής και λήψης. Ένας παλμός εκπέμπεται και μετράται το αποτέλεσμα στην κεραία λήψης με και χωρίς τη θωράκιση. Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης είναι

$$SE(dB) = 20 \log \left(\frac{1}{T} \right) \quad (4.49)$$

όπου T ο συντελεστής αλληλεπίδρασης μέσω της θωράκισης. Οι κεραίες πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση τουλάχιστον $\lambda/2\pi$ από το προς εξέταση υλικό (προσέγγιση μακρινού πεδίου).

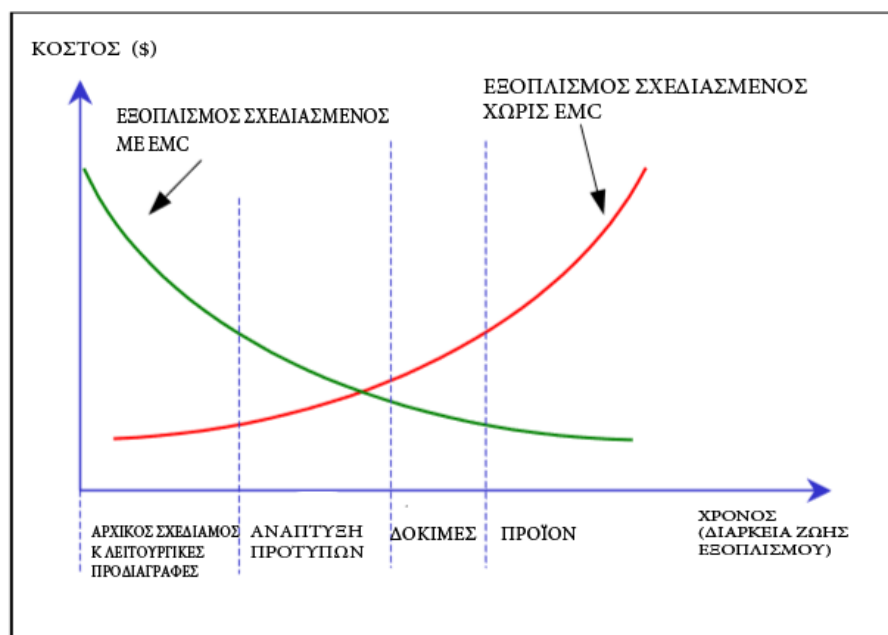


Σχήμα 4.23 Διάταξη μεθόδου στην περιοχή του χρόνου.

Κεφάλαιο 5: EMC σχεδιασμός τυπωμένων κυκλωμάτων PCB

5.1 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα πλακετών pcb

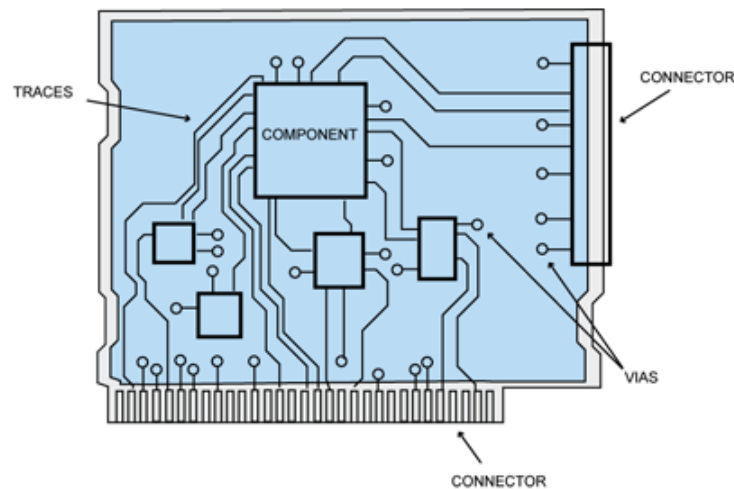
Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα πρέπει να εξετάζεται έγκαιρα από το στάδιο σχεδιασμού κάθε συσκευής. Εάν αυτό αγνοηθεί στην φάση του σχεδιασμού δημιουργούνται προβλήματα κατά την διάρκεια δοκιμών και οι επιδιορθώσεις κοστίζουν πιο ακριβά κυρίως επειδή ο σχεδιασμός είναι λιγότερο εύκαμπτος. Ένα πρόβλημα του θορύβου σε μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος μπορεί να επιδιορθωθεί στο στάδιο της διάταξης με σχετικά μικρό κόστος. Ωστόσο εάν αντιμετωπιστεί μετά την σχεδίαση το κόστος μπορεί να αυξηθεί κατά 10 ή ακόμα και 100 φορές περισσότερο. Το σχήμα 5.1 καταδεικνύει πως η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα που επιτεύχθηκε στο στάδιο του σχεδιασμού είναι ένα κόστος συγκεκριμένο ενώ τα προβλήματα και οι επιδιορθώσεις στην παραγωγή μπορούν να κοστίσουν εξαιρετικά μεγάλα ποσά χρόνου και χρήματος εάν οι μηχανικές αλλαγές είναι απαραίτητες.



Σχήμα 5.1. Συγκριτικό κόστος μεταξύ ενός σχεδιασμένου εξοπλισμού με EMC και χωρίς EMC.

Μερικοί σχεδιασμοί σε κυκλώματα είναι κατασκευασμένοι σε μικροσκοπικά δισκία πυριτίου και άλλοι αποτελούνται από διάφορα εξαρτήματα που είναι συνδεδεμένα με καλώδια. Ωστόσο, τα κυκλώματα που συχνά είναι το κέντρο της προσοχής για EMC ενός μηχανικού, είναι εκείνα που είναι τοποθετημένα σε πλακέτες αγωγίμου υλικού, κυρίως

χαλκού. Πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος παρόμοια με εκείνη που απεικονίζεται στο σχήμα 5.2 μπορεί να βρεθεί σε όλα σχεδόν τα ηλεκτρονικά συστήματα. Τα εξαρτήματα του κυκλώματος με μεταλλικές ακίδες συνδέονται με σχισμές χαλκού. Στην τεχνολογία SMT (Surface Mount) τα εξαρτήματα είναι κολλημένα στην κορυφή ή στο κάτω μέρος μιας πλακέτας. Τα εξαρτήματα με ακίδες κρατιούνται στην πλακέτα από τις ακίδες τους, οι οποίες εκτείνονται μέσω της πλακέτας και συγκολλούνται με σχισμές από την αντίθετη πλευρά.



Σχήμα 5.2 Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος.

Οι πλακέτες μονής στρώσης έχουν όλες τις σχισμές τους δρομολογημένες στη μία πλευρά της πλακέτας. Οι πλακέτες διπλής στρώσης έχουν σχισμές και στις δύο πλευρές. Πολλές πλακέτες έχουν πολλές στρώσεις σχισμών χαλκού και διαχωρίζονται από στρώματα υαλοβάμβακα (ή παρόμοια διηλεκτρικά υλικά). Αυτά αναφέρονται ως πολυστρωματικές πλακέτες. Ο αριθμός των στρωμάτων είναι συνήθως άρτιος. Πλακέτες με τέσσερις στρώσεις είναι πολύ κοινές σε προϊόντα χαμηλού κόστους. Πλακέτες με δεκάδες στρώσεις μερικές φορές χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν πολύπλοκες πλακέτες με υψηλό αριθμό εξαρτημάτων.

Οι πολυστρωματικές πλακέτες έχουν συνήθως ολόκληρα στρώματα με στερεά επίπεδα χαλκού ειδικά για την διανομή της ισχύς τροφοδοσίας στα εξαρτήματα της πλακέτας. Αυτά τα επίπεδα συνήθως ονομάζονται μετά από τις ακίδες εξαρτήματος που είναι συνδεδεμένα. Για παράδειγμα, ένα επίπεδο χαλκού που συνδέει όλες τις ακίδες VCC εξαρτημάτων για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος καλείται συχνά VCC επίπεδο.

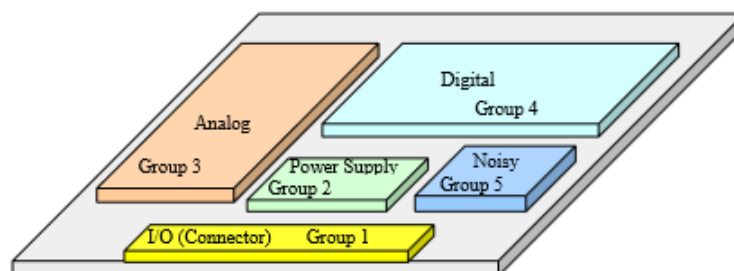
Η τοποθέτηση των εξαρτημάτων και η δρομολόγηση των σχισμών συνήθως παίζουν βασικό ρόλο στον καθορισμό της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας των προϊόντων που απασχολούν τα τυπωμένα κυκλώματα. Οι καλά τοποθετημένες πλακέτες δεν θα εκπέμπουν σημαντικά από μόνες τους και βοηθούν στην ελαχιστοποίηση των ρευμάτων και των πεδίων που θα μπορούσαν να προσθέσουν θόρυβο στα καλώδια ή σε άλλα αντικείμενα της πλακέτας. Μπορούν επίσης να έχουν ρυθμιστεί ώστε να ελαχιστοποιήσουν τις πιθανότητες των εξωτερικών ρευμάτων ή πεδίων, να ενώσουν τις παρεμβολές σημάτων σχετικά με την πλακέτα.

Η προσεκτική πρακτική σχεδίαση των κυκλωμάτων μπορεί να προσφέρει εγγενή ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Παραδείγματα τέτοιων είναι: η αποσύνδεση της ηλεκτρικής ενέργειας και οι I/O γραμμές γείωσης, η παροχή επιλεκτικότητας και περιορισμός της τάσης, διατήρηση την γραμμικότητας, ο περιορισμός στο εύρος ζώνης του σήματος μόνο σε αυτές που απαιτούνται από το κύκλωμα, η χρήση αρνητικής ανάδρασης, η διαμόρφωση στο κύμα ,ο συγχρονισμός, η ανανέωση του κύκλου, και η ανεκτικότητα σε σφάλματα λογισμικού.

5.2 Δομή και συστήματα γείωσης πλακετών

Όταν δημιουργείτε ένα σχηματικό κυκλώματος κάθε εξάρτημα θα πρέπει να έχει το κατάλληλο προσδιοριστικό στοιχείο αναφοράς που το ταυτοποιεί ως μέλος μιας συγκεκριμένης λειτουργικής ομάδας. Αυτό θα εξασφαλίσει τη σωστή τοποθέτηση των εξαρτημάτων του PCB κατά τη διάρκεια της διάταξης.

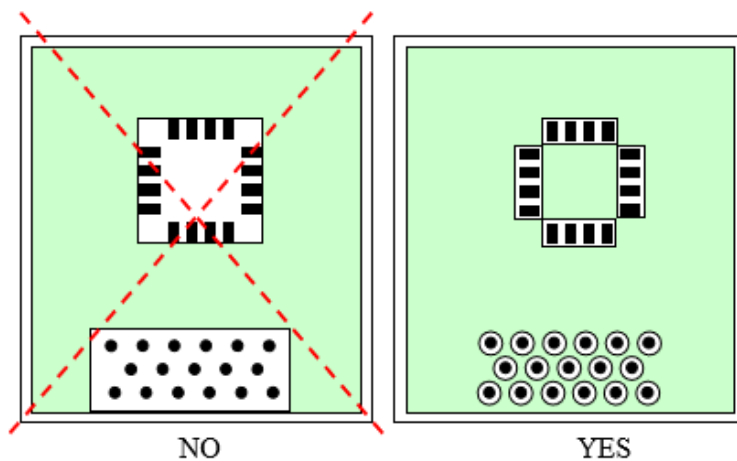
Μια προτεινόμενη διάταξη των λειτουργικών ομάδων στο PCB φαίνεται στο σχήμα 5.3. Όλα τα εξαρτήματα πρέπει να τοποθετούνται με κατάλληλη λειτουργική ομάδα και τα κομμάτια τους να δρομολογούνται εντός της οριοθετημένης περιοχής PCB τους.



Σχήμα 5.3 Διευθέτηση των λειτουργικών ομάδων στο PCB.

Η τοποθέτηση ενός επιπέδου γείωσης κάτω από όλα τα εξαρτήματα και όλα τα συνδεδεμένα στοιχεία τους είναι αναγκαία. Συνιστάται ένα συνεχές επίπεδο γείωσης χωρίς καμία αποφυγή στο ολοκληρωμένο κύκλωμα ή την περιοχή συνδέσεων.

Η μεγιστοποίηση στις περιοχές χαλκού ώστε να παρέχουν χαμηλή αντίσταση για την αποσύνδεση παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, με προσεκτική ρύθμιση των εξαρτημάτων και των συνδέσεων (σχισμών) μπορεί να επιτρέψει μεγάλες περιοχές των PCB να συμπληρωθούν με γείωση.

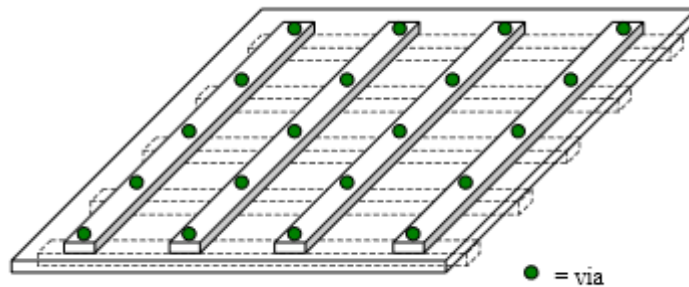


Σχήμα 5.4 Μεγιστοποίηση γείωσης στο PCB

Όλα τα PCBs δύο στρώσεων, όπου το επίπεδο γείωσης δεν είναι εφικτό, θα πρέπει να χρησιμοποιούν ένα σύστημα πλέγματος γείωσης.

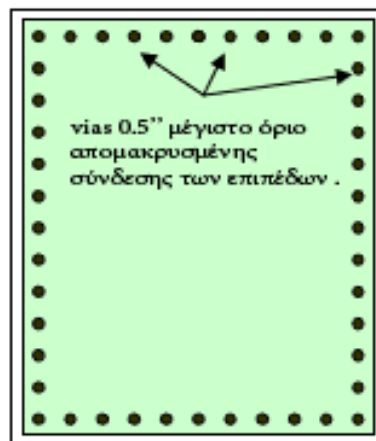
Η άνω και κάτω πλευρά του PCB θα πρέπει να μοιάζει με ένα επίπεδο γείωσης, με οριζόντια κομμάτια γείωσης από τη μία πλευρά, και κάθετα κομμάτια γείωσης από την άλλη πλευρά. Οι σχισμές του δικτύου της γείωσης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο πλατιές και να τοποθετούνται ξεχωριστά όσο το δυνατόν πλησιέστερα. Ένα δίκτυο γείωσης επιτυγχάνεται συνδέοντας κάθετες και οριζόντιες γραμμές στις αντίθετες πλευρές του PCB με ηλεκτρική σύνδεση νίας. Μια σύνδεση Vía είναι μια επιχρυσωμένη τρύπα που συνδέει δύο ή περισσότερα στρώματα PCB. Επιπλέον, PCBs πολλαπλών στρώσεων θα πρέπει να χρησιμοποιούν δίκτυα γείωσης, ακόμη και αν αυτά

χρησιμοποιούν ένα ή περισσότερα επίπεδα γείωσης. Ένα σωστά σχεδιασμένο δίκτυο γείωσης είναι το επόμενο καλύτερο σύστημα γείωσης. (Σχήμα 5.5)



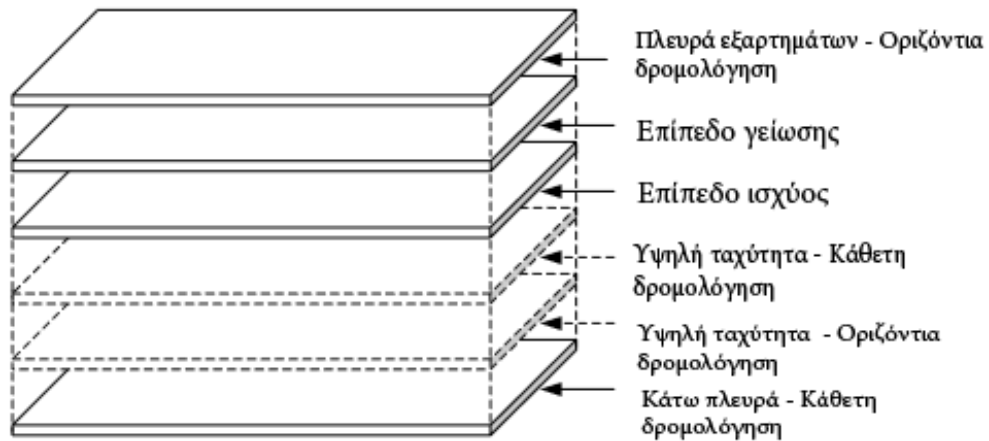
Σχήμα 5.5 Τεχνική δικτύου γείωσης.

Η εγκατάσταση μιας vias γείωσης γύρω από την περίμετρο του PCB κάθε 0,5 ίντσες ή λιγότερο όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. Σύνδεση των vias μαζί με 15 mil (0,4 mm) ελάχιστο πάχος σχισμής σε όλα τα επίπεδα. Αυτό θα βοηθήσει να συμπεριληφθούν συχνότητες έως και 5 GHz στην πλακέτα PCB σχηματίζοντας τον "κλωβό Faraday". Η δρομολόγηση των σχισμών έξω από τα vias της γείωσης δεν πρέπει να επιτρέπεται εκτός από περιπτώσεις συνδέσεων με τον «έξω κόσμος».



Σχήμα 5.6: Σχηματισμός 'Faraday's Cage'

Για πολύ-επίπεδες πλακέτες η συνιστώμενη στρώση φαίνεται στο σχήμα 5.7

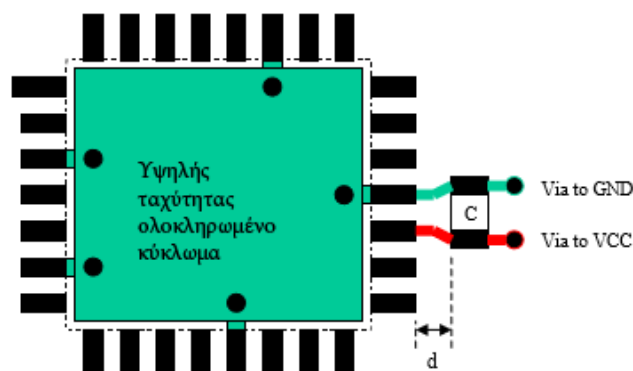


Σχήμα 5.7 Επίπεδα πλακετών pcb.

Σε πλακέτες χωρίς περιοχή γείωσης, δηλαδή διπλής όψης πλακέτες, η τροφοδότηση και οι σχισμές γείωσης θα πρέπει να δρομολογούνται σε διπλανά ή στην κορυφή του ενός ή του άλλου επιπέδου έτσι ώστε να μειώσουν την περιοχή βρόγχου. Σχήμα 5.13

Μία συμπαγή γείωση θα πρέπει να υπάρχει κάτω από όλα τα υψηλής ταχύτητας ολοκληρωμένα κυκλώματα (HSICs) στα επιφανειακά στρώματα, σχήμα 5.8.

Όπου είναι δυνατόν, τοποθετήστε μια γείωση δίπλα σε όλες τις ακίδες της γείωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8. Η συχνή χρήση των vias διασύνδεσης γειώσεων και στις δύο πλευρές του PCB ή σε διαφορετικά στρώματα της πλακέτας μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της αντίστασης RF στο μέρος της γείωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8 Χρήση vias για διασύνδεση γείωσης.

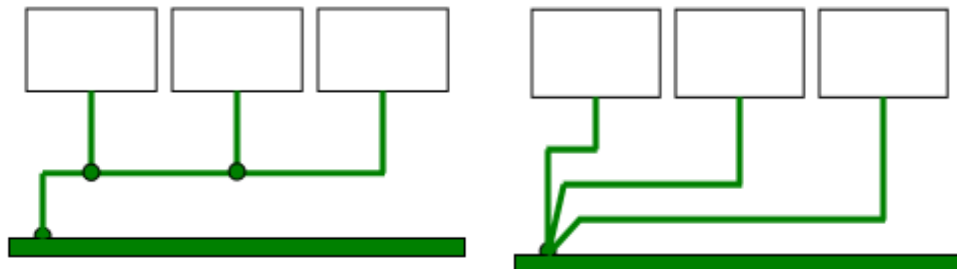
Όλα τα επίπεδα γείωσης, που ανήκουν στον ίδιο δίκτυο, θα πρέπει να είναι αγωγίμα δεμένα μεταξύ τους με συνδέσεις χαμηλής αντίστασης στο pin γείωσης κάθε στοιχείου.

Η γείωση που επιστρέφει από υψηλής συχνότητας ψηφιακά κυκλώματα και χαμηλού επιπέδου αναλογικά κυκλώματα δεν πρέπει να αναμιγνύεται ποτέ. Διασφαλίζοντας ότι τα μονοπάτια επιστροφής γείωσης για την αναλογικά, ψηφιακά ή τα σήματα ισχύς δεν ρέουν μέσω των κυκλωμάτων του άλλου.

Διατηρώντας την γείωση μικρότερη από το ένα εικοστό ($1/20$) του μήκους κύματος μπορεί να αποτρέψει τις υπερβολικές ακτινοβολούμενες εκπομπές και μπορεί να βοηθήσει στο να διατηρηθεί χαμηλή αντίσταση.

Το σύστημα γείωσης ενός σημείου πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για χαμηλά επίπεδα και κυκλώματα χαμηλής συχνότητας (κάτω του 1 MHz).

Το σύστημα γείωσης πολλαπλών σημείων πρέπει να χρησιμοποιείται για κυκλώματα υψηλής συχνότητας (πάνω από 1MHz) για να κρατήσει στη γείωση χαμηλή αντίσταση.

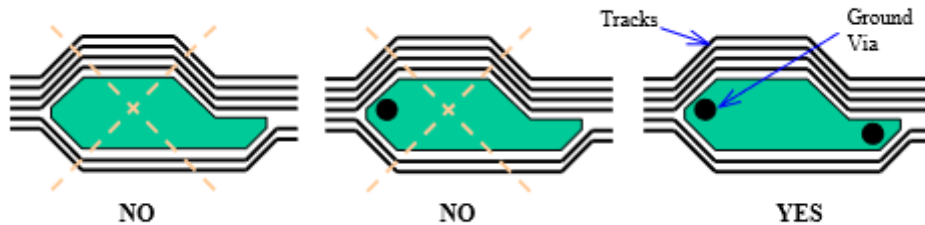


Σχήμα 5.9 Σύστημα γείωσης μονού σημείου (αριστερά) και πολλαπλών σημείων (δεξιά)

Εξασφάλιση ομοιόμορφης κατανομής των ακίδων γείωσης σε όλα τα πεδία ακίδων (συμπεριλαμβανομένων των καλωδίων ή των μηχανισμών της συσκευής) για την πρόληψη αναστάτωσης των τοπικών γειώσεων που οφείλεται σε μεταβατικά ρεύματα. Ο αριθμός των ακίδων του συνδετήρα γείωσης θα πρέπει να καθοριστεί πριν από την έναρξη της διάταξης

Δεν πρέπει να υπάρχουν μέταλλα κάθε είδους κοντά σε PCB. Όλα τα τμήματα γείωσης με αναλογία μήκους προς πλάτος μεγαλύτερο από 10: 1 πρέπει να έχουν, τουλάχιστον,

ένα GND via σε κάθε άκρο που στηρίζει της δομής της γείωσης PCB, όπως στο σχήμα 5.10.

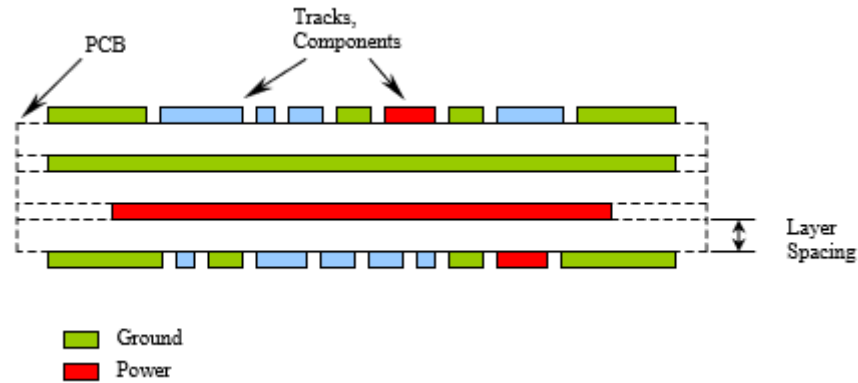


Σχήμα 5.10 Grd via στο κάθε άκρο της δομής της γείωσης.

Για τα PCB χωρίς επίπεδο γείωσης, τουλάχιστον ένα κομμάτι γείωσης -επιστροφής θα πρέπει να δρομολογηθεί δίπλα σε κάθε οκτώ γραμμές διευθύνσεων και δεδομένων για την ελαχιστοποίηση της περιοχής βρόχου. Κρατώντας τις γραμμές όσο το δυνατόν συντομότερες.

Αποφυγή των βρόχων γείωσης. Αυτοί μπορούν να είναι η πηγή ακτινοβολούμενων εκπομπών. Ένα επίπεδο γείωσης ή πλέγμα γείωσης είναι χρήσιμο στην πρόληψη των βρόχων γείωσης, από τη διαμόρφωση. Διακόπτοντας ένα βρόγχο με μικρό άνοιγμα μπορεί να λειτουργήσει σε DC αλλά το χάσμα χωρητικότητας μπορεί να κλείσει αποτελεσματικά το βρόχο σε υψηλότερες συχνότητες, δημιουργώντας μια μεγάλη κεραία βρόχου. Εκτός από τα προβλήματα RE, οι μεγάλοι βρόχοι γείωσης είναι γνωστό ότι κάνουν το σύστημα να είναι ευαίσθητο σε δυσλειτουργία όταν υποβάλλεται σε εξωτερικές πηγές EMI.

Επεκτείνετε τα επίπεδα γείωσης όσο το δυνατόν περισσότερο πέρα από τα όρια των εξαρτημάτων και τα κομμάτια τους και τα επίπεδα τροφοδοσίας, τα επίπεδα γείωσης πρέπει να επεκταθούν πέρα από τα επίπεδα τροφοδοσίας και κάθε ένα από τα κομμάτια τουλάχιστον 20 φορές την απόσταση επιπέδου τους (Σχήμα 5.11).

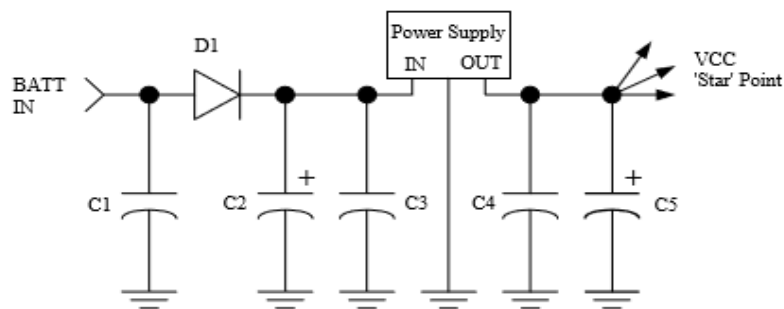


Σχήμα 5.11 Καθιέρωση συνωριακού επιπέδου γείωσης.

Οι παροχές ηλεκτρικού ρεύματος θα πρέπει να βρίσκονται κοντά στο σημείο εισόδου τροφοδοσίας PCB, και όσο το δυνατόν πλησιέστερα στα τροφοδοτούμενα κυκλώματα. Η στενή δρομολόγηση στα κομμάτια (για ελαχιστοποίηση της περιοχής μεταξύ των αγωγών, και ως εκ τούτου της αυτεπαγωγής) θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τη σύνδεση της πηγής ενέργειας στο τοπικό σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι Bulk πυκνωτές πρέπει να είναι πάντα παράλληλα αποσυνδεδεμένοι με έναν ή περισσότερους μικρότερους πυκνωτές υψηλής συχνότητας με χαμηλό ESL (equivalent series inductance). Τοποθετήστε τον πυκνωτή με την μικρότερη τιμή αποσύνδεσης πιο κοντά σε μια συσκευή που θα αποσυνδεθεί.

Η τροφοδοσία πρέπει να διανέμεται με ένα «αστέρι», ή πλέγμα, ή στο επίπεδο διαμόρφωσης τροφοδοσίας, αλλά ποτέ με σημείο προς σημείο (point-to-point) καλωδίωση (αλυσιδωτή σύνδεση). Χρησιμοποιήστε τη θετική πλευρά του πυκνωτή στην έξοδο του ρυθμιστή τάσης, όπως το "αστέρι" σημείο (Σχήμα 5.12).



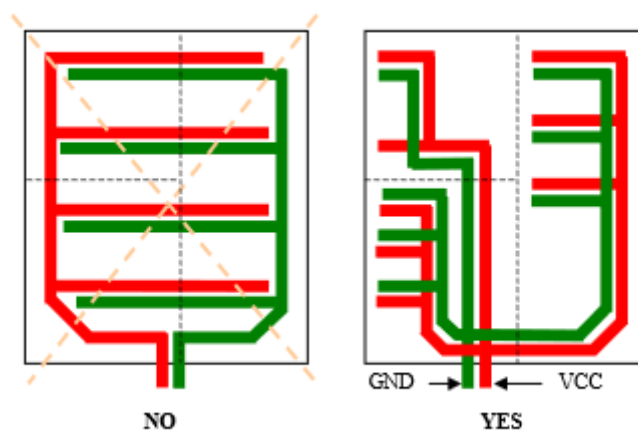
Σχήμα 5.12 Τροφοδοσία με σύστημα Star Point.

Η τιμή του πυκνωτή θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα φορές μεγαλύτερη από το άθροισμα όλων των τιμών των πυκνωτών αποσύνδεσης.

Οι υψηλής συχνότητας και χαμηλής αυτεπαγωγής κεραμικοί πυκνωτές θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την αποσύνδεση ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC) σε κάθε ακροδέκτη τροφοδοσίας χρησιμοποιώντας 0,1 F έως 15 MHz, και 0,01 F πάνω από 15 MHz. Ο πυκνωτής αποσύνδεσης θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά από τον ακροδέκτη τροφοδοσίας IC. Το σύστημα τροφοδοσίας πρέπει να παρέχει αρκετό ρεύμα, εγκαίρως, για να λειτουργήσει σωστά η συσκευή. Αυτό περιλαμβάνει υψηλής αιχμής ισχύουσες απαιτήσεις κατά τη διάρκεια της μεταγωγής εξόδου. Οι τοπικοί διακριτοί πυκνωτές, όταν τοποθετείται δίπλα στη συσκευή και συνδέεται με τροφοδοσία και με συνδέσεις γείωσης χαμηλής αυτεπαγωγής, θα παρέχουν αυτοί το ρεύμα.

Οι σχισμές του τυπωμένου κυκλώματος που μεταφέρουν ρεύμα υψηλής μεταγωγής ρεύματος με γρήγορους χρόνους ανόδου / πτώσης (5 10 ns) θα πρέπει να διατηρηθούν τουλάχιστον 3 mm απόσταση από τα άλλα ίχνη σήματος, τα οποία τρέχουν παράλληλα με αυτούς, ή/και μια σχισμή γείωσης θα πρέπει να τοποθετηθεί ανάμεσα τους.

Αντίστοιχα σήματα τροφοδοσίας και γείωσης θα πρέπει πάντα να δρομολογούνται παράλληλα (δίπλα -δίπλα) ή πάνω από το άλλο (σε παρακείμενα στρώματα) για να ελαχιστοποιηθεί η περιοχή βρόχου μειώνοντας έτσι την αντίσταση βρόγχου (Σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.13 Δρομολόγηση τροφοδοσίας και γείωσης .

Οι VCC σχισμές δεν πρέπει ποτέ να δρομολογούνται παράλληλα με αφιλτράριστες σχισμές που φέρουν: συσσωρευτή, ανάφλεξη, υψηλό ρεύμα, ή σήματα γρήγορης εναλλαγής.

Η τροφοδοσία, η γείωση, και οι σχισμές του σήματος στην πλακέτα θα πρέπει να διατηρηθούν σύντομα και όσο το δυνατόν ευρύτερα. Οι σχισμές πρέπει να είναι μικρότερες από τη διαγώνιο διάσταση της πλακέτας, και η ιδανική αναλογία τους μήκους προς πλάτος θα πρέπει να διατηρούνται σε 10:1.

Η τοποθέτηση σφαιριδίων φερίτη (ferrite beads) σε κομμάτια ισχύος μπορεί να παρέχουν εξασθένηση των ανεπιθύμητων σημάτων πάνω από 1 MHz. Όταν έχουν κατάλληλο μέγεθος, αυτά τα σφαιρίδια μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικά στην απόσβεση της υψηλής συχνότητας μεταγωγής μεταβατικών ή παρασιτικών κλήσεων που οφείλονται σε αντανάκλασεις γραμμών χωρίς να προκληθεί απώλεια DC.

Οι συσκευές ανίχνευσης συσσώρευσης ή ανάφλεξης, όπως οι αντιστάσεις ανίχνευσης, θα πρέπει να τοποθετούνται στο σημείο εισόδου τροφοδοσίας του PCB (κοντά στην υποδοχή I/O).

Συσκευές, όπως δίοδοι Zener, MOV ή transzorbs πρέπει να τοποθετούνται στο σημείο εισόδου τροφοδοσίας του PCB, όπως η λειτουργία τους είναι να περιορίσουν / υπερτάσεις και αιχμές κλιπ, εξασφαλίζοντας σύνδεση χαμηλής αντίστασης της γείωσης .

Παρέχοντας αρκετό ρεύμα αποθήκευσης (πυκνωτή) στην εισερχόμενη γραμμή της μπαταρίας κατά το σχεδιασμό μεταγωγικής τροφοδοσίας και/ή αντλώντας από άλλα κυκλώματα ασυνεχή ρεύματα από την μπαταρία, έτσι ώστε τα ρεύματα αυτά να μην εμφανίζονται στην καλωδίωση όπου μπορούν να δεχθούν ακτινοβολία ή να οδηγηθούν άλλα κυκλώματα.

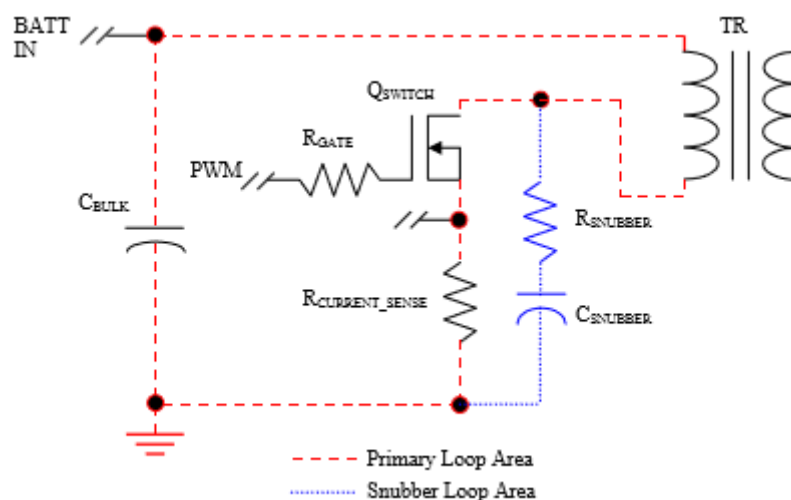
Τα στενά συνδεδεμένα κυκλώματα ισχύος και υψηλού ρεύματος κυκλώματα πρέπει να διατηρούνται χωριστά από τα ψηφιακά κυκλώματα και τα αναλογικά χαμηλού επιπέδου.

Όλες οι σχισμές μεταγωγής ισχύος (SMPS) θα πρέπει να δρομολογούνται σε ένα στρώμα PCB με το επίπεδο αναφοράς SMPS τοποθετημένο απευθείας στο γειτονικό στρώμα για ελαχιστοποίηση της περιοχής βρόχου.

Η ψήκτρα του τρανζίστορ μεταγωγής ισχύος πρέπει να συνδέεται με το ίδιο δυναμικό ως μέρος του τρανζίστορ, είτε τροφοδοσίας είτε γείωσης. Μερικές φορές η ψήκτρα δεν είναι άμεσα συνδεδεμένη με το τρανζίστορ μεταγωγής ισχύος, αλλά είναι μονωμένο από αυτό με ένα διηλεκτρικό υλικό. Αυτό παράγει μια παρασιτική χωρητικότητα μεταξύ του τρανζίστορ ισχύος και την ψήκτρα. Η τοποθέτηση ψήκτρας σε ένα επίπεδο αναφοράς, εκτός από την τροφοδοσία ή την γείωση που χρησιμοποιείται από το τρανζίστορ ισχύος μπορεί να παρέχει μια διαδρομή για ρεύματα κοινής λειτουργίας .

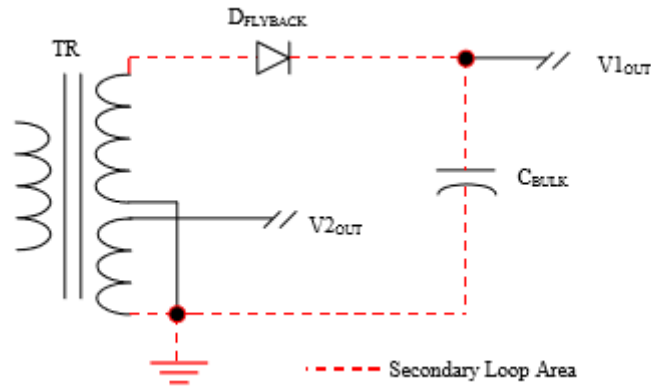
Η περιοχή βρόχου του Switching Mode Power Supply (SMPS) κυκλώματος απόσβεσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.

Η κύρια περιοχή βρόχου SMPS που χρησιμοποιεί ένα μετασχηματιστή θα πρέπει να ελαχιστοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο (Σχήμα 5.14). Ο βρόχος περιλαμβάνει το θετικό καλώδιο του πυκνωτή, τις κύριες περιελίξεις του μετασχηματιστή, το συλλέκτη ή την διαρροή του τρανζίστορ μεταγωγής, η την τρέχουσα αντίσταση, το καλώδιο γείωσης της τρέχουσας αντίστασης, και το καλώδιο γείωσης του πυκνωτή.



Σχήμα 5.14 Κύρια περιοχή βρόχου

Η δευτερεύουσα περιοχή του κυκλώματος SMPS που χρησιμοποιεί ένα μετασχηματιστή θα πρέπει να ελαχιστοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο (Σχήμα 5.15). Ο βρόχος περιλαμβάνει την θετική πλευρά των δευτερευόντων τυλιγμάτων του μετασχηματιστή, την σειριακή δίοδο, τον πυκνωτή, το καλώδιο γείωσης του πυκνωτή, και την πλευρά της γείωσης της δευτερεύουσας περιέλιξης του μετασχηματιστή.

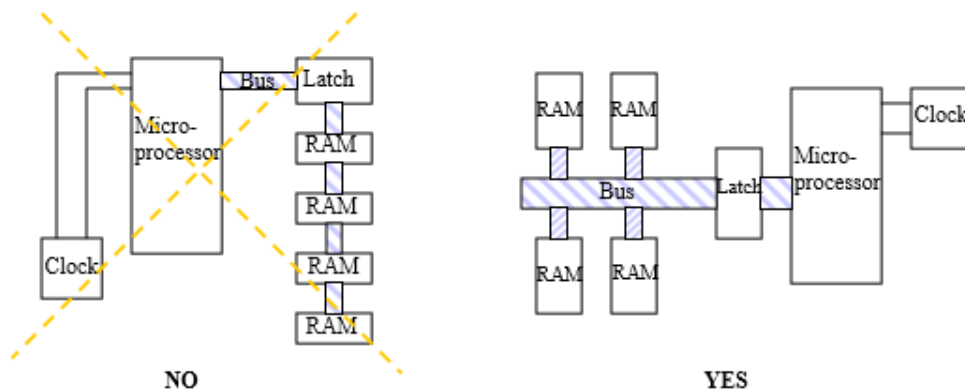


Σχήμα 5.15 Δευτερεύουσα περιοχή βρόχου.

5.3 EMC σε ψηφιακά κυκλώματα

Οι συνδέσεις στο ψηφιακό ρολόι θα πρέπει να είναι οι πρώτες που δρομολογούνται, και θα πρέπει να λειτουργούν σε ένα ενιαίο στρώμα PCB δίπλα σε ένα επίπεδο γείωσης.

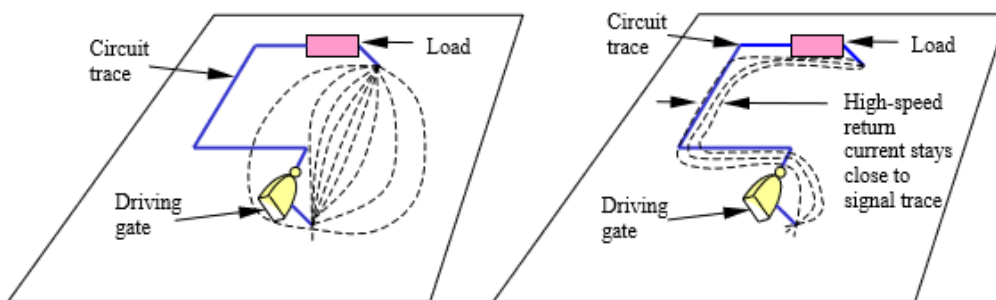
Όλα όπως το ρολόι / οι διευθύνσεις / οι συνδέσεις data bus θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν σύντομα και άμεσα με τα γειτονικά κομμάτια γείωσης ή το επίπεδο γείωσης (Σχήμα 5.16). Αποφύγετε τη χρήση καλωδίων, αποκόμματα ή κορδέλες καλωδίων για τη διανομή των σημάτων ρολογιού.



Σχήμα 5.16 Ελαχιστοποίηση μήκους ψηφιακού data bus.

Τα ψηφιακά σήματα υψηλής ταχύτητας, όπως τα δεδομένα, η διεύθυνση και οι γραμμές ελέγχου μικροεπεξεργαστών, θα πρέπει να ομαδοποιηθούν και να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο μακριά από την υποδοχή I/O.

Πάντα διευθύνουμε τα μέρη του σήματος και τις συνδεδεμένες γειώσεις επιστροφής τους όσο το δυνατόν πιο κοντά το ένα στο άλλο για ελαχιστοποίηση της περιοχής βρόχου (loop) που περικλείεται από τη ροή ρεύματος (Σχήμα 5.17).



Σχήμα 5.17 Σε χαμηλές συχνότητες το ρεύμα ακολουθεί την διαδρομή με την ελάχιστη αντίσταση (αριστερά), σε υψηλές συχνότητες το ρεύμα ακολουθεί την διαδρομή με την ελάχιστη αυτεπαγωγή (δεξιά).

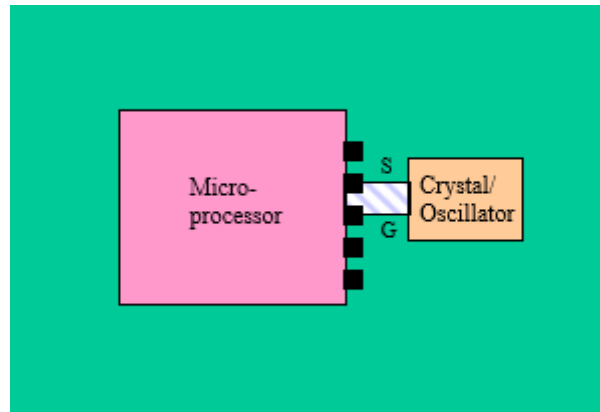
Αποφυγή της λειτουργίας των σχισμών εκτός από τη γείωση δίπλα ή κάτω από τους κρυστάλλους, ή οποιαδήποτε άλλα θορυβώδες κυκλώματα.

Οι ταλαντωτές και το ρολόι τοποθετούνται μακριά από τις IC I/O συνδέσεις και κοντά στα τσιπ που εξυπηρετούν, για να κρατηθεί ο χώρος βρόχου μικρός.

Πάντα επιλέγετε η χαμηλότερη συχνότητα ρολογιού και η πιο αργή άνοδος και πτώση χρόνου για τα ψηφιακά σήματα που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του συστήματος.

Όλα τα κρίσιμα δίκτυα, όπως ρολόγια κ.λπ., θα πρέπει να κατευθύνονται δίπλα στα κομμάτια γείωσης ή του επιπέδου γείωσης.

Οι κρύσταλλοι και τα αντηχεία τοποθετούνται όσο το δυνατόν πιο κοντά στη συσκευή που εξυπηρετούν, και ιδανικά στην ίδια πλευρά του PCB. Ελαχιστοποιούμε την απόσταση μεταξύ του ταλαντωτή και το IC (Σχήμα 5.18).



Σχήμα 5.18 Τοποθέτηση κρυστάλλων και ταλαντωτή.

Η τοποθέτηση RF φίλτρων μπροστά από εξαρτήματα όπως δίοδοι, κρυσταλλολυχνίες, ολοκληρωμένα κυκλώματα μπορεί να αποτρέψει την ραδιοσυχνότητα από το να μετατραπεί σε DC ή σε σήματα διαταραχής χαμηλής συχνότητας.

Η χρήση terminators (αντιστάσεις) για τις σχισμές των οποίων το μήκος υπερβαίνει το διπλάσιο του χρόνου ανόδου του σήματος μπορεί να εμποδίσει ανακλάσεις σε κάθε άκρο της γραμμής μετάδοσης.

Για μεγάλους δίαυλους, διατηρούμε τις σχισμές υψηλής ταχύτητας χωριστά από τα σήματα χαμηλής ταχύτητας με την προσθήκη επιπλέον απόστασης μεταξύ των σημάτων υψηλής και χαμηλής ταχύτητας, και εκτελώντας σήματα υψηλής συχνότητας, δίπλα σε μια σχισμή γείωσης .

Όλες οι γραμμές διαφορικού σήματος θα πρέπει να δρομολογούνται η μια δίπλα στην άλλη για να επωφεληθούν πλήρως από το μαγνητικό πεδίο ακύρωσης. Τοποθετούμε τις σχισμές της προστατευτικής γείωσης και στις δύο πλευρές σε όλο το μήκος των διαφορικών ζευγών σημάτων.

Δρομολογώντας τα κομμάτια του σήματος κάθετα (90μοίρες) το καθένα σε γειτονικά στρώματα του τυπωμένου κυκλώματος μπορεί να βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων παρεμβολών.

Ο έλεγχος της ανόδου και του χρόνου πτώσης, ο κύκλος, και η θεμελιώδης συχνότητα της μεταγωγής σημάτων μπορούν να βοηθήσουν στην ελαχιστοποίηση του διπλασιασμού συχνότητας .

Όλες οι αχρησιμοποίητες είσοδοι IC πρέπει να τερματίζονται για να αποτρέψουν την ακούσια τυχαία εναλλαγή και την παραγωγή θορύβου δηλαδή οι τερματισμένοι είσοδοι CMOS τείνουν να αυτό-πολωθούν σε μια γραμμική περιοχή λειτουργίας, αυξάνοντας σημαντικά το συνεχές ρεύμα.

Κρατάμε τις σχισμές υψηλής ταχύτητας μακριά από την άκρη του PCB

5.4 EMC σε αναλογικά κυκλώματα

Τα αναλογικά κυκλώματα θα πρέπει να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην υποδοχή I/O, και να φυλάσσονται μακριά από τα υψηλής ταχύτητας ψηφιακά κυκλώματα, τα υψηλής τάσης ή τα μεταγωγής ισχύος κυκλώματα. (Σχήμα 5.3).

Η δρομολόγηση των αναλογικών σημάτων χαμηλού επιπέδου θα πρέπει να περιορίζεται μόνο στο αναλογικό τμήμα του PCB.

Το φιλτράρισμα χαμηλής διελεύσεως θα πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται σε όλες τις αναλογικές εισόδους.

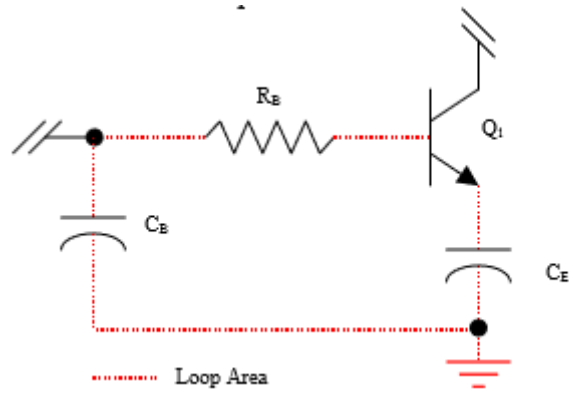
Οι σχισμές του τυπωμένου κυκλώματος οι οποίες καταλήγουν στο φινις της συσκευής θα πρέπει να αποσυνδεθούν από την RF στο φινις.

Τα κομμάτια προστατευτικής γείωσης θα πρέπει πάντα να δρομολογούνται δίπλα σε αναλογικά σήματα. Συνδέουμε τα κομμάτια γείωσης και στα δύο άκρα με νίαι για την αποστολή και λήψη της γείωσης του κυκλώματος.

Εάν ένα σήμα PWM χρησιμοποιείται για να οδηγήσει ένα σωληνοειδές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αντίσταση καταστολής. Αυτό θα αποτρέψει τον υψηλό ρυθμό μεταβολής του ρεύματος (di / dt), ο οποίος μπορεί να προκαλέσει υπερβολική ακτινοβολία στο μαγνητικό πεδίο.

Η πόλωση στις αντιστάσεις όταν τοποθετείται όσο το δυνατόν πιο κοντά στη βάση των τρανζίστορ μπορεί να αποτρέψει την RF από την σύνδεση και ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί το τρανζίστορ. (Σχήμα 5.19)

Η βάση και οι πυκνωτές θα πρέπει να βρίσκονται πολύ κοντά στα τρανζίστορ. Θα πρέπει να συνδέονται με τη γείωση με χαμηλή αντίσταση σύνδεσης για την ελαχιστοποίηση αυτεπαγωγής και περιοχής βρόχου.



Σχήμα 5.19 Κύκλωμα δρομολόγησης τρανζίστορ.

Κάθε σχισμή που μεταφέρει ευαίσθητα σήματα (κυρίως σε φορτία υψηλής σύνθετης αντίστασης εισόδου, δηλαδή μεγαλύτερη από 10 k Ω) αντιμετωπίζεται ως κεραία λήψης κατά την εξέταση της δρομολόγησης.

Κεφάλαιο 6: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών EMI

6.1 Μετρήσεις EMI στο πεδίο του χρόνου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τεχνικές μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) ευρείας ζώνης στο πεδίο του χρόνου. Τα συστήματα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου είναι βασισμένα στην μετατροπή ευρείας ζώνης από αναλογικό σε ψηφιακό και στην επακόλουθη διαδικασία ψηφιακής επεξεργασίας πραγματικού χρόνου των μετρήσεων των παρεμβολών EMI των σημάτων. Αυτό μας επιτρέπει να μειώνονται οι χρόνοι μέτρησης κατά αρκετές τάξεις μεγέθους. Τα σύγχρονα συστήματα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου για τις ζώνες συχνοτήτων έως 18 GHz και οι αρχές λειτουργίας τους παρουσιάζονται στην συνέχεια. Όπως οι συμβατικοί δέκτες EMI, τα συστήματα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου διευκολύνουν τη μέτρηση του μέσου όρου, της μέσης τετραγωνικής ρίζας, και των τιμών κορυφών των παρεμβολών EMI. Επιπλέον, τα συστήματα μέτρησης ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στο πεδίο του χρόνου επιτρέπουν τη μέτρηση φάσματος -φάσης, φάσματος σύντομου χρόνου και την εκτέλεση στατιστικής ανάλυσης των μετρούμενων σημάτων.

Όροι και ορισμοί

Στην συνέχεια παρουσιάζονται μερικοί όροι και ορισμοί που έχουν σημασία στο πλαίσιο των μετρήσεων παρεμβολών EMI:

- Το εύρος ζώνης B_n είναι το διάστημα συχνοτήτων μεταξύ δύο σημείων μιας εξασθένησης των n dB. Οι ορισμοί αναφέρονται συνήθως στα 6 dB σε εύρος ζώνης B_6 .
- Μια περιοχή παρόρμησης, που ονομάζεται επίσης δύναμη παρόρμησης IS , ορίζεται για την τάση παρόρμησης σημάτων $V(t)$ ως:

$$IS = \int_{-\infty}^{\infty} V(t) dt \quad (6.1)$$

Η περιοχή παρόρμησης εκφράζεται είτε σε $\mu V s$ ή dB. Η φασματική πυκνότητα, που εκφράζεται σε $\mu V / MHz$ ή dB ($\mu V / MHz$) σχετίζεται με την περιοχή παρόρμησης. Για ορθογώνιες παρορμήσεις με πλάτος παλμού T και ποσοστά παλμού $f < 1/T$ η σχέση δίνεται από $D (\mu V / MHz) = \sqrt{2} \times 10^6 IS (\mu V s)$.

- Το εύρος ζώνης παρόρμησης B_{imp} ενός δέκτη ορίζεται ως:

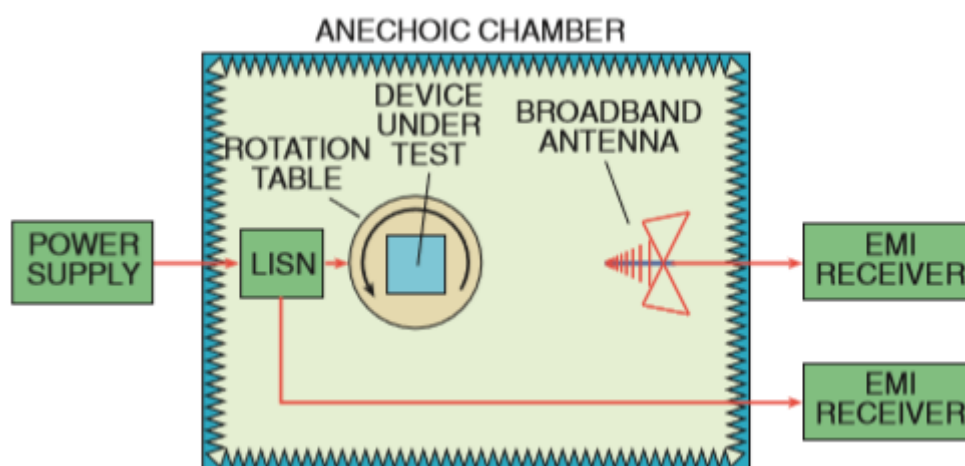
$$B_{imp} = \frac{A(t)_{max}}{2G_0IS} \quad (6.2)$$

όπου $A(t)_{max}$ είναι η μέγιστη τιμή του σήματος $A(t)$ στην ενδιάμεση συχνότητα εξόδου (IF) του δέκτη της EMI. Το IS αναφέρεται στο σήμα εισόδου $V(t)$ του δέκτη και G_0 είναι το κέρδος από την είσοδο δέκτη στην IF έξοδο. Το εύρος ζώνης παρόρμησης B_{imp} σχετίζεται στα 3 dB σε εύρος ζώνης B_3 και στα 6 dB σε εύρος ζώνης B_6 από

$$B_{imp} = 1.05B_3 = 1.31B_6 \quad (6.3)$$

6.2 Βασικές αρχές και πρότυπα μετρήσεων EMI

Για την μέτρηση φάσματος EMI σε μια ευρεία ζώνη συχνοτήτων και με υψηλή φασματική ανάλυση χρησιμοποιούνται οι αναλυτές φάσματος ή οι δέκτες EMI. Γίνεται διάκριση στις επαγόμενες και τις ακτινοβολούμενες εκπομπές. Η διεθνής ειδική επιτροπή ραδιοπαρεμβολών (CISPR), ορίζει ένα όριο για τις επαγόμενες εκπομπές οι οποίες, σε κάθε σύνδεση εξωτερικών γραμμών δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν ένα προσδιοριζόμενο όριο. Για τις μετρήσεις επαγόμενων εκπομπών, η υπό δοκιμή συσκευή ή σύστημα είναι συνδεδεμένο με τον δέκτη EMI μέσω καλωδίου. Για ακτινοβολούμενες εκπομπές η υπό δοκιμή συσκευή ή το σύστημα τοποθετείται είτε σε έναν κενό χώρο δοκιμών, ή σε ένα εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κελί (TEM-κυτάρων), ή μέσα σε έναν ανηχικό θάλαμο. Η CISPR καταγράφει τα όρια της ραδιο διαταραχής του πεδίου που εκπέμπονται από τον δέκτη EMI στην περιοχή συχνοτήτων από 9 kHz έως 18 GHz



Σχήμα 6.1 Διάταξη μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

Το σχήμα 6.1 δείχνει μια διάταξη δοκιμής μέτρησης EMI σε έναν ανηχωικό θάλαμο. Η εσωτερική πλευρά των μεταλλικών τοιχωμάτων διαλογής του θαλάμου συνήθως καλύπτεται αρχικά με πλάκες φερρίτη και πάνω σε αυτές υπάρχει υλικό απορρόφησης υψηλής συχνότητας. Η υπό δοκιμή συσκευή ή το σύστημα, τοποθετείται σε ένα τραπέζι περιστροφής, έτσι ώστε να μπορεί να ελέγχεται κάθε γωνιακή του θέση.

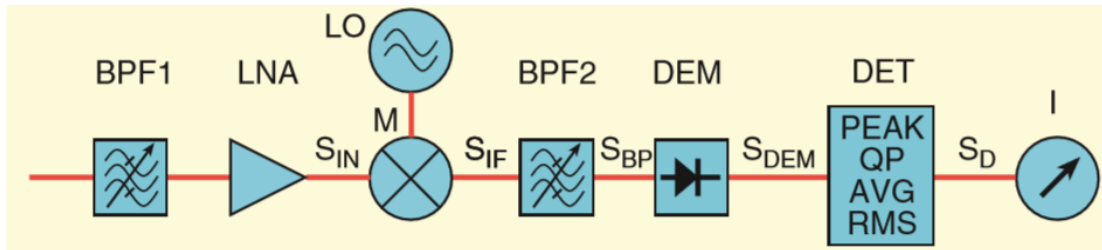
Η EMI επαγωγής μετριέται μέσω μιας γραμμής αντίστασης ενός δικτύου σταθεροποίησης (Line impedance stabilization network). Το LISN είναι ένα χαμηλοπερατό φίλτρο δικτύου που παρέχει μια γνωστή σύνθετη αντίσταση της γραμμής ισχύος για τη συνδεδεμένη υπό δοκιμή συσκευή, εμποδίζει τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που προέρχονται από τη γραμμή τροφοδοσίας, και μεταφέρει τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από την υπό δοκιμή συσκευή στον δέκτη EMI. Η διαταραχή επαγόμενης τάσης συνήθως μετριέται στο φάσμα συχνοτήτων από 9 kHz έως 30 MHz. Η εκπεμπόμενη EMI λαμβάνεται από μια κεραία ευρείας ζώνης και τροφοδοτείται σε ένα δέκτη EMI. Η εκπεμπόμενη EMI μετριέται συνήθως στο εύρος από 30 MHz έως 1 GHz.

6.3 Μετρήσεις EMI στο πεδίο της συχνότητας

Από τα μέσα του τριάντα του περασμένου αιώνα η παραδοσιακή μέθοδος για τη διεξαγωγή μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής βασίζεται στη χρήση με δέκτες παρεμβολών EMI που λειτουργούν στο πεδίο συχνότητας. Η απαιτούμενη ανάλυση συχνότητας επιτυγχάνεται με ένα ζωνοπερατό φιλτράρισμα του σήματος παρεμβολής. Οι μετρήσεις σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα EMC πρέπει να εκτελούνται διαδοχικά σε αρκετές χιλιάδες θέσεις συχνότητας. Λόγω του χρόνου παραμονής αρκετών δευτερολέπτων σε κάθε σημείο συχνότητα ο πλήρης χαρακτηρισμός μιας συσκευής υπό δοκιμή μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες. Αυτοί οι δέκτες EMI εκτελούν ένα φιλτράρισμα ευρείας ζώνης του σήματος EMI και μια μετατροπή σε μία ενδιάμεση συχνότητα. Το σήμα αναδιαμορφώνεται και αξιολογείται με διάφορους τρόπους ανίχνευσης, π.χ. τον μέσο όρο, την τετραγωνική ρίζα, τη μέγιστη κορυφή της ανίχνευσης.

Το σχήμα 6.2 δείχνει το σχηματικό διάγραμμα ενός συμβατικού δέκτη EMI. Το σήμα EMI είναι φιλτραρισμένο με το προεπιλογής RF φίλτρο συχνοτήτων εύρους ζώνης BPF1, ενισχυμένο στους ενισχυτές χαμηλού θορύβου LNA δίνοντας το σήμα με φάσμα SIN τροφοδοτούμενο στον μίκτη σημάτων M, όπου υπερτίθεται το σήμα από τον τοπικό ταλαντωτή LO με συχνότητα f_{LO} . Το ενδιάμεσο σήμα εξόδου συχνότητας του μίκτη M

είναι φιλτραρισμένο σε ένα ζωνοπερατό φίλτρο ευρείας ζώνης BPF2. Το ζωνοπερατό φίλτρο καθορίζει το εύρος ζώνης και τα γραμμικά χαρακτηριστικά μεταφοράς του σήματος του δέκτη EMI. Στον αποδιαμορφωτή, το σήμα $S_{IF}(f)$ είναι διορθωμένο και από έναν ολοκληρωτή ή ένα χαμηλοπερατό φίλτρο, περιορίζεται στη ζώνη βάσης, η οποία έχει το μισό πλάτος της ζώνης IF. Ο ανιχνευτής DET επεξεργάζεται περαιτέρω το σήμα εξόδου $S_{DEM}(f)$ του αποδιαμορφωτή. Αυτή η τιμή εμφανίζεται από την κρίσιμη μηχανική απόσβεση στην μέτρησης I.



Σχήμα 6.2: Σχηματικό διάγραμμα ενός δέκτη EMI.

Παρακάτω εξετάζεται η επεξεργασία σήματος του δέκτη EMI στο αναλογικό πεδίο συχνοτήτων. Το φάσμα του σήματος εξόδου μίκτη είναι:

$$S_{IF}(f) = S_{IN}(f - f_{LO}) \quad (6.4)$$

Το σήμα εξόδου του μίκτη είναι φιλτραρισμένο στο ζωνοπερατό φίλτρο BPF2 με την συνάρτηση μεταφοράς $H_{BP}(f)$:

$$S_{BP}(f) = H_{BP}(f)S_{IF}(f) \quad (6.5)$$

Το ζωνοπερατό φίλτρο BPF2 καθορίζει το εύρος ζώνης του δέκτη EMI. Οι απαιτήσεις εύρους ζώνης σύμφωνα με την επιτροπή CISPR εξαρτώνται από τη ζώνη συχνοτήτων. Το εύρος ζώνης πρέπει να είναι εντός των τιμών που δίνονται στον Πίνακα 1.

| Band | Frequency Range | 6 dB Bandwidth B_6 |
|---------|------------------|----------------------|
| A | 9 kHz – 150 kHz | 200 Hz |
| B | 150 kHz – 30 MHz | 9 kHz |
| C and D | 30 MHz – 1 GHz | 120 kHz |
| E | 1 GHz – 18 GHz | 1 MHz |

Πίνακας 1: Απαιτήσεις εύρους ζώνης σύμφωνα με την CISPR

Στην περίπτωση γραμμικής μέσης τιμής αποδιαμορφωτή, η απόλυτη τιμή του SBE (t) διαμορφώνεται και υπολογίζεται κατά μέσο όρο σε ένα χρονικό διάστημα από (t-Δt) σε t. Στην περίπτωση αυτή το σήμα εξόδου SDEM (t) του ανιχνευτή D δίνεται από

$$s_{DEM}^{ml}(t) = \int_{t-\Delta t}^t |s_{BP}(t_1)| dt_1 \quad (6.6)$$

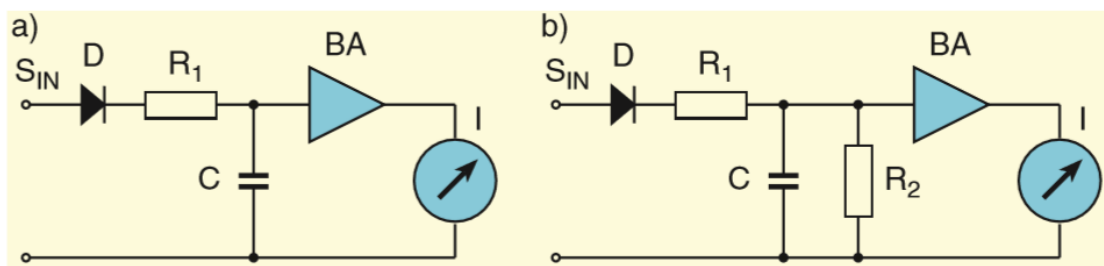
Στον κανόνα τετραγωνικής μέσης τιμής αποδιαμορφωτή το σήμα τετραγωνίζεται και υπολογίζεται κατά μέσο όρο στο χρονικό διάστημα από (t-Δt) σε t, αποδίδοντας το σήμα εξόδου του ανιχνευτή.

$$s_{DEM}^{sl}(t) = \int_{t-\Delta t}^t s_{BP}(t_1)^2 dt_1 \quad (6.7)$$

Στην περίπτωση της επεξεργασίας αναλογικού σήματος η μέση τιμή συνήθως εκτελείται με αναλογικούς ολοκληρωτές υλοποιημένους με κυκλώματα RC. Εάν η λειτουργία παλμικής απόκρισης του αναλογικού ολοκληρωτή δίνεται από $h_{int}(t)$, τα σήματα εξόδου $s_D^{ml}(t)$ του γραμμικού αποδιαμορφωτή και $s_D^{sl}(t)$ για τον κανόνα τετραγώνου αποδιαμορφωτή δίνονται από:

$$s_D^{ml}(t) = \int_{-\infty}^t |s_{BP}(t_1)h_{int}(t-t_1)| dt_1 \quad (6.8)$$

$$s_D^{sl}(t) = \int_{-\infty}^t s_{BP}(t_1)^2 h_{int}(t-t_1) dt_1 \quad (6.9)$$



Σχήμα 6.3 Αναλογικό κύκλωμα ενός (a) ανιχνευτή ‘peak’ και (b) ενός ανιχνευτή ‘quasi-peak’.

Οι δέκτες μέτρησης EMI περιλαμβάνουν τις ακόλουθες λειτουργίες του ανιχνευτή:

- Ο ανιχνευτής ‘peak’ έχει μια ικανότητα συγκράτησης μιας τιμής κορυφής. Το σχήμα 6.3 (α) δείχνει τη αναλογικό κύκλωμα μέγιστης συγκράτησης υλοποιημένο από έναν τέτοιο

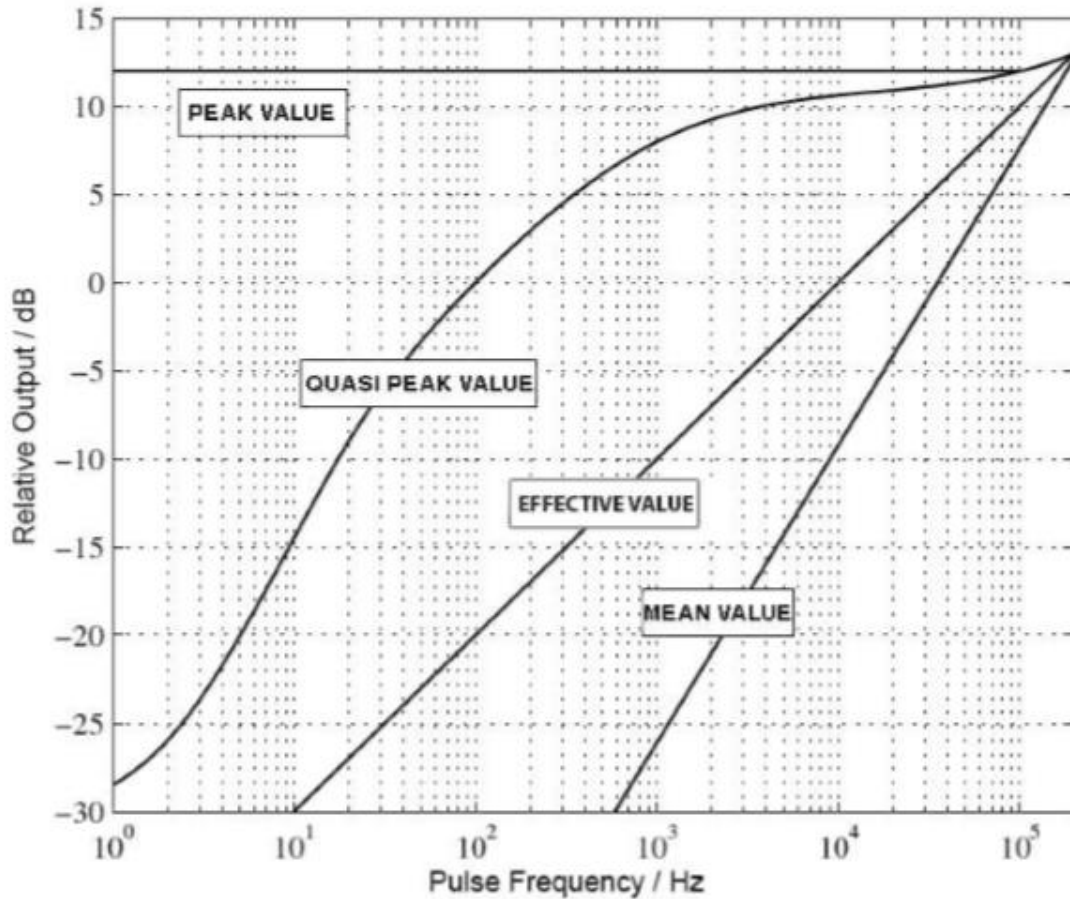
ανιχνευτή. Το κύκλωμα RC που σχηματίζεται από τα R1 και C επιδεικνύει μια σταθερά χρόνου

$$\tau_c = \frac{1}{R_1 C} \quad (6.10)$$

Το σήμα εισόδου SIN(t) φορτώνει τον πυκνωτή C με σταθερό χρόνο τ_c . Ο σταθερός χρόνος φόρτισης είναι ο χρόνος που περνά μέχρις ότου το σήμα εξόδου του ανιχνευτή φθάσει το 63% της τελικής του τιμής μετά, με ένα βήμα μετάβασης, ένα συνεχές σήμα κύματος RF εφαρμόζεται στην είσοδο του δέκτη EMI. Δεδομένου ότι ο ενισχυτής ρύθμισης BA έχει μια σύνθετη αντίσταση εισόδου κατά αρκετές τάξεις μεγέθους υψηλότερη από ότι το R1, ο πυκνωτής C κρατά την τιμή κορυφής της τάσης για μεγάλο χρονικό διάστημα που υποδηλώνει την τιμή κορυφής που μετράται επί μακρό χρονικό διάστημα του σήματος παρεμβολής. Επιπλέον, θα πρέπει να εξετασθεί μια σταθερά χρόνου t_m της κρίσιμης μηχανικής απόσβεσης της συσκευής που φαίνεται στην μέτρηση I. Προκειμένου να ληφθεί μια ένδειξη απόκλισης του μετρητή εντός του 10% της πραγματικής αξίας με ρυθμό επανάληψης παλμού 1 Hz, η αναλογία χρόνου φόρτισης και σταθεράς τ_c χρόνου εκφόρτισης πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από τις τιμές που αναγράφονται στον πίνακα 2.

| Band | Frequency Range | Minimum τ_d/τ_c |
|---------|------------------|-------------------------|
| A | 9 kHz – 150 kHz | 1.89×10^4 |
| B | 150 kHz – 30 MHz | 1.25×10^6 |
| C and D | 30 MHz – 1 GHz | 1.67×10^7 |
| E | 1 GHz – 18 GHz | 1.34×10^8 |

Πίνακας 2: Η ελάχιστη αναλογία φόρτισης και σταθεράς τ_c χρόνου εκφόρτισης σε κάθε εύρος συχνότητας.



Σχήμα 6.4 καμπύλες παλμών απόκρισης από τους δέκτες EMI

Το σχήμα 6.4 δείχνει τις καμπύλες απόκρισης παλμού ενός δέκτη EMI στους διάφορους τρόπους ανίχνευσης. Στη λειτουργία ανίχνευσης 'peak', η μέγιστη τιμή των παρορμητικών διαταραχών μπορεί να μετρηθεί ακόμη και αν ρυθμός επανάληψης παλμών EMI είναι πολύ χαμηλός.

• Ο ανιχνευτής 'quasi-peak' που προβλέπεται από την επιτροπή CISPR και οι διαδικασίες μέτρησης FCC είναι παρόμοια με ένα κύκλωμα μέγιστης συγκράτησης RC, αλλά εμφανίζει μια ορισμένη σταθερά χρόνου εκφόρτισης τ_c . Το αναλογικό κύκλωμα του ανιχνευτή μέγιστης κορυφής φαίνεται στο Σχ. 5 (β). Ο ανιχνευτής 'quasi-peak' φορτίζεται σε συνεχή χρόνο t_C και να αποφορτίζεται σε σταθερό χρόνο t_d που δίνεται από:

$$\tau_d = \frac{1}{R_2 C} \quad (6.11)$$

Τα χαρακτηριστικά των δεκτών κορυφής συνοψίζονται στον Πίνακα 3.

• Ο ανιχνευτής μέσης τιμής διαμορφώνει την μέση τιμή του διαμορφωμένου σήματος IF $s_{DEM}(t,f)$ στο χρονικό διάστημα T_D , όπου f είναι η συχνότητα στην οποία είναι συντονισμένος ο δέκτης EMI. Σε γενικές γραμμές, οι ανιχνευτές μέσης τιμής χρησιμοποιούνται για σήματα στενής ζώνης παρεμβολής και όχι για παρορμητικές διαταραχές. Η μέση τιμή $s_D^{avg}(t,f)$ σε T_D δίνεται από:

$$s_D^{avg}(t, f) = \frac{1}{T_D} \int_{t-T_D}^t s_{DEM}(t_1, f) dt_1 \quad (6.12)$$

| Characteristics | Frequency Band | | |
|---|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| | Band A 9 kHz – 150 kHz | Band B 150 kHz – 30 MHz | Band C 30 MHz – 1 GHz |
| 6 dB Bandwidth B_6 | 200 Hz | 9 kHz | 120 kHz |
| τ_c | 45 ms | 1 ms | 1 ms |
| τ_d | 500 ms | 160 ms | 550 ms |
| τ_m | 160 ms | 160 ms | 100 ms |
| Overload Factor of Circuits Preceding the Detector | 24 dB | 30 dB | 43.5 dB |
| Overload Factor of the DC Amplifier and Indicating Instrument | 6 dB | 12 dB | 6 dB |

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά των δεκτών Quasi-Peak σύμφωνα με την CISPR 16-1-1.

Το κατώτερο όριο θορύβου του ανιχνευτή μέσης τιμής είναι 12 dB χαμηλότερο από εκείνο του ανιχνευτή κορυφής. Αυτό επιτρέπει την ανίχνευση παρεμβολών περιορισμένης ζώνης οι οποίες διαφορετικά θα καλύπτονταν στο θόρυβο.

• Ο ανιχνευτής μέσης τετραγωνικής ρίζας αποτελεί την πραγματική αξία του διαμορφωμένου IF σήματος $s_{DEM}(t,f)$, κατά μέσο όρο σε χρονικό διάστημα T_D . Η τιμή τετραγωνικής ρίζας $s_D^{rms}(t,f)$ σε T_D δίνεται από:

$$s_D^{rms}(t, f) = \sqrt{\frac{1}{T_D} \int_{t-T_D}^t s_{DEM}^2(t, f) dt_1} \quad (6.13)$$

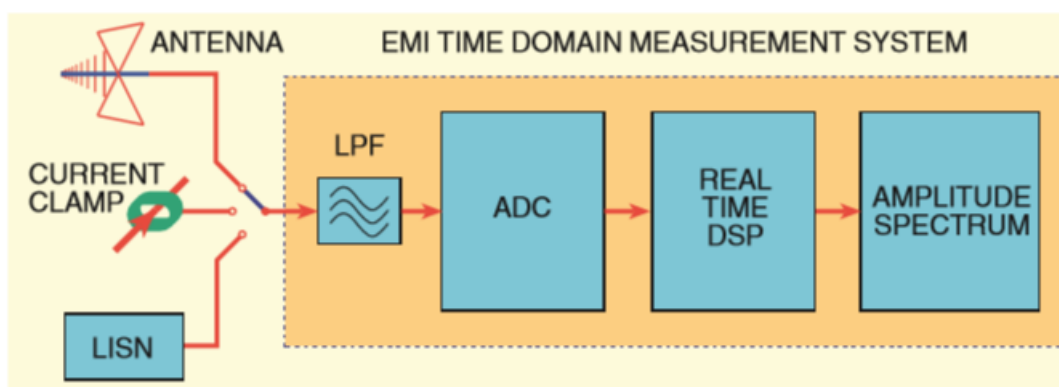
Το κατώτερο όριο θορύβου του ανιχνευτή μέσης τετραγωνικής ρίζας είναι από 1,2 dB υψηλότερος από εκείνον του ανιχνευτή μέσης τιμής.

6.4 Σύγχρονα συστήματα μέτρησης ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στο πεδίο του χρόνου

Σύστημα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου με έναν ADC (Analog to Digital Converter).

Τα πρώτα συστήματα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου έγιναν στην περιοχή συχνοτήτων 30 MHz-1 GHz. Το σχήμα 6.5 δείχνει το σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος μέτρησης EMI στο πεδίου χρόνου. Το σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί για μετρήσεις στις ακτινοβολούμενες ή επαγόμενες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Για τη μέτρηση παρεμβολών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται μια κεραία ευρείας ζώνης, για τη μέτρηση επαγόμενων παρεμβολών EMI χρησιμοποιείται είτε ένας σφιγκτήρας ρεύματος, είτε μια γραμμή αντίστασης σταθεροποίησης δικτύου lisen (line impedance stabilization network).

Στο σύστημα μέτρησης EMI το εισερχόμενο σήμα ενισχύεται πρώτα και στη συνέχεια φιλτράρεται από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο LPF χαμηλής διέλευσης, έτσι ώστε το σήμα να πληροί την προϋπόθεση Nyquist, δηλαδή ότι είναι περιορισμένης ζώνης με την Nyquist συχνότητα f_c η οποία είναι μικρότερη από το μισό της f_0 συχνότητας δειγματοληψίας. Στη συνέχεια, στον μετατροπέα ADC το αναλογικό σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα και ένα μπλοκ $s[n]$ δειγμάτων σήματος N αποθηκεύεται. Μέσω του μειωμένου χρόνου γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (STFT), το φάσμα σύντομου χρόνου $S_w[k]$ υπολογίζεται.



Σχήμα 6.5 Σύστημα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου.

Για τη στατιστική μέσου όρου των φασματικών δειγμάτων μόνο τα μεγέθη των φασματικών πλατών χρησιμοποιούνται και η πληροφορία φάσης δεν λαμβάνεται υπόψη περαιτέρω. Χρησιμοποιούμε το φάσμα μίας όψης πλάτους που ορίζεται ως:

$$S_A[k] = \frac{1}{N} |S_w[0]| \quad \text{για } k=0 \quad (6.14)$$

$$S_A[k] = \frac{\sqrt{2}}{N} |S_w[k]| \quad \text{για } 1 \leq k < k_{Nyq} \quad (6.15)$$

όπου k_{Nyq} είναι η συχνότητα Nyquist. Παίρνουμε μόνο τα φασματικά πλάτη μέχρι και τη συχνότητα Nyquist. Οι συχνότητες k πάνω από τη συχνότητα Nyquist, δηλαδή με $k_{Nyq} \leq k < N$, αντιστοιχούν στις αρνητικές συχνότητες και τα αντίστοιχα φασματικά πλάτη είναι συζυγές σύμπλεγμα στα φασματικά πλάτη στην περιοχή $1 \leq k < k_{Nyq}$. Έτσι, πρέπει να λάβουμε δύο φορές τα φασματικά πλάτη στην περιοχή $1 \leq k < k_{Nyq}$ και να τα διαιρούμε από $\sqrt{2}$ για να υπολογισθεί η πραγματική τιμή.

Για στατιστικούς μέσους όρους των πολλαπλών φασμάτων σύντομου χρόνου $S_A[k, p]$ με $p \in [0, P-1]$, το περιοδόγραμμα $S_p^{avg}(k)$ υπολογίζεται από το μέσο όρο του φασματικού πλάτους για κάθε ομάδα συχνότητας, αποδίδοντας

$$S_p^{avg}[k] = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} S_A[k, p] \quad (6.16)$$

Το φάσμα τετραγωνικής ρίζας $S_p^{rms}(k)$ υπολογίζεται από:

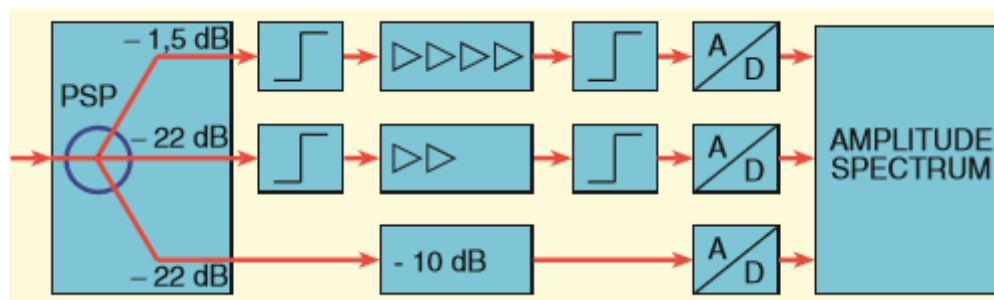
$$S_p^{rms}[k] = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} S_A^2[k, p]} \quad (6.17)$$

Το φάσμα μέγιστη κορυφής $S_p^{peak}(k)$ δίνεται από:

$$S_p^{peak}[k] = \max S_A[k, p] \quad \text{για } p \in [0, P-1] \quad (6.18)$$

Σύστημα μέτρησης EMI χαμηλού θορύβου και υψηλού δυναμικού ακραίας ευρυζωνικότητας στο πεδίο του χρόνου.

Το δυναμικό εύρος του συστήματος μέτρησης TDEMI περιορίζεται από την ανάλυση των μετατροπών ADCs που χρησιμοποιούνται. Σήμερα, οι ADCs υψηλής ταχύτητας με ρυθμούς δειγματοληψίας άνω των 2 Gbit/s έχουν συνήθως μια ανάλυση μόνο 10 bit. Αυτό θα περιορίζει την αναλογία σήματος προς θόρυβο για στάσιμα σήματα μεταξύ 60 dB και 70 dB. Αυτό θα πληροί τις απαιτήσεις του CISPR. Ωστόσο, για τον παροδικό ή παρορμητικό θόρυβο η αναλογία θορύβου σήματος SNR θα είναι κάτω από τα 10 dB. Το δυναμικό του συστήματος μέτρησης EMI στο πεδίου χρόνου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με τη χρήση πολλαπλών αναλύσεων μετατροπής αναλογικό σε ψηφιακό. Με πολλούς παράλληλους μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό ένα σύστημα μέτρησης TDEMI πολλαπλών αναλύσεων έχει αναπτυχθεί που δείχνει το επαρκές δυναμικό εύρος για να εκπληρώσει τα διεθνή πρότυπα EMC CISPR

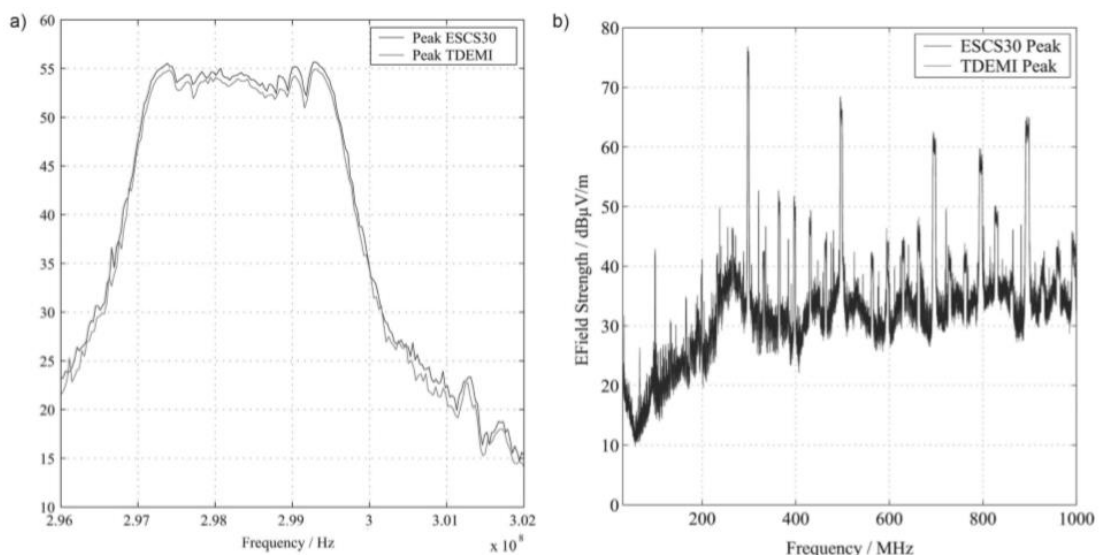


Σχήμα 6.6 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος μέτρησης EMI πολλαπλής ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου.

Το σχήμα 6.6 δείχνει το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος μέτρησης EMI πολλαπλής ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου. Το σήμα εισόδου EMI χωρίζεται μέσω του PSP διαιρέτη ισχύος σε τρία κανάλια. Το πρώτο κανάλι, το οποίο είναι το ανώτερο κανάλι στο Σχ. 6.6, είναι το πιο ευαίσθητο κανάλι. Αυτό ψηφιοποιεί τα σήματα στην περιοχή εύρους από 0 V έως 1,8 mV. Το δεύτερο κανάλι είναι αφιερωμένο στο εύρος πλάτους από 0 V έως 200 mV, και το τρίτο κανάλι ψηφιοποιεί τα σήματα στην περιοχή εύρους από 0 V έως 10 V. Τα κανάλια 1 και 2 έχουν μη κορεσμένες διόδους περιορισμού στην είσοδο, έτσι ώστε αυτά τα κανάλια να μην είναι υπερφορτωμένα από σήματα που υπερβαίνουν το ειδικό φάσμα πλάτους τους. Το σύστημα χρησιμοποιεί τρεις ADCs των 10 bit που λειτουργούν με ένα ρυθμό δειγματοληψίας του 2.3 GS/s. Τα ψηφιοποιημένα σήματα επεξεργάζονται

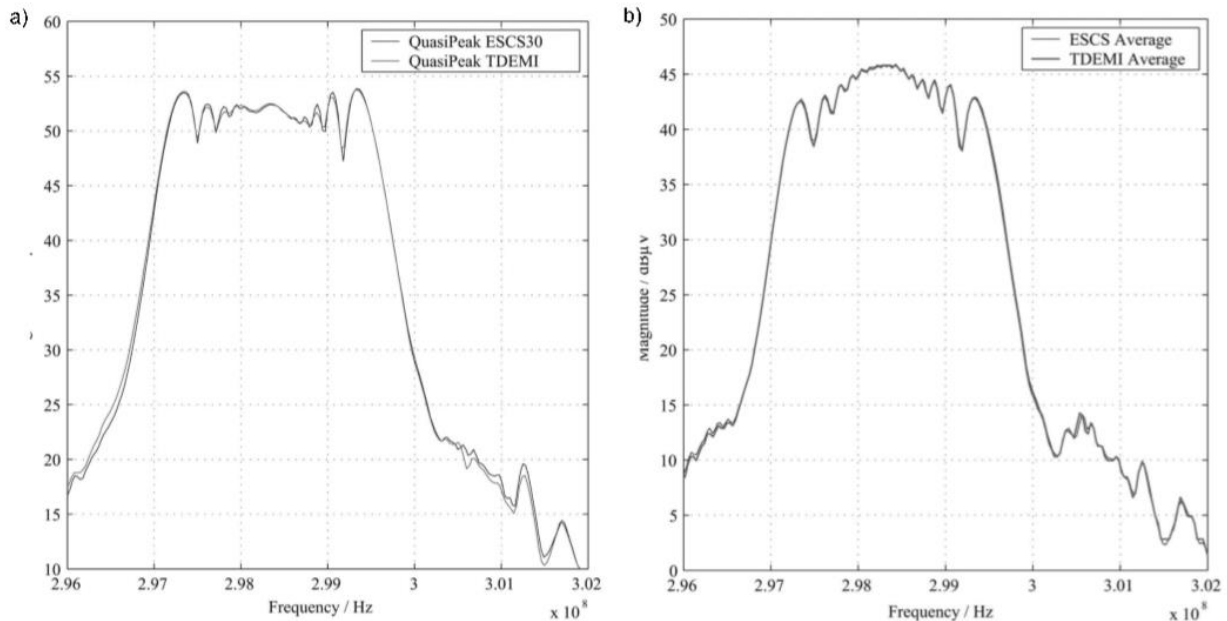
στη μονάδα επεξεργασίας ψηφιακού σήματος από ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα FPGA (Array Field Programmable Gate).

Το εμπορικώς διαθέσιμο σύστημα μέτρησης GAUSS Instruments TDEMI 1G παρουσιάζει ένα φάσμα συχνοτήτων από 9 kHz 1 GHz, το εύρος ζώνης CISPR 200Hz, 9 kHz, 120 kHz, και 1 MHz, και μια ψευδή περιοχή δυναμικού εύρους περίπου 55 dB. Σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς δέκτες EMI ο χρόνος μέτρησης μειώνεται κατά έναν συντελεστή 4000. Σε λειτουργία quasi-peak ο συνολικός χρόνος μέτρησης για μία μόνο σάρωση στην περιοχή συχνοτήτων 30 MHz-1 GHz διαρκεί περίπου 2 λεπτά. Οι προ-σαρώσεις εκτελούνται για ανίχνευση μόνο των κρίσιμων συχνοτήτων, και για να μειώσουν το συνολικό χρόνο σάρωσης από τις ακόλουθες τελικές μετρήσεις. Το σύστημα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου μας επιτρέπει να βελτιώσουμε την ποιότητα στις εν λόγω προ-σαρώσεις, επειδή οι προ-σαρώσεις μπορούν να εκτελεστούν με χρόνους παραμονής που είναι τυπικά δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες σε σύγκριση με τη συμβατική τεχνολογία δέκτη EMI. Επιπλέον, ο συνολικός χρόνος σάρωσης μειώνεται για την προ-σάρωση. Οι τελικές μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν στις προσδιορισμένες συχνότητες και θέσεις. Το σύντομο χρονικό διάστημα μέτρησης επιτρέπει τη μέτρηση των προτύπων ακτινοβολίας EMI, προκειμένου να εντοπιστούν οι πηγές EMI.



Σχήμα 6.7 Ακτινοβολούμενη EMI ενός επιτραπέζιου υπολογιστή μετρούμενη σε λειτουργία ανίχνευσης κορυφής στα διαστήματα συχνοτήτων (α) 296 έως 302 MHz, (β) 30 MHz έως 1GHz. Το σχήμα 6.7 (α) δείχνει τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε κατάσταση ανίχνευσης κορυφών στο διάστημα συχνοτήτων 296-302 MHz. Ο χρόνος παραμονής ήταν 100 ms και το βήμα συχνότητας ήταν 30 kHz. Η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των δύο μετρήσεων

είναι 0.8 dB. Το σχήμα 6.7 (β) δείχνει την ακτινοβολούμενη EMI μετρημένη στην περιοχή συχνοτήτων από 30 MHz έως 1 GHz. Ο χρόνος παραμονής ήταν 100 ms. Η μέτρηση με το σύστημα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου πήρε 11s, ενώ η μέτρηση με τον συμβατικό δέκτη EMI πεδίου συχνότητας χρειάστηκαν 50 λεπτά. Η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των δύο μετρήσεων είναι 1 dB.

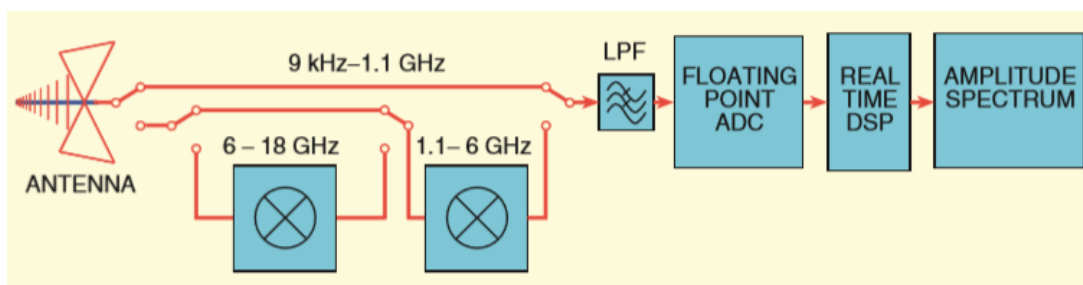


Σχήμα 6.8 Ακτινοβολούμενες EMI ενός επιτραπέζιου υπολογιστή μετρούμενες στο διάστημα συχνοτήτων 296-302 MHz στην (α) λειτουργία ανίχνευσης ‘quasi-peak’, (β) λειτουργία μέσης τιμής

Οι μετρήσεις στο διάστημα συχνότητας 296-302 MHz έχουν επίσης εκτελεστεί σε λειτουργία ανίχνευσης ‘quasi-peak’ και στην λειτουργία μέσης τιμής ‘average’, με βήματα συχνοτήτων 30 kHz και στις δύο περιπτώσεις. Το σχήμα 6.8 (α) δείχνει τα αποτελέσματα των μετρήσεων ‘quasi-peak’. Ο χρόνος παραμονής ήταν 2 s. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων με το σύστημα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου και τα αποτελέσματα που προέκυψαν με το δέκτη EMI ήταν 0,4 dB. Το σχήμα 6.8 (β) δείχνει τα αποτελέσματα των μετρήσεων της λειτουργία μέσης τιμής. Ο χρόνος παραμονής ήταν 4s. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων με το σύστημα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου και τα αποτελέσματα που προέκυψαν με το δέκτη EMI ήταν 0,2 dB.

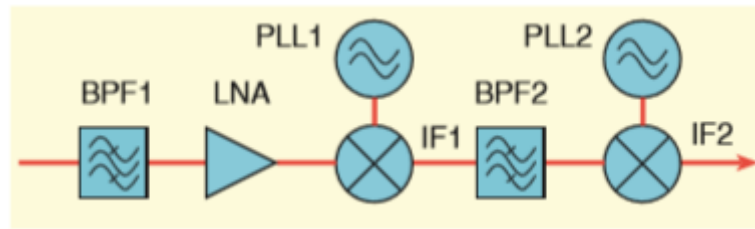
Συστήματα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου για ζώνες συχνότητας μέχρι 18 GHz.

Προκειμένου να προστατευθούν τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα πάνω από 1 GHz από τις ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές και να αναπτύξουν συμμορφωμένα ηλεκτρομαγνητικά κυκλώματα και συστήματα, υπάρχει μια αυξανόμενη απαίτηση για τα συστήματα μέτρησης EMI για τις ζώνες συχνοτήτων πέρα από 1 GHz. Επί του παρόντος, οι εν λόγω μετρήσεις διεξάγονται με τη χρήση αναλυτών φάσματος και εφαρμόζοντας τη μέγιστη λειτουργία συγκράτησης. Ωστόσο, δεδομένου ότι ο κλασικός δέκτης EMI μπορεί να παρατηρήσει μόνο μια φασματική συχνότητα ταυτόχρονα και η EMI αλλάζει σε μια περίοδο δευτερολέπτων, οι αναλυτές φάσματος δεν είναι κατάλληλοι για τη μέτρηση των μη-στάσιμων EMI με ένα λογικό χρονικό διάστημα σάρωσης. Τα συστήματα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου, χρησιμοποιούν ένα FFT σύνολο από δέκτες με σύντομους χρόνους μέτρησης, καθώς επίσης και σε συχνότητες πέραν του 1 GHz είναι η καλύτερη επιλογή.



Σχήμα 6.9 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος μέτρησης EMI των 9 GHz με 18 GHz στο πεδίο του χρόνου.

Το σχήμα 6.9 δείχνει το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος μέτρησης EMI από 9 kHz έως 18 GHz στο πεδίο χρόνου. Για το φάσμα συχνοτήτων από 9 kHz έως 1.1 GHz το σήμα EMI λαμβάνεται από την κεραία ευρείας ζώνης και τροφοδοτείται απευθείας με το σύστημα μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου 1.1 GHz. Για συχνότητες άνω των 1,1 GHz, η EMI μετατρέπεται σε βασικής ζώνης από 9 kHz έως 1,1 GHz. Οι ζώνες συχνοτήτων από 1,1 GHz και 6 GHz μετατρέπονται από τον μετατροπέα υποβιβασμού DC1 στη ζώνη βάσης. Οι ζώνες συχνοτήτων από 6 GHz έως 18 GHz αρχικά μετατρέπονται από τον μετατροπέα DC2 στην περιοχή συχνοτήτων από 1,1 GHz έως 6 GHz και περαιτέρω σε ζώνη βάσης.

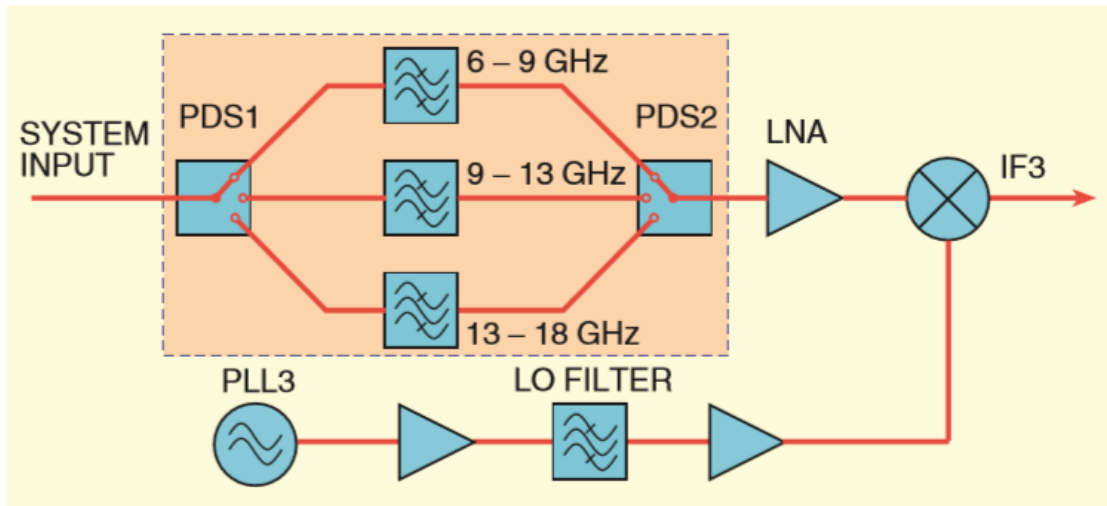


Σχήμα 6.10 Μετατροπέας υποβιβασμού για 1.1 GHz - 6 GHz.

Το σχήμα 6.10 δείχνει το σχηματικό διάγραμμα ενός μετατροπέα υποβιβασμού για την περιοχή συχνοτήτων από 1,1 GHz έως 6 GHz. Ένα σχέδιο ανάμειξης δύο σταδίων χρησιμοποιείται για να αποτρέψει τη ζώνη συχνοτήτων της εικόνας. Το σήμα εξόδου του μίκτη μπορεί να εμφανίζει τις ενδιάμεσες συχνότητες .

$$f_{IF}^{m,\pm n} = |mf_0 + nf_{rf}| \quad (6.19)$$

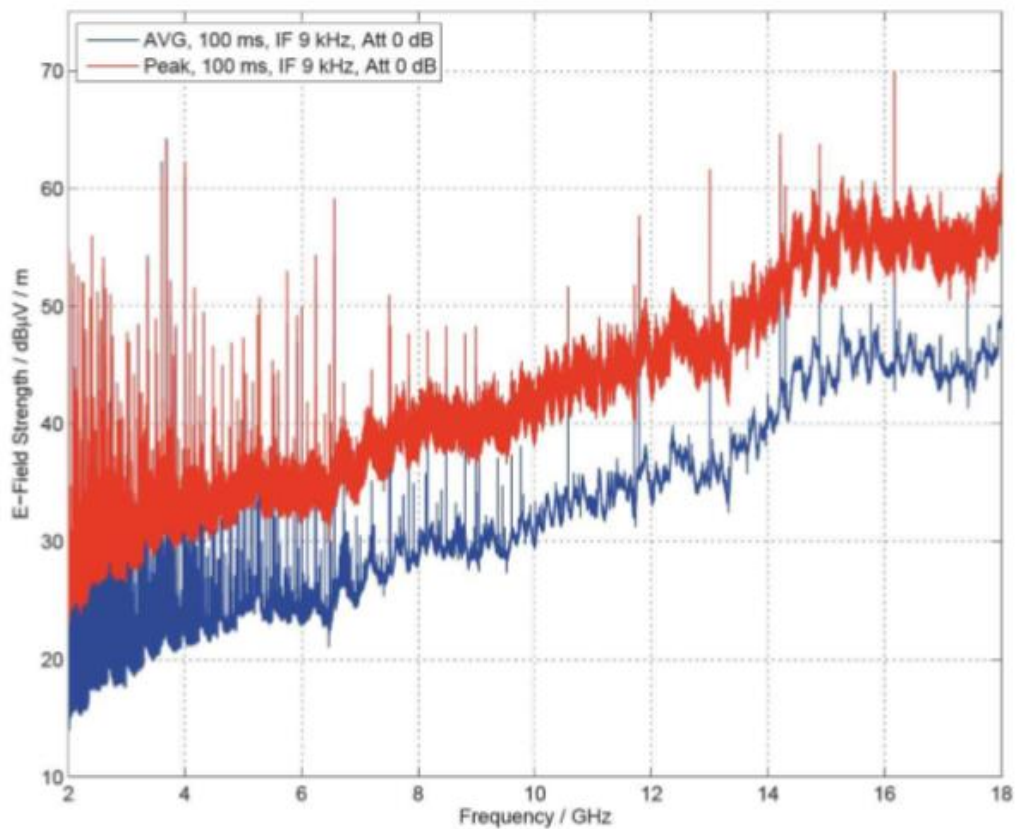
όπου f_{rf} είναι η συχνότητα του σήματος εισόδου RF και f_0 είναι η συχνότητα του τοπικού ταλαντωτή. Η μετατροπή συχνότητας παράγει δύο πλευρικές ζώνες. Η συχνότητα της εικόνας μετατρέπεται στην ίδια ενδιάμεση ζώνη συχνοτήτων ως ζώνη συχνοτήτων εισόδου. Το ζωνοπερατό φίλτρο BP1 προεπιλογής ενισχύει το ψευδο-ελεύθερο δυναμικό εύρος του συστήματος φιλτράροντας τις υψηλού επιπέδου EMI εκτός ζώνης. Η ζώνη εισόδου RF υποδιαιρείται σε 14 υποζώνες με εύρος ζώνης 325 MHz η κάθε μία. Κάθε μία από τις ζώνες αρχικά μετατρέπεται σε μια υψηλή ενδιάμεση ζώνη συχνότητας IF1, που βρίσκεται πάνω από τη ζώνη εισόδου RF. Αυτό το ενδιάμεσο σήμα συχνότητας φιλτράρεται από ένα στενό ζωνοπερατό φίλτρο BPF 2. Με αυτό τον τρόπο τα ανεπιθύμητα προϊόντα που συνδυάζουν εντός της ζώνης καταστέλλονται. Ένα δεύτερος μίκτης μετατρέπει το σήμα ενδιάμεσης συχνότητας από τη ζώνη IF1 στην ζώνη IF2 η οποία είναι στην περιοχή συχνοτήτων κάτω από 1,1 GHz. Τα PLL 1 και PLL2 είναι οι τοπικοί ταλαντωτές, που πραγματοποιήθηκαν με βρόχους κλειδωμένης φάσης.



Σχήμα 6.11 Μετατροπέας υποβιβασμού για 6 GHz - 18 GHz.

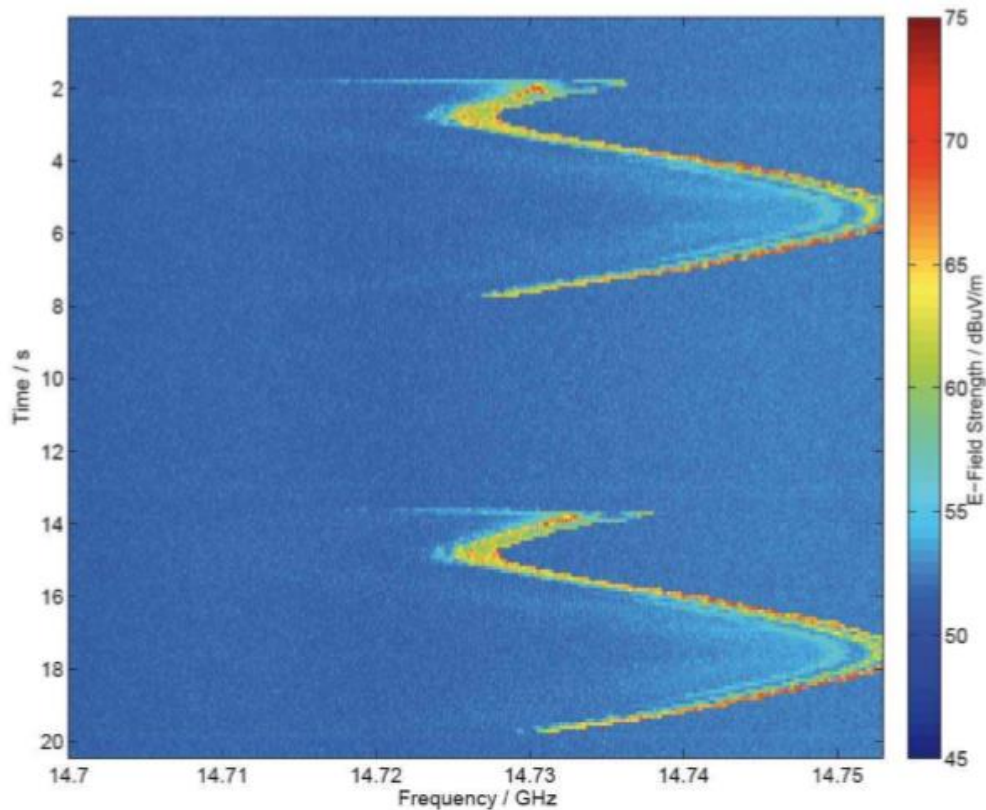
Στο σχήμα 6.11 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα ενός μετατροπέα υποβιβασμού των 6 GHz-18 GHz. Η ζώνη εισόδου χωρίζεται σε τρεις επιμέρους ζώνες, ζώνη 1 από 6 GHz έως 9 GHz, ζώνη 2 από 9 GHz έως 13 GHz, και η ζώνη 3 από 13 GHz έως 18 GHz. Η χαμηλή απώλεια παρεμβολής μονής εισόδου–τριπλής εξόδου διόδου PIN διακόπτες PDS1 και PDS2 χρησιμοποιούνται για να επιλέξουν το κατάλληλο φίλτρο διέλευσης ζώνης για την επιλεγμένη ζώνη. Αυτά τα φίλτρα διέλευσης ζώνης καταστέλλουν τις παρεμβολές που βρίσκονται εκτός ζώνης. Το σήμα EMI ενισχύεται από έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου και μετατρέπεται στη ζώνη συχνοτήτων από 1,1 GHz έως 6 GHz μέσω ενός μίκτη ευρείας ζώνης με χαμηλές απώλειες μετατροπής. Ο τοπικός PLL3 ταλαντωτής είναι μια φάση χαμηλού θορύβου κλειδωμένου βρόχου ταλαντωτή.

Το σχήμα 6.12 δείχνει το φάσμα ακτινοβολίας EMI σε μέσο όρο και 'quasi-peak' ενός προσωπικού υπολογιστή με ανοιγμένο το κάλυμμα. Οι μετρήσεις δείχνουν αρκετές στενές ζώνες εκπομπής, που υποθετικά προέρχονται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας, χρονισμένες στα 2,4 GHz.



Σχήμα 6.12 φάσμα ακτινοβολούμενης EMI ενός προσωπικού υπολογιστή

Μερικές οικιακές συσκευές ακτινοβολούν σημαντικές EMI σε συχνότητες πέρα από 1 GHz. Το σχήμα 6.13 δείχνει το γράφημα φάσματος της ακτινοβολούμενης εκπομπής ενός φούρνου μικροκυμάτων. Η υψηλή ευαισθησία του συστήματος μέτρησης EMI στο πεδίου χρόνου διευκολύνει τη μέτρηση της EMI λόγω του μάγνητρον φούρνου μικροκυμάτων. Η μέτρηση του φασματογράμματος επιτρέπει την ανίχνευση μοναδικών και παροδικών συμβάντων

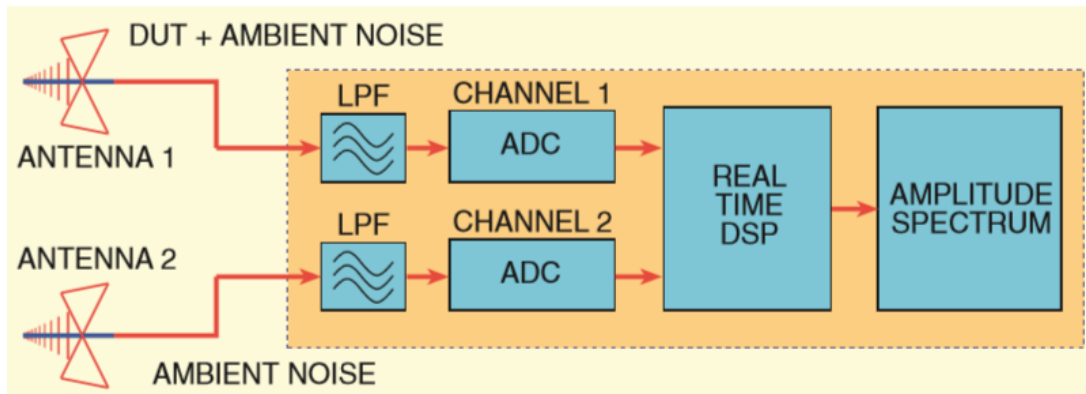


Σχήμα 6.13 Φασματογράφημα της ακτινοβολούμενης εκπομπής ενός φούρνου μικροκυμάτων

6.5 Τεχνικές ακύρωσης θορύβου περιβάλλοντος

Οι μετρήσεις EMI συνήθως εκτελούνται είτε σε θωρακισμένους ανηχικούς θαλάμους είτε σε ανοικτές περιοχές δοκιμών. Δεδομένου ότι οι εσωτερικές επιφάνειες των ανηχικών θαλάμων πρέπει να καλυφθούν με απορροφητικό υλικό ακτινοβολίας ευρείας ζώνης, οι ανηχικοί θάλαμοι είναι πολύ ακριβοί, ειδικά εάν απαιτείται μεγάλο μέγεθος. Οι ανοικτές περιοχές δοκιμών, ιδίως στις αστικές περιοχές, έχουν το μειονέκτημα των ανεπιθύμητων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, όπως των εκπομπών ραδιοφωνικών σταθμών, σταθμών κινητής τηλεφωνίας και άλλα. Μια εναλλακτική λύση θα ήταν να πραγματοποιηθεί η μέτρηση σε ανοιχτό χώρο δοκιμών με την παρουσία θορύβου περιβάλλοντος και να χρησιμοποιήσει την ακύρωση του θορύβου περιβάλλοντος. Η μέθοδος που περιγράφεται βασίζεται στην χρήση δύο συνδεδεμένων δεκτών EMI που τροφοδοτούνται ανά δύο κεραίες, όπου μία κεραία κατευθύνεται προς την υπό δοκιμή συσκευή και η άλλη κεραία λαμβάνει το θόρυβο του περιβάλλοντος. Αντιπαραθέτοντας τα δύο λαμβανόμενα σήματα μπορεί να ακυρωθεί ο θόρυβος περιβάλλοντος. Για να

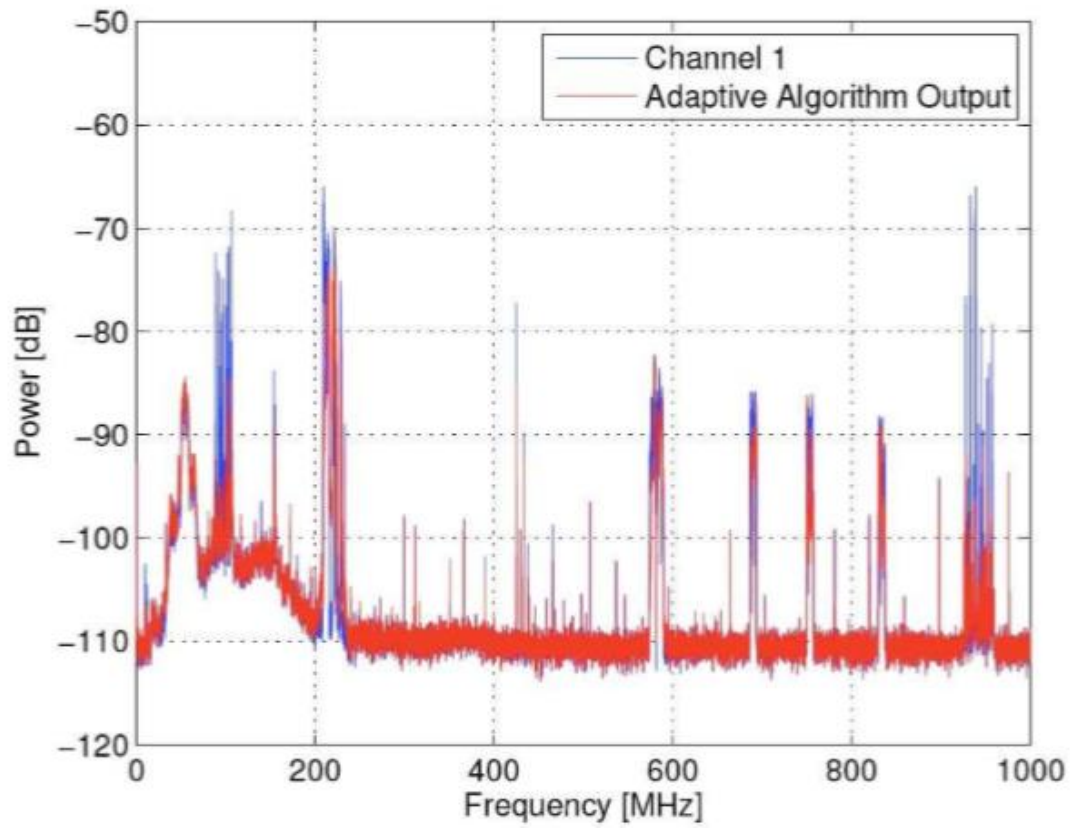
επιταχύνει αυτές τις μετρήσεις, η τεχνική μέτρησης EMI στο πεδίο του χρόνου είναι ιδιαίτερα ελκυστική.



Σχήμα 6.14 Σύστημα μέτρησης TDEMI με ακύρωση θορύβου περιβάλλοντος

Οι μετρήσεις που εκτελούνται με το σύστημα αυτό πραγματοποιούνται με επιτυχή ακύρωση του θορύβου περιβάλλοντος σε ένα αστικό χώρο δοκιμών στην περιοχή συχνοτήτων 30 έως 1000 MHz. Σε αυτό το σύστημα χρησιμοποιούνται δύο κανάλια. Τα δύο κανάλια τροφοδοτούνται από δύο κεραίες ευρείας ζώνης, όπου η πρώτη κεραία λαμβάνει κατά κύριο λόγο την ακτινοβολούμενη EMI από την υπό δοκιμή συσκευή και μια δεύτερη κεραία που λαμβάνει κατά κύριο λόγο το θόρυβο περιβάλλοντος. Στα δύο κανάλια και τα δύο σήματα ψηφιοποιούνται ανεξάρτητα και ταυτόχρονα.

Το σχήμα 6.15 δείχνει την μέτρηση της ακτινοβολούμενης EMI ενός μίξερ χειρός οικιακής χρήσης ως υπό δοκιμή συσκευή (DUT). Η κεραία αναφοράς της εγκατάστασης μέτρησης διαχωρίστηκε από το DUT και έλαβαν μόνο το θόρυβο περιβάλλοντος. Το σύστημα μέτρησης EMI λειτουργούσε με τη λειτουργία μέσου όρου και το φάσμα υπολογίστηκε με 120 kHz IF εύρος ζώνης, όπως απαιτείται από CISPR 16-1-1 για τη ζώνη Γ, και Δ. Ο αλγόριθμος ήταν επιτυχής όσον αφορά την ακύρωση του θορύβου περιβάλλοντος στις ζώνες FM και GSM, και σε άλλες συνιστώσες συχνότητας κατά μήκος του φάσματος και, ως εκ τούτου, το σήμα DUT ανακτήθηκε.



Σχήμα 6.15 Φάσμα της ακτινοβολούμενης EMI ενός οικιακού μίξερ χειρός.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] V. Prasad Kodali, “Engineering Electromagnetic Compatibility: Principles, measurements and technologies”, IEEE press, NY 1996
- [2] Kenneth L. Kaiser, “Handbook of Electromagnetic Compatibility”, CRC Press, 2005
- [3] Lelend H. Hemming “Architectural Electromagnetic Shielding Handbook”, IEEE press, Inc, NY 1992
- [4] Hewlett-Packard, “Designing for Electromagnetic Compatibility”, Student Workbook, Hewlett-Packard Company, 1989
- [5] Paul Chatterton, Michael Houlden, “ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ (EMC): Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό.” Μετάφραση: Μ. Χρυσομάλλης, 2000
- [6] Michel Mardiguian, “Interference Control in Computers and Microprocessor-Based Equipment”, First Edition, 1987
- [7] Keith Armstrong, “PCB Design Techniques for Lowest-Cost EMC Compliance”, Part 1, 1999
- [8] Armstrong, K. “EMC for Printed Circuit Boards: Basic and Advanced Design and Layout Techniques,” UK 2010, ISBN
- [9] Henry W. Ott, “Noise reduction techniques in electronic systems”, second edition, 1988
- [10] David Morgan, “A Handbook for EMC, Testing and measurement”, UK 1994
- [11] F. Krug, D. Müller, and P. Russer, “Statistical physical noise behavior analysis of the time domain EMI measurement system,” 2003 IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation, USA 2003
- [12] F. Krug and P. Russer, “Quasi-peak detector model for a time-domain measurement system,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005
- [13] S. Braun and P. Russer, “A FPGA based time-domain EMI measurement system for quasi-peak detection and disturbance analysis,” Germany 2005
- [14] S. Braun, T. Donauer, and P. Russer, “A real-time time-domain EMI measurement system for full-compliance measurements according to CISPR 16-1-1,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008

