



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

«ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥΣ EMC/EMI ΣΤΑ ΑΜΥΝΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΜΙΛΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Ουζούνογλου

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

«ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥΣ EMC/EMI ΣΤΑ ΑΜΥΝΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΜΙΛΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Ουζούνογλου

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή.

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δήμητρα - Θεοδώρα Κακλαμάνη
Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2014

.....
Παναγιώτης Μιλής

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Παναγιώτης Μιλής, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει την εξέλιξη των θεσμικών κειμένων (στρατιωτικά πρότυπα) στρατιωτικών φορέων (Υπουργείο Αμύνης ΗΠΑ), αναφορικά με τον τρόπο αντιμετώπισης των θεμάτων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στα στρατιωτικά συστήματα με κάθε είδους ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Κεντρικός άξονας είναι η ανάλυση όλων των δομικών στοιχείων που συνθέτουν ή επηρεάζουν ένα ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον (ηλεκτρονικές διατάξεις, εκπομπές Η/Μ ακτινοβολίας, κεραυνοί, Η/Μ παλμοί κτλ). Η επιλογή αποκλειστικά στρατιωτικών κειμένων των ΗΠΑ, καθορίσθηκε από τη διαχρονική και πολύπλευρη εμπειρία των αρμόδιων υπηρεσιών του Υπουργείου Αμύνης των ΗΠΑ σε θέματα EMC/EMI, λόγω συμμετοχής των στρατιωτικών δυνάμεων με τα πιο σύγχρονα μέσα σε πεδία επιχειρήσεων με μεγάλη ποικιλία διαφορετικών χαρακτηριστικών.

Αρχικά παρουσιάζεται η περιγραφή των εννοιών της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και διάφορων άλλων χαρακτηριστικών του εξωτερικού περιβάλλοντος και των συστημάτων - υποσυστημάτων, τα οποία σχετίζονται καθ' οποιονδήποτε τρόπο με τη δημιουργία του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος που περιβάλλει ένα στρατιωτικό σύστημα. Επιπλέον παρουσιάζεται μία σειρά ατυχημάτων σε στρατιωτικά συστήματα, λόγω παραβιάσεων των προδιαγραφών της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και επιδράσεων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση του τρόπου διαμόρφωσης του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος, των επιπέδων EM ενέργειας που προκαλούνται από διάφορες πηγές και βιώνονται από τα στρατιωτικά συστήματα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, καθώς και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ενός EME, μέσα στο οποίο θα λειτουργήσει ένα στρατιωτικό σύστημα με ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

Ακολουθεί η καταγραφή των γενικών και ειδικών απαιτήσεων στρατιωτικών προτύπων των ΗΠΑ, για όλες εκείνες τις παραμέτρους ή φαινόμενα (περιθώρια, εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον, μικροκυματικές πηγές, κεραυνοί, παλμοί, ηλεκτροστατική εκκένωση, Η/Μ ακτινοβολία, ηλεκτρονικός εξοπλισμός, πυρομαχικά κτλ) που σχετίζονται με την υποβάθμιση της λειτουργίας των στρατιωτικών συστημάτων λόγω δυσμενών επιπτώσεων στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα των υπόψη διατάξεων. Επιπρόσθετα, γίνεται ανάλυση της μεθοδολογίας διακρίβωσης της ικανότητας των συστημάτων να πληρούν τις παραπάνω απαιτήσεις, σύμφωνα με τα ισχύοντα στρατιωτικά πρότυπα των ΗΠΑ.

Στο τέλος αναφέρονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση συγκεκριμένων στρατιωτικών προτύπων, όσον αφορά τις εξελίξεις σε θέματα EMC/EMI, με τις ανάλογες προτάσεις για την καλύτερη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων.

Abstract

The present diploma thesis discusses the development of institutional texts (military standards) published by military actors (US DoD) concerning how to address EMC issues and electromagnetic interference in military systems with any kind of electronic equipment. Central to the analysis of all the components that create or influence an electromagnetic environment (electronic devices, electromagnetic emissions, lightning, Electromagnetic pulses etc.). The preference only US military texts, adopted by the timeless and diverse experience of the relevant departments of the Ministry of Defense of the United States on issues EMC/EMI, due to the participation of military forces with the latest systems in operation fields with a variety of different features.

Initially, is presented the description of the concepts of electromagnetic compatibility, electromagnetic interference and various other characteristics of the external environment and systems - subsystems, which are related in any way to creation of the electromagnetic environment surrounding a military system. In addition a series of accidents occurred in military systems is referred, because of violations of standards of electromagnetic compatibility and electromagnetic interference effects.

Then follows an analysis of how the configuration of the electromagnetic environment of EM energy levels caused by various sources and experienced by military systems during their operation and the determination of the characteristics of a Electromagnetic Enviroment, within which to operate a military system with electronic equipment.

The following is the record of general and special US military standards requirements, for all those parameters or phenomena (margins, internal and external environment, microwave sources, lightning, pulses, ESD, Electromagnetic radiation, electronic equipment, ammunition etc.) that related to the degradation of the military systems performance such adverse effects to the electromagnetic compatibility of such devices. Additionally, the verification methodology analyzes the capacity of systems to meet the above requirements, in accordance with applicable US military standards.

In the last chapter the main conclusions drawn from the analysis of specific military standards, as regards developments in matters of EMC/EMI, with relevant proposals for better use of the results.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων
Καθηγητή κ. Νικόλαο Ουζούνογλου για την υπομονή,
την κατανόηση και την πολύτιμη καθοδήγησή του.

Περιεχόμενα

<i>Περίληψη</i>	5
<i>Abstract</i>	6
<i>Περιεχόμενα</i>	8
<i>Κατάλογος Σχημάτων</i>	14
<i>Κατάλογος Συντημήσεων</i>	15
<i>Κατάλογος Συμβόλων</i>	20
1. Εισαγωγή	21
1.1 Γενικά	21
1.2 Σκοπός Εργασίας	21
1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	22
2. Ιστορική Αναδρομή	23
2.1 Ιστορική Εξέλιξη των Προδιαγραφών EMC/EMI	23
2.1.1 Τα Πρώτα Χρόνια - Έλεγχος της Εμφάνισης της Παρεμβολής	23
2.1.2 Η διάδοση των Προδιαγραφών Παρεμβολής και Ευαισθησίας	24
2.1.3 Η έκδοση του Πρώτου Κοινού Προτύπου (MIL-STD-461)	25
2.1.4 Η Ωρίμανση των Στρατιωτικών Προδιαγραφών EMC	25
2.1.5 Το Πρότυπο MIL-STD-464	27
2.1.6 Η Πρόοδος και το Μέλλον των Στρατιωτικών Προδιαγραφών EMC	29
2.2 Ιστορικά Περιστατικά EMI/E3 σε Στρατιωτικά Συστήματα	29
2.2.1 Περίπτωση Ευστάθειας B-52	29
2.2.2 Δυστυχήματα Ελικοπτέρων Black Hawk	29
2.2.3 Μη Επιδιωκόμενη Ενεργοποίηση	30
2.2.4 Έλεγχος Πτήσης Μαχητικών Αεροσκαφών (F-16/ Tornado)	30
2.2.5 Επιχείρηση Αποκατάστασης της Δημοκρατίας στην Αϊτή (1995)	30
2.2.6 Αεροπλανοφόρο USS Forrestal (Βιετνάμ-1969)	30
2.2.7 Πλοίο Επιφανείας HMS Sheffield (Νησιά Φώκλαντ)	31
2.2.8 Επιθετικό Ελικόπτερο AH-64 Apache	31
3. Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα - Στοιχεία Ηλεκτρομαγνητικού Περιβάλλοντος	32
3.1 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC)	32
3.2 Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή (EMI)	32
3.3 Ηλεκτρομαγνητικό Περιβάλλον (EME)	34
3.4 Ηλεκτρομαγνητικές Περιβαλλοντολογικές Επι-δράσεις (E3)	34
3.5 Ηλεκτρομαγνητική Τρωτότητα (EMV)	34

3.6 Ευπάθεια	35
3.7 Αποκαλυπτικές Εκπομπές	35
3.8 Υψηλής Ισχύος Μικροκύμα (HPM)	35
3.9 Άμεσα Αποτελέσματα Κεραυνού	35
3.10 Έμμεσες Επιπτώσεις Κεραυνού	35
4. Επίπεδα Ηλεκτρομαγνητικού Περιβάλλοντος (EME)	36
4.1 Γενικά	36
4.1.1 Επιδράσεις EME	36
4.1.2 Παράγοντες που Συμβάλλουν στη Διαμόρφωση του EME	37
4.2 Καθορισμός του EME	39
4.2.1 Επίπεδα Εξωτερικών EME RF για Συστήματα και Πλατφόρμες	39
4.2.2 Περιορισμοί EME για Συστήματα και Υποσυστήματα	40
4.2.3 Προσδιορισμός του Επιδιωκόμενου EME	40
4.2.4 Δομή Πινάκων Επιπέδων EME	42
4.2.4.1 Γενικά	42
4.2.4.2 EM Δεδομένα	42
4.2.4.3 EM Χαρακτηριστικά	43
4.2.5 Υπολογισμοί	43
4.2.5.1 Υπολογισμοί της Μέγιστης και της Μέσης Τιμής της Ισχύος	43
4.2.5.2 Όρια Κοντινών και Μακρινών Πεδίων	44
4.2.5.3 Μέθοδος Υπολογισμού Πυκνότητας Ισχύος Μακρινού Πεδίου	45
4.2.5.4 Μέθοδος Υπολογισμού Πυκνότητας Ισχύος Κοντινού Πεδίου	46
4.2.5.4.1 Μέθοδος Υπολογισμού Πυκνότητας Κοντινού Ηλεκτρικού Πεδίου για τις Κυκλικές Παραβολικές Κεραίες	47
4.2.5.4.2 Μέθοδος Υπολογισμού Πυκνότητας Ισχύος Κοντινού Πεδίου για τις Ορθογώνιες Παραβολικές Κεραίες	50
5. Απαιτήσεις	56
5.1 Χρήσιμοι Ορισμοί	56
5.1.1 Χώρος κάτω από το Κατάστρωμα	56
5.1.2 Ηλεκτρικά Εκκινούμενες Συσκευές (EIDs)	56
5.1.3 HERO Ασφαλή Πυρομαχικά	56
5.1.4 HERO Ευπαθή Πυρομαχικά	56
5.1.5 HERO μη Ασφαλή Πυρομαχικά	57
5.1.6 Όχημα Εκτόξευσης	57
5.1.7 Περιθώρια	57
5.1.8 Μέγιστο Ερέθισμα μη Πυροδότησης	57
5.1.9 Κρίσιμη Αποστολή	58
5.1.10 Φαινόμενο Διακοπής Μικροκυμάτων (Multipaction)	58
5.1.11 Μη Αναπτυξιακό Στοιχείο	58
5.1.12 Πολεμικό Υλικό (Πυρομαχικά)	58

5.1.13	Πλατφόρμα	58
5.1.14	Κρίσιμη Ασφάλεια	58
5.1.15	Θωρακισμένος Χώρος - Οχυρωματικό Έργο	59
5.1.16	Συστήματα Εξαρτώμενα από το Ραδιοφάσμα	59
5.1.17	Διαστημικό Όχημα	59
5.1.18	Υποσύστημα	59
5.1.19	Σύστημα	60
5.1.20	Σύστημα Επιχειρησιακών Επιδόσεων	60
5.1.21	TEMPEST	60
5.1.22	Έξαλα Σκάφους	60
5.2	Γενικές Απαιτήσεις	61
5.2.1	Γενικά	61
5.2.2	Αιτιολόγηση Απαίτησης	61
5.2.3	Οδηγίες Απαίτησης	62
5.2.4	Διδάγματα Απαίτησης	64
5.2.5	Αιτιολόγηση Διακρίβωσης	64
5.2.6	Οδηγίες Διακρίβωσης	64
5.2.7	Διδάγματα Διακρίβωσης	66
5.3	Ειδικές Απαιτήσεις	66
5.3.1	Περιθώρια	66
5.3.1.1	Απαίτηση	67
5.3.1.2	Διακρίβωση	70
5.3.2	Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα Ενδοσυστήματος (EMC)	71
5.3.2.1	Απαίτηση	71
5.3.2.2	Διακρίβωση	73
5.3.2.3	Παρεμβολές Αλληλοδιαμόρφωσης (IMI) στη Γάστρα του Σκάφους	79
5.3.2.3.1	Απαίτηση	79
5.3.2.3.2	Διακρίβωση	80
5.3.2.4	Ηλεκτρομαγνητικό Περιβάλλον Πλοίου Επιφανείας (EME)	80
5.3.2.4.1	Απαίτηση	81
5.3.2.4.2	Διακρίβωση	86
5.3.2.5	Φαινόμενο Multipaction	87
5.3.2.5.1	Απαίτηση	87
5.3.2.5.2	Διακρίβωση	88
5.3.2.6	Επαγωγικά Επίπεδα στις Υποδοχές των Κεραιών των Δεκτών	88
5.3.2.6.1	Απαίτηση	89
5.3.2.6.2	Διακρίβωση	89
5.3.3	Εξωτερικό RF EME	91
5.3.3.1	Απαίτηση	100
5.3.3.2	Διακρίβωση	106
5.3.4	Υψηλής Ισχύος Μικροκυματικές Πηγές (HPM)	111
5.3.4.1	Απαίτηση	112
5.3.4.2	Διακρίβωση	118

5.3.5 Κεραυνοί _____	119
5.3.5.1 Απαίτηση _____	120
5.3.5.2 Διακρίβωση _____	128
5.3.6 Ηλεκτρομαγνητικός παλμός (EMP) _____	129
5.3.6.1 Απαίτηση _____	129
5.3.6.2 Διακρίβωση _____	134
5.3.7 Υποσυστήματα και Εξοπλισμός Ηλεκτρομαγνητικών Παρεμβολών (EMI) _____	137
5.3.7.1 Απαίτηση _____	137
5.3.7.2 Διακρίβωση _____	139
5.3.7.3 Μη-Αναπτυξιακά Στοιχεία (NDI) και Εμπορικά Είδη _____	141
5.3.7.3.1 Απαίτηση _____	141
5.3.7.3.2 Διακρίβωση _____	144
5.3.7.4 Μαγνητικό Πεδίο σε DC Περιβάλλον επί των Πλοίων _____	145
5.3.7.4.1 Απαίτηση _____	145
5.3.7.4.2 Διακρίβωση _____	146
5.3.8 Ηλεκτροστατικός Έλεγχος Φορτίου _____	146
5.3.8.1 Απαίτηση _____	146
5.3.8.2 Διακρίβωση _____	149
5.3.8.3 Κάθετες Ανυψώσεις και Ανεφοδιασμοί κατά την Πτήση _____	150
5.3.8.3.1 Απαίτηση _____	150
5.3.8.3.2 Διακρίβωση _____	151
5.3.8.4 Στατική Κατακρήμνιση (p-static) _____	152
5.3.8.4.1 Απαίτηση _____	152
5.3.8.4.2 Διακρίβωση _____	154
5.3.8.5 Υποσυστήματα Πυρομαχικών _____	155
5.3.8.5.1 Απαίτηση _____	156
5.3.8.5.2 Διακρίβωση _____	156
5.3.8.6 Ηλεκτρικά και Ηλεκτρονικά Υποσυστήματα _____	156
5.3.8.6.1 Απαίτηση _____	157
5.3.8.6.2 Διακρίβωση _____	157
5.3.9 Κίνδυνοι Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας (EMRA-DHAZ) _____	157
5.3.9.1 Απαίτηση _____	158
5.3.9.2 Κίνδυνοι της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας στο Προσωπικό (HERP) _____	158
5.3.9.2.1 Απαίτηση _____	158
5.3.9.2.2 Διακρίβωση _____	159
5.3.9.3 Κίνδυνοι της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας στα Καύσιμα (HERF) _____	160
5.3.9.3.1 Απαίτηση _____	160
5.3.9.3.2 Διακρίβωση _____	161
5.3.9.4 Κίνδυνοι της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας στο Πολεμικό Υλικό (HERO) _____	161
5.3.9.4.1 Απαίτηση _____	164

5.3.9.4.2 Διακρίβωση	167
5.3.10 Κύκλος ζωής, E3 Σκληρότητα	171
5.3.10.1 Απαίτηση	171
5.3.10.2 Διακρίβωση	174
5.3.11 Ηλεκτρική Σύνδεση	176
5.3.11.1 Απαίτηση	177
5.3.11.2 Διακρίβωση	181
5.3.11.3 Διαδρομή Επιστροφής Ρεύματος	183
5.3.11.3.1 Αιτιολόγηση Απαίτησης	183
5.3.11.3.2 Διακρίβωση	183
5.3.11.4 Εγκαταστάσεις Κεραιών	184
5.3.11.4.1 Απαίτηση	184
5.3.11.4.2 Διακρίβωση	185
5.3.11.5 Μηχανικές Διεπαφές	185
5.3.11.5.1 Απαίτηση	186
5.3.11.5.2 Διακρίβωση	188
5.3.11.6 Προστασία από Πλήγματα, Σφάλματα και Αναφλέξιμους Ατμούς	188
5.3.11.6.1 Απαίτηση	188
5.3.11.6.2 Διακρίβωση	190
5.3.12 Εξωτερικές Γειώσεις	190
5.3.12.1 Απαίτηση	190
5.3.12.2 Διακρίβωση	194
5.3.12.3 Υποδοχές Γείωσης Αεροσκαφών	194
5.3.12.3.1 Απαίτηση	194
5.3.12.3.2 Διακρίβωση	195
5.3.12.4 Εξοπλισμός Συντήρησης και Επισκευής Γειώσεων	196
5.3.12.4.1 Απαίτηση	196
5.3.12.4.2 Διακρίβωση	196
5.3.13 TEMPEST	197
5.3.13.1 Απαίτηση	197
5.3.13.2 Διακρίβωση	198
5.3.14 Εκπεμπόμενες Ακτινοβολίες Συστήματος	198
5.3.14.1 Έλεγχος Εκπομπών (EMCON)	198
5.3.14.1.1 Απαίτηση	199
5.3.14.1.2 Διακρίβωση	201
5.3.14.2 EMC Διασυστήματος	203
5.3.14.2.1 Απαίτηση	203
5.3.14.2.2 Διακρίβωση	204
5.3.15 Συμβατότητα EM Φάσματος	205
5.3.15.1 Απαίτηση	205
5.3.15.2 Διακρίβωση	208
5.3.16 Συμπεράσματα - Προτάσεις	209
Βιβλιογραφία	212

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 4-1. Συντελεστές διόρθωσης κοντινού πεδίου για κυκλικό παραβολικό φωτισμό.....	53
Σχήμα 4-2. Συντελεστής διόρθωσης για την περιοχή Fresnel για ομοιόμορφο φωτισμό (ορθογώνιο άνοιγμα).....	53
Σχήμα 4-3. Συντελεστής διόρθωσης για την περιοχή Fresnel για συνημιτονοειδή φωτισμό (ορθογώνιο άνοιγμα).....	54
Σχήμα 4-4. Συντελεστής διόρθωσης για την περιοχή Fresnel για τετράγωνο συνημιτονοειδή φωτισμού (ορθογώνιο άνοιγμα).....	54
Σχήμα 4-5. Συντελεστής διόρθωσης για την περιοχή Fresnel για τρίτου βαθμού συνημιτονοειδή φωτισμό (ορθογώνιο άνοιγμα).....	55
Σχήμα 4-6. Συντελεστής διόρθωσης για την περιοχή Fresnel για τετάρτου βαθμού συνημιτονοειδή φωτισμό (ορθογώνιο άνοιγμα).....	55
Σχήμα 5-1. CCF των επιλεγέντων πλοίων επιφανείας.....	84
Σχήμα 5-2. Παράμετροι κυματομορφής των έμμεσων επιπτώσεων του κεραυνού.....	122
Σχήμα 5-3. Περιβάλλον EMP ελεύθερου πεδίου (χωρίς περιορισμούς διαβάθμισης) στο πεδίο του χρόνου (IEC 61000-2-9).....	130
Σχήμα 5-4. Περιβάλλον EMP ελεύθερου πεδίου (χωρίς περιορισμούς διαβάθμισης) στο πεδίο της συχνότητας (IEC 61000-2-9).....	130
Σχήμα 5-5. Περιβάλλον (χωρίς περιορισμούς διαβάθμισης) της ονομαστικής HEMP συνιστώσας(E1, E2 και E3).....	131

Κατάλογος Συντμήσεων

AC	Advisory Circular
AE	Aerospace
AFBSD	Air Force Ballistic Systems Division
AGC	Automatic Gain Control
AGE	Aerospace Ground Equipment
AM	Amplitude Modulation
ANSI	American National Standards Institute
ARP	Aerospace Recommended Practice
ASD(NII)/DoD	Assistant Secretary of Defense for Networks and Information Integration/Department of Defense Chief Information Officer
ASEMICAP	Air Systems' EMI Corrective Action Program
BIT	Built in Test
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CCF	Cavity Calibration Factor
C4I	Command, Control, Communications, Computer, and Intelligence
CFR	Code of Federal Regulations
CNSS	Committee on National Security Systems
COTS	Commercial off-the-shelf
CTTA	Certified TEMPEST Technical Authority
CVN	Aircraft carrier, Fixed wing, Nuclear powered
CW	Continuous Wave
DDG	Guided Missile Destroyer
DID	Data Item Description
DIESC	Defence Industry EMC Standards Committee
DISA	Defense Information System Agency
DO	Documents

DoD	Department of Defence
DoDD	Department of Defence Directive
DOT	Department of Transportation
ECM	Electronic Counter Measures
EED	Electro-explosive Devices
E3	Electronic Environmental Effects
EID	Electrically Initiated Device
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ELV	Expendable Launch Vehicles
EM	Electromagnetic
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMCON	Emission Control
EME	Electromagnetic Environment
EMI	Electromagnetic Interference
EMP	Electromagnetic Pulse
EMR	Electromagnetic Radiation
EMRADHAZ	Electromagnetic Radiation Hazards
EMV	Electromagnetic Vulnerability
EPS	Engineering Practice Study
ESC	Equipment Spectrum Certification
ESD	Electrostatic Discharge
ESDA	Electrostatic Discharge Association
ESG PWG	Equipment Spectrum Guidance Permanent Working Group
FAA	Federal Aviation Administration
FCC	Federal Communications Commission
FFG	Fast Frigate
FM	Frequency Modulation

GSFCs	Goddard Space Flight Center
GPS	Global Positioning System
GTD	Geometric Theory of Diffraction
HDBK	Hand Book
HEMP	High Altitude Electromagnetic Pulse
HERF	Hazards of Electromagnetic Radiation to Fuel
HERO	Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance
HERP	Hazards of Electromagnetic Radiation to Personnel
HIRF	Intensity Radiated Fields
HPM	High Power Microwave
IA PUB	Information Assurance Publication
I/CC	Induced Contact Current
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IMI	Intermodulation Interference
IRAC	Interdepartment Radio Advisory Committee
IRE	Institute of Radio Engineers
ISM	Industrial Scientific Medical
ISO	International Organization for Standardization
ISR	Intelligence Surveillance Reconnaissance
ITU	International Telecommunications Union
JSC	Joint Spectrum Center
KPP	Key Performance Parameter
LHD	Landing Helicopter Dock
LISN	Line Impedance Stabilization Network
LOS	Line of Sight
MCEB	Military Communications Electronics Board

MCM	1000 circular mils
MEPs	Mission Equipment Packages
MHD	Magnetohydrodynamic
MIL-STD	Military Standard
MNFS	Maximum No Fire Stimulus
MOM	Method of Moments
MRAP	Mine Resistant Ambush Protected
MSFC-SPEC	Marshall Space Flight Center Specifications
NAVSEA	Naval Sea
NAVSEAINST	Naval Sea Instructions
NAVSUP	Naval Supply Systems Command
NDI	Non Developmental Item
NFPA	National Fire Protection Association
NSA	National Security Agency
NSTISSAM	National Security Telecommunications and Information Systems Security Advisory Memoranda
NTIA	National Telecommunications and Information Administration
OMB	Office of Management and Budget
ONR	Office of Naval Research
pbw	percentage bandwidth
PCM	Pulse Code Modulation
PCS	Personal Communication System
PELs	Permissible Exposure Limits
PRF	Pulse Repetition Frequency
RF	Frequency
RFI	Radio Frequency Interference
RFID	Radio Frequency Identification

rms	root mean square
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
SAE	Society of Automotive Engineers
SAMSO	Space And Missile Systems Organization
SE	Shielding Effectiveness
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPS	Spectrum Planning Subcommittee
SUT	System Under Test
TEMPEST	Telecommunications Electronics Material Protected from Emanating Spurious Transmissions
TOCs	Tactical Operation Centers
TR	Technical Report
TRP	Total Radiated Power
TWT	Travelling Wave Tube
VHF	Very High Frequency
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
UAV	Unmanned Air Vehicle
UHF	Ultra High Frequency
USAF	United States Air Force
UWB	Ultra Wide Band
WLAN	Wireless Local Area Network

Κατάλογος Συμβόλων

PD	Πυκνότητα ισχύος
P_T	Μέγιστη ή η μέση τιμή της ισχύος εξόδου του πομπού
G	Αριθμητικό κέρδος της κεραίας
N	Συντελεστής διόρθωσης του κέρδους του κοντινού πεδίου
d	Απόσταση ή το εύρος από την κεραία
E	Μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου
Z_0	Πραγματική αντίσταση του ελεύθερου χώρου
NF_r	Περιοχή του κοντινού αντενεργού πεδίου (μέτρα)
NF_{rad}	Περιοχή του ακτινοβολούμενου κοντινού πεδίου (Fresnel)
FF	Περιοχή του μακρινού πεδίου (Franhauffer)
λ	Μήκος κύματος
f	Συχνότητα
L	Μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας
$d.c$	Χρόνος ενεργείας
p_w	Εύρος παλμού
p_{ri}	Ρυθμός διαστήματος επανάληψης του παλμού
p_{rf}	Ρυθμός συχνότητας επανάληψης του παλμού
p_α	Μέση ισχύ
p_p	Μέγιστη ισχύ
Q	Φορτίο μεταφοράς
C	Πυκνότητα σωματιδίων
S_a	Εμπρόσθια περιοχή επιφάνειας
V	Ταχύτητα κίνησης αεροσκάφους
I_c	Πυκνότητα του ρεύματος φόρτισης
S_{eff}	Αποτελεσματική εμπρόσθια περιοχή

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η απειλή που παρουσιάζεται από τους πομπούς ραδιοσυχνότητας (RF) και άλλες πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στα στρατιωτικά συστήματα, γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη. Οι αυξανόμενες πολυεθνικές στρατιωτικές επιχειρήσεις, η παραγωγή και η διάδοση οπλικών συστημάτων από πολλά κράτη και η εκτεταμένη χρήση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, έχουν οδηγήσει σε επιχειρησιακά ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα (EMEs), που δεν είχαν αντιμετωπισθεί στο παρελθόν από τους στρατιωτικούς φορείς. Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον μπορεί να περιλαμβάνει τις σκόπιμες ή μη σκόπιμες ηλεκτρομαγνητικές (EM) εκπομπές, από εγχώρια κρίσιμα συστήματα επιχειρησιακών αποστολών, καθώς και αντίστοιχες εκπομπές από ξένα συστήματα, από στρατιωτικά και πολιτικά συστήματα, από φίλια και εχθρικά συστήματα, από κυβερνητικά και εμπορικά συστήματα.

Στο περιβάλλον μέσα στο οποίο λειτουργούν τα στρατιωτικά συστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν ηλεκτρονικές ή ηλεκτρικές διατάξεις και συσκευές, παρουσιάζονται ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που διαδίδονται με αγωγιμότητα ή ακτινοβολία και οφείλονται στις προαναφερόμενες πηγές. Από τις αρχές του 20ου αιώνα με τη ραγδαία ανάπτυξη και εφαρμογή των τηλεπικοινωνιών και την εκτεταμένη χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων σε κάθε είδους στρατιωτική επιχείρηση, προέκυψε το ζήτημα υποβάθμισης της απόδοσης λειτουργίας των στρατιωτικών συστημάτων, μέχρι και πρόκλησης σοβαρών ατυχημάτων, λόγω ύπαρξης φαινομένων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI), με τις αντίστοιχες διαταραχές στη λειτουργία τους.

Συνεπώς, η επίτευξη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, με την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας ενός στρατιωτικού συστήματος μέσα σε ένα περιβάλλον με ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, στο οποίο συνυπάρχει και με άλλα συστήματα, απαιτεί τη σχεδίαση μεθόδων με την αντίστοιχη κατάλληλη εφαρμογή τους, που να πιστοποιούν την καλή λειτουργία του τόσο σε θέματα εκπομπών, όσο και σε θέματα ευαισθησίας.

1.2 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση των εξελίξεων EMC/EMI στα στρατιωτικά συστήματα, σύμφωνα και με τα αντίστοιχα διεθνή θεσμικά και στρατιωτικά κείμενα τυποποίησης (Υπουργείου Άμυνας ΗΠΑ) που αφορούν στην αναλυτική εξέταση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος (EME), κατά τη σχεδίαση, ανάπτυξη, την προμήθεια και την αξιολόγηση στρατιωτικών υποδομών, συστημάτων, υποσυστημάτων και εξοπλισμού, καθώς και τη θέσπιση των απαιτήσεων διεπαφής των ηλεκτρομαγνητικών περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων (E3) και πιστοποίησης κριτηρίων, για επίγεια, εναέρια, θαλάσσια και διαστημικά στρατιωτικά συστήματα.

1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια, των οποίων το περιεχόμενο έχει ως εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία σύντομη εισαγωγή του θέματος, γίνεται αναφορά στο σκοπό της διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζεται η διάρθρωση του περιεχομένου της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία ιστορική ανασκόπηση επί των διαχρονικών εξελίξεων σε θέματα EMC/EMI αναφορικά με τα στρατιωτικά συστήματα, καθώς και μία ιστορικά αναδρομή ατυχημάτων σε στρατιωτικές δραστηριότητες που προέρχονταν από επιδράσεις ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

Στο τρίτο κεφάλαιο ερμηνεύονται ως έννοιες, η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, καθώς και όλα τα στοιχεία και οι επιδράσεις που συνθέτουν και ενσωματώνονται σε ένα πιθανό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, ως περιρρέουσα κατάσταση σε λειτουργούντα ηλεκτρονικά στρατιωτικά συστήματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται διεξοδική ανάλυση του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος αναφορικά με τις επιπτώσεις του, τον τρόπο διαμόρφωσής του, τη διαδικασία καθορισμού του και τον τρόπο που επηρεάζει τη λειτουργία και τη διαμόρφωση ενός συστήματος, καθώς και αναφέρονται τύποι υπολογισμού πεδίου ανάλογα την απόσταση και τον τύπο της εκπεμπόμενης κεραίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται οι απαιτήσεις και οι ανάγκες διακρίβωσης σύμφωνα με τα πρότυπα και τα θεσμικά κείμενα του Υπουργείου Άμυνας και άλλων κυβερνητικών φορέων των ΗΠΑ, όλων εκείνων των παραμέτρων και στοιχείων του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος (EMC, κεραυνοί, ηλεκτροστατική εκκένωση κτλ) και των συστημάτων που λειτουργούν μέσα σε αυτά (πυρομαχικά, ηλεκτρονικά συστήματα, ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά συστημάτων κτλ), οι οποίες πρέπει να πληρούνται προκειμένου να εξασφαλίζεται η όσο δυνατόν βέλτιστη λειτουργία των στρατιωτικών συστημάτων. Επιπλέον, διατυπώνονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω ανάλυση με αντίστοιχη πρόταση για περαιτέρω αξιοποίηση των συμπερασμάτων που προέκυψαν.

2. Ιστορική Αναδρομή

2.1 Ιστορική Εξέλιξη των Προδιαγραφών EMC/EMI

2.1.1 Τα Πρώτα Χρόνια - Έλεγχος της Εμφάνισης της Παρεμβολής

Ο στρατός των ΗΠΑ αντιμετώπισε για πρώτη φορά την παρεμβολή ραδιοσυχνότητας (RFI), πριν από τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο, όταν ένας σταθμός ασυρμάτου εγκαταστάθηκε για πρώτη φορά σε όχημα. Ωστόσο, δεν υπάρχουν πολλές πληροφορίες για τις πρώτες προσπάθειες αντιμετώπισης των προβλημάτων RFI, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1930. Τα πρακτικά του IRE του έτους 1932 περιελάμβαναν ένα έγγραφο σχετικά με ηλεκτρικές παρεμβολές σε ασύρματους οχημάτων [a.]. Η πρώτη στρατιωτική προδιαγραφή δημοσιεύθηκε από τις Διαβιβάσεις του Στρατού των ΗΠΑ το 1934 ως SCL-49 [b.] με τίτλο «Ηλεκτρική Θωράκιση και Τροφοδοσία Ασυρμάτων σε Οχήματα». Το έγγραφο αυτό παρείχε οδηγίες προστασίας των ασυρμάτων δεκτών από παρεμβολές, μέσω της απόκτησης θωράκισης του συστήματος ανάφλεξης, του ρυθμιστή και της γεννήτριας του οχήματος. Η απαίτηση ήταν απλή και αφορούσε τη μη «ενόχληση» του ασυρμάτου κατά τη λειτουργία του οχήματος. Με την αυξανόμενη χρήση των ασύρματων κινητών επικοινωνιών, το SCL-49 είχε καταστεί ανεπαρκές. Το 1942 η παραπάνω προδιαγραφή είχε αντικατασταθεί από την προδιαγραφή 71-1303 [b.], «Καταστολή του Θορύβου σε Ασύρματο Οχήματος» που εξέτασε (επιπλέον της θωράκισης), τη χρήση φίλτρων, πυκνωτών απόζευξης, αντιστάσεων-καταστολέων, σύνδεσης, γείωσης και σωστής δρομολόγησης των καλωδίων. Οι προδιαγραφές αυτές καθόρισαν, επίσης, ένα σύστημα διατάξεων ελέγχου ηλεκτρονικών και ένα όριο. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1940 τα στρατιωτικά πρότυπα αφορούσαν κυρίως την RFI καταστολή των εξαρτημάτων για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης και τις ηλεκτρικές μηχανές. Το 1945 εκδόθηκε ένα κοινό πρότυπο JAN-I-225 [1] Στρατού-Ναυτικού με τίτλο «Μέθοδοι Μέτρησης Παρεμβολής Ασυρμάτου 150 χιλιάδων έως 20 μεγακύκλους», για τα εξαρτήματα και τα πλήρη συγκροτήματα. Στη συνέχεια, το 1947, το πρότυπο AN-1-40 [2] καθόρισε τα όρια για τα συστήματα των αεροσκαφών.

Η επόμενη διαδοχή των στρατιωτικών προδιαγραφών EMC ακολουθεί στενά την εξέλιξη της ηλεκτροτεχνολογίας. Αρχικά, τα όρια των στρατιωτικών προδιαγραφών για την παρεμβολή ραδιοσυχνότητας θεσπίστηκαν, για την προστασία της ελάχιστης ωφέλιμης έντασης του πεδίου επί των οχημάτων για ξηρά, θάλασσα και αέρα. Καθώς όλο και περισσότεροι ευαίσθητοι εξοπλισμοί αναπτύχθηκαν, καθιερώθηκαν όρια ευαισθησίας (ατρωσίας). Με τη διαστημική εποχή ήρθε και η ιδέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε μικρές πλατφόρμες συστημάτων και επίσης μεταξύ των συστημάτων. Κατά συνέπεια, οι προδιαγραφές εξοπλισμού και συστημάτων έγινε πιο γενικές για να συμπεριλάβουν όλα τα είδη ηλεκτρικού και

ηλεκτρονικού εξοπλισμού που απαιτούν εφαρμογή EMC τεχνικών κατά το σχεδιασμό, ανάπτυξη, παραγωγή, εγκατάσταση και καταστάση λειτουργίας.

2.1.2 Η διάδοση των Προδιαγραφών Παρεμβολής και Ευαισθησίας

Στη δεκαετία του 1950 και μέχρι το 1965, κάθε μεγάλη στρατιωτική υπηρεσία επέβαλε τις δικές της προδιαγραφές EMI/EMC στην προμήθεια των ηλεκτρονικών συστημάτων και του εξοπλισμού. Για παράδειγμα στις ΗΠΑ, η Πολεμική Αεροπορία χρησιμοποιούσε το MIL-1-6181 και το MIL-1-26600, το Πολεμικό Ναυτικό χρησιμοποιούσε το MIL-1-16910 και ο Στρατός χρησιμοποιούσε το MIL-1-11748 και MIL-E-55301 (EL) [a.]. Οι προδιαγραφές αυτές περιόριζαν τα επίπεδα των επαγόμενων και ακτινοβολούμενων εκπομπών EMI και έθεταν επίπεδα ευαισθησίας τα οποία τα συστήματα και ο εξοπλισμός, πρέπει να απορρίψουν. Οι προδιαγραφές που καθορίστηκαν, έθεσαν επίσης, τη ρύθμιση των παραμέτρων των δοκιμών και τεχνικών, που απαιτούνται για να αποδειχθεί η συμμόρφωση με τις σχετικές απαιτήσεις.

Η ύπαρξη και η εφαρμογή διαφορετικών προδιαγραφών EMC για κάθε υπηρεσία προκάλεσε κατά μεγάλο βαθμό ένα δίλημμα. Ήταν σημαντικά διαφορετικές η μία με την άλλη, έτσι ώστε όταν ένα εξάρτημα είχε σχεδιαστεί για να ανταποκριθεί σε μια προδιαγραφή, συνήθως έπρεπε να επανασχεδιαστεί και να δοκιμαστεί για να ανταποκριθεί σε άλλη. Οι περιοχές συχνοτήτων που καλύφθηκαν ήταν διαφορετικές και τα όρια για τις επικαλυπτόμενες συχνότητες ποικίλα. Το πιο σημαντικό ήταν ότι, κάθε προδιαγραφή απαιτούσε τη χρήση διαφορετικών δοκιμών εξοπλισμού, γεγονός που καθιστούσε αρκετά δαπανηρή την ικανότητα για έναν οργανισμό, να είναι πλήρως εξοπλισμένος για δοκιμές σε όλες τις προδιαγραφές EMC.

Το πρόβλημα επιδεινώθηκε από πρόσθετες προδιαγραφές για συγκεκριμένα συστήματα, όπως το Minuteman AFBSD-62-87 [c.] που τέθηκε σε εφαρμογή από την εταιρεία Boeing, το GSFC-523-P-7 [c.] που εκπονήθηκε από τη Genisco βάσει σύμβασης από το Κέντρο Διαστημικών Πτήσεων Goddard για εξοπλισμούς εδάφους αεροδιαστημικής (AGE) και εκείνων που εκδόθηκαν από άλλα θεσμικά τεχνικά κέντρα, όπως το MSFC-SPEC-279 [3] που εκδόθηκε από το Κέντρο Διαστημικών Πτήσεων Marshall και το MIL-STD-1541 [4] που εκδόθηκε από την USAF/SAMSO. Ήταν φανερό ότι υπήρχε ανάγκη να περιοριστούν αυτές οι διαφορετικές προδιαγραφές για τη δημιουργία ενός ενιαίου προτύπου που θα ικανοποιούσε όλες τις κυβερνητικές και στρατιωτικές υπηρεσίες.

Η πρώτη προσπάθεια για την έκδοση προδιαγραφών που θα είναι αποδεκτές από όλους τους κλάδους της κυβέρνησης ήταν η δημοσίευση του MIL-STD-826 [5] τον Ιανουάριο του 1964. Το έγγραφο αυτό παρουσίαζε ένα νέο σύνολο ορίων. Ωστόσο, η προσπάθεια αυτή δεν απέδωσε και το MIL-STD-826 χρησιμοποιήθηκε μόνο από την USAF.

2.1.3 Η έκδοση του Πρώτου Κοινού Προτύπου (MIL-STD-461)

Το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ (DoD), θέσπισε ένα ολοκληρωμένο αμυντικό πρόγραμμα συμβατότητας ραδιοσυχνοτήτων (που αργότερα μετονομάστηκε σε πρόγραμμα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας) που επικεντρώθηκαν οι στρατιωτικές υπηρεσίες για να παρασχεθούν τα μέσα μέσω των οποίων η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα θα έπρεπε να ενσωματωθεί στις στρατιωτικές επικοινωνίες και ηλεκτρονικό εξοπλισμό κατά το στάδιο της έρευνας και της ανάπτυξης. Το 1966, το προσωπικό EMC από τα τρία στρατιωτικά τμήματα συνέταξαν από κοινού πρότυπα αντιμετώπισης των αναγκών μείωσης παρεμβολής του συνόλου του Υπουργείου Άμυνας. Η προσπάθεια αυτή κορυφώθηκε το 1967 με την έκδοση των Στρατιωτικών Προτύπων 461, 462 και 463. Ως αποτέλεσμα, περίπου 20 βασικές και δευτερεύουσες προδιαγραφές είχαν αντικατασταθεί. Το πρότυπο 461 επικεντρώθηκε σχετικά με τις απαιτήσεις και το πρότυπο 462 καθόρισε μεθοδολογία μέτρησης. Ορισμοί και ακρωνύμια συμπεριλήφθηκαν στο πρότυπο 463.

Μία σημαντική αναθεώρηση κρίθηκε αναγκαία και το MIL-STD-461A [6] εκδόθηκε τον Αύγουστο του 1968. Το MIL-STD-461 έγινε αποδεκτό από τις κοινές υπηρεσίες και χρησιμοποιήθηκε επίσης από πολλές άλλες χώρες. Τελικά, οι διάφορες στρατιωτικές υπηρεσίες (Στρατός, Πολεμική Αεροπορία και Ναυτικό) βρήκαν πολλά στοιχεία που δεν τους ικανοποιούσαν και ως εκ τούτου πολλές αναθεωρήσεις εκδόθηκαν από κάθε μία από τις 3 υπηρεσίες μέχρι το 1989.

2.1.4 Η Ωρίμανση των Στρατιωτικών Προδιαγραφών EMC

Μια προσπάθεια ξεκίνησε το 1990 από την Επιτροπή EMC των 3 υπηρεσιών, για να ετοιμάσει μια ενημερωμένη έκδοση του MIL-STD-461 και MIL-STD-462 [7]. Το MIL-STD-463 [8] αποσύρθηκε και οι ορισμοί αναφέρθηκαν στο κείμενο C63.14 «Πρότυπο Λεξικό για τις Τεχνολογίες της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (EMC), Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών (EMP) και Ηλεκτροστατικής Εκκένωσης (ESD)» του Αμερικανικού Εθνικού Ινστιτούτου Προτύπων (ANSI) [9].

Από το 1970 το προσωπικό EMC του Αμερικανικού Στρατού, Ναυτικού και Πολεμικής Αεροπορίας έχει περιοδικά συνεργασθεί και αναβαθμίσει τα MIL-STD-461 και 462. Η προτελευταία αναθεώρηση (1999), κωδικοποίησε τα 2 πρότυπα (Όρια και Μέθοδοι μέτρησης) σε ένα πρότυπο, το MIL-STD-461E «Απαιτήσεις για τον Έλεγχο των Χαρακτηριστικών Ηλεκτρομαγνητικής Παρεμβολής των Υποσυστημάτων και Εξοπλισμού» [10]. Αυτή η έκδοση ήταν ένα πρότυπο «διασύνδεσης» των απαιτήσεων για την παροχή εύλογης βεβαιότητας (κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης) ότι ένα σύστημα, υποσύστημα ή ο εξοπλισμός θα είναι συμβατός με το αναμενόμενο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον του.

Οι πιο σημαντικές αλλαγές στα MIL-STD-461D/462D και του MIL-STD-461E σε σύγκριση με το προηγούμενο MIL-STD-461C ήταν οι εξής:

- α. Διαγράφηκαν οι δοκιμές εκπομπών ευρείας ζώνης (Broadband).
- β. Προσδιορίστηκαν οι μετρήσεις (6 dB) του εύρους ζώνης.
- γ. Προσδιορίστηκαν οι χρόνοι σάρωσης της ευαισθησίας ραδιοσυχνοτήτων (RF).
- δ. Η 50 Ω αντίσταση γραμμής σταθεροποίησης του δικτύου (LISN) χρησιμοποιήθηκε για επαγόμενες εκπομπές.
- ε. Η δοκιμή ρύθμισης βαθμονόμησης ήταν απαραίτητη.
- ζ. Καθορίστηκε απορροφητής στο θωρακισμένο χώρο.
- η. Καθορίστηκε η διοχέτευση μαζικού καλωδίου (bulk cable injection).
- θ. Οι μετρήσεις επαγόμενων εκπομπών σταμάτησαν στα 10 MHz.
- ι. Επεξηγηματικά παραρτήματα προστέθηκαν σε MIL-STD-461D και MIL-STD-462D.
- κ. Δοκιμές ευαισθησίας δέκτη καθορίστηκαν ως απαραίτητες για κάθε προμήθεια.
- λ. Το MIL-STD-463 ακυρώθηκε και οι ορισμοί συμπεριλήφθησαν στο κείμενο C63.14 του ANSI.

Τα πιο πολύτιμα τμήματα αυτών των δύο προδιαγραφών και του MIL-STD-461E είναι τα παραρτήματα, τα οποία δίνουν την τεχνική επεξήγηση για τα όρια και τις διαδικασίες μέτρησης. Αυτά τα παραρτήματα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πρώτα γιατί το υλικό δίνει τη λογική πίσω από τις απαιτήσεις.

Το τεχνικό έργο ολοκληρώθηκε το Νοέμβριο του 1992. Τα δύο έγγραφα, δηλαδή τα MIL-STD-461 και MIL-STD-462D, δημοσιεύθηκαν τον Ιανουάριο του 1993. Οι εργασίες για το MIL-STD-461E ολοκληρώθηκαν το 1999. Οι βασικές έννοιες από τα πρότυπα 461 υιοθετήθηκαν από διάφορους μη στρατιωτικούς οργανισμούς των ΗΠΑ και επηρέασαν επίσης εθνικές και διεθνείς προσπάθειες τυποποίησης.

Η τελευταία αναθεώρηση, το MIL-STD-461F [11] εκδόθηκε τον Δεκέμβριο του 2008. Το MIL-STD-461F είναι μια δοκιμή σε επίπεδο συστήματος που καθορίζει τις απαιτήσεις EMC και τα όρια με βάση την επιχειρησιακή πλατφόρμα για την ανάπτυξη (επιφάνειες πλοίων, αεροσκάφη, κλπ) και τη θέση για την υπόψη πλατφόρμα (εσωτερική ή εξωτερική). Η συνολική απαίτηση αποτελείται από δεκαοχτώ επιμέρους δοκιμασίες που καλύπτουν ποικίλα χαρακτηριστικά του συστήματος που κυμαίνονται από τις εκπομπές που επάγονται μέσω της ισχύος και οδηγούν σε παρασιτικές και αρμονικές ακτινοβολίες. Αυτή η δοκιμή δεν είναι μικρού κόστους. Οι πέντε βασικές δοκιμές του υπόψη προτύπου [RS103 (radiated susceptibility, electric field 2 MHz to 40 GHz), RE102 (radiated emissions, electric field, 10 KHz to 18 GHz), CS101 (conducted susceptibility, power leads, 30 Hz to 150 KHz), CS114 (conducted

susceptibility, bulk cable injection, 10 KHz to 200 MHz) και CS116 (conducted susceptibility, damped sinusoidal transients, cables and power leads, 10 KHz to 100 MHz)], θα απαιτήσουν περίπου δύο ημέρες στο εργαστήριο. Ολόκληρο το πρότυπο, θα απαιτήσει επτά έως δέκα ημέρες. Δεν απαιτούνται όλες οι δοκιμές για κάθε πλατφόρμα. Ο πίνακας V (Requirement Matrix) από το MIL-STD-461F παρέχει μια μήτρα των απαιτούμενων δοκιμών για κάθε ένα από τα περιβάλλοντα της πλατφόρμας.

2.1.5 Το Πρότυπο MIL-STD-464

Μολονότι το πρότυπο MIL-STD-461 υπηρετεί τις ανάγκες του στρατού, για να διασφαλιστεί το επίπεδο EMC εξαρτήματος ή συστήματος, το πρότυπο δεν σχεδιάστηκε για να αξιολογήσει ή να πιστοποιήσει την EMC εντός του συστήματος ή μεταξύ συστημάτων. Το υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ αναγνώρισε την ανάγκη για την ύπαρξη ενός προτύπου, προκειμένου να διεξάγονται αυτές οι εκτιμήσεις επιπέδου EMC στις πλατφόρμες. Ως αποτέλεσμα, μια σειρά από απαιτήσεις θεσπίστηκαν και αναθεωρήθηκαν κατά τη διάρκεια των ετών, συμπεριλαμβανομένων σχετικών προτύπων, με τελικό αποτέλεσμα την έκδοση του προτύπου MIL-STD-464 το 1997 [12], το οποίο επικαιροποιήθηκε με το MIL-STD-464A το 2002 και με το MIL-STD-464B στο τέλος του 2009. Συγκεκριμένα υπήρξαν αναθεωρήσεις, στις απαιτήσεις του MIL-STD-464A, στα κριτήρια επαλήθευσης και στα καθήκοντα αναδόχου για την E3 προστασία των εναέριων, επίγειων και υποστηρικτικών συστημάτων. Τα αποτελέσματα αυτά περιλαμβάνουν EMC και EMI καθώς και κεραυνούς, στατικό ηλεκτρισμό και επιδράσεις από ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς. Το πρότυπο προορίζεται για ολοκληρωμένα συστήματα και πλατφόρμες, τόσο των νέων όσο και των τροποποιημένων και καθορίζει την ικανότητά τους να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των λειτουργικών επιδόσεων. Αυτό περιλαμβάνει την εκτίμηση των στοιχείων της δοκιμής στο ειδικό-στρατιωτικό EME όπου θα λειτουργεί. Όπως φαίνεται στους Πίνακες που θα συναντήσουμε στο κεφάλαιο 5 της εργασίας, τα εν λόγω περιβάλλοντα είναι γενικά πολύ σκληρότερα από τα εμπορικά ή τις απαιτήσεις του MIL-STD-461. Η απόδοση σε αυτό το πρότυπο αναφέρεται ως ηλεκτρομαγνητική ευπάθεια (EMV).

Το MIL-STD-464 είναι ένα σύνολο απαιτήσεων E3 υψηλού επιπέδου του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ, για την προμήθεια ολοκληρωμένων ή τροποποιημένων συστημάτων. Ο όρος «Συστήματα» σημαίνει μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα διαφόρων τύπων, όπως οχημάτων εδάφους ή αεροχημάτων, πλοίων ή υποβρυχίων, διαστημικών σκαφών ή οχημάτων εκτόξευσης. Ορισμένα συστήματα μπορεί να είναι τμήματα άλλων συστημάτων, όπως ένα μαχητικό αεροσκάφος F-18, που λειτουργεί πάνω σε ένα αεροπλανοφόρο.

Τα επίπεδα που αναφέρονται στο MIL-STD-464A είναι συχνά εξαιρετικά υψηλά. Ωστόσο, αυτά καθορίστηκαν με βάση τα στοιχεία μετρήσεων που λαμβάνονται στα αντίστοιχα περιβάλλοντα που αντιπροσωπεύουν.

Λόγω προβλημάτων στην ψηφιακή διαδικασία έκδοσης [d.], το MIL-STD-464B της 1ης Οκτωβρίου του 2010 καταργήθηκε και το MIL-STD-464C [13] με ημερομηνία έκδοσης την 1η Δεκεμβρίου 2010 θα το αντικαταστήσει. Δεν υπάρχουν τεχνικές αλλαγές μεταξύ των 2 προτύπων, συνεπώς η αναθεωρημένη έκδοση του MIL-STD-464A είναι το MIL-STD-464C.

Οι αναθεωρήσεις A και C του προτύπου MIL-STD-464 βελτίωσαν την αρχική έκδοσή του, αλλά αποτελούν εξελικτικές και όχι επαναστατικές αλλαγές. Το MIL-STD-464C έχει πολλές αλλαγές, χωρίς όμως να υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις με το MIL-STD-464A.

Εκτός από το συμβατικό προσανατολισμό της παραπάνω αναθεώρησης, που είναι η δημιουργία κανόνων πειθαρχίας E3 στα πρότυπα των προμηθειών, το παράρτημα του MIL-STD-464C αποτελεί την καλύτερη πηγή πληροφοριών διδαγμάτων που μπορεί να βρεθεί. Γενικότερα, το υπόψη πρότυπο αναλύει τις απαιτήσεις των στοιχείων που επηρεάζουν το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον λειτουργίας ενός συστήματος (π.χ απαίτηση μικροκυμάτων υψηλής ισχύος) τις απαιτήσεις συμβατότητας των γειτνιαζόντων συστημάτων ενώ αναφέρονται οι ειδικές απαιτήσεις όσον αφορά στους κεραυνούς, στα εσωτερικά και εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα, στη συμβατότητα EMC μεταξύ των συστημάτων, στην ηλεκτροστατική εκκένωση, στα πυρομαχικά, στους ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς, στις μικροκυματικές πηγές, σε συστήματα EMI κτλ. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του επικαιροποιημένου προτύπου είναι:

- α. Οι γενικές απαιτήσεις είναι αναλυτικότερες και ευρύτερες.
- β. Υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες και επαναπροσδιορισμό των στοιχείων, αναφορικά με την EMC εντός συστημάτων.
- γ. Διαφοροποιούνται οι απαιτήσεις για τον έλεγχο των προϊόντων αλληλοδιαμόρφωσης.
- δ. Ενσωματώθηκαν νέα στοιχεία που συνθέτουν το εσωτερικό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον των πλοίων, όπως τα ασύρματα συστήματα που λειτουργούν κάτω από τα καταστρώματα (π.χ Wi-Fi, συστήματα RFID, φορητές επικοινωνίες και άλλοι πομποί χαμηλής ισχύος), ενώ αυξάνονται οι απαιτήσεις του EME (V/m) σε μη μεταλλικά πλοία και υποβρύχια.
- ε. Αναλύονται οι απαιτήσεις αναφορικά με τα επαγόμενα επίπεδα στις υποδοχές των κεραιών των δεκτών και στις τεχνικές διακρίβωσής των.
- ζ. Έχουν αναθεωρηθεί οι πίνακες που αναφέρονται στο μέγιστο και μέσο επίπεδο του EME σε πλοία, διαστημικά οχήματα και τα οχήματα εκτόξευσης, επίγεια συστήματα, αεροχήματα και αεροσάφη με σταθερά και περιστρεφόμενα πτερύγια, ανάλογα με το φάσμα συχνοτήτων λειτουργίας.

2.1.6 Η Πρόοδος και το Μέλλον των Στρατιωτικών Προδιαγραφών EMC

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων επτά δεκαετιών, τα αμερικανικά στρατιωτικά πρότυπα EMC έχουν εξελιχθεί από μια απλή αρχή, προκειμένου να συμβαδίζουν με την «έκρηξη της τεχνολογίας» και το επακόλουθο περίπλοκο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον. Οι απαιτήσεις (όρια) των προτύπων MIL-STD-461, MIL-STD-462 και MIL-STD-464 αναπτύχθηκαν από ένα σύνολο εμπειρογνομόνων της κυβέρνησης των ΗΠΑ και του βιομηχανικού κλάδου κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες.

Ωστόσο, η ανάπτυξη των EMC προδιαγραφών δεν ολοκληρώνεται δεδομένου ότι η τεχνολογία απαιτεί συνεχώς αλλαγές της συμβατότητας. Από τα μέσα της δεκαετίας του 90', η επιτροπή E3 προτύπων της αμυντικής βιομηχανίας των ΗΠΑ, προσπαθεί να βρει μια συμβιβαστική λύση μεταξύ της πολιτικής του Υπουργείου Άμυνας να χρησιμοποιεί εμπορικά πρότυπα EMC όποτε είναι δυνατόν και της χρήσης των στρατιωτικών προτύπων. Ωστόσο, το μέχρι τώρα έργο καταδεικνύει ότι υπάρχει πολύ περιορισμένη επικάλυψη των στρατιωτικών έναντι των εμπορικών απαιτήσεων EMC. Οι στρατιωτικές απαιτήσεις EMC αφορούν μικρές μεταλλικές πλατφόρμες με μοναδικές απαιτήσεις που διαφέρουν από τις εμπορικές ανάγκες.

2.2 Ιστορικά Περιστατικά EMI/E3 σε Στρατιωτικά Συστήματα

2.2.1 Περίπτωση Ευστάθειας B-52

Όταν τα πρώτα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου πτήσης εγκαταστάθηκαν στο σύστημα αυτόματου πιλότου στο βομβαρδιστικό B-52, κατά τη διάρκεια πτήσης συνέβη μία μη επιδιωκόμενη ενεργοποίηση των επιφανειών ελέγχου πτήσης των πίσω σταθεροποιητικών πτερυγίων, μετά την ενεργοποίηση σημάτων HF. Το γεγονός οφειλόταν σε παρασιτικά HF ασύρματα σήματα, που επάγονταν στο σύστημα καλωδίωσης [14].

2.2.2 Δυστυχήματα Ελικοπτέρων Black Hawk

Μεταξύ 1981-1987 5 ελικόπτερα αυτού του τύπου συνετρίβησαν, καθώς πετούσαν πολύ κοντά σε πομπούς ασύρματων σημάτων, με αποτέλεσμα να σκοτωθούν ή τραυματισθούν όλοι οι επιβαίνοντες. Η αιτία ήταν η μη επαρκής ατρωσία, των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων ελέγχου πτήσεως κατά τη διάρκεια αυτής, απέναντι στα ακτινοβολούμενα πεδία υψηλής πυκνότητας (HIRF), που παρήγαγαν μη εντεταλμένες κινήσεις, καθώς πετούσαν εγγύς πυλώνων ασύρματων εκπομπών [14].

2.2.3 Μη Επιδιωκόμενη Ενεργοποίηση

Κατά τη διάρκεια δοκιμής της μονάδας διεπαφής βλημάτων B-52, έλαβε χώρα μία μη εντεταλμένη σηματοδότηση ρίψης βλήματος. Ένας από τους παράγοντες που συντέλεσαν, ήταν τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης του ενός καναλιού στο άλλο (crosstalk), στο σύστημα καλωδίωσης. Το αποτέλεσμα ήταν μία μακροχρόνια επανασχεδίαση και προσπάθεια δοκιμών [14].

Ένας κινητήρας πυρηνικού πυραύλου Pershing II (Γερμανία), υπέστη έκρηξη κατά τη διάρκεια εργασιών συντήρησης. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση αναγνωρίστηκε ως αιτία. 3 άνθρωποι ήταν οι απώλειες [e.].

2.2.4 Έλεγχος Πτήσης Μαχητικών Αεροσκαφών (F-16/Tornado)

Ένα μαχητικό αεροσκάφος F-16 συνετρίβη στην περιοχή ενός ραδιοεκπομπού της Φωνής της Αμερικής (VOA). Διότι η καλωδίωση του συστήματος ελέγχου πτήσης ήταν επιρρεπής στα ραδιοκύματα που εκπέμπονταν. Καθόσον το F-16 είναι εγγενώς ασταθές, ο πιλότος πρέπει να βασίζεται στον υπολογιστή πτήσης για να πετάξει το αεροσκάφος. Συνεπώς, αρκετά από τα F-16, έχουν υποστεί μετατροπές προκειμένου να εμποδίζουν αυτόν τον τύπο EMI, που προκλήθηκε από τις μη ικανοποιητικές προδιαγραφές στο συγκεκριμένο ηλεκτρονικό σύστημα. Αυτή η περίπτωση του F-16, ήταν ένας από τους λόγους που οδήγησαν στη θέσπιση από την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας (FAA), προγραμμάτων πιστοποίησης [14].

Παρόμοιο περιστατικό συνέβη στο Μόναχο το 1984 με ένα γερμανικό μαχητικό Tornado, που συνετρίβη μετά από πτήση πολύ κοντά σε έναν εκπομπό μεγάλης ισχύος της Φωνής της Αμερικής (VOA) [14].

2.2.5 Επιχείρηση Αποκατάστασης της Δημοκρατίας στην Αϊτή (1995)

Κατά τη διάρκεια αντικατάστασης αερομεταφερόμενων δυνάμεων, επειδή τα αεροσκάφη του στρατού δεν ήταν σχεδιασμένα και δοκιμασμένα για μεταφορά προσωπικού, οι επιβαίνοντες χρειάστηκε να απενεργοποιήσουν όλα τα συστήματα επικοινωνιών και επιτήρησης [e.].

2.2.6 Αεροπλανοφόρο USS Forrestal (Βιετνάμ-1969)

Καθώς προσγειωνόταν ένα αεροσκάφος σε ένα αεροπλανοφόρο, ένας πύραυλος εκτοξεύθηκε από ακούσια ενεργοποίηση του συστήματος πυροδότησης από ραντάρ. 134 άνθρωποι σκοτώθηκαν και 27 αεροσκάφη καταστράφηκαν, ενώ η συνολική ζημιά στο πλοίο ανήλθε στα 27 εκατομμύρια δολάρια. Ήταν η μεγαλύτερη απώλεια του Ναυτικού από τον καιρό του Β' ΠΠ. Οι έρευνες έδειξαν ότι η υποβαθμισμένη

θωράκιση του αεροσκάφους επέτρεψε τη συχνότητα του ραντάρ να παρεμβάλλει τις λειτουργίες του [14].

2.2.7 Πλοίο Επιφανείας HMS Sheffield (Νησιά Φώκλαντ)

Το βρετανικό πλοίο Σέφιλντ είχε διαθέσιμο το πιο εξελιγμένο σύστημα αντιπυραυλικής άμυνας. Παρά το γεγονός αυτό, κατά τη διάρκεια του πολέμου των Νησιών Φόκλαντ (1982), χτυπήθηκε από πύραυλο EXOSET που εκτοξεύθηκε από βομβαρδιστικό της Αεροπορίας της Αργεντινής. Ο υπόψη πύραυλος δεν είχε ανιχνευθεί, καθόσον υπήρχαν φαινόμενα EMI κατά τη διάρκεια προσγείωσης και απογείωσης των αεροσκαφών Harrier που συνόδευαν το υπόψη πλοίο, από τα συστήματα επικοινωνιών τους. Τα φαινόμενα EMI προκάλεσαν υποβάθμιση της επιτήρησης των ραντάρ και δημιούργησαν ένα κενό στο αμυντικό σύστημα του πλοίου. Οι απώλειες ανήλθαν σε 21 ανθρώπους. 4 ημέρες αργότερα το πλοίο βυθίστηκε [14].

2.2.8 Επιθετικό Ελικόπτερο AH-64 Apache

Το επιθετικό ελικόπτερο AH-64 Apache σχεδιάστηκε κυρίως ως ένα αερομεταφερόμενο αντιαρματικό όπλο, με δυνατότητα γρήγορων χτυπημάτων εναντίων αρμάτων και τεθωρακισμένων οχημάτων. Το υπόψη ελικόπτερο είναι ουσιαστικά μία ηλεκτρονική συσκευή με πολλαπλά ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα, που ελέγχουν τα οπλικά συστήματα και τα συστήματα πλοήγησης. Κατά τη διάρκεια των αρχικών πτήσεων οι πιλότοι ανέφεραν ότι τα HIRF (ενέργεια ραδιοσυχνότητας) σήματα παρέμβαλαν τα ηλεκτρονικά συστήματα. Κατά μία περίπτωση αυτές οι παρεμβολές προκάλεσαν μία κατάσταση λειτουργίας πέρα από τα όρια της αρχικής σχεδίασης (overspeed). Οι επόμενες αναφορές έδειξαν ότι τα ελικόπτερα αυτού του τύπου ήταν επιρρεπή σε εκπομπούς διαφόρων τύπων (εμπορικούς μικροκυματικούς, τηλεόρασης, radar αεροδρομίων και πυράυλων). Το συμπέρασμα που εξήγαγε ο Στρατός ήταν ότι αυτά τα ελικόπτερα δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε αεροπλανοφόρα. Καθόσον καθορίστηκε ότι η πηγή των ανεπιθύμητων σημάτων ήταν η σύζευξη με τα I/O (Input/Output) καλώδια, η θωράκιση επανασχεδιάστηκε, αλλά ποτέ στο παρελθόν δεν κατασκευάστηκαν τόσο δαπανηρά αεροσκάφη/ελικόπτερα με EMI ατέλειες [14].

3. Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα - Στοιχεία Ηλεκτρομαγνητικού Περιβάλλοντος

3.1 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC)

Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) είναι η ικανότητα των συστημάτων, του εξοπλισμού, καθώς και των συσκευών που χρησιμοποιούν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, να λειτουργούν στα επιδιωκόμενα επιχειρησιακά περιβάλλοντά τους, χωρίς να υποστούν απαράδεκτη υποβάθμιση ή να προκαλούν ακούσια υποβάθμιση, λόγω της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ή απόκρισης. Αυτό συνεπάγεται την εφαρμογή της χρηστής διαχείρισης ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, του συστήματος, του εξοπλισμού, καθώς και τη διαμόρφωση σχεδιασμού συσκευής που να εξασφαλίζει λειτουργία χωρίς παρεμβολές και σαφείς έννοιες και δόγματα που μεγιστοποιούν την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα.

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.

3.2 Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή (EMI)

Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI) 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 αγωγού 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.

γ. Αξιολογηθούν επαρκώς οι EMC δοκιμές.

3.3 Ηλεκτρομαγνητικό Περιβάλλον (EME)

Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον (EME) είναι το προκύπτων προϊόν της κατανομής της ισχύος και του χρόνου σε διάφορες περιοχές συχνοτήτων των ακτινοβολούμενων ή/και επαγόμενων επιπέδων ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών, που πιθανόν να συναντηθεί από μία στρατιωτική δύναμη, ένα σύστημα, μία πλατφόρμα, όταν λειτουργούν στις ανατιθέμενες αποστολές τους, μέσα στα επιδιωκόμενα επιχειρησιακά περιβάλλοντα. Δυναμικά αποτελείται από ηλεκτρομαγνητική ενέργεια από πλήθος φυσικών πηγών [αστραπή, στατικός ηλεκτρισμός ατμοσφαιρικής κατακρήμνισης [precipitation static (p-static), ηλεκτροστατική εκκένωση (ESD), γαλακτικός και αστρικός θόρυβος κτλ] και τεχνητές πηγές [ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά συστήματα και RF συστήματα, συσκευές EM, υπερ-ευρείας ζώνης (UWB) συστήματα, μικροκυματικά συστήματα υψηλής ισχύος (HPM) κλπ].

3.4 Ηλεκτρομαγνητικές Περιβαλλοντολογικές Επιδράσεις (E3)

Οι ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις (E3) είναι η επίδραση του EME στην επιχειρησιακή ικανότητα των στρατιωτικών δυνάμεων, εξοπλισμού, συστημάτων και προγραμμάτων/πλατφομών. Συμπεριλαμβάνει τις επιδράσεις του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος που αντιμετωπίζονται από τις πειθαρχίες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), της Ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (EMI), την ηλεκτρομαγνητική ευπάθεια (EMV), τον ηλεκτρομαγνητικό παλμό (EMP), ηλεκτρονική προστασία και τους κινδύνους από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στα πυρομαχικά (HERO), στο προσωπικό (HERP), και στα καύσιμα (HERF) και περιλαμβάνει τις ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις που δημιουργούνται από όλους τους συντελεστές EME, συμπεριλαμβανομένων των RF συστημάτων, UWB συστημάτων, HPM συστημάτων, p-static, κλπ.

3.5 Ηλεκτρομαγνητική Τρωτότητα (EMV)

Η ηλεκτρομαγνητική τρωτότητα (EMV) είναι το χαρακτηριστικό ενός αντικειμένου, που του προξενεί την υποβάθμιση της απόδοσης ή της ικανότητας να εκτελεί τα ειδικοποιημένα καθήκοντα και έργα του, ως αποτέλεσμα ενός επιχειρησιακού EME. Ένα αντικείμενο λέγεται ότι είναι ευπαθές, όταν η απόδοσή του υποβαθμίζεται κάτω από ένα ικανοποιητικό επίπεδο, εξαιτίας της έκθεσής του στην πίεση ενός επιχειρησιακού ή παροδικού EME.

3.6 Ευπάθεια

Ευπάθεια είναι η ανικανότητα του αντικειμένου να εκτελέσει τη λειτουργία του, χωρίς υποβάθμιση με την παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής (EM) διαταραχής. Οι EM διαταραχές μπορεί να είναι με τη μορφή είτε ακτινοβολίας, είτε επαγόμενων εκπομπών. Ένα αντικείμενο θεωρείται ότι είναι ευπαθές, εάν δυσλειτουργεί, όταν εκτίθεται σε ακτινοβολούμενο ή επαγόμενο EME.

3.7 Αποκαλυπτικές Εκπομπές

Ακούσια σήματα που φέρουν στρατιωτικές πληροφορίες, τα οποία εάν υποκλαπούν και αναλυθούν, αποκαλύπτουν πληροφορίες εθνικής ασφάλειας, τα οποία εκπέμπονται, λαμβάνονται, χειρίζονται ή αλλιώς επεξεργάζονται από οποιοδήποτε σύστημα επεξεργασίας πληροφοριών.

3.8 Υψηλής Ισχύος Μικροκύμα (HPM)

Ένα περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων που παράγεται από μικροκυματικές πηγές (όπλο) που μπορεί να εκπέμπει υψηλής ισχύος ή υψηλής ενέργειας πυκνότητες. Οι συχνότητες λειτουργίας HPM είναι συνήθως μεταξύ 100 MHz και 35 GHz, αλλά μπορεί να περιλαμβάνει και άλλες συχνότητες, καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται. Η πηγή μπορεί να παράγει μικροκύματα υπό τη μορφή ενός ενιαίου παλμού, επαναλαμβανόμενων παλμών, παλμών με πιο σύνθετη διαμόρφωση, ή συνεχούς κύματος (CW) εκπομπές.

3.9 Άμεσα Αποτελέσματα Κεραυνού

Οποιαδήποτε φυσική βλάβη στη δομή του συστήματος και στον ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό εξοπλισμό, λόγω της άμεσης σύνδεσης του καναλιού κεραυνού και της ροής του ρεύματος. Αυτά τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν διάτρηση, σχίσιμο, κάμψη, κάψιμο, εξάτμιση, ή ανατίναξη του υλικού.

3.10 Έμμεσες Επιπτώσεις Κεραυνού

Ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα που προκαλούνται από κεραυνούς λόγω σύζευξης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Αυτά τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν βλάβη ή καταστροφή του ηλεκτρικού / ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

4. Επίπεδα Ηλεκτρομαγνητικού Περιβάλλοντος (ΕΜΕ)

4.1 Γενικά

Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον (ΕΜΕ), όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι το σύνολο της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από φυσικές ή τεχνητές πηγές, στο οποίο μία πλατφόρμα, σύστημα, υποσύστημα ή εξοπλισμός θα εκτίθεται σε οποιαδήποτε περιοχή (γη, ατμόσφαιρα, διάστημα, θάλασσα), καθώς εκτελεί την επιδιωκόμενη αποστολή του σε ολόκληρο το κύκλο ζωής λειτουργίας. Το ΕΜΕ αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο χρόνο και μέρος. Ειδικά χαρακτηριστικά εξοπλισμού (όπως επίπεδα ισχύος πομπού, συχνότητες λειτουργίας και ευαισθησία δέκτη), συντελεστές λειτουργίας (όπως οι αποστάσεις μεταξύ πλατφορμών, συστημάτων, υποσυστημάτων και υποδομών) και ο συντονισμός συχνότητας, συνεισφέρουν όλα στη διαμόρφωση ενός ΕΜΕ. Επιπρόσθετα, παροδικές εκπομπές, όπως εκείνες από EMP, κεραυνούς, ρ-static φαινόμενα, καθώς και οι χρόνοι αύξησης ή πτώσης αυτών των φαινομένων, επίσης συνεισφέρουν στη διαμόρφωση του ΕΜΕ.

Τα επίπεδα ΕΜΕ είναι πολύ υψηλά και μπορούν να υποβαθμίσουν την απόδοση του συστήματος, εάν δεν αντιμετωπισθούν κατάλληλα. Ακόμη και τα σχετικής μικρής ισχύος συστήματα προσωπικών επικοινωνιών, όπως τα κυψελωτά τηλέφωνα, όταν χρησιμοποιούνται σε εγγύτητα με ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές, μπορούν να δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητικά (EM) πεδία, ικανά να υποβαθμίσουν την απόδοση.

Σε όλες τις πιθανότητες, κάθε αντικείμενο θα εκτεθεί σε αρκετά διαφορετικά ΕΜΕ κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας του. Ο καθορισμός ενός αυστηρού επιπέδου ΕΜΕ, πιθανόν να οδηγήσει σε επιπρόσθετα και μη απαραίτητα κόστη. Κάθε ιδιαίτερο ΕΜΕ, στο οποίο ένα αντικείμενο θα εκτεθεί κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας του, θα πρέπει να προσδιορισθεί προτού καθορισθούν οι απαιτήσεις απόδοσης. Για παράδειγμα, ένας πύραυλος θα εκτεθεί σε διαφορετικά περιβάλλοντα ΕΜΕ, κατά τη διάρκεια της μεταφοράς, της αποθήκευσης, του ελέγχου, της εκτόξευσης και της προσέγγισης στο στόχο. Ο ειδικός έλεγχος E3 των απαιτήσεων της απόδοσης, θα πρέπει να βεβαιώσει ότι η απόδοση του αντικειμένου δεν θα επηρεασθεί δυσμενώς από οποιοδήποτε επίπεδο ΕΜΕ, το οποίο θα αντιμετωπίσει.

4.1.1 Επιδράσεις ΕΜΕ

Οι μη επιθυμητές επιδράσεις της EM ενέργειας πάνω σε ένα αντικείμενο, που λειτουργεί σε ένα ειδικό περιβάλλον, εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά ευαισθησίας του αντικειμένου, το πλάτος, τη συχνότητα και τα χαρακτηριστικά των ΕΜΕ που εξαρτώνται από το χρόνο. Για να αποτραπεί η εμφάνιση των προβλημάτων ΕΜΕ, οι πιθανές επιδράσεις της ανεπιθύμητης EM ενέργειας θα πρέπει να προσδιορισθούν για κάθε αντικείμενο, όταν λειτουργεί στο επιδιωκόμενο ΕΜΕ.

Η ανεπιθύμητη EM ενέργεια, δύναται να υποβαθμίσει την απόδοση ενός αντικειμένου προσωρινά, το οποίο πιθανόν να λειτουργεί υποβαθμισμένα, όσο θα εμφανίζεται η υπόψη EM ενέργεια. Σε άλλες περιπτώσεις, η EM ενέργεια πιθανόν να προκαλέσει μόνιμη ζημιά, κατά την οποία το αντικείμενο δε θα λειτουργεί μέχρι είτε να επισκευασθεί, είτε να αντικατασταθεί και το πρόβλημα επιλυθεί οριστικά. Παραδείγματα δυσμενών επιδράσεων, που δύναται να προκληθούν από ανεπιθύμητη EM ενέργεια και ανάλογα από το υλικό/εξοπλισμό που εκτίθεται στις ανεπιθύμητες εκπομπές, είναι τα παρακάτω:

- α. Κάψιμο ή διάσπαση τάσης των εξαρτημάτων, κεραιών κλπ.
- β. Υποβάθμιση της λειτουργίας των κυκλωμάτων επεξεργασίας σήματος του δέκτη.
- γ. Εσφαλμένη ή απρόσεκτη λειτουργία του ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού, των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, εξαρτημάτων, πυρομαχικών κτλ.
- δ. Ανεπιθύμητη πυροδότηση ή ανάφλεξη των πυρομαχικών και τεχνητών υλικών.
- ε. Τραυματισμοί προσωπικού.

4.1.2 Παράγοντες που Συμβάλλουν στη Διαμόρφωση του EME

Το EME στο οποίο στρατιωτικές πλατφόρμες, συστήματα, υποσυστήματα και εξοπλισμός πρέπει να λειτουργούν, αποτελείται από πολλαπλές φυσικές και τεχνητές πηγές. Η κατηγορία των φυσικών πηγών αποτελείται από τα παρακάτω:

- α. Γαλακτικός θόρυβος.
- β. Ατμοσφαιρικός θόρυβος.
- γ. Ηλιακός θόρυβος.
- δ. P-static φαινόμενα.
- ε. Κεραυνός.
- ζ. Φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκκένωσης (ESD).

Οι τεχνητές πηγές αποτελούνται από φίλιους ή εχθρικούς πομπούς, τόσο εσκεμμένες όσο και ακούσιες ή και παρασιτικές εκπομπές όπως ένας μηχανικός θόρυβος ή προϊόντα αλληλοδιαμόρφωσης. Οι πομποί σκόπιμης ακτινοβολίας περιλαμβάνουν, αλλά δεν περιορίζονται στους παρακάτω τύπους υποσυστημάτων/εξοπλισμού:

- α. Εξοπλισμός Επικοινωνιών.
- β. Εξοπλισμός Πλοήγησης.

- γ. Συστήματα Μετεωρολογίας.
- δ. Συστήματα Ραντάρ.
- ε. Οπλικά Συστήματα.
- ζ. Συστήματα Ηλεκτρονικού Πολέμου.

η. Απειλητικοί πομποί RF υψηλής ισχύος, όπως τα μικροκυματικά συστήματα υψηλής ισχύος (HPM).

Οι πομποί ακούσιας ακτινοβολίας περιλαμβάνουν υποσυστήματα και εξοπλισμό, τα οποία χρησιμοποιούν, μετασχηματίζουν και δημιουργούν ανεπιθύμητη EM ενέργεια, ως υποπροϊόν της εκτέλεσης της λειτουργίας και αποστολής τους. Ως εκ τούτου, κάθε ηλεκτρική, ηλεκτρονική, ηλεκτρομηχανική και ηλεκτροπτική συσκευή μπορεί να είναι πομπός ακούσιας ακτινοβολίας. Παραδείγματα τέτοιων πομπών, είναι τα παρακάτω:

- α. Εσκεμμένοι ακτινοβολητές που εκπέμπουν επιπλέον ακτινοβολίες εκτός από τις επιδιωκόμενες εκπομπές.
- β. Υπολογιστές και οι περιφερειακές τους συσκευές.
- γ. Τηλεοράσεις, κάμερες και εξοπλισμός Video.
- δ. Μικροκυματικοί φούρνοι.
- ε. Ασύρματοι δέκτες και ραντάρ.
- ζ. Τροφοδοτικά και μετατροπείς συχνότητας.
- η. Κινητήρες και γεννήτριες.
- θ. Ηλεκτρικά εργαλεία.

Τα επίπεδα ισχύος και οι θέσεις της πηγής σε σχέση με το αντικείμενο είναι τα δύο βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των πηγών που είναι οι κυρίαρχοι παράγοντες που συνεισφέρουν στο EME λειτουργίας. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια των κανονικών επιχειρήσεων σε πεδίο μη άμεσης εμπλοκής με εχθρικές δυνάμεις, οι πρωτογενείς πηγές της EM ενέργειας θα είναι οι εκούσιες και παρασιτικές εκπομπές από τον εξοπλισμό που είναι εγκατεστημένος στο ίδιο σημείο. Σε ένα σενάριο μάχης, οι εκπομπές από τις συμμαχικές δυνάμεις, θα μπορούσε να είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας. Ως εκ τούτου, το EME στο οποίο ένα προϊόν πρέπει να λειτουργήσει και να επιβιώσει είναι τόσο εξαρτώμενο από την αποστολή, όσο και από το σενάριο.

4.2 Καθορισμός του EME

Το αναμενόμενο EME του συστήματος ή εξοπλισμού, πρέπει να καθορισθεί κατά τη διάρκεια της φάσης της τελειοποίησης της ιδέας. Η ακόλουθη διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τον προσδιορισμό του περιβάλλοντος:

α. Στάδιο 1: Καθορίζονται οι κύριες γεωγραφικές περιοχές και οι χώρες στις οποίες το σύστημα ή ο εξοπλισμός αναμένεται να λειτουργήσει.

β. Στάδιο 2: Ορίζονται το θέατρο επιχειρήσεων και οι αποστολές στις οποίες θα συμμετέχει το σύστημα ή εξοπλισμός, καθώς και οι σχετικές πλατφόρμες και συστήματα που θα υποστηρίξουν τις αποστολές.

γ. Στάδιο 3: Καθορίζονται τα τωρινά και μελλοντικά συστήματα, στρατιωτικά και πολιτικά, που είναι εξαρτώμενα από το φάσμα, τα οποία θα μπορούσαν να αλληλεπιδράσουν με το προτεινόμενο σύστημα ή εξοπλισμό κατά τη διάρκεια αυτών των αποστολών. Η ταυτοποίηση πρέπει να αντιμετωπίσει τόσο το στρατιωτικό όσο και το εμπορικό EME.

Παρά το γεγονός ότι το EME ορίζεται στην αρχή του προγράμματος, συνεχείς ενημερώσεις του EME είναι απαραίτητες καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής, διότι το περιβάλλον δεν είναι στατικό. Άλλοι φορείς (φίλιοι και εχθρικοί) θα αναπτύσσουν ή θωρακίζουν αντικείμενα ταυτόχρονα, τα οποία θα λειτουργήσουν εντός του ίδιου EME. Τα δεδομένα που αφορούν αυτά τα «νέα» στοιχεία πρέπει να αναζητηθούν και να προστεθούν στους ορισμούς EME. Επιπλέον, η αρχική αποστολή του προτεινόμενου αντικείμενου μπορεί να αλλάξει, επιβάλλοντας προς εξέταση, επιπλέον γεωγραφικές περιοχές, χώρες, πλατφόρμες υποδοχής και γειτονικό εξοπλισμό.

Η φυσική διαμόρφωση του ενός στοιχείου μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την προβλεπόμενη θέση του. Η ανοσία ενός στοιχείου ή η ευαισθησία στο EME, επίσης μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τη φυσική διαμόρφωση και τη θέση του σε σχέση με το προβλεπόμενο EME λειτουργίας. Ως εκ τούτου, κατά την ανάπτυξη των Ε3 απαιτήσεων απόδοσης, θα πρέπει να εξεταστεί τόσο η φυσική διαμόρφωση, όσο και η θέση του στοιχείου μέσα στο κάθε ένα από τα προβλεπόμενα EME λειτουργίας του.

4.2.1 Επίπεδα Εξωτερικών EME RF για Συστήματα και Πλατφόρμες

Κατά τον προσδιορισμό των κατάλληλων επιπέδων εξωτερικών EME RF, για συστήματα και πλατφόρμες, χρησιμοποιούνται οι ισχύοντες πίνακες EME του MIL-STD-464 (σε πλοίο, στο έδαφος, σε αεροσκάφη κτλ). Αυτό θα δώσει τα γενικά επίπεδα EME σε συγκεκριμένες αποστάσεις, που μπορεί να κυμαίνονται σε λιγότερο από 1 μέτρο έως αρκετά χιλιόμετρα - μίλια, ανάλογα με τον πίνακα και τις αντίστοιχες περιοχές συχνοτήτων για το σύστημα ή την πλατφόρμα. Εάν τα επίπεδα EME είναι επιθυμητά σε αποστάσεις διαφορετικές από εκείνες που χρησιμοποιούνται για τους

ειδικούς πίνακες EME στο παραπάνω πρότυπο, τα επίπεδα EME μπορεί να προσαρμοστούν χρησιμοποιώντας τις οδηγίες του MIL-STD-464 και τους ισχύοντες αντίστοιχους πίνακες, οι οποίοι παρατίθενται σε αυτό το κεφάλαιο, σύμφωνα με το στρατιωτικό εγχειρίδιο MIL-HDBK-235 1C [15]. Με αυτόν τον τρόπο παρέχονται τα συγκεκριμένα και μοναδικής πλατφόρμας επίπεδα EME και τα αντίστοιχα εύρη συχνοτήτων. Επιπρόσθετες πληροφορίες δίδονται από τους επιμέρους πομπούς που δημιουργούν τα επίπεδα EME, τις συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων λειτουργίας τους, καθώς και τις αποστάσεις που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των επιπέδων EME. Εάν ένας πομπός δεν είναι πλέον σε λειτουργία, προσδιορίζεται ο εξοπλισμός αντικατάστασης και τα επίπεδα EME που δημιουργούνται από τον παραπάνω εξοπλισμό και εφαρμόζονται αυτά τα επίπεδα EME. Άλλοι παράγοντες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα επίπεδα EME είναι η πιθανότητα υποκλοπής, οι περίοδοι φωτισμού της ακτινοβολίας (dwell times), ο συγκεκριμένος τύπος του πομπού και η εκπεμπόμενη ισχύς.

4.2.2 Περιορισμοί EME για Συστήματα και Υποσυστήματα

Τα εκπεμπόμενα όρια ευαισθησίας για τα υποσυστήματα και τον εξοπλισμό περιγράφονται στην απαίτηση RS103 (radiated susceptibility, electric field, 2 MHz to 40 GHz) του MIL-STD-461. Αυτά τα επίπεδα ορίων καθορίζονται για διαφορετικές πλατφόρμες ή συστήματα και βασίζονται απλά σε επίπεδα που αναμένεται να προκύψουν κατά τη διάρκεια λειτουργίας του εξοπλισμού. Αυτά δεν αντιπροσωπεύουν τη χειρότερη περίπτωση περιβάλλοντος στον οποίο μπορεί να εκτεθεί αναγκαστικά ο εξοπλισμός. Τα περιβάλλοντα RF, μπορεί να είναι εξαιρετικά μεταβλητά, ιδιαίτερα για τους πομπούς που δεν βρίσκονται στην πλατφόρμα. Τα όρια τίθενται σε επίπεδα που θεωρούνται επαρκή για να καλύψουν τις περισσότερες καταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων των επιπέδων σχεδιασμού για τις επιδράσεις της «πίσω πόρτας (back door)» (αποκλείοντας την άμεση σύζευξη με τις κεραιές της πλατφόρμας ή με εξωτερικά τοποθετημένες συσκευές) που απορρέουν από τους απειλητικούς πομπούς RF υψηλής ισχύος, όπως το ραντάρ, τα συστήματα επικοινωνιών και τα μικροκυματικά συστήματα υψηλής ισχύος (HPM).

Πιθανή προσαρμογή των συμβατικών εγγράφων από την Υπηρεσία Προμηθειών, μπορεί να περιλαμβάνει την τροποποίηση των καθορισμένων ορίων EME και τις απαιτούμενες περιοχές συχνοτήτων με βάση τις πηγές εκπομπής που βρίσκονται κοντά σε μια συγκεκριμένη εγκατάσταση ή πλατφόρμα. Τα πραγματικά επίπεδα των πεδίων, μπορούν να υπολογιστούν από τα χαρακτηριστικά των πομπών, τις αποστάσεις μεταξύ των πομπών και του εξοπλισμού και την παρεμβαλλόμενη θωράκιση.

4.2.3 Προσδιορισμός του Επιδιωκόμενου EME

Μια σημαντική διαφορά υπάρχει συνήθως μεταξύ των επιπέδων EM ενέργειας που θα υποβαθμίσουν ή θα περιορίσουν προσωρινά την αποτελεσματική απόδοση ενός στοιχείου (σε κατάσταση λειτουργίας) και εκείνων των επιπέδων που θα βλάψουν

ένα στοιχείο μόνιμα (ικανότητα επιβίωσης). Επιπλέον, ένα στοιχείο που είναι ευαίσθητο κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών πρέπει να αξιολογείται για να διαπιστωθεί εάν θα είναι ευάλωτο στο επιδιωκόμενο επιχειρησιακό του περιβάλλον. Η απαίτηση για τον έλεγχο τυχόν επιπτώσεων από το EME κάτω από όλες τις συνθήκες θα πρέπει να είναι κατ' ανάγκη, πιο αυστηρή από τη σπουδή της διασφάλισης της μη οριστικής καταστροφής του προϊόντος. Κατά τον καθορισμό των E3 απαιτήσεων ελέγχου, η λειτουργία του αντικειμένου και η κρισιμότητα για την προβλεπόμενη αποστολή θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Υπάρχουν επίσης προληπτικά μέτρα που μπορούν να ληφθούν για την προστασία του εξοπλισμού που δεν είναι σε χρήση από την οριστική καταστροφή από EM ενέργεια, τα οποία δεν μπορούν να εφαρμοστούν όταν η συσκευή είναι σε κατάσταση λειτουργίας.

Τα χαρακτηριστικά ευαισθησίας ενός στοιχείου εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού του. Για παράδειγμα, το στοιχείο μπορεί να ανταποκρίνεται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων ή να είναι επιλεκτικής συχνότητας. Επιπλέον, ορισμένες συσκευές που εκτίθενται σε ακτινοβολία έχουν χρόνους απόκρισης σε μικροδευτερόλεπτα και επηρεάζονται από τα μέγιστα επίπεδα ισχύος των βραχυπρόθεσμων σημάτων, ενώ άλλες συσκευές «θύματα (victims)» επηρεάζονται από τη θέρμανση και ανταποκρίνονται πιο αργά στο μέσο όρο επιπέδων ισχύος των σημάτων. Τα χαρακτηριστικά σχεδίασης ενός στοιχείου, καθώς και η ακεραιότητα θωράκισης, η επιλογή των συστατικών και η χρήση του φιλτραρίσματος, πρέπει να εξετάζονται κατά την αξιολόγηση των EM επιδράσεων σε ένα στοιχείο.

Πιθανές αλλαγές στο προβλεπόμενο EME λειτουργίας και οι μελλοντικές εφαρμογές ενός στοιχείου (συσκευή/εξοπλισμός), θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον καθορισμό του EME, το οποίο ένα στοιχείο μπορεί να συναντήσει. Ένα στοιχείο που είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο EME, πιθανόν να απαιτηθεί να λειτουργήσει σε ένα άλλο μελλοντικά ή το στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτελέσει λειτουργίες και αποστολές που δεν είχε προγραμματιστεί για αυτές, κατά την αρχική σχεδίαση του προϊόντος. Παρά το γεγονός ότι το κόστος ενός στοιχείου μπορεί να αυξηθεί όταν σχεδιάζεται για ένα πιο αυστηρό EME, συγκριτικά με το EME που εκτιμάται ότι θα αντιμετωπίσει το στοιχείο, η αύξηση του κόστους μπορεί να δικαιολογηθεί αναφορικά με την προσαρμοστικότητα για μελλοντικές εφαρμογές. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα στοιχεία που έχουν σχεδιασθεί για ανάγκες μιας Υπηρεσίας και τελικά πιθανόν να χρησιμοποιηθούν σε μια κοινή επιχείρηση πολλών φορέων.

Κατά τον καθορισμό του επιχειρησιακού EME στο οποίο ένα στοιχείο θα πρέπει να λειτουργήσει ή να επιβιώσει κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής, πρέπει να εξετάζονται οι συνθήκες λειτουργίας και εγκατάστασης που μπορεί να εμποδίσουν ή να μειώσουν την έκθεση στο EME, καθώς και οποιαδήποτε επιπρόσθετη πληροφορία που μπορεί να επηρεάσει την έκθεση ενός αντικειμένου στο EME. Για παράδειγμα, η πληρότητα σε πομπούς σε μια πλατφόρμα ή τοποθεσία, θα καθορίσει τις ζώνες συχνοτήτων εντός των οποίων πιθανώς θα συναντώνται υψηλά επίπεδα EM ενέργειας. Περιορισμοί διαστάσεων και ενδιάμεσων δομών πιθανόν να υπάρχουν, οι οποίοι θα

προκαλέσουν ένα στοιχείο να λειτουργήσει στο κοντινό ή επαγόμενο πεδίο της περιοχής μιας κεραίας. Άλλοι παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν είναι η πλατφόρμα πάνω στην οποία είναι εγκατεστημένο ένα στοιχείο και η επιχειρησιακή χρήση του.

4.2.4 Δομή Πινάκων Επιπέδων EME

4.2.4.1 Γενικά

Ένας από τους βασικούς στόχους του εκάστοτε Υπουργείου Άμυνας είναι να παρέχει τον εξοπλισμό και τα συστήματα των οποίων οι επιδόσεις δεν θα επηρεαστούν αρνητικά από το EME κατά τη διάρκεια όλων των φάσεων του κύκλου ζωής του εξοπλισμού ή του συστήματος. Για παράδειγμα στις ΗΠΑ για να επιτευχθεί αυτό, τα επίπεδα EME έχουν αναπτυχθεί και καθορισθεί στο MIL-STD-464 και MIL-STD-461 για να συνδράμουν στις υπηρεσίες προμήθειας και στους σχεδιαστές εξοπλισμού, στον καθορισμό του επιδιωκόμενου EME λειτουργίας. Έχουν εκδοθεί εγχειρίδια από τους στρατιωτικούς φορείς των ΗΠΑ που αναλύουν τα επίπεδα του εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος σε σχέση με όλα τα συστήματα του Στρατού - Ναυτικού - Αεροπορίας για κάθε είδους επιχείρηση και πολεμικό υλικό (η σειρά των τμημάτων από 2C έως 10C του MIL-HDBK-235), για να υποστηρίξουν τους πίνακες EME που βρίσκονται στο MIL-STD-464, οι οποίοι θα αναφερθούν στο κεφάλαιο 5 της παρούσης εργασίας. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει ένας αποκλειστικός πίνακας EME ή τμήμα πίνακα για τα μη επανδρωμένα αεροχήματα (UAV). Τα επίπεδα EME για τα UAV μπορεί να καθορίζονται από την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού των τμημάτων για το είδος των UAV (σταθερών πτερυγίων ή περιστροφικών πτερυγίων) και τις προβλεπόμενες επιχειρήσεις UAV (σε πλοίο και/ή όχι σε πλοίο).

4.2.4.2 EM Δεδομένα

Τα δεδομένα στους πίνακες EME των παραπάνω στρατιωτικών προτύπων, αποτελούνται από μετρήσιμα καθώς και υπολογισμένα επίπεδα EME. Κάθε πίνακας EME δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τις μέγιστες μετρήσιμες τιμές EME που συλλέγονται σε κάθε ζώνη συχνότητων. Μετρήσιμα επίπεδα EME ελήφθησαν από εκθέσεις ερευνών, πιστοποιήσεις συστήματος και ειδικές δοκιμές. Στα μετρήσιμα EME δόθηκε προτεραιότητα έναντι των υπολογισμένων EME. Μετά την καταχώριση των μετρήσιμων τιμών, οι υπολογισμένες τιμές EME χρησιμοποιήθηκαν για να συμπληρώσουν τις διαθέσιμες θέσεις στον πίνακα. Τέλος, τα πλησιέστερα EME χρησιμοποιούνται όταν υπάρχουν συστήματα επί του σκάφους ή σε χώρο που δεν υποστηρίζουν μια συγκεκριμένη ζώνη συχνότητων. Σημειώνεται ότι, ο ίδιος ο πομπός δεν οδηγεί κατ' ανάγκη σε υψηλά και μέσα επίπεδα σε μια συγκεκριμένη περιοχή συχνότητων σε κάθε πίνακα. Επιπρόσθετα στα επίπεδα EME, κάθε μέρος περιγράφει τη μεθοδολογία και λογική που χρησιμοποιείται για να καθορίσει τα επίπεδα, παρέχοντας έτσι στο χρήστη ένα μέσο για την προσαρμογή των περιβαλλόντων όπως απαιτείται.

4.2.4.3 EM Χαρακτηριστικά

Οι πλατφόρμες και τα συστήματα των ενόπλων δυνάμεων των ΗΠΑ και οι σχετιζόμενοι με αυτά πομποί και κεραίες, αξιολογήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των διαφόρων πινάκων EME των προαναφερόμενων προτύπων - εγχειριδίων. Πιθανά εχθρικά συστήματα HPM επίσης χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των υπόψη επιπέδων EME. Τα χαρακτηριστικά πομπού/κεραίας συλλέχθηκαν από τις βάσεις δεδομένων και τα μοντέλα που υπάρχουν στην Υπηρεσία Αμυντικών Συστημάτων Πληροφοριών (DISA)/Κέντρο Κοινού Φάσματος (JSC), καθώς και από φυλλάδια των κατασκευαστών, τεχνικά εγχειρίδια και εκθέσεις έρευνας EME. Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές διαμορφώσεις πομπού/κεραίας, για τους υπολογισμούς επιλέχθηκε η κεραία με το μέγιστο κέρδος. Χαρακτηριστικά πομπού περιλαμβάνουν το φάσμα συχνοτήτων, τη μέγιστη ισχύ εξόδου, τη μέγιστη έξοδο της μέσης ισχύος, το πλάτος του παλμού και τη συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF). Οι προδιαγραφές κεραίας περιλαμβάνουν την ονοματολογία της κεραίας, το κέρδος, τον τύπο της κεραίας, την οριζόντια διάσταση, την κάθετη διάσταση, το οριζόντιο εύρος ακτινοβολίας, το κάθετο εύρος ακτινοβολίας, τις περιοχές πεδίου της κεραίας, την πυκνότητα ενέργειας και ισχύος του πεδίου, τους πλευρικούς λοβούς της (sidelobes) κεραίας και λογικές και παραδοχές για αποστάσεις από την κεραία.

4.2.5 Υπολογισμοί

4.2.5.1 Υπολογισμοί της Μέγιστης και της Μέσης Τιμής της Ισχύος

Όλες οι μονάδες που χρησιμοποιούνται να ορίσουν επίπεδα EME σε αυτή την εργασία, αναφέρονται στην ενεργό τιμή (rms). Όλες οι μετρήσεις και υπολογισμοί της έντασης του πεδίου, προέρχονται από την πυκνότητα ισχύος, είτε τη μέση τιμή, είτε τη μέγιστη και μετατρέπονται στην ενεργό τιμή (V/m).

Τυπικά, τα επικοινωνιακά συστήματα είναι ικανά σε τεχνικές διαμόρφωσης, όπως διαμόρφωση πλάτους (AM), διαμόρφωση συχνότητας (FM), παλμοκωδική διαμόρφωση (PCM) και συνεχούς κύματος (CW). Προκειμένου να καθορίσουμε την ενεργό τιμή της μέγιστης τιμής ισχύος για FM και PCM, χρησιμοποιείται μια προσέγγιση της χειρότερης περίπτωσης, όπου η μέση ισχύς είναι ίση με τη μέγιστη ισχύ του αδιαμόρφωτου φέροντος (ή του CW αντίστοιχα). Σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος ενέργειας (duty cycle) μιας μονάδας CW σήματος κάνει τη μέγιστη και μισή τιμή ισοδύναμα. Για σήματα AM, το σενάριο της χειρότερης περίπτωσης είναι όπου η μέγιστη τιμή της ισχύος ενός 100% διαμορφωμένου σήματος AM, είναι διπλάσια της μέγιστης τιμής του φέροντος και ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται για AM σήματα. Η προαναφερθείσα αιτιολόγηση χρησιμοποιείται εξαιτίας της τυχαίας αλλαγής της φύσης της αληθινής μέγιστης τιμής, πάνω σε ένα συγκεκριμένο διάστημα.

Τα σήματα διαμορφωμένα κατά παλμό, τυπικά από ραντάρ, έχουν διαφορές μεταξύ μέγιστης και μέσης τιμής. Η μέση ισχύ καθορίζεται από το λόγο του χρόνου

εκπομπής (time-on) και του χρόνου παύσης (time - off), πάνω σε ένα διάστημα. Αυτός ο λόγος είναι ο χρόνος ενέργειας (duty cycle) και μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.1. Η μέση τιμή μπορεί να υπολογισθεί από το αποτέλεσμα της μέγιστης ισχύος και του χρόνου ενέργειας (duty cycle), όπως φαίνεται στην εξίσωση 4.2.

$$d.c. = \frac{pw}{pri} \text{ ή } d.c. = pw \times prf \quad (\text{Εξ.4.1})$$

$$p_{\alpha} = p_p \times d.c. \quad (\text{Εξ.4.2})$$

όπου

$d.c.$ = χρόνος ενεργείας (duty cycle)

pw = εύρος παλμού (σε δευτερόλεπτα)

pri = το διάστημα επανάληψης του παλμού (σε δευτερόλεπτα)

prf = η συχνότητα επανάληψης του παλμού (Hz).

p_{α} = η μέση ισχύ (Watts)

p_p = η μέγιστη ισχύ (Watts)

4.2.5.2 Όρια Κοντινών και Μακρινών Πεδίων

Τα EM πεδία γύρω από την κεραία διαμοιράζονται σε 3 περιοχές: το αντενεργό κοντινό πεδίο (εξ.4.3), το ακτινοβολούμενο κοντινό πεδίο ή Fresnel (εξ.4.4) και το μακρινό πεδίο ή Fraunhofer (εξ.4.5)

$$NF_r \approx 0.62 \times \sqrt{\frac{L^3}{\lambda}} \quad (\text{όρια αντενεργού κοντινού πεδίου}) \quad (\text{Εξ.4.3})$$

$$0.62 \times \sqrt{\frac{L^3}{\lambda}} \leq NF_{rad} \leq \frac{2 \times L^2}{\lambda} \quad (\text{όρια ακτινοβολούμενου πεδίου}) \quad (\text{Εξ.4.4})$$

$$FF \approx \frac{2 \times L^2}{\lambda} \quad (\text{όρια κοντινού πεδίου}) \quad (\text{Εξ.4.5})$$

όπου

NF_r = η περιοχή του κοντινού αντενεργού πεδίου (μέτρα)

NF_{rad} = Η περιοχή του ακτινοβολούμενου κοντινού πεδίου (Fresnel) (μέτρα)

FF = Η περιοχή του μακρινού πεδίου (Fraunhofer) (μέτρα)

λ = το μήκος κύματος

L = η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας

Εάν η κεραία είναι μικρή και συγκρίσιμη με το μήκος κύματος ($\lambda > 10L$), το ακτινοβολούμενο κοντινό πεδίο δεν υπάρχει.

4.2.5.3 Μέθοδος Υπολογισμού Πυκνότητας Ισχύος Μακρινού Πεδίου

Στην περιοχή του μακρινού πεδίου, η πυκνότητα ισχύος για τις παραβολικές (aperture) κεραίες και τις κεραίες σύρματος (wire), μπορούν να υπολογισθούν χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.6. Όλα τα επίπεδα της πυκνότητας της ισχύος υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τη μέγιστη ισχύ εξόδου του πομπού και του κέρδους της κεραίας που σχετίζεται με το εύρος δέσμης 3 dB (στο σημείο δηλαδή που η ισχύς της κεραίας μειώνεται στο ήμισυ της μέγιστης τιμής της), του κύριου λοβού ακτινοβολίας

$$PD = \frac{P_T \times G}{4 \times \pi \times d^2} \quad (\text{Εξ.4.6})$$

όπου

PD = η πυκνότητα ισχύος (*watts/μέτρα²*)

P_T = η μέγιστη ή η μέση τιμή της ισχύος εξόδου του πομπού (*watts*)

G = το αριθμητικό κέρδος της κεραίας

d = η απόσταση ή το εύρος από την κεραία

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σχετίζεται με την πυκνότητα ισχύος από την εξίσωση:

$$E = \sqrt{P_d \times Z_0} \quad (\text{Εξ.4.7})$$

Όπου

E = η μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (*V/m-rms*)

Z_0 = η πραγματική αντίσταση του ελεύθερου χώρου (120π ή περίπου 377 Ω)

P_d = η πυκνότητα ισχύος (*watts/μέτρα²*)

Ανάλογα από την τερματική τάση των κεραιών, την αντίσταση και το τρέχων ρεύμα, τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία σε ένα δεδομένο σημείο θα ποικίλουν σε διαφορετικούς ρυθμούς σύμφωνα με το ποιο πεδίο γίνεται πρωτεύων. Στην περιοχή του κοντινού πεδίου η πραγματική αντίσταση του ελεύθερου χώρου, δεν είναι σταθερή στα 120π (περίπου 377 Ω). Καθώς η περιοχή του κοντινού πεδίου προσεγγίζεται, ο λόγος των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων αρχίζει περίπου από τα 377 Ω. Η ποικιλία μεταξύ των πεδίων γίνεται μικρότερη και οποιαδήποτε υπερίσχυση ενός πεδίου περιορίζεται. Μολονότι διαφορές υπάρχουν, η εξίσωση 4.7 χρησιμοποιείται ως σύμβαση μετατροπής των επιπέδων πυκνότητας ισχύος σε επίπεδα εντάσεων ηλεκτρικών πεδίων.

4.2.5.4 Μέθοδος Υπολογισμού Πυκνότητας Ισχύος Κοντινού Πεδίου

Η μέθοδος χρησιμοποιείται για να υπολογίσει την πυκνότητα ισχύος στην κατά τον άξονα διάδοση, μιας πηγής κυκλικής ή ορθογώνιας κεραίας στην περιοχή του εκπεμπόμενου κοντινού πεδίου (περιοχή Fresnel), η οποία δίδεται στα 4.2.5.4.1 και 4.2.5.4.2 αντίστοιχα. Το κέρδος της κεραίας και το εύρος του λοβού, υποβιβάζονται αντίστοιχα στην περιοχή Fresnel και ως εκ τούτου η εξίσωση 4.6 της πυκνότητας ισχύος του κοντινού πεδίου τροποποιείται για να εξηγήσει το συντελεστή διόρθωσης του κοντινού πεδίου (N) (εξίσωση 4.8).

$$PD = \frac{P_T \times G}{4 \times \pi \times d^2} \times N \quad (\text{Εξ.4.8})$$

όπου

PD = η πυκνότητα ισχύος ($watts/m^2$)

P_T = η μέγιστη ή η μέση τιμή της ισχύος εξόδου του πομπού ($watts$)

G = το αριθμητικό κέρδος της κεραίας

N = ο συντελεστής διόρθωσης του κέρδους του κοντινού πεδίου

d = η απόσταση ή το εύρος από την κεραία

Η μέθοδος υπολογισμού της πυκνότητας ισχύος του κοντινού πεδίου, που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των επιπέδων EME βασίζεται σε μία σταθερή προσέγγιση για την εκτίμηση φωτισμού της κεραίας και υπολογισμού/πιστοποίησης της αποδοτικότητας της κεραίας. Δεν εξετάζονται οι απώλειες λόγω κακής προσαρμογής (λόγος στάσιμων κυμάτων), που προέρχονται από την ανάκλαση στην υποδοχή τροφοδοσίας της κεραίας λόγω της κακής προσαρμογής, οι απώλειες RF μεταξύ της κεραίας και του σημείου υποδοχής της κεραίας, οι απώλειες υπερχειλίσης (spillover - η ενέργεια που δεν ανακλάται προς τον κύριο άξονα μετάδοσης του λοβού και χάνεται στους λοβούς πίσω από την κεραία με ανακλαστήρα) και οι απώλειες σφάλματος φάσης που προκαλούνται από το γεγονός ότι η κεραία παραβολικού κατόπτρου δεν έχει ομοιόμορφη επιφάνεια φάσης (η επιφάνεια που περιβάλλει το κύριο υλικό). Η μέθοδος για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος για κυκλικές παραβολικές κεραίες στο κοντινό πεδίο παρέχεται στην 4.2.5.4.1 και η μέθοδος για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος για ορθογώνιες παραβολικές κεραίες στο κοντινό πεδίο, παρέχεται στην 4.2.5.4.2. Οι δύο μέθοδοι διαφέρουν στοιχειωδώς στο γεγονός ότι, η μέθοδος της ορθογώνιας παραβολικής κεραίας υπολογίζει την τιμή μείωσης του κέρδους, ενώ η μέθοδος της κυκλικής υπολογίζει το συντελεστή διόρθωσης του κοντινού πεδίου, που περιλαμβάνει τόσο την τιμή της μείωσης του κέρδους, όσο και την τιμή απωλειών του διαστήματος.

4.2.5.4.1 Μέθοδος Υπολογισμού Πυκνότητας Κοντινού Ηλεκτρικού Πεδίου για τις Κυκλικές Παραβολικές Κεραίες

Η μέθοδος χρησιμοποιείται για να υπολογίσει την πυκνότητα ισχύος κατά μήκος του άξονα διάδοσης της πηγής, μιας μεγάλης κυκλικής παραβολικής κεραίας στην περιοχή του ακτινοβολούμενου κοντινού πεδίου και δίδεται στην εξίσωση 4.9. Το κέρδος της κεραίας και το εύρος δέσμης και τα δύο υποβιβάζονται στην περιοχή Fresnel. Ως εκ τούτου, η εξίσωση 4.6 της πυκνότητας ισχύος του μακρινού πεδίου τροποποιείται, για να λάβει υπόψη το συντελεστή διόρθωσης του κοντινού πεδίου της κεραίας (NCF_{circ}).

$$PD = \frac{P_T \times G}{4 \times \pi \times d_{ff}^2} \times NCF_{circ} \quad (\text{Εξ. 4.9})$$

όπου

PD = η μέση ή η μέγιστη τιμή της πυκνότητας ισχύος ($watts/m\acute{e}τρα^2$)

P_T = η μέγιστη ή η μέση τιμή της ισχύος εξόδου του πομπού ($watts$)

G = το αριθμητικό κέρδος της κεραίας

NCF_{circ} = ο συντελεστής διόρθωσης του κέρδους του κοντινού πεδίου

d_{ff} = η απόσταση από την κεραία μέχρι το κοντινό πεδίο, χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.5 (μέτρα)

Τα βήματα για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος του κοντινού πεδίου, είναι τα παρακάτω:

α. Υπολογίζεται η πυκνότητα ισχύος στα όρια του μακρινού ηλεκτρικού πεδίου, χρησιμοποιώντας τον μαθηματικό τύπο εκπομπής του Friis (Εξ. 4.9).

β. Υπολογίζεται η σταθερά φωτισμού (R), μέσω της εξίσωσης 4.10

γ. Υπολογίζεται ο φωτισμός της κεραίας και ο συντελεστής της κεραίας χρησιμοποιώντας τη σταθερά φωτισμού και τον πίνακα 4-1.

δ. Ελέγχεται εάν ο φωτισμός της κεραίας είναι λογικός, με υπολογισμό της αποδοτικότητας της κεραίας (K), χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.11.

ε. Υπολογίζεται η κανονικοποιημένη απόσταση από την κεραία και έπειτα καθορίζεται το NCF , με τη χρησιμοποίηση του κατάλληλου φωτισμού κεραίας στο σχήμα 4-1.

ζ. Πολλαπλασιάζεται η πυκνότητα ισχύος (στα όρια του μακρινού πεδίου) που υπολογίσθηκε στο βήμα α, με τη NCF , που υπολογίσθηκε στο βήμα ε.

Όπως προαναφέρθηκε, ο συντελεστής διόρθωσης του κοντινού πεδίου, εξαρτάται από τον τύπο φωτισμού της κεραίας και την απόσταση από την κεραία. Εάν ο φωτισμός της κεραίας δεν είναι γνωστός, μπορεί να εκτιμηθεί από τον πρώτο υπολογισμό της σταθεράς φωτισμού (R), χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.10.

$$R = 5.84 \times 10^{-5} \times (f) \times (BW) \times (L) \quad (\text{Εξ. 4.10})$$

όπου

R = η σταθερά υπολογισμού του φωτισμού

f = η συχνότητα σε MHz

BW = το εύρος δέσμης του λοβού σε μοίρες (οριζόντια ή κατακόρυφα) στα σημεία των 3dB

L = η διάμετρος της κυκλικής κεραίας (ή η μεγαλύτερη οριζόντια ή κατακόρυφη διάσταση της ορθογώνιας κεραίας)

Αφού υπολογίσουμε το R , ο φωτισμός της κεραίας μπορεί να εκτιμηθεί από τον Πίνακα 4-1. Οι φωτισμοί πιο πάνω από το $(1 - r^2)^4$, παραλείπονται σκόπιμα, καθώς η μείωση του κέρδους στην περιοχή Fresnel, θα είναι σχεδόν αμελητέα. Ο πίνακας είναι ο παρακάτω:

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1: Φωτισμοί Κυκλικής Παραβολικής Κεραίας $(1 - r^2)^\rho$

Όρια του R	Εκτιμώμενος φωτισμός	ρ	F
1.02 μέχρι 1.27	Ομοιόμορφος	0	1.00
1.27 μέχρι 1.47	$(1 - r^2)$ Taper (μειούμενος φωτισμός)	1	0.75
1.47 μέχρι 1.65	$(1 - r^2)^2$ Taper	2	0.56
1.65 μέχρι 1.81	$(1 - r^2)^3$ Taper	3	0.44
> 1.81	$(1 - r^2)^4$ Taper	4	0.36

Όταν η σταθερά φωτισμού (R) προσδιορίζεται να είναι στη διαχωριστική γραμμή μεταξύ δύο τάξεων φωτισμού, η υψηλότερη τάξη επιλέγεται, επειδή θα παράγει τη μέγιστη ένταση πεδίου. Ωστόσο, η απόδοση της κεραίας πρέπει να ελέγχεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.11, για να διαπιστωθεί εάν είναι λογική για αυτόν τον τύπο της κεραίας και φωτισμού. Σε περίπτωση που η ανώτερη τάξη φωτισμού προκαλούσε την απόδοση της κεραίας να είναι πολύ υψηλή, τότε πρέπει να επιλεγεί

η επόμενη κατώτερη τάξη. Η αποδοτικότητα της κεραίας (K) μεταξύ 0,3 και 0,9 θεωρείται λογική.

$$K = \frac{G(\lambda)^2}{4\pi(A)(F)} \quad (\text{Εξ. 4.11})$$

όπου

K = αποδοτικότητα της κεραίας (χωρίς μονάδα μέτρησης)

G = το κέρδος της κεραίας στο μακρινό πεδίο (χωρίς μονάδα μέτρησης)

A = η περιοχή ανοίγματος (τετραγωνικά μέτρα)

λ = το μήκος κύματος (μέτρα)

F = ο συντελεστής φωτισμού κεραίας

Μόλις ο συντελεστής φωτισμού (F) και η αποδοτικότητα επαληθευτεί ότι είναι εντός λογικού ορίου, τότε ο κατάλληλος συντελεστής διόρθωσης κέρδους μπορεί να εφαρμοστεί με τους υπολογισμούς στο εγγύς πεδίο για μια κυκλική κεραία ενός συγκεκριμένου τύπου φωτισμού.

Τώρα που έχει προσδιοριστεί ο τύπος φωτισμού ($\rho = 0,1,2,3,4$), ο συντελεστής διόρθωσης εγγύς-πεδίου μπορεί να επιλεγεί με τον υπολογισμό της κανονικοποιημένης απόστασης από την κεραία χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.12 και στη συνέχεια επιλέγοντας το κατάλληλο συντελεστή διόρθωσης (N) με βάση τον τύπο φωτισμού από το Σχήμα 4-1.

$$x = \frac{d}{2 \times \left(\frac{L^2}{\lambda}\right)} \quad (\text{Εξ. 4.12})$$

όπου

x = η κανονικοποιημένη απόσταση από την κεραία

λ = το μήκος κύματος (σε μέτρα)

L = η διάμετρος μιας κυκλικής κεραίας (ή η μεγαλύτερη οριζόντια ή κατακόρυφη διάσταση μιας ορθογώνιας κεραίας) σε μέτρα.

d = η απόσταση από την κεραία

Το επίπεδο της πυκνότητας ισχύος του κοντινού πεδίου, σε μια δοθείσα απόσταση (r) από την κεραία, μπορεί να καθορισθεί από τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος στην απόσταση του μακρινού πεδίου και πολλαπλασιάζοντας την τιμή από τον συντελεστή διόρθωσης (N).

4.2.5.4.2 Μέθοδος Υπολογισμού Πυκνότητας Ισχύος Κοντινού Πεδίου για τις Ορθογώνιες Παραβολικές Κεραίες

Η εξίσωση 4.13 χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος κατά μήκος του άξονα διάδοσης μιας πηγής μεγάλης ορθογώνιας παραβολικής κεραίας στην περιοχή του «ακτινοβολούντος» εγγύς-πεδίου. Τόσο το κέρδος της κεραίας όσο και το πλάτος της δέσμης υποβαθμίζονται στην περιοχή Fresnel. Ως εκ τούτου, η εξίσωση της πυκνότητας ισχύος (Εξ. 4.6) του μακρινού πεδίου έχει τροποποιηθεί για να ληφθεί υπόψη η μείωση του συντελεστή κέρδους της κεραίας του κοντινού πεδίου (NGF_{rect}).

$$PD = \frac{P_T \times G}{4 \times \pi \times d^2} \times NGF_{rect} \quad (\text{Εξ. 4.13})$$

όπου

PD = η πυκνότητα ισχύος (*watts/μέτρα²*)

P_T = η μέγιστη ή η μέση τιμή της ισχύος εξόδου του πομπού (*watts*)

G = το αριθμητικό κέρδος της κεραίας

NGF_{rect} = ο συντελεστής μείωσης του κέρδους του κοντινού πεδίου

d = η απόσταση ή το εύρος από την κεραία

Τα στάδια για τον υπολογισμό του κοντινού πεδίου πυκνότητα ισχύος, είναι τα παρακάτω:

α. Υπολογίζεται η πυκνότητα ισχύος στη συγκεκριμένη απόσταση ενδιαφέροντος χρησιμοποιώντας τον τύπο μετάδοσης Friis (Εξ. 4.13).

β. Υπολογίζεται ο σταθερός φωτισμός (R), τόσο για το οριζόντιο, όσο και για το κάθετο επίπεδο χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.10.

γ. Υπολογίζεται ο φωτισμός της κεραίας και ο συντελεστής κεραίας χρησιμοποιώντας τη σταθερά φωτισμού και τον πίνακα 4-4.

δ. Ελέγχεται εάν ο φωτισμός της κεραίας είναι λογικός με τον υπολογισμό της απόδοσης της κεραίας (K) χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.11.

ε. Προσδιορίζεται η NGF_{rect} χρησιμοποιώντας την απόσταση από την κεραία (σε μήκος κύματος) και το μήκος της κεραίας (σε όρους μήκους κύματος) χρησιμοποιώντας το κατάλληλο γράφημα φωτισμού της κεραίας από τα Σχήματα 4-2 μέχρι 4-6.

ζ. Πολλαπλασιάζεται η πυκνότητα ισχύος (στην απόσταση ενδιαφέροντος) που υπολογίζεται στο στάδιο α, με την NGF_{rect} που προσδιορίζεται στο στάδιο ε.

Τα ακόλουθα παρέχουν λεπτομέρειες για τον υπολογισμό των συντελεστών μείωσης του κέρδους (NGFrect) του κοντινού πεδίου για την περιοχή Fresnel μιας ορθογώνιας παραβολικής κεραίας. Όπως προαναφέρθηκε, ο συντελεστής μείωσης κέρδους κοντινού πεδίου εξαρτάται από τον τύπο του φωτισμού της κεραίας και την απόσταση από την κεραία. Ένας παράγοντας μείωσης της στάθμης τόσο για τον οριζόντιο, όσο και για τον κατακόρυφο άξονα/επίπεδο πρέπει να καθορίζεται, προκειμένου να υπολογίσουμε την πυκνότητα ισχύος για μία ορθογώνια κεραία. Εάν ο φωτισμός της κεραίας δεν είναι γνωστός για κάθε άξονα/επίπεδο, μπορεί να εκτιμηθεί με την μέθοδο που περιγράφεται στην 4.2.5.4.1. Πρώτον, υπολογίζεται ο σταθερός φωτισμός (R-value) χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.10 και καθορίζεται ο τύπος του φωτισμού και ο συντελεστής (F_h και F_v), χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.14 και τον πίνακα 4-2 για κάθε άξονα/επίπεδο. Οι φωτισμοί πάνω από \cos^4 παραλείπονται σκόπιμα, καθόσον η μείωση της στάθμης στην περιοχή Fresnel, θα είναι σχεδόν αμελητέα.

$$F = (F_h \times F_v) \quad (\text{Εξ. 4.14})$$

όπου

F = ο συντελεστής φωτισμού

F_h = ο συντελεστής οριζόντιου φωτισμού

F_v = ο συντελεστής κατακόρυφου φωτισμού

Ο υπόψη πίνακας είναι ο παρακάτω:

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2: Φωτισμοί Κεραίας Ορθογώνιου Ανοίγματος

Όρια του R	Εκτιμώμενος φωτισμός	$F = (F_h \times F_v)$
0.88 μέχρι 1.2	Ομοιόμορφη	1.00
1.2 μέχρι 1.45	\cos	0.810
1.45 μέχρι 1.66	\cos^2	0.667
1.66 μέχρι 1.93	\cos^3	0.575
1.93 μέχρι 2.03	\cos^4	0.515

Όταν η σταθερά φωτισμού (R) προσδιορίζεται να είναι στη διαχωριστική γραμμή μεταξύ δύο τάξεων φωτισμού, η υψηλότερη τάξη θα επιλεγεί επειδή θα παράγει τη μέγιστη ένταση πεδίου. Ωστόσο, η απόδοση της κεραίας πρέπει να ελέγχεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.11, για να διαπιστωθεί εάν είναι λογική για αυτόν τον τύπο της κεραίας και φωτισμό.

Στην περίπτωση που ο ανώτερης τάξης φωτισμός προκαλέσει την απόδοση της κεραίας να είναι πολύ υψηλή, τότε πρέπει να επιλεγεί η επόμενη κατώτερη τάξη. Οι αποδόσεις κεραιών (Κ) μεταξύ 0,3 και 0,9 θεωρούνται λογικές. Τώρα που έχει καθορισθεί ο τύπος φωτισμού (ομοιόμορφος, \cos , \cos^2 , \cos^3 , \cos^4), ο συντελεστής μείωσης κέρδους του κοντινού πεδίου μπορεί να επιλεγεί από την κανονικοποίηση της απόστασης από την κεραία και την διάσταση της κεραίας σε σχέση με το μήκος κύματος (εξισώσεις 4.15 και 4.16).

$$\lambda = \frac{300}{f} \quad (\text{Εξ. 4.15})$$

όπου

f = η συχνότητα σε MHz

$$x_{rect} = \frac{d}{\lambda} \quad (\text{Εξ. 4.16})$$

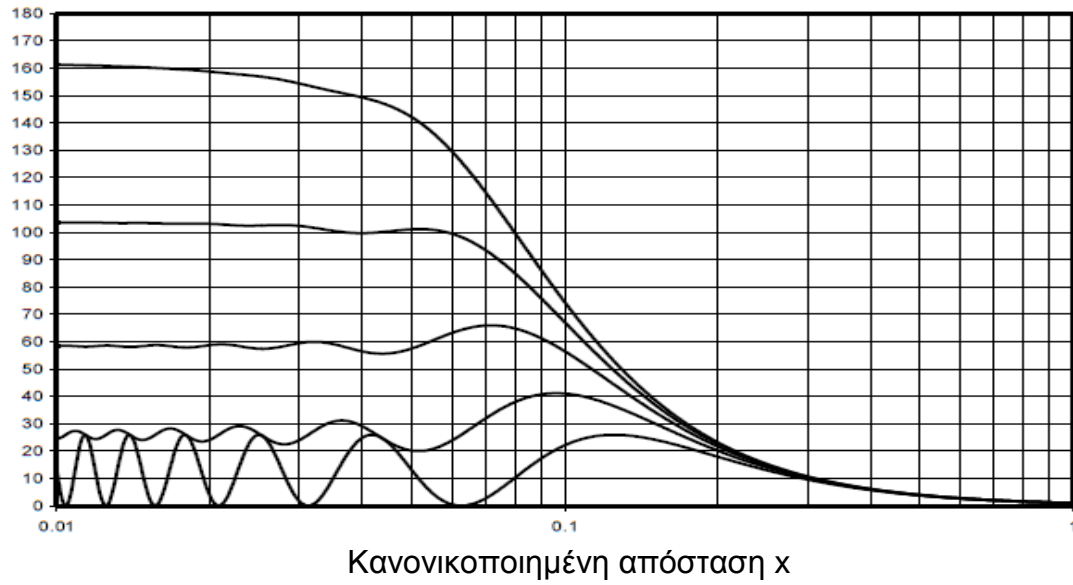
Τα σχήματα 4-2 μέχρι 4-6 παρέχουν γραφικές καμπύλες της μείωσης κέρδους σε decibels (dB) συναρτήσει της απόστασης (x_{rect}) από την κεραία (από την άποψη του μήκους κύματος) σε σχέση με τη διάσταση της κεραίας (από την άποψη του μήκους κύματος), για κάθε ένα από τους τύπους φωτισμού (ομοιόμορφος, \cos , \cos^2 , \cos^3 , \cos^4). Καθορίζονται οι διαστάσεις του ανοίγματος (α_h και α_v) κανονικοποιημένες σύμφωνα με το μήκος κύματος, όπως φαίνεται στην παρακάτω:

$$\alpha_h = \frac{L_h}{\lambda}, \quad \alpha_v = \frac{L_v}{\lambda} \quad (\text{Εξ. 4.17})$$

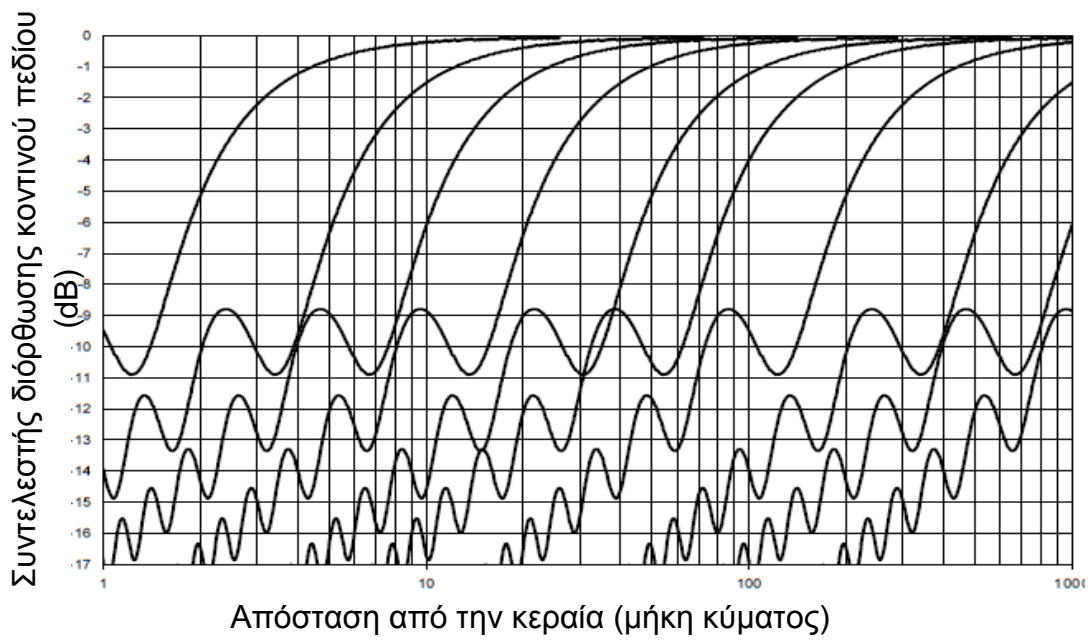
Αφού οι δύο κατάλληλες τιμές μείωσης κέρδους έχουν επιλεγεί για κάθε επίπεδο, ο συνδυασμένος συντελεστής μείωσης κέρδους του κοντινού πεδίου μπορεί να υπολογιστεί. Για να γίνει αυτό, προστίθενται οι δύο τιμές μείωσης του κέρδους και μετατρέπονται οι μονάδες από dB σε μια αριθμητική τιμή. Το επίπεδο πυκνότητας ισχύος του εγγύς πεδίου σε μια δεδομένη απόσταση (d) από την κεραία, μπορεί να προσδιοριστεί υπολογίζοντας την πυκνότητα ισχύος και πολλαπλασιάζοντας την τιμή αυτή με τον συντελεστή μείωσης του κέρδους του κοντινού πεδίου (NGFrect).

4.2.5.5 Γραφήματα Φωτισμού

Κατά τον άξονα συντελεστές διόρθωσης
πυκνότητας ισχύος για κοντινό πεδίο



Σχήμα 4-1: Συντελεστές διόρθωσης κοντινού πεδίου για κυκλικό παραβολικό φωτισμό



Σχήμα 4-2: Συντελεστής διόρθωσης για την περιοχή Fresnel για ομοιόμορφο φωτισμό (ορθογώνιο άνοιγμα)



Σχήμα 4-3: Συντελεστής διόρθωσης για την περιοχή Fresnel για συνημιτονοειδή φωτισμό (ορθογώνιο άνοιγμα)



Σχήμα 4-4: Συντελεστής διόρθωσης για την περιοχή Fresnel για τετράγωνο συνημιτονοειδή φωτισμού (ορθογώνιο άνοιγμα)

Συντελεστής διόρθωσης κοντινού πεδίου
(dB)



Σχήμα 4-5: Συντελεστής διόρθωσης για την περιοχή Fresnel για τρίτου βαθμού συνημιτονοειδή φωτισμό (ορθογώνιο άνοιγμα)

Συντελεστής διόρθωσης κοντινού πεδίου
(dB)



Σχήμα 4-6: Συντελεστής διόρθωσης για την περιοχή Fresnel για τετάρτου βαθμού συνημιτονοειδή φωτισμό (ορθογώνιο άνοιγμα)

5. Απαιτήσεις

5.1 Χρήσιμοι Ορισμοί

5.1.1 Χώρος κάτω από το Κατάστρωμα

Μια περιοχή στα πλοία που περιβάλλεται από μία μεταλλική δομή, όπως η γάστρα (το υποθαλάσσιο τμήμα του σκάφους) ή η υπερκατασκευή (χώρος πάνω από το κατάστρωμα) ενός μεταλλικού πλοίου επιφανείας, το κύτος ενός υποβρυχίου, το πήγμα ή τα δωμάτια μη μεταλλικών πλοίων, το πήγμα των πλοίων που χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών για το κύτος και η υπερκατασκευή ή ένα κατάστρωμα στο οποίο τοποθετείται μεταλλικός θωρακισμένος χώρος.

5.1.2 Ηλεκτρικά Εκκινούμενες Συσκευές (EIDs)

Μία EID είναι μια ενιαία μονάδα, συσκευή ή ένα υποσυγκρότημα που χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια για να παράγει εκρηκτική, πυροτεχνική, θερμική ή μηχανική έξοδο. Τέτοιες συσκευές είναι οι ηλεκτροεκρηκτικές συσκευές (θερμό καλώδιο γεφύρωσης, γέφυρα ημιαγωγών, γέφυρα άνθρακα και αγωγή σύνθεση), οι εκκινητές έκρηξης φύλλων αλουμινίου, οι εκκινητές λέιζερ, τα καλώδια πυροδοτήσεως και ηλεκτρικές συνδέσεις ασφαλείας (σύνδεσμοι τήξης).

5.1.3 HERO Ασφαλή Πυρομαχικά

Ο ορισμός αυτός αναφέρεται σε κάθε στοιχείο πυρομαχικών που είναι επαρκώς θωρακισμένο ή αλλιώς σε τέτοια έκταση προστατευμένο, ώστε όλες οι συσκευές ηλεκτρικής εκκίνησης (EIDs), που περιέχονται σε αυτό το στοιχείο, έχουν ανοσία στις δυσμενείς επιπτώσεις (ασφάλεια ή αξιοπιστία), όταν το στοιχείο χρησιμοποιείται στο περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων. Αυτά τα στοιχεία έχουν οριοθετηθεί σε διάφορα θεσμικά στρατιωτικά κείμενα (όπως το MILSTD-464 του Υπουργείου Αμύνης των ΗΠΑ). Οι γενικοί κίνδυνοι της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στις απαιτήσεις των πυρομαχικών, που καθορίζονται τους κινδύνους των εγχειριδίων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Οι πυροκροτητές πυρομαχικών δεν έχουν απαιτήσεις HERO.

5.1.4 HERO Ευπαθή Πυρομαχικά

Κάθε στοιχείο πυρομαχικών που περιέχει ηλεκτρο-εκρηκτικούς μηχανισμούς που αποδεικνύεται με δοκιμή ή ανάλυση, ότι επηρεάζονται αρνητικά από την ενέργεια των ραδιοσυχνοτήτων, σε σημείο που η ασφάλεια ή/και η αξιοπιστία του συστήματος είναι σε κίνδυνο, όταν το σύστημα χρησιμοποιείται στο περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων, χαρακτηρίζεται ευπαθή πυρομαχικό. Αυτά τα στοιχεία έχουν οριοθετηθεί σε διάφορα θεσμικά στρατιωτικά κείμενα (όπως το MILSTD-464 του Υπουργείου Αμύνης των ΗΠΑ).

5.1.5 HERO μη Ασφαλή Πυρομαχικά

Κάθε στοιχείο πυρομαχικών που περιέχουν συσκευές ηλεκτρικής εκκίνησης, που δεν έχουν ταξινομηθεί ως HERO ασφαλή ή HERO ευπαθή πυρομαχικά, ως αποτέλεσμα ανάλυσης ή δοκιμής για τους κινδύνους της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε πυρομαχικά (HERO), χαρακτηρίζονται ως μη ασφαλή πυρομαχικά. Επιπλέον, σε αυτή την κατηγορία ανήκει οποιοδήποτε στοιχείο πυρομαχικών που περιέχει συσκευές ηλεκτρικής εκκίνησης (συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που έχουν ταξινομηθεί προηγουμένως στα HERO ασφαλή ή HERO ευπαθή πυρομαχικά) και έχει την εσωτερική του καλωδίωση εκτεθειμένη, που διεξάγονται έλεγχοι σε αυτό και καταλήγουν σε πρόσθετες ηλεκτρικές συνδέσεις με το αντικείμενο, που οι συσκευές ηλεκτρικής εκκίνησης οι οποίες εμπεριέχονται σε αυτό, έχοντας αποκαλύψει τους συρμάτινους αγωγούς, εμφανίζονται και ενεργοποιούνται ή φορτώνονται σε οποιοδήποτε περίπτωση εκτός από τη δοκιμαζόμενη κατάσταση και εκείνο που συναρμολογείται ή αποσυναρμολογείται ή υπόκειται σε ζημιές, προκαλώντας έκθεση της εσωτερικής καλωδίωσης ή εξαρτημάτων ή καταστροφή μηχανικών HERO προστατευτικών διατάξεων.

5.1.6 Όχημα Εκτόξευσης

Ένας συνδυασμός των αρχικών βαθμίδων, των σταδίων ψεκασμού, του προσαρμογέα διαστημικού οχήματος και του αεροδυναμικού ασπίδιου, έχει την ικανότητα να θέτει σε κίνηση και τη διοχέτευση ενός διαστημικού οχήματος ή οχημάτων σε τροχιά.

5.1.7 Περιθώρια

Περιθώρια είναι η διαφορά της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μεταξύ του υποσυστήματος και εξοπλισμού και της τάσης μεταξύ υποσυστήματος και εξοπλισμού, που προκαλείται από την ηλεκτρομαγνητική σύζευξη σε επίπεδο συστήματος. Τα περιθώρια συνήθως εκφράζονται ως αναλογία σε decibel (dB).

5.1.8 Μέγιστο Ερέθισμα μη Πυροδότησης

Το μεγαλύτερο ερέθισμα πυροδότησης, το οποίο δεν προκαλεί την εκκίνηση μέσα σε πέντε λεπτά, σε περισσότερους από το 0,1% του συνόλου των ηλεκτρικών εκκινήτων ενός συγκεκριμένου σχεδιασμού με βαθμό βεβαιότητας 95%. Κατά τον καθορισμό των μέγιστων ερεθισμάτων μη πυροδότησης, για τους ηλεκτρικούς εκκινήτες με ένα στοιχείο καθυστέρησης ή με χρόνο απόκρισης περισσότερο από πέντε λεπτά, το ερέθισμα πυροδότησης, θα πρέπει να εφαρμόζεται για το χρόνο που απαιτείται κανονικά για την ενεργοποίηση.

5.1.9 Κρίσιμη Αποστολή

Εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά στην προδιαγραφή για τις δημόσιες συμβάσεις, ένας όρος που εφαρμόζεται σε μια κατάσταση, εκδήλωση, λειτουργία, διαδικασία ή στοιχείο, το οποίο εάν εκτελεσθεί εσφαλμένα ενδέχεται να:

- α. Απαγορεύσει την εκτέλεση μιας αποστολής.
- β. Μειώσει σημαντικά την επιχειρησιακή ικανότητα.
- γ. Αυξήσει σημαντικά την ευπάθεια του συστήματος.

5.1.10 Φαινόμενο Διακοπής Μικροκυμάτων (Multipaction)

Αυτό το φαινόμενο είναι το αποτέλεσμα της αντήχησης ραδιοσυχνοτήτων (RF), που συμβαίνει μόνο σε συνθήκες υψηλού κενού, όπου το πεδίο RF επιταχύνει ελεύθερα ηλεκτρόνια που προκαλούν συγκρούσεις σε επιφάνειες, δημιουργώντας δευτερογενή ηλεκτρόνια τα οποία επιταχύνονται με αποτέλεσμα περισσότερα ηλεκτρόνια και τελικά, μια σημαντική αποφόρτιση και πιθανή βλάβη του εξοπλισμού.

5.1.11 Μη Αναπτυξιακό Στοιχείο

Μη αναπτυξιακό στοιχείο είναι ένας ευρύς, γενικός όρος που καλύπτει υλικό (hardware και λογισμικό), διαθέσιμο από μια ευρεία ποικιλία πηγών με απαιτούμενη ελάχιστη ή καμία προσπάθεια ανάπτυξης από την κυβέρνηση.

5.1.12 Πολεμικό Υλικό (Πυρομαχικά)

Το πολεμικό υλικό περιλαμβάνει εκρηκτικές ύλες, χημικές ουσίες, πυροτεχνικά υλικά και παρόμοια εφόδια (όπως οι βόμβες, όπλα, πυρομαχικά, φωτοβολίδες, ηλεκτροεκρηκτικές συσκευές, καπνογόνα κτλ), που φέρονται σε αερομεταφερόμενα μέσα, πλωτά μέσα, διαστημικά συστήματα και επίγεια συστήματα.

5.1.13 Πλατφόρμα

Μία κινητή ή σταθερή εγκατάσταση, όπως πλοίο, αεροσκάφος, οχήματα εδάφους, οχυρωματικά έργα ή άλλοι παρόμοιοι χώροι, διαστημικά οχήματα και οχήματα εκτόξευσης, παράκτιοι ή επίγειοι σταθμοί. Στην παρούσα εργασία, μια πλατφόρμα θεωρείται ένα σύστημα.

5.1.14 Κρίσιμη Ασφάλεια

Εκτός εάν διαφορετικά ορίζεται στην προδιαγραφή για τις δημόσιες συμβάσεις, ένας όρος που εφαρμόζεται σε μια κατάσταση, εκδήλωση, λειτουργία, διαδικασία, ή στοιχείο, του οποίου η ορθή αναγνώριση, έλεγχος, απόδοση ή η ανοχή είναι απαραίτητη για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος ή χρήση, συνθέτει την κρίσιμη ασφάλεια. Για παράδειγμα, συναντούμε τη λειτουργία κρίσιμης ασφάλειας, τη

διαδρομή κρίσιμης ασφάλειας ή το συστατικό κρίσιμης ασφάλειας. Επιπλέον, ένας όρος που αναφέρεται σε θέματα κρίσιμης ασφάλειας είναι όταν χρησιμοποιείται σε κάποια βλάβη ή δυσλειτουργία ενός συστήματος ή υποσυστήματος, που δύναται να προκαλέσει θάνατο ή σοβαρό τραυματισμό στο προσωπικό.

5.1.15 Θωρακισμένος Χώρος - Οχυρωματικό Έργο

Μια περιοχή που δεν είναι άμεσα εκτεθειμένη σε ΕΜ ενέργεια συνθέτει τον παραπάνω ορισμό. Αυτή περιλαμβάνει θωρακισμένους - υπόγειους - επιχωματωμένους χώρους, διαμερίσματα και δωμάτια, περιοχές στο εσωτερικό του κύτους και της υπερκατασκευής της μεταλλικής γάστρας του πλοίου, περιοχές εντός μεταλλικού καταφυγίου, ένα μεταλλικό περίβλημα ή ένας μεταλλικός ιστός και τις περιοχές πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας για πλοία με μη μεταλλικό κύτος.

5.1.16 Συστήματα Εξαρτώμενα από το Ραδιοφάσμα

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα, υποσυστήματα, συσκευές ή/και ο εξοπλισμός που εξαρτώνται από τη χρήση του φάσματος, για να ολοκληρώσουν σωστά τη λειτουργία τους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το πώς αποκτήθηκαν (πλήρης απόκτηση, ταχεία απόκτηση, κοινή αντίληψη της επίδειξης τεχνολογίας, κτλ.) ή προμηθεύθηκαν (εμπορικά off-the-shelf είδη, κυβερνητικά off-the-shelf είδη, μη αναπτυξιακά στοιχεία, κλπ.).

5.1.17 Διαστημικό Όχημα

Ένα πλήρες, ολοκληρωμένο σύνολο υποσυστημάτων και εξαρτημάτων, ικανά για να υποστηρίξουν έναν επιχειρησιακό ρόλο στο διάστημα. Ένα διαστημικό όχημα, μπορεί να είναι ένα όχημα σε τροχιά, ένα σημαντικό τμήμα ενός οχήματος σε τροχιά ή ένα ωφέλιμο φορτίο ενός οχήματος σε τροχιά το οποίο εκτελεί την αποστολή του, ενώ συνδέεται με ένα ανακτήσιμο όχημα εκτόξευσης. Ο αερομεταφερόμενος εξοπλισμός υποστήριξης, ο οποίος προσιδιάζει σε προγράμματα που χρησιμοποιούν ένα ανακτήσιμο όχημα εκτόξευσης, θεωρείται μέρος των διαστημικών οχημάτων, που μεταφέρονται από το όχημα εκτόξευσης.

5.1.18 Υποσύστημα

Ένα τμήμα ενός συστήματος που περιέχει δύο ή περισσότερα ολοκληρωμένα εξαρτήματα τα οποία, ενώ δεν εκτελούν ολοκληρωμένα τη συγκεκριμένη λειτουργία του συστήματος, δύναται να απομονωθούν για το σχεδιασμό, τη δοκιμή ή τη συντήρηση. Καθένα από τα ακόλουθα θεωρούνται υποσυστήματα για τον καθορισμό απαιτήσεων EMC. Σε κάθε περίπτωση, οι συσκευές ή ο εξοπλισμός μπορεί να διαχωρίζονται φυσικά όταν είναι σε λειτουργία και θα πρέπει να εγκατασταθούν σε σταθερούς ή κινητούς σταθμούς, οχήματα ή συστήματα.

α. Ένα σύνολο συσκευών ή εξοπλισμών που έχουν σχεδιαστεί και ενσωματωθεί για να λειτουργήσουν ως ενιαία οντότητα, αλλά όπου δεν απαιτείται συσκευή ή εξοπλισμός να λειτουργήσει ως ενιαία συσκευή ή εξοπλισμός.

β. Ένα σύνολο εξοπλισμού και υποσυστημάτων, που έχουν σχεδιαστεί και ενσωματωθεί για να λειτουργήσουν ως μια μείζονα υποδιαίρεση ενός συστήματος και να εκτελέσουν μια επιχειρησιακή λειτουργία ή λειτουργίες. Ορισμένες δραστηριότητες, εκλαμβάνουν αυτά τα σύνολα ως συστήματα. Ωστόσο, όπως σημειώνεται παραπάνω, αυτά τα σύνολα θα θεωρούνται ως υποσυστήματα.

5.1.19 Σύστημα

Ένας συνδυασμός εξοπλισμού, υποσυστημάτων, εξειδικευμένου προσωπικού, καθώς και τεχνικών, τα οποία είναι ικανά για την εκτέλεση ή την υποστήριξη ενός καθορισμένου επιχειρησιακού ρόλου. Ένα πλήρες σύστημα περιλαμβάνει τις σχετικές εγκαταστάσεις, τον εξοπλισμό, τα υποσυστήματα, τα υλικά, τις υπηρεσίες και το προσωπικό που απαιτείται για τη λειτουργία του στο βαθμό που μπορεί να θεωρηθεί αυτόνομο μέσα στο επιχειρησιακό ή υποστηρικτικό του περιβάλλον.

5.1.20 Σύστημα Επιχειρησιακών Επιδόσεων

Μια σειρά ελάχιστα αποδεκτών παραμέτρων, που προσαρμόζονται στην πλατφόρμα και αντανakλούν τις κορυφαίες επιπέδου δυνατότητες, όπως εύρος, πιθανότητα εξόντωσης, πιθανότητα επιβίωσης, επιχειρησιακή διαθεσιμότητα και ούτω καθεξής. Μία πρωτογενής πτυχή της απόκτησης που σχετίζεται με αυτόν τον ορισμό, είναι οι βασικοί παράμετροι απόδοσης (KPPs), οι οποίες χρησιμοποιούνται στην απόκτηση, για να προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά του συστήματος που θεωρούνται πλέον απαραίτητα για την επιτυχή ολοκλήρωση της αποστολής και τα οποία παρακολουθούνται κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος. Το σύνολο των παραμέτρων που εξετάζονται επεκτείνονται συνήθως πέρα από αυτό το περιορισμένο σύνολο των παραμέτρων για την αντιμετώπιση άλλων λεπτομερειών της απόδοσης του συστήματος που μπορεί να είναι λιγότερο κρίσιμες, αλλά εξακολουθούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα του συστήματος.

5.1.21 TEMPEST

Ένα αδιαβάθητο, σύντομο όνομα που αναφέρεται στην έρευνα και τη μελέτη των αποκαλυπτικών εκπομπών.

5.1.22 Έξαλα Σκάφους

Όλες οι περιοχές του πλοίου που είναι συνεχώς εκτεθειμένες στο εξωτερικό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, όπως το κύριο κατάστρωμα και ότι βρίσκεται πάνω από αυτό, οι υπερυψωμένες διαβάθρες και τα εκτεθειμένα τμήματα των εξωστών του καταστρώματος.

5.2 Γενικές Απαιτήσεις

5.2.1 Γενικά

Κάθε σύστημα πρέπει να είναι ηλεκτρομαγνητικά συμβατό, τόσο μεταξύ όλων των υποσυστημάτων και του εξοπλισμού εντός του συστήματος, όσο και με τα περιβάλλοντα που προκαλούνται από πομπούς και άλλες ηλεκτρομαγνητικές πηγές εκτός του συστήματος, για να εξασφαλίσει την ασφαλή και σωστή λειτουργία και απόδοση. Στην παρούσα εργασία διατυπώνεται η βασική σχεδίαση των απαιτήσεων και διακρίβωσης για την αντιμετώπιση θεμάτων E3, όπως καθορίζεται από τα ισχύοντα στρατιωτικά πρότυπα. Οι απαιτήσεις και οι προσεγγίσεις της διακρίβωσης, μπορούν να προσαρμοστούν με βάση τη μηχανική ευθυγράμμιση που προέρχεται από τις λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος και τη μηχανική ανάλυση. Τεχνικές σχεδίασης που χρησιμοποιούνται για την προστασία του εξοπλισμού από τα EMI αποτελέσματα, πρέπει να είναι επαληθεύσιμα, διατηρήσιμα και αποτελεσματικά, πέρα από τον εκτιμώμενο κύκλο ζωής του συστήματος. Τα περιθώρια σχεδίασης θα πρέπει να καθορίζονται με βάση την κρισιμότητα του συστήματος, τις ανοχές των μηχανικών μερών των υπολογιστικών συστημάτων και τις αβεβαιότητες που εμπλέκονται στη διακρίβωση της σχεδίασης των απαιτήσεων του συστήματος - επιπέδου. Η διακρίβωση πρέπει να καλύπτει όλες τις πτυχές του κύκλου ζωής του συστήματος, καθώς και τις κανονικές εν χρήσει λειτουργίες, την ολοκλήρωση της προμήθειας, την αποθήκευση, τη μεταφορά, το χειρισμό, τη συσκευασία, τη φόρτωση, την εκφόρτωση, την έναρξη και τις συνήθεις διαδικασίες λειτουργίας που σχετίζονται με κάθε πτυχή. Οι προδιαγραφές και οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιηθούν από τον ανάδοχο της κατασκευής ή προμήθειας ενός συστήματος, αναλύονται και τυποποιούνται από επίσημα κείμενα των Υπουργείων Αμύνης (π.χ το κείμενο DID [f.] του Υπουργείου Αμύνης των ΗΠΑ) και παρέχουν ένα μέσο για τη δημιουργία μιας συνολικής και ολοκληρωμένης E3 σχεδίασης, τη προσέγγιση της διακρίβωσης, την αναγνώριση των τομέων που προκαλούν ανησυχία στην αρχή του προγράμματος, τον περιορισμό του κινδύνου, καθώς και τα αποτελέσματα των δοκιμών.

5.2.2 Αιτιολόγηση Απαιτήσης

Ο τομέας των ηλεκτρομαγνητικών περιβαλλοντολογικών επιδράσεων (E3) αντιμετωπίζει μια σειρά από θέματα διεπαφών με το περιβάλλον, τόσο εξωτερικά με το σύστημα, όσο και μέσα στο σύστημα. Εξωτερικά στο σύστημα, υπάρχουν ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις όπως ο κεραυνός, ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός (EMP) και οι τεχνητές RF εκπομπές. Στο εσωτερικό του συστήματος, υπάρχουν ηλεκτρομαγνητικές επιπτώσεις, όπως οι ηλεκτρονικές εκπομπές θορύβου, αυτοπαραγόμενες εκπομπές RF από τις κεραίες και η σύζευξη (cross coupling) των ηλεκτρικών ρευμάτων. Τα συστήματα σήμερα είναι πολύπλοκα, τόσο από πλευράς χρήσης υλικών, όσο και από πλευράς ηλεκτρονικών διατάξεων. Πολλά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι μη μεταλλικά και έχουν μοναδικές ηλεκτρομαγνητικές

ιδιότητες, τα οποία απαιτούν προσεκτική αντιμετώπιση. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία που εκτελούν κρίσιμες λειτουργίες είναι κοινά. Η ευρεία χρήση των πομπών RF, ευαίσθητων δεκτών, άλλων αισθητήρων και πρόσθετων ηλεκτρονικών δημιουργεί ένα δυναμικό προβλημάτων, τόσο στο εσωτερικό του συστήματος, όσο και στο εξωτερικό περιβάλλον. Η αύξηση της χρήσης του εμπορικού εξοπλισμού σε μοναδικά στρατιωτικά επιχειρησιακά περιβάλλοντα θέτει ειδικά ζητήματα διασύνδεσης. Κάθε σύστημα πρέπει να είναι συμβατό τόσο στο εσωτερικό του, όσο και με άλλα συστήματα και εξωτερικά περιβάλλοντα για να εξασφαλίσει τις απαιτούμενες επιδόσεις και να αποτρέψει δαπανηρούς επανασχεδιασμούς για την επίλυση των προβλημάτων.

5.2.3 Οδηγίες Απαίτησης

Το σύστημα και όλα τα σχετικά υποσυστήματα και ο εξοπλισμός, συμπεριλαμβανομένων και των πυρομαχικών, πρέπει να επιτύχουν τη συμβατότητα του συστήματος. Κάθε προσπάθεια πρέπει να γίνει, για να ανταποκριθεί το σύστημα σε αυτές τις απαιτήσεις κατά τη διάρκεια της αρχικής σχεδίασης και όχι σε μια βάση ανταπόκρισης μετά το γεγονός.

Πρέπει να καθορισθεί μία συνολική ολοκληρωμένη EMC σχεδίαση και προσέγγιση πιστοποίησης για το σύστημα. Βασισμένη στην αρχιτεκτονική του συστήματος, οι κατάλληλες απαιτήσεις σκλήρυνσης (hardening), κατανέμονται μεταξύ των χαρακτηριστικών του σχεδιασμού του συστήματος, των υποσυστημάτων και της σκληρότητας του εξοπλισμού. Καθορίζονται συναρτήσεις μεταφοράς από τα περιβάλλοντα του συστήματος σε καταπονήσεις στο υποσύστημα και εξοπλισμό και επιβάλλονται οι κατάλληλοι έλεγχοι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

Μια προσέγγιση ενσωμάτωσης E3, μπορεί να οργανωθεί σε πέντε δραστηριότητες:

α. Καθορισμός της απειλής του εξωτερικού περιβάλλοντος, κατά την οποία το σύστημα απαιτείται να επιδεικνύει τη συμμόρφωση ανοσίας.

β. Προσδιορισμός στο σύστημα του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού που απαιτείται για την εκτέλεση λειτουργιών κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της εξωτερικής απειλής. Κανονικά όλες οι λειτουργίες που είναι ουσιώδεις για την ολοκλήρωση των αποστολών, προστατεύονται από τις εξωτερικές απειλές.

γ. Καθορισμός του εσωτερικού περιβάλλοντος που προκαλείται από τις εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις, για κάθε εγκατεστημένο εξοπλισμό. Όλα τα εξωτερικά περιβάλλοντα του συστήματος που αναφέρονται σε αυτή την εργασία, προκαλούν συναφή περιβάλλοντα εσωτερικά του συστήματος. Το επίπεδο αυτού του εσωτερικού περιβάλλοντος, θα είναι το αποτέλεσμα πολλών παραγόντων, όπως οι δομικές λεπτομέρειες του συστήματος, η διαπέραση της ακτινοβολίας, οι συνδέσεις και ο συντονισμός του συστήματος και των καλωδίων. Το εσωτερικό περιβάλλον για κάθε απειλή θα πρέπει να καθορισθεί από την ανάλυση, την ομοιότητα με προηγούμενα δοκιμασμένα συστήματα ή τις δοκιμές. Το εσωτερικό περιβάλλον

εκφράζεται συνήθως ως επίπεδο εντάσεων του ηλεκτρικού ρεύματος, που εμφανίζεται στη διεπαφή του εξοπλισμού ή σε μεγέθη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Αυτές οι εσωτερικές τάσεις, συνήθως συνδέονται με τυποποιημένες απαιτήσεις για τον εξοπλισμό (για παράδειγμα, MIL-STD-461). Συνδυασμοί πρέπει να γίνουν, ώστε ένας βαθμός σκλήρυνσης να εφαρμοστεί σε επίπεδο συστήματος (όπως θωρακισμένοι χώροι ή κυκλική συστροφή (overbraiding) στην καλωδίωση διασύνδεσης) σε σχέση με το επίπεδο του εξοπλισμού (αυστηρότερες απαιτήσεις ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής), προκειμένου να υλοποιηθεί μία πιο αποτελεσματική προσέγγιση από άποψη απόδοσης και κόστους.

δ. Ο σχεδιασμός της προστασίας του συστήματος και του εξοπλισμού. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος, στη συνέχεια, σχεδιάζονται ως απαραίτητα για τον έλεγχο του εσωτερικού περιβάλλοντος (συμπεριλαμβανομένων των εκτιμήσεων του περιθωρίου), σε επίπεδα που καθορίζονται από συνδυασμένες μελέτες και τις ενδεδειγμένες απαιτήσεις που επιβάλλονται στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Τα επίπεδα ανοσίας του εξοπλισμού πρέπει να είναι πάνω από τα εσωτερικά περιβάλλοντα, με τα απαραίτητα περιθώρια να καταδεικνύουν την κρισιμότητα του εξοπλισμού, τις κατασκευαστικές ανοχές και τις αβεβαιότητες στην επαλήθευση. Κανονικά υπάρχουν απαιτήσεις σχεδίασης και δοκιμών στα υπόψη πρότυπα (π.χ MIL-STD-461) που εφαρμόζεται για κάθε ένα από τα εξωτερικά περιβάλλοντα, αλλά μπορεί να χρειάζονται τροποποίηση για τη συγκεκριμένη εφαρμογή του συστήματος. Για παράδειγμα, το εξωτερικό περιβάλλον μπορεί να οδηγήσει σε εσωτερικά περιβάλλοντα πάνω από το επίπεδο ευαισθησίας που ορίζεται στο MIL-STD-461. Αν συμβεί αυτό, το όριο πρέπει να είναι προσαρμοσμένο για το συγκεκριμένο σύστημα, θα πρέπει να επιβληθούν εναλλακτικές απαιτήσεις ή το εσωτερικό περιβάλλον να μειωθεί σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Ο σχεδιασμός E3 του συστήματος πρέπει να είναι βιώσιμος καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του συστήματος. Το ζήτημα αυτό απαιτεί επίγνωση της σωστής εφαρμογής των διατάξεων για τον έλεγχο της διάβρωσης και θεμάτων που σχετίζονται με τις ενέργειες συντήρησης και δύνανται να επηρεάσουν την EMC. Παραδείγματα διασφαλίζουν, ότι οι διατάξεις ηλεκτρικής σύνδεσης δεν υποβαθμίζονται, διατηρούν επιφανειακές επεξεργασίες (treatments) για τον έλεγχο του E3 και υπολογίζουν την έκθεση των ηλεκτρονικών στα EME, όταν τα τμήματα πρόσβασης είναι ανοιχτά. Για τη διατήρηση ενός βιώσιμου συστήματος E3, ο σχεδιασμός απαιτεί επίσης ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα διαχείρισης της ρύθμισης παραμέτρων για την παρακολούθηση και την αξιολόγηση των αλλαγών μηχανικής στο σύστημα, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι ο σχεδιασμός E3 δεν είναι σε κίνδυνο.

ε. Επιβεβαίωση της επάρκειας προστασίας. Ο σχεδιασμός του συστήματος και του εξοπλισμού προστασίας E3, πρέπει να επαληθευθεί ότι πληροί τις συμβατικές απαιτήσεις. Η επαλήθευση της καταλληλότητας της σχεδίασης προστασίας, περιλαμβάνει αποδείξεις, ότι τα πραγματικά επίπεδα του εσωτερικού περιβάλλοντος που εμφανίζονται στις διεπαφές του εξοπλισμού και τα περιβλήματα, δεν υπερβαίνουν τα επίπεδα δοκιμών πιστοποίησης του εξοπλισμού για κάθε

περιβάλλον με τα απαιτούμενα περιθώρια. Όλες οι ηλεκτρονικές και οι ηλεκτρικές συσκευές πρέπει να έχουν εξειδικευθεί στο κατάλληλο επίπεδο προδιαγραφών. Δοκιμές επιπέδου συστημάτων, κανονικά απαιτούνται για να ελαχιστοποιήσουν το απαιτούμενο αποδεδειγμένο περιθώριο. Η ανάλυση μπορεί να γίνει δεκτή υπό ορισμένες συνθήκες, ωστόσο, τα απαιτούμενα περιθώρια τυπικά θα είναι μεγαλύτερα.

Αυτές οι δραστηριότητες επαλήθευσης θα πρέπει να τεκμηριώνονται λεπτομερώς στις διαδικασίες επαλήθευσης και των εκθέσεων ελέγχου.

5.2.4 Διδάγματα Απαίτησης

Οι πρώτες εφαρμογές των απαιτήσεων E3 έχουν συμβάλει στην πρόληψη των προβλημάτων σε προηγούμενα προγράμματα. Η εξέλιξη στα σχέδια του συστήματος σχετικά με την αλλαγή των υλικών και την αύξηση της κρισιμότητας των ηλεκτρονικών ειδών, απαιτεί την εφαρμογή πιο αποτελεσματικών ελέγχων των ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων.

Είναι σημαντικό ότι όλα τα εξωτερικά περιβάλλοντα να αντιμετωπίζονται σε μία ενιαία προσέγγιση. Αλληλοεπικάλυψη των προσπαθειών σε διάφορους κλάδους έχει συμβεί στο παρελθόν. Για παράδειγμα, η σκλήρυνση σε EMP και παροδικά δημιουργούμενους κεραυνούς, έχουν αντιμετωπιστεί ανεξάρτητα και όχι ως μια κοινή απειλή με διαφορετικά μέτρα προστασίας να εφαρμόζονται για κάθε μία. Αυτή η κατάσταση προφανώς οφείλεται εν μέρει στις οργανωτικές δομές των εγκαταστάσεων του ανάδοχου, που αναθέτουν την ευθύνη σε διαφορετικά γραφεία για κάθε μία από τις απειλές.

5.2.5 Αιτιολόγηση Διακρίβωσης

Κάθε ξεχωριστή απαίτηση πρέπει να επαληθεύεται σύμφωνα με το συμβατικό σύστημα απαιτήσεων και την κατάσταση εργασίας. Η υπηρεσία ανάπτυξης θα πρέπει να αναδεικνύει τα στοιχεία της ευθύνης επαλήθευσης, για να συσχετίσει τους ανάδοχους ως κατάλληλους για τα τροφοδοτούμενα συστήματα και υποσυστήματα αυτών.

5.2.6 Οδηγίες Διακρίβωσης

Οι περισσότερες από τις απαιτήσεις που συναντάμε στην παρούσα εργασία επαληθεύονται σε επίπεδο συστήματος. Η συμμόρφωση για ορισμένες απαιτήσεις, επαληθεύεται στο υποσύστημα, τον εξοπλισμό ή σε επίπεδο εξαρτήματος, όπως οι απαιτήσεις EMI σε ένα υποσύστημα ή η αντικεραυνική πιστοποίηση ενός στοιχείου της ατράκτου.

Η επιλογή της δοκιμής, της ανάλυσης ή της επιθεώρησης ή κάποιου συνδυασμού, για να καταδείξουν μια ιδιαίτερη απαίτηση, γενικά εξαρτάται από το βαθμό εμπιστοσύνης στα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μεθόδου, της καταλληλότητας

της τεχνικής, του σχετικού κόστους και της διαθεσιμότητας του υλικού. Μερικές από τις απαιτήσεις καθορίζουν τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα, η επαλήθευση των απαιτήσεων ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής σε επίπεδο υποσυστήματος και εξοπλισμού πρέπει να αποδεικνύεται με δοκιμή, διότι δεν είναι διαθέσιμα εκείνα τα εργαλεία ανάλυσης, τα οποία θα παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η ανάλυση και ο έλεγχος συχνά αλληλοσυμπληρώνονται. Πριν από τη διαθεσιμότητα του υλικού, η ανάλυση θα είναι συχνά το κύριο εργαλείο που χρησιμοποιείται για να εξασφαλιστεί ότι ο σχεδιασμός ενσωματώνει επαρκή μέτρα. Η δοκιμή μπορεί τότε να είναι προσανατολισμένη προς την επικύρωση της ακρίβειας και της καταλληλότητας των μοντέλων που χρησιμοποιούνται. Το επίπεδο εμπιστοσύνης σε ένα μοντέλο σε σχέση με μία συγκεκριμένη εφαρμογή, καθορίζει την ισορροπία μεταξύ της ανάλυσης και δοκιμών. Η δοκιμή είναι συχνά απαραίτητη για την ολοκλήρωση ενός πειστικού επιχειρήματος επαλήθευσης.

Οι απαιτήσεις E3 πρέπει να επαληθεύονται μέσω μιας διαδικασίας στοιχειώδους ελέγχου. «Στοιχειώδεις» σημαίνει ότι η εξακρίβωση της συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις E3, είναι μια συνεχής διαδικασία οικοδόμησης ενός επιχειρήματος (διαδρομής ελέγχου) σε όλη την ανάπτυξη, που ο σχεδιασμός ικανοποιεί τις επιβαλλόμενες απαιτήσεις απόδοσης. Η αρχική μηχανική σχεδίαση πρέπει να βασίζεται στην ανάλυση και τα μοντέλα. Δεδομένου ότι το υλικό είναι διαθέσιμο, οι δοκιμές των συστατικών στοιχείων του υποσυστήματος μπορεί να χρησιμοποιούνται για την επικύρωση και τη συμπλήρωση της ανάλυσης και των μοντέλων. Ο σχεδιασμός εξελίσσεται καθώς παράγεται καλύτερη πληροφορία. Όταν το σύστημα πράγματι παράγεται, η επιθεώρηση, η τελική δοκιμή και η ανάλυση που ακολουθούν, ολοκληρώνουν τη διαδικασία της στοιχειώδους επαλήθευσης. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε, ότι οι δοκιμές είναι συχνά αναγκαίες για τη λήψη πληροφοριών που μπορεί να μην είναι επιδεκτικές σε προσδιορισμό με ανάλυση. Ωστόσο, η δοκιμή επίσης χρησιμοποιείται συχνά για να προσδιορίσει μερικά σημαντικά δεδομένα σε σχέση με μια συγκεκριμένη απαίτηση διεπαφής με ανάλυση (και σχετικές προσομοιώσεις) συμπληρώνοντας την συνολική εικόνα. Θέματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επαλήθευση E3, είναι τα παρακάτω:

α. Συστήματα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο πρέπει να είναι στη διαμόρφωση της παραγωγής.

β. Το σύστημα πρέπει να είναι ενημερωμένο σε σχέση με όλες τις εγκριθείσες προτάσεις μηχανικών αλλαγών, τόσο σε επίπεδο λογισμικού, όσο και σε επίπεδο ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

γ. Η ανάλυση EMI θα πρέπει να ολοκληρωθεί στα υποσυστήματα και τον εξοπλισμό.

δ. Τα υποσυστήματα και ο εξοπλισμός θα πρέπει να τίθενται σε τρόπους λειτουργίας που θα μεγιστοποιήσουν την πιθανή ένδειξη παρεμβολών ή ευαισθησίας, σύμφωνα με τις απαιτήσεις λειτουργικής απόδοσης του συστήματος.

ε. Οποιαδήποτε εξωτερική ηλεκτρική ισχύ που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του συστήματος θα πρέπει να συμμορφώνεται με την πρότυπη ποιότητα ισχύος του συστήματος.

ζ. Τυχόν ανωμαλίες που βρέθηκαν θα πρέπει να αξιολογούνται για να διαπιστωθεί εάν είναι πραγματικά ζήτημα E3 ή κάποιος άλλος τύπος δυσλειτουργίας ή απόκρισης.

η. Τυχόν τροποποιήσεις του συστήματος που προκύπτουν από τις προσπάθειες ελέγχου, θα πρέπει να επικυρωθούν για την αποτελεσματικότητά τους, μετά την κατασκευή τους.

θ. Τα περιθώρια, όπου αυτά εφαρμόζονται, πρέπει να αποδειχθούν.

5.2.7 Διδάγματα Διακρίβωσης

Ιστορικά, η αδυναμία να ελεγχθεί επαρκώς η απόδοση του συστήματος σε ένα επιχειρησιακό EME, έχει ως αποτέλεσμα τις δαπανηρές καθυστερήσεις κατά την ανάπτυξη του συστήματος, τη ματαίωση αποστολών και τη μειωμένη λειτουργικότητα του συστήματος και εξοπλισμού. Είναι σημαντικό ότι το υλικό, που απαιτείται για την εξακρίβωση των E3 απαιτήσεων, πρέπει να προσδιορίζεται στην αρχή του προγράμματος, ώστε να εξασφαλισθεί η διαθεσιμότητά του, όταν απαιτηθεί.

5.3 Ειδικές Απαιτήσεις

5.3.1 Περιθώρια

Τα περιθώρια πρέπει να παρέχονται με βάση τις απαιτήσεις λειτουργικής απόδοσης του συστήματος, τις ανοχές στο μηχανικό υλικό των Η/Υ του συστήματος και τις αβεβαιότητες που εμπλέκονται στη διακρίβωση των απαιτήσεων σχεδίασης του επιπέδου του συστήματος. Οι λειτουργίες της κρίσιμης ασφαλείας και του έργου του κρίσιμου συστήματος, πρέπει να έχουν ένα περιθώριο τουλάχιστον 6 dB. Οι EIDs πρέπει να έχουν ένα περιθώριο τουλάχιστον 16,5 dB του μέγιστου ερεθίσματος χωρίς πυροδότηση (MNFS) για διαβεβαιώσεις ασφάλειας και 6 dB του MNFS για άλλες εφαρμογές. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, με ανάλυση ή ένα συνδυασμό αυτών. Όργανα που έχουν εγκατασταθεί σε εξαρτήματα του συστήματος κατά τη διάρκεια της δοκιμής για τα περιθώρια, θα πιάνουν τη μέγιστη απόκριση του συστήματος και δεν θα πρέπει να αλλοιώσουν τα συνήθη χαρακτηριστικά απόκρισης του εξαρτήματος. Όταν οι προσομοιώσεις του περιβάλλοντος, χρησιμοποιούνται κάτω από συγκεκριμένα επίπεδα, οι αποκρίσεις των οργάνων μπορούν να υπολογισθούν κατά προσέγγιση, στα πλήρη περιβάλλοντα για τα εξαρτήματα με γραμμικές αποκρίσεις (όπως το θερμό καλώδιο γεφύρωσης EIDs). Όταν η απόκριση

είναι κάτω από την ευαισθησία των οργάνων, η ευαισθησία των οργάνων θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως βάση για τον υπολογισμό κατά προσέγγιση. Για εξαρτήματα με μη-γραμμικές αποκρίσεις (όπως ημιαγωγοί γέφυρας EIDs), δεν επιτρέπεται ο υπολογισμός κατά προσέγγιση.

5.3.1.1 Απαίτηση

Η μεταβλητότητα υπάρχει στο υλικό του συστήματος από παράγοντες όπως οι διαφορές στη δρομολόγηση της καλωδίωσης και τη σύνθεση, η επάρκεια των τερματισμών προστασίας, η αγωγιμότητα των φινιρισμάτων στις επιφάνειες για την ηλεκτρική σύνδεση, οι διαφορές των εξαρτημάτων στους ηλεκτρονικούς πίνακες και η υποβάθμιση με τη γήρανση του υλικού και τη συντήρηση. Τα περιθώρια πρέπει να περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό, για να αντιμετωπισθούν αυτοί οι τύποι μεταβλητότητας. Επιπλέον, οι αβεβαιότητες παρουσιάζονται στη διαδικασία επαλήθευσης, σύμφωνα με τη μέθοδο διακρίβωσης που χρησιμοποιείται, τους περιορισμούς στην προσομοίωση του περιβάλλοντος και την ακρίβεια των μετρούμενων δεδομένων. Η ορθή εφαρμογή των περιθωρίων στη σχεδίαση του συστήματος και υποσυστήματος παρέχουν την αξιοπιστία ότι όλα τα συστήματα παραγωγής θα λειτουργήσουν ικανοποιητικά στα λειτουργικά περιβάλλοντα E3.

Τα περιθώρια εφαρμόζονται γενικά για συγκεκριμένα περιβάλλοντα εκτός του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των κεραυνών (μόνο έμμεσες επιπτώσεις), μεταξύ συστημάτων EMC, EMP, HERO και πτυχών ενδοσυστημάτων EMC που συνδέονται με οποιοδήποτε είδος σύζευξης με κυκλώματα εκρηκτικών διατάξεων. Τα περιθώρια πρέπει να εξεταστούν από τη σωστή οπτική γωνία. Η χρήση των περιθωρίων αναγνωρίζει απλά ότι υπάρχει μεταβλητότητα στην κατασκευή και ότι ο έλεγχος της απαίτησης έχει αβεβαιότητες. Το περιθώριο εξασφαλίζει ότι κάθε παραγόμενο σύστημα θα ανταποκριθεί στις απαιτήσεις συνολικά και όχι μόνο για τις συγκεκριμένες συνθήκες που υφίσταται με μία επιλεγμένη τεχνική επαλήθευσης. Τα μικρότερα περιθώρια είναι κατάλληλα για περιπτώσεις όπου οι διαδικασίες παραγωγής είναι κάτω από αυστηρούς ή πιο ακριβείς ελέγχους και πιο διεξοδικές τεχνικές ελέγχου χρησιμοποιούνται. Τα μικρότερα περιθώρια, είναι επίσης κατάλληλα, εάν πολλά συστήματα παραγωγής υφίστανται την ίδια διαδικασία διακρίβωσης, δεδομένου ότι εξετάζεται η μεταβλητότητα της παραγωγής. Τα περιθώρια δεν αυξάνονται στα βασικά καθορισμένα επίπεδα για τα διάφορα ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλοντα. Η πιο συνηθισμένη τεχνική είναι να βεβαιωθεί, ότι οι ηλεκτρομαγνητικές και ηλεκτρικές τάσεις που επάγονται στο εσωτερικό του συστήματος από τα εξωτερικά περιβάλλοντα, είναι κάτω από την αντοχή του εξοπλισμού τουλάχιστον στο περιθώριο. Ενώ τα περιθώρια μπορεί μερικές φορές να αποδειχθούν με την διενέργεια του ελέγχου σε ένα επίπεδο πέραν της καθορισμένης απαίτησης, ο σκοπός του περιθωρίου δεν είναι να αυξήσει την απαίτηση.

Το περιθώριο των 16,5 dB, καθορίζεται για τη διασφάλιση της ασφάλειας των EIDs στα πυρομαχικά και προέρχεται από κριτήριο του προτύπου MIL-STD-1385 [16] (το οποίο έχει ακυρωθεί και αντικατασταθεί από την MIL-STD-464), ότι το μέγιστο

επιτρεπόμενο επίπεδο των EIDs σε απαιτούμενα περιβάλλοντα είναι 15% του μέγιστου ρεύματος μη πυροδότησης. Η αναλογία των επιτρεπόμενων ρευμάτων μη πυροδότησης σε dB είναι $20 \log(0,15)$ ή 16,5 dB περιθώριο. Η απαίτηση εκφράζεται σε dB, προκειμένου να δύναται να εφαρμοσθεί σε σχεδίαση που δεν χρησιμοποιεί συμβατικά EIDs θερμής γεφύρωσης, όπου ο όρος «ρεύμα πυροδότησης» μπορεί να είναι χωρίς νόημα. Το MIL-STD-1385 είχε καθορίσει ένα κριτήριο του 45% των ρευμάτων πυροδότησης (7 dB περιθώριο), όταν υπάρχουν συνέπειες διάφορες της ασφάλειας. Το αντίστοιχο κριτήριο στο πρότυπο MIL-STD-464 έχει καθοριστεί ως 6 dB.

Τα EIDs θερμής γεφύρωσης (bridgewire), με 1 amp/1 watt MNFS, χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές πυρομαχικών για να συνδράμουν στην ικανοποίηση των απαιτήσεων ασφαλείας. Ως εναλλακτική λύση στη χρήση δειγμάτων μεγάλων μεγεθών για την απόδειξη ότι τα στατιστικά κριτήρια που περιλαμβάνονται στον ορισμό του MNFS (όχι πάνω από 0,1% πυροδότηση με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%) πληρούνται, οι μέθοδοι του προτύπου MIL-DTL-23659 [17] μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πιστοποίηση του 1amp/1watt MNFS.

Οι τιμές MNFS για τα EIDs, καθορίζονται συνήθως από τους κατασκευαστές με όρους όπως DC ρεύματα ή ενέργεια. Τα περιθώρια αποδεικνύονται συχνά με την παρατήρηση της επίδρασης κατά τη διάρκεια της εφαρμογής ενός ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος, που είναι το ίδιο φαινόμενο που παρατηρείται κατά την εφαρμογή ενός επιπέδου ερεθίσματος στη μορφή υπό την οποία η MNFS ορίζεται. Για παράδειγμα, η άνοδος της θερμοκρασίας του καλωδίου θερμής γεφύρωσης (bridgewire), μπορεί να παρακολουθείται υπό την παρουσία ενός EME σχετικού με την άνοδο της θερμοκρασίας που παράγεται από ένα ρεύμα DC που είναι 16.5 dB κάτω από το MNFS. Η διαστημική κοινότητα έχει επιλέξει να χρησιμοποιεί τα επίπεδα MNFS, που προσδιορίζονται με τη χρήση RF αντί DC. Εκτός διαστημικής κοινότητας, η χρήση των επιπέδων DC έδωσε επιτυχή αποτελέσματα.

Τα περιθώρια είναι στενά συνδεδεμένα τόσο με το σχεδιασμό, όσο και τον έλεγχο, αφού η προγραμματισμένη μεθοδολογία διακρίβωσης επηρεάζει το μέγεθος του περιθωρίου και την προκύπτουσα επίδραση επί της απαιτούμενης ευρωστίας του σχεδιασμού. Το ειδικό περιθώριο που καθορίζεται για ένα συγκεκριμένο σχεδιασμό και περιβάλλον είναι μία απόφαση μηχανικής. Αν το περιθώριο είναι πολύ μεγάλο, τότε δυσάρεστες συνέπειες σε βάρος και κόστος, μπορεί να επιβληθούν στο σχεδιασμό. Αν το περιθώριο είναι πολύ μικρό, τότε η πιθανότητα μιας ανεπιθύμητης απόκρισης του συστήματος γίνεται απαραίτητα υψηλή.

Το μέγεθος του περιθωρίου που καθορίζεται, είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την εγγενή ακρίβεια της μέθοδος διακρίβωσης που χρησιμοποιείται. Μία μέθοδος επαλήθευσης αντικεραυνικής προστασίας, είναι να εκτεθεί ένα επιχειρησιακό αεροσκάφος σε μια προσομοίωση δριμύτατης επαφής με κεραυνό (οι πιο σοβαροί κεραυνοί με τις χειρότερες περιπτώσεις σημείων επαφής). Με αυτήν τη σχετικά ακριβή μέθοδο επαλήθευσης, ένα μικρότερο συνολικά περιθώριο, θα απαιτηθεί. Μια

άλλη μέθοδος για την επαλήθευση αντικεραυνικής προστασίας είναι η χρήση ενός χαμηλής στάθμης παλμικού ή συνεχούς κύματος (CW), δοκιμάζοντας την επέκταση της καμπύλης μεταβολών των μετρούμενων επαγόμενων επιπέδων επί της ηλεκτρικής καλωδίωσης σε μία πλήρη κλίμακα χτυπημάτων. Αυτά τα επίπεδα είτε θα εφαρμοστούν στα καλώδια του συστήματος, είτε θα συγκριθούν με εργαστηριακά δεδομένα. Αυτό το είδος της προσέγγισης θα απαιτούσε τυπικά ένα συνολικό περιθώριο των 6 dB. Παρόμοια περιθώρια μπορεί να είναι κατάλληλα, για καθαρά αναλυτικές προσεγγίσεις που παράγουν αποτελέσματα, τα οποία έχουν αποδειχθεί από προηγούμενες δοκιμές, ότι είναι σταθερά συντηρητικά για να αξιολογηθεί ο συγκεκριμένος τύπος του συστήματος.

Η λιγότερο ακριβή μέθοδος επαλήθευσης είναι η χρήση μιας ανάλυσης, η οποία δεν έχει προηγουμένως ελεγχθεί ως αποδίδουσα «ακριβή» αποτελέσματα, για τον τύπο του συστήματος ενδιαφέροντος. Ο όρος «προηγουμένως ελεγχθεί» σε αυτή την περίπτωση, σημαίνει ότι η ανάλυση βασίζεται σε αποδεκτές αρχές, αλλά η συγκεκριμένη διαμόρφωση του συστήματος που παρουσιάζεται για πιστοποίηση, δεν έχει προηγουμένως δοκιμασθεί για τον έλεγχο της ακρίβειας της ανάλυσης. Για αυτήν την περίπτωση, τα περιθώρια της τάξης των 30 dB δεν είναι ρεαλιστικά.

Για τις περισσότερες προσεγγίσεις, τα περιθώρια τυπικά εμπίπτουν εντός της περιοχής από 6 έως 20 dB. Για τον εξοπλισμό που δεν έχει ταξινομηθεί ως κρίσιμης ασφάλειας, κρίσιμης αποστολής ή πυρομαχικό, μπορεί να είναι επιθυμητό να χρησιμοποιεί μειωμένο (πιθανώς μηδέν) περιθώριο για τη διατήρηση των πηγών του προγράμματος.

Η χρήση των περιθωρίων στην επαλήθευση των απαιτήσεων του ενδο-συστήματος EMC μεταξύ των υποσυστημάτων, μέσω δοκιμής, έχει επιχειρηθεί στο παρελθόν. Ωστόσο, αυτή η πρακτική έχει σε μεγάλο βαθμό εγκαταλειφθεί με εξαίρεση τα ηλεκτροεκρηκτικά κυκλώματα. Μια βασική δυσκολία που υπήρχε, ήταν η έλλειψη διαθέσιμων τεχνικών για την αξιολόγηση της πιθανότητας, κατά πόσο ένα κύκλωμα δύναται να επηρεασθεί ή να υποβαθμισθεί. Με τόσα πολλά κυκλώματα στις περισσότερες πλατφόρμες, μπορεί να είναι εξαιρετικά δύσκολο έργο να αξιολογηθούν όλα αυτά κυκλώματα. Μία τεχνική που έχει χρησιμοποιηθεί, είναι ο προσδιορισμός μέσω της ανάλυσης των κυκλωμάτων, τα οποία είναι δυνητικά τα πιο ευπαθή. Το εκούσιο εκπεμπόμενο σήμα σε όλη την ηλεκτρική διεπαφή, μειώνεται σε πλάτος κατά τον απαιτούμενο αριθμό dB, προκειμένου να μειωθεί το σχετικό επίπεδο του εκούσιου σήματος σε οποιαδήποτε παρουσιασθείσα παρεμβολή. Ωστόσο, υπάρχει κάποια διχογνωμία σε αυτόν τον τύπο δοκιμής, δεδομένου ότι τα κυκλώματα λήψης δεν εφαρμόζουν το κανονικό επίπεδο λειτουργίας τους. Τα περιθώρια για τα EIDs έχουν αποδειχθεί συχνά, χρησιμοποιώντας τεχνικές, όπως οι ηλεκτροπτικές, οι υπέρυθρες, οι ακροδέκτες ρεύματος, τα θερμοστοιχεία, οι RF ανιχνευτές, και τα ευαίσθητα στη θερμοκρασία κεριά.

5.3.1.2 Διακρίβωση

Για να αποκτηθεί εμπιστοσύνη, ότι το σύστημα θα λειτουργήσει αποτελεσματικά στα διάφορα περιβάλλοντα, τα περιθώρια πρέπει να επαληθεύονται. Επιπρόσθετα, η μεταβλητότητα στο υλικό του συστήματος, η δοκιμή και η ανάλυση, συνεπάγονται αβεβαιότητες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον καθορισμό του βαθμού εκπλήρωσης των απαιτήσεων της σχεδίασης ενός συστήματος. Αυτές οι αβεβαιότητες περιλαμβάνουν ανοχές των οργάνων, σφάλματα μέτρησης και ελλείψεις προσομοιωτή (όπως ανεπαρκή φασματική κάλυψη). Η επαλήθευση των περιθωρίων για τα διαστημικά οχήματα και οχήματα εκτόξευσης είναι απαραίτητη, δεδομένου ότι τα συστήματα αυτά είναι υψηλού κόστους και πρέπει να πληρούν τις επιδόσεις από την πρώτη και μόνο φορά. Για τα αναλώσιμα οχήματα εκτόξευσης (ELVs) δεν υπάρχουν επισκευές κατά τη διάρκεια της τροχιάς.

Μερικές αβεβαιότητες, όπως οι παραλλαγές του υλικού του συστήματος ή σφάλματα οργάνων, μπορεί να είναι γνωστές πριν από την προσπάθεια επαλήθευσης. Άλλες αβεβαιότητες πρέπει να αξιολογούνται κατά τη στιγμή μιας δοκιμής ή ως μια πληροφορία που καθίσταται διαθέσιμη για να τεκμηριώσει την ανάλυση. Τα περιθώρια πρέπει να εξετάζονται στην αρχή του προγράμματος, έτσι ώστε να μπορούν να συμπεριληφθούν στο σχεδιασμό. Είναι προφανές ότι οι καλύτερες τεχνικές ελέγχου, μπορεί να οδηγήσουν σε πιο λιτά σχέδια, αφού οι αβεβαιότητες είναι μικρότερες. Προσοχή πρέπει να δίδεται στον καθορισμό των περιθωρίων, έτσι ώστε η πιθανή έλλειψη αξιόπιστων και ακριβών τεχνικών ελέγχου να μην επιβαρύνει αδικαιολόγητα το σχεδιασμό.

Κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής E3, η συμβολή στην αβεβαιότητα από τη δοκιμή είναι είτε σφάλματα, είτε διακυμάνσεις. Τα σφάλματα εμπίπτουν στις κατηγορίες της μέτρησης, του υπολογισμού κατά προσέγγιση (προσομοίωση) και της επαναληψιμότητας. Οι διακυμάνσεις προκαλούνται από διάφορα θέματα, όπως ο προσανατολισμός του συστήματος σε σχέση με το προσπίπτον πεδίο, η πόλωση του προσπίπτοντος πεδίου και οι διαφορετικές διαρθρώσεις - ρυθμίσεις του συστήματος (όπως η λειτουργία/μη λειτουργία, ο ανεφοδιασμός σε καύσιμα, ο συναγερμός εδάφους). Οι συνεισφορές των λαθών και των διακυμάνσεων, συνδυάζονται για τον προσδιορισμό του περιθωρίου. Μπορούν να προστεθούν απ' ευθείας. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή τείνει να παράγει μια υπερβολικά συντηρητική απάντηση. Η πιο κοινή προσέγγιση είναι να συνδυασθεί η χρήση της ρίζας του αθροίσματος τετραγώνων.

Ένα παράδειγμα της εκτίμησης περιθωρίου, που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της επαλήθευσης των έμμεσων επιδράσεων των κεραυνών και της προστασίας ηλεκτρομαγνητικών παλμών είναι η απόδειξη ότι τα επίπεδα των ηλεκτρικών ρευμάτων που προκαλούνται στα ηλεκτρικά καλώδια του συστήματος από το συγκεκριμένο περιβάλλον, είναι μικρότερα από την αποδεδειγμένη σκληρότητα του εξοπλισμού, τουλάχιστον από το περιθώριο. Αυτή η επαλήθευση γενικά, επιτυγχάνεται με ένα συνδυασμό δοκιμών και αναλύσεων. Το επίπεδο σκληρότητας

του εξοπλισμού, γενικά καταδεικνύεται σε εργαστήριο κατά τη διάρκεια δοκιμής σύμφωνα με το MIL-STD-461. Δοκιμή μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί για μεμονωμένα στοιχεία εξοπλισμού σε επίπεδο συστήματος. Υπάρχουν κάποιες ανησυχίες για τις επαγωγικές μεταβατικές κυματομορφές, που καθορίζονται στο επίπεδο συστήματος να είναι διαφορετικές από εκείνες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της δοκιμής επιπέδου εξοπλισμού. Τεχνικές ανάλυσης είναι διαθέσιμες για σύγκριση κυματομορφής, όπως η χρήση κανονικών χαρακτηριστικών, για την αξιολόγηση των διαφόρων παραμέτρων της κυματομορφής. Οι τεχνικές δοκιμών είναι διαθέσιμες για να εισάγουμε μετρήσιμες κυματομορφές ρεύματος σε ηλεκτρικά καλώδια και σε ενισχυμένα επίπεδα, κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής σε επίπεδο συστήματος.

5.3.2 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα Ενδοσυστήματος (EMC)

Το σύστημα πρέπει να είναι συμβατό ηλεκτρομαγνητικά στο εσωτερικό του, ούτως ώστε οι απαιτήσεις λειτουργικών επιδόσεων του συστήματος να πληρούνται. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή σε επίπεδο συστήματος, με ανάλυση ή με ένα συνδυασμό αυτών. Για τα πλοία επιφανείας, το πρότυπο MIL-STD-1605 [18] παρέχει τις μεθόδους δοκιμών που χρησιμοποιούνται για την εξακρίβωση της συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις του MIL-STD-464C για την EMC του ενδοσυστήματος ή του διασυστήματος, για τις δημιουργούμενες παρεμβολές αλληλοδιαμόρφωσης στη γάστρα των πλοίων και την ηλεκτρική σύνδεση.

5.3.2.1 Απαίτηση

Είναι ουσιώδες μέσα σε ένα σύστημα, τα υποσυστήματα και ο εξοπλισμός να είναι ικανά να παρέχουν πλήρη απόδοση σε συνδυασμό με άλλα υποσυστήματα και εξοπλισμούς που απαιτείται να λειτουργούν ταυτόχρονα. Η EMI που παράγεται από ένα υποσύστημα ή άλλα υποσυστήματα και εξοπλισμούς, πρέπει να μην υποβαθμίζει τη συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος. Τα έξαλα και οι περιοχές κάτω από το κατάστρωμα των πλοίων, έχουν πολύ περίπλοκο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον με σημαντικό μέρος του εξοπλισμού και των συστημάτων να είναι ενσωματωμένα ή/και συνεγκατεστημένα. Το Πολεμικό Ναυτικό έχει ενσωματώσει τους εξοπλισμούς κατά το MIL-STD-461, αλλά σύμφωνα και με εμπορικά πρότυπα, όπως τα πρότυπα των IEEE και IEC, προκειμένου να μειώσει το κόστος. Για να εξασφαλισθεί ότι η EMC επιτυγχάνεται σε πλοία του Ναυτικού, η επιθεώρηση που προβλέπει το πρότυπο MIL-STD-1605 (SH), πρέπει να πραγματοποιηθεί. Η EMC μεταξύ κεραιών των υποσυστημάτων (συμβατότητα RF) αποτελεί βασικό στοιχείο της απόδοσης του συστήματος. Η αδυναμία της κεραίας του υποσυστήματος να λάβει κατάλληλα εκούσια εκπεμπόμενα σήματα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της αποστολής. Η επίτευξη της συμβατότητας απαιτεί προσεκτικό στρατηγικό σχεδιασμό για την τοποθέτηση των κεραιών του δέκτη και πομπού στο σύστημα και για τη διαλειτουργικότητα των υποσυστημάτων.

Η EMC του ενδοσυστήματος είναι το πιο βασικό στοιχείο των E3 ανησυχιών. Οι διάφορες συσκευές και υποσυστήματα πρέπει να σχεδιάζονται και να ενσωματώνονται, για να συνυπάρξουν και να παρέχουν την επιχειρησιακή απόδοση που απαιτείται από το χρήστη. Ωστόσο, ποικίλοι βαθμοί λειτουργικότητας είναι αναγκαίοι ανάλογα με τις λειτουργικές ανάγκες των επιμέρους στοιχείων (αντικειμένων) κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων αποστολών. Ορισμένες συσκευές μπορεί να μην χρειάζεται να λειτουργούν κατά το χρόνο της λειτουργίας του άλλου εξοπλισμού. Για την κατάσταση αυτή, δεν ισχύουν κατ' ανάγκη οι απαιτήσεις συμβατότητας του ενδοσυστήματος. Η υπηρεσία προμηθειών και ο χρήστης του συστήματος, θα πρέπει να συμμετέχουν στη διαβούλευση για τον καθορισμό της απαιτούμενης λειτουργικότητας. Ένα παράδειγμα τέτοιων περιπτώσεων, είναι ότι είναι απίθανο ένα όργανο συστήματος προσγείωσης αεροσκάφους, να απαιτείται να είναι συμβατό με ένα υποσύστημα ηλεκτρονικού πολέμου που ακτινοβολεί ηλεκτρονική παρεμβολή κατά τη διάρκεια των προσεγγίσεων ακριβείας. Ωστόσο, θα πρέπει να είναι συμβατά κατά τη διάρκεια άλλων δραστηριοτήτων, όπως στην περίπτωση που εφαρμόζεται η ενσωματωμένη δοκιμή (BIT).

Όταν τα κατάλληλα μέτρα περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό του συστήματος, όπως η E3 σκλήρυνση στο επίπεδο του συστήματος, οι απαιτήσεις EMI στα υποσυστήματα και εξοπλισμό και οι καλές πρακτικές γείωσης και σύνδεσης, τότε σχετικά λίγα θα είναι τα προβλήματα EMC που θα συναντηθούν στο ενδοσύστημα. Τα περισσότερα προβλήματα που εντοπίζονται, αφορούν την κεραία των πομπών και δεκτών. Η απόδοση του δέκτη υποβαθμίζεται από τον ευρυζωνικό θερμικό θόρυβο, τις αρμονικές και τις παρασιτικές (spurious) εξόδους συζευγμένων κεραιών από πομπούς. Οι αρμονικές που ακτινοβολούνται από το ρολόι του μικροεπεξεργαστή (microprocessor clock) του συστήματος καλωδίωσης υποβαθμίζοντας τους δέκτες, είναι ένα άλλο κοινό πρόβλημα. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που εκπέμπονται από κεραίες επί του σκάφους έχουν επηρεάσει μια ποικιλία υποσυστημάτων στις πλατφόρμες. Τυπικά προβλήματα που δεν σχετίζονται με την κεραία, είναι οι παροδικές συζεύξεις μεταξύ καλωδίων από μη αποκλειόμενες επαγωγικές συσκευές και συχνότητες ισχύος που συζευγνύονται μέσα σε καλώδια σημάτων ενδοεπικοινωνίας και βίντεο. Προβλήματα που οφείλονται στη σύζευξη μεταξύ καλωδίων της σταθερής κατάστασης του θορύβου και της άμεσης μετάδοσης μιας μεταβατικής ή σταθερής κατάστασης θορύβου συνήθως προσδιορίζονται και επιλύονται νωρίς στην ανάπτυξη ενός συστήματος.

Η γενιά των ευρυζωνικών EMI στα πλοία από τα ηλεκτρικά «τόξα», αποτελεί μια κοινή πηγή υποβάθμισης των κεραιών των δεκτών και πρέπει να ελέγχεται. Οι πηγές του ηλεκτρικού τόξου έχουν θόρυβο βούρτσας (brush) από ηλεκτρικές μηχανές και επάγονται τάσεις και ρεύματα μεταξύ των μεταλλικών στοιχείων από τις εκπομπές της κεραίας. Η περιοδική (διακοπτόμενη) επαφή των μεταλλικών στοιχείων λόγω του ανέμου ή της κίνησης του πλοίου, είναι ένας παράγοντας που συμβάλλει. Το MIL-STD-1605 (SH) παρέχει καθοδήγηση σχετικά με τον έλεγχο και τον εντοπισμό των πηγών των ευρυζωνικών EMI.

Η μοντελοποίηση λογισμικού πρόβλεψης ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης μέσω κεραιών, συνιστάται για να μειώσει τον κίνδυνο πρόωρα σε ένα πρόγραμμα ανάπτυξης του συστήματος. Τεχνικές μοντελοποίησης κοινού λογισμικού, περιλαμβάνουν τη Μέθοδο Στιγμών (MoM), τη Γεωμετρική Θεωρία της Περίθλασης (GTD) και τη Γεωμετρική Οπτική (ray-tracing). Τα προγράμματα λογισμικού μπορούν να χρησιμοποιήσουν μία από αυτές τις τεχνικές ή ένα υβρίδιο πολλαπλών τεχνικών, για προβλέψουν τη ζεύξη από κεραία σε κεραία και τελικά, ένα περιθώριο EMI μεταξύ των συζευγμένων επιπέδων έναντι της ευαισθησίας του δέκτη. Η μοντελοποίηση του λογισμικού είναι εξαιρετικά χρήσιμη, όταν πραγματικά το υλικό δεν είναι διαθέσιμο για ενδεχόμενη δοκιμή. Περιορισμοί του κάθε προγράμματος ανάλυσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη χρήση του αποτελεσμάτων, για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Ένα κοινό πρόβλημα που εμφανίζεται σε συστήματα, είναι όταν το σύστημα χρησιμοποιεί αμφότερα τα ηλεκτρονικά αντίμετρα (ECM) και εξοπλισμό ραντάρ που λειτουργούν σε επικαλυπτόμενες συχνότητες. Τα μέτρα που δύνανται να είναι χρήσιμα, για να παρέχουν συμβατότητα ραδιοσυχνοτήτων μεταξύ αυτών των τύπων των υποσυστημάτων είναι η αμαύρωση (blanking), ο παλμός αναγνώρισης, η αξιοποίηση της λογικής επεξεργασίας του νεκρού χρόνου, ο διαχωρισμός ζώνης και η ψηφιακή λειτουργία εξαγωγής. Μία μήτρα (matrix) αμαύρωσης χρησιμοποιείται συνήθως, για να αναπαριστά τη σχέση μεταξύ της πηγής και του ζεύγους θυμάτων.

Τα προϊόντα αλληλοδιαμόρφωσης (μερικές φορές ονομάζεται παθητική αλληλοδιαμόρφωση), που προκαλείται από την μίξη δύο σημάτων σε μη γραμμική συμβολή (όπως ένας διαβρωμένος δεσμός) και εμφανίζεται σε προβλέψιμες συχνότητες (συχνότητα αλληλοδιαμόρφωσης = $mf_1 \pm nf_2$ όπου m και n είναι ακέραιοι και f_1 και f_2 είναι οι δύο συχνότητες σήματος). Τα προϊόντα αυτά μπορούν να υποβαθμίσουν την κεραία των δεκτών, που είναι συντονισμένοι στη συχνότητα αλληλοδιαμόρφωσης. Σε ορισμένες εγκαταστάσεις όπου υπάρχει ευελιξία στην επιλογή των συχνοτήτων λειτουργίας του εξοπλισμού, τα πιθανά προβλήματα μπορούν να αντιμετωπισθούν μέσα από τη διαχείριση των συχνοτήτων, αποφεύγοντας προβλέψιμους συνδυασμούς. Σε περίπτωση που είναι πολύ ευαίσθητοι οι δέκτες που εμπλέκονται, ακόμα και προϊόντα υψηλότερης τάξης μπορούν να επηρεάσουν αυτούς. Οι διαστημικές εφαρμογές αντιμετωπίζουν με ιδιαίτερη προσοχή τα θέματα αλληλοδιαμόρφωσης.

5.3.2.2 Διακρίβωση

Η διακρίβωση EMC των ενδοσυστημάτων μέσω δοκιμής, που υποστηρίζεται από την ανάλυση, είναι το πιο βασικό στοιχείο της απόδειξης ότι οι προσπάθειες της E3 σχεδίασης υπήρξαν επιτυχείς. Η επαλήθευση της EMC με δοκιμή είναι απαραίτητη, για την εξασφάλιση επαρκούς σχεδιασμού ο οποίος είναι απαλλαγμένος από την υποβάθμιση που προκαλείται από την παρεμβολή των συζευγμένων κεραιών. Πρότερη ανάλυση και δοκιμή επιπέδου εξοπλισμού, είναι απαραίτητες για την

εκτίμηση πιθανών προβλημάτων και την εξασφάλιση επαρκούς χρόνου για τον καθορισμό των προβλημάτων του υποσυστήματος.

Παρά το γεγονός ότι η ανάλυση είναι ένα σημαντικό μέρος από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού ή της τροποποίησης ενός συστήματος, η δοκιμή είναι ο μόνος πραγματικά ακριβής τρόπος, για να γνωρίζουμε ότι ένα σχέδιο πληροί τις απαιτήσεις EMC εντός του συστήματος. Ένας ανηχοϊκός θάλαμος συχνά απαιτείται για τη δοκιμή σε επίπεδο συστήματος, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι ανακλάσεις και η περιρρέουσα παρεμβολή, που μπορεί να υποβαθμίσουν την ακρίβεια της δοκιμής και να αξιολογηθούν οι τρόποι λειτουργίας που προορίζονται για τον πόλεμο ή είναι διαβαθμισμένοι. Οδηγίες, σχετικά με τα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν για την δοκιμή EMC του ενδοσυστήματος, αφορούν τα παρακάτω:

α. Πιθανές παρεμβολές μεταξύ ζευγών πηγής/θύματος θα πρέπει να αξιολογούνται συστηματικά με την δοκιμή των υποσυστημάτων και του εξοπλισμού πάνω στο σύστημα μέσω διαφόρων καταστάσεων και λειτουργιών, καθώς παρακολουθούνται τα υπόλοιπα στοιχεία για την υποβάθμιση. Αμφότερα και η πηγή σε σχέση με ένα θύμα και οι πολλαπλές πηγές σε σχέση με τις συνθήκες του θύματος πρέπει να υπολογίζονται.

β. Θα πρέπει να αναπτυχθεί ένα σχέδιο επιλογής συχνοτήτων για τη δοκιμή της κεραίας που συνδέεται με πομπούς και δέκτες. Το σχέδιο αυτό πρέπει να περιλαμβάνει:

(1) Προβλέψιμες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πομπών και δεκτών, όπως οι αρμονικές του πομπού, προϊόντα αλληλοδιαμόρφωσης, άλλες παρασιτικές αποκρίσεις (όπως συχνότητες είδωλα) και διασταυρούμενη διαμόρφωση. Η αποδοχή ορισμένων τύπων απαντήσεων θα είναι εξαρτώμενη του συστήματος.

(2) Αξιολόγηση των πομπών και δεκτών σε ολόκληρη την περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων των συχνοτήτων έκτακτης ανάγκης.

(3) Αξιολόγηση των γνωστών EMI εκπομπών και θεμάτων ευαισθησίας, με τα μεμονωμένα υποσυστήματα.

γ. Τα περιθώρια πρέπει να αποδεικνύονται για τα εκρηκτικά υπο-συστήματα και άλλα συναφή υποσυστήματα.

δ. Η εκτέλεση της επιχειρησιακής αξιολόγησης στο πεδίο, των αποκρίσεων του συστήματος που βρίσκονται σε εργαστηριακό περιβάλλον (όπως η δοκιμή πτήσης του αεροσκάφους για να αξιολογήσει τις αποκρίσεις που βρέθηκαν κατά τη διάρκεια δοκιμών στο έδαφος).

ε. Οι δοκιμές πρέπει να διεξάγονται σε μια περιοχή όπου το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον δεν επηρεάζει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών. Η πιο ενοχλητική πτυχή του περιβάλλοντος, είναι συνήθως η πυκνή χρήση του φάσματος συχνοτήτων, η οποία μπορεί να παρεμποδίσει τις προσπάθειες για

την αξιολόγηση της απόδοσης των δεκτών κεραίας, αναφορικά με τις εκπομπές θορύβου από άλλο εξοπλισμό εγκατεστημένο στο σύστημα.

ζ. Οι δοκιμές θα πρέπει να περιλαμβάνουν όλο το σχετικό εξωτερικό υλικό του συστήματος, όπως όπλα, αποθέματα, προμηθευόμενο εξοπλισμό (στοιχεία που έχουν εγκατασταθεί στο σύστημα του χρήστη) και υποστήριξη εξοπλισμού.

η. Είναι απαραίτητη η διακρίβωση της συμμόρφωσης με το πρότυπο ποιότητας ισχύος του συστήματος, της οποιαδήποτε εξωτερικής ηλεκτρικής πηγής ισχύος, που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του συστήματος.

θ. Ο παρακάτω πίνακας προσδιορίζει το είδος των απαιτούμενων EMI/EMC δοκιμών, όταν νέος, τροποποιημένος ή μεταφερόμενος εξοπλισμός θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε στρατιωτικά αεροσκάφη.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5- 1: Τύπος EMI/EMC Δοκιμών

Τύπος ηλεκτρονικού/ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που θα εγκατασταθεί στο αεροσκάφος	Απαίτηση εργαστηριακής δοκιμής EMI (ΝΑΙ/ΟΧΙ και Τύπος)	Απαίτηση δοκιμής EMC στο επίπεδο του αεροσκάφους (ΝΑΙ/ΟΧΙ και Τύπος)
1. Νέος ή μόνιμα αλλαγμένος/τροποποιημένος εξοπλισμός	ΝΑΙ E & S	ΝΑΙ R, O, G
2. Προσωρινός εξοπλισμός, χωρίς εκπομπές κεραιών, που προορίζεται χρησιμοποιηθεί για συγκεκριμένη χρονική περίοδο	Κρίσιμη πτήση- E & S Μη κρίσιμη πτήση- E	Εργαστηριακά σύμμορφο - ΟΧΙ Μη σύμμορφο* - ΝΑΙ - R
3. Προσωρινός εξοπλισμός, με εκπομπές κεραιών, που προορίζεται να χρησιμοποιηθεί για συγκεκριμένη χρονική περίοδο	Κρίσιμη πτήση- E & S Μη κρίσιμη πτήση-E	Εργαστηριακά σύμμορφο - ΝΑΙ - R,G Μη σύμμορφο* - ΝΑΙ - R,O,G
4. Μεταφερόμενος εξοπλισμός χωρίς εκπομπές κεραιών	Κρίσιμη πτήση- E & S Μη κρίσιμη πτήση- E	Εργαστηριακά σύμμορφο - ΟΧΙ Μη σύμμορφο* - ΝΑΙ - R
5. Μεταφερόμενος εξοπλισμός με εκπομπές κεραιών	Κρίσιμη πτήση- E & S Μη κρίσιμη πτήση- E	Εργαστηριακά σύμμορφο - ΝΑΙ-R Μη σύμμορφο* - ΝΑΙ - R,O,G

Τύπος ηλεκτρονικού/ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που θα εγκατασταθεί στο αεροσκάφος	Απαίτηση εργαστηριακής δοκιμής EMI (ΝΑΙ/ΟΧΙ και Τύπος)	Απαίτηση δοκιμής EMC στο επίπεδο του αεροσκάφους (ΝΑΙ/ΟΧΙ και Τύπος)
6. Ηλεκτρικά εκκινούμενες συσκευές (EIDs)	ΝΑΙ Η	ΝΑΙ Η,G

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

* Η ανάλυση απαιτείται για να αξιολογηθεί εάν ο εξοπλισμός που δεν συμμορφώνεται με το MIL-STD-461, χρειάζεται ειδική προσοχή στο επίπεδο του αεροσκάφους. Η μη συμμόρφωση δεν έχει σκοπό να υποδείξει ότι η μη τήρηση των συμβατικών απαιτήσεων είναι αποδεκτή. Ο εμπορικός εξοπλισμός (off-the-shelf) που εξετάζεται για χρήση και δεν έχει σχεδιασθεί να ανταποκριθεί στο MIL-STD-461, θα έχει συχνά ορισμένες διακοπές λειτουργίας, αναφορικά με το πρότυπο που πιθανόν ή μη πιθανόν να σχετίζεται.

Οι τύποι δοκιμών που αναγράφονται στον παραπάνω Πίνακα είναι:

α. Ε - Ακτινοβολούμενες και επαγόμενες εκπομπές (Δοκιμές του MIL-STD-461F: RE102, CE102 μόνο εάν συνδέεται με A/C ισχύ, CE106 μόνο αν έχει υποδοχές κεραιών).

β. S - Ακτινοβολούμενη και επαγόμενη ευαισθησία [Δοκιμές του MIL-STD-461F: RS103 (radiated susceptibility, electric field 2 MHz to 40 GHz), CS101 (conducted susceptibility, power leads, 30 Hz to 150 KHz), CS114 (conducted susceptibility, bulk cable injection, 10 KHz to 200 MHz), CS115 (conducted susceptibility, bulk cable injection, impulse excitation), CS116 (conducted susceptibility, damped sinusoidal transients, cables and power leads, 10 KHz to 100 MHz)].

γ. Η - Δοκιμή σε στοιχεία πυρομαχικών (HERO) για κινδύνους της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα EED/EID πρέπει να ρυθμισθούν και να δείξουν περιθώριο ασφαλείας 16.5 dB, από το καθορισμένο ρεύμα μη πυροδότησης.

δ. R - Σκόπιμες, αρμονικές και παρασιτικές εκπομπές πρέπει να αξιολογούνται για παρεμβολή στη ζώνη συχνοτήτων των κεραιών αεροσκαφών, που συνδέονται με δέκτες RF, μέσω σαρώσεων από αναλυτή φάσματος ή άλλη παρόμοια τεχνική.

ε. Ο - Οι μη συμμορφούμενες εκπομπές μπορεί να απαιτούν μια εκτίμηση της ζώνης διέλευσης συχνοτήτων των κεραιών αεροσκαφών, που συνδέονται με δέκτες RF, μέσω σαρώσεων από αναλυτή φάσματος ή άλλη παρόμοια τεχνική.

ζ. G - Δοκιμή πηγής-θύματος.

Οι λειτουργικές δοκιμές των συστημάτων, συχνά αρχίζουν προτού μία ενδελεχή δοκιμή EMC στο εσωτερικό του συστήματος αρχίσει να εκτελείται. Επίσης, το σύστημα που χρησιμοποιείται για την αρχική δοκιμή, σπάνια είναι διαμορφωμένο για το στάδιο παραγωγής. Το σύστημα τυπικά, θα περιλαμβάνει όργανα δοκιμής και θα του ελλείπουν κάποιες ηλεκτρονικές διατάξεις του σταδίου παραγωγής. Αυτός ο έλεγχος θα πρέπει να περιλαμβάνει την εκτέλεση και την αξιολόγηση όλων των λειτουργιών που μπορεί να επηρεάζουν την ασφάλεια. Είναι ουσιαστικό ότι η δοκιμή της ασφάλειας πτήσης του αεροσκάφους, γίνεται για να ικανοποιήσει τις ανησυχίες ασφαλείας πριν από την πρώτη πτήση και κάθε πτήση στη συνέχεια, όπου εισάγονται μεγάλες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές αλλαγές.

Ένα κοινό θέμα στη διακρίβωση EMC του ενδοσυστήματος, είναι εάν θα χρησιμοποιηθούν όργανα κατά τη διάρκεια της δοκιμής για την αξιολόγηση της απόδοσης των υποσυστημάτων και του εξοπλισμού. Η πιο κοινή προσέγγιση είναι να παρακολουθείται η απόδοση του υποσυστήματος, μέσω οπτικών και ακουστικών ενδείξεων και εξόδων. Δεν είναι συνήθως επιθυμητό να τροποποιείται η καλωδίωση και οι ηλεκτρονικοί πίνακες για να προστίθενται όργανα, δεδομένου ότι αυτές οι τροποποιήσεις μπορεί να αλλάξουν τις αποκρίσεις του υποσυστήματος και να εισαγάγουν πρόσθετες διαδρομές σύζευξης. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι τομείς όπου τα όργανα είναι σημαντικά. Η απόδειξη των περιθωρίων για τις κρίσιμες περιοχές απαιτεί κανονικά κάποιο είδος παρακολούθησης. Για παράδειγμα, οι EIDs απαιτούν παρακολούθηση για την εκτίμηση των περιθωρίων.

Μερικές κεραίες συνδεδεμένες με δέκτες, όπως συστήματα οργάνων προσγείωσης των αεροσκαφών και ταυτοποίησης φίλιων ή εχθρών, απαιτούν ένα σήμα εισόδου βασικής γραμμής (baseline - στα απαιτούμενα επίπεδα απόδοσης), ώστε η υποβάθμιση να αξιολογείται αποτελεσματικά. Άλλος εξοπλισμός που εκπέμπει ενέργεια και αξιολογεί το σήμα επιστροφής, όπως ραντάρ ή υψομετρικά όργανα ραντάρ, χρειάζεται ένα πραγματικό ή προσομοιωμένο σήμα επιστροφής, ώστε να μπορεί ενδελεχώς να αξιολογηθεί για πιθανές επιπτώσεις. Τα εργαλεία που απαιτούνται για αυτούς τους τύπους των εργασιών λειτουργούν πλήρως σε σύζευξη κεραίας και δεν απαιτούν να τροποποιηθεί ο ενσωματωμένος εξοπλισμός.

Κάποιες φορές γίνονται προσπάθειες, για να εκτελεστούν δοκιμές EMC εντός του ενδοσυστήματος των διαστημικών συστημάτων, με την προσομοίωση πομπών επί του σκάφους. Είναι σημαντικό ότι οι πραγματικοί πομποί χρησιμοποιούνται και λειτουργούν στους τύπους αποστολών τους, για να εξασφαλίσουν ότι ο εξοπλισμός έχει εκτεθεί σε ρεαλιστικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία και προκύπτοντα ρεύματα και τάσεις και για να αξιολογήσουν επαρκώς τα θέματα αλληλοδιαμόρφωσης. Χωρίς να χρησιμοποιούνται οι πραγματικοί πομποί RF, δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι παρέχεται ένα 100% λειτουργικό σύστημα. Χαρακτηριστικά εξόδου του διασκορπισμού φάσματος των πομπών, παρουσιάζουν μοναδικά τεχνικά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να επιτευχθεί η EMC.

Η συμβατότητα μεταξύ των κεραιών RF που συνδέονται με τα υποσυστήματα είναι ένα στοιχείο της EMC στο ενδοσύστημα και η απόδειξη της συμμόρφωσης με αυτή την απαίτηση θα πρέπει να ενσωματωθεί σε αυτές τις προσπάθειες. Όλες οι τεχνικές αμαύρωσης (blanking) που εφαρμόζονται για την απόδοση EMC, πρέπει να αξιολογούνται κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Τόσο το στρατιωτικό πρότυπο MIL-STD-461, όσο και ορισμένες εμπορικές προδιαγραφές, μειώνουν τον κίνδυνο των EMI, λόγω του περιβλήματος και του καλωδίου που είναι αγωγίμα και των εκπομπών ακτινοβολίας και της ευαισθησίας. Η συμμόρφωση με αυτά τα πρότυπα εξακολουθεί να επιτρέπει κινδύνους σε επίπεδο συστήματος, λόγω του μεγάλου αριθμού των συστεγαζόμενων συστημάτων, που έχουν ενσωματωθεί στα πλοία. Το EME του πλοίου, είναι δυναμικό και κυμαίνεται ανά διαμέρισμα, καθώς και μεταξύ πλοίων σε μια κατηγορία, λόγω των εκσυγχρονισμών και παραλλαγών του εξοπλισμού, εξαιτίας της μακράς περιόδου για την κατασκευή των πλοίων. Ως εκ τούτου, η διεξαγωγή δοκιμών, σύμφωνα με το MIL-STD-1605 (SH), για να αξιολογηθεί η EMC, συνιστάται ιδιαίτερα, όπου είναι εφικτό.

Η υποβάθμιση των επιδόσεων των κεραιών που συνδέονται με δέκτες επικοινωνίας, δεν δύναται να αξιολογηθεί αποτελεσματικά, δίνοντας προσοχή στους ανοικτούς δίαυλους, όπως έχει γίνει ευρέως στο παρελθόν. Η διακοπή της φίμωσης έχει χρησιμοποιηθεί συχνά ως κριτήριο για την αποτυχία. Υπάρχουν ορισμένα προβλήματα με αυτή την τεχνική

Εκτός από τα EIDs, η εκτίμηση του περιθωρίου είναι πρακτική σε διάφορες περιοχές. Τα περιθώρια μπορούν να εκτιμηθούν για κεραίες που συνδέονται με δέκτες, με τη χρήση της τεχνικής του αναλυτή φάσματος, που περιγράφεται στην ενότητα 5.3.2.6 Ένας άλλος τομέας όπου η αξιολόγηση του περιθωρίου είναι πρακτική, είναι η πιθανή υποβάθμιση των υποσυστημάτων, λόγω της σύζευξης του ηλεκτρικού καλωδίου με τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, που δημιουργούνται από την κεραία των πομπών που βρίσκονται επί του σκάφους. Τα προβλήματα συμβατότητας του ενδοσυστήματος, που οφείλονται στην επικοινωνία των πομπών, ιδιαίτερα στην περιοχή των HF (2-30 MHz), είναι αρκετά κοινά. Τα επαγόμενα επίπεδα που παρουσιάζονται σε κρίσιμα καλώδια διεπαφών, μπορούν να μετρηθούν και να συγκριθούν με τα επίπεδα σκληρότητας, που αποδεικνύονται από εργαστηριακές δοκιμές με τον ίδιο τρόπο όπως περιγράφεται στην ενότητα 5.3.3 για την EMC του διασυστήματος.

Η δοκιμή στο επίπεδο του συστήματος, θα πρέπει να είναι η τελική απόδειξη ότι η συμβατότητα RF έχει επιτευχθεί. Δεν πρέπει να είναι ένα σημείο εκκίνησης για να εντοπιστούν οι τομείς που απαιτούν διορθώσεις. Η προηγούμενη ανάλυση και οι δοκιμές πάγκου (bench), θα πρέπει να επιλύσουν τα ζητήματα συμβατότητας, εκ των προτέρων. Για την αξιολόγηση της σκληρότητας E3 του συστήματος, το Ναυτικό χρησιμοποιεί το MIL-STD-1605 (SH) [18]. Μια έρευνα EMI απαιτείται για την κατασκευή νέων πλοίων και πλοίων που επιδέχονται γενικές επισκευές ή άλλες

σημαντικές εργασίες επισκευής, οι οποίες αλλάζουν την ηλεκτρομαγνητική διαμόρφωση των πλοίων.

Οι τεχνικές μηδενισμού του ενεργού σήματος, παρουσιάζουν μια επικίνδυνη προσέγγιση για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και θα πρέπει να ελέγχονται αυστηρά πριν τεθούν σε εφαρμογή. Η προσέγγιση αυτή είναι πιο ευαίσθητη σε σφάλμα φάσης του σήματος και μπορεί να επιδεινώσει πραγματικά ένα πρόβλημα παρεμβολών, από την εισαγωγή του θορύβου φάσης που προκύπτει από μία μεταβαλλόμενη κατάσταση πολλαπλών διαδρομών (λόγω των φορτίων που είναι φορτωμένα στα αεροσκάφη, της εκκένωσης από αυτά και ούτω καθεξής).

5.3.2.3 Παρεμβολές Αλληλοδιαμόρφωσης (IMI) στη Γάστρα του Σκάφους

Για εφαρμογές σε πλοία επιφανείας, η απαίτηση EMC του ενδοσυστήματος, θεωρείται ότι πληρούται για τις παραγόμενες IMI στη γάστρα, όταν οι IMI παράγουν σειρές, μεγαλύτερες από την 19η σειρά που παράγεται από τους πομπούς υψηλής συχνότητας (HF) που είναι εγκατεστημένοι στο πλοίο και δεν είναι ανιχνεύσιμες από τις κεραίες των δεκτών του πλοίου. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, με ανάλυση, ή συνδυασμό αυτών, μέσω της μέτρησης των ληφθέντων επιπέδων στις κεραίες του συστήματος και αξιολόγησης της δυνατότητας αυτών των επιπέδων να υποβαθμίσουν τους δέκτες.

5.3.2.3.1 Απαίτηση

Σε γενικές γραμμές, ο έλεγχος των IMI σε συστήματα που καλύπτονται από τις απαιτήσεις που αντιμετωπίζουν την EMC του ενδοσυστήματος. Λόγω της δυσκολίας στα πλοία και του περιορισμού των IMI που παράγονται από πομπούς HF, μόνο τα προϊόντα αλληλοδιαμόρφωσης ανώτερης τάξης πρέπει να ελέγχονται, για να είναι δυνατή η αποτελεσματική χρήση του φάσματος. Οι έξοδοι με τα προϊόντα χαμηλότερης τάξης, αντιμετωπίζονται μέσω της διαχείρισης συχνοτήτων.

Ο μεγάλος αριθμός των πομπών HF, η ισχύς εξόδου των πομπών, η κατασκευή των υλικών και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε πλοία, κάνουν την παρουσία των IMI μια πραγματικότητα. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία από μεταδόσεις HF, επάγουν ροή ρεύματος στη γάστρα του πλοίου. Τα διάφορα ρεύματα από διαφορετικούς πομπούς, αναμιγνύονται σε μη-γραμμικότητες εντός της γάστρας (ονομάζεται το «αποτέλεσμα του σκουριασμένου μπουλονιού»), για να παράγουν σήματα ως άθροισμα και διαφορά συχνοτήτων των θεμελιωδών και αρμονικών συχνοτήτων των προσπιπτουσών σημάτων ($F3 = \pm n1F1 \pm n2F2 \pm \dots$, όπου $n1$, $n2$, κλπ, είναι ακέραιοι). Η τάξη των IMI είναι το άθροισμα των όρων n . Η μίξη μιας θεμελιώδους συχνότητας με την τέταρτη αρμονική, παράγει την IMI πέμπτης τάξεως.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι ο έλεγχος υψηλότερα από την IMI 19ης τάξεως, παρέχει στο προσωπικό διαχείρισης συχνοτήτων, επαρκή ευελιξία για να διαχειριστεί αποτελεσματικά το φάσμα.

5.3.2.3.2 Διακρίβωση

Οι δοκιμές και οι σχετικές αναλύσεις, είναι τα μόνα αποτελεσματικά μέσα, για να εξακριβωθούν οι απαιτήσεις IMI. Οι οδηγίες σχετικά με την αξιολόγηση των IMI, είναι διαθέσιμες μέσω του Προγράμματος Βελτίωσης της EMC του πλοίου (SEMCIIP) και της τεχνικής βοήθειας δικτύου. Η πρόσβαση στη βάση δεδομένων πρέπει να παρέχεται από τους αρμόδιους φορείς των στρατιωτικών υπηρεσιών. Οι δοκιμές, που υποστηρίζονται από την ανάλυση, έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την αξιολόγηση των IMI.

5.3.2.4 Ηλεκτρομαγνητικό Περιβάλλον Πλοίου Επιφανείας (EME)

Για τις εφαρμογές πλοίων και υποβρυχίων, τα ηλεκτρικά πεδία (η μέγιστη τιμή V/m-RMS) που προκαλούνται κάτω από το κατάστρωμα, από πομπούς επί του σκάφους, δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα ακόλουθα επίπεδα:

α. Πλοία επιφανείας:

(1) Μεταλλικά: 10V/m από 10kHz έως 18GHz

Οι πομποί εκούσιας ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται κάτω από το κατάστρωμα, πρέπει να περιορίζονται μέχρι τη μέγιστη ισχύ των 100 milliwatt (mW) ισότροπης ακτινοβολουμένης ισχύος (EIRP). Η συνολική συνδυασμένη ισχύ που ακτινοβολείται μέσα σε ένα διαμέρισμα και εντός της ζώνης συχνοτήτων λειτουργίας, θα πρέπει να περιορίζεται στα 550 mW της συνολικά ακτινοβολουμένης ισχύος (TRP). Επιπλέον, καμία συσκευή δεν πρέπει να είναι μόνιμα εγκατεστημένη σε απόσταση ενός μέτρου, από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό κρίσιμης ασφάλειας ή κρίσιμου έργου.

(2) Μη μεταλλικά: 50V/m από 2 MHz έως 1 GHz

Μεταλλικά όρια εφαρμόζονται για όλες τις άλλες ζώνες συχνοτήτων. Οι πομποί εκούσιας ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται κάτω από το κατάστρωμα, πρέπει να περιορίζονται σε μέγιστη ισχύ των 100 milliwatt (mW) ισότροπης ακτινοβολουμένης ισχύος (EIRP). Η συνολική συνδυασμένη ισχύ που ακτινοβολείται μέσα σε ένα διαμέρισμα και εντός της ζώνης συχνοτήτων λειτουργίας θα πρέπει να περιορίζεται σε 13,75 W της συνολικά ακτινοβολουμένης ισχύος (TRP). Επιπλέον, καμία συσκευή δεν πρέπει να είναι μόνιμα εγκατεστημένη σε απόσταση ενός μέτρου, από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό κρίσιμης ασφάλειας ή κρίσιμου έργου.

β. Υποβρύχια

5V/m από 10 kHz έως 30 MHz και 10V/m από 30 MHz έως 18 GHz:

Οι πομποί εκούσιας ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται κάτω από το κατάστρωμα, πρέπει να περιορίζονται στη μέγιστη ισχύ των 25 milliwatt (mW) της ισότροπης ακτινοβολουμένης ισχύος (EIRP). Η συνολική συνδυασμένη ισχύς που ακτινοβολείται μέσα σε ένα χώρο και εντός της ζώνης συχνοτήτων λειτουργίας θα

πρέπει να περιορίζεται στα 250 mW συνολικά εκπεμπόμενης ισχύος (TRP). Επιπλέον, καμία συσκευή δεν πρέπει να εγκατασταθεί μόνιμα σε απόσταση ενός μέτρου από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό της κρίσιμης ασφάλειας ή του κρίσιμου έργου. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή των ηλεκτρικών πεδίων που δημιουργούνται κάτω από το κατάστρωμα με όλες τις κεραίες (στα πάνω και κάτω καταστρώματα) ακτινοβολίας και την τήρηση των ορίων της συνολικά εκπεμπόμενης ισχύος που αναγράφεται.

5.3.2.4.1 Απαίτηση

Πρέπει να επιβληθούν συγκεκριμένοι έλεγχοι για τον περιορισμό των εσωτερικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε εφαρμογές πλοίων, ώστε να εξασφαλισθεί ότι η ποικιλία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στα πλοία, θα είναι σε θέση να λειτουργήσει με περιορισμένο τον κίνδυνο της υποβάθμισης των επιδόσεων. Η προσέγγιση αυτή οφείλεται εν μέρει στην μεθοδολογία με την οποία ο εξοπλισμός έχει εγκατασταθεί σε πλοία. Για τις εφαρμογές του συστήματος, εκτός των πλοίων, είναι γενικά ευθύνη του φορέα που ολοκλήρωσε το σύστημα, να διασφαλισθεί ότι τα πεδία στο εσωτερικό του συστήματος ελέγχονται σε επίπεδα συμβατά με τα χαρακτηριστικά της ανοσίας του εγκατεστημένου εξοπλισμού.

Η χρήση ασύρματων συσκευών, όπως συστήματα αναγνώρισης ραδιοσυχνότητας (RFID), πομποδέκτες χειρός, ασύρματα τοπικά δίκτυα περιοχής (WLAN), κλπ, αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς, για τις εφαρμογές κάτω από το κατάστρωμα. Εφόσον κάτω από το κατάστρωμα οι χώροι είναι ανακλαστικοί, περιέχουν και αντανακλούν την εκπεμπόμενη RF ενέργεια. Η διάδοση των ραδιοσυχνοτήτων στους χώρους αυτούς είναι σαφώς καθορισμένη στο πρότυπο MIL-STD-461F [11], στο RS-103 (radiated susceptibility, electric field, 2 MHz to 40 GHz) με τις διαδικασίες εναλλακτικών δοκιμών, που περιγράφουν το χαρακτηρισμό και τη χρήση των Θαλάμων Αντανάκλασης (Reverberation Chambers) ως εγκαταστάσεις δοκιμών EMI. Κατά συνέπεια η διάδοση των εκούσιων εκπομπών, καταλήγει σε ένα αυξημένο EME. Αυτή η αύξηση του EME, έχει αναγνωρισθεί ως η αιτία των παρεμβολών σε κρίσιμο συμβατικό εξοπλισμό αποστολών. Η άμβλυση της EMI απαιτεί ότι τα πλοία και τα υποβρύχια να υπολογίζονται ως ένα συνολικό σύστημα, που αποτελείται από πολλά υπο-συστήματα. Κατά συνέπεια, απαιτούνται οι έλεγχοι της διεπαφής, για την εξασφάλιση της EMC του συνολικού συστήματος. Η απαίτηση αυτή έχει σκοπό να περιορίσει το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον όπως η EMI, τόσο από τον άμεσο φωτισμό, όσο και από την ενέργεια αντανάκλασης, που δεν υπερβαίνει την απαίτηση (σύμφωνα με το πρότυπο MIL-STD-461) της ευαισθησίας του ηλεκτρικού πεδίου που ακτινοβολείται και ως εκ τούτου, ο εξοπλισμός που βρίσκεται μέσα σε αυτό το περιβάλλον θα λειτουργεί αξιόπιστα και χωρίς προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (E3).

Πολλοί τύποι ηλεκτρονικών συσκευών χρησιμοποιούνται σε πλοία, οι οποίοι δεν έχουν σχεδιασθεί να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλον με υψηλότερα επίπεδα ηλεκτρικού πεδίου. Οι δεσπόζοντες τύποι σε αυτή την ομάδα, είναι τα είδη NDI και οι

συσκευές εμπορικής προέλευσης. Ως εκ τούτου, το EME πρέπει να ελέγχεται για να παρέχει ένα επίπεδο βεβαιότητας ότι ο εξοπλισμός θα λειτουργεί σωστά.

Τα όρια ισχύος εξόδου των 25 και 100 mW EIRP, για ένα απλό πομποδέκτη σε υποβρύχια και πλοία αντίστοιχα, χρησιμοποιούνται στο πρότυπο MIL-STD-464C [13]. Τα όρια αυτά εξασφαλίζουν την αξιόπιστη λειτουργία του συμβατικού εξοπλισμού. Δεδομένου ότι αυτές οι συμβατικές συσκευές δοκιμάστηκαν σε 1 V/m για εφαρμογές υποβρυχίου και σε 10 V/m για πλοία επιφανείας, είναι αναγκαίο να θεσπιστούν κριτήρια για κάθε περίπτωση. Η εξίσωση 5.1, χρησιμοποιήθηκε για να προβλέψει τις προκύπτουσες εντάσεις πεδίου, για κάθε μία περίπτωση, σε απόσταση ενός μέτρου. Στην περίπτωση των υποβρυχίων, τα 25 mW EIRP θα παράγουν μία ένταση ηλεκτρικού πεδίου των 0,87 V/m, που ευθυγραμμίζεται και με τη δοκιμή 1 V/m που έγινε, για τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις του MIL-STD-461F [11]. Δεδομένου ότι ο εξοπλισμός του πλοίου επιφανείας, ελέγχθηκε σύμφωνα με το MIL-STD-461F στα 10 V/m με όλα τα σημεία χειρισμού (κονσόλες) εξοπλισμού ασφαλισμένα και πολλά από τα ασύρματα συστήματα, όπως αυτά των δικτύων WLAN να είναι σε συνεχή μετάδοση, κρίνεται απαραίτητο να ληφθεί υπόψη για το περίβλημα/κονσόλα η αποτελεσματικότητα της θωράκισης (SE). Αυτή η SE μπορεί να εκτιμηθεί περίπου στα 15 dB, το οποίο σημαίνει ότι τα ηλεκτρονικά μέσα δεν πρέπει να εκτεθούν σε περισσότερα από 2 V/m, όταν οι κονσόλες/περιβλήματα είναι ανοιχτά. Κατά συνέπεια, ένα όριο για τα πλοία επιφανείας που προτείνεται, είναι τα 100 mW, το οποίο θα οδηγήσει σε μια έκθεση του 1,7 V/m με καθόλου εξωτερική θωράκιση.

$$|E| = \frac{1}{2r} \sqrt{\eta G_t P_t} / \pi \quad (\text{Εξ. 5.1})$$

Όπου:

$|E|$ = πυκνότητα ηλεκτρικού πεδίου, σε V/m

G_t = κέρδος εκπομπής κεραίας

P_t = ισχύς πομποδέκτη

r = απόσταση από την κεραία εκπομπής, σε μέτρα ($r = 1$ m)

η = μέση αντίσταση, σε ohms ($\eta = 377 \Omega$)

Κατά την εξέταση της πρόσθετης ιδιοσυστασίας των πομπών μέσα σε ηλεκτρικά κλειστούς αντανάκλαστικούς χώρους, πρέπει κανείς να εξετάσει την ολική ακτινοβολούμενη ισχύ (TRP) αντί της EIRP. Αυτό οφείλεται στη διάχυση της εκπεμπόμενης ενέργειας λόγω των ανακλάσεων. Κάθε κέρδος (κατευθυντικότητα) που προσδίδεται στην εκπεμπόμενη ενέργεια, χάνεται σε τέτοιους χώρους λόγω της φύσης αντανάκλασής τους. Αυτό είναι κατανοητό και τεκμηριωμένο στην εναλλακτική μεθοδολογία δοκιμών του Θαλάμου Αντανάκλασης, που περιγράφεται στο MIL-STD-461F. Η χρησιμότητα της χρήσης TRP στη συνέχεια, είναι να υπολογίσει

ογκομετρικά (δηλαδή, non-line-of-sight) τα επίπεδα ηλεκτρικού πεδίου σε κλειστούς χώρους.

Εφαρμογές Υποβρυχίων:

Η απαίτηση των 250 mW TRP, για πολλαπλούς πομπούς σε ένα χώρο, είναι μία προσπάθεια να ελεγχθεί το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο, μέσα στον ιδιαίτερο χώρο (διαμέρισμα) και χρησιμοποιήθηκε για το πρότυπο MIL-STD-464C. Ένας χώρος, ορίζεται ως μια λειτουργική περιοχή μέσα σε ένα διαμέρισμα [π.χ. ο χώρος εξοπλισμού ηχητικού εντοπισμού αντικειμένων (Sonar) ή ο χώρος τορπιλών (Torpedo)]. Τα 250 mW TRP, ισοδυναμούν με μία ογκομέτρηση έντασης ηλεκτρικού πεδίου 6,75 V/m. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου των 6,75 V/m, ευθυγραμμίζεται με την απαίτηση ευαισθησίας [σύμφωνα με τη δοκιμή RS103 (radiated susceptibility, electric field, 2 MHz to 40 GHz), του προτύπου MIL-STD-461F] του ηλεκτρικού πεδίου που ακτινοβολείται, με 3,4 dB περιθώριο ασφαλείας και επιτρέπει τη διακύμανση στο συντελεστή βαθμονόμησης της κοιλότητας συντονισμού. Αυτό το επίπεδο ισχύος υπολογίστηκε ως εξής:

$$P_{in} \approx (E/ccf)^2 \quad (\text{Εξ. 5.2})$$

Όπου:

P_{in} = ισχύς εκπομπού, σε watts

E = πυκνότητα ηλεκτρικού πεδίου, σε V/m

ccf = συντελεστής διόρθωσης κοιλότητας συντονισμού, που υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$ccf = (8\pi/(\lambda\sqrt{5IL}))/n_{rx} \quad (\text{Εξ. 5.3})$$

Όπου:

λ = μήκος κύματος, σε μέτρα

η_{rx} = αποδοτικότητα κεραίας

IL = εισαγόμενη απώλεια που υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$IL = (P_{rcvd})/P_{in} \quad (\text{Εξ. 5.4})$$

Όπου:

P_{rcvd} = ληφθείσα ισχύ, σε watts

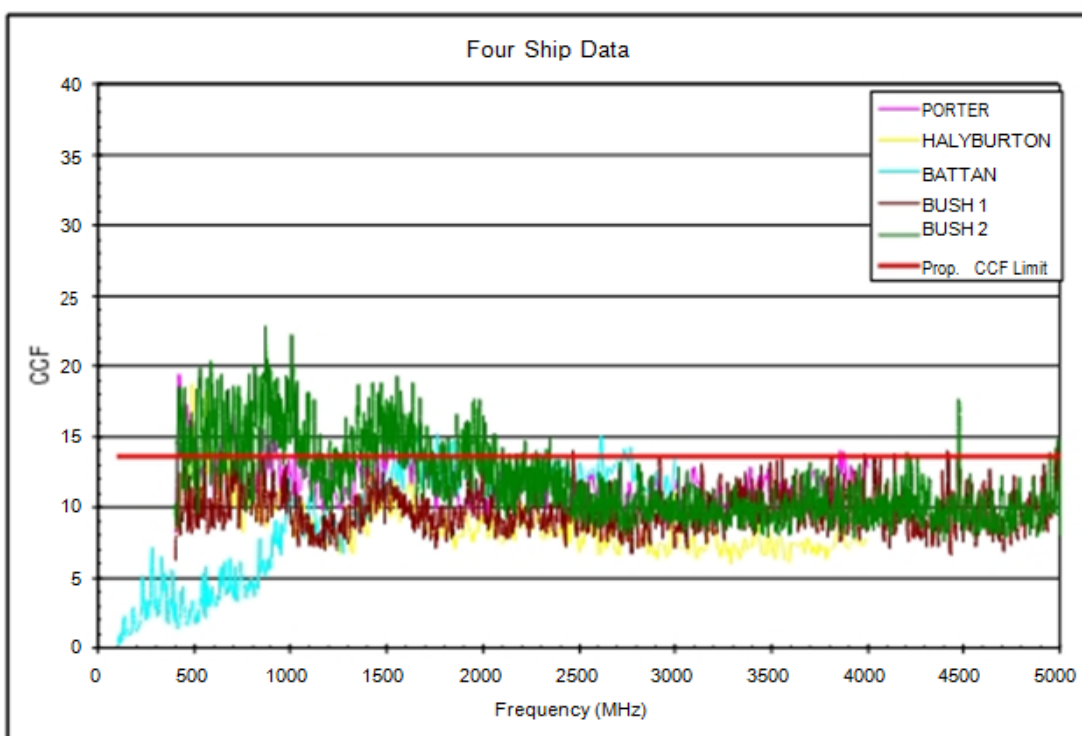
P_{in} = προσπίπτουσα ισχύ μέσα στην κοιλότητα, σε watts

Ένας συντελεστής διόρθωσης της κοιλότητας συντονισμού ccf του 13,5, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της μέγιστης συνολικής ισχύος εισόδου στο

διαμέρισμα του υποβρυχίου.

Εφαρμογές Πλοίων Επιφανείας:

Τα τελευταία χρόνια οι NAVSEA, NAVSUP και ONR παρέχουν συλλογικά πόρους, για να διεξαχθεί η μελέτη για τη φύση αντανάκλασης των χώρων κάτω από το κατάστρωμα σε πλοία του Ναυτικού. Η μελέτη διεξήχθη σε δέκα πλοία διαφόρων κατηγοριών (CVN, LHD, DDG και FFG) και συγκεντρώθηκαν δεδομένα για πάνω από 100 χώρους. Η εξίσωση 5.2 χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορίσει μια συνθήκη οριοθέτησης CCF από τα μετρήσιμα δεδομένα απωλειών εισόδου. Λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων που συλλέχθηκαν, μόνο τα τέσσερα πλοία που παρήγαγαν τις υψηλότερες τιμές CCF φαίνονται στο Σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1: CCF των Επιλεγέντων Πλοίων Επιφανείας

Επίσης αυτό που παρέχεται στο Σχήμα 5-1, είναι το προτεινόμενο όριο CCF 13,5, το οποίο ισοδυναμεί με ένα όριο TRP των 548 mW. Είναι εύκολα εμφανές, ότι το προτεινόμενο όριο δεν περιλαμβάνει όλα τα μετρούμενα δεδομένα. Ωστόσο, ταιριάζει καλά στις βιομηχανικές, επιστημονικές και ιατρικές (ISM) ζώνες στα 900 MHz και 2400 MHz και είναι πάνω από την συντριπτική πλειοψηφία του συνόλου των δεδομένων που μετρήθηκαν πάνω από 2000 MHz. Με βάση αυτή την ανάλυση, η άποψη του Ναυτικού είναι ότι η σύσταση της αύξησης της τομής 13,5 του CCF, θα είναι υπερβολικά περιοριστική και ότι ο κίνδυνος της EMI θα αμβλυνηθεί επαρκώς μέσω ενός ορίου TRP των 550 mW. Μια σύνοψη των συστάσεων αυτών παρέχεται στον Πίνακα 5-2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5- 2: Σύνοψη των Συστάσεων

Πλατφόρμα	Stand Off ¹	Max. EIRP ²	Max. TRP ³
Υποβρύχιο	1 m	25 mW	250 mW
Πλοίο επιφανείας	1 m	100 mW	550 mW

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

1. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ της πηγής μετάδοσης και του κρίσιμου ηλεκτρονικού εξοπλισμού ασφάλειας ή αποστολής.
2. Η μέγιστη EIRP από μία μόνο συσκευή.
3. Η μέγιστη TRP όλων των συσκευών σε έναν ενιαίο χώρο. Σε περιπτώσεις όπου τα όρια χώρου δεν είναι σαφώς καθορισμένα, μια ακτίνα 30 ποδίων από την πηγή μετάδοσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία του ορίου.

Προβλήματα συμβατότητας έχουν διαπιστωθεί σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό, που οφείλεται σε ανεπαρκή έλεγχο της σύζευξης πεδίου που συμβαίνει κάτω από το κατάστρωμα. Μέχρι σήμερα, το Πολεμικό Ναυτικό έχει περιορισμένο αριθμό τεκμηριωμένων περιπτώσεων, στις οποίες η εφαρμογή ενός ασύρματου συστήματος έχει προκαλέσει EMI στις πλατφόρμες. Ωστόσο, τεκμηριωμένες περιπτώσεις υπάρχουν για ένα ασύρματο τοπικό σύστημα δικτύου, που έχει εγκατασταθεί σε σύνθετα σκάφη. Τα εξαρτήματα του συστήματος έχουν αποτυπωθεί στις προδιαγραφές του προτύπου MIL-STD-461F και μέχρι στιγμής, έχουν προκαλέσει την EMI υποβάθμιση της αποστολής, στα συμβατικά κρίσιμα συστήματα μάχης πάνω σε αυτές τις πλατφόρμες. Τόσο η πολύπλοκη κοιλότητα, όσο και οι απ' ευθείας LOS μηχανισμοί, έχει προσδιοριστεί ότι συμβάλλουν σε αυτά τα προβλήματα EMI.

Ένα θεμελιώδες θέμα εντός του Πολεμικού Ναυτικού, προκύπτει από τον όγκο των χρηστών ασύρματης τεχνολογίας και των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται. Τα πλοία είναι επανδρωμένα με εκατοντάδες και σε ορισμένες περιπτώσεις, με χιλιάδες ναύτες, όπου στον καθένα, έχουν ανατεθεί τομείς αρμοδιοτήτων, οι οποίοι έχουν μοναδικές και σε πολλές περιπτώσεις, συγκρουόμενες απαιτήσεις για τις ασύρματες τεχνολογίες. Αν αφεθούν ανεξέλεγκτοι, υπάρχει η πιθανότητα ένας ευρύς αριθμός ασύρματων δικτύων να απαιτηθεί, για να εξυπηρετηθούν οι σύνθετες ανάγκες του πλοίου. Αυτή η κατάσταση θα έχει ως αποτέλεσμα όχι μόνο τις ανησυχίες για την ασφάλεια από την EMI και HERO προοπτική, αλλά και την πρόκληση συγκρούσεων φάσματος το οποία θα υποβαθμίσουν την συνολική απόδοση του πλοίου. Σκοπός είναι το Πολεμικό Ναυτικό, να προηγηθεί των εξελίξεων και των προκλήσεων της ασύρματης διάδοσης, από τη σκοπιά του σχεδιασμού της πλατφόρμας, μέσω της εφαρμογής ενός γενικού ορίου για τον αριθμό και τη θέση των ασύρματων συσκευών, ώστε να εξασφαλισθεί η ασύρματη λειτουργικότητα σε ένα σύστημα περιβάλλοντος συστημάτων.

Η απαίτηση για μεμονωμένους πομπούς και η απαίτηση για συνολικό συνδυασμό ισχύος είναι απαραίτητες για να οριοθετήσουν τα επίπεδα των ηλεκτρικών πεδίων, σε χώρους κάτω από το κατάστρωμα. Τα όρια αυτά εναρμονίζονται με το όριο ευαισθησίας του ακτινοβολούμενου ηλεκτρικού πεδίου, σύμφωνα με τη δοκιμή RS103 (radiated susceptibility, electric field, 2 MHz to 40 MHz) του MIL-STD-461F. Η τήρηση των ορίων αυτών, διασφαλίζει ότι τα συστήματα που είναι συμβατά με τη RS103, θα είναι συμβατά με τα επιδιωκόμενα περιβάλλοντά τους και οι μελλοντικές αυξήσεις στα επίπεδα του RS103 δε θα είναι απαραίτητες.

5.3.2.4.2 Διακρίβωση

Η δοκιμή είναι η μόνη αξιόπιστη μέθοδος, για τον προσδιορισμό του συζευγμένου EME, με ένα εύλογο επίπεδο βεβαιότητας. Η απαίτηση για τους πομπούς εκούσιας ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται κάτω από το κατάστρωμα, μπορούν να καλυφθούν από την ανάλυση ή εξέταση.

Σημαντική απόδοση των χαρακτηριστικών των χώρων κάτω από το κατάστρωμα, έχει πραγματοποιηθεί. Οι προσπάθειες αυτές οδήγησαν στη δυνατότητα εφαρμογής ελέγχων, που περιορίζουν το περιβάλλον ηλεκτρικό πεδίο που βασίζεται στην ισχύ. Κατά συνέπεια η διακρίβωση απλοποιείται, στην παρακολούθηση του αριθμού και της ισχύος εξόδου των πομπών, οι οποίοι έχουν εγκατασταθεί εντός των συγκεκριμένων χώρων.

Οι δοκιμές πρέπει να εκτελεστούν με δέκτες επιλεκτικών συχνοτήτων (αναλυτή φάσματος ή EMI δέκτης) και κατάλληλες κεραίες όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες δοκιμής RE102 (radiated emissions, electric field, 10 KHz to 18 GHz) του προτύπου MIL STD-461F. Η λειτουργία που αναδύει τεχνικές είναι η προτιμώμενη μέθοδος για την διακρίβωση αυτής της απαίτησης. Ευρυζωνικοί κατευθυντικοί αισθητήρες ηλεκτρικού πεδίου, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες ελέγχου της δοκιμής RS103 του παραπάνω προτύπου, μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αναζήτηση περιοχών υψηλότερων πεδίων. Δεδομένου ότι αυτές οι συσκευές είναι ευρυζωνικές, θα ανιχνεύουν την προκύπτουσα ένταση του ηλεκτρικού πεδίου από όλες τις πηγές που βρίσκονται εντός της ζώνης διέλευσης της συσκευής. Η κυρίαρχη πηγή της παρακολούθησης των ενδείξεων, μπορεί να μην είναι προφανής. Επίσης, δεδομένου ότι αυτές οι συσκευές δεν χρησιμοποιούν τη λειτουργία ανίχνευσης αιχμής, που εμφανίζεται σε αναλυτές φάσματος και EMI δέκτες, τα εμφανιζόμενα επίπεδα μπορεί να είναι πολύ χαμηλότερα από τα πραγματικά επίπεδα αιχμής, ιδιαίτερα για παλμικά πεδία.

Ο έλεγχος των εξόδων μεμονωμένων πομπών και η συνολική συνδυασμένη ισχύς που ακτινοβολείται μέσα σε ένα ιδιαίτερο χώρο και εντός της ζώνης συχνοτήτων λειτουργίας, είναι το μόνο επωφελέ μέσο για τον έλεγχο του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται από τις στρατιωτικές υπηρεσίες είναι πιστοποιημένες από τις διάφορες θεσμικές επιτροπές προτύπων όπως Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή, η Ομοσπονδιακής Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας κτλ. Κάθε μία από αυτές τις επιτροπές προτύπων, αναγνωρίζει το όφελος της χρήσης του

Θαλάμου Αντανάκλασης, για τέτοιες αξιολογήσεις. Αφού η φύση ενός τέτοιου Θαλάμου, είναι η ίδια με οποιοδήποτε ηλεκτρικά κλειστό αντανάκλαστικό χώρο, είναι πιο σκόπιμο να αξιοποιηθεί αυτή η χρήση, για τους σκοπούς της μείωσης της EMI σε χώρους κάτω από το κατάστρωμα των υποβρυχίων και πλοίων.

Σημαντική προσπάθεια καταβλήθηκε για τη δημιουργία αυτών των απαιτήσεων, προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι δεν εφαρμόστηκαν αδικαιολόγητα εμπόδια, τα οποία θα κατέστειλαν τη χρήση ή την εφαρμογή των ασύρματων τεχνολογιών, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα στο μέγιστο δυνατό βαθμό, ότι τέτοιες εφαρμογές δεν θα δημιουργήσουν EMI, στον εξοπλισμό που είναι εγκατεστημένος στον ίδιο χώρο.

5.3.2.5 Φαινόμενο Multipaction

Οι διαστημικές εφαρμογές, ο εξοπλισμός και τα υποσυστήματα, θα πρέπει να είναι απαλλαγμένα από τα αποτελέσματα του φαινομένου multipaction. Το φαινόμενο αυτό είναι η υποβάθμιση των εκπεμπόμενων σημάτων ή διακοπή λειτουργίας των ηλεκτρονικών συσκευών, από την επίδραση ηλεκτρονίων στις επιφάνειες, λόγω συσσώρευσης πολλών ηλεκτρονίων στο κενό εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή και ανάλυση.

5.3.2.5.1 Απαίτηση

Είναι σημαντικό ότι ο εξοπλισμός εκπομπής RF και τα σήματα, δεν πρέπει να υποβαθμίζονται από τη δράση του φαινομένου multipaction. Είναι ουσιώδες το υπόψη φαινόμενο, να μην καταλήγει σε παρασιτικά σήματα που παρεμβαίνουν στους δέκτες.

Το φαινόμενο Multipaction είναι μια συντονισμένη RF επίδραση, που συμβαίνει σε ένα υψηλό κενό. Ένα πεδίο RF επιταχύνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που προκύπτουν από τις συγκρούσεις με τις επιφάνειες, δημιουργώντας δευτερογενή ηλεκτρόνια. Εάν η συχνότητα του σήματος είναι τέτοια, ώστε το πεδίο RF αλλάζει πολικότητα σε συντονισμό με την παραγωγή των δευτερογενών ηλεκτρονίων, τα δευτερογενή ηλεκτρόνια τότε επιταχύνονται, με αποτέλεσμα περισσότερα ηλεκτρόνια, που οδηγούν σε μια σημαντική εκφόρτιση και πιθανή βλάβη του εξοπλισμού. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να είναι πολύ χειρότερο, παρουσία χαμηλής μερικής πίεσης Paschen (η τάση διάσπασης ενός αερίου μεταξύ δύο ηλεκτροδίων και η δημιουργία ηλεκτρικού τόξου, συναρτήσει της πίεσης και της απόστασης), ελάχιστων αερίων, όπως το ήλιο. Ο εξαερισμός του ηλίου κατά τη διάρκεια της ανόδου, είναι κοινός για τα αναλώσιμα οχήματα εκτόξευσης (ELVs).

Οι σύνδεσμοι, τα καλώδια και οι κεραίες, έχουν αντιμετωπίσει multipaction περιστατικά. Μερικές φορές, η εφαρμογή των μονωτήρων για τις κεραίες ή οι οπές εξαερισμού σε συνδέσμους, είναι επαρκείς για να περιορίσουν το φαινόμενο multipaction ή τη βλάβη. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η εκπεμπόμενη ισχύς του σήματος έχει επηρεασθεί σε σημαντικό βαθμό. Το φαινόμενο Multipaction στη

διάταξη κυκλωμάτων του ενισχυτή RF, έχει εμπλακεί την υποβάθμιση των ημιαγωγών και του μονωτή.

5.3.2.5.2 Διακρίβωση

Το Multipaction είναι ένα φαινόμενο συντονισμού στις διαστάσεις της συχνότητας και ισχύος. Η εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων μειώνεται, καθώς η ενέργεια των ηλεκτρονίων αυξάνεται. Συνεπώς, η ταχεία αύξηση της ισχύος (για παράδειγμα, ένας παλμός ραντάρ) δύναται επίσης να μειώσει την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου multipaction. Η ανάλυση είναι απολύτως απαραίτητη, να καθορισθεί πόσο περιθώριο παρουσιάζεται. Αφού το φαινόμενο multipaction μπορεί να δείξει τις αδυναμίες στον μηχανικό εξοπλισμό και τα διηλεκτρικά υλικά, που καμία άλλη δοκιμή δεν δύναται να δείξει, οι δοκιμές επίσης πρέπει να εκτελεσθούν.

Όλα τα εξαρτήματα που υφίστανται τα επίπεδα RF άνω των 5 watts (λιγότερο σε περιβάλλον διαστήματος), πρέπει να ελέγχονται για το φαινόμενο του multipaction. Ο εξοπλισμός δοκιμών πρέπει να παρέχει επαρκή ισχύ και μεταβατικά επίπεδα για να δείξει το περιθώριο σε σχέση με την κατάσταση λειτουργίας. Οι μετρήσεις VSWR, παρέχουν μία αδέξια μέθοδο ανίχνευσης του φαινομένου multipaction. Ωστόσο, είναι καλύτερα να ανιχνεύονται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ή οι αλλαγές στις εκπομπές αρμονικών.

Για να συμβεί το φαινόμενο του multipaction, αναπαραγόμενα (seed) ηλεκτρόνια, πρέπει να εμφανίζονται. Στο διάστημα, αυτά τα ηλεκτρόνια παρέχονται από την ακτινοβολία. Μερικές δοκιμές στο επίπεδο της θάλασσας, δεν έχουν δείξει την εμφάνιση του φαινομένου multipaction στα εξαρτήματα, ενώ σοβαρά περιστατικά multipaction συμβαίνουν στην τροχιά. Είναι ζωτικής σημασίας η πηγή της ακτινοβολίας ή τα ηλεκτρόνια που παρέχονται, να υποστούν μια δοκιμή ακριβείας. Υπάρχει μία θεωρία ότι ορισμένα μέταλλα όπως το αλουμίνιο έχουν τη δυνατότητα της αυτο-αναπαραγωγής. Ωστόσο, δεδομένου ότι το αποτέλεσμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιφανειακή επεξεργασία, το αλουμίνιο δεν θα πρέπει να εξαρτάται από τη δυνατότητα της αυτο-αναπαραγωγής.

5.3.2.6 Επαγωγικά Επίπεδα στις Υποδοχές των Κεραιών των Δεκτών

Τα επαγωγικά επίπεδα που προκαλούνται στις υποδοχές των κεραιών, που είναι συνδεδεμένες με δέκτες και τα οποία προκαλούνται από ακούσιες εκπομπές ραδιοσυχνοτήτων (RF) εξοπλισμού και υποσυστημάτων, θα πρέπει να ελέγχονται αναφορικά με την καθορισμένη ευαισθησία του δέκτη, έτσι ώστε οι απαιτήσεις της λειτουργικής απόδοσης να πληρούνται. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με μετρήσεις σε υποδοχές κεραιών των δεκτών, σε ολόκληρη τη ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας τους.

5.3.2.6.1 Απαίτηση

Η ανάγκη για την αξιολόγηση κεραιών που συνδέονται με τους δέκτες, στο φάσμα λειτουργίας τους, είναι σημαντική για τη σωστή αξιολόγηση. Ήταν κοινή πρακτική στο παρελθόν, να ελέγχονται μερικά κανάλια του δέκτη και να εξάγεται το συμπέρασμα ότι δεν υπήρξε καμία παρεμβολή. Αυτή η πρακτική δεν ήταν παράλογη στο παρελθόν, όταν μεγάλο μέρος της δυνητικής παρεμβολής ήταν ευρυζωνικό στη φύση, όπως ο θόρυβος βούρτσας (brush) των κινητήρων. Ωστόσο, με τις κυματομορφές που σχετίζονται με τη σύγχρονα κυκλώματα, όπως τα ρολόγια μικροεπεξεργαστή και τα κυκλώματα διακοπής και παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, η μεγαλύτερη πιθανότητα για την εμφάνιση προβλημάτων είναι τα εξαρτήματα στενής φασματικής ζώνης αυτών των σημάτων να παρεμβάλουν τους δέκτες. Ως εκ τούτου, είναι κοινή πρακτική να παρακολουθούνται όλες οι έξοδοι των συνδεδεμένων κεραιών με εξοπλισμό ανάλυσης φάσματος κατά τη διάρκεια δοκιμής EMC στο ενδοσύστημα. Η ανάλυση των ληφθέντων επιπέδων είναι απαραίτητη, να τον προσδιορισμό της προοπτικής υποβάθμισης του συγκεκριμένου δέκτη.

Ακούσιες ακτινοβολούμενες εκπομπές που συζευγνύονται με τις κεραίες, δύνανται να είναι πάνω από το επίπεδο θορύβου των δεκτών, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των επιδόσεων. Για να επιτευχθεί η αξιόπιστη επικοινωνία, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR), θα πρέπει να υπερβαίνει μία ελάχιστη τιμή, ειδική για κάθε τύπο διαμόρφωσης και σήματος. Για παράδειγμα, οι δέκτες που χρησιμοποιούν διαμόρφωση πλάτους (AM) για μεταδόσεις φωνής, συνήθως απαιτούν ένα ελάχιστο SNR των 10 decibels (dB), στο καθορισμένο επίπεδο ευαισθησίας τους. Η δυαδική διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (BPSK) γίνεται συχνά άχρηστη, όταν το SNR πέσει κάτω από 4 dB. Ανεπιθύμητα σήματα στη ζώνη των δεκτών, μπορούν να μειώσουν δραματικά το εύρος των γραμμών επικοινωνίας ή να αυξήσουν την πιθανότητα απώλειας πληροφοριών, μέσω συνδέσεων δεδομένων.

Προβλήματα συμβατότητας και απόδοσης έχουν συχνά ανιχνευθεί στα συστήματα δεκτών, που οφείλονται σε ανεπαρκή έλεγχο των ακτινοβολούμενων εκπομπών του ενδοσυστήματος από τον εξοπλισμό και τα υποσυστήματα.

5.3.2.6.2 Διακρίβωση

Οι μετρήσεις σε επίπεδο συστήματος για την παραγωγή διαμορφωμένου υλικού και σχετικών αναλύσεων, είναι αποτελεσματικά μέσα για τη διακρίβωση της απόδοσης του δέκτη.

Οι μετρήσεις πρέπει να εκτελούνται με έναν αναλυτή φάσματος (ή ισοδύναμου τύπου εξοπλισμού επιλεκτικής συχνότητας) στην υποδοχή της κεραίας των δεκτών, για ολόκληρη τη ζώνη συχνοτήτων της λειτουργίας του δέκτη έναντι όλων των δυνητικών πηγών των ακούσιων εκπομπών, για να καθορισθεί η επίδραση σε σχέση με την ευαισθησία του δέκτη. Τα επαγόμενα επίπεδα στους δέκτες πρέπει να προσδιορίζονται και να ποσοτικοποιούνται, ώστε ενδεχόμενη υποβάθμιση, να δύναται να αξιολογηθεί μέσω ανάλυσης.

Η πιο κοινή υποβάθμιση δέκτη που ανιχνεύεται, είναι από τις αρμονικές του ρολογιού του μικροεπεξεργαστή, που ακτινοβολούνται από την καλωδίωση. Τα σήματα αυτά είναι στενής ζώνης και σταθερά σε συχνότητα. Λαμβάνοντας υπόψη ένα δέκτη που έχει σχεδιασθεί για να λαμβάνει σήματα διαμορφωμένα κατά πλάτος (AM), υπάρχουν πολλές αποκρίσεις που μπορεί να παρατηρηθούν. Παρόμοια ανάλυση είναι εφαρμόσιμη σε άλλου τύπου δεκτών.

Εάν ένα εκούσιο σήμα πάνω από τη φίμωση παρουσιασθεί, το είδος της υποβάθμισης εξαρτάται από τη θέση του σήματος παρεμβολής σε σχέση με το φέρων. Εάν το σήμα παρεμβολής, βρίσκεται μέσα σε λίγες εκατοντάδες hertz του φέροντος, η κύρια επίπτωση θα είναι μάλλον μια αλλαγή στο επίπεδο αυτόματου ελέγχου κέρδους (AGC) του δέκτη. Εάν το σήμα παρεμβολής είναι αρκετά μακριά από το φέρων, για να ανταγωνισθεί με την ενέργεια της πλευρικής ζώνης, τότε πολύ πιο σοβαρή υποβάθμιση μπορεί να συμβεί. Η κατάσταση αυτή δίνει το καλύτερο παράδειγμα, στο να αιτιολογήσει το λόγο που η διακοπή της φίμωσης, δεν αποτελεί επαρκές κριτήριο αποτυχίας. Οι δέκτες AM, αξιολογούνται συνήθως για τις απαιτούμενες επιδόσεις, χρησιμοποιώντας ένα 30%-AM, 1-kHz τόνο, ο οποίος θεωρείται ότι έχει την ίδια καταληπτότητα για έναν ακροατή, όπως η τυπική 80% AM διαμόρφωση φωνής. Η συνολική ισχύς στις πλευρικές ζώνες είναι περίπου 13 dB κάτω από το επίπεδο του φέροντος. Οι προδιαγραφές του δέκτη, επίσης απαιτούν συνήθως 10 dB λόγο σήματος (με θόρυβο) προς θόρυβο κατά τη διάρκεια των αποδείξεων ευαισθησίας. Ως εκ τούτου, για ένα σήμα παρεμβολής το οποίο ανταγωνίζεται με τις πλευρικές ζώνες, για να μην παρεμβαίνει στην απόδοση του δέκτη, θα πρέπει να είναι περίπου 23 dB κάτω από τα φέρων. Μία επίδραση αυτού του συμπεράσματος είναι, ότι ένα σήμα παρεμβολής που είναι πολύ πιο κάτω από τη διακοπή φίμωσης, μπορεί να προκαλέσει σημαντικό βαθμό υποβάθμισης σε ένα δέκτη. Αν η διακοπή φίμωσης αντιπροσωπεύει την αληθινή ευαισθησία που απαιτείται για την εκτέλεση της αποστολής, ένα σήμα παρεμβολής ακριβώς κάτω από τη διακοπή φίμωσης μπορεί να προκαλέσει μια απώλεια πάνω από 90% στο πιθανό εύρος.

Εάν δεν παρουσιάζονται εκούσια σήματα και η αρμονική του ρολογιού δεν έχει οποιαδήποτε AM διαμόρφωση, που σχετίζεται με αυτή, το κύριο αποτέλεσμα είναι μία χωρίς θόρυβο ακουστική έξοδος του δέκτη, που οφείλεται στη δράση του AGC. Για έναν παρατηρητή, το αποτέλεσμα αυτό θα μπορούσε πραγματικά φαίνεται ως βελτίωση της απόδοσης του δέκτη. Αν κάποια AM διαμόρφωση παρουσιασθεί σε ακουστικές συχνότητες της ζώνης διέλευσης, ένα σήμα θα είναι προφανές ότι εξαρτάται από την ένταση της AM διαμόρφωσης. Ωστόσο, ο βαθμός υποβάθμισης του δέκτη δεν δύναται να αξιολογηθεί αποτελεσματικά, δεδομένου ότι καλύπτεται από τον AGC.

Δύο αποδεκτές μέθοδοι αξιολόγησης της υποβάθμισης είναι εμφανείς. Ένα 30% AM σήμα μπορεί να ακτινοβολείται σε κάθε κανάλι ενδιαφέροντος σε ένα επαγόμενο επίπεδο στο δέκτη που αντιστοιχεί στην ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση. Οι αλλαγές στην καταληπτότητα μπορούν να αξιολογηθούν με και χωρίς την παρουσία

παρεμβολής. Επίσης, το επίπεδο της πηγής του σήματος μπορεί να μεταβάλλεται και τα προκύπτοντα αποτελέσματα να αξιολογούνται. Λόγω του μεγάλου αριθμού των καναλιών σε πολλούς δέκτες [δέκτες UHF (225 - 400 MHz) έχουν τυπικά 7.000 κανάλια], η τεχνική αυτή μπορεί συχνά να μην είναι πρακτική. Μία αυξανόμενη δημοφιλής προσέγγιση είναι να παρακολουθούνται τα επαγόμενα επίπεδα σήματος της κεραίας με ένα αναλυτή φάσματος ή έναν αναλυτή φάσματος σε πραγματικό χρόνο, που μπορεί να καταγράψει μια ενιαία καταγραφή RF συχνοτήτων. Ένας προενισχυτής είναι συνήθως απαραίτητος, για να βελτιωθεί η εικόνα θορύβου του αναλυτή και να αποκτήσει επαρκή ευαισθησία. Τα ληφθέντα επίπεδα μπορεί στη συνέχεια να αξιολογηθούν εύκολα για πιθανή υποβάθμιση δεκτών. Αυτή η τεχνική έχει βρεθεί να είναι πολύ αποτελεσματική.

5.3.3 Εξωτερικό RF EME

Το σύστημα πρέπει να είναι ηλεκτρομαγνητικά συμβατό με το καθορισμένο εξωτερικό RF EME του, προκειμένου οι απαιτήσεις της λειτουργικής απόδοσης του, να πληρούνται. Σύμφωνα με το MIL-STD-464C [13] έχουν καθορισθεί ανάλογοι Πίνακες με τα σχετικά EME λειτουργίας. Ο Πίνακας 5-3 πρέπει να χρησιμοποιείται για εργασίες καταστρώματος σε πλοία του Ναυτικού και ο Πίνακας 5-4 θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τις λειτουργίες των πλοίων του Ναυτικού στον κύριο λοβό των πομπών. Για εφαρμογές διαστημικών συστημάτων και οχημάτων εκτόξευσης, αντιστοιχεί ο Πίνακας 5-5. Για τα συστήματα εδάφους, πρέπει να χρησιμοποιείται ο Πίνακας 5-6. Για αεροσκάφη περιστροφικής πτέρυγας, όπου οι επιχειρήσεις των πλοίων επιφανείας εξαιρούνται, αντιστοιχεί ο Πίνακας 5-7. Για χρήσεις αεροσκαφών με σταθερά πτερύγια, όπου οι επιχειρήσεις πλοίων επιφανείας αποκλείονται, χρησιμοποιείται ο Πίνακας 5-7. Για τα μη επανδρωμένα αεροχήματα, πρέπει να πληρούνται οι απαιτήσεις των υπόψη πινάκων, όσον αφορά την αντίστοιχη εφαρμογή τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3: Μέγιστο Εξωτερικό EME για Λειτουργίες Καταστρώματος σε Πλοία του Πολεμικού Ναυτικού

Εύρος συχνοτήτων		Καταστρώματα Πτήσεων (Flight Decks)		Καταστρώματα (Weather Decks)	
		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
(MHz)	(MHz)	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
0.01	2	(1)	(1)	(1)	(1)

Εύρος συχνοτήτων		Καταστρώματα Πτήσεων (Flight Decks)		Καταστρώματα (Weather Decks)	
		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
2	30	164	164	169	169
30	150	61	61	61	61
150	225	61	61	61	61
225	400	61	61	61	61
400	700	196	71	445	71
700	790	94	94	94	94
790	1000	246	100	1307	244
1000	2000	212	112	112	112
2000	2700	159	159	159	159
2700	3600	2027	200	897	200
3600	4000	298	200	1859	200
4000	5400	200	200	200	200
5400	5900	361	213	711	235
5900	6000	213	213	235	235
6000	7900	213	213	235	235
7900	8000	200	200	200	200
8000	8400	200	200	200	200
8400	8500	200	200	200	200
8500	11000	200	200	913	200

Εύρος συχνοτήτων		Καταστρώματα Πτήσεων (Flight Decks)		Καταστρώματα (Weather Decks)	
		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
11000	14000	744	200	833	200
14000	1800	744	200	833	200
18000	50000	200	200	267	200

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

1. Μη ύπαρξη πομπών σε αυτό το εύρος συχνοτήτων

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-4: Μέγιστο Εξωτερικό ΕΜΕ για Λειτουργίες Πλοίου στον Κύριο Λοβό των Πομπών

Εύρος συχνοτήτων (MHz)		Κύριος λοβός (οι αποστάσεις διαφέρουν με την τάξη του πλοίου και τη διάταξη-διαμόρφωση της κεραίας)	
		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
		Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
0.01	2	(1)	(1)
2	30	200	200
30	150	10	10
150	225	10	10
225	400	43	43
400	700	2036	268
700	790	10	10
790	1000	2528	485

Εύρος συχνοτήτων (MHz)		Κύριος λοβός (οι αποστάσεις διαφέρουν με την τάξη του πλοίου και τη διάταξη-διαμόρφωση της κεραίας)	
		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
		Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
1000	2000	930	156
2000	2700	10	10
2700	3600	27460 (2)	2620 (2)
3600	4000	8553	272
4000	5400	139	139
5400	5900	3234	267
5900	6000	267	267
6000	7900	400	400
7900	8000	400	400
8000	8400	400	400
8400	8500	400	400
8500	11000	4173	907
11000	14000	3529	680
14000	18000	3529	680
18000	50000	2862	576

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

1. Μη ύπαρξη πομπών σε αυτό το εύρος συχνοτήτων
2. Τα επίπεδα EME στον πίνακα εφαρμόζονται σε επιχειρήσεις πλοίου στον κύριο λοβό των συστημάτων, σε εύρος συχνοτήτων 2700 με 3600 MHz στις εμπόλεμες επιφάνειες. Για όλες τις άλλες επιχειρήσεις, η μέγιστη τιμή του επιπέδου EME, που δεν υπόκειται σε περιορισμούς είναι 12667 V/m και ο αντίστοιχος μέσος όρος είναι 1533 V/m.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-5: Μέγιστο Εξωτερικό ΕΜΕ για Διαστημικά Οχήματα και Οχήματα Εκτόξευσης

Εύρος συχνοτήτων (MHz)		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
		Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
0.01	2	1	1
2	30	73	73
30	150	17	17
150	225	4	1
225	400	(1)	(1)
400	700	47	6
700	790	1	1
790	1000	7	7
1000	2000	63	63
2000	2700	187	187
2700	3600	23	8
3600	4000	2	2
4000	5400	3	3
5400	5900	164	164
5900	6000	164	164
6000	7900	6	6
7900	8000	3	1
8000	8400	1	1
8400	8500	3	1

Εύρος συχνοτήτων (MHz)		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
		Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
8500	11000	140	116
11000	14000	114	114
14000	18000	16	9
18000	50000	23	23

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

1. Μη ύπαρξη πομπών σε αυτό το εύρος συχνοτήτων

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-6: Μέγιστο Εξωτερικό ΕΜΕ για Συστήματα Εδάφους

Εύρος συχνοτήτων (MHz)		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
		Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
0.01	2	73	73
2	30	103	103
30	150	74	74
150	225	41	41
225	400	92	92
400	700	98	98
700	790	267	267
790	1000	284	267
1000	2000	2452	155
2000	2700	489	155
2700	3600	2450	219

Εύρος συχνοτήτων (MHz)		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
		Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
3600	4000	489	49
4000	5400	645	183
5400	5900	6146	155
5900	6000	549	55
6000	7900	4081	119
7900	8000	549	97
8000	8400	1095	110
8400	8500	1095	110
8500	11000	1943	139
11000	14000	3454	110
14000	18000	8671	243
18000	50000	2793	76

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-7: Μέγιστο Εξωτερικό ΕΜΕ για Αεροσκάφη Περιστρεφόμενων Πτερύγιων, Συμπεριλαμβανομένων τα μη Επανδρωμένα Αεροχήματα, Αποκλείοντας τις Επιχειρήσεις Πλοίων

Εύρος συχνοτήτων (MHz)		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
		Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
0.01	2	200	200
2	30	200	200
30	150	200	200

Εύρος συχνοτήτων (MHz)		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
		Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
150	225	200	200
225	400	200	200
400	700	1311	402
700	790	700	402
790	1000	700	402
1000	2000	6057	232
2000	2700	3351	200
2700	3600	4220	455
3600	4000	3351	200
4000	5400	9179	657
5400	5900	9179	657
5900	6000	9179	200
6000	7900	400	200
7900	8000	400	200
8000	8400	7430	266
8400	8500	7430	266
8500	11000	7430	266
11000	14000	7430	558
14000	18000	730	558
18000	50000	1008	200

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-8: Μέγιστο Εξωτερικό ΕΜΕ για Αεροσκάφη Σταθερών Πτερύγιων, Συμπεριλαμβανομένων τα μη Επανδρωμένα Αεροχήματα, Αποκλείοντας τις Επιχειρήσεις Πλοίων

Εύρος συχνοτήτων (MHz)		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
		Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
0.01	2	88	27
2	30	64	64
30	150	67	13
150	225	67	36
225	400	58	3
400	700	2143	159
700	790	80	80
790	1000	289	105
1000	2000	3363	420
2000	2700	957	209
2700	3600	4220	455
3600	4000	148	11
4000	5400	3551	657
5400	5900	3551	657
5900	6000	148	4
6000	7900	344	14
7900	8000	148	4
8000	8400	187	70

Εύρος συχνοτήτων (MHz)		Ηλεκτρικό πεδίο (V/m - rms)	
		Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή
8400	8500	187	70
8500	11000	6299	238
11000	14000	2211	94
14000	18000	1796	655
18000	50000	533	38

Συστήματα που εκτίθενται σε περισσότερα από ένα από τα καθορισμένα EME, πρέπει να χρησιμοποιούν τη χειρότερη περίπτωση συνδυασμού των εφαρμόσιμων EME. Το εξωτερικό RF EME καλύπτει τη συμβατότητα, αλλά δεν περιορίζεται από τις πλατφόρμες που βρίσκονται μέσα σε αυτό (όπως αεροσκάφη που πετούν σε σχηματισμό, πλοίο που συνοδεύεται από πλοία, συστήματα εδάφους σε οχυρωματικά έργα και θωρακισμένους χώρους) και τους φίλιους πομπούς. Η συμμόρφωση πρέπει να ελέγχεται από το σύστημα, υποσύστημα, δοκιμές επιπέδου εξοπλισμού, ανάλυση ή ένα συνδυασμό αυτών.

5.3.3.1 Απαίτηση

Οι αυξημένες πολυεθνικές στρατιωτικές επιχειρήσεις, η διάδοση τόσο των φιλικών, όσο και των εχθρικών οπλικών συστημάτων και η εκτεταμένη χρήση του φάσματος σε όλο τον κόσμο, έχουν οδηγήσει σε επιχειρησιακά EMEs, που στο παρελθόν δεν είχαν αντιμετωπισθεί. Επομένως, είναι απαραίτητο αυτά τα περιβάλλοντα να ορίζονται και να χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των απαιτήσεων σχεδιασμού της EMC μεταξύ των συστημάτων. Τα τμήματα του στρατιωτικού προτύπου MIL-HDBK-235 [15] διαφόρων επίγειων, επί των πλοίων, επί των αεροσκαφών και διαστημικών πομπών με τα συναφή περιβάλλοντα, έχουν οδηγήσει στους παραπάνω πίνακες. Πολλά από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται από αυτές τις πηγές εκπομπής είναι πολύ υψηλά και ικανά να υποβαθμίζουν την απόδοση των συστημάτων, που φωτίζονται από αυτά, εάν δεν αντιμετωπισθούν κατάλληλα. Ακόμη και αντικείμενα σχετικά με συστήματα προσωπικών επικοινωνιών (PCS) χαμηλής ισχύος, όπως κινητά τηλέφωνα, τα οποία χρησιμοποιούνται σε στενή γεινίαση με ευαίσθητα ηλεκτρονικά είδη, μπορεί να δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ικανά να υποβαθμίσουν την απόδοση.

Τα λειτουργικά προβλήματα που προκύπτουν από τις δυσμενείς επιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στα συστήματα είναι τεκμηριωμένα επαρκώς.

Περιλαμβάνουν, αλλά κατά κανένα τρόπο δεν περιορίζονται στην αποτυχία του εξαρτήματος και αναξιόπιστες ενδείξεις από ενσωματωμένες δοκιμές (BIT) του υλικού. Η μεγάλη ποικιλία των πιθανών προβλημάτων υπογραμμίζει τη σημασία του σχεδιασμού των συστημάτων που είναι συμβατά με τα επιδιωκόμενα λειτουργικά EME.

Κοινές διακλαδικές επιχειρήσεις, αυξάνουν περαιτέρω τη δυνατότητα για προβλήματα ασφάλειας και αξιοπιστίας, εάν τα συστήματα εκτίθενται σε επιχειρησιακά EME, διαφορετικά από εκείνα για τα οποία έχουν σχεδιασθεί. Για παράδειγμα, τα συστήματα του Στρατού, εφόσον έχουν σχεδιασθεί για τη συμβατότητα με τα EME σε λειτουργία επί εδάφους, μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά από την έκθεση σε «κοινό» περιβάλλον ενός Ναυτικού πλοίου.

Ο ίδιος πομπός δεν οδηγεί κατ' ανάγκην τη μέγιστη τιμή και τα μέσα επίπεδα, σε μία ιδιαίτερη περιοχή συχνοτήτων για κάθε πίνακα. Οι μέσες στάθμες ηλεκτρικού πεδίου στους πίνακες, βασίζονται στη μέση ισχύ εξόδου, η οποία είναι το γινόμενο της μέγιστης ισχύος εξόδου του πομπού και του μέγιστου κύκλου λειτουργίας (duty cycle). Ο κύκλος λειτουργίας, εξάγεται ως ποσοστό του πλάτους του παλμού στη συχνότητα επανάληψης του παλμού. Ο ακριβής τύπος είναι $V_{Avg} = V_{peak} \times (duty\ cycle)^{1/2}$. Αυτό ισχύει μόνο για τα παλμικά συστήματα. Η μέση ισχύς για μη-παλμικά σήματα είναι η ίδια με τη μέγιστη ισχύ (δηλαδή, καμία διαμόρφωση δεν παρουσιάζεται).

Κάθε ένας από τα τους παραπάνω πίνακες EME, περιγράφεται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους. Το πρότυπο MIL-HDBK-235-1 [15] παρέχει γενικές πληροφορίες και παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία καθενός από τους πίνακες EME. Τα συγκεκριμένα τμήματα του υπόψη εγχειριδίου, δίνουν λεπτομερή τεκμηρίωση και τις παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των επιπέδων EME, καθώς και τα χαρακτηριστικά των πομπών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αυτών των επιπέδων.

Ο Πίνακας 5-3 παρέχει το μέγιστο εξωτερικό EME, για τις λειτουργίες του καταστρώματος σε κάθε καθορισμένη περιοχή συχνοτήτων, που αφορά τα καταστρώματα που είναι εκτεθειμένα στον καιρό και τους αεροδιαδρόμους των πλοίων (συμπεριλαμβανομένων και των υπόστεγων των καταστρωμάτων), για κάθε ενεργή κατηγορία των πλοίων του Ναυτικού.

Ο Πίνακας 5-4 παρέχει το μέγιστο εξωτερικό EME, για τις λειτουργίες των πλοίων στον κύριο λοβό ακτινοβολίας των πομπών, σε κάθε καθορισμένη ζώνη συχνοτήτων για όλα τα πλοία του Ναυτικού. Οι αποστάσεις από την κεραία ποικίλουν με την κατηγορία των πλοίων και τη διαμόρφωση της κεραίας.

Τα επίπεδα EME που φαίνονται στον Πίνακα 5-3 είναι συνδυασμός επιπέδων που παράγονται από τις ακόλουθες σημαντικές κατηγορίες πλοίων του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ, όπως μαχητικά, αμφίβια, μεταγωγικά, αποβατικά, ναρκαλιευτικά, σκάφη παράκτιας περιπολίας και πλοία διεξαγωγής επιχειρήσεων επί των ακτών. Τα

επίπεδα EME που φαίνονται στον Πίνακα 5-4, είναι ο συνδυασμός των επιπέδων που δημιουργούνται από τις προαναφερθείσες κατηγορίες πλοίων.

Τα εξωτερικά RF EME των υποβρυχίων, δεν περιλαμβάνονται ως ένας μοναδικός πίνακας στο MIL-STD-464C. Τα επίπεδα των πεδίων που αναφέρονται στη δοκιμή RS103 (radiated susceptibility, electric field, 2 MHz to 40 GHz) του MIL-STD-461F, είναι γενικά επαρκή για πολλές εγκαταστάσεις. Ωστόσο, ο εξοπλισμός των πύργων και των ιστών, καθώς και οι αισθητήρες των υποβρυχίων, μπορεί να υφίστανται πεδία που υπερβαίνουν την απαίτηση των 200 V/m της δοκιμής RS103, τα οποία προέρχονται από κοντινές συσκευές και κεραίες, που είναι εγκατεστημένες πλησίον του παραπάνω εξοπλισμού. Η ανάλυση πρέπει να εκτελεσθεί, για τα παραπάνω, προκειμένου να προσδιορισθεί η πυκνότητα του προσπίπτοντος πεδίου, πάνω σε αυτούς τους εξοπλισμούς, που οφείλονται στους πομπούς RF του κύτους. Το MIL-HDBK-235 - 10 (Military Operational Electromagnetic Environment Profiles Part 10 External Electromagnetic Environment Levels for Submarine Operations) [15] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των RF πομπών των υποβρυχίων.

Ο Πίνακας 5-5 παρέχει τα μέγιστα επίπεδα εξωτερικών EME, για τα διαστημικά συστήματα και τα συστήματα εκτόξευσης των οχημάτων. Τα επίπεδα EME είναι τα μέγιστα επίπεδα, που προέρχονται από τα επίπεδα EME για τα διαστημικά συστήματα σε χαμηλή τροχιά [δηλαδή, 100 ναυτικά μίλια (nm) υψόμετρο] και ο συνδυασμός επιπέδων EME, 1 χιλιόμετρο (χλμ) πάνω από διάφορες τοποθεσίες καθέλκυσης και ανέλκυσης.

Ο Πίνακας 5-6 περιγράφει το ελάχιστο αρχικό EME για τα επίγεια συστήματα. Οι τιμές των EME για τον υπόψη πίνακα, προήλθαν από κινήσεις φαλαγγών ή επιχειρήσεις εν κινήσει εξελισσόμενες (κινητές και φορητές πλατφόρμες) και κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων βάσης (από σταθερά και μεταφερόμενα συστήματα), με κάθε κατάσταση να λαμβάνει συγκεκριμένες διαχωριστικές αποστάσεις από διάφορες κατηγορίες πομπών. Οι κλίσεις στα EME εξομαλύνονται, ώστε να μην συνεπάγεται ένα επίπεδο πιστότητας που δεν υπάρχει πραγματικά και να απλουστευθεί η δοκιμή.

Ο Πίνακας 5-7 παρέχει τα εξωτερικά EME για αεροσκάφη περιστροφικών πτερυγίων, συμπεριλαμβανομένων των UAVs, εκτός των επιχειρήσεων επί του πλοίου. Τα επίπεδα EME είναι συνδυασμός επιπέδων που παράγονται από τα ακόλουθα: αεροσκάφη περιστροφικών πτερυγίων, κατά την πτήση, πολιτικά αεροδρόμια κατά τη διάρκεια επιχειρήσεων προσγείωσης και απογείωσης, επιχειρήσεις στρατιωτικών αεροδρομίων, εκστρατευτικά αεροδρόμια και υψηλής έντασης πεδία ακτινοβολίας (HIRF) στην Ευρώπη. Οι αποστάσεις από το αεροσκάφος μέχρι το αεροδρόμιο και τους σταθερούς και κινητούς πομπούς επί εδάφους, κυμαίνονται από 50 έως 300 πόδια.

Ο Πίνακας 5-8 παρέχει τα μέγιστα EME για τα συστήματα των αεροσκαφών σταθερών πτερυγίων, συμπεριλαμβανομένων των UAVs, εκτός των επιχειρήσεων επί του πλοίου. Τα επίπεδα EME είναι συνδυασμός επιπέδων που παράγονται από τα ακόλουθα: αεροσκάφη σταθερών πτερυγίων κατά την πτήση, πολιτικά αεροδρόμια

κατά τη διάρκεια επιχειρήσεων προσγείωσης και απογείωσης, επιχειρήσεις σε στρατιωτικά αεροδρόμια και εκστρατευτικά αεροδρόμια. Υπάρχουν και άλλα έγγραφα και κανονισμοί (εκτός των MIL-STD-464C και MIL-HDBK-235), που μπορούν να καθορίσουν παραλλαγές-διακυμάνσεις στα επίπεδα του περιβάλλοντος, που καθορίζονται στους Πίνακες 5-7 και 5-8. Ωστόσο, τα επίπεδα που αναφέρθηκαν παραπάνω, αντιπροσωπεύουν τις τελευταίες διαθέσιμες πληροφορίες σε αυτά τα περιβάλλοντα.

Το πραγματικό επιχειρησιακό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, που το σύστημα θα συναντήσει, είναι ιδιαίτερα εξαρτώμενο από τις επιχειρησιακές απαιτήσεις και θα πρέπει να καθορίζεται από την Υπηρεσία Προμηθειών. Οι πίνακες EME παρέχουν ένα σημείο εκκίνησης για μία ανάλυση, προκειμένου να αναπτυχθεί το πραγματικό περιβάλλον του εξωτερικού πεδίου ακτινοβολίας, που βασίζεται στις λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος. Ωστόσο, είναι δυνατόν, λόγω των ειδικών επιχειρησιακών απαιτήσεων ή περιορισμών, το πραγματικό περιβάλλον να είναι υψηλότερο ή χαμηλότερο από τις παραπάνω τιμές EME. Δεν υπάρχει υποκατάστατο για πλήρως τεκμηριωμένα κριτήρια, που αφορούν ένα σύστημα που βασίζεται στις επιχειρησιακές του απαιτήσεις.

Ο κατάλληλος καθορισμός του περιβάλλοντος, πρέπει να περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά, τόσο της διαμόρφωσης, όσο και της πόλωσης ενός συστήματος για τον προσδιορισμό της μέγιστης τιμής και του μέσου όρου των πεδίων, σε ολόκληρη την περιοχή συχνότητας. Οι απαιτήσεις αυτές πρέπει να βασίζονται στις λειτουργικές διαμορφώσεις των φίλιων, εχθρικών και πολιτικών συστημάτων. Για παράδειγμα, η διαμόρφωση πλάτους (AM) μπορεί να προκαλέσει σημαντικές παρεμβολές σε χαμηλά επίπεδα πεδίου, ενώ η αντίστοιχη του συνεχούς κύματος (CW) σε σημαντικά υψηλότερα επίπεδα, ενδέχεται να μην προκαλέσει παρεμβολές. Αυτό το είδος της διαφοράς μπορεί να ισχύει και για διαμόρφωση συχνότητας (FM) και διαμόρφωση παλμού (PM), όπως επίσης και σε παραλλαγές στην πόλωση (κάθετη, οριζόντια και κυκλική).

Τα EME, στα διάφορα στρατιωτικά συστήματα και εξοπλισμό που πρέπει να λειτουργούν, δημιουργούνται από ένα πλήθος πηγών. Η συνεισφορά του κάθε πομπού, μπορεί να περιγραφεί από την άποψη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του, που αφορούν το επίπεδο ισχύος, διαμόρφωση, συχνότητα, εύρος ζώνης, το κέρδος της κεραίας (κύριου λοβού και των πλευρικών λοβών), σάρωση της κεραίας κτλ. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι σημαντικά στον προσδιορισμό των δυνητικών επιπτώσεων για το σχεδιασμό του συστήματος. Ένας μεγάλης ισχύος πομπός, μπορεί να φωτίσει το σύστημα μόνο για ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, λόγω του προτύπου αναζήτησης του ή μπορεί να λειτουργήσει σε μια συχνότητα όπου ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις.

Οι κεραίες που είναι συνδεδεμένες με τους δέκτες, γενικά δεν αναμένεται να λειτουργήσουν χωρίς κάποια υποβάθμιση της απόδοσης, για τα επίπεδα EME που καθορίζονται στους πίνακες. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο δέκτης πρέπει να είναι

προστατευμένος από διακοπές λειτουργίας (burn out). Ενώ οι πίνακες εκφράζουν τις απαιτήσεις από την άποψη ενός μοναδικού επιπέδου πάνω από μια ζώνη συχνοτήτων, είναι μάλλον απίθανο ότι οι πραγματικά απειλητικοί πομποί, που οδηγούν στα επίπεδα των πινάκων, θα είναι στην συντονισμένη συχνότητα του συγκεκριμένου δέκτη. Μερικές ευρείας ζώνης συσκευές, όπως δέκτες προειδοποίησης ηλεκτρονικού πολέμου, θα τείνουν να είναι η εξαίρεση. Επίσης, πρέπει να αναγνωρισθεί, ότι οι πίνακες αντιπροσωπεύουν επίπεδα, που συναντώνται σπάνια στις περισσότερες περιπτώσεις.

Οι κεραιές που είναι συνδεδεμένες με δέκτες, συχνά έχουν σχεδιασθεί για να λειτουργούν χωρίς υποβάθμιση, με ένα σήμα εκτός ζώνης των 0 dBm που παρουσιάζεται στην υποδοχή της κεραιάς και επίπεδα που είναι 80 dB πάνω από την ευαισθησία, για τα σήματα της συντονισμένης περιοχής. Δεδομένου ότι τα επίπεδα αντιπροσωπεύουν τις λογικές απαιτήσεις για την ελάχιστη απόδοση, οι δέκτες συνήθως θα έχουν σημαντικά καλύτερες επιδόσεις. Οι υπολογισμοί που χρησιμοποιούν τα πεδία των πινάκων και τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού δέκτη κεραιάς, δείχνουν ότι τα επίπεδα στους δέκτες μπορεί να είναι της τάξεως των 50 dBm για τα πεδία μέγιστης τιμής και 30 dBm για τα πεδία μέσης τιμής. Η απόδοση του δέκτη, δεν μπορεί να διασφαλισθεί, χωρίς τη χρήση εξωτερικού φιλτραρίσματος. Εάν υπάρχουν ζητήματα λειτουργικής απόδοσης με την απόλυτη ανάγκη για ένα συγκεκριμένο δέκτη, να είναι απολύτως λειτουργικός σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον, ορισμένα μέτρα σχεδιασμού πρέπει να εφαρμοστούν.

Τα εξωτερικά EME πρέπει να προσδιορίζονται για κάθε σύστημα. Κατά την εξέταση των εξωτερικών EME (κατάστρωμα πτήσης, κατά τη διάρκεια της πτήσης, πεδίο μάχης κλπ), οι ακόλουθοι τομείς θα πρέπει να συμπεριληφθούν στην αξιολόγηση.

α. Απαιτήσεις της αποστολής. Οι συγκεκριμένοι πομποί, στους οποίους το σύστημα θα εκτεθεί, εξαρτώνται από την επιδιωκόμενη χρήση τους.

β. Η κατάλληλη διατήρηση της απόστασης σε κάθε πομπό.

γ. Ο αριθμός των περιοχών και τα σημεία που βρίσκονται. Η πιθανότητα υποκλοπής για κάθε πομπό και ο χρόνος παραμονής, θα πρέπει να υπολογίζεται.

δ. Εάν ισχύει, θα πρέπει να συμπεριληφθούν μικροκυματικοί και ευρείας ζώνης πομποί.

ε. Απαιτήσεις της λειτουργικής απόδοσης με επιλογές όπως, μόνο επιβίωσιμο, αποδεκτή υποβάθμιση απόδοσης ή πλήρη απόδοση απαιτούνται.

Χωρίς ειδικές απαιτήσεις σχεδιασμού και ελέγχου, τα προβλήματα που προκαλούνται από τα εξωτερικά EME, συνήθως ανακαλύπτονται, έως ότου το σύστημα τεθεί σε λειτουργία. Μέχρι η παρεμβολή να ταυτοποιηθεί, το σύστημα μπορεί να λειτουργεί κατά τρόπο ικανοποιητικό μέσα στην φάση παραγωγής του προγράμματος και οι αλλαγές θα είναι ακριβές. Στο παρελθόν, τα EME επί του σκάφους που παράγονται

από υποσυστήματα RF του συστήματος (συστήματα ηλεκτρονικού πολέμου, ραντάρ, συστήματα επικοινωνιών και πλοήγησης) παρήγαγαν το περιβάλλον ελέγχου, για πολλά συστήματα. Από τη δυνατότητα της έκθεσης, τα στοιχεία αυτά εξακολουθούν να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Ωστόσο, με τα εξωτερικά επίπεδα ισχύος του πομπού να αυξάνονται, οι εξωτερικοί πομποί μπορεί να κατευθύνουν το συνολικό περιβάλλον του συστήματος.

Ζητήματα σχετικά με τα εξωτερικά RF EME, συναντώνται πιο συχνά λόγω των κοινών επιχειρήσεων μεταξύ των στρατιωτικών υπηρεσιών και των απρόβλεπτων χρήσεων των συστημάτων. Για παράδειγμα, ορισμένα αεροσκάφη και όπλα που δεν προορίζονταν αρχικά για χρήση στα πλοία, έχουν αναπτυχθεί στα πλοία. Μια επιπλοκή με σύγχρονα συστήματα είναι η χρήση εξειδικευμένων δομικών υλικών. Το κλασικό σύστημα έχει κατασκευασθεί από αλουμίνιο, τιτάνιο, ή χάλυβα. Η σύγχρονη τεχνολογία και η ανάγκη να αναπτυχθούν συστήματα υψηλότερων επιδόσεων, παρέχουν εναλλακτικές λύσεις με τη χρήση σύνθετων υλικών, όπως εποξειδωτικός άνθρακας (carbon-epoxy) και κατασκευή kevlar. Τα μέταλλα μπορούν να παρέχουν καλή θωράκιση και προστασία κατά των EME, για τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Ηλεκτρικά αγωγίμα σύνθετα υλικά, παρέχουν συνήθως στο σύστημα θωράκιση συγκρίσιμη με αυτή του μετάλλου σε υψηλότερες συχνότητες (περίπου 100 MHz). Ωστόσο, στις χαμηλότερες συχνότητες δεν αποδίδουν εξίσου καλά. Κάποιες κατασκευές είναι δομημένες από μη αγωγίμα σύνθετα υλικά όπως το kevlar, οι οποίες δεν παρέχουν θωράκιση, εκτός εάν αυτές αντιμετωπίζονται με τις κατάλληλες τελικές επεξεργασίες.

Τα υψηλής ισχύος ραντάρ πλοίων έχουν προκαλέσει παρεμβολές σε δορυφορικά τερματικά που βρίσκονται σε άλλα πλοία, με αποτέλεσμα την απώλεια της ασφάλειας στον δορυφόρο και την πλήρη διακοπή της επικοινωνίας. Η παρέμβαση απενεργοποιεί το δορυφορικό τερματικό έως και 15 λεπτά, που είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αποκατασταθεί η δορυφορική σύνδεση. Η διατήρηση αποστάσεων μέχρι 20 ναυτικά μίλια μεταξύ πλοίων απαιτείται, για να αποφευχθεί το πρόβλημα.

Ένα οπλικό σύστημα υπέστη σοβαρές παρεμβολές, που οφείλονταν σε ανεπαρκή επιλεκτικότητα του καναλιού στην πρόσοψη (front-end) του δέκτη. Ενέργεια που προερχόταν από συστήματα ηλεκτρονικού πολέμου και από άλλα «συγγενικής» διάλυσης γειτνιάζοντα οπτικά συστήματα (που λειτουργούσαν σε διαφορετικό κανάλι, αλλά εντός της ίδιας ζώνης διέλευσης) συζευγμένη μέσα στο δέκτη θύμα και «επεξεργασμένη», υποβάθμιζε σοβαρά τη δυνατότητα ανίχνευσης του στόχου και παρακολούθησης. Η εγκατάσταση ενός ηλεκτρονικά συντονισμένου φίλτρου αμέσως μετά την κεραία αντιμετωπίζει τα προβλήματα της παρεμβολής εκτός καναλιού με:

- α. Την εξάλειψη κορεσμού του ενισχυτή από την πρόσοψη δέκτη.
- β. Τη μείωση της υπερφόρτωσης του επεξεργαστή του συστήματος με άσχετα εντός της ζώνης σήματα.

Ένα αεροσκάφος που έχασε την αντιολισθητική ικανότητα πέδησης κατά την προσγείωση, λόγω των RF πεδίων από ένα ραντάρ εδάφους, άλλαξε το σήμα βάρους στους τροχούς, από ένα διακόπτη εγγύτητας. Το σήμα κατέδειξε στο αεροσκάφος ότι ήταν στον αέρα και απενεργοποίησε το σύστημα αντιολίσθησης.

Ένα αεροσκάφος υπέστη μία μη εντελλόμενη κίνηση ελέγχου πτήσης, όταν πετούσε στην περιοχή πομπού υψηλής ισχύος, με αποτέλεσμα την απώλεια του αεροσκάφους. Εάν το προφίλ της αποστολής του αεροσκάφους και τα αναμενόμενα επιχειρησιακά EME, είχαν εξετασθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, η καταστροφή αυτή θα μπορούσε να είχε αποφευχθεί.

Συστήματα αεροσκαφών έχουν βιώσει αποτυχίες αυτοδιάγνωσης (self-test) και διακυμάνσεις σε όργανα του πιλοτηρίου (cockpit), όπως οι δείκτες της ταχύτητας του κινητήρα και των δεικτών ροής καυσίμου, που προκαλούνται από σαρώσεις των ραντάρ των πλοίων κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων στα καταστρώματα πτήσεως. Αυτές οι ψευδείς ενδείξεις και οι αποτυχίες δοκιμών έχουν οδηγήσει σε πολλές περιπτώσεις ακυρώσεις προκαταρκτικών ελέγχων. Αεροσκάφη κατά την προσέγγιση σε διαδρόμους αεροπλανοφόρων, έχουν υποστεί παρεμβολές από ραντάρ του πλοίου. Ένα τέτοιο πρόβλημα συνεπάγεται την ενεργοποίηση των ψευδών ενδείξεων «Τροχοί Προειδοποίηση», υποδεικνύοντας ότι το σύστημα προσγείωσης δεν είναι προς τα κάτω και είναι κλειδωμένο. Ένα σήμα μη προσγείωσης, κυκλικής πτήσης και επανάληψης προσγείωσης (wave-off) ή ακύρωσης προκαταρκτικού ελέγχου (pre-flight) θα μπορούσε να συμβεί λόγω αυτής της EMI που προκαλείται από αυτήν την κατάσταση.

Τα πληρώματα των αεροσκαφών έχουν αναφέρει σοβαρές παρεμβολές στις επικοινωνίες μεταξύ αυτών και των πληρωμάτων καταστρωμάτων πτήσεων. Εκπομπές UHF στο περιβάλλον των καταστρωμάτων πτήσεων, έχουν προκαλέσει παρεμβολές αρκετά σοβαρές, ώστε τα πληρώματα να αδυνατούσαν να ακροασθούν μεταξύ τους για το συντονισμό του ιπτάμενου προσωπικού. Το πρόβλημα αυτό θέτει ένα σοβαρό κίνδυνο για το προσωπικό, με την πιθανότητα βλάβης ή απώλεια του αεροσκάφους και του ιπτάμενου προσωπικού κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων στο κατάστρωμα πτήσης.

5.3.3.2 Διακρίβωση

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά περιβάλλοντα RF, που ένα σύστημα θα εκτεθεί στη διάρκεια της λειτουργίας του. Πολλές απειλές θα αντιμετωπισθούν σπάνια. Οι κανονικές λειτουργικές δοκιμές του συστήματος μπορούν να το εκθέσουν σε έναν μόνο περιορισμένο αριθμό απειλών. Εξειδικευμένες δοκιμές και αναλύσεις που απαιτούνται για να διακριβωθεί η ικανότητα του συστήματος σε όλα τα περιβάλλοντα RF, πρέπει να εξετασθούν.

Ο εξωτερικός έλεγχος των RF EME, θα πρέπει να πραγματοποιείται υπό εργαστηριακές συνθήκες, όπου το υπό δοκιμή σύστημα και το προσομοιωμένο περιβάλλον ελέγχονται. Ανεπιθύμητες αποκρίσεις του συστήματος μπορεί να

απαιτούν ανάλυση ηλεκτρομαγνητικής ευαισθησίας (EMV), για να καθορισθεί η επίδραση του εργαστηρίου στην παρατηρούμενη ευαισθησία της επιχειρησιακής απόδοσης του συστήματος. Μόνο κάτω από ασυνήθιστες περιστάσεις ολοκληρώνεται η διακρίβωση του συστήματος ή οι ευαισθησίες του συστήματος διερευνώνται από επιχειρησιακές δοκιμές σε πραγματικά εξωτερικά ΕΜΕ. Υπάρχει πολύ λιγότερος έλεγχος στις μεταβλητές συνθήκες, λιγότερες λειτουργίες του συστήματος πιθανόν να εκτελούνται, καθώς και το κόστος μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερο. Τα αποτελέσματα της EMV ανάλυσης και των επιχειρησιακών δοκιμών καθοδηγούν την πιθανή ανάγκη τροποποίησης του συστήματος, με επιπλέον ανάλυση ή δοκιμές.

Η δοκιμή του συστήματος σε επίπεδο μεγάλων πλατφορμών, όπως αεροσκάφη, άρματα μάχης και πλοία, γίνεται συνήθως σε μια τοποθεσία δοκιμής ανοικτής περιοχής. Το διασυστημικό περιβάλλον του συστήματος αξιολογείται για να προσδιορισθούν οι συχνότητες που έχουν ενδιαφέρον από τους πιθανούς πομπούς και θα πρέπει να αντιμετωπίζονται από το σύστημα όταν αναπτυχθεί, η βέλτιστη συχνότητα ζεύξης στο σύστημα, οι πιθανές EMV συχνότητες του συστήματος, οι διαθέσιμοι προσομοιωτές και οι εξουσιοδοτημένες συχνότητες δοκιμών. Με βάση αυτές τις εκτιμήσεις και άλλους μοναδικούς παράγοντες στο σύστημα ή πρόγραμμα, ένας ολοκληρωμένος κατάλογος των πομπών δοκιμών αποκομίζεται. Για κάθε πομπό δοκιμής, το σύστημα φωτίζεται και αξιολογείται για ευαισθησίες. Οι πομποί της δοκιμής μπορεί να μεταβάλλουν τη συχνότητα εξόδου με σταθερά βήματα ή να παραμένουν σε επιλεγμένες συχνότητες. Για τα πυρομαχικά που εκτοξεύονται από αέρα, οι δοκιμές σε επίπεδο συστήματος θα πρέπει να περιλαμβάνουν: προκαταρκτικό έλεγχο προ πτήσεως (preflight), δοκιμές κατά την αερομεταφορά του υπόψη σκάφους ή πυρομαχικού από ένα άλλο φορέα αεροσκάφος (captive carry), καθώς και διαμορφώσεις κατά τη διάρκεια πτήσεως πυραύλου με απενεργοποιημένο το σύστημα προωθήσεως του (free flight).

Ιδανικά, ολόκληρο το σύστημα θα πρέπει να φωτίζεται ομοιόμορφα σε πλήρη απειλή για την πιο αξιόπιστη επίδειξη της σκληρότητας. Ωστόσο, στις περισσότερες συχνότητες, δεν υπάρχει εξοπλισμός δοκιμής προς εκπλήρωση της αποστολής αυτής. Οι καθιερωμένες τεχνικές δοκιμών, βασίζονται στο μέγεθος του συστήματος σε σύγκριση με το μήκος κύματος της συχνότητας δοκιμής. Σε συχνότητες όπου το σύστημα είναι μικρό σε σύγκριση με το μήκος κύματος της συχνότητας φωτισμού (συνήθως κάτω από 30 MHz), είναι αναγκαίο να φωτίζει ολόκληρο το σύστημα ομοιόμορφα ή να ακτινοβολεί το σύστημα, προκειμένου κατάλληλες ηλεκτρομαγνητικές εντάσεις να αναπτύσσονται στο πλαίσιο του συστήματος. Όπου ο φωτισμός ολόκληρου του συστήματος δεν είναι πρακτικός, διάφορες πτυχές των μεγαλύτερων φυσικών διαστάσεων του συστήματος θα πρέπει να φωτίζονται για να συσχετίσουν το πεδίο ακτινοβολίας με τη δομή του συστήματος. Σε συχνότητες (συνήθως άνω των 400 MHz) όπου το μέγεθος του συστήματος είναι μεγάλο σε σύγκριση με το μήκος κύματος, ο προσαρμοσμένος (spot) φωτισμός είναι επαρκής για να αξιολογήσει τις πιθανές αποκρίσεις, φωτίζοντας ειδικά ανοίγματα, καλώδια και

υποσυστήματα. Η ζώνη των 30 - 400 MHz, είναι μια περιοχή μετάβασης από τη μία αντίληψη στην άλλη, όπου η όποια τεχνική που μπορεί να είναι κατάλληλη, εξαρτάται από το σύστημα και τον προσομοιωτή του περιβάλλοντος.

Τυπικά, για ένα νέο σύστημα, 4 έως 6 θέσεις χρησιμοποιούνται για φωτισμό χαμηλής συχνότητας και 12 έως 36 θέσεις χρησιμοποιούνται για spot φωτισμό σε υψηλότερες συχνότητες. Οι πομποί ακτινοβολούνται διαδοχικά, τόσο σε κάθετη όσο και σε οριζόντια πόλωση. Συνήθως δεν είναι πρακτικό να χρησιμοποιείται κυκλική και διασταυρούμενη (cross) πόλωση. Για ένα υφιστάμενο σύστημα που είναι υπό επανέλεγχο μετά την εγκατάσταση ενός νέου υποσυστήματος, 2 θέσεις χρησιμοποιούνται συνήθως για τις χαμηλές συχνότητες και από 2 έως 4 θέσεις για τις υψηλές συχνότητες.

Για την περίπτωση όπου το εξωτερικό περιβάλλον υπερβαίνει όλους τους διαθέσιμους προσομοιωτές ή είναι αναγκαίο να επιτύχουμε το φωτισμό ολόκληρου του συστήματος, η μέθοδος δοκιμής του μαζικού ρεύματος (bulk current), μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Το σύστημα φωτίζεται από μια απόσταση για να ληφθεί εγγύς ομοιόμορφος φωτισμός αλλά σε χαμηλά επίπεδα. Το επαγόμενο ρεύμα στις δέσμες καλωδίων από το ομοιόμορφο εξωτερικό πεδίο, υπολογίζεται. Τα επίπεδα των επαγόμενων ρευμάτων κλιμακώνονται σε επίπεδα πλήρων ρευμάτων, με βάση το εξωτερικό περιβάλλον του συστήματος. Αυτά τα υπολογισμένα κατά προσέγγιση επίπεδα, συγκρίνονται με τα δεδομένα της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, για μεμονωμένα υποσυστήματα και εξοπλισμό. Εάν δεν είναι διαθέσιμα επαρκή στοιχεία, τα καλώδια μπορεί να οδηγηθούν στα απαιτούμενα επίπεδα μέσα στο σύστημα, για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Η τεχνική της οδήγησης καλωδίου (cable drive) έχει εφαρμοσθεί μέχρι τα 400 MHz.

Το σύστημα κατά τη διάρκεια της δοκιμής EMC του διασυστήματος αξιολογείται ως θύμα των παρεμβολών από το περιβάλλον. Λειτουργίες των υποσυστημάτων και του εξοπλισμού, θα πρέπει να περιλαμβάνουν ενσωματωμένες δοκιμές (BIT), κοινές λειτουργικές διαδικασίες με το περιβάλλον του πομπού δοκιμής (π.χ, οι λειτουργίες στο κατάστρωμα πτήσεων έναντι αερομεταφερόμενων όπλων που εκτοξεύονται από ένα αεροσκάφος) και λειτουργίες ασφαλείας.

Οι δοκιμές προκαταρκτικών ελέγχων (preflight) του διασυστήματος, των εκτοξευόμενων από αέρα πυρομαχικών, διεξάγονται για να διασφαλισθεί ότι το σύστημα μπορεί να εκτελέσει με επιτυχία τις προπαρασκευαστικές εργασίες, που απαιτούνται κατά τη χρήση των υπηρεσιών. Λειτουργίες όπως BIT αεροσκαφών, φόρτωση δεδομένων της αποστολής ή του στόχου πραγματοποιούνται, καθώς εκτίθεται το όπλο στη δοκιμή EME.

Οι captive-carry δοκιμές του διασυστήματος, των εκτοξευόμενων από αέρα πυρομαχικών, διεξάγονται για τη διακρίβωση της επιβιωσιμότητας του όπλου, μετά από έκθεση στην κύρια δέσμη των επιχειρησιακών EME. Δεδομένου, ότι η δοκιμή προσομοιώνει το όπλο που διέρχεται μέσα από την κύρια δέσμη ραντάρ κατά την απογείωση και την προσγείωση της πλατφόρμας υποδοχής (αεροσκάφος), το όπλο

πρέπει να λειτουργεί όπως προβλέπεται για αυτές τις συνθήκες πτήσης, συνήθως σε κατάσταση αναμονής ή σε κατάσταση μη λειτουργίας (off). Η διάρκεια της έκθεσης του όπλου στο ΕΜΕ από την κύρια δέσμη, θα πρέπει να βασίζεται στις κανονικές επιχειρησιακές εκτιμήσεις. Η διακρίβωση της επιβιωσιμότητας του συστήματος δύναται σε πολλές περιπτώσεις, να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας τη λειτουργία BIT του όπλου. Ωστόσο, αν αυτό δεν είναι δυνατό, απαιτείται διακρίβωση που χρησιμοποιεί ένα κατάλληλο σύνολο δοκιμών του συστήματος.

Η δοκιμή free flight των πυρομαχικών γίνεται χρησιμοποιώντας ένα αδρανές, με ενσωματωμένα όργανα όπλο, το οποίο αναστέλλεται προσωρινά η λειτουργία του, σε περιρρέουσες συνθήκες χαμηλών RF [ανηχοϊκός θάλαμος (anechoic chamber)], προσομοιάζοντας τον ελεύθερο χώρο ή το θάλαμο λειτουργίας ανάδευσης (mode - stirred chamber). Εφόσον τα σημεία εισόδου RF και οι πλευρικές γωνίες (aspect angles) που σχετίζονται με τις συγκεκριμένες ευαισθησίες δεν μπορούν να προσδιορισθούν στο θάλαμο λειτουργίας ανάδευσης, τότε μερικές φορές απαιτείται η χρήση του ανηχοϊκού θάλαμου. Το πρόγραμμα δοκιμών free flight, αποτελείται από την αξιολόγηση της απόδοσης του όπλου κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης, της σταθερής πτήσης και των τερματικών φάσεων της πτήσης, ενώ εκτίθενται σε φίλια και εχθρικά ΕΜΕ.

Η επίσημη δοκιμή διακρίβωσης ενός συστήματος για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα μεταξύ των συστημάτων, πραγματοποιείται συνήθως αργά στην ανάπτυξη του συστήματος. Ένα σύστημα, όπως ένα αεροσκάφος υποβάλλεται συχνά πρώτα σε δοκιμές εκτεταμένης ανάπτυξης και ολοκλήρωσης. Το εξωτερικό περιβάλλον που μπορεί να προκύψει κατά τη διάρκεια αυτών των δοκιμών, πρέπει να αναθεωρηθεί και η κατάσταση του αεροσκάφους σε σχέση με το περιβάλλον πρέπει να αξιολογείται για την ασφάλεια πριν από την πτήση. Η δοκιμή EMI των υποσυστημάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση της σκληρότητας (hardness). Περιορισμένες δοκιμές του διασυστήματος των συστημάτων, για τις ανησυχίες ασφαλείας λόγω των ειδικών πομπών, μπορεί να είναι απαραίτητες ή πιθανός περιορισμός των επιτρεπόμενων λειτουργιών (όπως οι διαδρομές πτήσης του αεροσκάφους) είναι δυνατόν να επιβληθούν.

Για την υπηρεσία των αεροσκαφών του Στρατού των ΗΠΑ, η δοκιμή σε επίπεδο συστήματος γίνεται για τα ελικοφόρα, υπό τις συνθήκες του Πίνακα 5-9. Η τέταρτη και πέμπτη στήλη καθόρισε τις παραμέτρους διαμόρφωσης των παλμών που πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη μέγιστη και τη μέση τιμή των πεδίων στον Πίνακα 5-7. Επιπλέον, οι δοκιμές εκτελούνται στα μειωμένα επίπεδα ηλεκτρικού πεδίου στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 5-9, χρησιμοποιώντας τους τύπους διαμόρφωσης που παρατίθενται στην τρίτη στήλη. Η πρόσθετη αυτή δοκιμή, προτίθεται να καταδείξει την απόδοση, για τους τύπους των διαμορφώσεων, που χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-9: Εξειδικευμένες Δοκιμές Ελικοφόρων

Συχνότητα (MHz)	Ηλεκτρικό πεδίο για επικοινωνίες προσομοίωσης (V/m - rms)	Διαμόρφωση για επικοινωνίες προσομοίωσης	Διαμόρφωση παλμού για μέγιστη/μέση τιμή πεδίων στον Πίνακα 5-7	
			Εύρος παλμού (Ms)	Συχνότητα επανάληψης παλμού (Hz)
0.01-2	200	CW, AM		
2-20	200	CW, AM	833.3	300
20-25	200	CW, AM, FM	833.3	300
25-150	200	CW, AM, FM		
150-250	200	AM, FM	20.0-25.0	200-310
250-500	200	AM, FM	25.0-33.0	300
500-1000	200	AM, FM	33.0	100-300
1000-2000	200	AM, FM	1.0-2.0	670-1000
2000-4000	200	AM, FM	1.0	250-600
4000-8000	200	AM, FM	1.0-2.0	250
8000-10000	200	AM, FM	1.0	150-250
10000-50000	200	CW, AM	1.0	1000

Η παράλειψη να διεξαχθεί στο ενδοσύστημα επαρκή ανάλυση EMC ή έλεγχος πριν από την εγκατάσταση του συστήματος, έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα ή/και την ικανότητα των στρατιωτικών υποδομών, συστημάτων, πυρομαχικών και εξοπλισμού. Για παράδειγμα, μια αναθεώρηση των πολυάριθμων εκθέσεων EMI του Στόλου, στη βάση δεδομένων διαχείρισης προβλήματος του διορθωτικού προγράμματος δράσης EMI των αεροπορικών συστημάτων του Ναυτικού (ASEMICAP), καταδεικνύει ότι πολλά περιστατικά EMI του Στόλου, θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί, με τη συμπλήρωση ενός επαρκούς προγράμματος διακρίβωσης κατά την ανάπτυξη του συστήματος.

Τα προβλήματα των πεδίων και τα αποτελέσματα των δοκιμών, έδειξαν ότι η κύρια ανησυχία για την υποβάθμιση του συστήματος, είναι η περιοχή συχνοτήτων κάτω των 5 GHz, με την πλειοψηφία των μεγάλων προβλημάτων να εντοπίζονται κάτω από το 1 GHz. Κατά το συντονισμό του συστήματος, η μέγιστη σύζευξη λαμβάνει χώρα συνήθως με το περιβάλλον. Τα χαρακτηριστικά του συντονισμού του συστήματος, η ακτινοβολία και τα καλώδια είναι συνήθως μεταξύ 1 MHz και 1 GHz.

Τα δεδομένα των δοκιμών δείχνουν μία γραμμική αύξηση, στα επίπεδα των επαγόμενων ρευμάτων των καλωδίων, με το συντονισμό της δομής με τη συχνότητα μέχρι το ένα τέταρτο (1/4) του μήκους κύματος, όπου τα επαγόμενα επίπεδα εξομαλύνονται και ταλαντώνονται πάνω και κάτω, στο επίπεδο του ενός τετάρτου μήκους κύματος με αυξανόμενη συχνότητα. Για την ανίχνευση αυτών των συντονισμών κατά τη διάρκεια της δοκιμής, είναι επιθυμητή είτε η σάρωση ή η χρήση μικρών αυξήσεων των συχνοτήτων.

Η επικράτηση των προβλημάτων σε χαμηλότερες συχνότητες μπορεί να εξηγηθεί εξετάζοντας τη σύζευξη ενός πεδίου στην ενεργό περιοχή ενός συντονισμένου ανοίγματος (aperture) ακτινοβολίας ($\lambda^2/4\pi$), το οποίο είναι ανάλογο προς το τετράγωνο του μήκους κύματος (λ) της συχνότητας. Αυτό το άνοιγμα είναι μια ιδανική περιοχή, το οποίο βελτιστοποιείται για τη σύζευξη της μέγιστης ισχύος, από ένα προσπίπτων πεδίο. Αυτή η έκφραση πολλαπλασιάζεται στη θεωρία της κεραίας με το κέρδος της κεραίας, για να προσδιοριστεί η περιοχή λήψης της κεραίας. Το κέρδος απλά υποτίθεται ότι είναι ενιαίο σε αυτή την περίπτωση. Η έννοια αυτή μπορεί να θεωρηθεί, είτε ως άμεση σύζευξη μέσω μιας εισόδου στη δομή του συστήματος, είτε απ' ευθείας σύζευξη με τη διάταξη κυκλωμάτων του υποσυστήματος, που συμπεριφέρεται ως κεραία. Καθώς το μήκος κύματος γίνεται μικρότερο με την αύξηση της συχνότητας, η περιοχή λήψης γίνεται μικρότερη και η λαμβανόμενη ισχύς είναι επίσης μικρότερη. Επιπλέον, καθώς η συχνότητα αυξάνεται, τα ηλεκτρικά καλώδια είναι συγκριτικά περιορισμένες γραμμές εκπομπής και η σύζευξη στο υποσύστημα γίνεται ακόμα λιγότερο αποτελεσματική, η οποία επιτρέπει μόνο την άμεση διείσδυση των περιβλημάτων ως το κύριο μονοπάτι σύζευξης στο υποσύστημα. Ως ένα παράδειγμα της επίδρασης του μήκους κύματος, η συζευγμένη ισχύς σε ένα συντονισμένο άνοιγμα ακτινοβολίας των 10 MHz, για μια δεδομένη πυκνότητα ισχύος, θα είναι ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερη από τη συζευγμένη ισχύ σε ένα συντονισμένο άνοιγμα ακτινοβολίας των 10 GHz για την ίδια πυκνότητα ισχύος:

$$(\lambda_1/\lambda_2)^2 = \left(\frac{30\text{μέτρα}}{0.03\text{μέτρα}}\right)^2 = 1.000.000 \quad (\text{Εξ. 5.5})$$

Ο τυπικός εξοπλισμός δοκιμών, που χρησιμοποιείται για τη CW και τις δοκιμές των σημάτων με υψηλά ποσοστά ενέργειας στην περίοδο του χρόνου (duty cycle), είναι οι ενισχυτές λυχνίας/τρανζίστορ ευρυζωνικής κατανομής και ενισχυτές λυχνίας οδεύοντος κύματος (TWT), μαζί με κατακόρυφες μαστιγωτές, χοανοειδείς, μεγάλου μήκους κύματος ή διπολικές κεραίες. Τυπικοί εξοπλισμοί δοκιμών που χρησιμοποιούνται για τις δοκιμές παλμών, είναι ενισχυτές συντονισμένης κοιλότητας (cavity tuned), οι λυχνίες TWTs χαμηλού duty cycle, μάγνητρα και κλείστρα με χοάνες υψηλού κέρδους.

5.3.4 Υψηλής Ισχύος Μικροκυματικές Πηγές (HPM)

Το σύστημα πρέπει να πληροί τις επιχειρησιακές απαιτήσεις απόδοσης, αφού εκτεθεί στα στενής και ευρείας ζώνης περιβάλλοντα HPM. Τα εφαρμόσιμα επίπεδα πεδίου και χαρακτηριστικά παλμών HPM για ένα συγκεκριμένο σύστημα, θα πρέπει να

καθορίζονται από την Υπηρεσία Προμηθειών, με βάση τα σενάρια λειτουργίας, τις τακτικές και το είδος της αποστολής, χρησιμοποιώντας πιστοποιημένη απειλή και πηγές δεδομένων, όπως η Έκθεση Αξιολόγησης της Μέγιστης (capstone) Απειλής (θεσμικό κείμενο υπηρεσιών Στρατού των ΗΠΑ) ή κάτι αντίστοιχο. Αυτή η απαίτηση ισχύει μόνο εάν απαιτηθεί από την Υπηρεσία Προμηθειών. Η συμμόρφωση πρέπει να ελέγχεται από το σύστημα, υποσύστημα, τις δοκιμές επιπέδου εξοπλισμού, την ανάλυση ή ένα συνδυασμό αυτών.

5.3.4.1 Απαίτηση

Η περιοχή των πηγών HPM αντιμετωπίζεται ως μια απειλή που ακτινοβολεί ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς υψηλής ισχύος, που προορίζονται να διακόψουν ή να καταστρέψουν τα ηλεκτρονικά συστήματα. Υπάρχουν διάφορες άλλες χρήσεις για τις συσκευές HPM, όπως στα ραντάρ ή σε τεχνολογίες ηλεκτρονικού πολέμου. Οι συσκευές HPM ονομαστικά, παράγουν παλμό μέγιστης ισχύος 100 MW ή μεγαλύτερο. Ορισμένες συσκευές παράγουν ένα μόνο παλμό, ενώ άλλες παράγουν πολλαπλούς παλμούς. Μηχανισμοί διοχέτευσης μπορεί να είναι ένα άτομο, οχήματα ή μεγάλες επίγειες εγκαταστάσεις. Πιθανές συσκευές HPM έχουν κατηγοριοποιηθεί τις προηγούμενες δεκαετίες και οι βασικές συσκευές του υλικού είναι διαθέσιμες. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των συσκευών HPM είναι ένα ζήτημα, δεδομένου ότι είναι συχνά άγνωστο στο χρήστη του όπλου, εάν επιτεύχθηκε κάποια διακοπή λειτουργίας ή βλάβη. Η σύζευξη στο σύστημα ποικίλλει σημαντικά, ανάλογα με διάφορες παραμέτρους, όπως οι πλευρικές γωνίες (aspect angle).

Τα επιχειρησιακά σενάρια και το είδος της αποστολής πρέπει να εξετασθούν, για να καθορίσουν την πιθανότητα της στόχευσής τους από τέτοιες εχθρικές πηγές και τη δυνατότητα μιας τέτοιας απειλής να είναι επιτυχής, δεδομένου του σχετικά περιορισμένου εύρους αποτελεσματικότητας. Με βάση αυτά τα σενάρια λειτουργίας και το είδος της αποστολής, βάσει των οποίων τα συστήματα έχουν σχεδιασθεί για να λειτουργούν μέσα σε αυτά, πρέπει να πραγματοποιούνται εμπορικές μελέτες και αναλύσεις, για να καθορίσουν αποτελεσματικά τις αποστάσεις από τις πηγές HPM, στις οποίες τα συστήματα απαιτείται να λειτουργούν και να εκτελούν τις αποστολές τους. Είναι δυνατόν, ως αποτέλεσμα αυτών των εμπορικών μελετών και αναλύσεων, η απαίτηση HPM να μην μπορεί να εφαρμοσθεί σε ένα συγκεκριμένο σύστημα, αφού άλλα περιβάλλοντα ενέργειας RF, όπως αυτά που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.3.3 της παρούσας εργασίας, μπορεί να θέσουν αποτελεσματικά μια πιο σοβαρή απαίτηση.

Οι πίνακες 5-10 και 5-11 παρακάτω, περιέχουν μια λίστα πολλαπλών απειλών HPM και παρουσιάζουν ένα συνολικό συνδυασμό αυτών των απειλών. Οι υπόψη πίνακες, περιέχουν εντάσεις πεδίου, που υπάρχουν σε απόσταση ενός χιλιομέτρου από την στενή ζώνη απειλή HPM εξωτερικού EME και σε απόσταση 100 μέτρων για το ευρεία ζώνη HPM εξωτερικού EME. Για να προσδιορισθεί η συγκεκριμένη απειλή HPM για μια συγκεκριμένη πλατφόρμα, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται θεσμικά κείμενα των στρατιωτικών υπηρεσιών, που εξειδικεύονται σε τέτοια αντικείμενα,

όπως μία επικαιροποιημένη έκδοση της Έκθεσης Αξιολόγησης της Μέγιστης Απειλής (Capstone Threat Assessment Reports) ή αντίστοιχα κείμενα όπως για παράδειγμα το εγχειρίδιο του Υπουργείου Αμύνης των ΗΠΑ MIL-HDBK-235-8 (External Electromagnetic Environment Levels from High-Power Microwave Systems) [15]. Το MIL-HDBK- 235-8 συγκεκριμένα, παρουσιάζει τη μέθοδο της χρήσης/εκτόξευσης για κάθε συγκεκριμένο σύστημα απειλής. Παραδείγματα μεθόδου χρήσης/εκτόξευσης είναι ο κινούμενος άνθρωπος, κινούμενο πλοίο/άμυνα εδάφους, UAV/επιθετική ενέργεια μέσω αέρα, επίθεση μέσω πυρομαχικών, σταθερή αεράμυνα κλπ. Επιπλέον, θα πρέπει να καθορισθεί το εύρος της απόστασης ασφαλείας (stand off) κατά τη μέθοδο χρήσης/εκτόξευσης, με βάση τα επιχειρησιακά σενάρια, τακτικές και/ή τα είδη των αποστολών των συστημάτων τους. Όταν αυτές οι αποστάσεις καθορίζονται, το ακριβές περιβάλλον HPM για κάθε απειλή, δύναται να υπολογισθεί.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-10: Εξωτερικά ΕΜΕ για Στενής Ζώνης HPM

Εύρος Συχνότητας (MHz)	Ηλεκτρικό Πεδίο (kV/m σε 1 km)
2000 - 2700	18.0
3600 - 4000	22.0
4000 - 5400	35.0
8500 - 11000	69.0
14000 - 18000	12.0
28000 - 40000	7.5

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-11: Εξωτερικά ΕΜΕ για Ευρείας Ζώνης HPM

Εύρος Συχνότητας (MHz)	Κατανομή Ηλεκτρικού Πεδίου Ευρείας Ζώνης (mV/m/MHz σε 100 m)
30 - 150	33000
150 - 225	7000
225 - 400	7000

Εύρος Συχνότητας (MHz)	Κατανομή Ηλεκτρικού Πεδίου Ευρείας Ζώνης (mV/m/MHz σε 100 m)
400 - 700	1330
700 - 790	1140
790 - 1000	1050
1000 - 2000	840
2000 - 2700	240
2700 - 3000	80

Οι στενής ζώνης και ευρείας ζώνης HPM πηγές, ορίζονται ως εξής:

- α. Στενής ζώνης: Ένα σήμα ή κυματομορφή με $rbw < 1\%$.
- β. Ευρείας ζώνης: Ένα σήμα ή κυματομορφή με $rbw > 1\%$.

γ. rbw - ποσοστό εύρους ζώνης: ο λόγος των σημείων του φάσματος όπου επιτυγχάνεται η διαφορά των 3 dB (η ισχύ στο ήμισυ της μέγιστης) με την κεντρική συχνότητα.

Τα στενής ζώνης HPM, χρησιμοποιούν παλμική ισχύ για την κατεύθυνση μιας δέσμης ηλεκτρονίων διόδου ή παρόμοιου φορτίου, που μετατρέπει τελικά την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων σε συνεκτική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι πηγές HPM στενής ζώνης, δύνανται συχνά να αποδώσουν πάνω από 1 GW της ισχύος, σε μικρά «ξεσπάσματα» (συνήθως $< 100\text{ns}$ του πλάτους του παλμού).

Οι πηγές ευρείας ζώνης, συμπεριλαμβανομένων των HPM πηγών υπερευρείας ζώνης (UWB), χρησιμοποιούν γρήγορες τεχνικές μεταγωγής, για να κατευθύνουν τις γεννήτριες παλμών. Το περιεχόμενο της συχνότητας του παλμού εξόδου μπορεί να απλωθεί σε πολλά δεκαδικά της συχνότητας. Παρά το γεγονός ότι οι επαναλαμβανόμενοι παλμοί σε μικρές δόσεις (π.χ 100 παλμοί σε 100 Hz) έχουν αποδειχθεί, αυτοί τείνουν να είναι σε ουσιαστικά χαμηλότερα επίπεδα ισχύος πηγής (τυπικά 15 φορές κατώτερη). Ως εκ τούτου, μόνο ριπές παλμών λαμβάνονται υπόψη.

Για ευρυζωνικές πηγές HPM, ο τυπικός ρυθμός επανάληψης είναι από 5 έως 1000 Hz. Εφόσον οι πηγές HPM έχουν πολλές εκφάνσεις, ο στόχος κατά τον ορισμό του HPM περιβάλλοντος, είναι να εξασφαλισθεί η ευελιξία για την αντιμετώπιση πολλών διαφορετικών επιχειρησιακών σεναρίων και τρόπων εργασίας. Κατά τον υπολογισμό του περιβάλλοντος HPM, το πιθανό εύρος του « r » της εμπλοκής (engaging) μιας

δεδομένης απειλής εναντίον ενός στρατιωτικού συστήματος, πρέπει να προσδιορίζεται από το ηλεκτρικό πεδίο που ποικίλλει ανάλογα με την απόσταση. Οι ακόλουθες εξισώσεις χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος (power density) μακρινού πεδίου σε μία δεδομένη απόσταση r :

$$p_d = \frac{\varepsilon G P_{in}}{4\pi r^2} \quad (\text{Εξ. 5.6})$$

Όπου p_d η πυκνότητα ισχύος στην απόσταση r , με κέρδος κεραίας G , με ισχύ εισόδου στην κεραία P_{in} και συντελεστή προσαρμογής της κεραίας ε .

$$p_d = \frac{E^2}{Z_0} \quad (\text{Εξ. 5.7})$$

Όπου Z_0 η αντίσταση στον κενό χώρο ($Z_0=377$)

Οι δύο εξισώσεις δείχνουν ότι το μέγεθος του E , είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα υπολογισμού περιβάλλοντος ηλεκτρομαγνητικού παλμού (HPM) ευρείας ζώνης, για εύρος (30-150 MHz), με μία περιοχή εμπλοκής των 10 χιλιομέτρων, είναι να πάρουμε το E στα 100 μέτρα από τον πίνακα 5-11 (33000/Mv/m/MHz) και να το υπολογίσουμε για τα 10 χιλιόμετρα με τον ακόλουθο τύπο:

$$E = \frac{33000 \cdot 100}{10000} = \frac{330mV}{m} / MHz \quad (\text{Εξ. 5.8})$$

Οι παράμετροι της πηγής HPM, όπως πλάτος παλμού, συχνότητα επανάληψης παλμού, διαμόρφωση και άλλες λεπτομερείς πληροφορίες καθορίζονται στα αντίστοιχα εγχειρίδια (MIL-HDBK-235-8).

Ένα λεπτομερές παράδειγμα καθορισμού HPM περιβάλλοντος, ενός μαχητικού αεροσκάφους, αναλύεται όπως παρακάτω:

α. Θεωρείται ότι ο Πίνακας 5-12 περιέχει ειδική λίστα όλων των απειλών HPM στενής ζώνης και ο Πίνακας 5-13 περιέχει ειδική λίστα όλων των απειλών HPM ευρείας ζώνης. Οι Πίνακες 5-12 και 5-13 δεν αντιστοιχούν στους Πίνακες 5-10 και 5-11 για το συγκεκριμένο παράδειγμα.

β. Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου ευρείας ζώνης, για κάθε συγκεκριμένη απειλή στον Πίνακα 5-14 ορίζεται σε (mV/m/MHz σε 100 μέτρα) για κάθε συχνότητα «bin» (ο λόγος της εξεταζόμενης συχνότητας προς τον αριθμό των αριθμό δειγματοληψιών του φάσματος στο πεδίο του χρόνου). Ο Πίνακας 5-14 περιέχει τις καθορισμένες περιοχές απόστασης ασφαλείας (stand off) για αυτό το γενικό παράδειγμα μαχητικού αεροσκάφους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-12: Απειλές ΗΡΜ Στενής Ζώνης (ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ)

Πηγή Απειλής	Εύρος Συχνότητας (MHz)	Ηλεκτρικό Πεδίο (kV/m σε 1 km)
1	2000 - 2700	20.0
2	4000 - 5400	40.0
3	8500 - 11000	60.0
4	14000 - 18000	10.0

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-13: Απειλές ΗΡΜ Ευρείας Ζώνης (ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ)

Πηγή Απειλής	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz
	30 - 150	150 - 225	225 - 400	400 - 700	700 - 790	790 - 1000	1000 - 2000	2000 - 2700	2700 - 3000
5	50*	200*	300*						
6		400*	700*						
7		60*	50*	40*	30*	20*	10*	10*	10*

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

* Κατανομή Ηλεκτρικού Πεδίου Ευρείας Ζώνης (mV/m/MHz σε 100 m)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-14: Περιοχές Απόστασης Ασφαλείας για Γενικά Μαχητικά Αεροσκάφη (ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ)

Απειλή	Μέθοδος χρήσης/διοχέτευσης-εκτόξευσης	Περιοχή (m)
1	Σταθερή Αεράμυνα	5000
2	Σταθερή Αεράμυνα	5000
3	Σταθερή Αεράμυνα	5000

Απειλή	Μέθοδος χρήσης/διοχέτευσης-εκτόξευσης	Περιοχή (m)
4	Σταθερή Αεράμυνα	5000
5	Σταθερή Αεράμυνα	500
6	Μεταφερόμενος άνθρωπος	100
7	Κινούμενο πλοίο/άμυνα εδάφους	1000

γ. Ο Πίνακας 5-15 είναι η υπολογισμένη απειλή HPM στενής ζώνης για το σύστημα. Αυτή έχει υπολογισθεί, πολλαπλασιάζοντας τις ειδικές απειλές HPM στενής ζώνης που παρατίθενται στον Πίνακα 5-12, με την αναλογία του 1 km και της απόστασης ασφαλείας που κυμαίνεται για το παράδειγμα του γενικού μαχητικού αεροσκάφους στον Πίνακα 5-14. Ο Πίνακας 5-16 είναι η υπολογισμένη απειλή HPM ευρείας ζώνης για το σύστημα. Αυτή υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τις συγκεκριμένες απειλές HPM ευρείας ζώνης, που αναφέρονται στον Πίνακα 5-13, με την αναλογία των 100 m και της απόστασης ασφαλείας που κυμαίνεται για το παράδειγμα του γενικού μαχητικού αεροσκάφους στον Πίνακα 5-14. Η μεγαλύτερη τιμή για κάθε συχνότητα "bin" διακρίνεται με μεγαλύτερη γραμματοσειρά και ευκρίνεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-15: Απειλές HPM Στενής Ζώνης Διαιρούμενες ανά Περιοχή

Πηγή Απειλής	Εύρος Συχνότητας (MHz)	(kV/m)
1	2000 - 2700	4.0
2	4000 - 5400	8.0
3	8500 - 11000	12.0
4	14000 - 18000	2.0

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-16: Απειλές HPM Ευρείας Ζώνης Διαιρούμενες ανά Περιοχή

Πηγή Απειλής	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz	MHz
	30 - 150	150 - 225	225 - 400	400- 700	700- 790	790 - 1000	1000- 2000	2000- 2700	2700- 3000
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:									
* Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε ζώνης (mV/m/MHz)									
6		400*	700*						
7		6*	5*	4*	3*	2*	1*	1*	1*

Οι μικροκυματικές (HPM) πηγές υψηλής ισχύος αποτελούν για μεγάλη περίοδο, το αντικείμενο έρευνας ως πιθανά όπλα για πολεμικές συγκρούσεις, δολιοφθορές, και τρομοκρατικές ενέργειες. Εξ' αιτίας των περιορισμών διαβάθμισης, οι λεπτομέρειες αυτής της εργασίας είναι σχετικά άγνωστες εκτός της στρατιωτικής κοινότητας. Λόγω του εύρους συχνοτήτων των πηγών αυτών (1 έως 40 GHz), το HPM έχει τη δυνατότητα να διεισδύει, όχι μόνο στην πρόσοψη (front-end) του ασυρμάτου, αλλά και να επιτυγχάνει μικρές διεισδύσεις στα περιβλήματα θωράκισης του συστήματος ή του εξοπλισμού. Σε υψηλά επίπεδα, υπάρχει η πιθανότητα για παρουσίαση βλαβών σε συσκευές και κυκλώματα. Ωστόσο, οι τάσεις που επάγονται από τα πεδία, είναι αντιστρόφως ανάλογες με το μήκος κύματος, σε συχνότητες όπου ο εξοπλισμός είναι πολλαπλάσιος σε διάσταση του μήκους κύματος. Συνεπώς, οι υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας, δε συσχετίζονται απαραίτητα με την πιο αποτελεσματική απόδοση του όπλου HPM.

5.3.4.2 Διακρίβωση

Για συστήματα με μια απαίτηση HPM, η διακρίβωση είναι αναγκαία, για να αποδειχθεί ότι τα εφαρμοζόμενα μέτρα παρέχουν την απαιτούμενη προστασία. Τόσο η ανάλυση, όσο και η δοκιμή, είναι συνήθως απαραίτητες για τον έλεγχο της απόδοσης του συστήματος.

Ο καθορισμός των κατάλληλων δοκιμών επιπέδων HPM περιβάλλοντος, απαιτεί λεπτομερή γνώση του όπλου HPM, του σεναρίου εμπλοκής του, του επιχειρησιακού σεναρίου προστασίας του συστήματος στόχου και της θωράκισης από την περιβάλλουσα υποδομή. Το προφανές αντίμετρο είναι να προστατευθεί ή να «σκληρύνει» ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός. Επί του παρόντος, μόνο τα κρίσιμα συστήματα και ο εξοπλισμός πτήσεων και αποστολών θωρακίζονται (σκληραίνουν). Ο επανεξοπλισμός της «σκληρύνσης» του υπάρχοντος εξοπλισμού είναι δύσκολος

και μπορεί να είναι και δαπανηρός. Το παραπάνω παράδειγμα στις οδηγίες της απαίτησης (5.3.4.1) του γενικού μαχητικού αεροσκάφους, εκθέτει λεπτομερώς πώς καθορίζεται το κατάλληλο περιβάλλον HPM για ένα συγκεκριμένο σύστημα. Οι δοκιμές για τις απειλές HPM στενής και ευρείας ζώνης, πρέπει να πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας την ακριβή κυματομορφή της απειλής ή όσο πιο δυνατόν είναι τεχνικά εφικτό, τις ακριβείς κυματομορφές που ορίζονται για κάθε απειλή σε αντίστοιχο τεχνικό εγχειρίδιο (MIL-HDBK-235-8). ή επιπλέον για τις απειλές ευρείας ζώνης, χρησιμοποιώντας μια κυματομορφή ευρείας ζώνης, όπως οι διπλές εκθετικές (double exponentials), που καλύπτουν την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου ευρείας ζώνης που υπολογίζεται.

Το HPM δεν απαιτεί μοναδικές τεχνικές «σκλήρυνσης» (hardening). Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα που επιβάλλονται σε ένα σύστημα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη των μεθόδων «σκλήρυνσης» και της απαιτούμενης διακρίβωσης.

5.3.5 Κεραυνοί

Το σύστημα θα πρέπει να πληροί τις επιχειρησιακές απαιτήσεις απόδοσης, τόσο για τις άμεσες όσο και για τις έμμεσες επιπτώσεις των κεραυνών. Τα πυρομαχικά θα πρέπει να πληρούν τις επιχειρησιακές απαιτήσεις απόδοσης, όταν υποστούν ένα εγγύς κτύπημα σε συνθήκες έκθεσης και ένα άμεσο κτύπημα σε συνθήκες αποθήκευσης. Τα πυρομαχικά θα πρέπει παραμείνουν ασφαλή, τόσο κατά τη διάρκεια, όσο και μετά από ένα άμεσο κτύπημα σε εκτεθειμένες συνθήκες. Το Σχήμα 5-2 και ο Πίνακας 5-17, περιέχουν τις πτυχές του περιβάλλοντος κεραυνών που προκύπτουν από άμεσο κτύπημα και σχετίζονται με την προστασία της πλατφόρμας από τις έμμεσες συνέπειες. Ο Πίνακας 5-18, θα πρέπει να χρησιμοποιείται για το περιβάλλον εγγύς πτώσης κεραυνού. Η συμμόρφωση πρέπει να ελέγχεται από δοκιμές επιπέδου συστήματος, υποσυστήματος, εξοπλισμού και εξαρτημάτων [π.χ οι σφαιρικοί θόλοι των αεροσκαφών(radome)], την ανάλυση ή ένα συνδυασμό αυτών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-17: Παράμετροι Κυματομορφών Έμμεσων Επιπτώσεων Κεραυνού

Συνιστώσα ρεύματος	Περιγραφή	$i(t) = i_0 (e^{-at} - e^{-\beta t})$, όπου t ο χρόνος σε δευτερόλεπτα (s)		
		I_0 (Amperes)	$\alpha(s^{-1})$	$\beta(s^{-1})$
A	Σφοδρό κτύπημα	218,810	11,354	647,265
Ah	πρώτο κτύπημα επιστροφής ζώνης μετάβασης	164,903	16,065	858,888
B	Ενδιάμεσο ρεύμα	11,300	700	2,000

Συνιστώσα ρεύματος	Περιγραφή	$i(t) = i_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$, όπου t ο χρόνος σε δευτερόλεπτα (s)		
		i_0 (Amperes)	α (s ⁻¹)	β (s ⁻¹)
C	Μέσο ρεύμα	400 για 0.5 s	Μη εφαρμόσιμο	Μη εφαρμόσιμο
D	Ρεύμα επόμενου κτύπηματος	109,405	22,708	1,294,530
D/2	Πολλαπλό κτύπημα	54,703	22,708	1,294,530
H	Πολλαπλό ξέσπασμα	10,572	187,191	19,105,100

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

Η συνιστώσα ρεύματος Ah εφαρμόζεται στη ζώνη μετάβασης 1C και αντιπροσωπεύει το εκτιμώμενο σχήμα του πρώτου πλήγματος επιστροφής (συνιστώσα A) σε υψηλότερα υψόμετρα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-18: Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία από Κοντινά Χτυπήματα Κεραυνού

Ρυθμός μεταβολής μαγνητικού πεδίου στα 10 μέτρα	2.2×10^9 A/m/s
Ρυθμός μεταβολής ηλεκτρικού πεδίου στα 10 μέτρα	6.8×10^{11} V/m/s

5.3.5.1 Απαίτηση

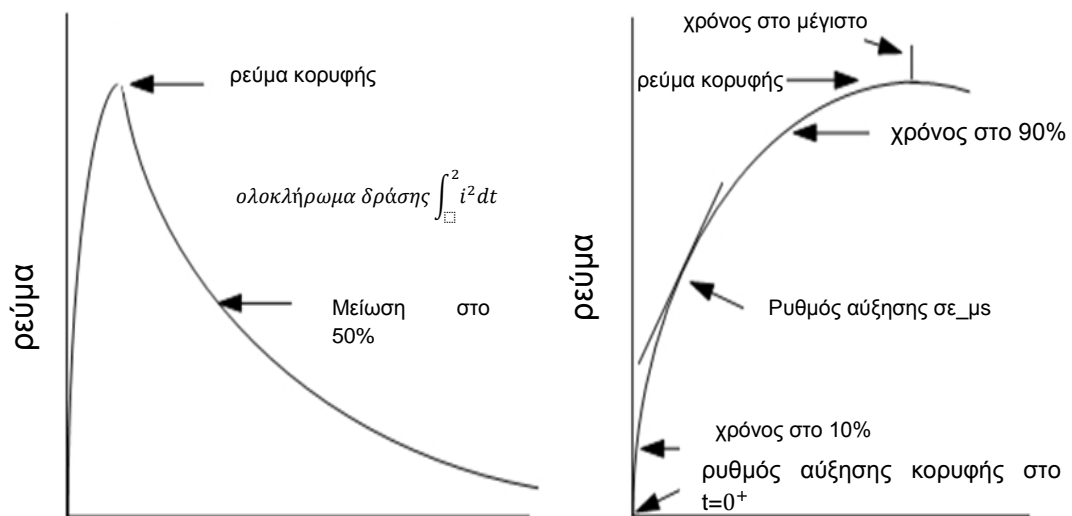
Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι ο κεραυνός είναι επικίνδυνος για τα συστήματα, τα οποία πρέπει να περιλαμβάνουν διατάξεις για την προστασία τους από κεραυνούς. Δεν υπάρχει καμία γνωστή τεχνολογία για την πρόληψη από χτυπήματα κεραυνών. Ωστόσο, οι επιδράσεις των κεραυνών μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τον κατάλληλο σχεδιασμό τεχνικών.

Οι επιδράσεις των κεραυνών στα συστήματα διακρίνονται στις άμεσες (φυσικές) και έμμεσες (ηλεκτρομαγνητικές) επιδράσεις. Οι φυσικές συνέπειες των κεραυνών είναι η φωτιά και η διάβρωση, οι εκρήξεις και οι διαρθρωτικές παραμορφώσεις που προκαλούνται από τον κεραυνό, καθώς και τα κρουστικά κύματα υψηλής πίεσεως και οι μαγνητικές δυνάμεις που παράγονται από τα συσχετιζόμενα υψηλά ρεύματα. Οι έμμεσες επιπτώσεις προκύπτουν από το ηλεκτρομαγνητικά πεδία, που σχετίζονται με κεραυνούς και την αλληλεπίδραση αυτών των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, με τον εξοπλισμό του συστήματος. Επικίνδυνες επιπτώσεις μπορεί να προκληθούν και από κεραυνό που δεν έρχεται σε άμεση επαφή με τη δομή του συστήματος (κοντινά

χτυπήματα). Σε ορισμένες περιπτώσεις, τόσο οι φυσικές όσο και οι ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις μπορεί να εμφανιστούν στο ίδιο εξάρτημα. Ένα παράδειγμα θα ήταν μια πτώση κεραυνού σε μια κεραία, η οποία προκαλεί ζημιά στην κεραία και διοχετεύει επίσης, καταστροφικές τάσεις στον πομπό ή δέκτη που συνδέεται με τη συγκεκριμένη κεραία. Το θεσμικό κείμενο του Υπουργείου Μεταφορών των ΗΠΑ (Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας) DOT/FAA/CT-89/22 [19] είναι μια εξαιρετική πηγή χαρακτηριστικών του κεραυνού και κατευθύνσεων σχεδιασμού.

Ένας πρόσθετος λόγος για τον οποίο απαιτείται η προστασία από κεραυνούς, είναι οι πιθανές επιπτώσεις στο προσωπικό. Για παράδειγμα, σοβαρή ηλεκτροπληξία μπορεί να προκληθεί από ρεύματα και τάσεις, που επάγονται μέσω μηχανικών καλωδίων ελέγχου ή καλωδίωσης που δρομολογείται στο πιλοτήριο ενός αεροσκάφους, από τις επιφάνειες ελέγχου ή άλλα ηλεκτρονικά υλικά που χτυπήθηκαν από κεραυνό. Χτυπήματα από τα έντονα ηλεκτρικά πεδία μιας καταιγίδας, δύνανται επίσης να προκληθούν στα πληρώματα των πτήσεων, που βρίσκονται κάτω από διηλεκτρικά καλύμματα, όπως τα κουβούκλια των αεροσκαφών. Ένα από τα πιο ενοχλητικά αποτελέσματα είναι στιγμιαία τύφλωση, η οποία εμφανίζεται πάντα σε ένα μέλος του πληρώματος πτήσης που κοιτάζει έξω από το αεροσκάφος στην κατεύθυνση του κεραυνού και μπορεί να διαρκέσει για 30 δευτερόλεπτα ή περισσότερο.

Στον Πίνακα 5-17, οι έμμεσες περιβαλλοντικές επιδράσεις ορίζονται, από τον καθορισμό των παραμέτρων μιας διπλής εκθετικής κυματομορφής (εκτός από τη συνιστώσα C, που είναι ένας ορθογώνιος παλμός) για τις διάφορες συνιστώσες του ηλεκτρικού ρεύματος. Το Σχήμα 5-2 αναπαριστά ένα μοντέλο ιδιοτήτων των περιπτώσεων κεραυνού, που περιλαμβάνει μια σειρά χτυπημάτων του πιο σημαντικού ρεύματος, κατανεμημένα πάνω στο χρόνο (πολλαπλά χτυπήματα) και πολλά μεμονωμένα χτυπήματα του χαμηλότερου ρεύματος, πιο στενά κατανεμημένα και ομαδοποιημένα σε ριπές πάνω στο χρόνο (πολλαπλές ριπές). Το μοντέλο αυτό προορίζεται να συνδέεται μόνο με δυνητικές διαταραχές των ηλεκτρονικών διατάξεων, μέσω έμμεσων επιδράσεων και δεν προορίζονται για την αντιμετώπιση των ζημιών λόγω των φυσικών επιδράσεων. Το Σχήμα 5-2 προσδιορίζει τα σημαντικά χαρακτηριστικά της διπλής εκθετικής κυματομορφής και του μετώπου κύματος που αναφέρονται στον Πίνακα 5-19 για κάθε μία από τις έμμεσες επιπτώσεις των συνιστωσών του ρεύματος. Τόσο οι άμεσες όσο και οι έμμεσες επιπτώσεις περιβάλλοντος προέρχονται από την ARP 5412 [20] της SAE. Η SAE είναι μία παγκόσμια οργάνωση κοινωφελούς σκοπού, που αποτελείται από επιστήμονες, μηχανικούς και επαγγελματίες της αεροδιαστημικής και της αυτοκίνησης για την προώθηση της γνώσης και την εξέλιξη της επιστήμης των αυτοκινούμενων μέσων.



ΣΧΗΜΑ 5-2: Παράμετροι Κυματομορφής των Έμμεσων Επιπτώσεων του Κεραυνού

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-19: Χαρακτηριστικά Κυματομορφής των Έμμεσων Επιπτώσεων του Κεραυνού

Συνιστώσα ρεύματος	Ρεύμα κορυφής (kA)	Ολοκλήρωμα δράσης (A^2s)	Μείωση στο 50% (μs)	Χρόνος στο 10% (μs)	Χρόνος στο 90% (μs)	Χρόνος κορυφής (μs)	Ρυθμός αύξησης (A/s) στα 0.5 μs	Ρυθμός αύξησης κορυφής $t=0^+$ (A/s)
A	200	2.0×10^6	69	0.15	3.0	6.4	1.0×10^{11} στα 0.5 μs	1.4×10^{11}
B	Παράγει μέσο ρεύμα των 2 kA πάνω από μία περίοδο των 5 millisecond							
C	Ορίζεται ως ορθογώνια κυματομορφή για σκοπούς ανάλυσης των 400 A για 500 milliseconds							
D	100	0.25×10^6	34.5	0.08	1.5	3.18	1.0×10^{11} στα 0.25 μs	1.4×10^{11}
D/2	50	6.25×10^4	34.5	0.08	1.5	3.18	0.5×10^{11} στα 0.25 μs	0.7×10^{11}

Συνιστώσα ρεύματος	Ρεύμα κορυφής (kA)	Ολοκλήρωμα δράσης (A^2s)	Μείωση στο 50% (μs)	Χρόνος στο 10% (μs)	Χρόνος στο 90% (μs)	Χρόνος κορυφής (μs)	Ρυθμός αύξησης (A/s)	Ρυθμός αύξησης κορυφής $t=0^+$ (A/s)
H	10	-	4.0	0.0053	0.11	0.24	-	2.0×10^{11}

Ο Πίνακας 5-18 είναι μια ειδική περίπτωση, που εφαρμόζεται σε πυρομαχικά για μία πτώση κεραυνού πλησίον αυτών. Οι έμμεσες προϋποθέσεις του κεραυνού ορίζονται στον Πίνακα 5-17 και στο Σχήμα 5-2, που σχετίζονται με τις ηλεκτρικές ιδιότητες μιας άμεσης σύζευξης (attachment) του κεραυνού. Τα πυρομαχικά δεν απαιτείται γενικώς να χρησιμοποιηθούν, μετά από μια άμεση σύνδεση με την εκτεθειμένη κατάσταση. Ωστόσο, θα πρέπει να επιβιώσουν από τις ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις σύζευξης μιας κοντινής πτώσης κεραυνού, όπως ορίζονται στον Πίνακα 5-18. Τα πυρομαχικά απαιτείται να μην υποστούν φθορά, μετά από μία άμεση σύνδεση στις αποθήκες όπου αποθηκεύονται. Οι παράμετροι μιας κοντινής πτώσης στον Πίνακα 5-18 προέρχονται από τη μοντελοποίηση του κεραυνού ως μιας κάθετης γραμμής φόρτισης. Η χρήση του νόμου Ampere για μια σταθερή ένταση του μαγνητικού πεδίου σε απόσταση "r" μακριά από το κανάλι και η χρήση της χρονικής παραγώγου παράγει:

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{dI(t)}{dt} / 2\pi r \quad (\text{Εξ. 5.9})$$

Όπου H είναι το μαγνητικό πεδίο, I είναι το ρεύμα και r η απόσταση από το κανάλι. Χρησιμοποιώντας το μέγιστο ρυθμό μεταβολής, για μία συνιστώσα A του ρεύματος στον Πίνακα 5-19, παράγεται ο ρυθμός μεταβολής του μαγνητικού πεδίου στον Πίνακα 5-18, για αποστάσεις των 10 μέτρων. Για ασφάλεια από τους κινδύνους, λαμβάνεται υπόψη μια ελάχιστη απόσταση των 10 μέτρων. Μικρότερες αποστάσεις διαχωρισμού θεωρούνται ως περιστατικό άμεσου χτυπήματος. Εναλλακτικές αποστάσεις διαχωρισμού για συγκεκριμένα συστήματα μπορούν θεωρητικά να υπολογίζονται με τη χρησιμοποίηση των τεχνικών υπολογισμού του «κώνου προστασίας (cone of protection)» ή της «κυλιόμενης σφαίρας (rolling sphere)». Επιπλέον, για την επιβίωση του συστήματος, διαχωριστικές αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 μέτρων μπορεί να είναι αποδεκτές, όταν συνδυάζονται με την κατάλληλη ανάλυση και αιτιολόγηση. Η ανάπτυξη του ρυθμού μεταβολής ηλεκτρικού πεδίου είναι πάρα πολύ περίπλοκη και βασίζεται σε μοντελοποίηση ενός κάθετου οδηγού (leader-καναλιού ιονισμένου αέρα), που πλησιάζει τη γη ως μία γραμμή φορτίου σε μία καθορισμένη απόσταση από το έδαφος.

Καθώς ένας κεραυνός πλησιάζει σε ένα αντικείμενο, τα αποτελέσματα προσεγγίζουν τους ορισμούς για τον άμεσο ή έμμεσο κεραυνό. Η ένταση κορυφής του πεδίου ενός εξαιρετικά εγγύς κεραυνού, μπορεί να φτάσει τα 3×10^6 V/m. Για κάθε σύστημα που σκληραίνει έναντι των καθορισμένων απαιτήσεων των έμμεσων συνεπειών των

κεραυνών, λαμβάνεται υπόψη και η προστασία από κοντινούς κεραυνούς. Πολλά επίγεια συστήματα δύνανται να υπόκεινται σε κάποιους κινδύνους, προκειμένου το σύστημα να λειτουργεί μόνο μετά από μια πτώση κεραυνού μέτριας έντασης σε μια λογική απόσταση. Για παράδειγμα, η απαίτηση για τον εξοπλισμό σε ένα τακτικό οχυρωματικό έργο (tactical center), να επιβιώσει στο 90% των περιπτώσεων πτώσεων κεραυνού στα 50 μέτρα, μπορεί να αντιπροσωπεύει μια λογική κριτηρίων κινδύνου για το έργο. Αυτό το είδος της απαίτησης, θα οδηγήσει σε ένα υψηλό επίπεδο γενικής προστασίας από κεραυνούς με μειωμένο κόστος σχεδιασμού και δοκιμών.

Τα περιβάλλοντα των άμεσων και έμμεσων επιπτώσεων, ενώ περιγράφουν την ίδια απειλή, ορίζονται διαφορετικά όσον αφορά στη χρήση τους. Το περιβάλλον των άμεσων επιπτώσεων είναι προσανατολισμένο προς την υποστήριξη μεθοδολογίας των διαθέσιμων δοκιμών για την εκτίμηση της ικανότητας του υλικού να προστατευθεί έναντι της απειλής. Το περιβάλλον των έμμεσων συνεπειών «γέρνει» περισσότερο στην υποστήριξη της ανάλυσης. Ενώ αυτά τα περιβάλλοντα έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογές αεροσκαφών, θα πρέπει να αντιπροσωπεύουν ένα λογικό ορισμό περιβάλλοντος για άλλα συστήματα. Ορισμένες πρόσφατες μετρήσεις των φυσικών κεραυνών, έχουν δείξει ότι το φασματικό περιεχόμενο κάποιων χτυπημάτων σε υψηλότερες συχνότητες, μπορεί να είναι μεγαλύτερο από ό,τι παρουσιάζεται από τα καθορισμένα πρότυπα κεραυνών. Για μικρά συστήματα, θα μπορούσε να υπάρξει κάποια βελτίωση της σύζευξης λόγω της διέγερσης των συντονισμών.

Εκτός του κειμένου ARP 5412 που αναφέρθηκε προηγουμένως, η SAE (Οργάνωση Μηχανικών Αυτοκίνησης) AE-2 (Κεραυνική Επιτροπή Αεροδιαστημικής) επιτροπή, έχει εκδώσει αρκετά άλλα έγγραφα που απευθύνονται σε βάθος στον τομέα του κεραυνού. Το πρότυπο ARP 5415 [21] καθώς και η συμβουλευτική εγκύκλιος AC 20-136 της Ομοσπονδιακής Πολιτικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ (FAA) [22] ασχολούνται με την πιστοποίηση των αεροσκαφών για την προστασία από τις έμμεσες επιπτώσεις, το ARP 5577 [23] παρέχει καθοδήγηση σχετικά με την πιστοποίηση των αεροσκαφών για την προστασία από τις άμεσες επιδράσεις και το ARP 5414 [24] αντιμετωπίζει τις μεταβαλλόμενες καταστάσεις των κεραυνών για τα αεροσκάφη και το ARP 5416 [25] αναλύει τη μεθοδολογία των δοκιμών για την αξιολόγηση τόσο των άμεσων, όσο και των έμμεσων επιπτώσεων του κεραυνού.

Ενώ όλα τα αερομεταφερόμενα συστήματα πρέπει να προστατεύονται από τις συνέπειες του κεραυνού, δεν απαιτούν όλα το ίδιο επίπεδο προστασίας. Για παράδειγμα, ένας πύραυλος εκτοξευόμενος από αέρα, πιθανόν να απαιτείται να προστατευθεί μόνο στο βαθμό που είναι αναγκαίο, για την αποτροπή βλάβης του αεροσκάφους που μεταφέρει το βλήμα. Το σύστημα πρέπει να παραμείνει ασφαλές για λειτουργία, τόσο κατά τη διάρκεια, όσο και μετά από ένα άμεσο κτύπημα και όλα τα συστήματα της αποστολής θα επανέλθουν στις προ του χτυπήματος καταστάσεις λειτουργίας τους.

Η προστασία από τις άμεσες επιπτώσεις σε όλα τα μεταλλικά αεροσκάφη έχει γενικά περιορισθεί στην προστασία του συστήματος καυσίμου, των κεραιών και των σφαιρικών θόλων (radomes). Στα περισσότερα αεροσκάφη που απωλέσθησαν λόγω χτυπήματος κεραυνού, το αποτέλεσμα οφειλόταν στο σχηματισμό τόξου στη δεξαμενή καυσίμου και την έκρηξη. Άλλες απώλειες έχουν προκληθεί από έμμεσες επιπτώσεις ηλεκτρικού τόξου σε ηλεκτρική καλωδίωση στις δεξαμενές καυσίμων. Δεδομένου ότι τα αεροσκάφη έχουν κατασκευαστεί με μη μεταλλικές δομές, η προστασία του συστήματος καυσίμου γίνεται πολύ πιο δύσκολη και απαιτείται αυστηρή προσοχή στη λεπτομέρεια. Σε γενικές γραμμές, κάποια μέταλλα θα πρέπει να τοποθετηθούν και πάλι σε μη μεταλλικές κατασκευές, για να παρέχουν επαρκή προστασία από κεραυνούς. Η συμβουλευτική εγκύκλιος της FAA AC 20-53 [26] και το εγχειρίδιο χρηστών του, παρέχουν τις απαιτήσεις για την προστασία των συστημάτων καυσίμων των αεροσκαφών.

Στο αεροσκάφος, η αντικεραυνική προστασία έναντι των έμμεσων επιδράσεων έχει γίνει πολύ πιο σημαντική λόγω της αυξημένης χρήσης των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου πτήσης και κινητήρα. Επίσης, τα μη μεταλλικά στρώματα που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη για εξοικονόμηση βάρους παρέχουν λιγότερη θωράκιση, έναντι των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που σχετίζονται με κεραυνούς. Η συμβουλευτική εγκύκλιος της FAA AC 20-136 [22] και το εγχειρίδιο των χρηστών, παρέχουν πληροφορίες για την προστασία από τις έμμεσες επιπτώσεις. Το πρότυπο DO-160 [27] της RTCA (Ραδιοτεχνική Επιτροπή Εμπειρογνομώνων για την Αεροναυτική που αναπτύσσει τεχνικές οδηγίες για Κυβερνητικούς φορείς και βιομηχανίες και αποτελεί την Ομοσπονδιακή Συμβουλευτική Επιτροπή της Ομοσπονδιακής Πολιτικής Αεροπορικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ) παρέχει λεπτομερείς απαιτήσεις των έμμεσων επιπτώσεων για τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό των αεροσκαφών.

Αν τα πρότυπα των Πολιτικών Οργανισμών (π.χ τα κείμενα DO-160 και AC20-136) είναι εγκεκριμένα για χρήση, η ορολογία κινδύνου και οι διάφορες παροδικές απαιτήσεις των έμμεσων επιπτώσεων που χρησιμοποιούνται από την πολιτική αεροπορική κοινότητα, πρέπει να επανεξετάζονται σε σχέση με τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε συγκεκριμένες στρατιωτικές προμήθειες.

Για τα διαστημικά συστήματα, η εγκατάσταση εκτόξευσης αναμένεται να παρέχει προστασία για τα διαστημικά οχήματα και τα οχήματα εκτόξευσης από ένα άμεσο χτύπημα κεραυνού. Τα οχήματα διαστήματος και εκτόξευσης, δεν απαιτείται υπό κανονικές συνθήκες να επιβιώσουν από ένα άμεσο χτύπημα. Οι απαιτήσεις των έμμεσων επιδράσεων για τα οχήματα διαστήματος και εκτόξευσης, ισχύουν για τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, σε απόσταση 100 μέτρων ή μεγαλύτερη. Το σύστημα πρέπει να είναι ικανό να ανιχνεύει τυχόν απώλειες των επιχειρησιακών επιδόσεων που προκαλείται από κεραυνό πριν από την εκτόξευση.

Τα ειδικά μέτρα προστασίας για τις εγκαταστάσεις εδάφους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τους τύπους των φυσικών δομών και του εξοπλισμού που εμπλέκεται.

Συσκευές όπως τα αλεξικέραυνα, ανασχετικά, πλέγματα γείωσης στο οδόστρωμα και η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία, δύνανται να επηρεάσουν την προστασία που παρέχεται.

Τα αεροσκάφη μπορεί να εκτεθούν σε φυσικά συμβάντα χτυπημάτων ή μπορεί να προκαλέσουν το χτύπημα από κεραυνό. Το φυσικό συμβάν κεραυνού σε ένα αεροσκάφος οφείλεται στο γεγονός, ότι καθώς ένα αεροσκάφος εκτελεί πτήση μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των δύο πόλων ηλεκτρικών φορτίων (charge centers), εκτρέπει και συμπιέζει τις συνεχόμενες ισοδυναμικές γραμμές. Τα υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία θα εμφανιστούν στα άκρα του αεροσκάφους, όπου οι γραμμές είναι περισσότερο συμπιεσμένες. Εάν το αεροσκάφος ανακόψει ένα φυσικό συμβάν κεραυνού, η ερχόμενη διακλαδωτή διάδοση ηλεκτρικής διάσπασης (stepped leader), θα εντείνει το ηλεκτρικό πεδίο και θα δημιουργήσει έναν αγωγό ροής από τα άκρα του αεροσκάφους. Μία από αυτές τις ροές θα συναντηθεί με το πλησιέστερο «κλαδί» του εξελισσόμενου διακλαδωτού καναλιού (step leader), σχηματίζοντας έναν συνεχή σπινθήρα από το σύννεφο που βρίσκεται ο πόλος ηλεκτρικών φορτίων στο αεροσκάφος. Το αεροσκάφος γίνεται τμήμα της διαδρομής του οδηγού (leader) στην κίνησή του σε μια δεξαμενή φορτίου αντίθετης πολικότητας, οπουδήποτε στο ίδιο σύννεφο (χτύπημα ενδονέφους), σε ένα άλλο νέφος (χτύπημα διανέφους) ή στο έδαφος (χτύπημα νέφους-εδάφους). Στην περίπτωση των αεροσκαφών που προκαλούν χτυπήματα, τα ηλεκτρικά πεδία επάγουν οδηγούς, που αρχίζουν να διαδίδονται κατά την είσοδο και την έξοδο του αεροσκάφους. Ο κεραυνός που προκαλείται από αεροσκάφη είναι μία πολύ πιθανή περίπτωση.

Ρεύματα υψηλής έντασης εμφανίζονται, όταν η διακλαδωτή διάδοση της ηλεκτρικής εκκένωσης, συμπληρώσει τη διαδρομή μεταξύ των πόλων ηλεκτρικών φορτίων και σχηματίσει τη ροή της εκκένωσης μέσω ενός ιονισμένου καναλιού (return stroke). Αυτά τα ρεύματα υψηλής έντασης είναι συνήθως 30 έως 40 kA. Ωστόσο, υψηλότερα ρεύματα καταμετρώνται, με εντάσεις που υπερβαίνουν τα 200 kA. Το ρεύμα στη ροή εκκένωσης (return stroke) αυξάνεται ραγδαία, με τυπικές τιμές 10-20 kA/μικροδευτερόλεπτο και σποραδικές τιμές άνω των 100 kA/μικροδευτερόλεπτο. Τυπικά, το ρεύμα εξασθενεί στο μισό του μέγιστου πλάτους του, σε 20-40 μικροδευτερόλεπτα.

Η ροή εκκένωσης του κεραυνού μεταφέρει μερικά coulomb (C) του φορτίου. Τα υψηλότερα επίπεδα μεταφέρονται στις ακόλουθες δύο φάσεις του κεραυνού. Η πρώτη είναι μία ενδιάμεση φάση, με ρεύματα των μερικών χιλιάδων amperes για λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου, το οποίο μεταφέρει περίπου 20 C. Η δεύτερη είναι μια φάση συνεχούς ρεύματος, με ρεύματα της τάξης των 200 - 400 amperes, που ρέουν για 0.1 έως 1 δευτερόλεπτο και τα οποία μεταφέρουν περίπου 200 C.

Τυπικά γεγονότα κεραυνών, περιλαμβάνουν πολλές ροές (stroke) υψηλών ρευμάτων, μετά την πρώτη ροή εκκένωσης (return stroke). Αυτά συμβαίνουν σε διαστήματα μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου, καθώς διαφορετικοί θύλακες στο

σύννεφο τροφοδοτούν το φορτίο τους στο κανάλι του κεραυνού. Το μέγιστο πλάτος των επαναχτυπημάτων είναι περίπου το μισό από το αρχικό υψηλό ρεύμα κορυφής.

Όταν κεραυνός χτυπά μια πλατφόρμα, το ηλεκτρικό ρεύμα διανέμει σε όλα τα ηλεκτρικά αγωγίμα τμήματα της δομής πλατφόρμας. Τα επίπεδα ρεύματος που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της πλατφόρμας, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα εξωτερικά δομικά υλικά και τα συναφή «επιδερμικά» φαινόμενα και τη διάχυση του ρεύματος. Για τα αεροσκάφη που κατασκευάζονται από μεταλλική κατασκευή, τα ρεύματα στους εσωτερικούς αγωγούς, όπως τα θωρακισμένα καλώδια, είναι συχνά της τάξεως των 10 amperes. Για αεροσκάφη που χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες εποξειδικού γραφίτη (graphite epoxy) στη βασική τους δομή, τα ρεύματα μπορεί να είναι της τάξεως των 10 kA.

Τα εσωτερικά ρεύματα στους ηλεκτρικούς αγωγούς μέσα στις δεξαμενές καυσίμων μπορεί να προκαλέσουν ηλεκτρικό τόξο ή σπινθήρες που δύνανται δυνητικά να προκαλέσουν ανάφλεξη στους ατμούς των καυσίμων, αν η ηλεκτρική σύνδεση δεν έχει εφαρμοσθεί ορθά. Μία σημαντική πτυχή στις περιοχές ατμών των καυσίμων, είναι ότι τα ρεύματα εμφανίζονται σε όλους τους τύπους των ηλεκτρικά αγωγίμων υλικών, όπως οι σωλήνες καυσίμου, οι υδραυλικοί σωλήνες, οι γραμμές αδρανοποίησης (intering), τα μεταλλικά στηρίγματα και οι σωλήνες ηλεκτρικών αγωγών. Υπήρξαν πρόσφατες περιπτώσεις, όπου διαπιστώθηκε μετά από τέτοια συμβάντα, ότι η σύνδεση δεν εφαρμόστηκε σωστά και απαιτούνταν σημαντικές προσπάθειες επανασχεδίασης. Εμφανίζεται μια τάση για ανεπαρκή σύνδεση, όταν αμιγώς μηχανικά συστήματα εμπλέκονται και οι ανησυχίες για τον έλεγχο της διάβρωσης κυριαρχούν στις αποφάσεις.

Οι συνέπειες των κεραυνών μπορεί να προκαλέσουν φυσική βλάβη σε προσωπικό και εξοπλισμό. Σε μία από τις πολυάριθμες τεκμηριωμένες επιπτώσεις κεραυνών, αυτός εντοπίστηκε να εισάγεται στη μύτη αεροσκάφους του Ναυτικού, δρομολογήθηκε κάτω από τη δεξιά πλευρά και εξήλθε από την κορυφή της δεξιάς κάθετης ουράς. Ο πιλότος υπέστη στιγμιαία τύφλωση για 10-15 δευτερόλεπτα. Μετά την ανάκτηση της όρασης του, ο πιλότος παρατήρησε ότι η ηλεκτρική ενέργεια του πιλοτήριου είχε απολεσθεί. Μετά την παρέλευση άλλων 15 δευτερολέπτων, η ηλεκτρική ενέργεια του πιλοτηρίου εμφανίσθηκε μόνη της, χωρίς να υπάρχουν ενδείξεις στο πιλοτήριο για οποιαδήποτε δυσλειτουργία του εξοπλισμού.

Σε μία άλλη περίπτωση, ο κεραυνός συνδέθηκε με το σωλήνα pitot (σωλήνας μέτρησης πίεσης), προκαλώντας υπερτάσεις που κατέστρεψε όλα τα συστήματα των 28 volt DC. Ο πιλότος, αποπροσανατολισμένος, εισήλθε σε ένα στρώμα νεφών στα 2000 πόδια πάνω από το έδαφος, στους 600 κόμβους και με μια βύθιση 45 μοιρών. Σχεδόν όλα τα μέσα στο πιλοτήριο ήταν δυσλειτουργικά - η πυξίδα, το γυροσκόπιο (gyrohorizon), κλπ. Επιπλέον, μία δευτερεύουσα επίδραση συνέβη, αλλά δεν αποκαλύφθηκε για αρκετούς μήνες. Αυτή αφορούσε τη διαδρομή του ρεύματος του κεραυνού, η οποία μετέφερε τις άμεσες επιδράσεις, αλλά δεν ελέγχθηκε κατά την προσγείωση. Πάνω από 800 εργατοώρες αναλώθηκαν για να διορθωθούν τα

ηλεκτρικά (28 volt DC) προβλήματα, αλλά καμία προσπάθεια δεν αναλώθηκε σε επιθεώρηση των βλαβών άμεσων επιδράσεων, προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι το σύστημα προστασίας από κεραυνούς ήταν άθικτο. Το άκαμπτο ομοαξονικό από το πρόσθιο μέρος του καλύμματος προστασίας (radome) των κεραιών radar του αεροσκάφους, μέχρι το διαχωριστικό πλαίσιο μεταξύ κινητήρα και κουβουκλίου αεροσκάφους (bulkhead) είχε επιμηκυνθεί και σχεδόν αποκοπεί από το σημείο σύνδεσης στο παραπάνω διαχωριστικό πλαίσιο (bulkhead), λόγω των μαγνητικών δυνάμεων που είχαν εμφανισθεί. Αυτή η ζημιά μειώνει την αποτελεσματικότητα της σχεδιασθείσας αντικεραυνικής προστασίας. Ένα άλλο δευτερεύον αποτέλεσμα ήταν η μαγνήτιση όλων των σιδηρούχων υλικών που προκάλεσε σοβαρά λάθη στην πυξίδα. Το σύνολο του αεροσκάφους έπρεπε να απομαγνητισθεί.

5.3.5.2 Διακρίβωση

Η διακρίβωση των απαιτήσεων κεραυνού είναι απαραίτητη, για να αποδειχθεί ότι ο σχεδιασμός προστατεύει το σύστημα από το περιβάλλον απειλητικού κεραυνού. Δεν υπάρχει ενιαία προσέγγιση για την διακρίβωση του σχεδιασμού. Ένα καλά δομημένο πρόγραμμα δοκιμών που υποστηρίζεται από την ανάλυση, είναι συνήθως απαραίτητο. Κατά την ανάπτυξη του σχεδιασμού του συστήματος, πολλές δοκιμές εξέλιξης και αναλύσεις διεξάγονται κανονικά, για την επιλογή του βέλτιστου σχεδιασμού. Αυτές οι δοκιμές και οι αναλύσεις, δύνανται να θεωρηθούν μέρος της διαδικασίας διακρίβωσης, αλλά θα πρέπει να τεκμηριώνονται δεόντως. Οι λεπτομέρειες της τεκμηρίωσης θα πρέπει να περιλαμβάνουν τον ορισμό του υλικού, κυματομορφές, όργανα και κριτήρια επιτυχίας και αποτυχίας.

Οι δοκιμές πτήσεων του αεροσκάφους διεξάγονται συχνά πριν από τη διακρίβωση του σχεδιασμού προστασίας από κεραυνούς. Υπό αυτές τις συνθήκες, το πρόγραμμα πτητικών δοκιμών, πρέπει να περιλαμβάνει περιορισμούς για την απαγόρευση πτήσεων εντός ορισμένης απόστασης από καταιγίδες, συνήθως στα 25 μίλια. Κεραυνοί εμφανίζονται μερικές φορές σε μεγάλες αποστάσεις από τα σύννεφα καταιγίδας και μπορούν να παρουσιασθούν έως και μία ώρα, αφότου η καταιγίδα φαίνεται να έχει εγκαταλείψει την περιοχή. Μεγάλες περιοχές φορτίων μπορεί να παραμείνουν και πιθανόν να αποφορτισθούν από ένα αεροσκάφος που εκτελεί πτήση μεταξύ αντίθετα φορτισμένων περιοχών.

Το φυσικό γεγονός του κεραυνού είναι ένα σύνθετο φαινόμενο. Οι κυματομορφές που παρουσιάσθηκαν παραπάνω, είναι η καλύτερη προσπάθεια της τεχνικής κοινότητας στην προσομοίωση του φυσικού περιβάλλοντος, για τους σκοπούς του σχεδιασμού και της διακρίβωσης. Η χρήση αυτών των κυματομορφών δεν εγγυάται κατ' ανάγκη ότι ο σχεδιασμός είναι επαρκής, όταν αντιμετωπισθεί το φυσικό φαινόμενο του κεραυνού. Ένα παράδειγμα είναι ότι η μύτη του προστατευτικού θόλου (radome) ενός αεροσκάφους που είχε συμπεριληφθεί στην αντικεραυνική προστασία, η οποία είχε διακριβωθεί ως επαρκής από τις τεχνικές δοκιμών που υπήρχαν εκείνη τη χρονική περίοδο. Ωστόσο, όταν το αεροσκάφος βίωσε χτυπήματα, ο φυσικός κεραυνός τρυπούσε συχνά τον υπόψη προστατευτικό θόλο (radome). Μεταγενέστερες δοκιμές,

δεν ήταν ικανές να αναπαραγάγουν την αποτυχία. Ωστόσο, η τεχνική κοινότητα έχει πλέον αναπτύξει νέα μεθοδολογία δοκιμών για τους προστατευτικούς θόλους, που δύνανται να αναπαραγάγουν τις αποτυχίες.

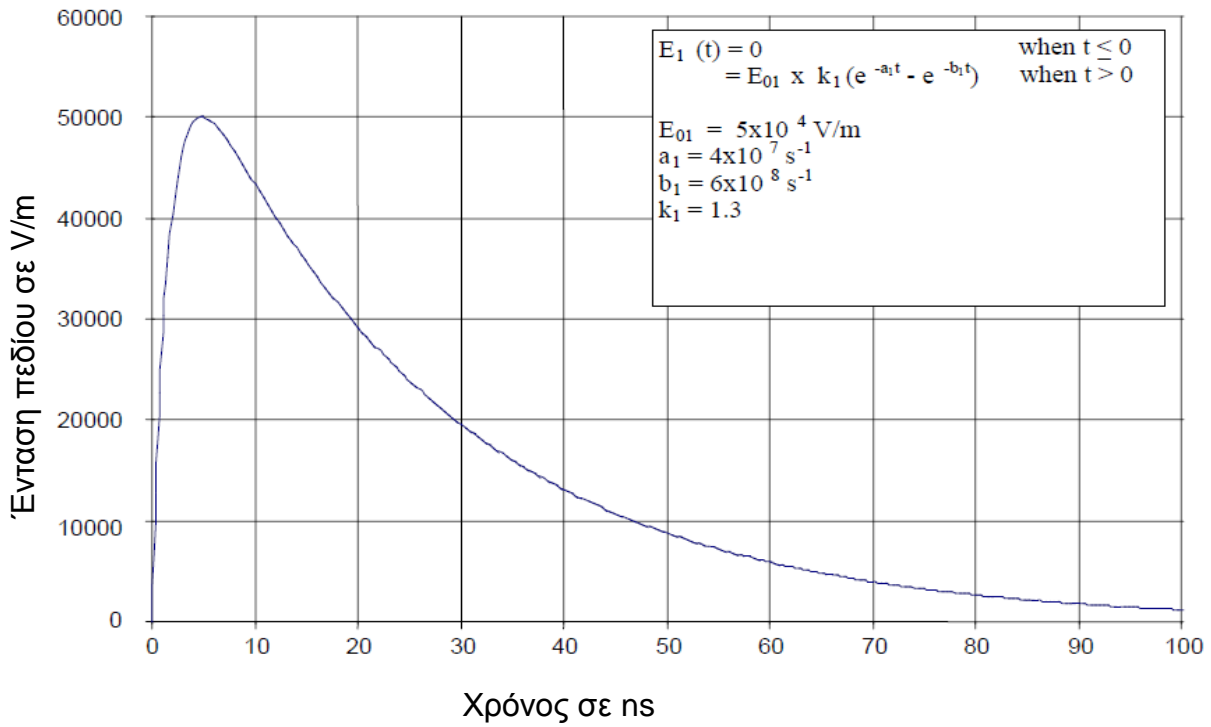
Η χρήση των μη μεταλλικών (σύνθετων) υλικών για τμήματα όπως οι δεξαμενές καυσίμων και τα φτερά του αεροσκάφους, εισήγαγε την ανάγκη ειδικών εξετάσεων, για την εξακρίβωση των συνθηκών δημιουργίας σπινθήρων και ηλεκτρικού τόξου σε αυτά τα τμήματα. Μια δοκιμή σε μία υγρή πτέρυγα αεροσκάφους, προσδιόρισε μια οφιοειδή ροή (streaming) και ηλεκτρικό τόξο από τα άκρα των συνδέσμων. Οι δοκιμές προκάλεσαν την εκτέλεση μιας νέας επεξεργασίας από τον κατασκευαστή, προκειμένου να επιστρωθεί κάθε άκρη συνδέσμου με ένα μονωτικό κάλυμμα.

5.3.6 Ηλεκτρομαγνητικός παλμός (EMP)

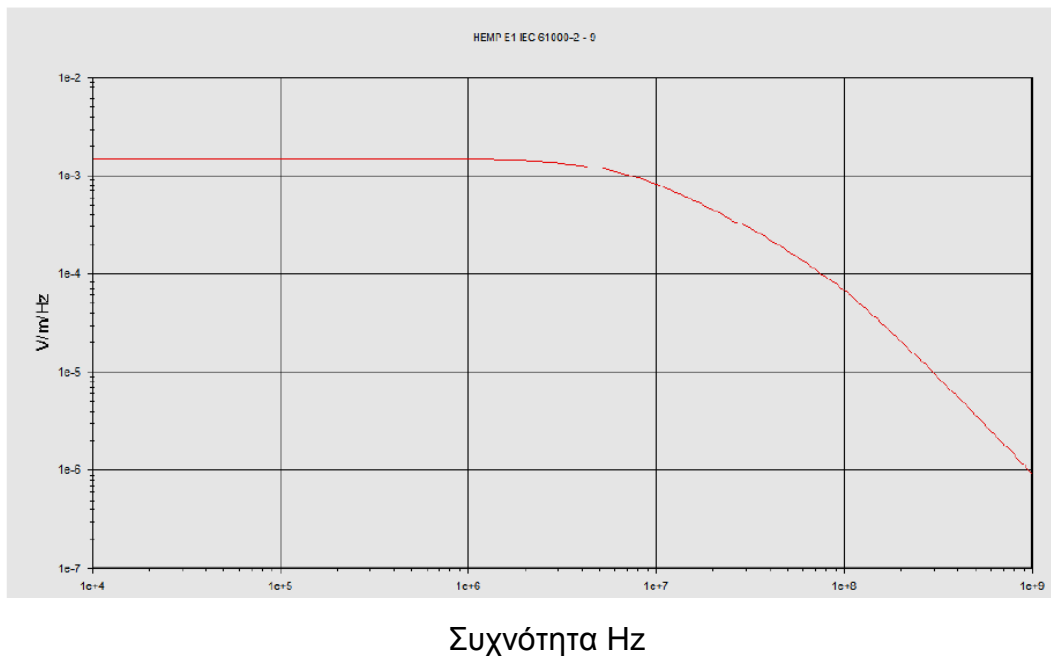
Το σύστημα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις της λειτουργικής απόδοσης, αφού υποστεί το EMP περιβάλλον. Το περιβάλλον αυτό έχει ταξινομηθεί και σήμερα στις Ένοπλες Δυνάμεις των ΗΠΑ, ορίζεται από το στρατιωτικό πρότυπο MIL-STD-2169 [28]. Η απαίτηση αυτή ισχύει όταν απαιτηθεί από την εκάστοτε Υπηρεσία Προμηθειών. Η συμμόρφωση πρέπει να επαληθεύεται από το σύστημα, το υποσύστημα, τις δοκιμές επίπεδου εξοπλισμού, την ανάλυση ή ένα συνδυασμό αυτών.

5.3.6.1 Απαίτηση

Μεγάλου πλάτους ηλεκτρομαγνητικός παλμός (HEMP), παράγεται από μια πυρηνική έκρηξη πάνω από την ατμόσφαιρα, που καλύπτει μεγάλες περιοχές οι οποίες σχετίζονται με πολλά στρατιωτικά συστήματα. Το σύνολο μιας ηπειρωτικής περιοχής μεγέθους των ΗΠΑ, μπορεί να εκτεθεί σε πεδία υψηλού επιπέδου με λίγες εκρήξεις. Το MIL-STD-2169, ένα διαβαθμισμένο έγγραφο του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ, παρέχει λεπτομερείς περιγραφές των συνιστωσών των απειλητικών κυματομορφών (E1, E2 και E3). Το Σχήμα 5-3 παρέχει μια εκδοχή (χωρίς περιορισμούς διαβάθμισης) της απειλής ελεύθερων πεδίων, η οποία αναπτύχθηκε από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC). Αυτή η κυματομορφή δύναται να χρησιμοποιηθεί για πρόχειρους (σε τάξη μεγέθους) υπολογισμούς, αλλά δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό και τη δοκιμή πραγματικών στρατιωτικών συστημάτων. Το Σχήμα 5-4, περιέχει το φάσμα συχνοτήτων E1. Όλα τα στρατιωτικά συστήματα με μία απαίτηση HEMP, είναι υποχρεωμένα να χρησιμοποιούν το διαβαθμισμένο περιβάλλον HEMP που αναφέρεται στο παραπάνω πρότυπο. Σε έναν πυρηνικό πόλεμο, είναι πιθανό τα περισσότερα στρατιωτικά συστήματα να εκτεθούν σε HEMP.

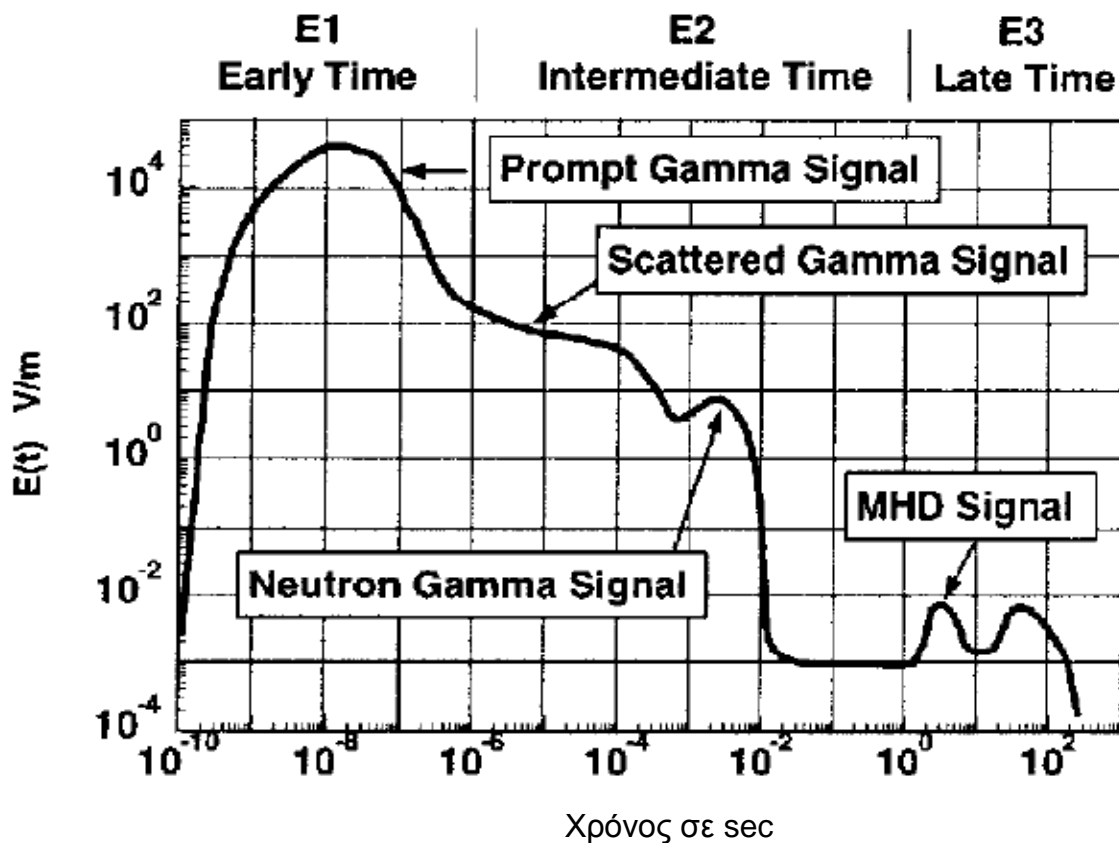


ΣΧΗΜΑ 5-3: Περιβάλλον EMP Ελεύθερου Πεδίου (χωρίς περιορισμούς διαβάθμισης) στο Πεδίο του Χρόνου (IEC 61000-2-9)



ΣΧΗΜΑ 5-4: Περιβάλλον EMP Ελεύθερου Πεδίου (χωρίς περιορισμούς διαβάθμισης) στο Πεδίο της Συχνότητας (IEC 61000-2-9)

Οι HEMP διαδίδονται σαν ένα επίπεδο κύμα. Η κατεύθυνση της διάδοσης σε σχέση με ένα σύστημα προσδιορίζεται με οπτική επαφή από το σύστημα προς το σημείο έκρηξης. Ως εκ τούτου, για τα συστήματα που βρίσκονται ακριβώς κάτω από την έκρηξη, το ηλεκτρικό πεδίο είναι πολωμένο οριζόντια (παράλληλο προς την γήινη επιφάνεια), ενώ για τα συστήματα που βρίσκονται πλησίον της εφαπτομένης στη γη από το σημείο έκρηξης, τα πεδία είναι ουσιαστικά κάθετα πολωμένα. Επίσης, τα πεδία ποικίλλουν με ένα πολύπλοκο τρόπο σε πλάτος και πόλωση σε σχέση με την κατεύθυνση και την γωνία από το σημείο έκρηξης. Δεδομένου ότι είναι γενικά άγνωστο, το μέρος που ένα σύστημα θα πρέπει να βρίσκεται σε σχέση με το σημείο έκρηξης, μία συνετή προσέγγιση σχεδιασμού είναι να σκληρύνει έναντι της μέγιστης απειλής στο επίπεδο του πεδίου. Μια αδιαβάθμητη σύνθετη κυματομορφή HEMP περιβάλλοντος, του αρχικού χρόνου (E1), του μέσου χρόνου (E2) και τελικού χρόνου (E3) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-5.



ΣΧΗΜΑ 5-5: Περιβάλλον (χωρίς περιορισμούς διαβάθμισης) της Ονομαστικής HEMP Συνιστώσας (E1, E2 και E3)

Ο άμεσος HEMP από την ακτινοβολία γάμμα (E1) συζευγνύεται με τις τοπικές κεραίες, τον εξοπλισμό κτιρίων [μέσω ανοιγμάτων (apertures)] και τις μικρού ή μεγάλου μήκους αγωγίμες γραμμές. Η E1 περιέχει ισχυρά εντός ζώνης σήματα για σύζευξη με δέκτες MF, HF, VHF και ορισμένους δέκτες UHF. Η πιο κοινή προστασία κατά των επιδράσεων της ακτινοβολίας E1, επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας

ηλεκτρομαγνητική θωράκιση, φίλτρα και απαγωγείς υπερτάσεων. Η Ε1 δύναται προσωρινά ή μόνιμα, να διακόψει τη λειτουργία των σταθερών, κινητών και μεταφερόμενων επίγειων συστημάτων, αεροσκαφών, πυραύλων, πλοίων επιφανείας και ηλεκτρονικού εξοπλισμού και εξαρτημάτων. Έτσι, τα Ε1 αποτελέσματα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την ουσιαστική προστασία όλων των επίγειων στρατιωτικών συστημάτων και εξοπλισμού, τα οποία πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργούν σε ένα περιβάλλον HEMP.

Τυπικά HEMP - επαγόμενα ρεύματα σε στρατιωτικά συστήματα, σχετίζονται με τα μήκη και σχήματα των αγώγιμων στοιχείων (όπως μία άτρακτος), με το μέγεθος, τον αριθμό και την τοποθεσία των ανοιγμάτων σε μεταλλικά δομικά στοιχεία, με το μέγεθος, τον αριθμό και την τοποθεσία των αγωγών διείσδυσης, στη συνολική αποτελεσματικότητα της θωράκισης και σε έναν αριθμό άλλων παραγόντων. Για αεροσκάφη και διασυνδεδεμένα οχήματα εδάφους, η μέγιστη τιμή των εξωτερικών ρευμάτων είναι της τάξης των 1000 A. Η μέγιστη τιμή των επιφανειακών ρευμάτων στα πλοία είναι της τάξης των 1000 A, ενώ τα ρεύματα αιχμής για απομονωμένα οχήματα μεσαίου μεγέθους είναι μικρότερα από εκείνα των αεροσκαφών και των πλοίων. Ρεύματα σε κεραίες HF, LF και VLF που συνδέονται με τα συστήματα αυτά κυμαίνονται από 100 μέχρι 1000 A.

Ο HEMP (E2α) της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας γάμμα, είναι ένα επίπεδο κύμα που συζευγνύεται με αγώγιμες γραμμές μεγάλου μήκους, με κατακόρυφους πύργους κεραιών και τα αεροσκάφη με κεραίες συρόμενου σύρματος (trailing wire antennas). Η προστασία έναντι του E2α επιτυγχάνεται με τη χρήση EM φίλτρων και απαγωγών υπερτάσεων.

Ο HEMP (E2β) ακτινοβολίας γάμμα, από την ανελαστική σκέδαση νετρονίων (neutron anelastic), συζευγνύεται με εναέριες και υπόγειες αγώγιμες γραμμές και σε εκτεταμένες VLF και LF κεραίες σε υποβρύχια. Οι κύριες συχνότητες επικαλύπτουν την εναλλασσόμενη ισχύ και τα φάσματα ακουστικών συχνοτήτων κάνοντας το φιλτράρισμα δύσκολο.

Ο μαγνητούδροδυναμικός (MHD) HEMP (E3), συζευγνύεται με τις μακρινές γραμμές επικοινωνιών, συμπεριλαμβανομένων και των υποθαλάσσιων καλωδίων. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε συχνότητα (υπό Hertz) καθιστά τη θωράκιση και την απομόνωση δύσκολη. Η εμπειρία από μαγνητικές καταιγίδες και τις προηγούμενες υπέργειες πυρηνικές δοκιμές υποδηλώνει σημαντική πιθανότητα δυσλειτουργίας των σταθερών τηλεπικοινωνιακών καλωδίων εμπορικής χρήσης.

Το Σχήμα 5-3 επιλαμβάνεται μόνο τον Ε1, δεδομένου ότι είναι το πιο κοινό τμήμα της κυματομορφής EMP που επιβάλλεται στα συστήματα. Το πρότυπο MIL-STD-2169 [28] αντιμετωπίζει όλες τις πτυχές της απειλής και η χρήση του είναι υποχρεωτική για όλα τα στρατιωτικά συστήματα με μια απαίτηση HEMP. Η διατύπωση «απαίτηση», αφορά την ικανοποίηση των απαιτήσεων επιχειρησιακής απόδοσης «μετά» την έκθεση στο περιβάλλον EMP. Αυτή η διατύπωση είναι η αναγνώριση του γεγονότος

ότι κατά τη στιγμή του EMP συμβάντος, οι ηλεκτρικές υπερτάσεις που παρουσιάζονται εντός του συστήματος, μπορεί να προκαλέσουν κάποια διαταραχή στην απόδοση. Αμέσως μετά την εκδήλωση ή μέσα σε κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος επιχειρησιακής απόδοσης), το σύστημα πρέπει να λειτουργεί σωστά.

Το στρατιωτικό πρότυπο των ΗΠΑ MIL-STD-188-125-1 [29], ορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις απόδοσης για την προστασία χαμηλού κινδύνου των επίγειων εγκαταστάσεων διοίκησης, ελέγχου, επικοινωνιών, ηλεκτρονικών υπολογιστών και πληροφοριών (C^4I), από βλάβες με επιπτώσεις στην αποστολή και διαταραχές από απειλητικά HEMP περιβάλλοντα, όπως καθορίζονται στο MIL-STD-2169 [28]. Το υπόψη πρότυπο, επίσης αντιμετωπίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις δοκιμών, για την απόδειξη ότι η προδιαγραφόμενη απόδοση έχει επιτευχθεί και για την πιστοποίηση ότι τα εγκατεστημένα υποσυστήματα προστασίας παρέχουν την απαιτούμενη λειτουργικά σκληρότητα (hardness), για την ολοκληρωμένη εγκατάσταση. Το πρότυπο επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες επίγειες εγκαταστάσεις που απαιτούν σκλήρυνση (hardening). Το MIL-STD-188-125-2 [30], συνιστά τις ελάχιστες απαιτήσεις απόδοσης για την προστασία χαμηλού κινδύνου των μεταφερόμενων επίγειων εγκαταστάσεων (C^4I), από ζημιές με επιπτώσεις στην αποστολή και διαταραχές από απειλητικά HEMP περιβάλλοντα.

Ενώ η ιονίζουσα ακτινοβολία δεν εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής του προτύπου MIL-STD-464C [13] που αναλύει τις απαιτήσεις για τις επιπτώσεις του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος, ορισμένα διαστημικά οχήματα έχουν απαιτήσεις απόδοσης κατά τη διάρκεια της έκθεσης σε περιβάλλον ιονίζουσών ακτινοβολιών ενός πυρηνικού αντιδορυφορικού όπλου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το διαστημικό όχημα και τα συνδεδεμένα ηλεκτρονικά ωφέλιμα φορτία πρέπει να είναι σχεδιασμένα για να λειτουργούν μέσα σε αυτές και να επιβιώσουν από τις επιπτώσεις.

Ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός (EMP) αποτελεί απειλή μόνο για τον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό σε συστήματα. Δεν υπάρχουν δομικές βλάβες σε μηχανισμούς. Ωστόσο, ο EMP που έχει προκαλέσει ηλεκτρικό τόξο (arcing) των μονωτήρων σε συστήματα κεραιών μπορεί να καταστρέψει μόνιμα το μονωτικό υλικό, απενεργοποιώντας την κεραία. Η EMP κυματομορφή έχει ως αποτέλεσμα μία ευρυζωνική παροδική διέγερση του συστήματος. Τα παροδικά ρεύματα επάγονται και ρέουν στις φυσικές συχνότητες συντονισμού του συστήματος. Ρεύματα μπορούν να ρέουν σε εσωτερικά τμήματα του συστήματος μέσω της άμεσης διέλευσης σε ηλεκτρική καλωδίωση ή μηχανικών συγκροτημάτων που διαπερνούν την εξωτερική δομή. Τα μαγνητικά πεδία που παράγονται από τα μεγάλα εξωτερικά ρεύματα μπορούν να συζεύξουν τάσεις και ρεύματα στην καλωδίωση στο εσωτερικό του συστήματος, μέσω κάθε διαθέσιμου ανοίγματος.

Τα επίγεια στρατιωτικά συστήματα συνήθως καθορίζουν το περιβάλλον HEMP, ακόμα και όταν άλλα συστατικά του πυρηνικού περιβάλλοντος δεν έχουν καθορισθεί. Αυτή η απειλή είναι ένα επίπεδο κύμα ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο επίπεδο του

εδάφους, που προκύπτει από μία έκρηξη σε υψηλό υψόμετρο. Η σκλήρυνση έναντι του περιβάλλοντος που προκαλεί η ακτινοβολία επίγειας πυρηνικής έκρηξης, συχνά δεν είναι αποδοτική από πλευράς κόστους, διότι μια έκρηξη που παράγει μια ακτινοβολία και ηλεκτρομαγνητική απειλή είναι πολύ πιθανόν να απενεργοποιήσει την εγκατάσταση.

Οι πιο συχνά παρατηρούμενες επιπτώσεις από τον EMP είναι η διαταραχή του συστήματος. Η διακοπή λειτουργίας των ηλεκτρονικών λόγω υπερθέρμανσης (Burnout) συμβαίνει λιγότερο συχνά. Ωστόσο, καθώς τα μεγέθη των ηλεκτρονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (chips) εξακολουθούν να μειώνονται (sub-micron), το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την υπερθέρμανση (burn out) θα μειωθεί και οι σχεδιαστές πρέπει να διασφαλίσουν ότι υπάρχει επαρκής προστασία της διεπαφής. Αυτές οι διαταραχές μπορεί να κυμαίνονται, από επιπτώσεις απλής ενόχλησης, όπως ακανόνιστες αναλαμπές στην οθόνη και οξείς μεταλλικούς ήχους στα ακουστικά μέχρι ολοκληρωτικό κλείδωμα των συστημάτων. Οι διαταραχές οι οποίες ανατρέπουν την κατάσταση ενός συστήματος, μπορεί να είναι είτε προσωρινές (δυνατότητα επαναφοράς) ή μόνιμες. Μερικές περιπτώσεις διαταραχής μπορεί να αποκατασταθούν σχεδόν στιγμιαία κατά τη στιγμή που ένας διακόπτης ενεργοποιείται, ενώ άλλες, όπως η επαναφόρτωση του λογισμικού, μπορεί να διαρκέσει μερικά λεπτά. Με την εισαγωγή της ασφάλειας των κρίσιμων λειτουργιών που ελέγχονται από ηλεκτρονικά συστήματα, οι πιθανές επιπτώσεις από διαταραχές λειτουργίας μπορεί να είναι δυνητικά απειλητικές για τη ζωή.

5.3.6.2 Διακρίβωση

Για συστήματα με μία απαίτηση EMP, η διακρίβωση είναι αναγκαίο να αποδείξει ότι τα εφαρμοζόμενα μέτρα παρέχουν την απαιτούμενη προστασία. Τόσο η ανάλυση, όσο και η δοκιμή, είναι συνήθως απαραίτητες για τον έλεγχο της απόδοσης του συστήματος. Η ανάλυση είναι το σημείο εκκίνησης για τον αρχικό σχεδιασμό του συστήματος και τις κατανομές της σκλήρυνσης. Οι δοκιμές ανάπτυξης γενικά, πραγματοποιούνται για να διευκρινίσουν τις προβλέψεις ανάλυσης, καθώς και να καθορίζουν τα βέλτιστα σχέδια. Αυτές οι αναλύσεις και οι δοκιμές αποτελούν μέρος της συνολικής πιστοποίησης του σχεδιασμού.

Για πολλά συστήματα, το κόστος του ελέγχου EMP είναι μια σημαντική κινητήρια δύναμη. Ως εκ τούτου, η Υπηρεσία Προμηθειών, θα πρέπει να αποφασίσει το επίπεδο της διακρίβωσης, που είναι σύμφωνο με τον κίνδυνο που είναι διατεθειμένη να αναλάβει.

Τα παρακάτω, είναι στοιχεία μιας επαναληπτικής διαδικασίας, για το σχεδιασμό και τον έλεγχο της προστασίας του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού ενός συστήματος από τις συνέπειες της EMP.

α. Ανάλυση σύζευξης EMP: Μία ανάλυση της σύζευξης, είναι απαραίτητη για να προσδιορισθεί η EMP σύζευξη ελευθέρου πεδίου (free-field), μέσα στο σύστημα. Τα υπάρχοντα δεδομένα σύζευξης για τη σχεδίαση παρόμοιου

συστήματος, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οποτεδήποτε είναι δυνατό. Η ανάλυση αυτή, παρέχει μία εκτίμηση των τάσεων και ρευμάτων που παράγονται από τον EMP, σε κάθε διεπαφή του κάθε κρίσιμου εξοπλισμού για την αποστολή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των επιπέδων της έντασης, που πρέπει να περιλαμβάνονται στις απαιτήσεις των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI), που επιβάλλονται στον εξοπλισμό. Οι απαιτήσεις των δοκιμών CS115 (conducted susceptibility, bulk cable injection, impulse excitation), CS116 (conducted susceptibility, damped sinusoid transients, cables and power leads, 10 KHz to 100 MHz), RS105 (radiated susceptibility, transient, electromagnetic field) του προτύπου MIL-STD-461F [11] παρέχουν μια βάση για τις κατάλληλες απαιτήσεις του εξοπλισμού.

β. Προσδιορισμός των σχετικών υποσυστημάτων: Τα υποσυστήματα και ο εξοπλισμός που μπορεί να επηρεασθούν από τον EMP και των οποίων η σωστή λειτουργία είναι κρίσιμη και απαραίτητη για τη λειτουργία του συστήματος, πρέπει να προσδιορισθούν. Οι θέσεις του εξοπλισμού στο πλαίσιο του συστήματος, πρέπει να καθορισθούν.

γ. Προσδιορισμός της αντοχής του εξοπλισμού: Η εγγενής σκληρότητα του εξοπλισμού χωρίς τις ειδικές απαιτήσεις της ευαισθησίας EMI, πρέπει να προσδιορισθεί. Αυτά τα αποτελέσματα, σε συνδυασμό με τις υφιστάμενες απαιτήσεις EMI σχετικά με τον εξοπλισμό, καθιερώνουν ένα κατώτατο όριο για τις διαταραχές και τα κατώφλια βλαβών, για κάθε κρίσιμο εξοπλισμό της αποστολής.

δ. Απόδειξη της συμμόρφωσης με τις προδιαγραφές: Η διακρίβωση ότι το σύστημα πληροί τις EMP απαιτήσεις της σχεδίασης, επιτυγχάνεται με την απόδειξη ότι τα πραγματικά παροδικά επίπεδα που εμφανίζονται στις διεπαφές του εξοπλισμού, δεν υπερβαίνουν τα επίπεδα σκληρότητας του μεμονωμένου εξοπλισμού ή υποσυστήματος και ότι τα απαιτούμενα περιθώρια σχεδίασης έχουν εκπληρωθεί. Η πιστοποίηση θα πρέπει να επιτευχθεί με ένα συνδυασμό δοκιμής και ανάλυσης.

Τα MIL-STD-188-125-1 και MIL-STD-188-125-2 που αναφέρθηκαν παραπάνω, περιλαμβάνουν τις μεθόδους δοκιμών για τη διακρίβωση, αποδεικνύοντας ότι οι σταθερές επίγειες και μεταφερόμενες εγκαταστάσεις C^4I πληρούν τις HEMP απαιτήσεις. Οι μέθοδοι δοκιμής περιγράφουν τη σύζευξη της απειλής (σχετικής με μεταβατικά φαινόμενα), χρησιμοποιώντας την εισαγωγή ρεύματος παλμού, για να διεισδύσει σε αγωγούς στα σημεία εισαγωγής, που βρίσκονται εξωτερικά της διαχωριστικής (barrier) ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης της εγκατάστασης. Οι υπόλοιπες εσωτερικές αποκρίσεις μετρώνται και παρακολουθείται η λειτουργία των κρίσιμων υποσυστημάτων της αποστολής, για διαταραχή ή βλάβη. Το πρότυπο περιέχει επίσης, την αποτελεσματικότητα της θωράκισης και τις διαδικασίες δοκιμών CW φωτισμού, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της απόδοσης της θωράκισης της εγκατάστασης.

Πυρηνικές δοκιμές στις ΗΠΑ κατά τη διάρκεια του 1960, επιβεβαίωσαν ότι οι επιπτώσεις του πυρηνικού EMP είναι σημαντικές και πέρα από τον τόπο της

έκρηξης. Η επιλογή των μεθόδων ελέγχου είναι κάπως εξαρτώμενη από τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις διαθέσιμες μεθόδους. Οι μέθοδοι διακρίβωσης που είναι προσανατολισμένες περισσότερο προς την ανάλυση, θα εισαγάγουν συνήθως πολύ μεγαλύτερη αβεβαιότητα από ό, τι η δοκιμή. Ως εκ τούτου, τα απαιτούμενα περιθώρια που πρέπει να αποδειχθούν, θα είναι πολύ μεγαλύτερα. Επίσης, η ανάλυση δεν είναι σε θέση να προβλέπει ελαττώματα σχεδιασμού. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής επιπέδου συστήματος αεροσκάφους προκύπτουν μεγαλύτερα από τα αναμενόμενα επίπεδα ρευμάτων, που οφείλονται σε μεταλλικές γραμμές που δεν είχαν σχεδιασθεί για σωστή ηλεκτρική σύνδεση, κατά την εισαγωγή ενός θωρακισμένου όγκου. Σε άλλη περίπτωση, οι τερματικές συσκευές προστασίας δεν λειτουργούν, λόγω της χαμηλής σύνθετης αντίστασης που υπάρχει στο κύκλωμα για την προστασία του οποίου είχαν σχεδιασθεί, με αποτέλεσμα, υψηλά επίπεδα ρευμάτων να εμφανιστούν σε ένα θωρακισμένο όγκο. Οι αβεβαιότητες στην ανάλυση μπορεί να μειωθούν με επιλεκτική δοκιμή των τμημάτων του συστήματος.

Τα μέτρα προστασίας που σχετίζονται με δομικά στοιχεία, πρέπει να αξιολογούνται για τις επιδόσεις κατά τη συναρμολόγηση, για να πιστοποιηθεί ότι πληρούν τις απαιτήσεις, καθώς εγκαθίστανται στο σύστημα. Μετά τη συναρμολόγηση, η πρόσβαση σε ορισμένα εξαρτήματα ενδέχεται να μην είναι πρακτική. Μία επιτυχή δοκιμή στο εργαστήριο, δεν σημαίνει κατ' ανάγκην, ότι οι απαιτήσεις θα ικανοποιηθούν στο πραγματικό συγκρότημα. Πολλές φορές το τελικό σχέδιο περιέχει υλικά, επιφάνειες ή συνδέσμους που είναι διαφορετικά από το εργαστηριακό μοντέλο. Επίσης, η πολύπλοκη γεωμετρία του τελικού σχεδιασμού του συστήματος μπορεί να είναι τόσο διαφορετική από εκείνη που διαμορφώθηκε στο εργαστήριο, που η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του να έχει αλλοιωθεί σημαντικά.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να ληφθεί η διέγερση σε επίπεδο συστήματος, για σκοπούς όπως ο έλεγχος της ποιότητας ή η αξιολόγηση της σκλήρυνσης. Χαμηλού επιπέδου CW φωτισμός του συστήματος ή μεμονωμένων εξαρτημάτων είναι σχετικά εύκολος και μπορεί συχνά να αποκαλύψει μια αβλεψία στη συναρμολόγηση του συστήματος ή ανεπάρκεια στο σχεδιασμό ενός στοιχείου σκληρύνσεως. Για αεροσκάφη, ένα μοναδικό σημείο διέγερσης (ηλεκτρική σύνδεση μιας πηγής σήματος σε ένα φυσικό σημείο της εξωτερικής δομής του συστήματος) μπορεί να επιτευχθεί [ακόμη και σε ένα γάντζο (hanger)] και μπορεί ομοίως να αποκαλύψει τυχόν εμφανή προβλήματα στην θωράκιση της ατράκτου.

Οι δοκιμές των μέτρων διαρθρωτικού σχεδιασμού και σκλήρυνσης, θα πρέπει να γίνουν το συντομότερο δυνατόν στη συναρμολόγηση του συστήματος και θα πρέπει να συνεχισθεί καθ' όλη τη διαδικασία σχεδίασης. Αν τα προβλήματα αποκαλυφθούν κατά τη διάρκεια της αρχικής διάταξης, η διόρθωση είναι συνήθως απλή. Ωστόσο, εάν οι ατέλειες δεν διαπιστωθούν μέχρι το σύστημα να ολοκληρωθεί, το αποτέλεσμα πιθανόν να είναι ένα πολύ ακριβό πρόγραμμα διασκευής. Η ανάλυση, οι εργαστηριακές δοκιμές και οι δοκιμές σε επίπεδο συστήματος με σήματα χαμηλής στάθμης, αποτελούν σημαντικά στοιχεία της συμμόρφωσης. Ωστόσο, η δοκιμή σε

επίπεδο ενός συστήματος, της λειτουργικότητας του συστήματος, χρησιμοποιώντας ένα προσομοιωτή υψηλού επιπέδου EMP, είναι μια μέθοδος υψηλής αξιοπιστίας για την απόδειξη της συμμόρφωσης.

5.3.7 Υποσυστήματα και Εξοπλισμός Ηλεκτρομαγνητικών Παρεμβολών (EMI)

Τα ατομικά υποσυστήματα και ο εξοπλισμός, θα πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις ελέγχου παρεμβολών (όπως οι επαγόμενες εκπομπές, οι ακτινοβολούμενες εκπομπές, η επαγόμενη ευαισθησία και οι απαιτήσεις της ακτινοβολούμενης ευαισθησίας του προτύπου MIL-STD-461F), προκειμένου το συνολικό σύστημα να συμμορφώνεται με όλες τις ισχύοντες απαιτήσεις. Η συμμόρφωση πρέπει να επαληθεύεται με δοκιμές που συνάδουν με την ατομική απαίτηση (MIL-STD-461F).

5.3.7.1 Απαίτηση

Τα χαρακτηριστικά EMI (εκπομπή και ευαισθησία) των επιμέρους εξοπλισμών και υποσυστημάτων πρέπει να ελέγχονται, για να αποκτηθεί ένας υψηλός βαθμός βεβαιότητας, ότι τα στοιχεία αυτά θα λειτουργούν στις εγκαταστάσεις που προορίζονται χωρίς ακούσιες ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις με άλλους εξοπλισμούς, υποσυστήματα ή εξωτερικά περιβάλλοντα. Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον μέσα σε ένα σύστημα είναι πολύπλοκο και εξαιρετικά μεταβλητό, ανάλογα με τους διάφορους τρόπους λειτουργίας και τις συχνότητες του εξοπλισμού επί αυτού. Οι διαμορφώσεις του συστήματος αλλάζουν συνεχώς, λόγω νέου αναβαθμίσεων και τροποποιήσεων του εξοπλισμού του συστήματος. Ο εξοπλισμός που έχει αναπτυχθεί σε μία πλατφόρμα, δύναται να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες πλατφόρμες, με πιθανό το ενδεχόμενο να προκληθεί ηλεκτρομαγνητική ασυμβατότητα. Το πρότυπο MILSTD-461F [11] παρέχει ένα τυποποιημένο σύνολο των απαιτήσεων ελέγχου παρεμβολών και δοκιμών που αποτελούν μια κοινή βάση για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών του EMI εξοπλισμού. Μερικοί από τους κύριους παράγοντες που προκαλούν την ανάγκη για ελέγχους, είναι η παρουσία ευαίσθητων κεραιών δεκτών, οι οποίες ανταποκρίνονται σε παρεμβολές που παράγονται εντός του εύρους συντονισμού τους και σε περιβάλλοντα που δημιουργούνται από τους εξωτερικούς ή επί της πλατφόρμας πομπούς, κεραυνούς και ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς.

Οι ειδικές απαιτήσεις EMI σε ξεχωριστά αντικείμενα πρέπει να προσδιορίζονται με βάση μία έννοια σχεδίασης συστήματος, που σχετίζεται με τις συναρτήσεις μεταφοράς μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος του οχήματος και των θέσεων εγκατάστασης, τις εκτιμήσεις απομόνωσης σε σχέση με άλλους εξοπλισμούς επί του σκάφους/πλατφόρμας και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του άλλου εξοπλισμού.

Οι απαιτήσεις του MIL-STD-461F θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως βάση αναφοράς. Κατάλληλες απαιτήσεις για την συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί επίσης να ληφθούν από εμπορικές προδιαγραφές, όπως το πρότυπο της RTCA DO-160 [27]

που αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα ή άλλα παρόμοια βιομηχανικά πρότυπα. Το πρότυπο DO-160 περιέχει μια ποικιλία από όρια, τα οποία ο κατασκευαστής του εξοπλισμού μπορεί να επιλέξει, ως επίπεδο προσδιορισμού για τον εξοπλισμό του. Για κάθε πρότυπο EMI, πρέπει να ληφθεί μέριμνα για να εξασφαλισθεί ότι χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα όρια για μία συγκεκριμένη εφαρμογή. Μοναδικές απαιτήσεις μπορούν επίσης να καθορίζονται ανάλογα με τις ανάγκες. Για παράδειγμα, πρόσθετες απαιτήσεις μπορεί να είναι αναγκαίες για λόγους όπως η αντικεραυνική προστασία των συστημάτων που χρησιμοποιούν σύνθετη δομή ή η συμβατότητα φάσματος.

Οι απαιτήσεις EMI χωρίζονται σε δύο περιοχές, στις εκπομπές παρεμβολών από το υποσύστημα και την ευαισθησία [μερικές φορές αναφέρεται ως ανοσία (immunity)] σε εξωτερικές επιρροές. Κάθε μία από αυτές τις περιοχές έχουν ελέγχους αγωγιμότητας και ακτινοβολίας. Οι περισσότερες απαιτήσεις εκπομπής σχετίζονται με το πεδίο της συχνότητας και τα δεδομένα που λαμβάνονται με εξοπλισμό φασματικής ανάλυσης, με καθετήρες ρεύματος για μετρήσεις αγωγιμότητας και κεραιές για μετρήσεις ακτινοβολίας. Οι απαιτήσεις της ευαισθησίας καθορίζονται συνήθως αναφορικά με τους αγωγίσιμους οδηγούς (conducted drive) τάσεων και ρευμάτων για μεταβατικά φαινόμενα και διαμορφωμένα ημιτονοειδή (modulated sinusoids), προκειμένου να αξιολογηθούν οι διεπαφές ισχύος και σήματος και τα επίπεδα ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για τα εκπεμπόμενα σήματα. Οι μετρήσεις της ευαισθησίας πραγματοποιούνται με μια ευρεία ποικιλία πηγών σήματος, ενισχυτών ισχύος, συσκευών έγχυσης (injection) και κεραιών.

Μια εφαρμογή όπου οι απαιτήσεις εκπομπών που πιθανόν να απαιτηθεί να επιβληθούν, είναι αυστηρότερες από τα προεπιλεγμένα όρια στα ισχύοντα πρότυπα αφορά πλατφόρμες ή επίγειες εγκαταστάσεις που εκτελούν αποστολές πληροφοριών, επιτήρησης και αναγνώρισης (ISR). Οι ISR μπορεί να περιλαμβάνουν την ανίχνευση αδύναμων σημάτων σε ένα ευρύ τμήμα του φάσματος συχνοτήτων. Τα καθιερωμένα όρια εκπομπών που εφαρμόζονται για να προστατεύσουν άλλους δέκτες με συνδεδεμένες κεραιές σε εγκαταστάσεις, πιθανόν να μην παρέχουν επαρκή προστασία για να επιτρέψουν σε αυτούς του δέκτες να χρησιμοποιηθούν κατά το βέλτιστο τρόπο. Όπως και με οποιαδήποτε εφαρμογή, οι πραγματικοί έλεγχοι που είναι απαραίτητοι βασίζονται στις συναρτήσεις μεταφοράς για τη σύζευξη της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μεταξύ των θέσεων του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων της κεραιάς.

Τα όρια που ορίζονται στο πρότυπο MIL-STD-461F [11] είναι επίπεδα που προέκυψαν εμπειρικά, για να καλύψουν τις περισσότερες διατάξεις και περιβάλλοντα. Ωστόσο, μπορεί να μην είναι επαρκή ώστε να εξασφαλίζεται η συμβατότητα του συστήματος. Η προσαρμογή πρέπει να ληφθεί υπόψη για τις ιδιαιτερότητες της επιδιωκόμενης εγκατάστασης. Τα όρια που έχουν ένα αποδεδειγμένο ιστορικό επιτυχίας αποδεικνύονται από το σχετικά χαμηλό ποσοστό των προβλημάτων στο επίπεδο του συστήματος. Υπάρχει συνήθως απροθυμία να χαλαρώσουν οι απαιτήσεις, αφού οι ρυθμίσεις του συστήματος αλλάζουν συνεχώς και τα

υποσυστήματα/εξοπλισμός χρησιμοποιούνται συχνά σε εγκαταστάσεις, στις οποίες δεν προορίζονταν αρχικά να χρησιμοποιηθούν. Οι μετρήσεις σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον δεν είναι συνήθως διαθέσιμες και τα πραγματικά επίπεδα θα πρέπει να αναμένεται ότι θα ποικίλουν σημαντικά με τις αλλαγές της φυσικής τοποθεσίας για το σύστημα και με τις αλλαγές στη διαμόρφωση.

Η εμπειρία του παρελθόντος έχει δείξει ότι η συμμόρφωση του εξοπλισμού με τις απαιτήσεις EMI εξασφαλίζει έναν υψηλό βαθμό εμπιστοσύνης, για την επίτευξη συμβατότητας σε επίπεδο συστήματος. Η μη συμμόρφωση προς τις απαιτήσεις EMI οδηγεί συχνά σε προβλήματα του συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η μη συμμόρφωση σε σχέση με τα όρια, τόσο υψηλότερη είναι η πιθανότητα να αναπτυχθούν προβλήματα. Από τότε που οι EMI απαιτήσεις είναι μια πρωτοβουλία μείωσης κινδύνου, η προσήλωση στις υπόψη απαιτήσεις, θα προσφέρει στην ομάδα σχεδίασης υψηλό βαθμό εμπιστοσύνης για τη δυνατότητα του συστήματος και των συναφών υποσυστημάτων του να λειτουργούν συμβατά μετά την ενσωμάτωση.

Υπάρχει συχνά σύγχυση σχετικά με τα παρατηρούμενα περιθώρια μεταξύ των εκπομπών και των απαιτήσεων ευαισθησίας. Η σχέση μεταξύ των περισσότερων απαιτήσεων ελέγχου των εκπομπών και των επιπέδων ευαισθησίας δεν αφορά μία άμεση αντιστοίχιση. Για παράδειγμα, στο MIL-STD-461F η απαίτηση της δοκιμής RS103 (radiated susceptibility, electric field 2 MHz to 40 GHz) καθορίζει τα ηλεκτρικά πεδία που τα υποσυστήματα πρέπει να αντέξουν. Η απαίτηση της δοκιμής RE102 (radiated emissions, electric field, 10 KHz to 18 GHz) καθορίζει τις επιτρεπόμενες εκπομπές ηλεκτρικών πεδίων από τα υποσυστήματα. Τα επίπεδα της δοκιμής RE102 σε τάξεις μεγέθους είναι μικρότερα από ό,τι τα επίπεδα της δοκιμής RS103. Περιθώρια της τάξης των 110 dB είναι πιθανόν να συναχθούν. Το συμπέρασμα θα μπορούσε να αιτιολογηθεί κατά κάποιο τρόπο, αν τα όρια αφορούσαν αυστηρά μία προς μία αλληλεπίδραση, όπως η στενή σύζευξη αμφοτέρων των επιπέδων των απαιτήσεων RE102 και RS103. Αυτό το είδος της σύζευξης δεν αποτελεί μία ιδιαίτερη ανησυχία για την απαίτηση RE102. Ο λόγος που οδηγεί στα επίπεδα του RE102 είναι η σύζευξη σε ευαίσθητους δέκτες RF μέσω κεραιών. Οι προσόψεις των δεκτών είναι συνήθως πολλές τάξεις μεγέθους πιο ευαίσθητες από τις συνδεδεμένες με καλώδιο διεπαφές των συστημάτων. Ομοίως τα επίπεδα του RS103 αντιστοιχούν άμεσα σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία που ακτινοβολούνται από πομπούς με συνδεδεμένη κεραία. Τα πεδία αυτά είναι συνήθως τάξης μεγέθους μεγαλύτερα από τα πεδία που παράγονται από τις εκπομπές των καλωδίων. Κατά συνέπεια, τα εμφανή υπερβολικά περιθώρια που δύναται να συναχθούν εσφαλμένα από το πρότυπο MIL-STD-461F δεν υπάρχουν.

5.3.7.2 Διακρίβωση

Δοκιμές απαιτούνται για να αποδειχθεί η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Για τις περισσότερες περιπτώσεις, τα εργαλεία ανάλυσης που δύνανται να παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα για οποιοδήποτε αποδεκτό βαθμό ακρίβειας δεν είναι διαθέσιμα.

Για τα προγράμματα που χρησιμοποιούν το στρατιωτικό πρότυπο MIL-STD-461F, παρέχονται επίσης αντίστοιχες μέθοδοι δοκιμών για κάθε απαίτηση (απαιτήσεις αγωγιμότητας και ακτινοβολίας για τις εκπομπές και την ευαισθησία). Το πρότυπο RTCA DO-160 [27] της βιομηχανίας εμπορικών αεροσκαφών, είναι το ισοδύναμο του MIL-STD-461F και για τις απαιτήσεις και για τη μεθοδολογία της δοκιμής. Μερικές από τις μεγαλύτερες εταιρείες εμπορικών αεροσκαφών έχουν τα δικά τους πρότυπα, τα οποία η FAA αποδέχεται για χρήση πιστοποίησης. Κάποια στρατιωτικά αεροσκάφη (κυρίως μεταφοράς φορτίου) έχουν ένα μίγμα στρατιωτικών και εμπορικών υποσυστημάτων. Τα υποσυστήματα τα οποία είναι νέας σχεδίασης ή έχουν τροποποιηθεί σημαντικά θα πρέπει να είναι πιστοποιημένα με το στρατιωτικό πρότυπο. Ο μη τροποποιημένος εξοπλισμός από το διαθέσιμο απόθεμα (off-the-shelf) συνήθως δεν απαιτεί εκ νέου πιστοποίηση, παρέχοντας αποδεκτά και υπαρκτά δεδομένα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σύμφωνα με τις δοκιμές των προαναφερόμενων στρατιωτικών και πολιτικών προτύπων.

Για εφαρμογές πρώτης πτήσης αεροσκάφους όταν η διακρίβωση του εξοπλισμού δεν έχει ολοκληρωθεί, οι επόμενες δοκιμές του MIL-STD-461F (ή ισοδύναμου), πρέπει να ολοκληρωθούν πριν από την πτήση, για να εξασφαλισθεί η ασφάλεια των πτήσεων. Οι απαιτήσεις των δοκιμών RE102 (radiated emissions, electric field, 10 KHz to 18 GHz), RS103 (radiated susceptibility, electric field 2 MHz to 40 GHz), CS114 (conducted susceptibility, bulk cable injection, 10 KHz to 200 MHz), CS115 (conducted susceptibility, bulk cable injection, impulse excitation) και CS116 (conducted susceptibility, damped sinusoidal transients, cables and power leads, 10 KHz to 100 MHz) αφορούν τον κρίσιμο για την ασφάλεια εξοπλισμό και το RE102 χρησιμοποιείται για οποιοδήποτε άλλο εξοπλισμό. Οι απαιτήσεις αυτές ισχύουν επίσης και για τα συστήματα εδάφους του Στρατού, προκειμένου να πετύχει την αποδέσμευση της ασφάλειας. Για τα συστήματα πληροφοριών σημάτων ISR, για τον χαρακτηρισμό RF εκπομπής ή την επισκόπηση της στάθμης του EM θορύβου της επίγειας ή αερομεταφερόμενης πλατφόρμας υποδοχής, θα πρέπει να εκτιμηθεί η ευαισθησία του αισθητήρα σε επιχειρησιακό περιβάλλον.

Το πρότυπο MIL-STD-461F υπογραμμίζει τις τεχνικές δοκιμών που σχετίζονται πιο άμεσα με τις μετρήσιμες παραμέτρους σε επίπεδο συστήματος. Για παράδειγμα, οι δοκιμές του καλωδίου συσσώρευσης (bulk cable), εφαρμόστηκαν τόσο για τις μεταβατικές ημιτονοειδείς κυματομορφές που το πλάτος τους μηδενίζεται στο χρόνο (damped waves), όσο και για τα διαμορφωμένα συνεχή κύματα. Τα μετρήσιμα δεδομένα από τις δοκιμές αυτές, μπορούν να συγκριθούν άμεσα με τις καταπονήσεις που εισάγονται από τις απειλές σε επίπεδο συστήματος. Η φιλοσοφία αυτή αυξάνει σημαντικά την αξία των αποτελεσμάτων και επιτρέπει όρια αποδοχής που έχουν αξιοπιστία.

Ένα επιχείρημα που έχει διατυπωθεί μερικές φορές στο παρελθόν είναι ότι, η επιτυχής ολοκλήρωση της συμβατότητας του ενδοσυστήματος αναιρεί την ανάγκη να ολοκληρωθούν οι δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ή η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις. Οι δοκιμές των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, πρέπει να

ολοκληρωθούν πριν από την δοκιμή σε επίπεδο συστήματος για να παρέχουν μια βασική γραμμή των επιδόσεων και να προσδιοριστούν οι τομείς που μπορούν να απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διάρκεια της δοκιμής σε επίπεδο συστήματος. Επίσης, οι δοκιμές σε επίπεδο συστήματος, δοκιμάζουν μόνο έναν περιορισμένο αριθμό από συνθήκες, με βάση τις ιδιαίτερες καταστάσεις λειτουργίας, τις παραμέτρους του εξοπλισμού και τις συνθήκες ηλεκτρικής φόρτωσης. Επιπλέον, ο προσδιορισμός των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών των υποσυστημάτων, παρέχει προστασία για το σύστημα με τις αλλαγές διαμόρφωσης στο σύστημα με την πάροδο του χρόνου. Μια ιδιαίτερη ανησυχία είναι η προσθήκη νέων δεκτών με συνδεδεμένες κεραίες, η οποίοι μπορεί να υποβαθμιστούν εύκολα αν επαρκείς έλεγχοι δεν διατηρούνται.

5.3.7.3 Μη-Αναπτυξιακά Στοιχεία (NDI) και Εμπορικά Είδη

Τα NDI και τα εμπορικά είδη, πρέπει να πληρούν τις κατάλληλες απαιτήσεις ελέγχου διεπαφής EMI, για να εξασφαλίσουν ότι οι απαιτήσεις επιχειρησιακής απόδοσης του συστήματος πληρούνται. NDI είναι εκείνα τα στοιχεία που παράγονται αποκλειστικά για χρήση από κυβερνητικούς και κρατικούς φορείς. Συνήθως αυτά απαιτούν μικρή διαμόρφωση - τροποποίηση προκειμένου να διατεθούν στο εμπόριο. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση ή ένα συνδυασμό αυτών.

5.3.7.3.1 Απαίτηση

Τα NDI και τα εμπορικά είδη δύνανται να εγκατασταθούν σε συστήματα για λόγους οικονομικής φύσεως, διαθεσιμότητας κτλ. Όταν εγκατασταθούν στο σύστημα, το NDI και τα εμπορικά στοιχεία πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του συστήματος σε επίπεδο E3, του εν λόγω προτύπου. Ως εκ τούτου, τα NDI και τα εμπορικά στοιχεία πρέπει να έχουν κατάλληλα χαρακτηριστικά EMI, έτσι ώστε να μην είναι επιρρεπή σε ηλεκτρομαγνητικές τάσεις που παρουσιάζονται στην εγκατάσταση τους και να μη παράγουν παρεμβολές οι οποίες υποβαθμίζουν άλλο εξοπλισμό. Το μεγαλύτερο μέρος του εξοπλισμού που έχει κατασκευασθεί στις μέρες μας, έχει σχεδιασθεί και δοκιμασθεί για κάποια μορφή απαίτησης EMI και τα δεδομένα μπορεί να είναι διαθέσιμα. Για άλλου είδους εξοπλισμό μπορεί να απαιτηθούν δοκιμές.

Η χρήση των NDI ή των εμπορικών ειδών παρουσιάζουν ένα δίλημμα μεταξύ της ανάγκης για την επιβολή των ελέγχων EMI και την επιθυμία της χρήσης του πλεονεκτήματος των ήδη υπαρχόντων σχεδίων, τα οποία μπορεί να έχουν άγνωστα ή ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά EMI. Χρησιμοποιώντας «τυφλά» τα NDI ή τα εμπορικά είδη, ενέχει ο κίνδυνος της εμφάνισης ασυμβατότητας στο σύστημα. Για τον περιορισμό του κινδύνου, η εκτίμηση της καταλληλότητας απαιτείται για να αξιολογηθεί το περιβάλλον της εγκατάστασης και τα EMI χαρακτηριστικά του εξοπλισμού, μέσα από την αναθεώρηση των υφιστάμενων δεδομένων, την αναθεώρηση του σχεδιασμού του εξοπλισμού ή των περιορισμένων δοκιμών.

Τα υπάρχοντα δεδομένα δοκιμών EMI θα πρέπει να αναθεωρηθούν, για να καθορισθεί εάν ο εξοπλισμός είναι κατάλληλος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή που

προορίζονται. Αν ένα κομμάτι NDI ή εμπορικό αντικείμενο εξετάζεται για χρήση ως ειδικός εξοπλισμός αποστολής σε αεροσκάφος, τότε ο εξοπλισμός πρέπει να πληροί τις ίδιες EMI απαιτήσεις που επιβάλλονται για άλλες συσκευές στο αεροσκάφος. Ωστόσο, εάν το NDI ή εμπορικό προϊόν εξετάζεται για χρήση σε ένα ηλεκτρομαγνητικά θωρακισμένο επίγειο οχυρωματικό έργο, η επιβολή των απαιτήσεων EMI μπορεί να μην είναι απαραίτητη. Κάθε πιθανή χρήση του NDI ή εμπορικού στοιχείου, θα πρέπει να αναθεωρηθεί για την πραγματική χρήση που προορίζεται και ένας καθορισμός των κατάλληλων απαιτήσεων είναι απαραίτητος για αυτή την εφαρμογή.

Η επιτροπή EMC προτύπων της αμυντικής βιομηχανίας (DIESC) των ΗΠΑ, μελέτησε την καταλληλότητα της χρήσης εξοπλισμού σε στρατιωτικές εφαρμογές που πληρούσε τις προϋποθέσεις για διάφορα εμπορικά EMI πρότυπα. Η DIESC εκτέλεσε λεπτομερείς συγκρίσεις των απαιτήσεων και της μεθοδολογίας δοκιμών των εμπορικών προτύπων σε σχέση με την προτελευταία έκδοση του στρατιωτικού προτύπου MIL-STD-461(E). Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας είναι διαθέσιμα στο θεσμικό κείμενο EPS-MIL-STD-461 [31]: «Τα αποτελέσματα των λεπτομερών συγκρίσεων των ιδιαίτερων EMC απαιτήσεων και διαδικασιών δοκιμών που περιγράφονται στα σημαντικότερα εθνικά και διεθνή εμπορικά πρότυπα με το στρατιωτικό πρότυπο MIL-STD-461E».

Οι ακόλουθες κατευθυντήριες γραμμές θα πρέπει να εξεταστούν κατά την επιλογή και τη χρήση NDI ή εμπορικών στοιχείων στο σύστημα:

α. Τα EMI χαρακτηριστικά του εξοπλισμού μπορεί να θεωρηθούν επαρκή, εάν οι συγκεκριμένες απαιτήσεις του εγκατεστημένου εξοπλισμού σε ένα συγκεκριμένο σύστημα που αναπτύχθηκε από συναρτήσεις μεταφοράς (transfer functions) είναι λιγότερο αυστηρές από εκείνες στις οποίες ο εξοπλισμός έχει σχεδιαστεί και τα εφαρμόσιμα δεδομένα δοκιμών EMI είναι διαθέσιμα για την επαλήθευση της συμμόρφωσης. Η συμμόρφωση με τις EMI απαιτήσεις στο επίπεδο του εξοπλισμού, δεν απαλλάσσει την Υπηρεσία Ανάπτυξης από την ευθύνη για την παροχή συμβατότητας του συστήματος.

β. Σε περίπτωση που η συμμόρφωση με τις ισχύουσες EMI απαιτήσεις στο επίπεδο του εξοπλισμού δεν είναι δυνατόν να είναι τεκμηριωμένες, απαιτείται η εκτέλεση εργαστηριακών EMI δοκιμών, για την παροχή των απαιτούμενων δεδομένων, προκειμένου να αποδειχθεί η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις.

γ. Εάν μετά την αξιολόγηση των δεδομένων EMI του επιπέδου εξοπλισμού, διαπιστωθεί ότι ο εξοπλισμός πιθανόν να μην πληροί τις απαιτήσεις συμβατότητας του συστήματος, τότε είναι ευθύνη της Υπηρεσίας Ανάπτυξης η εφαρμογή τροποποιήσεων της σχεδίασης για την κάλυψη των απαιτούμενων επιπέδων EMI ή η επιλογή άλλου εξοπλισμού με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά.

Υπήρξαν και θετικά και αρνητικά αποτελέσματα EMI με τη χρήση των NDI και εμπορικών στοιχείων στο παρελθόν. Ο στρατός πήρε ηλεκτρονικό εξοπλισμό

αεροσκαφών από εμπορικά αεροσκάφη και τα εγκατέστησε σε στρατιωτικά αεροσκάφη επίγειων βάσεων με θετικά αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυτός ο εξοπλισμός εξετάστηκε και πιστοποιήθηκε με EMI προδιαγραφές εμπορικών αεροσκαφών όπως το RTCA DO-160 [27] που αναφέρθηκε σε προηγούμενες ενότητες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα εμπορικά ηλεκτρονικά συστήματα απαιτούν EMI τροποποιήσεις ώστε να είναι συμβατά με ένα πιο σοβαρό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον ενός στρατιωτικού αεροσκάφους. Για παράδειγμα οι σύγχρονοι αισθητήρες υπερύθρων, που αναπτύχθηκαν αρχικά για χρήση από την αστυνομία, δεν ήταν συμβατοί με το EME ενός στρατιωτικού ελικοπτέρου και σημαντικοί περιορισμοί κατά τη χρήση τους απαιτείται να επιβληθούν. Ένα σύστημα νυχτερινής όρασης που αναπτύχθηκε από το στρατό είχε χρησιμοποιηθεί από το Πολεμικό Ναυτικό ως NDI. Σημαντικά προβλήματα EMC εμφανίσθηκαν στο πλοίο, λόγω του υψηλότερου EME του πλοίου.

Πολλές περιπτώσεις έχουν παρατηρηθεί σε εφαρμογές επί εδάφους, όπου οι εκπομπές EMI από εμπορικό εξοπλισμό ψηφιακής επεξεργασίας παρεμποδίζουν τη λειτουργία των ευαίσθητων δεκτών. Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλούν οι εκπομπές που ακτινοβολούνται από τον επεξεργαστή σημάτων χρονισμού, προκαλώντας παρεμβολή σε εξοπλισμό επικοινωνιών που λειτουργεί στα 30-88 MHz. Το μεγαλύτερο μέρος του εμπορικού εξοπλισμού πιστοποιείται από δοκιμή σε απόσταση τριών μέτρων. Τα προβλήματα σε μεγάλο βαθμό προκαλούνται από τη χρήση των εμπορικών ειδών σε αποστάσεις ενός μέτρου ή και μικρότερο, όπου τα πεδία θα είναι υψηλότερα.

Ένα παράδειγμα προβλημάτων των NDI και εμπορικών στοιχείων στο επίπεδο του συστήματος, που οι περισσότεροι ταξιδιώτες έχουν παρατηρήσει, είναι οι περιορισμοί στη χρήση φορητών ηλεκτρονικών συσκευών σε εμπορικά αεροσκάφη κατά την απογείωση και προσγείωση. Οι περιορισμοί αυτοί λαμβάνουν χώρα, λόγω των πολλών προβλημάτων που σημειώνονται με τη σύζευξη των παρεμβολών από τις φορητές ηλεκτρονικές συσκευές με την κεραία δεκτών που χρησιμοποιούνται για την πλοήγηση και τις επικοινωνίες.

Ο Στρατός πολλών χωρών έχει χρησιμοποιήσει με επιτυχία τα NDI και εμπορικά στοιχεία σε πολλές άλλες περιπτώσεις. Οι χώροι συντήρησης ηλεκτρονικών, γενικά χρησιμοποιούν εξοπλισμό δοκιμών, δομημένο σε εμπορικές EMI προδιαγραφές ή βιομηχανικά πρότυπα, χωρίς να απαιτούνται τροποποιήσεις. Εφαρμογές επίγειων συστημάτων του εξοπλισμού επεξεργασίας δεδομένων, οθόνες και εξοπλισμός γραφείου που χρησιμοποιήθηκαν με άλλα εμπορικά είδη και NDI υπήρξαν επιτυχείς, όπου είχε ληφθεί μέριμνα με την ενσωμάτωση. Η πρωταρχική έμφαση πρέπει να είναι εάν ο εξοπλισμός είναι κατάλληλος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Όταν ένα προϊόν που παραδίδεται αποτελείται από έναν αριθμό από επιμέρους στοιχεία του εξοπλισμού, είναι μερικές φορές πιο αποδοτικό να προσδιορισθεί ένα ολοκληρωμένο εξάρτημα και όχι μεμονωμένα τμήματα του εξοπλισμού. Επίσης, η απόδοση του ολοκληρωμένου συγκροτήματος, όπως έχει εγκατασταθεί στο σύστημα,

είναι το πιο σημαντικό ζήτημα από τα χαρακτηριστικά EMI των επιμέρους στοιχείων που ενδέχεται να τροποποιηθούν με την ενσωμάτωσή τους.

5.3.7.3.2 Διακρίβωση

Όταν απαιτήσεις EMI απαιτούνται για τα NDI ή τα εμπορικά στοιχεία, τότε δεδομένα δοκιμών EMI απαιτούνται για να αποδειχθεί η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις αυτές. Ο εξοπλισμός δεν μπορεί να είναι ευαίσθητος στην EMI που θα τον υποβάθμιζε ή θα τον καταθιστούσε αναποτελεσματικό. Ομοίως, ο εξοπλισμός δεν μπορεί να είναι μια πηγή EMI, που επηρεάζει τη λειτουργία του άλλου εξοπλισμού στο πλαίσιο του συστήματος. Τα NDI και τα εμπορικά στοιχεία, πιθανόν να έχουν προηγουμένως πιστοποιηθεί σε μια ευρεία ποικιλία τύπων των απαιτήσεων EMI. Η ανάλυση της δυνατότητας εφαρμογής του συγκεκριμένου τύπου EMI προδιαγραφών σε σχέση με μία συγκεκριμένη εγκατάσταση του συστήματος, είναι αναγκαία.

Η διακρίβωση απαιτείται για τις ιδιαίτερες απαιτήσεις που επιβάλλονται στην εγκατάσταση του συστήματος. Εάν τα NDI ή τα εμπορικά είδη που επιλέχθηκαν είναι σήμερα σε στρατιωτική χρήση, τότε κατά πάσα πιθανότητα υπάρχουν δεδομένα από δοκιμές EMI τα οποία μπορεί να αξιολογηθούν για την καταλληλότητα. Η διακρίβωση απαιτεί την κατανόηση του περιβάλλοντος της εγκατάστασης, τόσο από την άποψη των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που παρουσιάζονται και της εν δυνάμει ευαισθησίας του εξοπλισμού, όσο και από την αρκετά καλή γνώση των χαρακτηριστικών EMI των NDI και εμπορικών στοιχείων, για να καταλήξουμε σε συμπεράσματα σχετικά με συμβατότητα του συστήματος.

Το μεγαλύτερο μέρος του εμπορικού εξοπλισμού προσδιορίζεται/πιστοποιείται από μία δοκιμή σε απόσταση 3 μέτρων. Το πρότυπο MIL-STD-461F χρησιμοποιεί 1 μέτρο. Κατά την εξέταση της χρήσης NDI ή εμπορικών ειδών, η θέση του εξοπλισμού σε σχέση με τις κεραίες του συστήματος, πρέπει να εξεταστεί κατά την εκτίμηση της καταλληλότητας του εξοπλισμού. Τα δεδομένα από την απόσταση 3 μέτρων, μπορεί να είναι κατάλληλα. Είναι δύσκολο να ερμηνευθούν δεδομένα του εμπορικού εξοπλισμού, που προκύπτουν στο 1 μέτρο. Η κατάσταση αυτή οφείλεται σε μεταβλητά πεδία, σύνθετες αντιστάσεις που συνδέονται με τις εκπομπές κοντινού πεδίου και σε διακυμάνσεις σε πρότυπα εκπομπών απροσδιόριστου κοντινού πεδίου.

Τα NDI και τα εμπορικά ηλεκτρονικά συστήματα, που προσδιορίζονται σε εμπορικά πρότυπα, όπως το RTCA DO-160 [27], είναι γενικά αποδεκτά για στρατιωτική χρήση σε αεροσκάφη επίγειων βάσεων, δεδομένου ότι τα εμπορικά και στρατιωτικά πρότυπα EMI για τα αερομεταφερόμενα ηλεκτρονικά είναι πολύ παρόμοια με τις απαιτούμενες δοκιμές και τα όρια που έχουν επιβληθεί. Με την πάροδο του χρόνου, περισσότερες ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές γενικής χρήσης, απαιτείται να πληρούν κάποια μορφή της απαίτησης EMI. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτές θα ήταν επίσης αποδεκτές για στρατιωτική χρήση και σε άλλες περιπτώσεις, θα απαιτούνταν σε ένα αυστηρότερο όριο περισσότερες δοκιμές ή προσδιορισμός/πιστοποίηση.

Συχνά θα απαιτείται κάποια δοκιμή, για να προσδιορισθούν/πιστοποιηθούν οι σημαντικές ιδιότητες των NDI και των εμπορικών ειδών. Για παράδειγμα, εάν η σύζευξη με συγκεκριμένους δέκτες αποτελεί λόγο ανησυχίας, μία δοκιμή RE102 (radiated emissions, electric field, 10 KHz to 18 GHz) από το πρότυπο MIL-STD-461F που περιορίζεται σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων, πιθανόν μόνο να απαιτηθεί.

5.3.7.4 Μαγνητικό Πεδίο σε DC Περιβάλλον επί των Πλοίων

Τα υποσυστήματα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στα πλοία δεν πρέπει να υποβαθμίζονται, όταν εκτίθενται στο επιχειρησιακό DC μαγνητικό περιβάλλον (όπως το θεσμικό κείμενο DOD-STD-1399-70-1 [32] του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ). Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή.

5.3.7.4.1 Απαίτηση

Τα υψηλού επιπέδου DC μαγνητικά πεδία, σκόπιμα δημιουργούνται στα πλοία κατά τη διάρκεια της μαγνητικής θεραπείας. Η μαγνητική θεραπεία, όπως ο απομαγνητισμός του πλοίου ή η αφαίρεση πλεονάζοντος υλικού (flashing), είναι μια διαδικασία κατά την οποία η μόνιμη μαγνήτιση του πλοίου αλλάζει ή μειώνεται με εφαρμογή μεγάλων μαγνητικών πεδίων. Στο πλοίο απαιτείται να εκτελείται αυτή η διαδικασία σε μία ειδική εγκατάσταπλοία κατά τη διάρκεια της μαγνητικής θεραπείας. Η μαγνητική θεραπεία, όπως, που ονομάζεται εγκατάσταση απομαγνήτισης (deperming). Αυτά τα πεδία που δημιουργούνται από ένα πηνίο από σύρμα, τυπικά 500 χιλιάδων κυκλικών χιλιοστών της ίντσας (MCM), τυλιγμένο γύρω από το σκάφος εξωτερικά, με χιλιάδες amperees να διατρέχουν το πηνίο. Τα πλοία πιθανόν να έχουν ένα σύστημα πηνίου απομαγνήτισης, εγκατεστημένο επί του σκάφους για τη μείωση της μαγνητικής υπογραφής του πλοίου. Αυτά τα καλώδια ενεργοποιούνται από ειδικά τροφοδοτικά εγκατεστημένα επί του σκάφους. Ο έλεγχος των ρευμάτων βασίζεται στην κατεύθυνση του πλοίου και τη θέση του πάνω στη γη.

Το πρότυπο του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ DOD-STD-1399-70-1 [32], παρέχει απαιτήσεις και κατευθύνσεις για την προστασία του εξοπλισμού από τα DC μαγνητικά πεδία. Μετρήσεις επί των πλοίων έχουν δείξει DC μαγνητικά πεδία που κυμαίνονται μεταξύ 40 και 640 A/m ανάλογα με την τοποθεσία και την ώρα κατά την κανονική λειτουργία και 1600 A/m κατά τη διάρκεια της απομαγνήτισης (deperming). Αυτά τα επίπεδα τείνουν να είναι υψηλότερα κάτω από τα καταστώματα πτήσης και ελέγχου. Μια τυπική απαίτηση που επιβάλλεται στον εξοπλισμό είναι να λειτουργεί σε 400 A/m και να επιβιώσει σε 1600 A/m. Μία άλλη σημαντική παράμετρος είναι ο ρυθμός μεταβολής που το μαγνητικό πεδίο μπορεί να ποικίλει και ο οποίος είναι 1600 A/m ανά δευτερόλεπτο. Έρευνες επί του πλοίου για τον καθορισμό των μαγνητικών πεδίων, είναι χρήσιμες στον εντοπισμό περιοχών όπου τα πεδία είναι μικρότερα από 400 A/m ή προσαρμόζονται στην απαίτηση για μία συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης. Θα υπάρξουν περιπτώσεις όπου απαιτείται η απόδοση στα 1600 A/m ή όπου εντοπίζεται θωράκιση, θα πρέπει να χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση.

Τα είδη που επηρεάζονται πιο συχνά από τα DC μαγνητικά πεδία και τις παραλλαγές του είναι οι οθόνες σωλήνα καθοδικών ακτίνων (cathode ray tube monitors). Το μαγνητικό πεδίο της γης ποικίλλει σε μέγεθος μεταξύ 24 και 56 A/m. Τα πεδία αυτά σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι τόσο μεγάλα όσο τα παραγόμενα πεδία των πλοίων. Οι κινητές πλατφόρμες ενδέχεται να αντιμετωπίσουν αλλαγές δύο φορές στο τοπικό πεδίο της γης απλά μέσω της κίνησης και της αλλαγής προσανατολισμού της πλατφόρμας. Οι μη τροποποιημένες εμπορικές οθόνες πιθανόν να βιώσουν παραμόρφωση της εικόνας όταν τα τοπικά πεδία αλλάζουν μόλις 16 A/m.

5.3.7.4.2 Διακρίβωση

Ο έλεγχος είναι το μόνο αποτελεσματικό μέσο για την επαλήθευση της συμμόρφωσης. Το πρότυπο DOD-STD-1399-70-1 [32] παρέχει καθοδήγηση σχετικά με τη μεθοδολογία δοκιμών. Η δοκιμή χρειάζεται κανονικά να πραγματοποιηθεί σε όλους τους άξονες προσανατολισμού του, αν και αυτό δεν είναι πάντοτε δυνατό λόγω του μεγέθους του εξοπλισμού. Η προσομοίωση του ρυθμού μεταβολής του πεδίου είναι μερικές φορές πιο σημαντική από ό, τι το απόλυτο μέγεθος του πεδίου.

5.3.8 Ηλεκτροστατικός Έλεγχος Φορτίου

Το σύστημα πρέπει να ελέγχει με ασφάλεια και να διαλύει τη συσσώρευση ηλεκτροστατικών φορτίων, που προκαλούνται από τις επιδράσεις στατικής κατακρήμνισης (p-static), τη ροή υγρού, τη ροή αέρα, τη ροή των καυσαερίων, τη φόρτιση προσωπικού, τη φόρτιση των οχημάτων εκτόξευσης (συμπεριλαμβανομένων των συνθηκών προ εκτόξευσης) και διαστημικών οχημάτων και άλλων μηχανισμών παραγωγής φορτίου, για την αποφυγή ανάφλεξης καυσίμων, ακούσιας έκρηξης ή των κινδύνων μη εκραγόντων πυρομαχικών, για την προστασία του προσωπικού από τους κινδύνους ηλεκτροπληξίας, για την πρόληψη της υποβάθμισης της απόδοσης ή της βλάβης στις ηλεκτρονικές διατάξεις των συστημάτων. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση, επιθεωρήσεις ή ένα συνδυασμό αυτών.

5.3.8.1 Απαίτηση

Οι τάσεις, που συνδέονται με τη στατική φόρτιση και την ενέργεια, που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια των αποφορτίσεων, είναι δυνητικά επικίνδυνες για το προσωπικό, τους ατμούς των καυσίμων, τα πυρομαχικά και τα ηλεκτρονικά στοιχεία. Η σκόνη, η βροχή, το χιόνι και ο πάγος μπορεί να προκαλέσουν μια ηλεκτροστατική συσσώρευση φορτίου στη δομή του συστήματος, λόγω του διαχωρισμού του φορτίου και το φαινόμενο ονομάζεται κατακρήμνιση (precipitation) στατικής φόρτισης. Τα καύσιμα που περισεύουν σε δεξαμενές και η ροή καυσίμων στους αγωγούς, μπορεί να δημιουργήσει μια συσσώρευση φορτίου που καταλήγει σε ένα πιθανό κίνδυνο από τα καύσιμα λόγω σπινθήρων. Οποιοδήποτε άλλο υγρό ή αέριο που ρέει στο σύστημα (όπως ψυκτικό υγρό ή αέρας) μπορούν επίσης να εναποθέσουν φορτίο με δυνητικά επικίνδυνες συνέπειες.

Κατά τη διάρκεια της συντήρησης, η επαφή του προσωπικού με τη δομή και τα διάφορα υλικά μπορεί να δημιουργήσουν ηλεκτροστατική συσσώρευση φορτίου τόσο στο προσωπικό όσο και στη δομή (ιδιαίτερα σε μη αγώγιμες επιφάνειες). Αυτή η συσσώρευση μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο για την ασφάλεια του προσωπικού ή των καυσίμων ή μπορεί να προκαλέσει ζημιά στα ηλεκτρονικά στοιχεία. Δυνητικά ευαίσθητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα είναι τα μικροκυκλώματα, οι μεμονωμένοι ημιαγωγοί, αντιστάσεις από λεπτό ή παχύ φύλλο μεταλλικού υλικού (film resistors), τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, οι υβριδικές συσκευές και οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι, ανάλογα από το μέγεθος και το σχήμα του παλμού της ηλεκτροστατικής εκκένωσης (ESD).

Τα μη παραγωγικά (Dudding) αποτελέσματα από την εφαρμογή ή την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή της ενέργειας κάτω από αυτήν που απαιτείται για την εκκίνηση, προκαλούν απευαισθητοποίηση του EID. Αν το EID έχει απευαισθητοποιηθεί, το συνιστώμενο ερέθισμα εκκίνησης μπορεί να μην είναι αρκετό για να ενεργοποιήσει την ηλεκτρονική αναγνώριση όταν ο κατάλληλος παλμός πυροδότησης εφαρμοσθεί, καταλήγοντας σε αποτυχία. Τα πυρομαχικά είναι δυνητικά επιρρεπή σε αντιπαραγωγικές (dudding) επιδράσεις από ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Η κύρια ανησυχία είναι η αποφόρτιση από το σύρμα γεφύρωσης του EID που χρησιμοποιείται για την πυροδότηση του εκρηκτικού. Τα διαστημικά οχήματα και τα οχήματα εκτόξευσης έχουν βιώσει τις συνέπειες διαχωρισμού φορτίου στο διάστημα από το φως του ήλιου που προσπίπτει στην επιφάνεια των οχημάτων.

Κάθε στοιχείο της δομής του συστήματος μπορεί να συσσωρεύσει ένα ηλεκτροστατικό φορτίο και συνεπώς πρέπει να παρέχονται τα κατάλληλα μέσα, για να διαλύσει το φορτίο σε χαμηλά επίπεδα και να αποφευχθεί η ανάπτυξη οποιασδήποτε σημαντικής τάσης. Ηλεκτρικά αγώγιμα και μη αγώγιμα υλικά συμπεριφέρονται διαφορετικά. Αποθέματα φορτίων σε αγώγιμα υλικά θα μετακινηθούν στο υλικό, έτσι ώστε όλα τα τμήματα βρίσκονται στο ίδιο ηλεκτρικό δυναμικό. Φορτία που εναποτίθενται σε καθαρά μη αγώγιμο υλικό δεν δύνανται να μετακινηθούν και μεγάλες διαφορές τάσεων μπορεί να υπάρχουν σε μικρές αποστάσεις.

Ο έλεγχος της στατικής φόρτισης επιτυγχάνεται με την εξασφάλιση ότι όλες οι δομικές επιφάνειες είναι τουλάχιστον ελαφρώς αγώγιμες, ότι όλα τα εξαρτήματα είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα και ότι παρέχεται μια ηλεκτρική διαδρομή προς τη γη. Σε γενικές γραμμές, οι αγώγιμες επικαλύψεις πρέπει να εφαρμόζονται σε όλα τα εσωτερικά και εξωτερικά τμήματα της δομής του συστήματος, τα οποία είναι ηλεκτρικά μη αγώγιμα. Για τις περισσότερες εφαρμογές, οι διαδρομές αντιστάσεως από 10^6 έως 10^7 ohms (ή 10^7 έως 10^{10} ohms ανά τετράγωνο) αρκούν για να διαλύσουν τη συγκέντρωση φορτίου. Ο συντελεστής του δέκα μεταξύ των δύο περιοχών οφείλεται στη γεωμετρία των ομόκεντρων δακτυλίων που χρησιμοποιούνται σε συγκροτήματα ηλεκτροδίων για τη μέτρηση της επιφανειακής ειδικής αντιστάσεως. Αυτή η μετατροπή μπορεί να μην είναι κατάλληλη για τα υλικά που είναι επενδυμένα με μεταλλικές επιστρώσεις ή ελάσματα. Οι τιμές στις

αναφερθέντες περιοχές θεωρούνται «στατικού διασκορπισμού (static dissipative)» με τις χαμηλότερες τιμές να ορίζονται «αγώγιμες». Για σκοπούς θωράκισης, οι χαμηλότερες τιμές θα παράγουν ανώτερες προστατευτικές ιδιότητες. Ωστόσο, στη συντήρηση και επισκευή των ηλεκτρονικών τα υλικά του στατικού διασκορπισμού είναι στην πραγματικότητα πιο επιθυμητά, δεδομένου ότι ελαχιστοποιούν το ρεύμα εκφόρτισης από συσκευές που διατηρούν ήδη ένα φορτίο. Ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας για το προσωπικό αρχίζει στα περίπου 3000 Volts. Ως εκ τούτου, η φόρτιση για τα εξαρτήματα του συστήματος δε θα πρέπει να υπερβαίνει τα 2500 Volts.

Το πρότυπο ANSI/ESD S20.20 [33], που εκδόθηκε από την Ένωση Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης (ESDA), προβλέπει απαιτήσεις για το σχεδιασμό και τη δημιουργία ενός προγράμματος ελέγχου ESD, προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι κίνδυνοι για τις ευαίσθητες συσκευές στην ESD. Είναι ουσιαστικά εφαρμόσιμη για όλα τα στάδια δραστηριοτήτων, που σχετίζονται με τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό από την παραγωγή, τον έλεγχο, τη συσκευασία, μέχρι και την επισκευή σε επιχειρησιακή χρήση. Αυτό το έγγραφο προέκυψε από μία προσπάθεια συνεργασίας μεταξύ των εμπορικών και στρατιωτικών εμπειρογνομώνων. Αποτελεί τη βάση για τη λήψη μέτρων προστασίας ESD, που υλοποιείται από την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ, τόσο για τους συμβατικούς μηχανισμούς κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, όσο και για τους στρατιωτικούς χειριστές και συντηρητές. Το εγχειρίδιο ESD TR 20.20 [34] είναι ένα εγχειρίδιο το οποίο παρέχει οδηγίες για την εφαρμογή του ANSI/ESD S20.20.

Τα συστήματα πρέπει να ενσωματώσουν χαρακτηριστικά, για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα σπινθήρων μέσα στο σύστημα καυσίμου. Ο σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να εξετάσει την ηλεκτρική αγωγιμότητα των καυσίμων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και τον έλεγχο της αγωγιμότητας, εάν είναι απαραίτητο. Οι αναθυμιάσεις του καυσίμου μπορεί να αναφλεγούν με περίπου 0,2 millijoules ενέργειας. Καθώς με τα δομικά χαρακτηριστικά του συστήματος, κάθε εξάρτημα του συστήματος καυσίμου μπορεί να συσσωρεύσει ένα ηλεκτροστατικό φορτίο, πρέπει να παρέχονται και επαρκή μέσα για να διαλύσει το φορτίο. Μέτρα ηλεκτρικής σύνδεσης, γείωσης και αγωγίμης επικάλυψης πρέπει να εφαρμοστούν. Οι γραμμές καυσίμου, που δρομολογούνται μέσω δεξαμενών καυσίμων, απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή.

Το σύστημα καυσίμου πρέπει επίσης να αποτρέπει τη δημιουργία σπινθήρων εντός των δεξαμενών καυσίμου κατά τις εργασίες ανεφοδιασμού. Μερικές χρήσιμες απαιτήσεις είναι οι εξής:

- α. Η σύνδεση και γείωση των εξαρτημάτων καυσίμου.
- β. Ο περιορισμός της ταχύτητας γραμμής σε όχι περισσότερο από 30 μέτρα ανά δευτερόλεπτο.
- γ. Ο περιορισμός της ταχύτητας εισόδου της δεξαμενής σε όχι περισσότερο από 10 πόδια ανά δευτερόλεπτο.

δ. Ο ανεφοδιασμός της δεξαμενής από το κάτω μέρος. Οδηγίες για τον έλεγχο του στατικού ηλεκτρισμού κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού των αεροσκαφών παρουσιάζεται στο τεχνικό εγχειρίδιο TO 00-25-172 [35].

Το NASA TP2361 [36] έγγραφο, παρέχει οδηγίες σχεδιασμού για θέματα φόρτισης, σε διαστημικά οχήματα και οχήματα εκτόξευσης. Τα υποσυστήματα και ο εξοπλισμός που εγκαθίσταται πάνω διαστημικά συστήματα θα πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των λειτουργικών επιδόσεων τόσο κατά τη διάρκεια, όσο και μετά του σταδίου που υπόκεινται σε μία παλμική εκφόρτιση 10 kV. Η τιμή αυτή προέρχεται από τη φόρτιση επιστρωμάτων μόνωσης και μετέπειτα εκφόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο MIL-STD-1541 [4].

Ένα άτομο συντήρησης που εργαζόταν μέσα σε μία δεξαμενή καυσίμου, βίωσε ένα τόξο από το κλειδί του, όταν αφαιρούσε τα μπουλόνια. Διαπιστώθηκε ότι το προσωπικό συντήρησης λάμβανε στρώματα αφρού που βρίσκονταν στη δεξαμενή, κατά την εκτέλεση της συντήρησης. Η τριβή ανάμεσα στα αφρώδη στρώματα και τα ρούχα επέτρεπε μία συσσώρευση φορτίου που προκαλούσε το τόξο. Όλα τα υλικά που παράγουν στατικά φαινόμενα, θα πρέπει να απαγορεύονται από τη δεξαμενή κατά τη διάρκεια της συντήρησης. Πολλές βλάβες του εξοπλισμού έχουν αποδοθεί σε βλάβη ESD των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

5.3.8.2 Διακρίβωση

Η διακρίβωση του σχεδιασμού προστασίας για ηλεκτροστατική φόρτιση είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί ότι οι κατάλληλοι έλεγχοι έχουν υλοποιηθεί. Η επιλεγμένη μέθοδος διακρίβωσης πρέπει να είναι κατάλληλη για τον τύπο του δομικού υλικού που χρησιμοποιείται και το συγκεκριμένο είδος του ελέγχου που διακριβώνεται. Σχετικά φτωχές ηλεκτρικές συνδέσεις είναι αποτελεσματικές ως διαδρομές εκφόρτισης για τα ηλεκτροστατικά φορτία. Ως εκ τούτου, η επιθεώρηση θα έπρεπε κανονικά να είναι κατάλληλη για τη διακρίβωση ότι τα μεταλλικά και τα αγώγιμα σύνθετα δομικά τμήματα είναι επαρκώς συνδεδεμένα με την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούνται ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά και απολήξεις. Για διηλεκτρικές επιφάνειες οι οποίες χειρίζονται με αγώγιμες απολήξεις, ο έλεγχος της ειδικής αντίστασης της επιφάνειας και η ηλεκτρική επαφή με μία αγώγιμη διαδρομή, θα ήταν πιο κατάλληλες.

Για τα διαστημικά οχήματα και τα οχήματα εκτόξευσης, οι απαιτήσεις ESD επαληθεύονται από μια παλμική εκφόρτιση ανά μία το δευτερόλεπτο, για 30 δευτερόλεπτα σε μια απόσταση των 30 εκατοστών από μία εκτεθειμένη όψη των υποσυστημάτων και του εξοπλισμού. Η δοκιμή αυτή κατόπιν επαναλαμβάνεται χρησιμοποιώντας μια άμεση εκφόρτιση από το ηλεκτρόδιο δοκιμής για κάθε κορυφή της γεωμετρικής γωνίας του υπό δοκιμή εξοπλισμού. Το δίκτυο εφόρτισης είναι 100 pF σε σειρά με 1500 ohms.

Για να αξιολογηθεί κατάλληλα ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων, πρέπει συχνά να λαμβάνει χώρα η διακρίβωση της επαρκούς σύνδεσης των εξαρτημάτων μεταξύ

τους, κατά τη συναρμολόγηση του συστήματος. Μετά την ολοκλήρωση της κατάσκευής η πρόσβαση σε ορισμένα συστατικά στοιχεία μπορεί να περιορίζεται, κάνοντας δύσκολη τη διακρίβωση.

5.3.8.3 Κάθετες Ανυψώσεις και Ανεφοδιασμοί κατά την Πτήση

Το σύστημα πρέπει να πληροί τις λειτουργικές απαιτήσεις απόδοσης του, όταν υποβάλλεται σε 300 kilovolt εκκένωση. Η απαίτηση αυτή ισχύει για τις κάθετες ανυψώσεις αεροσκαφών, για ανεφοδιασμούς κατά τη διάρκεια της πτήσης από οποιοδήποτε αεροσκάφος, για οποιαδήποτε συστήματα που λειτουργούν ή μεταφέρονται εξωτερικά από κάθετες ανυψώσεις αεροσκαφών και για φορητά αντικείμενα από άνθρωπο που μεταφέρονται στο εσωτερικό του αεροσκάφους. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμές (όπως στα πρότυπα MIL-STD-331 [37] ή AECTP-500 - κατηγορία 508 Φυλλάδιο 2 [38]) την ανάλυση, τις επιθεωρήσεις ή ένα συνδυασμό αυτών. Η διάταξη δοκιμής πρέπει να περιλαμβάνει την ηλεκτροστατική εκκένωση (ESD) στην κάθε λειτουργία της κάθετης ανύψωσης και ανεφοδιασμού από αεροσκάφος προσομοίωσης χωρητικότητας 1000 picofarads, μέσω ενός ανώτατου ορίου του ενός ohm αντίστασης, με ένα αυτεπαγωγικό κύκλωμα, που δεν υπερβαίνει τα 20 microhenry.

5.3.8.3.1 Απαίτηση

Κάθε τύπος αεροσκάφους μπορεί να αναπτύξει ένα στατικό φορτίο στην άτρακτο από επιδράσεις ρ-στατικής φόρτισης που αναφέρονται παρακάτω. Τα αεροσκάφη που έχουν την ικανότητα να ανυψώνουν φορτίο ή να εκτελούν ανεφοδιασμό κατά τη διάρκεια πτήσεως, έχουν να αντιμετωπίσουν ειδικά επιχειρησιακά θέματα. Στην περίπτωση της κάθετης ανύψωσης, το συσσωρευμένο φορτίο μπορεί να προκαλέσει ένα τόξο μεταξύ του αγκίστρου και του φορτίου κατά τη διάρκεια της παραλαβής ή μεταξύ του αναρτώμενου φορτίου και της γης κατά τη διάρκεια της παράδοσης. Στην περίπτωση του εν πτήσει ανεφοδιασμού, το αεροσκάφος με τις δεξαμενές, δύναται να είναι σε ένα δυναμικό τάσης και το αεροσκάφος που θα ανεφοδιαστεί θα είναι σε ένα διαφορετικό δυναμικό, που ενδεχομένως θα οδηγήσει σε ένα τόξο κατά τη διάρκεια της σύζευξης των δύο αεροσκαφών. Το μέγιστο αναμενόμενο επίπεδο εκφόρτισης για οποιαδήποτε από αυτές τις περιπτώσεις είναι 300 kV. Τα προκύπτοντα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα μπορούν να επηρεάσουν τόσο το αεροσκάφος, όσο και το αναρτώμενο (suspended) φορτίο.

Για ικανότητα κάθετης ανύψωσης, η απαίτηση θα πρέπει να εφαρμόζεται τόσο για το αεροσκάφος ανύψωσης, όσο και για το σύστημα που ανυψώνεται. Ο προβληματισμός αφορά την ασφαλή και ικανοποιητική λειτουργία του υλικού του συστήματος ανύψωσης και όχι την υποβάθμιση ή μόνιμη βλάβη άλλου εξοπλισμού αποστολής. Για τον ανεφοδιασμό κατά τη διάρκεια της πτήσης, η απαίτηση θα πρέπει να εφαρμόζεται στον εξοπλισμό και τα υποσυστήματα, που λειτουργούν κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού. Ο εξοπλισμός που βρίσκεται κοντά στο υλικό

ανεφοδιασμού είναι πρωταρχικής μέριμνας. Πιθανοί κίνδυνοι λόγω της παρουσίας των εύφλεκτων ατμών καυσίμου πρέπει επίσης να αντιμετωπισθούν.

Για τα όπλα στα οποία είναι φορτωμένα πυρομαχικά, η απαίτηση αυτή ισχύει εκτός από τα υποσυστήματα πυρομαχικών. Παραδείγματα συστημάτων που λειτουργούν εξωτερικά από το σύστημα κάθετης ανύψωσης αεροσκαφών είναι τα SONAR και οι συσκευές που χρησιμοποιούνται από τα διασωστικά ελικόπτερα. Η εκφόρτιση λαμβάνει χώρα για τα συστήματα αυτά, όταν το αντικείμενο πλησιάζει ή όταν έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια της γης ή του νερού.

Για την προστασία του προσωπικού στο έδαφος από την ηλεκτροπληξία, είναι συνήθης πρακτική για τα ελικοφόρα να προσεγγίσουν το έδαφος με το γάντζο πριν συνδεθούν με το φορτίο. Καθώς το φορτίο ανυψώνεται, το όλο σύστημα (αεροσκαφών και του φορτίου) θα γίνει επαναφορτιζόμενο. Και πάλι, όταν το φορτίο κατεβαίνει στο έδαφος, θα πρέπει να αγγίξει το έδαφος για να εκφορτισθεί πριν χειρισθεί από προσωπικό. Το σύστημα του αεροσκάφους και του φορτίου αντιμετωπίζουν συχνά πολλές ηλεκτρικές εκφορτίσεις, καθώς η διαδικασία κατακόρυφης ανύψωσης εκτελείται.

Κατά τη διάρκεια του εν πτήσει ανεφοδιασμού, πιλότοι έχουν αναφέρει ότι είδαν ηλεκτρικό τόξο μεταξύ του ακροδέκτη ανεφοδιασμού και το καλαθιού ανεφοδιασμού κατά τη διάρκεια της σύζευξης. Αυτές οι εκφορτίσεις ήταν αρκετές ίντσες σε μήκος. Βάσει αυτών των παρατηρήσεων, προήλθε ο αριθμός 300 kV. Αεροσκάφη που έχουν αντιμετωπίσει εκφόρτιση από ανεφοδιασμούς εν πτήσει, είχαν δυσλειτουργίες στο σύστημα πλοήγησης με αποτέλεσμα προβλήματα ελέγχου.

5.3.8.3.2 Διακρίβωση

Η πορεία της εκφόρτισης είναι κάπως απρόβλεπτη. Επιθεωρήσεις και αναλύσεις απαιτούνται για να εξακριβώσουν ότι οι υποθέσεις για την πορεία της ροής του ρεύματος είναι εύλογες και ότι η προστασία εφαρμόζεται κατάλληλα. Η δοκιμή είναι απαραίτητη για να αξιολογήσει τις πιθανές διαδρομές όπου είναι πιθανόν να προκύψει περίπτωση εκφόρτισης. Η χωρητικότητα των 1000 picofarad που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή, αντιπροσωπεύει μια λογική τιμή για ένα αεροσκάφος μεγάλου μεγέθους.

Η δοκιμή εξοπλισμού του αεροσκάφους για κατακόρυφη ανύψωση περιελάμβανε την εισαγωγή του γάντζου φορτίου με εκφορτίσεις από μια γεννήτρια mini-Marx. Δοκιμές για τον εν πτήσει ανεφοδιασμό, περιελάμβανε την εισαγωγή του καθετήρα ανεφοδιασμού σε αεροσκάφος εν πτήσει, με εκφορτίσεις από μια γεννήτρια mini-Marx (η γεννήτρια που παράγει ένα παλμό υψηλής τάσης από μία τροφοδοσία χαμηλής DC τάσης). Και οι δύο θετικές και αρνητικές τάσεις εκφόρτισης έχουν χρησιμοποιηθεί και για τους δύο τύπους δοκιμών. Ο εξοπλισμός αεροσκαφών παρακολουθείται για δυσλειτουργία ή αποτυχία.

Ο έλεγχος του φορτίου κάθετης ανύψωσης περιελάμβανε την εφαρμογή των εκφορτίσεων mini-Marx στα εμπορευματοκιβώτια μεταφοράς ή απευθείας στο σύστημα φορτίου ανάλογα με τη διάρθρωση που χρησιμοποιείται στις μεταφορές. Το εμπορευματοκιβώτιο θα πρέπει να έχει τις εκφορτίσεις που εφαρμόζονται σε διάφορες τοποθεσίες γύρω από αυτό. Μετά την εκφόρτιση, το σύστημα ελέγχεται για τη σωστή λειτουργία. Το πρότυπο MIL-STD-331 [37] ή το πρότυπο του Ναυτικού NAVSEAINST 8020.19 [39] παρέχουν καθοδήγηση σχετικά με ζητήματα με εκρηκτικές συσκευές.

5.3.8.4 Στατική Κατακρήμνιση (p-static)

Το σύστημα ελέγχει την p-static παρεμβολή στις κεραίες που συνδέονται με τους δέκτες επί του συστήματος ή της πλατφόρμας υποδοχής, προκειμένου οι απαιτήσεις των λειτουργικών επιδόσεων του συστήματος να πληρούνται. Το σύστημα πρέπει να προστατεύει έναντι διάτρησης των δομικών υλικών και φινιρισμάτων (επενδύσεων), κινδύνων ηλεκτροπληξίας από την πυκνότητα φορτίου των 30 $\mu\text{A}/\text{ft}^2$ (326 $\mu\text{A}/\text{m}^2$). Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση, επιθεωρήσεις ή ένα συνδυασμό αυτών.

5.3.8.4.1 Απαίτηση

Καθώς τα συστήματα σε κίνηση αντιμετωπίζουν σκόνη, βροχή, χιόνι και πάγο, ένα ηλεκτροστατικό φορτίο αυξάνει τις επιπτώσεις στη δομή, που οφείλεται στην στατική φόρτιση λόγω ατμοσφαιρικής κατακρήμνισης (precipitation). Αυτή η συσσώρευση στατικού ηλεκτρισμού προκαλεί την παρουσίαση σημαντικών τάσεων και οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές σε εξοπλισμό, διάτρηση σε διηλεκτρικά υλικά και κινδύνους ηλεκτροπληξίας στο προσωπικό. Για τις εφαρμογές του αεροσκάφους, το ιπτάμενο προσωπικό μπορεί να επηρεασθεί κατά τη διάρκεια της πτήσης και το προσωπικό εδάφους μπορεί να επηρεασθεί μετά την προσγείωση.

Ο στατικός ηλεκτρισμός συσσωρεύεται στο αεροσκάφος κατά την πτήση (p-στατική φόρτιση) επειδή δεν υπάρχει άμεση ηλεκτρική διαδρομή για να μπορέσουν οι φορτίσεις να απορρέουν από το αεροσκάφος. Ειδικοί μηχανισμοί ελέγχου καθίστανται απαραίτητοι για να διαλύσουν το φορτίο. Το συσσωρευμένο φορτίο αναπτύσσει μια τάση σε ένα αεροσκάφος σε σχέση με τον περιβάλλοντα αέρα. Όταν η τάση γίνεται αρκετά υψηλή, ο αέρας διασπάται περιοδικά στα αιχμηρά σημεία του περιγράμματος, όπου το ηλεκτρικό πεδίο είναι το υψηλότερο. Οι αιχμηρές διεγέρσεις παράγουν ευρυζωνικής ακτινοβολίας παρεμβολές οι οποίες μπορεί να υποβαθμίσουν τους δέκτες με συνδεδεμένη κεραία, ιδιαίτερα τους δέκτες με χαμηλότερη συχνότητα. Οι διεγέρσεις μπορεί να συμβούν τόσο γρήγορα, που οι δέκτες παράγουν μόνο έναν συριστικό ήχο και γίνονται άχρηστοι. Οι ατμοσφαιρικής κατακρήμνισης στατικοί εκφορτιστές, συνήθως χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των επιδράσεων. Αυτές οι συσκευές έχουν σχεδιασθεί για να εξέρχεται το συσσωρευμένο φορτίο από το αεροσκάφος, σε επίπεδα αρκετά χαμηλά, προκειμένου να μην προκαλείται παρεμβολή στον δέκτη.

Το συνολικό ρεύμα φόρτισης εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, την εμπρόσθια επιφάνεια του αεροσκάφους και την ταχύτητα του αεροσκάφους (V). Το συνολικό ρεύμα φόρτισης μπορεί να υπολογισθεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$I_t = Q \times C \times S_a \times V \quad (\text{Εξ. 5.10})$$

το συνολικό ρεύμα φόρτισης, σε μA

Q = φορτίο μεταφοράς ανά σωματίδιο που επηρεάζουν την εμπρόσθια επιφάνεια, σε $\mu\text{A}/\text{σωματίδιο}$

C = πυκνότητα σωματιδίων, σε $\text{σωματίδια}/\text{m}^3$

S_a = εμπρόσθια περιοχή επιφάνειας, σε m^2

V = ταχύτητα κίνησης αεροσκάφους, σε m/s

Η γραμμική σχέση με την ταχύτητα δεν ισχύει και σε υψηλότερες ταχύτητες. Αυτό αντικαθίσταται από την χρήση ενός αποτελεσματικού όρου της περιοχής επιφάνειας σε μία απλουστευμένη εξίσωση:

$$I_t = I_c \times S_{eff} \quad (\text{Εξ. 5.11})$$

Όπου:

I_c = η πυκνότητα του ρεύματος φόρτισης, σε $\mu\text{A}/\text{m}^2$

S_{eff} = η αποτελεσματική εμπρόσθια περιοχή, σε m^2

Η S_{eff} , είναι μία συνάρτηση της ταχύτητας κίνησης. Τείνει να αυξάνει με την ταχύτητα κίνησης στο χώρο. Ωστόσο, σε υπερηχητικές ταχύτητες μειώνεται ο ρυθμός φόρτισης, όπως τα κρύσταλλα πάγου λιώνουν κατά την πρόσκρουση.

Οι ακόλουθες πυκνότητες ρεύματος έχουν καθορισθεί για τα διάφορα είδη των νεφών και κατακρήμνισης:

σύνεφο 50 μέχρι 100 $\mu\text{A}/\text{m}^2$

στρατοσωρείτης 100 μέχρι 200 $\mu\text{A}/\text{m}^2$

χιόνι 300 $\mu\text{A}/\text{m}^2$

Σε σπάνιες περιπτώσεις έχουν παρατηρηθεί επίπεδα των 400 $\mu\text{A}/\text{m}^2$.

Ο έλεγχος της συσσώρευσης στατικού φορτίου, επιτυγχάνεται με την εξασφάλιση ότι όλες οι δομικές επιφάνειες είναι τουλάχιστον ελαφρώς αγώγιμες (megohms). Αγώγιμες επικαλύψεις πρέπει να εφαρμόζονται σε όλα τα εξωτερικά τμήματα της δομής του συστήματος, τα οποία είναι ηλεκτρικά μη αγώγιμα. Για οποιοδήποτε συστατικό στοιχείο της δομής που μπορεί να συσσωρεύσει ένα ηλεκτροστατικό

φορτίο, θα πρέπει να παρέχονται επαρκή μέσα για να διαλύσει το φορτίο σε χαμηλά επίπεδα για να αποφευχθεί η ανάπτυξη οποιαδήποτε σημαντικής τάσης.

Ένα μαχητικό αεροσκάφος αντιμετώπιζε σοβαρή υποβάθμιση του δέκτη UHF, όταν πετούσε μέσα ή πλησίον των νεφών. Η έρευνα αποκάλυψε ότι το αεροσκάφος δεν ήταν εξοπλισμένο με ατμοσφαιρικής κατακρήμνισης στατικούς εκφορτιστές. Η εγκατάσταση αυτών των συσκευών επίλυσε το πρόβλημα.

Ένα αεροσκάφος είχε ένα μικρό τμήμα της εξωτερικής δομής κατασκευασμένο από γυάλινες ίνες (fiberglass). Οι επιθεωρήσεις μετά το πέρας της πτήσης, απαιτούσαν το προσωπικό να έρθει σε στενή επαφή με αυτό το μη αγώγιμο διαρθρωτικό συστατικό. Σε αρκετές περιπτώσεις, το προσωπικό δεχόταν σημαντικά ηλεκτρικά «σοκ», τα οποία προκαλούσαν πτώσεις του προσωπικού από τις σκάλες με επακόλουθο και τραυματισμούς. Η διορθωτική ενέργεια επίλυσης του προβλήματος επιτυγχανόταν εύκολα, με την εφαρμογή ενός αγώγιμου χρώματος στις επιφάνειες που εκτίθενται σε ροή αέρα και την επαφή του προσωπικού.

Οι στατικές εκφορτίσεις από το κουβούκλιο (canopy) του αεροσκάφους ήταν συγκλονιστική βιωματική κατάσταση για τους πιλότους σε μαχητικά αεροσκάφη, κατά τη διάρκεια της πτήσης. Τα φορτία που συσσωρεύονταν στο εξωτερικό του θόλου, προκαλούσαν προφανώς ένα παρόμοιο φορτίο σε μία αγώγιμη επικάλυψη που ήταν στο εσωτερικό του θόλου. Όταν συνέβαινε μία εκφόρτιση στο εξωτερικό του θόλου, το εσωτερικό φορτίο εκφορτιζόταν στο κράνος του πιλότου. Μία σωστή γείωση της αγώγιμης επικάλυψη στο εσωτερικό του θόλου, επίλυσε το πρόβλημα.

Όταν ένα αεροσκάφος πετούσε στα σύννεφα κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας, ο πιλότος δεν ήταν σε θέση να μεταδώσει ή να λάβει σήματα ραδιοεπικοινωνιών. Περαιτέρω έρευνες έγιναν και το πιο λογικό συμπέρασμα που εξήχθη ήταν ότι η καταστολή ασυρμάτου προκλήθηκε από ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Αρκετά περιστατικά έχουν επίσης αναφερθεί, στα οποία οι πιλότοι και τα πληρώματα εδάφους δέχτηκαν ηλεκτρικά «σοκ», που οφείλονται σε στατικές εκφορτίσεις από τους θόλους των αεροσκαφών. Αυτά τα περιστατικά συνέβησαν στους αεροδιαδρόμους των καταστρωμάτων, αφού τα αεροσκάφη είχαν πτήσεις αρκετών ωρών.

Θόλοι και διηλεκτρικές επικαλύψεις των δομικών υλικών είχαν διαρραγεί, λόγω των μεγάλων τάσεων που παρουσιάστηκαν από τη συσσώρευση στατικού φορτίου.

Ανακαλύφθηκε σε ένα αεροσκάφος που αντιμετώπιζε ρ-στατικά προβλήματα, ότι οι στατικοί εκφορτιστές που είχαν εγκατασταθεί, χρησιμοποιούσαν μια συγκολλητική ουσία που δεν ήταν ηλεκτρικά αγώγιμη.

5.3.8.4.2 Διακρίβωση

Συστήματα, υποσυστήματα και εξοπλισμός πρέπει να ελέγχονται ότι δεν συνιστούν κίνδυνο όταν υποβάλλονται σε ρ-στατική φόρτιση. Αγώγιμη επικάλυψη αντίστασης

πρέπει να διακριβώνεται ότι εμπίπτει εντός του δοθέντος εύρους, προκειμένου να μην προκαλείται υπερβολική συσσώρευση ηλεκτροστατικού φορτίου.

Σχετικά φτωχές ηλεκτρικές συνδέσεις είναι αποτελεσματικές ως διαδρομές εκκένωσης για ηλεκτροστατική φόρτιση. Ως εκ τούτου, η επιθεώρηση θα έπρεπε κανονικά να είναι κατάλληλη για την επαλήθευση ότι τα μεταλλικά και αγωγίμα συστατικά δομικά τμήματα είναι επαρκώς συνεκτικά υπό την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούνται ηλεκτρικά αγωγίμα υλικά και απολήξεις/επενδύσεις. Μία συσκευή ικανή για μέτρηση της αντίστασης επιφάνειας εντός του δοθέντος εύρους θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να δοκιμαστεί η αντοχή της επιστρωμένης περιοχής.

Ο έλεγχος υλικού που εφαρμόζει ηλεκτρικό φορτίο σε επιφάνειες του συστήματος πρέπει να είναι σε θέση να απομονώσει και να εντοπίσει τις πηγές του φαινομένου κορώνας, να εντοπίσει μεμονωμένα μέταλλα, να προσδιορίσει τα διαδοχικά (streamering) προβλήματα επιφάνειας και να επιτρέπει την αξιολόγηση των επιπτώσεων στους δέκτες με συνδεδεμένες κεραίες.

Μια εκκένωση κορώνας είναι το φαινόμενο που δημιουργείται σε ένα αέριο διάκενο μεταξύ δύο ηλεκτροδίων διαφορετικής ακτίνας καμπυλότητας, όταν αυτά βρίσκονται υπό την επίδραση διαφοράς δυναμικού μερικών kV. Η εκκένωση κορώνας συνοδεύεται από την εμφάνιση ηλεκτρικών, οπτικών, ακουστικών, χημικών, αεροδυναμικών (ηλεκτρικός άνεμος) και ραδιοηλεκτρικών φαινομένων. Ο ηλεκτρικός άνεμος είναι ένα φαινόμενο το οποίο δημιουργείται από τη μετάδοση της ορμής των ιόντων στα ουδέτερα μόρια του αερίου οπότε παρατηρείται μία κίνηση του αερίου από το ηλεκτρόδιο με μικρή ακτίνα καμπυλότητας, προς το άλλο ηλεκτρόδιο

Ο συντονισμός μεταξύ των μηχανολόγων και ηλεκτρολόγων μηχανικών είναι απαραίτητος για να εξασφαλισθεί ότι όλες οι απαιτούμενες περιοχές έχουν αξιολογηθεί. Για παράδειγμα, ένα δομικό στοιχείο άλλαξε σε ένα αεροσκάφος από αλουμίνιο σε γυάλινη ίνα (fiberglass) και πραγματοποιήθηκε συσσώρευση ηλεκτροστατικού φορτίου κατά την πτήση η οποία είχε ως αποτέλεσμα την ηλεκτροπληξία στο προσωπικό εδάφους. Ο μηχανολόγος μηχανικός έκανε αυτή την αλλαγή χωρίς τον ανάλογο συντονισμό, η οποία οδήγησε σε μία ακριβή τροποποίηση για τη διόρθωση του προβλήματος του ηλεκτρικού «σοκ».

5.3.8.5 Υποσυστήματα Πυρομαχικών

Τα υποσυστήματα πυρομαχικών, δεν πρέπει να τίθενται σε εφαρμογή ακούσια ή να αχρηστεύονται από μία ESD 25 kilovolt, που προκλήθηκε από προσωπικό χειρισμό. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμές (όπως το πρότυπο MIL-STD-331 [37] ή το AECTP 500 - κατηγορία 508 Φυλλάδιο 2 [38]), αποφορτίζοντας ένα πυκνωτή 500 picofarad μέσω 500 ohm αντίστασης με ένα αυτεπαγωγικό κύκλωμα που να μην υπερβαίνει τα 5 microhenry στα υποσυστήματα πυρομαχικών (όπως ηλεκτρικές διεπαφές, περιβλήματα και σημεία χειρισμού).

5.3.8.5.1 Απαίτηση

Εκρηκτικά υποσυστήματα χρησιμοποιούνται για πολλούς σκοπούς, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων εκτόξευσης του αεροσκάφους, συστημάτων διαφυγής, πυραυλοκινητήρων και εκρηκτικών κεφαλών. Τάσεις και ενέργειες εκφόρτισης που συνδέονται με την ESD μπορεί ακούσια να αναφλέξουν ή πυροδοτήσουν αυτές τις συσκευές. Οι συνέπειες μπορεί να είναι επικίνδυνες.

Η απαίτηση αυτή βασίζεται σε επίπεδα φόρτισης που θα μπορούσαν ενδεχομένως να αναπτυχθούν σε προσωπικό. Όλα εκρηκτικά υποσυστήματα πρέπει να πληρούν αυτή την απαίτηση για να εγγυηθεί η ασφάλεια του προσωπικού που τα χειρίζεται. Τα εκρηκτικά υποσυστήματα που έχουν τεθεί σε λειτουργία από την ESD, η οποία προκλήθηκε από ανθρώπινη επαφή ή άλλες πηγές ESD.

5.3.8.5.2 Διακρίβωση

Λόγω της υψηλής κρισιμότητας της διατήρησης της ασφάλειας των εκρηκτικών, η υψηλή εμπιστοσύνη που παρέχεται από τη δοκιμή είναι απαραίτητη για να διασφαλισθεί ότι πληρούνται οι απαιτήσεις.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, η αυτεπαγωγή του κυκλώματος θα πρέπει να περιορισθεί στα 5 microhenries. Ο πυκνωτής 500 picofarad και η αντίσταση 500 ohm, επιλέχθηκαν για να προσομοιώσουν τα χαρακτηριστικά της χειρότερης περίπτωσης εκφόρτισης του ανθρώπινου σώματος, λόγω της κρίσιμης φύσης των πυρομαχικών. Ένας σημαντικός αριθμός των συστατικών στοιχείων πρέπει να δοκιμασθεί ώστε να παρασχεθεί μια στατιστική βάση για το συμπέρασμα ότι η προϋπόθεση αυτή πληρούται. Για τα EID's, οι εκφορτίσεις πρέπει να εφαρμοστούν και στις δύο περιπτώσεις μεθόδων (ακροδέκτη σε ακροδέκτη και ακροδέκτη σε κυτίο) για τις δύο πολικότητες.

Ένα πύραυλος εδάφους-αέρος καθώς μετακινούταν από ένα container εξερράγη. Πιθανολογήθηκε ότι το ατύχημα πιθανόν να προκλήθηκε από μια ηλεκτροστατική εκκένωση του προωθητικού (όχι στα EID's).

5.3.8.6 Ηλεκτρικά και Ηλεκτρονικά Υποσυστήματα

Τα συστήματα πρέπει να εξασφαλίζουν, ότι όλες οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές που δεν διασυνδέονται ή ελέγχουν στοιχεία πυρομαχικών, δεν πρέπει να καταστραφούν λόγω των ηλεκτροστατικών εκκενώσεων κατά τη διάρκεια της κανονικής εγκατάστασης, χειρισμού και λειτουργίας. Το περιβάλλον ESD ορίζεται ως 8 kV (εκκένωση επαφής) ή 15 kV (εκκένωση του αέρα) ηλεκτροστατικής εκκένωσης. Αποφορτίζοντας έναν πυκνωτή 150 picofarad μέσω μίας αντίστασης 330 ohm, με ένα αυτεπαγωγικό κύκλωμα που δεν υπερβαίνει τα 5 microhenry προς το ηλεκτρικό/ηλεκτρονικό υποσύστημα [όπως περίβλημα συνδετήρα (όχι pin), κυτία και σημεία χειρισμού]. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή (όπως το AECTP-500, κατηγορία 508 Φυλλάδιο 2 [38]).

5.3.8.6.1 Απαίτηση

Τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά υποσυστήματα περιέχουν ευαίσθητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που μπορούν ακούσια να υποστούν βλάβη από ανθρώπινες ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις κατά τη διάρκεια μετακίνησης και αντικατάστασης, μεταφοράς και άλλων ενεργειών συντήρησης. Παρόλο που περιλαμβάνονται στο επίπεδο συστήματος, η απαίτηση αυτή και η αντίστοιχη μεθοδολογία διακρίβωσης εφαρμόζεται στο επίπεδο εξοπλισμού.

Η απαίτηση αυτή βασίζεται στα επίπεδα φόρτισης που θα μπορούσαν ενδεχομένως να αναπτυχθούν για το προσωπικό κατά τη διάρκεια μετακίνησης και αντικατάστασης, μεταφοράς και άλλων ενεργειών συντήρησης. Πολλές βλάβες του εξοπλισμού έχουν αποδοθεί σε βλάβη των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, λόγω ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

5.3.8.6.2 Διακρίβωση

Για να αποφευχθούν οι επιπτώσεις στην αποστολή και το χρονοδιάγραμμα και το κόστος των ακριβών επισκευών, η υψηλή εμπιστοσύνη που παρέχεται από τη δοκιμή είναι απαραίτητη για να διασφαλισθεί ότι πληρούνται οι απαιτήσεις.

Ο πυκνωτής 150 picofarad και η αντίσταση 330 ohm χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση μίας ανθρώπινης εκφόρτισης που αντιπροσωπεύεται με μία διπλά εκθετική κυματομορφή με χρόνο ανόδου 2-10 νανοδευτερόλεπτα και διάρκεια παλμού περίπου 150 νανοδευτερόλεπτα. Τουλάχιστον πέντε εκφορτίσεις από θετική πολικότητα και πέντε εκφορτίσεις από αρνητική πολικότητα πρέπει να εφαρμόζονται στα κυτία, ενώσεις, συνδετήρες και οποιαδήποτε άλλη θέση του κυτίου του εξοπλισμού, όπου η ESD είναι πιθανό να διαπεράσει την εσωτερική διάταξη κυκλωμάτων και αυτά είναι προσπελάσιμα κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης ή μεταφοράς του εξοπλισμού. Το υποσύστημα/εξοπλισμός πρέπει να τροφοδοτείται και να παρακολουθείται κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Πολλές βλάβες του εξοπλισμού που περιγράφονται ως «EMI προβλήματα», ήταν το αποτέλεσμα μιας ηλεκτροστατικής εκκένωσης κατά το χειρισμό ή τη μεταφορά του εξοπλισμού.

5.3.9 Κίνδυνοι Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας (EMRA-DHAZ)

Ο σχεδιασμός του συστήματος θα πρέπει να προστατεύει το προσωπικό, καύσιμα και πυρομαχικά από τις επικίνδυνες επιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση, επιθεωρήσεις ή ένα συνδυασμό αυτών.

5.3.9.1 Απαίτηση

Έχει σταθερά εδραιωθεί ότι αρκετά υψηλά ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορεί να βλάψουν το προσωπικό, να προκαλέσουν την ανάφλεξη των καυσίμων και να διεγείρουν τις ηλεκτρικά εκκινούμενες συσκευές (EIDs). Προληπτικά μέτρα πρέπει να εφαρμοσθούν για να εξασφαλισθεί ότι δεν θα αναπτυχθούν μη ασφαλείς συνθήκες.

5.3.9.2 Κίνδυνοι της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας στο Προσωπικό (HERP)

Το σύστημα πρέπει να συμμορφώνεται με τις τα θεσμικά κείμενα των υπηρεσιών του Υπουργείου Αμύνης, που περιλαμβάνουν τα κριτήρια για την προστασία του προσωπικού ενάντια στην επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η πολιτική, για τις υπηρεσίες των ΗΠΑ αναλύεται στο κείμενο DoDI 6055.11 [40]. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση ή συνδυασμό αυτών.

5.3.9.2.1 Απαίτηση

Οι αποδεδειγμένες δυσμενείς βιολογικές επιδράσεις των μη ιοντιζουσών (ηλεκτρομαγνητικές) ακτινοβολιών είναι θερμικές, που προκύπτουν από την υπερθέρμανση του ανθρώπινου σωματικού ιστού. Τα αποτελέσματα της υπερθέρμανσης, όταν το σώμα δεν είναι σε θέση να αντιμετωπίσει ή να διαλύσει επαρκώς τη θερμότητα, παράγονται από την έκθεση σε ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων. Η απόκριση του σώματος εξαρτάται από το επίπεδο της ενέργειας, το χρόνο έκθεσης και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σε αντίθεση με την ιονίζουσα ακτινοβολία, δεν έχουν αποδειχθεί σωρευτικές επιπτώσεις από την επαναλαμβανόμενη έκθεση ή τις μοριακές αλλαγές που μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές γενετικές βλάβες σε βιολογικούς ιστούς. Οι κατευθυντήριες γραμμές και διαδικασίες στην έκθεση σε ραδιοσυχνότητες, έχουν υιοθετηθεί και κοινοποιηθεί για την προστασία του προσωπικού των στρατιωτικών υπηρεσιών από τις βλαβερές συνέπειες της έκθεσης σε ραδιοσυχνότητες. Η οδηγία DoDI 6055.11 εφαρμόζει τα κριτήρια HERP για στρατιωτικές επιχειρήσεις.

Ραντάρ και συστήματα ECM συνήθως παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα κινδύνου για το προσωπικό, λόγω της υψηλής ισχύος εξόδου του πομπού και των χαρακτηριστικών της κεραίας και της πιθανής έκθεσης του υπηρετούντος προσωπικού.

Το προσωπικό που ορίζεται για την επισκευή, τη συντήρηση και τις εγκαταστάσεις δοκιμών έχουν μεγαλύτερες δυνατότητες για υπερέκθεση εξαιτίας της ποικιλίας των καθηκόντων, την εγγύτητα με ακτινοβολούντα στοιχεία και τις πιέσεις για την ταχεία απόκριση της συντήρησης.

5.3.9.2.2 Διακρίβωση

Η ασφάλεια σχετικά με τους κινδύνους RF στο προσωπικό πρέπει να επαληθεύεται. Το κείμενο DoDI 6055.11 παρέχει λεπτομερή μεθοδολογία για την αξιολόγηση των κινδύνων.

Η αξιολόγηση κινδύνου RF γίνεται με τον προσδιορισμό των αποστάσεων ασφαλείας για το προσωπικό, από τις RF εκπομπές. Οι ασφαλείς αποστάσεις μπορεί να προσδιοριστούν με υπολογισμούς που βασίζονται στα χαρακτηριστικά του πομπού RF ή μέσω μέτρησης. Αφού έχει καθοριστεί η απόσταση, απαιτείται επιθεώρηση των περιοχών όπου το προσωπικό έχει πρόσβαση σε συνδυασμό με τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά της κεραίας. Εάν το προσωπικό έχει πρόσβαση σε επικίνδυνες περιοχές, πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα, όπως προειδοποιητικές ενδείξεις και προφυλάξεις στα έντυπα συντήρησης, εγχειρίδια οδηγιών, εγχειρίδια λειτουργίας και άλλα συναφή έντυπα. Το εγχειρίδιο TO 31Z-10-4 [41] της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ, το NAVSEA OP 3565 [42] του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ και το TB MED 523 [43] του Στρατού των ΗΠΑ, παρέχουν τεχνική καθοδήγηση και μεθοδολογία για την αξιολόγηση των κινδύνων RF.

Οι υπολογισμοί της ασφαλούς απόστασης συχνά βασίζονται στην παραδοχή ότι υπάρχουν συνθήκες μακρινού πεδίου για την κεραία. Αυτά τα αποτελέσματα θα είναι συντηρητικά, αν όντως υπάρχουν συνθήκες κοντινού πεδίου. Τα παραπάνω πρότυπα (TO 31Z-10-4 και OP 3565) παρέχουν τεχνικές για τον υπολογισμό της μείωσης του κέρδους για ορισμένους τύπους των κεραιών. Οι μετρήσεις μπορεί να είναι επιθυμητές για καλύτερη ακρίβεια.

Πριν την εκτέλεση μίας έρευνας μέτρησης, θα πρέπει να γίνουν υπολογισμοί για τον προσδιορισμό των αποστάσεων για την έναρξη των μετρήσεων, προκειμένου να αποφευχθούν οι επικίνδυνες εκθέσεις του προσωπικού έρευνας και για την πρόληψη βλαβών στα μέσα. Δεδομένου ότι τα κριτήρια κινδύνου βασίζονται κυρίως στη μέση πυκνότητα ισχύος και στα επίπεδα έντασης πεδίου (τα μέγιστα επίπεδα καθορίζονται επίσης), θα πρέπει να τηρείται μία προσοχή με τους ανιχνευτές (ακροδέκτες) που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις, επειδή έχουν όρια μέγιστης ισχύος, πάνω από τα οποία μπορεί να προκύψει διακοπή λειτουργίας λόγω υπερβολικής θερμότητας των στοιχείων των αισθητήρων ανίχνευσης.

Όταν πολλαπλοί πομποί είναι παρόντες και οι πομποί δεν είναι σε συμφωνία φάσης (η συνήθης περίπτωση), η προκύπτουσα πυκνότητα ισχύος είναι προσθετική. Το αποτέλεσμα αυτό πρέπει να εξεταστεί και για τις δύο προσεγγίσεις υπολογισμού και μέτρησης.

Επιπρόσθετα του κινδύνου του κύριου λοβού, εντοπίστηκαν «θερμά σημεία (hot spots)» που μπορούν να παραχθούν με ανακλάσεις της μεταδιδόμενης ενέργειας από οποιαδήποτε μεταλλική δομή. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να εμφανιστούν σε περιοχές που έχουν γενική πυκνότητα ισχύος μικρότερη από τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια έκθεσης.

Η εμπειρία έχει δείξει επί των πλοίων, εκτός εάν το προσωπικό τηρεί τους περιορισμούς (σαφείς ζώνες) γύρω από τα εκπεμπόμενα μέσα, ότι το προσωπικό μπορεί να επηρεαστεί από την εκτεταμένη έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

5.3.9.3 Κίνδυνοι της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας στα Καύσιμα (HERF)

Τα καύσιμα δεν θα πρέπει να αναφλεγούν κατά λάθος από τα ακτινοβολούμενα ΕΜΕ. Τα ΕΜΕ περιλαμβάνουν τους επί του σκάφους/πλατφόρμας πομπούς και τα εξωτερικά ΕΜΕ. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, την ανάλυση, την επιθεώρηση ή ένα συνδυασμό αυτών.

5.3.9.3.1 Απαίτηση

Αναθυμιάσεις καυσίμου μπορούν να αναφλεγούν από ένα τόξο που προκαλείται από ένα ισχυρό πεδίο RF. Η ύπαρξη και η έκταση του κινδύνου καυσίμου προσδιορίζεται από τη σύγκριση της πραγματικής πυκνότητας ισχύος RF με τα καθιερωμένα κριτήρια ασφαλείας. Τα παραπάνω εγχειρίδια της Αεροπορίας και του Ναυτικού των ΗΠΑ ΤΟ 31Z-10-4 και ΟΡ 3565 προβλέπουν διαδικασίες για την εγκαθίδρυση αποστάσεων ασφαλούς λειτουργίας.

Η ενέργεια RF μπορεί να επάγει ρεύματα σε οποιοδήποτε μεταλλικό αντικείμενο. Η ποσότητα του ρεύματος και ως εκ τούτου η δύναμη ενός τόξου ή σπινθήρα που παράγεται μεταξύ δύο ηλεκτρικών αγωγών (ή θέρμανση των μικρών νημάτων) εξαρτάται τόσο από την ένταση του πεδίου της ενέργειας ραδιοσυχνότητας, όσο και σε ποιο βαθμό λειτουργούν ως κεραία λήψης τα αγωγιμα στοιχεία. Πολλά μέρη ενός συστήματος, ένα όχημα ανεφοδιασμού και στατικοί αγωγοί γείωσης μπορεί να λειτουργήσουν ως κεραίες λήψης. Το επαγόμενο ρεύμα εξαρτάται κυρίως από το μήκος του αγωγού σε σχέση με το μήκος κύματος της ενέργειας ραδιοσυχνότητας και τον προσανατολισμό στο ακτινοβολούμενο πεδίο. Δεν είναι εφικτό να προβλεφθούν ή να ελεγχθούν αυτοί οι παράγοντες. Τα κριτήρια κινδύνου πρέπει στη συνέχεια να βασίζονται στην υπόθεση ότι η ιδανική κεραία λήψεως θα μπορούσε να δημιουργηθεί ακούσια με τους αγωγούς.

Υπάρχει μια ειδική περίπτωση κινδύνου RF σε καύσιμα ή όπλα, που μπορεί να υφίστανται έστω και αν τα επίπεδα RF είναι μέσα στα ασφαλή όρια. Αυτή η ειδική περίπτωση είναι και για τους χειρός (1-5 watts) και κινητούς (5-50 watts) πομποδέκτες. Οι κεραίες στον εξοπλισμό μπορεί να δημιουργήσουν επικίνδυνες καταστάσεις, εάν έρθουν σε επαφή με το σύστημα, τα πυρομαχικά ή τον εξοπλισμό υποστήριξης. Για την αποφυγή αυτού του κινδύνου, οι πομποδέκτες δεν θα πρέπει να λειτουργούν εγγύτερα των 10 ποδιών από το πυρομαχικά, τους εξαερισμούς των καυσίμων κτλ.

5.3.9.3.2 Διακρίβωση

Η ασφάλεια σχετικά με τους κινδύνους RF σε καύσιμα πρέπει να επαληθεύεται. Το μεγαλύτερο μέρος του ελέγχου γίνεται με την επιθεώρηση, ανάλυση και με δοκιμές που περιορίζονται σε ειδικές περιπτώσεις.

Τα προαναφερόμενα εγχειρίδια Αεροπορίας και Ναυτικού παρέχουν τη μεθοδολογία για τον υπολογισμό των επικίνδυνων αποστάσεων από τους RF εκπομπούς. Ένα σημαντικό ζήτημα είναι ότι τα κριτήρια κινδύνου των καυσίμων συνήθως βασίζονται στη μέγιστη ισχύ, ενώ τα κριτήρια επικινδυνότητας για το προσωπικό βασίζονται κυρίως στη μέση ισχύ. Κάθε περιοχή στο σύστημα όπου οι αναθυμιάσεις του καυσίμου μπορεί να υπάρχουν, πρέπει να αξιολογηθεί. Οι περιορισμοί σχετικά με τη χρήση κάποιων RF πομπών μπορεί να είναι απαραίτητοι για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια ορισμένων επιχειρήσεων, όπως οι επιχειρήσεις ανεφοδιασμού. Όλες οι απαιτούμενες διαδικασίες πρέπει να τεκμηριώνονται προσεκτικά σε τεχνικές εντολές ή άλλες κατάλληλα έντυπα μεταβλητότητα και το σημείο ανάφλεξης συγκεκριμένων καυσίμων επηρεάζει το κατά πόσον υπάρχει κίνδυνος υπό ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες.

5.3.9.4 Κίνδυνοι της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας στο Πολεμικό Υλικό (HERO)

Ηλεκτρικά εκκινούμενες συσκευές (EIDs) σε πολεμικό υλικό (ή πυρομαχικά), δεν πρέπει να ενεργοποιούνται ακούσια κατά τη διάρκεια ή την υποβολή σε υποβάθμιση των χαρακτηριστικών απόδοσης, μετά από έκθεση στα εξωτερικά επίπεδα των EME του Πίνακα 5-20, τόσο για την άμεση RF που προκαλείται από την ενεργοποίηση του EID, όσο και για την ακούσια ενεργοποίηση ενός ηλεκτροδοτημένου κυκλώματος. Σχετικές φάσεις πυρομαχικών, που περιλαμβάνουν τα μη περιορισμένα και περιορισμένα επίπεδα στον Πίνακα 5-20 αναφέρονται στον Πίνακα 5-21. Προκειμένου να λάβει πιστοποίηση HERO, την «HERO ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΠΥΡΟΜΑΧΙΚΩΝ» σε όλα ή τα κατάλληλα επίπεδα συναρμολόγησης, τα πυρομαχικά ή το σύστημα υπό δοκιμή (SUT), πρέπει να αξιολογούνται με βάση και σε συμμόρφωση με τον ΠΙΝΑΚΑ 5-20. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή και ανάλυση, με τη χρήση της μεθοδολογίας στο πρότυπο MIL-HDBK-240 [44].

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-20: Μέγιστα Εξωτερικά EME Επίπεδα για Πυρομαχικά

Εύρος συχνοτήτων		Πυκνότητα πεδίου (V/m - rms)			
(MHz)	(MHz)	Μη περιορισμένο		Περιορισμένο (2)	
		Μέγιστη τιμή	Μέσος όρος	Μέγιστη τιμή	Μέσος όρος
0.01	2	200	200	80	80

Εύρος συχνοτήτων		Πυκνότητα πεδίου (V/m - rms)			
(MHz)	(MHz)	Μη περιορισμένο		Περιορισμένο (2)	
		Μέγιστη τιμή	Μέσος όρος	Μέγιστη τιμή	Μέσος όρος
2	30	200	200	100	100
30	150	200	200	80	80
150	225	200	200	70	70
225	400	200	200	100	100
400	700	2200	410	450	100
700	790	700	410	270	270
790	1000	2600	490	1400	270
1000	2000	6100	600	2500	160
2000	2700	6000	500	490	160
2700	3600	27460(1)	2620(1)	2500	220
3600	4000	8600	280	1900	200
4000	5400	9200	660	650	200
5400	5900	9200	660	6200	240
5900	6000	9200	270	550	240
6000	7900	4100	400	4100	240
7900	8000	550	400	550	200
8000	8400	7500	400	1100	200
8400	8500	7500	400	1100	200

Εύρος συχνοτήτων		Πυκνότητα πεδίου (V/m - rms)			
(MHz)	(MHz)	Μη περιορισμένο		Περιορισμένο (2)	
		Μέγιστη τιμή	Μέσος όρος	Μέγιστη τιμή	Μέσος όρος
8500	11000	7500	910	2000	300
11000	14000	7500	680	3500	220
14000	18000	8700	680	8700	250
18000	50000	2900	580	2800	200

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

1. Τα επίπεδα ΕΜΕ στον πίνακα εφαρμόζονται σε πλοία εκτόξευσης πυρομαχικών που θα διασχίσουν την κύρια δέσμη συστημάτων στην περιοχή συχνοτήτων 2700 έως 3600 MHz, για εμπόλεμες επιφάνειες. Για όλα τα άλλα πυρομαχικά, το απεριόριστο επίπεδο κορυφής ΕΜΕ είναι 12667 V/m και το απεριόριστο μέσο επίπεδο είναι 1533 V/m.

2. Σε κάποιες από τις περιοχές συχνοτήτων για τη στήλη «Περιορισμένος μέσος όρος», ο περιορισμός της έκθεσης του προσωπικού στο χρόνο κατά μέσο όρο, θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις των κινδύνων των πυρομαχικών για την ασφάλεια του προσωπικού.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-21: Φάσεις Πυρομαχικών και Συσχετιζόμενα Περιβάλλοντα

Απόθεμα στις φάσεις ασφαλούς διαχωρισμού	Περιβάλλον
Μεταφορά/Αποθήκευση	Μη περιορισμένο
Συναρμολόγηση/Αποσυναρμολόγηση	Περιορισμένο
Οργανωμένο σε στάδια	Μη περιορισμένο
Φορτωμένο/Μη φορτωμένο	Περιορισμένο
Πλατφόρμα φόρτωσης	Μη περιορισμένο
Άμεση θέση εκτόξευσης	Περιορισμένο

5.3.9.4.1 Απαίτηση

Η ενέργεια RF επαρκούς μεγέθους για να πυροδοτήσει ή αχρηστεύσει τις EIDs μπορεί να συζευχθεί από το εξωτερικό EME μέσω της καλωδίωσης του εκρηκτικού υποσυστήματος ή να συζευχθεί χωρητικά από τα κοντινά ακτινοβολούντα αντικείμενα. Οι πιθανές συνέπειες περιλαμβάνουν τόσο τους κινδύνους για την ασφάλεια, όσο και την υποβάθμιση των αποδόσεων. Ο Πίνακας 5-20 βασίζεται σε ένα συνδυασμό των ανώτατων επιπέδων από τους άλλους πίνακες EME που αναλύθηκαν στην ενότητα 5.3.3. Η τεκμηρίωση και οι υποθέσεις που οδήγησαν στον παραπάνω πίνακα, αναλύονται λεπτομερώς στο MIL-HDBK-235-7 [45]. Εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά από την υπηρεσία προμηθειών, όλα τα πυρομαχικά πρέπει να σχεδιαστούν για να λειτουργούν στο κοινό EM περιβάλλον, που αναλύεται λεπτομερώς στον υπόψη Πίνακα. Ωστόσο, εάν είναι γνωστό ότι ένα στοιχείο πυρομαχικού δεν θα εκτοξευθεί από μία εμπόλεμη επιφάνεια, το επίπεδο στην περιοχή των 2700 μέχρι 3600 MHz μπορεί να τροποποιηθεί όπως υποδεικνύεται στον Πίνακα.

Το πολεμικό υλικό περιλαμβάνουν οπλικά συστήματα, πυραύλους, εκρηκτικές ύλες, τα ίδια τα EIDs, βεγγαλικά, φωτοβολίδες, πυροκροτητές, εκρηκτικά μπουλόνια, φυσίγγια ηλεκτρικού εμπυρεύματος, εκρηκτικές συσκευές καταστροφής και βοηθητικούς πύραυλους απογείωσης.

Ο Πίνακας 5-20 προβλέπει τόσο «μη περιορισμένα» όσο και «περιορισμένα» περιβάλλοντα. Το μη περιορισμένο περιβάλλον αντιπροσωπεύει τα χειρότερα επίπεδα περιπτώσεων στα οποία το πυρομαχικό μπορεί να εκτεθεί. Το περιορισμένο περιβάλλον περιλαμβάνει περιπτώσεις όπου το προσωπικό σχετίζεται άμεσα με το πυρομαχικό (συναρμολόγηση/αποσυναρμολόγηση, φόρτωση/εκφόρτωση). Για την ειδική περίπτωση της διεύθυνσης επιχειρήσεων, το περιβάλλον περιορίζεται σκοπίμως, για να αποτρέψει το προσωπικό από την έκθεση σε επικίνδυνα επίπεδα ενέργειας EM ή ρεύματων επαφής (ενότητα 5.3.9.2). Ωστόσο, αυτές οι επιχειρήσεις τείνουν να αυξάνουν τα συζευγμένα επίπεδα στα πυρομαχικά, λόγω των ενεργειών, όπως σύνδεση και αποσύνδεση των ηλεκτρικών συνδέσμων. Ως εκ τούτου, τα πυρομαχικά πρέπει να σχεδιαστούν, ώστε να είναι ασφαλή σε αυτούς τους τύπους των δράσεων στα χαμηλότερα πεδία, που σχετίζονται με τα περιορισμένα επίπεδα.

Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις για τις κοινές επιχειρήσεις ή να επιτευχθεί η κατάταξη των HERO ως «HERO SAFE», τα πυρομαχικά, πρέπει να ελέγχονται σε όλο το φάσμα των επιπέδων EME του Πίνακα 5-20, για όλες τις στρατιωτικές υπηρεσίες και για όλες τις φάσεις και διαμορφώσεις του πυρομαχικού. Ειδικά τα περιβάλλοντα για τα κοινά πυρομαχικά περιλαμβάνουν συνθήκες τόσο κοντινού πεδίου όσο και μακρινού πεδίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα πυρομαχικά των συστημάτων μπορεί να εκτεθούν σε επίπεδα διαφορετικά από εκείνα που αναφέρονται στον Πίνακα 5-20. Ειδική μέριμνα θα πρέπει να δοθεί στους πομπούς πλατφόρμας, για να διασφαλιστεί ότι το απαιτούμενο EME αντανakλά τα επίπεδα του, στην τοποθεσία του πυρομαχικού. Για παράδειγμα, το αντιαεροπορικό-

αντιπυραυλικό (Close-In Weapon) σύστημα που εγκαταστάθηκε σε κάποια πλοία του Ναυτικού, είναι κοντά σε κεραιές HF υψηλής ισχύος και τα συστήματα πυρομαχικών που υπάρχουν σε μερικά οχήματα εδάφους [π.χ τα οχήματα που είναι ανθεκτικά στις εκρηκτικές συσκευές (MRAP)] είναι ουσιαστικά συνεγκατεστημένα με πλατφόρμες κεραιών, που απαιτούν πιστοποίηση σε επίπεδα που ξεπερνούν ακόμα και αυτά της απεριόριστης κατηγορίας.

Επιπλέον, για τις κεραιές πλατφόρμας κοντά στα πυρομαχικά, μία δοκιμή HERO στο εσωτερικό του συστήματος μπορεί να απαιτηθεί, για την αντιμετώπιση τόσο των EMEs που υπερβαίνουν εκείνα που βρίσκονται στον υπόψη Πίνακα, όσο και πιθανών επιπτώσεων κοντινού πεδίου. Αντίθετα, για συστήματα εκτόξευσης που βρίσκονται σε αεροσκάφη, τα οποία ποτέ δεν θα λειτουργούν σε ένα περιβάλλον του πλοίου, μπορεί να είναι λογικό να μειωθούν τα επίπεδα EME HERO, έτσι ώστε το στοιχείο να αξιολογηθεί απέναντι στο επιδιωκόμενο επιχειρησιακό περιβάλλον του. Συνεπώς, τα επίπεδα έντασης του πεδίου μπορεί να προσαρμοστούν προς τα πάνω ή προς τα κάτω, ανάλογα με το EME που αναμένεται να αντιμετωπισθεί σε όλες τις φάσεις και διαμορφώσεις του πυρομαχικού. Ωστόσο, ακόμη και αν ένα στοιχείο μπορεί να αξιολογηθεί σε σχέση με ένα προσαρμοσμένο περιβάλλον, θα πρέπει να δοκιμαστεί σε όλο το φάσμα των επιπέδων EME στον Πίνακα 5-20, για να επιτευχθεί η ταξινόμηση HERO σε «HERO SAFE ORDNANCE». Μία τέτοια προσαρμογή θα πρέπει να αντιμετωπισθεί πάνω σε μία ιδιαίτερη βάση.

Η τυχαία διέγερση των ηλεκτρικά διεγερόμενων (εκκινούμενων) συσκευών (EIDs) από την ενέργεια RF δεν είναι ένα νέο πρόβλημα. Οι εμπορικοί κατασκευαστές των πυροκροτητών έχουν προειδοποιήσει σχετικά για τους πιθανούς κινδύνους που συνεπάγεται η χρήση ηλεκτρικά πυροδοτούμενων πυροκροτητών στην περιοχή των πομπών. Οι περισσότερες ηλεκτρικά διεγερόμενες συσκευές (EIDs) χρησιμοποιούν μια μικρή αντίσταση, που ονομάζεται σύρμα γεφύρωσης (bridgewire). Όταν η ηλεκτρικά διεγερόμενη συσκευή (EID) ενεργοποιείται σκόπιμα, ένα παλμικό ρεύμα περνά διαμέσου του σύρματος γεφύρωσης (bridgewire), προκαλώντας τη θέρμανση και συνεπακόλουθα την πυροδότηση του εκρηκτικού φορτίου ή τη λειτουργία της συσκευής. Οι ραδιοσυχνότητες (RF) επάγουν ρεύματα που θα προκαλέσουν θέρμανση του σύρματος γεφύρωσης (bridgewire), που μπορεί να ενεργοποιήσει κατά λάθος το EID. Η συρμάτινη διασύνδεση στο EID γενικά παρέχει το πιο αποτελεσματικό μονοπάτι για τα πεδία ραδιοσυχνότητας, για τη σύζευξη της ενέργειας στο σύρμα γεφύρωσης (bridgewire). Ωστόσο, η ενέργεια RF μπορεί επίσης να πυροδοτήσει εξαιρετικά ευαίσθητες συσκευές, όπως οι ηλεκτρικοί εκκινητές (primers), ως αποτέλεσμα της χωρητικής σύζευξης από κοντινά ακτινοβολούντα αντικείμενα. Η ενέργεια RF μπορεί επίσης να διαταράξει ενεργά κυκλώματα πυροδότησης των EIDs, προκαλώντας την αποστολή λανθασμένων εντολών πυροδότησης στο EID. Οι τύποι των EIDs χωρίς σύρμα γεφύρωσης (bridgewire) χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για πολλές εφαρμογές πυρομαχικών. Η ηλεκτροθερμική συμπεριφορά αυτών των συσκευών διαφέρει σημαντικά από τις

bridgewire συσκευές. Πολλές έχουν πολύ μικρότερους χρόνους απόκρισης και παρουσιάζουν μη-γραμμικά χαρακτηριστικά απόκρισης.

Τα EIDs θα πρέπει να έχουν το υψηλότερο ανώτατο όριο διέγερσης μη πυροδότησης (MNFS) που θα επιτρέψουν στο EID να καλύψει τις απαιτήσεις του συστήματος. Κάθε EID θα πρέπει να κατηγοριοποιείται ως προς το εάν η ακούσια ανάφλεξη του, θα οδηγήσει σε προβλήματα είτε ασφάλειας, είτε υποβάθμισης της απόδοσης (δηλαδή, «αξιοπιστία»). Μια συνέπεια ασφάλειας είναι η ακούσια ενεργοποίηση του EID, που δημιουργεί ένα άμεσο καταστροφικό γεγονός που έχει τη δυνατότητα είτε να καταστρέψει τον εξοπλισμό, είτε να τραυματίσει το προσωπικό, όπως η πυροδότηση ενός μηχανισμού ανάφλεξης πυραύλου από ενέργεια RF ή η ακούσια ενεργοποίηση ενός EID που αυξάνει την πιθανότητα ενός μελλοντικού καταστροφικού γεγονότος με την αφαίρεση ή αλλιώς την απενεργοποίηση χαρακτηριστικών ασφαλείας του στοιχείου πυρομαχικού. Αυτό, για παράδειγμα, θα μπορούσε να προκληθεί από τη διέγερση RF ενός εμβόλου ενεργοποίησης που μετακινεί μια κλειδαριά στο ρότορα S&A (συσκευή που εμποδίζει την τυχαία ενεργοποίηση του εκρηκτικού γεμίσματος από το ενισχυτικό εκρηκτικό υλικό, μέσω μιας διαχωριστικής διάταξης -safety and arming) ενός πυροσωλήνα πυροβολικού, επιτρέποντας έτσι ένα ευαίσθητο πυροκροτητή να περιστρέφεται σε σειρά με τη γραμμή εκρηκτικών. Η υποβάθμιση των επιδόσεων μπορεί να είναι οποιαδήποτε κατάσταση η οποία δεν έχει επιπτώσεις στην ασφάλεια και αναφέρεται ως «αξιοπιστία». Υποβάθμιση των επιδόσεων μπορεί να προκύψει, επειδή ένας EID μπορεί να έχει απευαισθητοποιηθεί, ως αποτέλεσμα των πολλαπλών εκθέσεων χαμηλού επιπέδου, που θα το αποτρέψει από την πυροδότηση όταν θα απαιτηθεί ή θα έχει ήδη αναφλεγεί. Οι κατηγοριοποιήσεις «ασφάλεια» και «αξιοπιστία» θα πρέπει να καθορίζονται από την υπηρεσία προμηθειών.

Το πρότυπο 30393 OD [46] του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ παρέχει τις αρχές και πρακτικές του σχεδιασμού για τον έλεγχο των ηλεκτρομαγνητικών κινδύνων για τα πυρομαχικά. Τα πρότυπα MIL-STD-1576 [47] και MIL-HDBK-83578 [48] της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ παρέχουν οδηγίες σχετικά με τη χρήση του πολεμικού υλικού σε διαστημικά οχήματα και οχήματα εκτόξευσης. Για τις διαστημικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν οπλικά συστήματα, πρέπει να είναι εκτελείται μια ανάλυση των περιθωρίων, που βασίζεται στον καθορισμό κατωφλίου RF του MNFS.

Η απόκριση ενός EID σε ένα ενεργειακό πεδίο RF και η πιθανότητα της πυροδότησης, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες είναι η ισχύς εξόδου του πομπού, τα χαρακτηριστικά διαμόρφωσης, η συχνότητα λειτουργίας, τα χαρακτηριστικά διάδοσης της κεραίας, η διαμόρφωση της καλωδίωσης του EID (όπως θωράκιση, μήκος και προσανατολισμός) και η θερμική σταθερά χρόνου (ο χρόνος που συμβαίνει η θέρμανση και η ψύξη της συσκευής σε κατάσταση ισορροπίας χωρίς εξάρσεις) της συσκευής. Αρκετά περιστατικά στα πλοία του Πολεμικού Ναυτικού, που αφορούν την ακούσια πυροδότηση ρουκετών και πυραύλων, έχουν οδηγήσει σε καταστροφικές απώλειες ζωής και εξοπλισμού.

Υπάρχουν πολλές αναφορές ατυχών περιστατικών εκρήξεων που αφορούν RF επαγωγικά φαινόμενα, με ανεξέλεγκτη ενεργοποίηση των συσκευών αυτόματης πλήρωσης με αέρα (automatic inflator) των σωσιβίων, που φέρονται από το ιπτάμενο προσωπικό τόσο στα καταστρώματα της πτήσης, όσο και κατά τη διάρκεια της πτήσης, καθώς και κατά την απογείωση και προσγείωση στον φορέα. Τα προβλήματα αυτά αποτελούν ένα τεράστιο κίνδυνο για τα πληρώματα, ειδικά εκείνα που εμφανίζονται την ώρα της πτήσης. Η χρήση μη πιστοποιημένων συστημάτων στα πλοία λόγω κοινών επιχειρήσεων έχει οδηγήσει σε επιχειρησιακούς περιορισμούς επί των εκπομπών του πλοίου.

5.3.9.4.2 Διακρίβωση

Η επαρκής σχεδίαση προστασίας για τα ηλεκτρο-εκρηκτικά υποσυστήματα και τα EIDs, πρέπει να διακριβώνεται για να εξασφαλισθεί η ασφάλεια της απόδοσης του συστήματος. Στην περίπτωση που μία θεωρητική εκτίμηση καταδεικνύει θετικά, ότι η ενέργεια που επάγεται από την RF, στις γραμμές πυροδότησης ενός EID ή σε ηλεκτρονικά κυκλώματα που σχετίζονται με κρίσιμες λειτουργίες ασφαλείας είναι αρκετά χαμηλή ώστε να εξασφαλισθεί ένα αποδεκτό περιθώριο ασφαλείας στο καθορισμένο EME (λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές ανακρίβειες στην τεχνική ανάλυση), θα είναι απαραίτητο να διεξαχθεί πρακτική δοκιμασία.

Οι μέθοδοι διακρίβωσης πρέπει να δείξουν ότι τα ηλεκτρο-εκρηκτικά υποσυστήματα δεν θα λειτουργούν ακούσια και οι EIDs δεν θα τίθενται ακούσια σε λειτουργία ή θα αχρηστεύονται κατά το χειρισμό, την αποθήκευση ή την εγκατάσταση στο σύστημα. Η αξιολόγηση της ανοσίας του EID, βασίζεται στο κατώτατο όριο της μη πυροδότησης. Για την αποδοχή, θα πρέπει να αποδειχθεί ότι η ενέργεια RF που προκαλείται σε ένα EID κύκλωμα στο συγκεκριμένο EME, δεν θα υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο επίπεδο που εκφράζεται ως περιθώριο σε dB κάτω από τη μέγιστη ευαισθησία του κατωφλίου μη πυροδότησης για το υπόψη EID. Στο πρότυπο MIL-HDBK-240 [44] υπάρχουν οδηγίες για τη δοκιμή.

Η δοκιμή HERO θα πρέπει να περιλαμβάνει την έκθεση του πυρομαχικού στη δοκιμασία EME σε όλες τις διαμορφώσεις του κύκλου ζωής, συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς/αποθήκευσης, συναρμολόγησης/αποσυναρμολόγησης, φόρτωσης/εκφόρτωσης, προετοιμασίας, φόρτωσης σε πλατφόρμα και το διάστημα αμέσως μετά την εκτόξευση. Το σύστημα θα πρέπει να εκτίθεται στη δοκιμή EME, ενώ υποβάλλεται σε λειτουργικές διαδικασίες που συνδέονται με αυτές τις ρυθμίσεις. Για τις διαμορφώσεις του συστήματος που αποκλειστικά περιλαμβάνουν την παρουσία του προσωπικού, όπως η συναρμολόγηση και η αποσυναρμολόγηση ή η φόρτωση και μεταφόρτωση, τα περιορισμένα επίπεδα στον Πίνακα 5-20, πρέπει να χρησιμοποιούνται με τις εκτιμήσεις του μέσου χρόνου που σχετίζονται με την έκθεση του προσωπικού που υλοποιείται όπου είναι απαραίτητο, για να πληρούνται τα ισχύοντα κριτήρια κινδύνων για το προσωπικό.

Ο Πίνακας 5-22 παρουσιάζει τα κατάλληλα επίπεδα έντασης πεδίου από τον Πίνακα 5-20, καθώς σχετίζονται με τη χαμηλή έναντι της γρήγορης απόκρισης των EIDs και

των ενεργοποιημένων έναντι των μη ενεργοποιημένων κυκλωμάτων πυροδότησης σε όλες τις φάσεις και διαμορφώσεις του πυρομαχικού. Εάν ένα EID θεωρείται αργής ή γρήγορης απόκρισης, εξαρτάται από τη θερμική σταθερά χρόνου του σε σχέση με τα πλάτη παλμού και τη συχνότητα επανάληψης του παλμού του ραντάρ. Ο παράγοντας που υπολογίζει το MNFS σε Watts είναι:

$$MF = \frac{(1-e^{-t_2/\tau})}{(1-e^{-t_1/\tau})} \quad (\text{Εξ. 5.12})$$

Όπου t_1 το πλάτος του παλμού, t_2 το διάστημα του παλμού (1/συχνότητα επανάληψης του παλμού) και τ η σταθερά χρόνου του EID. Στο πρότυπο MIL-HDBK-240 αναλύονται σχετικά οι θερμικές σταθερές χρόνου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-22: Επίπεδα Δοκιμών HERO EME

Αποθέματα σε φάσεις ασφαλούς διαχωρισμού	Επίπεδα EME (1)	
	Μη ενεργοποιημένα κυκλώματα πυροδότησης ή αργής απόκρισης EIDs	Ενεργοποιημένα κυκλώματα πυροδότησης ή γρήγορης απόκρισης EIDs
Μεταφορά/αποθήκευση	Απεριόριστα συνήθη επίπεδα	Απεριόριστα υψηλά επίπεδα (2,3)
Αρμολόγηση/συναρμολόγηση	Περιορισμένα συνήθη επίπεδα	Περιορισμένα υψηλά επίπεδα
Προετοιμασία	Απεριόριστα συνήθη επίπεδα	Απεριόριστα υψηλά επίπεδα (2,3)
Φόρτωση/εκφόρτωση	Περιορισμένα συνήθη επίπεδα	Περιορισμένα υψηλά επίπεδα (4)
Φόρτωση σε πλατφόρμα	Απεριόριστα συνήθη επίπεδα	Απεριόριστα υψηλά επίπεδα (2)
Αμέσως μετά την εκτόξευση	Απεριόριστα συνήθη επίπεδα	Απεριόριστα υψηλά επίπεδα (2)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

1. Τα εφαρμόσιμα επίπεδα έντασης πεδίου, ορίζονται στον Πίνακα 5-20.
2. Τα απεριόριστα επίπεδα κορυφής θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν, εκτός εάν έχουν αναπτυχθεί προσαρμοσμένα περιβάλλοντα.
3. Ισχύει μόνο για EIDs γρήγορης απόκρισης.
4. Μερικά κυκλώματα πυροδότησης μπορεί να ενεργοποιηθούν κατά τη διάρκεια της ακολουθίας φόρτωσης/εκφόρτωσης, προκειμένου να επιτευχθούν πριν και μετά τη φόρτωση διαγνωστικές διαδικασίες.

Για τα αποθέματα στις φάσεις ασφαλούς διαχωρισμού, όπου το προσωπικό απαιτείται να χειριστεί το πυρομαχικά, η έκθεση του προσωπικού πρέπει να περιορίζεται στα επίπεδα έντασης του πεδίου που θεωρούνται ασφαλής σύμφωνα με την οδηγία DoDI 6055.11 [40]. Τα «περιορισμένα» επίπεδα στον Πίνακα 5-20, βασίζονται στα πραγματικά ακτινοβολούντα επίπεδα, στα οποία το προσωπικό εκτίθεται σε κανονικές επιχειρησιακές συνθήκες. Υπάρχουν μερικές περιπτώσεις όπου τα περιορισμένα επίπεδα στον υπόψη Πίνακα υπερβαίνουν τα συνεχόμενα (6 λεπτά ή περισσότερο) Επιτρεπόμενα Όρια έκθεσης (PELs), που αναφέρονται στις οδηγίες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το προσωπικό δοκιμής πρέπει περιορίσει τη διάρκεια της έκθεσης του σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα, δηλαδή λιγότερο από τα 6 λεπτά. Στο MIL-HDBK-240 [44] διατυπώνονται οδηγίες σχετικά με το πώς καθορίζεται ο μέγιστος χρόνος έκθεσης, ως συνάρτηση της συχνότητας και της έντασης του πεδίου, όπως παρακάτω:

$$T_{\text{allowed}} = 6(F_{\text{SMPE}}/F_{\text{Sreq'd}})^2 \text{ όπου,}$$

T_{allowed} = ο επιτρεπόμενος χρόνος (σε λεπτά),

F_{SMPE} = τα συνεχόμενα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια έκθεσης MPEs (V/m), όπως καθορίζονται στον παρακάτω Πίνακα σύμφωνα με το MIL-HDBK-240.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-23: Ακτινοβλούμενα MPEs για Περιορισμένα Περιβάλλοντα

Περιοχή συχνοτήτων (MHz)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (V/m)	Ένταση μαγνητικού πεδίου (A/m)	Πυκνότητα Ισχύος (Ηλεκτρικό- Μαγνητικό πεδίο W/m^2)	Μέσος χρόνος (λεπτά)
0,1-1	1842	16,3/f	9000,100,000 f_M^2	6
1-30	1842/ f_M	16,3/f	9000,100,000 f_M^2	6
30-100	61,4	16,3/f	1,0 100,000 f_M^2	6

Περιοχή συχνοτήτων (MHz)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (V/m)	Ένταση μαγνητικού πεδίου (A/m)	Πυκνότητα Ισχύος (Ηλεκτρικό- Μαγνητικό πεδίο W/m^2)	Μέσος χρόνος (λεπτά)
100-300	61,4	0,163	10	6
300-3000	-	-	$f_M/30$	6
3000-150000	-	-	100	$19,63/f_G^{1,079}$
15000-300000	-	-	100	$2,254/f_G^{0,476}$

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

f_M η συχνότητα σε MHz και f_G η συχνότητα σε GHz

$FS_{req'd}$ = η απαιτούμενη ένταση πεδίου (V/m), σύμφωνα με τον Πίνακα 5-20.

Εκτός από όρια για τα επίπεδα ακτινοβολίας πεδίου, υπάρχουν επίσης τα όρια σε επίπεδα για το επαγόμενο/ ρεύμα επαφής (I/CC) που μπορεί να προκληθεί από την έκθεση σε ακτινοβολών περιβάλλον. Οδηγίες για να εξασφαλιστεί η συμμόρφωση με τα εκπεμπόμενα PELs και όρια I/CC παρέχονται στο πρότυπο MIL-HDBK-240 [44].

Το πρότυπο MIL-HDBK-240 [44] προσδιορίζει ένα ελάχιστο σύνολο συχνοτήτων όπου η δοκιμή θα πρέπει να εκτελείται. Οι δοκιμές θα πρέπει να εκτελούνται σε οποιοσδήποτε συχνότητες είναι γνωστό ότι αποτελούν τους συντονισμούς του συστήματος. Οι δοκιμές σάρωσης συχνότητας είναι προτιμότερες, αλλά συνήθως δεν είναι πρακτικές στο επίπεδα έντασης πεδίου που απαιτούνται.

Η δοκιμή EME θα πρέπει να προσομοιώσει το συγκεκριμένο EME στο βαθμό που απαιτείται για να διεγείρει τις μέγιστες αποκρίσεις του EID και του κυκλώματος πυροδότησης. Αυτό απαιτεί την κατάλληλη εκπροσώπηση του καθορισμένου EME σε σχέση με τη συχνότητα, την ένταση πεδίου (πυκνότητα ισχύος), την πόλωση του πεδίου και τη γωνία φωτισμού. Για τα επίπεδα EME των ραντάρ, τα αντιπροσωπευτικά πλάτη παλμών, η συχνότητα επανάληψης παλμών και οι περίοδοι φωτισμού της δέσμης ακτινοβολίας (dwell periods), θα πρέπει να επιλεγούν για την μεγιστοποίηση της απόκρισης του συστήματος με τη δέουσα προσοχή για τους χρόνους απόκρισης των EIDs και τα κυκλώματα πυροδότησης. Το στρατιωτικό κείμενο MIL-HDBK-235-7 [45] αναφέρεται σε συγκεκριμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά και το πρότυπο MIL-HDBK-240 [44] σε λεπτομερείς οδηγίες.

5.3.10 Κύκλος ζωής, E3 Σκληρότητα

Οι απαιτήσεις E3 και επιχειρησιακής απόδοσης του συστήματος, πρέπει να πληρούνται καθ' όλο το ρυθμό του κύκλου ζωής του συστήματος και περιλαμβάνουν, (αλλά δεν περιορίζονται σε αυτά) τη συντήρηση, την επισκευή, την επιτήρηση και τον έλεγχο της φθοράς. Η συμμόρφωση πρέπει να επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση, επιθεωρήσεις ή ένα συνδυασμό αυτών. Η διατηρησιμότητα, η προσβασιμότητα, η ικανότητα δοκιμασίας και η ικανότητα ανίχνευσης της υποβάθμισης, πρέπει να αποδεικνύονται.

5.3.10.1 Απαίτηση

Τα προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα και οι διαρθρωτικές αντιλήψεις, προσφέρουν τεράστια πλεονεκτήματα στην αύξηση της απόδοσης των συστημάτων υψηλής τεχνολογίας. Τα πλεονεκτήματα αυτά μπορεί να υποχωρήσουν, σε οποιοδήποτε βαθμό, εάν οι αντιλήψεις της E3 προστασίας επιδρούν στο κόστος του κύκλου ζωής μέσω των εκτεταμένων τμημάτων ελέγχου και μετρήσεων, της υποχρεωτικής συντήρησης ή τις δαπανηρές απαιτήσεις επισκευής. Είναι σημαντικό, ως εκ τούτου, οι εκτιμήσεις του κύκλου ζωής να συμπεριληφθούν στους συνδυασμούς (trades off) που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη της E3 προστασίας.

Ο έλεγχος της διάβρωσης είναι ένα σημαντικό ζήτημα για τη διατήρηση της EMC στη διάρκεια του κύκλου ζωής του συστήματος. Είναι σημαντικό οι διατάξεις προστασίας που απαιτούν συντήρηση να είναι προσβάσιμες και δεν πρέπει να υποβαθμίζεται η προστασία, λόγω των ενεργειών συντήρησης σε αυτές τις διατάξεις.

Υπάρχει κανονικά ένας αριθμός διαθέσιμων προσεγγίσεων για την παροχή της E3 προστασίας. Η ιδιαίτερη σχεδιαστική λύση που επιλέγεται πρέπει να δώσει επαρκή προσοχή σε όλες τις πτυχές του κύκλου ζωής, συμπεριλαμβανομένης της συντήρησης και της ανάγκης για επισκευή.

Τα χαρακτηριστικά της E3 σκληρότητας (hardening) θα πρέπει είτε να είναι προσβάσιμα και διατηρήσιμα είτε ικανά να επιβιώσουν στη σχεδιαζόμενη διάρκεια ζωής του συστήματος, χωρίς την υποχρεωτική συντήρηση ή επιθεώρηση. Τα μέτρα προστασίας που απαιτούν συντήρηση πρέπει να επισκευάζονται ή αντικαθίστανται χωρίς την υποβάθμιση του αρχικού επιπέδου προστασίας. Ο σχεδιασμός του συστήματος θα πρέπει να περιλαμβάνει διατάξεις για την εξασφάλιση της αποτελεσματικότητας της σύνδεσης, της θωράκισης ή άλλων συσκευών προστασίας που μπορεί να αποσυνδεθούν, να τεθούν εκτός παροχής τροφοδοσίας ή απενεργοποιηθούν κατά τη διάρκεια των εργασιών συντήρησης.

Τα συστήματα προστασίας E3 περιλαμβάνουν ειδικά μέτρα σχεδιασμού τόσο εσωτερικά στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά περιβλήματα, όσο και στη βασική δομή του συστήματος. Παράγοντες όπως η διάβρωση, ηλεκτρική υπερβολική καταπόνηση, χαλαρές συνδέσεις, φθορά, κακή ευθυγράμμιση (misalignment), σκόνη, χρώματα,

λίπη, κολλητικές ουσίες και ενέργειες συντήρησης θα υποβαθμίσουν την αποτελεσματικότητα ορισμένων μέτρων προστασίας με το χρόνο.

Για να εξασφαλιστεί η συνεχής προστασία (σκληρότητα), σε όλο τον κύκλο ζωής του συστήματος, τα συστήματα προστασίας και οι συσκευές πρέπει να προσδιορίζονται και τα διαστήματα συντήρησης και οι διαδικασίες να καθορίζονται. Έμφαση πρέπει να δοθεί στις κρίσιμες λειτουργίες για τη λειτουργικότητα του συστήματος και την απόδοση του έργου. Ο χρήστης πρέπει να αναλάβει την ευθύνη για τη διατήρηση της σκληρότητας κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος και να τροποποιήσει τις διαδικασίες, όπου είναι απαραίτητο, για να περιλαμβάνουν όρους που δεν είχαν αρχικά προβλεφθεί. Οι δημοσιεύσεις συντήρησης θα πρέπει να τεκμηριώνουν τις απαιτούμενες ενέργειες. Μερικά από τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού που επηρεάζουν τη σκληρότητα η κυκλική συστροφή (overbraiding) των ηλεκτρικών καλωδίων, η ακεραιότητα των θωρακισμένων όγκων (shielding volumes), η ηλεκτρική σύνδεση των επιφανειών, το γραμμικό (αντίσταση, χωρητικότητα και αυτεπαγωγή) και μη γραμμικό [όπως συσκευές προστασίας (transzorb), δίοδοι zener και μεταβλητές αντιστάσεις] φιλτράρισμα, ο σχεδιασμός του κυκλώματος διεπαφής (ισορροπία, γείωση κτλ) και τα χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων επεξεργασίας σήματος.

Οι ενέργειες συντήρησης πρέπει επίσης να αντιμετωπιστούν με προσοχή, όταν πραγματοποιούνται σε μη-κρίσιμα στοιχεία τα οποία βρίσκονται στην ίδια περιοχή με τα κρίσιμα στοιχεία, για να διασφαλιστεί ότι το προσωπικό δεν θα θέσει σε κίνδυνο κατά λάθος, τα μέτρα προστασίας των κρίσιμων λειτουργιών. Οι διαδικασίες αντιμετωπίζουν τροποποιήσεις στο σύστημα που αφορούν είτε νέα είτε υφιστάμενα υποσυστήματα που επιτελούν κρίσιμες λειτουργίες. Θα μπορούσαν επίσης να περιλαμβάνουν τροποποιήσεις στη δομή του συστήματος ή σε συστατικά στοιχεία του υποσυστήματος, όπως η καλωδίωση και οι προστατευτικές διατάξεις.

Η συντήρηση E3 θα πρέπει να ενσωματωθεί στους κανονικούς κύκλους συντήρησης και επισκευής του συστήματος. Ιδιαίτερη και ανεξάρτητη συντήρηση είναι ανεπιθύμητη. Τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού που απαιτούν προγραμματισμένη συντήρηση θα πρέπει να είναι προσβάσιμα, ώστε να μπορούν να δοκιμάζονται ή να επιθεωρούνται.

Στην ανάπτυξη, ο εξοπλισμός διαστημικών εφαρμογών δεν μπορεί να ελεγχθεί ή να συντηρηθεί ως θέμα ρουτίνας. Ως εκ τούτου, το διαστημικό όχημα πρέπει να έχει χαρακτηριστικά που έχουν σχεδιαστεί για μη επιτηρούμενη λειτουργία και αντοχή για τη διάρκεια της αποστολής.

Πολλές φορές στο παρελθόν, η E3 προστασία έχει εγκατασταθεί χωρίς να δίδεται επαρκή μέριμνα για τη συντήρηση και την επισκευή. Είναι συχνά πολύ δύσκολη η πρόσβαση στα μέτρα προστασίας για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητάς τους. Λαμβάνοντας υπόψη το πρόβλημα της πρόσβασης και ελέγχου κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, είναι δυνατόν να παρασχεθούν μέτρα προστασίας που θα επιτρέψουν τη διεξαγωγή ελέγχων συντήρησης, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τυχόν

αρνητικές επιπτώσεις στο σχεδιασμό. Επίσης, οι τεχνικές σχεδιασμού που προσανατολίζονται προς την καλύτερη πρόσβαση συντήρησης μπορεί να παρέχουν τη δυνατότητα για ελέγχους ποιότητας κατά τη συναρμολόγηση, προς όφελος τόσο του κατασκευαστή του συστήματος, όσο και των χρηστών.

Η προστασία πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να είναι εύκολα επισκευάσιμη. Το σύστημα προστασίας και οποιεσδήποτε λεπτομέρειες επισκευής πρέπει να είναι επαρκώς τεκμηριωμένες. Για παράδειγμα, εάν οι λωρίδες εκτροπής (diverter strip) κεραυνού (συσκευή που δημιουργεί ιονισμένο κανάλι έξω από το αεροσκάφος αποτρέποντας τον κεραυνό) ή τα κομβία χρησιμοποιούνται σε σφαιρικούς θόλους, οι πληροφορίες συντήρησης πρέπει να απηχούν τυχόν προφυλάξεις, ώστε να μην επικαλυφθούν με χρώμα. Αν η επιφάνεια της δεξαμενής καυσίμου δεν πρέπει να χρωματισθεί για την πρόληψη από διάτρηση κεραυνού, η πληροφορία αυτή πρέπει να τεκμηριώνεται με λογική.

Οι θύρες πρόσβασης που είναι κατασκευασμένες από σύνθετα υλικά τα οποία αποτελούν τα στοιχεία της θωράκισης ενός όγκου, είναι συνήθως σχεδιασμένα για να συνδέονται ηλεκτρικά με τη δομή του συστήματος. Εάν οι δαχτύλιοι-ελατήρια (spring fingers) της θύρας χρησιμοποιούνται, πρέπει να διατηρούνται καθαροί, απαλλαγμένοι από φθορές και να ευθυγραμμίζονται ανά πάσα στιγμή. Η καλή επαφή ανάμεσα στο πλαίσιο της θύρας γύρω από την θύρα πρόσβασης και στους δαχτύλιους-ελατήρια είναι κρίσιμη, για τη διατήρηση της ακεραιότητας του προστατευτικού μέσου. Η περιοχή σύνδεσης πρέπει να ελέγχεται προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η αποτελεσματικότητα της σύνδεσης δεν έχει αλλοιωθεί από τη βρωμιά, τη διάβρωση, τις υπερβάσεις σε κολλητικές ουσίες και χρωματισμούς, τη βλάβη ή την κακή ευθυγράμμιση.

Τα προστατευτικά πλαίσια των παραθύρων που χρησιμοποιούν πλέγμα δικτυωτό, χρησιμοποιούνται για να θωρακίσουν τα ανοίγματα στη δομή. Αυτά τα πλαίσια πρέπει να αντιμετωπίζονται κατά παρόμοιο τρόπο με τις θύρες πρόσβασης.

Η αποτελεσματική ηλεκτρική σύνδεση των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών περιβλημάτων στη δομή του συστήματος, είναι συχνά απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία στα διάφορα ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα. Οι επιφάνειες επί των περιβλημάτων και της δομής θα πρέπει να διατηρούνται καθαρές, για να διατηρηθεί η καλή συνοχή. Η τεκμηρίωση σε σχέση με το σύστημα πρέπει να δείξει σαφώς τις περιοχές που χρειάζονται για τη συνεκτικότητα και τα κατάλληλα φινιρίσματα (επενδύσεις) τα οποία θα πρέπει να υλοποιηθούν επί των επιφανειών. Το βάψιμο των περιοχών που προορίζονται για την ηλεκτρική σύνδεση αποτελεί μία κοινή αιτία των προβλημάτων EMC. Ένα παράδειγμα του σχεδιασμού συνδέσεως είναι η επαφή μεταξύ του οπίσθιου μέρους ενός περιβλήματος με τους δαχτύλιους δίσκους στο οπίσθιο τοίχωμα του ερμαρίου των ηλεκτρονικών στοιχείων. Άλλες ηλεκτρικές συνδέσεις που απαιτούν προσοχή μπορεί να είναι με τη μορφή επίπεδων ζωνών ή πλεξούδων σε επαφή με βάσεις κραδασμών ή δομικά μέλη.

Είναι σημαντικό το υλικό αντικατάστασης να συμμορφώνεται με την αρχική ιδέα του σχεδιασμού. Για παράδειγμα, όταν τα κατεστραμμένα καλώδια επισκευαστούν, οι ισχύουσες για το σχεδιασμό τεχνικών τερματισμού στη θωράκιση, πρέπει να τηρηθούν.

Ένα παράδειγμα από μία λεπτή αλλαγή στη διαμόρφωση του υλικού με την αρχική ιδέα του σχεδιασμού, μπορεί να συναντηθεί σε ένα σωσίβιο. Το σωσίβιο ήταν εξοπλισμένο με ένα EID σύρματος γεφυρώσεως (bridgewire), που θα μπορούσε να πυροδοτηθεί από το θαλασσινό νερό ενεργοποιώντας ένα πακέτο συσσωρευτών, οι οποίοι είχαν σκληρύνει και πιστοποιηθεί για τις απαιτήσεις HERO. Μετά την εισαγωγή στο στόλο, μια πρόταση μηχανικής αλλαγής αναπτύχθηκε, η οποία και εγκρίθηκε, για να τροποποιήσει τον τύπο του συσσωρευτή που χρησιμοποιείται στο πακέτο των μπαταριών. Η αλλαγή δεν υποβλήθηκε για HERO εξέταση. Όταν τα σωσίβια ήταν εξοπλισμένα με το νέο πακέτο συσσωρευτών και χρησιμοποιήθηκαν επί των πλοίων του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ, υπήρξαν αναφορές για ανεξέλεγκτη ενεργοποίηση των γιλέκων κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων πτήσης, καθώς και στο κατάστρωμα πτήσης. Από την έρευνα που ακολούθησε διαπιστώθηκε ότι το νέο πακέτο συσσωρευτών έκανε το EID να συντονίζεται με ένα σύστημα ραντάρ στο πλοίο και συνεπώς με τον τρόπο αυτό, δημιουργήθηκαν προβλήματα ευαισθησίας.

5.3.10.2 Διακρίβωση

Η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις του κύκλου ζωής πρέπει να επαληθευθούν προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι η E3 προστασία μπορεί να διατηρηθεί και δεν θα αποδομηθεί με το χρόνο. Η επαλήθευση μπορεί να κυμαίνεται από την επιθεώρηση της κατάλληλης τεκμηρίωσης μέχρι την πραγματική επίδειξη των τεχνικών.

Ορισμένα μέτρα προστασίας E3, όπως η ηλεκτρική επαφή των κρίσιμων εξαρτημάτων και η αποτελεσματικότητα της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης, δεν μπορεί να διατηρηθούν μόνο από τους οπτικούς ελέγχους. Μερικές δοκιμές θα είναι πιθανώς απαραίτητες. Ωστόσο, η ανάγκη για οποιαδήποτε δοκιμή επιτήρησης σκληρότητας θα πρέπει να ελαχιστοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο.

Οι τεχνικές και τα χρονικά διαστήματα για την αξιολόγηση ή τον έλεγχο της ακεραιότητας των χαρακτηριστικών προστασίας του συστήματος πρέπει να καθοριστούν. Ο χρήστης θα πρέπει πιθανότατα να ρυθμίζει τα χρονικά διαστήματα της συντήρησης, μετά την επίτευξη εμπειρίας με τους μηχανισμούς υποβάθμισης. Η ικανότητα αυτοελέγχου (BIT), η δοκιμή των θυρίδων, οι μετρήσεις αντίστασης, οι έλεγχοι συνέχειας, οι μετρήσεις σύνθετης αντίστασης μεταφοράς και οι μετρήσεις συνάρτησης μεταφοράς είναι κάποια από τα διαθέσιμα μέσα για χρήση στην περιοδική επιτήρηση της ακεραιότητας του συστήματος. Για την αξιολόγηση της πιθανής υποβάθμισης, είναι απαραίτητη μία τιμή αναφοράς του συστήματος, όπως παραδίδεται στο χρήστη.

Ο κατασκευαστής του συστήματος έχει την καλύτερη αντίληψη όσον αφορά στα μέτρα προστασίας του συστήματος. Ο ρόλος του στον καθορισμό των κατάλληλων απαιτήσεων για διάφορα μέτρα προστασίας με ένα τρόπο που μπορεί αποτελεσματικά να ελεγχθεί σε επίπεδο συστήματος και να αξιολογηθεί κατά τη διάρκεια της συντήρησης, είναι το κλειδί για ένα επιτυχημένο πρόγραμμα του κύκλου ζωής. Αυτές οι εκτιμήσεις περιλαμβάνουν την ανάγκη για εύκολη πρόσβαση στα μέτρα προστασίας που απαιτούν αξιολόγηση. Σε αντίθετη περίπτωση η απόδοση κάποιων μέτρων προστασίας μπορεί να αγνοηθεί. Σε ορισμένες περιπτώσεις, άλλες εκτιμήσεις σχεδιασμού του συστήματος μπορεί να είναι επιτακτικές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι συχνά δυνατό να παρέχονται χαρακτηριστικά στο σχεδιασμό (όπως καρτέλες δοκιμής ή ειδικές υποδοχές), τα οποία θα επιτρέψουν σε μία μέτρηση ελέγχου να πραγματοποιηθεί, χωρίς ανάλωση χρόνου στην αποσυναρμολόγηση.

Οι περισσότερες αποτυχίες στο θωρακισμένο καλώδιο, συμβαίνουν στο συνδετήρα και ένας μετρητής αντίστασης, ικανός για τη μέτρηση milliohms είναι συνήθως επαρκής για τον εντοπισμό αυτών των αποτυχιών. Δοκιμές σε διάφορα αεροσκάφη έχουν δείξει ότι οι οπές ή μικρές ατέλειες στις ίδιες τις θωρακίσεις δεν αποτελούν σημαντικό πρόβλημα. Αποτελεί μεγάλη φθορά για τη αποτελεσματικότητα της θωράκισης, η υποβάθμισή της. Επιπλέον, στο πεδίο του χρόνου, μετρητές ανακλάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό ασυνεχειών ή αλλαγών στα συστήματα προστασίας. Οι μετρήσεις μετά τη θωράκιση του συστήματος, μπορούν να συγκριθούν με τις μετρήσεις αναφοράς του συστήματος.

Οι συσκευές δοκιμών της θωράκισης των καλωδίων, είναι διαθέσιμες για πιο ενδελεχή αξιολόγηση της απόδοσης της θωράκισης ή του αγωγού. Ένας οδηγός ρεύματος (current driver) εγκαθίσταται εύκολα στο εξωτερικό τμήμα του καλωδίου. Ωστόσο, μία μέτρηση της τάσης στα καλώδια στο εσωτερικό της θωράκισης απαιτεί πρόσβαση σε αυτά τα καλώδια. Εάν ένας ηλεκτρικός σύνδεσμος είναι αρκετά προσιτός, η μέτρηση της τάσης είναι απλή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα καλώδια διέρχονται δια μέσου των χωρισμάτων, χωρίς τη χρήση συνδέσμων και η πρόσβαση δεν είναι άμεσα διαθέσιμη. Μια πιθανή λύση είναι να συμπεριληφθεί ένα καλώδιο στόχευσης (pick-off), που συνδέεται με ένα από τα καλώδια εντός της δέσμης, και το οποίο δρομολογείται σε μία ομάδα συνδετήρων, προσβάσιμους για τους τεχνικούς.

Μία συσκευή δοκιμών ανοίγματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της ακεραιότητας των RF παρεμβυσμάτων (gaskets) και των προστατευτικών καλυμμάτων (screen protecting) των ανοιγμάτων στο σύστημα. Μία υπάρχουσα συσκευή δοκιμών χρησιμοποιεί ένα γυμνό αγωγό στην εξωτερική δομή του συστήματος, για να οδηγήσει ένα ρεύμα διαμέσου του ανοίγματος, όπου μετράται η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του ανοίγματος εντός της δομής. Η εγκατάσταση του γυμνού αγωγού δεν είναι δύσκολη. Ωστόσο, η βαφή και τα μη-αγώγιμα υλικά στο εσωτερικό της δομής παρεμποδίζουν την ικανότητα μετρήσεως των τάσεων που επάγονται στα πλαίσια των θυρών και των παραθύρων. Καρτέλες δοκιμών ή υποδοχές θα απλοποιήσουν σε μεγάλο βαθμό τη μέτρηση. Η συχνή εκτέλεση των

ελέγχων επιτήρησης μετά την αρχική εγκατάσταση, μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση των διαστημάτων συντήρησης με τον καθορισμό των μηχανισμών υποβάθμισης και του ρυθμού ανάπτυξης της υποβάθμισης.

Οι εκτιμήσεις του κύκλου ζωής πρέπει να λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι τα συστήματα συχνά τροποποιούνται αμέσως μετά τη θωράκισή τους και συχνά σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους. Μερικές φορές οι αλλαγές είναι μικρές και μπορεί να πιστοποιηθούν με μια περιορισμένη προσπάθεια. Συχνά υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στη δομή του συστήματος, καθώς και στα ηλεκτρονικά στοιχεία. Η προσθήκη σημαντικών νέων υποσυστημάτων μπορεί να εισάγει νέα σημεία εισόδου για την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια σε προστατευόμενες περιοχές και μια σημαντική εκ νέου πιστοποίηση του συστήματος πιθανόν να είναι απαραίτητη. Επίσης, εάν αρκετές μικρές τροποποιήσεις γίνονται κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου, η σκληρότητα του συστήματος μπορεί να τίθεται σε αμφιβολία και μία νέα πιστοποίηση θα πρέπει να εξετασθεί.

Οι αξιολογήσεις EMI σκληρότητας υπό το πρόγραμμα διορθωτικής δράσης EMI των αεροπορικών συστημάτων του Πολεμικού Ναυτικού (ASEMICAP) των ΗΠΑ, έχουν δείξει ότι η σκληρότητα του αεροσκάφους αποδομείται συναρτήσει του χρόνου. Οι ηλεκτρικές επιθεωρήσεις έχουν δείξει πολλές περιπτώσεις βλαβών από ξένα αντικείμενα, υπερβολική αποφλοίωση (chaffing) των καλωδίων και μη κατάλληλες συνδέσεις και τερματισμούς. Οι μετρήσεις σύνδεσης που πραγματοποιούνται πάνω από δέκα χρόνια σε μαχητικά αεροσκάφη του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ, δείχνουν ότι ένα 10-15% δεν πληροί τις συνθήκες προδιαγραφών ενός νέου αεροσκάφους, ένα 40-60% δεν πληροί τις συνθήκες προδιαγραφών ενός αεροσκάφους 5 ετών και ένα 70-80% δεν πληροί τις συνθήκες προδιαγραφών ενός αεροσκάφους 10 ετών. Αυτά που είναι εκτός των συνθηκών προδιαγραφών σύνδεσης, οδηγούν σε ανεπαρκή τερματισμό των υλικών θωράκισης και των κυτίων και σε υποβάθμιση της αποτελεσματικότητας της θωράκισης. Κατά τις δοκιμές EMC, τα αποτελέσματα της διάβρωσης και των πρακτικών συντήρησης για το σχεδιασμό EMC έχουν επισημανθεί. Για παράδειγμα, σύνθετοι συνδετήρες ενσωματώθηκαν στους πυλώνες των μαχητικών αεροσκαφών του Πολεμικού Ναυτικού, για να αντιμετωπισθεί ένα σοβαρό πρόβλημα διάβρωσης στις υπάρχουσες υποδοχές αλουμινίου. Οι σύνθετοι συνδετήρες είναι περισσότερο ανθεκτικοί στην διάβρωση από το αλουμίνιο. Ωστόσο, οξειδώνονται και παράγουν ένα υπόλειμμα σε μορφή σκόνης επί του συνδετήρα. Το προσωπικό συντήρησης στη συνέχεια, καθαρίζει με συρμάτινη βούρτσα αυτό το υπόλειμμα, εξαλείφοντας έτσι την εξωτερική αγωγή επιστρωση, υποβαθμίζοντας σοβαρά την αγωγιμότητα της υποδοχής και εισάγοντας δυνητικά πιο σοβαρά προβλήματα διάβρωσης.

5.3.11 Ηλεκτρική Σύνδεση

Το σύστημα, τα υποσυστήματα, και ο εξοπλισμός πρέπει να περιλαμβάνουν την απαραίτητη ηλεκτρική συνοχή για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις E3 των

προτύπων. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση, επιθεωρήσεις ή ένα συνδυασμό αυτών, για την συγκεκριμένη διάταξη συνδέσεως.

5.3.11.1 Απαίτηση

Οι πρακτικές καλής ηλεκτρικής σύνδεσης έχουν από καιρό αναγνωριστεί ως ένα βασικό στοιχείο μιας επιτυχημένης σχεδίασης του συστήματος. Μια ένδειξη της σημασίας της ηλεκτρικής σύνδεσης είναι ότι το πρώτο στοιχείο που συχνά αξιολογείται όταν παρουσιαστούν προβλήματα EMC, είναι εάν η σύνδεση είναι επαρκής. Δεδομένου ότι οι ηλεκτρικές συνδέσεις περιλαμβάνουν την απόκτηση καλής ηλεκτρικής επαφής μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών, ενώ τα μέτρα ελέγχου διάβρωσης συχνά προσπαθούν να αποφύγουν την ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ ανόμοιων υλικών, είναι σημαντικό ότι οι (ενδεχομένως αντικρουόμενες) απαιτήσεις κάθε τομέα πρέπει να λαμβάνονται πλήρως υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος.

Τα συστήματα περιλαμβάνουν γενικά επίπεδα γείωσης (ground plane) για να σχηματίσουν ισοδυναμικές επιφάνειες για τις διατάξεις των κυκλωμάτων. Εάν δυναμικά τάσης εμφανιστούν μεταξύ ηλεκτρονικών περιβλημάτων και του επιπέδου του εδάφους που οφείλονται στη λειτουργία του εσωτερικού κυκλώματος, το περίβλημα θα εκπέμπει παρεμβολές. Ομοίως, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία θα προκαλέσουν δυναμικά τάσης μεταξύ ανεπαρκώς συνδεδεμένων περιβλημάτων και του επιπέδου του εδάφους. Αυτά τα δυναμικά που επιβάλλονται ως σήματα κοινής λειτουργίας για όλα τα κυκλώματα, αναφέρονται στο περίβλημα. Τα δύο ίδια αποτελέσματα θα προκύψουν για κακώς συνδεδεμένες απολήξεις θωράκισης.

Χωρίς την κατάλληλη σύνδεση, η αλληλεπίδραση κεραυνού με τα συστήματα μπορεί να παράγει τάσεις οι οποίες μπορούν να χτυπήσουν το προσωπικό, να αναφλέξουν τα καύσιμα μέσω ηλεκτρικού τόξου και σπινθήρων, να αναφλέξουν ή αχρηστεύσουν τα πυρομαχικά και να διαταράξουν ή προκαλέσουν βλάβη στα ηλεκτρονικά στοιχεία. Οι απαιτήσεις του κεραυνού περιγράφηκαν στην ενότητα 5.3.5, όσον αφορά την περιγραφή του περιβάλλοντος. Δεν υπάρχουν συγκεκριμένα επίπεδα, λόγω της μεγάλης ποικιλίας των πιθανών αναγκών με βάση τη συγκεκριμένη πλατφόρμα και της φυσικής τοποθεσίας εντός της πλατφόρμας. Ενώ η ηλεκτρική σύνδεση είναι μια σημαντική πτυχή για την επίτευξη μιας αποδεκτής κεραυνικής σχεδίασης, αυτό είναι μόνο ένα στοιχείο ενός συνολικού σχεδιασμού για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του κεραυνού. Στο παρελθόν, οι απαιτήσεις κεραυνού για τα αεροσκάφη προσδιορίζονταν μόνο στην προδιαγραφή της ηλεκτρικής σύνδεσης με το πρότυπο MIL-B-5087 [49], το οποίο ακυρώθηκε και αντικαταστάθηκε από το πρότυπο MIL-STD-464, στο οποίο οι απαιτήσεις του κεραυνού - όπως αναφέρθηκαν και στην αντίστοιχη ενότητα - ορίζονται πιο κατάλληλα σε ένα υψηλότερο επίπεδο, δεδομένου του σχεδιασμού που περιλαμβάνει επιπλέον στοιχεία από την ηλεκτρική σύνδεση.

Είναι ουσιαστικό ότι το σύστημα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού να παρέχεται με επαρκή επίπεδα τάσης από πρωταρχικές πηγές ενέργειας για τη σωστή λειτουργία. Ηλεκτρικά εσφαλμένες συνθήκες, δεν πρέπει να εισάγουν πιθανούς

κινδύνους καυσίμων ή πυρκαγιάς λόγω ηλεκτρικού τόξου ή σπινθήρων από λιωμένο ή εξαερωμένο δομικό υλικό. Οι διατάξεις σύνδεσης βοηθούν στον έλεγχο των πτώσεων τάσης στην ισχύ του ρεύματος επιστροφής και στις εσφαλμένες διαδρομές. Ο σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να προστατεύσει το προσωπικό από τους κινδύνους ηλεκτροπληξίας.

Ο ρόλος της σύνδεσης είναι ουσιαστικά στον έλεγχο της τάσης, παρέχοντας διαδρομές χαμηλής σύνθετης αντίστασης για τη ροή του ρεύματος. Σε αντισυμβατικές συνδέσεις θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή για να εξασφαλιστεί η επάρκειά τους, ιδιαίτερα στις αγώγιμες συναρμογές σε περιοχές αναθυμιάσεων του καυσίμου. Το SAE ARP1870 [50] παρέχει λεπτομέρειες σχετικά με την έννοια της ηλεκτρικής σύνδεσης για αεροδιαστημικά συστήματα και παραδείγματα των τεχνικών σύνδεσης. Το πρότυπο MIL-HDBK-419 [51] του Στρατού των ΗΠΑ, παρέχει καθοδήγηση για τη γείωση, τη σύνδεση και τη θωράκιση των χερσαίων εγκαταστάσεων, συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Το πρότυπο MIL-STD-1310 [52] του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ, παρέχει οδηγίες για την ηλεκτρική σύνδεση επί των πλοίων.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη σχέση αλληλεξάρτησης μεταξύ των ηλεκτρικών συνδέσεων και του ελέγχου της διάβρωσης. Τεχνικές σχεδιασμού για την αποτελεσματική προστασία από τη διάβρωση, όπως η χρήση φινιρισμάτων (επενδύσεων) που δεν είναι ηλεκτρικά αγώγιμα, μπορεί να οδηγήσουν σε έλλειψη σύνδεσης. Αντίθετα, μια καλή ηλεκτρική συνεκτικότητα μπορεί να οδηγήσει σε πιθανά προβλήματα διάβρωσης, εάν η σύνδεση δεν έχει εφαρμοστεί ορθά. Λεπτομερείς απαιτήσεις διάβρωσης για τα συστήματα, διατυπώνονται σε άλλα έγγραφα του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ, όπως το πρότυπο MIL-HDBK-1568 [53] για αερομεταφερόμενα συστήματα.

Καθώς τα συγκεκριμένα επίπεδα σύνδεσης που απαιτούνται για την απόκτηση των απαιτούμενων επιδόσεων, εξαρτώνται από το σύστημα, τα 2,5 milliohms έχουν αναγνωριστεί ως ένδειξη ενός καλού δεσμού σε μία μεταλλική διεπαφή, ιδιαίτερα στο αλουμίνιο. Δεν υπάρχουν τεχνικά αποδεικτικά στοιχεία ότι ο αριθμός αυτός πρέπει να τηρείται αυστηρώς για να αποφευχθούν τα προβλήματα. Ωστόσο, οι υψηλότερες τιμές τείνουν να δείξουν ότι πιθανόν να εμφανισθεί πρόβλημα διασφάλισης της ποιότητας και η σύνδεση μπορεί να υποβαθμισθεί ή όχι υπό τον κατάλληλο έλεγχο. Οι υψηλότερες τιμές μπορεί να είναι πιο κατάλληλες για άλλα μέταλλα, όπως το ανοξείδωτο ατσάλι ή το τιτάνιο. Επίσης, τα σύνθετα υλικά θα εμφανίζουν πολύ υψηλότερα επίπεδα και οι επιβαλλόμενες απαιτήσεις θα πρέπει να είναι σύμφωνες με αυτά τα υλικά. Επιλεγμένα επίπεδα σύνδεσης, θα πρέπει να αιτιολογούνται για το σχεδιασμό και να αποδεικνύεται η επάρκειά τους, ιδιαίτερα όταν αυτά αποκλίνουν από τα παραδοσιακά πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν.

Οι έλεγχοι πρέπει να εφαρμόζονται στις διαδρομές τερματισμού της θωράκισης (shield termination paths) μέσω των συνδέσεων συναρμολόγησης. Μια ρεαλιστική τιμή θα είναι της τάξης των 10 milliohms από τη θωράκιση μέχρι το ηλεκτρονικό

περίβλημα για ένα συγκρότημα επικαθμιωμένου αλουμινίου, με 2,5 milliohms κατ' ανώτατο όριο για κάθε ιδιαίτερο σύνδεσμο.

Τα μέτρα σύνδεσης για την πρόληψη των κινδύνων ανάφλεξης του καυσίμου από ηλεκτρικά ρεύματα σφάλματος πρέπει να αντιμετωπίζουν περιοχές με εύφλεκτα αέρια, εγκατεστημένο ηλεκτρικό εξοπλισμό (όπως αντλίες καυσίμου), ηλεκτρικές διαδρομές των ρευμάτων σφάλματος, διαθέσιμα επίπεδα του ρεύματος σφάλματος και την τιμή σύνδεσης, όλα απαραίτητα για να υλοποιηθεί η αρχιτεκτονική σχεδιασμού για την πρόληψη από ηλεκτρικό τόξο, σπινθήρες και άλλα θερμά σημεία (hot spots).

Ιστορικά, το MIL-B-5087 [49] (που αντικαταστάθηκε από το MIL-STD-464), καθιέρωσε για πρώτη φορά τις απαιτήσεις ηλεκτρικής σύνδεσης για αεροσκάφη, το 1949. Αρκετές κατηγορίες ηλεκτρικής σύνδεσης καθορίστηκαν και τελικά σχεδιάστηκαν σε μελλοντικές αναθεωρήσεις ως εξής:

α. Κατηγορία A για την εγκατάσταση κεραίας: Καμία αντίσταση σύνδεσης δεν καθορίστηκε.

β. Κατηγορία C για τη διαδρομή του ρεύματος επιστροφής: Καταρτίστηκαν πίνακες ρεύματος σφάλματος σε σχέση με την αντίσταση.

γ. Κατηγορία H για κίνδυνο ηλεκτροπληξίας: Καθορίστηκε η τιμή των 0,1 ohm.

δ. Κατηγορία L για αντικεραυνική προστασία: Καθορίστηκε έλεγχος των εσωτερικών τάσεων των οχημάτων στα 500 volts.

ε. Κατηγορία R για τις δυνατότητες RF: Καθορίστηκε η τιμή των 2,5 milliohms από ηλεκτρονικές μονάδες στη δομή του συστήματος.

ζ. Κατηγορία S για στατικό φορτίο: Καθορίστηκε η τιμή των 1,0 ohm.

Στο κείμενο MIL-B-5087 περιέχονταν επίσης πολλές εγκεκριμένες τεχνικές σύνδεσης συμπεριλαμβανομένου και του ειδικού υλικού, που επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί για την ηλεκτρική σύνδεση. Υπήρχαν επίσης λιγότερο προφανείς απαιτήσεις του παραπάνω προτύπου, όπως η απαίτηση των 2,5 milliohm, για τα εξωτερικά περιβλήματα των συνδέσμων, όταν χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά συνεκτικές θωρακίσεις. Με την πάροδο των ετών, η απαίτηση των 2,5 milliohm της κατηγορία R έγινε συνώνυμο με το πρότυπο MIL-B-5087 και ήταν καθολικά αποδεκτή, ως απαίτηση του σχεδιασμού για τις ηλεκτρονικές μονάδες στη δομή του οχήματος. Δεν υπάρχει απόλυτη επιστημονική βάση για την απαίτηση των 2,5 milliohm, εκτός από το γεγονός ότι είναι μία τιμή που μπορεί να επιτευχθεί με καλή επαφή μεταξύ μετάλλων. Ως εκ τούτου, αποτελεί μία καλή απαίτηση σχεδίασης, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι μία καλή ηλεκτρική σύνδεση περιλαμβάνεται στο σχεδιασμό. Η λογική της κατηγορίας R, ήταν πιθανόν να εξασφαλισθεί ότι οι σύνθετες αντιστάσεις του κυκλώματος επιστροφής διατηρήθηκαν πολύ χαμηλά λόγω της εκτεταμένης

χρήσης των απλών κυκλωμάτων τερματισμού (single end circuits) σε αυτό το χρονικό πλαίσιο. Σύγχρονα ηλεκτρονικά στοιχεία χρησιμοποιούν κυρίως ισορροπημένα κυκλώματα και η ανάγκη για να πληρούν την κατηγορία R δεν είναι μεγάλη.

Οι απαιτήσεις σύνδεσης είναι ακόμα σημαντικές στα σημερινά συστήματα. Ο εξοπλισμός της απαίτησης της κατηγορίας R, πιθανότατα δεν είναι σημαντικός στις περισσότερες περιπτώσεις. Ωστόσο, το 2,5 milliohm, εξακολουθεί να είναι ένας καλός αριθμός για πολλά άλλα ηλεκτρικά συνδετικά υλικά, όπως ο τερματισμός της θωράκισης σε συνδέσμους και η σύνδεση ενός συνδέσμου στο κυτίο του εξοπλισμού. Είναι επίσης μια καλή τιμή, ως στόχος του σχεδιασμού, όπου ένας καλός δεσμός είναι απαραίτητος για άλλους σκοπούς. Απαιτεί κυρίως ο σχεδιαστής, να σχεδιάσει μια σκόπιμη διαδρομή σύνδεσης.

Οι άλλες τιμές σύνδεσης των παραπάνω κατηγοριών για προστασία από ηλεκτροπληξία, τις διαδρομές των ρευμάτων επιστροφής και τα στατικά φορτία, εξακολουθούν να ισχύουν για σημερινή χρήση.

Πολλές περιπτώσεις στο παρελθόν έχουν καταδείξει την ανάγκη για καλή σύνδεση. Βελτιώσεις σύνδεσης ή διορθώσεις έχουν λύσει πολλά προβλήματα του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων τη στατική κατακρήμνιση (p-static) σε δέκτες UHF, την ευαισθησία των ηλεκτρονικών στοιχείων σε εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, την ακτινοβολία της παρεμβολής μέσα στους δέκτες και τα τρωτά σημεία του κεραυνού.

Η πραγματική ανάγκη για ορισμένη σύνδεση σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή, δεν είναι εύκολο να εξακριβωθεί. Εξαρτάται από διάφορα στοιχεία, όπως την τοπολογία της θωράκισης, τον τύπο των διεπαφών του κυκλώματος και τη χρήση του περιβλήματος ως πεδίο αναφοράς, για τα κυκλώματα και τα φίλτρα. Για παράδειγμα, ένα υποσύστημα το οποίο είναι ολοκληρωμένο (όλα τα περιβλήματα και οι διασυνδέσεις του καλωδίου βρίσκονται σε μια συνεχή αδιάσπαστη θωράκιση) συνήθως δεν απαιτεί κατ' ανάγκην σύνδεση για RF δυνατότητες ελέγχου. Τα εξωτερικά ρεύματα θα παραμένουν έξω από τη θωράκιση και τα εσωτερικά ρεύματα θα παραμείνουν εντός. Αυτή η διάταξη είναι σπάνια. Η αυξανόμενη χρήση των κυκλωμάτων διαφορικών διεπαφών (differential interface) κάνει τον εξοπλισμό της σύνδεσης του περιβλήματος στο όχημα λιγότερο κρίσιμη, δεδομένου ότι υπάρχει καλύτερη απόρριψη του θορύβου κοινής λειτουργίας.

Σε συστήματα που χρησιμοποιούν βασικά μεταλλική κατασκευή, ολόκληρη η δομή του οχήματος σχηματίζει ένα επίπεδο γείωσης. Η εισαγωγή των σύνθετων υλικών στη δομή, τα οποία είναι λιγότερο αγωγίμα από τα μέταλλα, έχει δημιουργήσει την ανάγκη σε ορισμένες περιπτώσεις, να εισαχθούν ξεχωριστά επίπεδα γείωσης, για να διατηρηθεί επαρκής έλεγχος της E3.

5.3.11.2 Διακρίβωση

Η διακρίβωση των μέτρων προστασίας για την ηλεκτρική σύνδεση, είναι απαραίτητη για να εξασφαλισθεί η επαρκής εφαρμογή των ελέγχων.

Η περιοχή των ηλεκτρικών συνδέσεων, περιλαμβάνει μια σειρά από διαφορετικούς προβληματισμούς. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία διακρίβωσης πρέπει να είναι προσαρμοσμένη για να εκτιμηθεί ο έλεγχος της σύνδεσης. Πολλά στοιχεία απαιτούν περισσότερες από μία μορφή ελέγχου. Όταν απαιτούνται τιμές σύνδεσης σε εύρος αρκετών milliohm ή λιγότερο, η ακριβής δοκιμή με έναν ανιχνευτή τεσσάρων σημείων είναι αναγκαία. Όταν οι πολύ υψηλότερες τιμές είναι επαρκείς, η επιθεώρηση των επιφανειών και των τεχνικών τοποθέτησης συνοδευόμενες από ανάλυση, μπορεί να είναι αποδεκτές. Η διακρίβωση ότι η σύνδεση της αντικεραυνικής προστασίας και των προτύπων της κεραίας είναι κατάλληλη, γενικά απαιτεί τη δοκιμή σε επίπεδο συστήματος. Η ανάλυση είναι ένα στοιχείο της αξιολόγησης δομικών πτώσεων τάσης, επιστροφής του ρεύματος, κινδύνων ανάφλεξης καυσίμου και ηλεκτροπληξίας προσωπικού.

Οι απαιτήσεις για την ηλεκτρική συνέχεια σε όλες τις εξωτερικές μηχανικές διεπαφές για τον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, συνήθως επαληθεύεται κατά την ανάπτυξη του εξοπλισμού. Ο εξοπλισμός στη διεπαφή της κατασκευής, συνήθως επαληθεύεται σε επίπεδο συστήματος. Μία μέτρηση διεξάγεται για μια επιφάνεια του περιβλήματος στο επόμενο κύριο συγκρότημα. Για παράδειγμα, σε μία εγκατάσταση με ένα περίβλημα τοποθετημένο σε ένα δίσκο, ξεχωριστές μετρήσεις θα εφαρμοσθούν από το περίβλημα στο δίσκο και από το δίσκο στην κατασκευή. Η μέτρηση εκτελείται κανονικά με ένα μετρητή αντίστασης DC. Ίδανικά, η αντίσταση θα πρέπει να διατηρηθεί όσο το δυνατόν υψηλότερα στη συχνότητα. Η αντίσταση κανονικά θα παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα, για τα περιβλήματα που είναι δύσκολο να τοποθετηθούν στη δομή της κατασκευής. Ωστόσο, για τα περιβλήματα εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούν συνδετικούς ιμάντες, όπως οι βάσεις κραδασμών, η σύνθετη αντίσταση των ιμάντων σύνδεσης θα είναι σημαντική λόγω της αυτεπαγωγής του ιμάντα.

Ένας λόγος μήκους προς πλάτος 5:1 ή λιγότερο θεωρείται γενικά ότι είναι απαραίτητος για ένα ιμάντα σύνδεσης για να είναι αποτελεσματικός. Η χρήση χαμηλής τάσης και ρεύματος μετρητών σύνδεσης, επιθεώρησης και ανάλυσης των διαδρομών σύνδεσης και ο προσδιορισμός του αριθμού των μηχανικών διεπαφών σε μια διαδρομή σύνδεσης, είναι μερικές από τα πτυχές της διακρίβωσης.

Η διακρίβωση των μέτρων ηλεκτρικής σύνδεσης για το σχεδιασμό εναντίον της ηλεκτροπληξίας κατά κύριο λόγο επιτυγχάνεται, με την απόδειξη ότι τα σφάλματα τάσης σε ηλεκτρικά αγωγιμες επιφάνειες, δεν θα οδηγήσουν σε επικίνδυνες τάσεις στην επιφάνεια. Αυτοί οι τύποι των σφαλμάτων πρέπει κανονικά να διακόπτονται, μέσω του κυκλώματος προστασίας του εξοπλισμού.

Η επάρκεια αρκετών ηλεκτρικών συνδέσεων μπορεί να αξιολογηθεί μέσω επιθεώρησης και μετρήσεων αντίστασης DC και χαμηλής συχνότητας AC. Οι RF μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν. Ωστόσο, αυτές απαιτούν πιο εξελιγμένα όργανα και πιθανόν να παρέχουν παραπλανητικά αποτελέσματα και συνεπώς δεν συνίστανται. Οι μετρήσεις DC έχουν αποδειχθεί ότι παρέχουν μια καλή ένδειξη της ποιότητας του συνδετικού υλικού (bond). Μία εξαίρεση όπου οι μετρήσεις υψηλών συχνοτήτων μπορεί να είναι αποτελεσματικές, είναι οι η μετρήσεις της σύνθετης αντίστασης μεταφοράς των θωρακισμένων καλωδίων. Υπό αυτό τον τύπο της αξιολόγησης, ένα γνωστό RF ρεύμα οδηγείται στο θωρακισμένο καλώδιο και η τάση που αναπτύσσεται κατά μήκος του εσωτερικού της θωράκισης μετράται. Τα επίπεδα ηλεκτρικής σύνδεσης των τερματισμών της θωράκισης και των συνδέσμων των συστημάτων, περιλαμβάνονται στη συνολική τιμή που μετρήθηκε.

Οι μετρητές σύνδεσης είναι συνήθως συσκευές τεσσάρων σημείων, τα οποία καθορίζουν την αντίσταση του συνδετικού υλικού, με την καθοδήγηση ενός γνωστού ρεύματος μεταξύ δύο ακροδεκτών μέτρησης και στη συνέχεια μετρώντας την πτώση τάσεως στα άκρα του συνδετικού υλικού με δύο άλλους ακροδέκτες μέτρησης. Μεγάλες εφαρμοζόμενες τάσεις και ρεύματα μπορούν να επηρεάσουν τη μέτρηση με κάψιμο (burning) μέσω της μόλυνσης (contamination) που θα μπορούσε να συμβεί στις επιφάνειες της σύνδεσης. Είναι καλύτερο να χρησιμοποιούνται συσκευές χαμηλότερης τάσης και ρεύματος, για να καθορισθεί η τιμή του συνδετικού υλικού.

Οι απαιτήσεις της ροπής στρέψης στα μπουλόνια και στους κοχλίες διαδραματίζει ένα ρόλο στην αποτελεσματικότητα και τον κύκλο ζωής της αντοχής ενός συνδετικού υλικού.

Οι μετρήσεις σύνδεσης συχνά απαιτούν να διαπερνάται ένα προστατευτικό φινίρισμα με ηλεκτρικούς ακροδέκτες μέτρησης, για να ληφθεί καλή ηλεκτρική επαφή. Πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα, προκειμένου το πρόβλημα της διάβρωσης να μην εμφανισθεί.

Για την αντικεραυνική προστασία, μεταλλικά δομικά μέλη (αλουμίνιο, χάλυβας, τιτάνιο κτλ) παρέχουν την καλύτερη ευκαιρία για την επίτευξη μιας ηλεκτρικής συνοχής της τάξης των 2,5 milliohms. Ένα συνδετικό υλικό αυτού του επιπέδου θα περιορίσει την επαγόμενη τάση στο σύστημα καλωδίωσης μέχρι 500 volts από τις πτώσεις του κεραυνού (200 kA) στη δομή του συστήματος.

Η βαφή της κατασκευής για τον έλεγχο της διάβρωσης, πριν την εξασφάλιση ηλεκτρικής συνοχής, έχει τεκμηριωθεί ως η κύρια αιτία της κακής ποιότητας ή αναποτελεσματικών συνδετικών υλικών.

Οι P-στατικές δοκιμές έχουν ανακαλύψει ανοιχτές συνδέσεις, όπως οι διατάξεις τοποθέτησης (βάσεις) κεραίας, οι οποίες είναι ηλεκτρικά απομονωμένες από τη δομή του συστήματος.

5.3.11.3 Διαδρομή Επιστροφής Ρεύματος

Για τα συστήματα που χρησιμοποιούν κατασκευή για ρεύματα επιστροφής ισχύος, θα πρέπει να παρέχονται παροχές σύνδεσης για τις διαδρομές ρεύματος επιστροφής, για τις πηγές ηλεκτρικής ισχύος, έτσι ώστε η συνολική τάση να πέφτει μεταξύ του σημείου της ρύθμισης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και των ηλεκτρικών φορτίων, που είναι εντός των ορίων ανοχής του ισχύοντος σε ποιότητα ισχύος προτύπου. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή ή ανάλυση σε διαδρομές ηλεκτρικού ρεύματος, επίπεδα ηλεκτρικού ρεύματος και τα επίπεδα ελέγχου σύνθετης αντιστάσεως σύνδεσης.

5.3.11.3.1 Αιτιολόγηση Απαιτήσης

Είναι ουσιαστικό το σύστημα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού να παρέχεται με επαρκή επίπεδα τάσης από πρωταρχικές πηγές ενέργειας για τη σωστή λειτουργία. Συνθήκες ηλεκτρικών σφαλμάτων δεν πρέπει να εισαγάγουν τους πιθανούς κινδύνους καυσίμου ή πυρκαγιάς λόγω ηλεκτρικού τόξου ή σπινθήρων από λιωμένο ή εξαμιζόμενο δομικό υλικό.

Τα πρότυπα ποιότητας ηλεκτρικής τροφοδοσίας του Υπουργείου Αμύνης των ΗΠΑ, όπως το πρότυπο MIL-STD-704 [54] για τα αεροσκάφη και το πρότυπο MIL-STD-1399-300 [55] για τα πλοία, ελέγχουν την τάση τροφοδοσίας για τον εξοπλισμό χρήσης εντός καθορισμένων ορίων. Η τάση διατηρείται σε μια θέση παρακολούθησης που ονομάζεται το «σημείο ρύθμισης» με ανοχές για πτώσεις τάσης πέρα από αυτό το σημείο στην είσοδο του εξοπλισμού χρήσης. Αυτές οι πτώσεις θα πρέπει να ελέγχονται μέσω τύπου αγωγού καλωδίου και της επιλογής του μεγέθους και του σχεδιασμού της διαδρομής επιστροφής. Τα περισσότερα αεροσκάφη, χρησιμοποιούν την κατασκευή τους, ως τη διαδρομή επιστροφής για τα ρεύματα τροφοδοσίας. Οι διατάξεις σύνδεσης πρέπει να ενσωματωθούν, για τον έλεγχο της σύνθετης αντίστασης αυτής της διαδρομής. Τα συστήματα ισχύος στα διαστημικά οχήματα, γενικά απαγορεύουν τη χρήση της κατασκευής τους και θα πρέπει να χρησιμοποιούν τις απαιτήσεις του προτύπου MIL-STD-1541 [4].

Η διατήρηση των απαιτούμενων επιπέδων τάσης σε μεταλλικά αεροσκάφη στον εξοπλισμό χρήσης δεν αποτέλεσε πρόβλημα, δεδομένου ότι οι διαδρομές επιστροφής των ρευμάτων έχουν χαμηλή σύνθετη αντίσταση. Με την αυξανόμενη χρήση των σύνθετων υλικών, η ανάγκη για ξεχωριστά καλώδια επιστροφής ή η εφαρμογή τους σε επίπεδα γείωσης, αποτελεί μία σημαντική παράμετρο.

5.3.11.3.2 Διακρίβωση

Οι πτώσεις τάσης που παρουσιάζονται στις διαδρομές των ρευμάτων επιστροφής της τροφοδοσίας, πρέπει να αξιολογούνται, για να εξασφαλισθεί ότι η λαμβανόμενη ισχύς του εξοπλισμού χρήσης της ηλεκτρικής ισχύος, είναι σύμφωνη με τα πρότυπα ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος και να εξασφαλισθεί ότι οι κίνδυνοι καυσίμων και πυρκαγιάς αποφεύγονται.

Επιπλέον, στα στρατιωτικά αεροσκάφη, η δομή του αεροσκάφους χρησιμοποιείται για το ρεύμα επιστροφής για την ηλεκτρική ισχύ. Οι έλεγχοι της σύνδεσης μεταξύ των δομικών μελών, η αντίσταση της δομής και τα επίπεδα του ηλεκτρικού ρεύματος θα πρέπει να εξετάζονται. Για τα αεροσκάφη που χρησιμοποιούν καλώδια επιστροφής, η αντίσταση του σύρματος είναι το πρωταρχικό μέλημα. Η θέση του σημείου ρύθμισης για το ηλεκτρικό σύστημα διαδραματίζει κάποιο ρόλο.

Σε μεταλλικά αεροσκάφη, οι πτώσεις τάσης μέσω της δομής της κατασκευής είναι τυπικά πολύ χαμηλές. Πολύ υψηλότερα επίπεδα, είναι δυνατά με δομή γραφίτη/εποξειδικής ρητίνης (epoxy).

5.3.11.4 Εγκαταστάσεις Κεραιών

Οι κεραιές πρέπει να συνδέονται, για να επιτευχθούν τα απαιτούμενα πρότυπα κεραιών και να πληρούν τις απαιτήσεις απόδοσης για την κεραία. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση, επιθεωρήσεις ή ένα συνδυασμό αυτών.

5.3.11.4.1 Απαίτηση

Η καλή ηλεκτρική σύνδεση είναι ένα βασικό στοιχείο της επιτυχούς εγκατάστασης μιας κεραιάς. Η κακή σύνδεση μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στα επιθυμητά πρότυπα της κεραιάς και σε υποβάθμιση των ενεργών ανοιγμάτων ακτινοβολίας.

Κεραιές επικοινωνιών, όπως οι κεραιές λεπίδα (blade), συχνά γίνονται σημεία προσέγγισης του κεραυνού. Χωρίς την κατάλληλη σύνδεση, οι κεραυνοί μπορεί να παράγουν τάση που μπορεί να βλάψει σοβαρά τον συνδεδεμένο εξοπλισμό με την κεραία.

Οι κεραιές συνδέονται σε σύνθετες κατασκευαστικές δομές μέσω μεταλλικού πλέγματος. Αυτό το «ψευδοεπίπεδο γείωσης», πρέπει να είναι σε θέση να άγει τα επαγόμενα ρεύματα από τον κεραυνό.

Οι διατάξεις σύνδεσης που απαιτούνται για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των προτύπων της κεραιάς και των απαιτούμενων κερδών της, εξαρτώνται από το σύστημα. Συνήθως, το σύστημα αγωγών στο κάτω μέρος της κεραιάς ή τα επίπεδα γείωσης που σχετίζονται με τις κεραιές είναι σχεδιασμένα για να παρέχουν αμελητέα σύνθετη αντίσταση στις συχνότητες λειτουργίας του εξοπλισμού. Επιπλέον, ο σχεδιασμός κεραιών που απαιτούν μια μικρή διαδρομή αντίστασης RF για την αποτελεσματική λειτουργία, πρέπει να έχει διαδρομή χαμηλής σύνθετης αντίστασης του ελάχιστου μήκους, στο κατάλληλο μεταλλικό τμήμα της κεραιάς.

Η κακή σύνδεση των κεραιών έχει ως αποτέλεσμα την υποβαθμισμένη λειτουργία των επικοινωνιών και του εξοπλισμού πλοήγησης. Η δημιουργία p-static φαινομένων στη βάση της κεραιάς, υποβαθμίζει σημαντικά την απόδοση του εξοπλισμού για τους δέκτες VHF. Επιπλέον, σοβαρές φθορές από κεραυνό έχουν συμβεί στις κεραιές λεπίδα (blade) με ένα ανεπαρκή επίπεδο γείωσης και συγκεκριμένα για σύνθετα

επίπεδα τμήματα πλαισίωσης. Η φθορά ήταν αρκετά σοβαρή ώστε να απαιτείται η αντικατάσταση της κεραίας και ολόκληρου του επιπέδου πλαισίωσης.

5.3.11.4.2 Διακρίβωση

Η διακρίβωση της σύνδεσης για κεραίες, είναι απαραίτητη προκειμένου να διασφαλιστεί ότι επιτυγχάνονται τα απαιτούμενα πρότυπα κεραίας και κέρδη, καθώς και ότι παρέχονται επαρκείς διαδρομές χαμηλής σύνθετης αντίστασης για ρεύματα που επάγονται από p-static πηγές, RF πηγές και κεραυνούς.

Η διακρίβωση των μετρήσεων σύνδεσης για κεραίες, επιτυγχάνεται με την απόδειξη ότι υπάρχει μια διαδρομή χαμηλής σύνθετης αντίστασης μεταξύ των αγωγίμων τμημάτων της κεραίας και του επιπέδου γείωσης ή του συστήματος αγωγών στο κάτω μέρος της κεραίας (counterpoise). Τα πρότυπα της κεραίας και τα κέρδη μπορεί να διακριβωθούν σε ανηχοϊκούς θαλάμους (anechoic chambers) ή σε ένα ήσυχο περιβάλλον RF.

Η επάρκεια των συνδέσεων της κεραίας, μπορεί να εκτιμηθεί με τις μετρήσεις των προτύπων κεραίας, τις μετρήσεις αντίστασης DC και την επιθεώρηση. Οι μετρήσεις AC είναι επιθυμητές. Ωστόσο, αυτές απαιτούν πιο εξελιγμένο εξοπλισμό και διαδικασίες μέτρησης.

5.3.11.5 Μηχανικές Διεπαφές

Η ηλεκτρική σύνδεση του συστήματος, παρέχει ηλεκτρική συνέχεια σε όλες τις εξωτερικές μηχανικές διεπαφές για τον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, τόσο στον εξοπλισμό όσο και μεταξύ του εξοπλισμού και των άλλων στοιχείων του συστήματος, για τον έλεγχο της E3, προκειμένου οι απαιτήσεις των λειτουργικών επιδόσεων του συστήματος να πληρούνται. Για τις περιπτώσεις όπου συγκεκριμένοι έλεγχοι δεν έχουν τεκμηριωθεί για ένα σύστημα και εγκρίνονται από την Υπηρεσία Προμηθειών, τα ακόλουθα επίπεδα σύνδεσης συνεχούς ρεύματος (DC), εφαρμόζονται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

α. 10 milliohms ή λιγότερο από το περίβλημα του εξοπλισμού στη δομή του συστήματος, συμπεριλαμβανομένου του σωρευτικού αποτελέσματος όλων των διεπαφών της επιφάνειας του.

β. 15 milliohms ή λιγότερο από τις θωρακίσεις των καλωδίων στο περίβλημα του εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένου του σωρευτικού αποτελέσματος όλων των διεπαφών των συνδέσεων και περιφερειακών εξαρτημάτων.

γ. 2,5 milliohms ή λιγότερο μεταξύ των επιμέρους διεπαφών, εντός του εξοπλισμού, όπως μεταξύ υποσυστημάτων ή τμημάτων.

Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση, επιθεωρήσεις ή ένα συνδυασμό αυτών.

5.3.11.5.1 Απαίτηση

Η μηχανική σύνδεση (άλλοτε καθορισμένη ως κατηγορία R «ραδιοσυχνότητα» στο πρότυπο MIL-B-5087 [49]) είναι αναγκαία για να αποφευχθεί η σύζευξη των σημάτων παρεμβολής που παρουσιάζονται στο σύστημα και στα υποσυστήματα. Αυτά τα σήματα παρεμβολών μπορούν να παραχθούν από άλλα υποσυστήματα, το εξωτερικό ΕΜΕ, τους κεραυνούς, τα p-static φαινόμενα, τα ρεύματα γείωσης του συστήματος ισχύος κτλ. Τα σήματα παρεμβολών από τα υποσυστήματα, είναι συνήθως ο θόρυβος RF σε κυκλώματα ισχύος και ελέγχου που παρατηρούνται στους χώρους των υποσυστημάτων. Με μία χαμηλή αντίσταση μεταξύ ενός υποσυστήματος και του υπολοίπου συστήματος, οι διαφορές δυναμικού μπορεί να ελέγχονται σε χαμηλές τιμές.

Υπάρχει μια γενική υποχρέωση για όλα τα συστήματα, για την αντιμετώπιση και την εφαρμογή των μέτρων σύνδεσης, χωρίς να αναφέρονται συγκεκριμένα επίπεδα ελέγχου. Ένα σημαντικό θέμα είναι ότι η σύνδεση είναι «υπό έλεγχο» και σε «γνωστά επίπεδα». Η σύνδεση δεν πρέπει να είναι τυχαία ή ακανόνιστη. Η επαναληψιμότητα των επιδόσεων από σύστημα σε σύστημα με την πάροδο του χρόνου είναι κρίσιμη.

Υπάρχουν επίπεδα σύνδεσης που προβλέπονται στην απαίτηση, όπου συγκεκριμένοι εναλλακτικοί έλεγχοι δεν έχουν αναπτυχθεί για μια πλατφόρμα. Τα επίπεδα εξειδικεύονται για να λάβουν υπόψη πολλά στοιχεία. Αφορούν το σύνολο των διεπαφών μεταξύ του περιβλήματος του εξοπλισμού και του υλικού του συστήματος στο σύνολό του, χωρίς την επιμέρους αντιμετώπιση κάθε μηχανικής διεπαφής. Τόσο οι διατάξεις ολοκλήρωσης (integrator provisions) του συστήματος (όπως ηλεκτρικές καλωδιώσεις, ερμάρια τοποθέτησης εξοπλισμού και οι επεξεργασίες επιφάνειας/υλικού), όσο και οι κατασκευαστικές διατάξεις του εξοπλισμού (όπως οι σύνδεσμοι εγκατάστασης και οι επεξεργασίες επιφάνειας/υλικού) περιλαμβάνονται στα παραπάνω επίπεδα. Οι τιμές λαμβάνουν υπόψη, ότι συχνά περιλαμβάνονται οι διάφορες διεπαφές επιφανειών αποτελούνται από συνδεδεμένα τμήματα με διάφορους τρόπους σύνδεσης (faying surfaces). Για παράδειγμα, η απαίτηση για τον τερματισμό της θωράκισης του καλωδίου θα περιλαμβάνει συχνά τις ακόλουθες διεπαφές: θωράκιση με το οπίσθιο περίβλημα (shell), οπίσθιο περίβλημα με το περίβλημα σύνδεσης, επαφή μεταξύ των περιβλημάτων συνδέσμων και το περίβλημα συνδέσμου με τον περίβλημα της κατασκευής (enclosure). Σε γενικές γραμμές, χαμηλότερες τιμές από εκείνες που καθορίζονται θα απαιτηθούν κατά τη διάρκεια της κατασκευής, για να εξηγήσουν την υποβάθμιση συναρτήσει του χρόνου. Η αναμενόμενη υποβάθμιση με την πάροδο του χρόνου πρέπει να γίνει κατανοητή.

Θα υπάρξουν περιπτώσεις όπου η τιμή των 10 milliohm από το περίβλημα του εξοπλισμού στη δομή του συστήματος μπορεί να μην είναι επαρκής. Η Αεροπορία Στρατού έχει βιώσει ένα ζήτημα επί του αεροσκάφους περιστροφικών πτερυγίων, όταν ένας συγκεκριμένος σύνδεσμος υπερέβη τα 8 milliohms. Αυτό το παράδειγμα τονίζει, ότι απαιτείται να επανεξετασθούν μεμονωμένες περιπτώσεις, για να

καθορισθούν οι πραγματικές ανάγκες σύνδεσης με βάση τον εξοπλισμό που εμπλέκεται και τα περιβάλλοντα που αντιμετωπίζονται.

Η απαίτηση των 15 milliohm σύνδεσης από θωρακίσεις των καλωδίων στο περίβλημα είναι ένα σημαντικό στοιχείο της συνολικής απόδοσης της σύνθετης αντίστασης μεταφοράς ενός θωρακισμένου καλωδίου. Η σύνθετη αντίσταση μεταφοράς, είναι η σχέση μιας τάσης κοινής λειτουργίας που αναπτύσσεται στη θωράκιση, η οποία αποτυπώνεται στα κυκλώματα διασύνδεσης, που σχετίζονται με τα ρεύματα που ρέουν στη θωράκιση. Ιδανικά, η σύνθετη αντίσταση μεταφοράς του συνδέσμου της συσκευής, πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή ώστε η σύνθετη αντίσταση μεταφοράς ολόκληρου του καλωδίου θωράκισης, να είναι το κυρίαρχο στοιχείο στη συνολική σύνθετη αντίσταση μεταφοράς της συνολικής θωράκισης και των τερματικών συνδέσμων των συσκευών/συγκροτημάτων.

Η κακή μηχανική σύνδεση σε πλοία έχει ως αποτέλεσμα το «σκουριασμένο μπουλόνι», όπου τα προϊόντα αλληλοδιαμόρφωσης, παράγονται από μη-γραμμικές επιδράσεις μη κατάλληλων συνδέσμων.

Τα περισσότερα εγχειρίδια EMC περιέχουν πληροφορίες σχετικά με διάφορες τεχνικές για να επιτευχθεί μια επιτυχημένη μηχανική σύνδεση «κατηγορίας R». Ειδικές τεχνικές δεν απαιτούνται για να επιτρέψουν μια πιο ευέλικτη εφαρμογή της σύνδεσης. Η χρήση των 2,5 milliohms κατά το παρελθόν, έχει αποκλείσει πολλά προβλήματα EMI. Σε ένα αεροσκάφος, το πηδάλιο βρέθηκε να τρέμει ενώ εκτίθεται στο εξωτερικό περιβάλλον. Το πρόβλημα προσδιορίστηκε στο ότι το υποσύστημα διασύνδεσης του πηδαλίου κλίσης πτερύγων δεν είχε μηχανικά συνδεθεί. Όταν συνδέθηκε, το πηδάλιο ήταν σταθερό.

Οι μετρήσεις κατά τη διάρκεια πολλών ετών των δοκιμών του ASEMICAP του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ, έχουν αποκαλύψει μετρήσεις σύνδεσης εξοπλισμού που δεν πληρούν πάντα την απαίτηση των 2,5 milliohm. Εκτεταμένες δοκιμές E3 στη συνέχεια σε γενικές γραμμές, δεν έχουν συνδέσει οποιαδήποτε προβλήματα EMI με την υποβαθμισμένη σύνδεση. Αυτή η εκτενής βάση δεδομένων έχει υποστηρίξει την άποψη, ότι είναι δυνατόν υπό ορισμένες συνθήκες να γίνεται υπέρβαση των 2,5 milliohms και να εξακολουθεί να υπάρχει επαρκής έλεγχος E3.

Οι απαιτήσεις σύνδεσης στο παρελθόν, έχουν επικεντρωθεί σε μεγάλο βαθμό στην σύνδεση μεταξύ ενός περιβλήματος του εξοπλισμού και της δομής του συστήματος. Σε πολλές περιπτώσεις, έχει αναγνωριστεί ότι η σύνδεση του θωρακισμένου καλωδίου είναι η πιο κρίσιμη για την απόδοση από τη σύνδεση του περιβλήματος. Υπάρχουν ακόμη και περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητό να απομονωθεί ένα περίβλημα από τη δομή, ώστε να εμποδίζεται η διέλευση μεγάλων ρευμάτων κεραυνού, κατά μήκος μιας συγκεκριμένης καλωδίωσης. Για τις περιπτώσεις αυτές, είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί ότι τα ηλεκτρονικά στοιχεία και το φιλτράρισμα στο περίβλημα διαμορφώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε η απουσία ενός δεσμού δεν θα είναι επιζήμια.

5.3.11.5.2 Διακρίβωση

Απαιτούνται δοκιμές για την πραγματική μέτρηση χαμηλής σύνθετης αντίστασης του συνδέσμου. Η επιθεώρηση των σχεδίων και διαδικασιών μπορούν να εξασφαλίσουν ότι οι διατάξεις σύνδεσης έχουν ορθή εφαρμογή. Η ανάλυση του ρόλου της σύνδεσης στην παροχή της συνολικής E3 προστασίας, είναι απαραίτητη.

Το πρώτο βήμα για τον έλεγχο είναι να επανεξετασθεί η εφαρμογή της σύνδεσης για να καθορισθεί η τιμή της αντίστασης που απαιτείται, από το περίβλημα του εξοπλισμού στη γείωση αναφοράς του συστήματος. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των σημείων όπου μπορεί να γίνει η μέτρηση. Με βάση τα σημεία μέτρησης, η αντίσταση μεταξύ των δύο σημείων υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το σύνολο των μηχανικών συνδέσμων στη διαδρομή. Κατά την εκτέλεση της μέτρησης, πρώτα επιθεωρούνται οπτικά οι σύνδεσμοι, για να ελεγχθεί η παρουσία τους και η σωστή κατασκευή. Στη συνέχεια, αφαιρούνται όλες οι άλλες συνδέσεις στον εξοπλισμό, για να διασφαλισθεί ότι μόνο η μηχανική σύνδεση μετράται και όχι ο εξοπλισμός της γείωσης ασφαλείας ή άλλες διατάξεις γείωσης.

5.3.11.6 Προστασία από Πλήγματα, Σφάλματα και Αναφλέξιμους Ατμούς

Η σύνδεση όλων των ηλεκτρικά αγώγιμων αντικειμένων, που υπόκεινται σε ηλεκτρικά ρεύματα σφάλματος, θα πρέπει να εξασφαλίζεται για τον έλεγχο κινδύνων κρουστικών τάσεων και την υλοποίηση της σωστής λειτουργίας των συσκευών προστασίας κυκλώματος. Για διεπαφές που βρίσκονται σε καύσιμα ή άλλες εύφλεκτες περιοχές ατμών, η σύνδεση πρέπει να είναι επαρκής για την αποτροπή ανάφλεξης από τη ροή των ρευμάτων σφάλματος. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση ή συνδυασμό αυτών.

5.3.11.6.1 Απαίτηση

Το προσωπικό πρέπει να προστατεύεται από τις επικίνδυνες τάσεις. Για να δύνανται οι συσκευές προστασίας κυκλώματος να λειτουργούν σωστά, η σύνδεση θα πρέπει να είναι επαρκής για να επιτρέπει την αποτελεσματική ροή του ρεύματος σφάλματος στη διέλευση εντός των συσκευών κατά τρόπο έγκαιρο. Η ροή των ηλεκτρικών ρευμάτων σφάλματος δια μέσου ανεπαρκώς συνδεδεμένων διεπαφών, μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρικό τόξο, σπινθήρες και θερμές κηλίδες που οφείλονται στη θέρμανση των υλικών και πιθανόν να οδηγήσει σε ανάφλεξη εύφλεκτων ατμών.

Οι τάσεις σε αγώγιμες επιφάνειες μπορεί να προκύψουν από πηγές όπως σπασμένα εξαρτήματα διατάξεων, που επιτρέπουν την «θερμή» καλωδίωση να έρθει σε επαφή με το περίβλημα ή από ένα κύκλωμα ηλεκτρικά σχετιζόμενο με το περίβλημα (όπως το κύκλωμα χωρητικού φιλτραρίσματος για καταστολή ανεπιθύμητων συχνοτήτων, ηλεκτρικών τόξων, ισχύων κτλ). Η απαίτηση αυτή αφορά κάθε ηλεκτρικά αγώγιμο τμήμα του συστήματος το οποίο μπορεί να γίνει «θερμό», από την επαφή με την καλωδίωση υψηλότερης τάσης. Δεν περιορίζεται σε ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά

περιβλήματα. Στο πρότυπο MIL-HDBK-454 [56], προτείνεται η προστασία από τις τάσεις άνω των 30 Volts rms και DC.

Οι απαιτήσεις για την πρόληψη της αναφλέξεως εύφλεκτων ατμών πρέπει να εξετάσουν τυχόν διαδρομές όπου σημαντικά ρεύματα σφάλματος πιθανόν να ρέουν. Πιο εμφανείς είναι οι διαδρομές βλάβης, που σχετίζονται με ηλεκτρικές συσκευές που λαμβάνουν την κύρια ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία τους, όπως αντλίες καυσίμου ή βαλβίδες. Οι μελέτες πρέπει να αντιμετωπίσουν θέματα, όπως τα διαθέσιμα ρεύματα σφάλματος, τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται, οι περιοχές που εμπλέκονται με καύσιμα, το φινίρισμα (επένδυση) της επιφάνειας (τόσο περιοχές σύνδεσης όσο και εκτεθειμένες επιφάνειες), οι στεγανωτικές ουσίες (sealants) και τα είδη των θραυσμάτων (debris) που ενδέχεται να υπάρχουν.

Προηγούμενες μελέτες σχετικά με την ηλεκτρική σύνδεση για τα ρεύματα σφάλματος σε εύφλεκτες περιοχές ατμών, έχουν καθορίσει ότι οι απαιτήσεις της σύνδεσης, σχετίζονται με μια συγκεκριμένη τάση που εμφανίζεται δια μέσου της διεπαφής υπό συνθήκες βλάβης. Δεδομένου ότι η τάση που αναπτύχθηκε είναι ευθέως ανάλογη προς το ρεύμα σφάλματος για μια σταθερή αντίσταση, τα απαιτούμενα επίπεδα σύνδεσης διαφέρουν ανάλογα με το διαθέσιμο ρεύμα σφάλματος. Ένα κατώφλι ανάφλεξης βρέθηκε να είναι τα 0,37 volt για ένα σύρμα αλουμινίου ασφαλείας, με ένα σημείο επαφής παράλληλα με την προβλεπόμενη διαδρομή σύνδεσης. Ένας παράγοντας ασφαλείας των 5, έχει χρησιμοποιηθεί για να αποδώσει την υποβάθμιση στην πάροδο του χρόνου και τη μεταβλητότητα στις δοκιμές με κριτήρια σύνδεσης τα 0.074 volt. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, το διαθέσιμο ρεύμα σφάλματος για ένα κύκλωμα αρχικά υπολογίζεται διαιρώντας τη πηγή τάσης με την αντίσταση της καλωδίωσης στο κύκλωμα. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας πηγή 115 Volt, 400 Hz και 200 milliohms αντίσταση καλωδίωσης, το διαθέσιμο ρεύμα σφάλματος είναι 575 amperes. Η απαιτούμενη αντοχή σύνδεσης προσδιορίζεται διαιρώντας τα 0.074 volt με τα 575 amperes με αποτέλεσμα τα 0,13 milliohms. Τα επίπεδα σύνδεσης ορίζονται στο SAE ARP1870 [50] για τα ρεύματα σφάλματος με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης. Άλλες εργασίες διαπίστωσαν ότι λιγότερο αυστηρά επίπεδα σύνδεσης, ήταν κατάλληλα για καλώδια ασφαλείας κατασκευασμένα από ανοξείδωτο ατσάλι και όχι από αλουμίνιο.

Εύφλεκτοι ατμοί μπορεί να αναφλεγούν μέσω ηλεκτρικών τόξων, σπινθήρων (θερμά σωματίδια και διάσπαση τάσης) και θερμικές καυτές κηλίδες (hot spots). Ως ένα παράδειγμα ενός ορίου ανάφλεξης, οι ατμοί του καυσίμου JP-5, μπορεί να αναφλεγούν με θερμικές καυτές κηλίδες (hot spots), στους 245 βαθμούς Κελσίου.

Οι ρυθμίσεις φιλτραρίσματος των γραμμών μεταφοράς στα ηλεκτρονικά στοιχεία, που απομονώνουν την ουδέτερη γραμμή μεταφοράς από το περίβλημα, μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνες τάσεις στο περίβλημα, αν το πλαίσιο γείωσης αποσυνδεθεί. Τυπικά, τα φίλτρα θα παρουσιάζονται και στην ψηλή πλευρά και στην επιστροφή και τα οποία θα έχουν χωρητικότητα στο πλαίσιο. Εάν το πλαίσιο κινείται σε σχέση με

την γείωση, οι πυκνωτές δρουν ως διαιρέτης τάσεως για AC κυματομορφές. Η τιμή των πυκνωτών καθορίζει την ποσότητα του ρεύματος που μπορεί να ρέει.

Για την προστασία του κυκλώματος, προκειμένου να λειτουργεί γρήγορα και αποτελεσματικά, είναι απαραίτητα ρεύματα σφάλματος που πιθανόν να υπερβαίνουν την απόδοση του κυκλώματος. Για παράδειγμα, ένας διακόπτης κυκλώματος μπορεί να πάρει δεκάδες δευτερόλεπτα για να διακόψει ένα κύκλωμα σε ένα ρεύμα διπλάσιο της ονομαστικής ισχύος.

5.3.11.6.2 Διακρίβωση

Μερικές δοκιμές θα είναι πιθανώς απαραίτητες για να αξιολογηθούν οι σύνδεσμοι. Η ανάλυση θα είναι απαραίτητη, για να προσδιοριστεί ο τύπος όπου υπάρχουν δυνητικά επικίνδυνες τάσεις και να αξιολογηθούν οι συνθήκες σφάλματος.

Πρέπει να προσδιορίζονται τα στοιχεία του συστήματος όπου μπορεί να εμφανιστούν δυνητικά επικίνδυνες τάσεις. Διαδρομές ρευμάτων σφάλματος και οι σχετικές διατάξεις ηλεκτρικής σύνδεσης πρέπει να αξιολογούνται για την επάρκεια τους. Ένα παραδοσιακό επίπεδο ελέγχου για την προστασία από κινδύνους ηλεκτροπληξίας που περιέχονται στα πρότυπα MIL-B-5087 [49] και MIL-STD-1310 [52] του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ ήταν τα 0,1 ohms. Αυτό το επίπεδο είναι κάπως αυθαίρετο, αλλά μπορεί να είναι ένας κατάλληλος έλεγχος για ορισμένες εφαρμογές.

Το επίπεδο των συνδέσεων που είναι απαραίτητο να πληροί την απαίτηση αυτή, κανονικά θα απαιτήσει μετρητές σύνδεσης τεσσάρων σημείων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (ενότητα 5.3.11.2) για να χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις.

5.3.12 Εξωτερικές Γειώσεις

Το σύστημα και τα συναφή υποσυστήματα παρέχουν εξωτερικές διατάξεις γείωσης, για τον έλεγχο του ηλεκτρικού ρεύματος και της στατικής φόρτισης, για την προστασία του προσωπικού από την ηλεκτροπληξία, την πρόληψη της ακούσιας ανάφλεξης πυρομαχικών, καυσίμων και εύφλεκτων ατμών και την προστασία του υλικού από τη φθορά. Η συμμόρφωση στις εξωτερικές γειώσεις επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση, επιθεωρήσεις ή συνδυασμό αυτών.

5.3.12.1 Απαίτηση

Οι εξωτερικές γειώσεις είναι απαραίτητες για την παροχή οδεύσεων στα ρεύματα σφάλματος, για την προστασία του προσωπικού από τους κινδύνους ηλεκτροπληξίας, την απαγωγή του στατικού ηλεκτρισμού για την πρόληψη των κινδύνων από το προσωπικό, τα εύφλεκτα αέρια, τα πυρομαχικά και το ηλεκτρονικό υλικό.

Όλες οι τηλεπικοινωνιακές και ηλεκτρονικές εγκαταστάσεις είναι εγγενώς σχετιζόμενες με τη γη, με χωρητική σύζευξη, τυχαία επαφή και κατασκευαστικές συνδέσεις. Ως εκ τούτου, η «γη», θα πρέπει να εξεταστεί από μία συνολική άποψη

του συστήματος, με διάφορα υποσυστήματα που περιλαμβάνει το συνολικό σύστημα της γείωσης της εγκατάστασης. Το σύστημα γείωσης της εγκατάστασης αποτελεί μια άμεση διαδρομή της γνωστής χαμηλής αντίστασης μεταξύ της γης και των διαφόρων εξοπλισμών ισχύος, επικοινωνιών και άλλων, που εκτείνεται ουσιαστικά στη προσέγγιση της γείωσης αναφοράς σε όλη την εγκατάσταση. Το σύστημα γείωσης της εγκατάστασης αποτελείται από ένα υποσύστημα ηλεκτροδίων γείωσης, ένα υποσύστημα αντικεραυνικής προστασίας, ένα υποσύστημα προστασίας από τα σφάλματα και το υποσύστημα σήματος αναφοράς.

Για λόγους ασφαλείας, το στρατιωτικό πρότυπο MIL-STD-188 - 124 [57], απαιτεί τα ηλεκτρικά συστήματα ισχύος και ο εξοπλισμός να είναι γειωμένα. Ως εκ τούτου, το σύστημα γείωσης επηρεάζεται άμεσα από τη σωστή εγκατάσταση και συντήρηση των συστημάτων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η επιδιωκόμενη γείωση των ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος ελαχιστοποιεί το μέγεθος και τη διάρκεια των υπερτάσεων σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα τραυματισμού του προσωπικού, την αποτυχία μόνωσης ή την πρόκληση πυρκαγιάς στο σύστημα και εξοπλισμό και κατά συνέπεια την πρόκληση ζημιών σε κτίρια.

Πολλά τμήματα ενός συστήματος απαιτούν ένα σύστημα γείωσης για να εξασφαλιστεί ότι μία κατάλληλη διαδρομή ρεύματος είναι διαθέσιμη για να ρέουν τα ρεύματα σε περίπτωση ηλεκτρικής βλάβης και να δρομολογηθούν στις συσκευές προστασίας των κυκλωμάτων. Όλες οι αγώγιμες επιφάνειες με τις οποίες το προσωπικό μπορεί να έρθει σε επαφή, πρέπει να συνδέονται με το έδαφος αναφοράς, προκειμένου να αποτραπεί σε επικίνδυνες τάσεις να εμφανισθούν στις επιφάνειες κατά τη διάρκεια βλαβών και να παρέχουν μια διαδρομή για τα προκύπτοντα ρεύματα σφάλματος για να δρομολογηθούν στις συσκευές προστασίας.

Οι διατάξεις γείωσης είναι συχνά αναγκαίες υπό ορισμένες λειτουργίες, για να παρέχουν μια διαδρομή ρεύματος προς πρόληψη στατικών ηλεκτρικών φορτίων από τη συσσώρευση, όπως και κατά το χειρισμό πυρομαχικών, σε ενέργειες ανεφοδιασμού ή άλλες λειτουργίες εύφλεκτων ατμών και ενέργειες συντήρησης σε ευαίσθητα ηλεκτρονικά στοιχεία.

Οι διατάξεις γείωσης συνήθως απαιτούνται για τα πυρομαχικά που αποθηκεύονται σε αποθήκες, σε εμπορευματοκιβώτια (container) ή όταν εκτίθενται στα στοιχεία της φύσης για τη μείωση της συσσωρεύσεως ηλεκτροστατικών φορτίων κατά το χειρισμό. Αυτά περιλαμβάνουν τα πυρομαχικά σε εμπορευματοκιβώτια, τα εμπορευματοκιβώτια στο έδαφος και τα πυρομαχικά (όχι σε εμπορευματοκιβώτια) στο έδαφος.

Αναφορικά με το σύστημα γείωσης στρατιωτικού οχυρωματικού έργου, το σύστημα γείωσης της εγκατάστασης συνδέει κάθε μεταλλικό στοιχείο από τα σχετιζόμενα υποσυστήματα με τη γη, μέσω μιας διάταξης γης με ηλεκτρόδιο. Εγκαθιστά ένα δυναμικό αναφοράς κοινό για οποιαδήποτε εξοπλισμό ή υποσύστημα και καθιστά το δυναμικό γείωσης διαθέσιμο σε όλο το σύστημα. Γενικά, τέσσερα υποσυστήματα περιλαμβάνονται στο σύστημα γείωσης της εγκατάστασης και θα πρέπει να

εξετασθούν κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της εγκατάστασης οποιουδήποτε ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, υποσυστήματος, καθώς και συστήματος. Παρά το γεγονός ότι, δεν είναι δυνατόν να έχουμε ένα σταθερό σύνολο κανόνων που να διέπουν τη γείωση όλων των πιθανών διαμορφώσεων του ηλεκτρικού ή ηλεκτρονικού εξοπλισμού ή συστήματος, οι κατευθυντήριες γραμμές θα πρέπει να προσαρμοστούν στην απαίτηση μιας συγκεκριμένης τακτικής εγκατάστασης. Πιο λεπτομερείς οδηγίες παρέχονται στο MIL-STD-188-124 [57] και στο πρότυπο MIL-HDBK-419 [51].

Είναι σημαντικό να εξεταστεί σοβαρά η υλοποίηση της γείωσης του συστήματος. Η σωστή γείωση μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ικανότητα της, να διατηρήσει τις λειτουργίες κάτω από αντίξοες συνθήκες. Οι μέθοδοι γείωσης ορίζονται με βάση όχι μόνο τις εκτιμήσεις για την υλοποίηση του συστήματος, αλλά και για τη συμμόρφωση με τις ειδικές απαιτήσεις της μετρούμενης αντίστασης. Οι τακτικές αναπτύξεις του κινητού εξοπλισμού διακρίνεται σε 4 κατηγορίες: αυτοδύναμος εξοπλισμός, αυτοδύναμα καταφύγια, συνεγκατεστημένος (collocated) εξοπλισμός και περιστοιχισμένα (collocated) καταφύγια-θωρακισμένοι χώροι.

Ένα αυτόνομο καταφύγιο αποτελείται από εξοπλισμό που στεγάζεται σε ένα κινητό μεταλλικό καταφύγιο και τυπικά δεν βρίσκεται αρκετά κοντά σε άλλες συσκευές για να έχει αξία η κατασκευή ενός κοινού υποσυστήματος εκτεταμένου ηλεκτροδίου γείωσης, μεταξύ των διασυνδέσεων των συστημάτων του. Η ισχύς που παρέχεται σε ένα καταφύγιο μπορεί να προέλθει από μια γεννήτρια ή από ρεύμα πόλεως. Η διασύνδεση με το καταφύγιο μπορεί να είναι μέσω του καλωδίου τροφοδοσίας. Η ανάγκη για τη γείωση στα αυτόνομα καταφύγια είναι να παρέχεται γη για:

- α. Το υποσύστημα προστασίας από τα σφάλματα.
- β. Την «αιμορραγία» στατικών φορτίων ή EMI από τα καλώδια σηματοδοσίας των διεπαφών.
- γ. Το υποσύστημα σηματοδοσίας αναφοράς.
- δ. Το υποσύστημα της αντικεραυνικής προστασίας.

Ο συνεγκατεστημένος κινητός εξοπλισμός είναι συσκευές που λειτουργούν μεμονωμένα, αλλά φιλοξενούνται μαζί εντός ενός ενιαίου μεταφερόμενου περιβλήματος (enclosure), όπως ένας μουςαμάς. Τυπικά, αυτές οι συσκευές δεν είναι εγκατεστημένες σε ερμάριο και δύνανται να βρίσκονται πάνω στη γη. Συνδέσεις επικοινωνίας εντός περιβλήματος μπορεί να υπάρχουν μεταξύ των εξοπλισμών, αλλά συνήθως οι συνδέσεις εγκαθίστανται μεταξύ του εξοπλισμού και του εξωτερικού συστήματος. Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του συνεγκατεστημένου εξοπλισμού είναι παρόμοια με τις μεμονωμένες συσκευές. Οι απαιτήσεις γείωσης είναι κατά κύριο λόγο για την ασφάλεια του προσωπικού από κεραυνούς και σφάλματα ισχύος.

Τα περιστοιχισμένα/συνεγκατεστημένα καταφύγια (shelter) είναι μεταφερόμενα μεταλλικά καταφύγια (κλωβοί) που μοιράζονται κοινά καλώδια σήματος ή ισχύος και ταξινομούνται σε δύο γενικές κατηγορίες, εκείνων που βρίσκονται εντός 8 μέτρων (26,5 πόδια) το ένα με το άλλο και εκείνα που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από τα 8 μέτρα το ένα από το άλλο. Οι διαμορφώσεις ενός περιστοιχισμένου καταφυγίου, είναι συνήθως ενός συστήματος εξοπλισμού που πρέπει να στεγάζεται σε πολλά καταφύγια. Οι απαιτήσεις γείωσης για τα περιστοιχισμένα καταφύγια απαιτούνται για την παροχή προστασίας του προσωπικού και εξοπλισμού από τις συνέπειες των κεραυνών και των σφαλμάτων ισχύος και για να αποτελέσει σημείο αναφοράς για τις γειώσεις σηματοδοσίας. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στα περιστοιχισμένα καταφύγια που λαμβάνουν ισχύ από την ίδια πηγή ενέργειας ή επικοινωνούν μέσω καλωδίων σηματοδοσίας μεταξύ καταφυγίων. Η ανάγκη να εγκατασταθεί ένα σύστημα γείωσης, που να περιλαμβάνει όλα τα περιστοιχισμένα καταφύγια που είναι εγκατεστημένα σε απόσταση πάνω από οκτώ μέτρα, θα πρέπει να είναι συνάρτηση των μετρήσεων αντίστασης του εδάφους που λαμβάνονται από κάθε πλευρά του καταφυγίου. Οι τρόποι διασύνδεσης του συστήματος γείωσης κάθε καταφυγίου καθορίζονται στο στρατιωτικό πρότυπο των ΗΠΑ MIL-HDBK-419 [51]. Εάν θόρυβος ή άλλες ανεπιθύμητες επιδράσεις, παράγονται ως αποτέλεσμα των υψηλότερων διαφορών αντίστασης γείωσης, το σύστημα που έχει την υψηλότερη αντίσταση μπορεί να μειωθεί με τη χρήση χημικής επεξεργασίας ή βελτίωσης που αναλύεται διεξοδικά στο υπόψη πρότυπο.

Τα σταθερά προκατασκευασμένα καταφύγια συνήθως έχουν σχεδιαστεί με τα κύρια συστατικά τμήματά τους προκατασκευασμένα και στη συνέχεια συναρμολογούνται επί τόπου σε ένα σταθερό καταφύγιο (shelter) που μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερή εγκατάσταση. Ως τέτοιο, θα πρέπει να έχει το δικό του υποσύστημα ηλεκτροδίων γείωσης (γείωση δακτυλίου). Θα πρέπει επίσης να έχει ένα υποσύστημα αντικεραυνικής προστασίας, που να πληροί τις απαιτήσεις των στρατιωτικών προτύπων (π.χ MIL-HDBK-419), όταν το καταφύγιο βρίσκεται έξω από τον κώνο της προστασίας ενός υψηλότερου γειωμένου πύργου. Το περίβλημα των μεταλλικά προκατασκευασμένων καταφυγίων, θα πρέπει να κατασκευάζεται για να είναι ηλεκτρικά συνεχές και πρέπει να γειώνεται στο υποσύστημα του ηλεκτροδίου γείωσης για να διοχετεύσει τα στατικά φορτία και να μειώσει τα αποτελέσματα των παρεμβολών σε εξοπλισμό και κυκλώματα. Εάν η επίστρωση είναι μεταλλική και ηλεκτρικά συνεχής, τότε αυτή η επίστρωση ενός σταθερού προκατασκευασμένου καταφυγίου μπορεί να χρησιμεύσει ως ισοδυναμικό επίπεδο. Εάν η επίστρωση δεν είναι μεταλλική ή ηλεκτρικά συνεχής, θα απαιτηθεί ξεχωριστή ισοδυναμική επιφάνεια. Στα συστήματα εκτόξευσης των διαστημικών οχημάτων και στις εγκαταστάσεις, το όχημα εκτόξευσης πρέπει να είναι γειωμένο στο χώρο εκτόξευσης. Είναι σημαντικό ότι οι βρόγχοι γείωσης πρέπει να ελέγχονται για ηλεκτρικές διεπαφές μεταξύ των οχημάτων εκτόξευσης και των διαστημικών οχημάτων, για την αποφυγή προβλημάτων.

Η ανάφλεξη πυρομαχικών και ατμών του καυσίμου, καθώς και ζημιές σε ηλεκτρονικά στοιχεία, έλαβαν χώρα από στατικές εκκενώσεις.

5.3.12.2 Διακρίβωση

Για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια, η σωστή χρήση και η εγκατάσταση των εξωτερικών γειώσεων πρέπει να ελεγχθεί το σύστημα. Η επιθεώρηση είναι κατάλληλη για τη διακρίβωση ότι έχουν υλοποιηθεί οι διατάξεις για την εξωτερική γείωση. Οι πρακτικές εγκατάστασης θα πρέπει να επανεξεταστούν για να διασφαλιστεί ότι συμπεριλαμβάνεται η προστασία από τη διάβρωση.

5.3.12.3 Υποδοχές Γείωσης Αεροσκαφών

Οι υποδοχές γείωσης πρέπει να συνδέονται με το σύστημα, για να επιτρέπουν τη σύνδεση των καλωδίων γείωσης για ανεφοδιασμό, διαχείριση αποθεμάτων, συντήρηση, εργασίες συντήρησης και ανάγκες στάθμευσης. Ο ISO 46 [58] περιέχει τις απαιτήσεις για τη συμβατότητα της διεπαφής. Οι υποδοχές γείωσης πρέπει να συνδέονται με το σύστημα αναφοράς στο έδαφος, έτσι ώστε η αντίσταση μεταξύ του βύσματος ζευγαρώματος (mating plug) και του συστήματος αναφοράς στο έδαφος, να μην υπερβαίνει το 1,0 ohm DC. Οι παρακάτω ακροδέκτες γείωσης απαιτούνται:

α. Ακροφύσιο (nozzle) γείωσης καυσίμου. Ένα βύσμα γείωσης πρέπει να εγκατασταθεί σε κάθε είσοδο καυσίμου. Για να πληρούνται οι διεθνείς συμφωνίες για τη διασύνδεση με τον εξοπλισμό ανεφοδιασμού, η υποδοχή θα είναι εντός 1,0 μέτρου από το κέντρο της εισόδου του καυσίμου, για τη γείωση του ακροφυσίου καυσίμου.

β. Γειώσεις τεχνικής εξυπηρέτησης. Υποδοχές γείωσης πρέπει να εγκαθίστανται σε θέσεις κατάλληλες για τη συντήρηση και επισκευή.

γ. Γειώσεις όπλων. Υποδοχές γείωσης πρέπει να εγκαθίστανται σε θέσεις κατάλληλες για χρήση σε χειρισμό των όπλων ή άλλων εκρηκτικών μηχανισμών.

Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή και επιθεωρήσεις.

5.3.12.3.1 Απαίτηση

Η γείωση μεταξύ αεροχημάτων και εξοπλισμού συντήρησης είναι απαραίτητη για την αποφυγή κινδύνων ασφαλείας από τα ηλεκτροστατικά φαινόμενα φόρτισης. Οι διατάξεις γείωσης παρέχουν διαδρομές για την εξισορρόπηση των δυναμικών τάσης μεταξύ των διαφόρων σημείων. Οι υποδοχές γείωσης πρέπει να βρίσκονται σε ικανοποιητικό αριθμό θέσεων, για να παρέχεται ευκολία συντήρησης και να συμμορφώνονται με τις διεθνείς συμφωνίες.

Είναι καλά τεκμηριωμένο ότι οι σπινθήρες που οφείλονται σε διαφορές δυναμικού μεταξύ αεροσκαφών και εξοπλισμού συντήρησης μπορεί να είναι ικανές για να προκαλέσουν ανάφλεξη. Η κίνηση του καυσίμου κατά τις εργασίες ανεφοδιασμού έχει μεγάλη συμβολή στην στατική φόρτιση. Υπάρχει επίσης ανησυχία για την πρόληψη

των ηλεκτροστατικών εκκενώσεων κατά το χειρισμό των πυρομαχικών. Οι ηλεκτρικά εκκινούμενες συσκευές (EID's), που χρησιμοποιούνται σε πυρομαχικά είναι δυνητικά επιρρεπείς σε ακούσια ανάφλεξη από στατική εκφόρτιση.

Η ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ του ακροδέκτη γείωσης και της δομής του οχήματος πρέπει να ελέγχεται για να διασφαλιστεί ότι η σύνδεση είναι επαρκής για την απαγωγή του στατικού φορτίου.

Οι σχετικά κακής ποιότητας ηλεκτρικές συνδέσεις (πολύ μεγαλύτερες από το καθορισμένο ένα ohm) είναι επαρκείς για να απάγουν το στατικό φορτίο. Ωστόσο, θα πρέπει να επιβληθούν έλεγχοι, οι οποίοι θα υποδεικνύουν ότι υπάρχει μια λογική σύνδεση μετάλλου με μέταλλο. Η χρήση τιμών μεγαλύτερων από 1,0 ohm θα μπορούσε να οδηγήσει αμφισβητήσιμες ή ασταθείς συνδέσεις να θεωρούνται επαρκείς.

Η τεχνική οδηγία 00-25-172 της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ [59], προβλέπει απαιτήσεις για τη γείωση των αεροσκαφών της κατά τη διάρκεια της συντήρησης. Το στρατιωτικό πρότυπο MIL-HDBK-274 [60] του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ, παρέχει πληροφορίες για επιχειρήσεις ναυτικών αεροσκαφών και συντήρησης από προσωπικό για να εξασφαλίσει ότι τα αεροσκάφη είναι σωστά γειωμένα για την ασφάλεια από στατικά φορτία και την ισχύ.

Η σύνδεση μεταξύ του εξοπλισμού συντήρησης του και του αεροπλάνου παρουσία δυνητικά επικίνδυνων υλικών, είναι αναγκαία για την πρόληψη πιθανών προβλημάτων που οφείλονται σε ηλεκτροστατικές εκκενώσεις μεταξύ του υλικού του εξοπλισμού συντήρησης και της δομής του αεροσκάφους.

Διεθνείς συμφωνίες απαιτούν κοινές διεπαφές για τη στατική γείωση των αεροσκαφών. Ο ISO 46 [58] παρέχει η φυσική περιγραφή των διατάξεων υποδοχών της γείωσης, για να εξασφαλιστεί η συμβατότητα των διεπαφών. Το στρατιωτικό πρότυπο MIL-DTL-83413 [61] του Υπουργείου Αμύνης των ΗΠΑ, καθορίζει τα υλικά για τη στατική γείωση των αεροσκαφών.

Οι πυρκαγιές των καυσίμων των αεροσκαφών έχουν αποδοθεί σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Η απόδειξη του γεγονότος ότι η ηλεκτροστατική εκκένωση προκάλεσε ένα ατύχημα, συνήθως δεν είναι δυνατή, λόγω της δυσκολίας στην αναπαραγωγή των συνθηκών που είχαν εμφανισθεί.

Οι υποδοχές γείωσης επί αεροσκαφών στο πεδίο, έχουν βρεθεί να είναι ηλεκτρικώς ανοικτού κυκλώματος σε σχέση με τη δομή του αεροσκάφους, που οφείλεται σε διάβρωση. Είναι σημαντικό ότι τα μέτρα ελέγχου της διάβρωσης, πρέπει να εφαρμοστούν κατά τη στιγμή της εγκατάστασης.

5.3.12.3.2 Διακρίβωση

Για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια, πρέπει να διακριβώνεται η συμμόρφωση με τις διατάξεις για τις υποδοχές γείωσης.

Η τοποθέτηση των υποδοχών μπορεί να διακριβώνεται με δοκιμή των απαιτούμενων αποστάσεων και την επιθεώρηση. Η κατάλληλη αντίσταση σύνδεσης μπορεί να ελεγχθεί με δοκιμή με ένα ωμόμετρο.

Η διαθεσιμότητα των υποδοχών γείωσης σε σύγχρονα αεροσκάφη έχει ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα μιας έκρηξης κατά την τροφοδοσία καυσίμου και το χειρισμό πυρομαχικών.

Η κατάλληλη επεξεργασία των επιφανειών πρέπει να επανεξετασθεί για να καθορισθεί εάν τα μέτρα που εφαρμόστηκαν αντιμετωπίζουν με επιτυχία όλα τα θέματα του κύκλου ζωής, προκειμένου η διάβρωση να μην υποβαθμίσει την ηλεκτρική σύνδεση των υποδοχών με την πάροδο του χρόνου.

5.3.12.4 Εξοπλισμός Συντήρησης και Επισκευής Γειώσεων

Ο εξοπλισμός συντήρησης και επισκευής, πρέπει να έχει ένα μόνιμα συνδεδεμένο καλώδιο γείωσης κατάλληλο για σύνδεση με το έδαφος. Όλος ο εξοπλισμός συντήρησης που χειρίζεται και επεξεργάζεται εύφλεκτα καύσιμα, υγρά, εκρηκτικά, οξυγόνο ή άλλα δυνητικά επικίνδυνα υλικά, πρέπει να έχει ένα μόνιμα συνδεδεμένο καλώδιο γείωσης, για τη σύνδεση του με το σύστημα. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με την επιθεώρηση.

5.3.12.4.1 Απαίτηση

Οι διατάξεις γείωσης απαιτούνται για την αποφυγή ηλεκτροπληξίας από το προσωπικό και δυνητικών ηλεκτρικών τόξων, με την παρουσία των επικίνδυνων υλικών. Συνθήκες ηλεκτρικού σφάλματος στο εσωτερικό του εξοπλισμού συντήρησης και επισκευής μπορεί να προκαλέσουν την εμφάνιση επικίνδυνων τάσεων στη δομή του εξοπλισμού. Ο αγωγός γείωσης για τη σύνδεση με τη γη είναι απαραίτητος, για να επιτραπεί η ροή των ρευμάτων σφάλματος και για την ενεργοποίηση των συσκευών προστασίας του κυκλώματος, εξαλείφοντας έτσι την επικίνδυνη τάση. Αν μια γείωση παρουσιάζεται πάντα μέσω του καλωδίου ρεύματος (power cord) στον εξοπλισμό, τότε ιδιαίτερη διάταξη γείωσης δεν είναι απαραίτητη. Ο αγωγός γείωσης για τη σύνδεση με το σύστημα, εμποδίζει τις διαφορές τάσεως να αναπτύξουν επιδράσεις λόγω της στατικής φόρτισης, η οποία μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρικό τόξο και δυνητικά ανάφλεξη των εύφλεκτων ατμών. Εάν η σύνδεση της συντήρησης έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μία ηλεκτρικά αγωγή διαδρομή μεταξύ του συστήματος και του εξοπλισμού συντήρησης, τότε δεν είναι απαραίτητος ξεχωριστός αγωγός γείωσης.

5.3.12.4.2 Διακρίβωση

Η εφαρμογή της γείωσης θα πρέπει να διακριβωθεί. Η επιθεώρηση του υλικού ή των σχεδίων είναι επαρκής για να εξασφαλίσει ότι περιλαμβάνονται οι κατάλληλες διατάξεις γείωσης.

5.3.13 TEMPEST

Οι πληροφορίες εθνικής ασφαλείας δεν πρέπει να εκτίθενται σε κίνδυνο μέσω εκπομπών, από εξοπλισμό επεξεργασίας διαβαθμισμένων πληροφοριών. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση, επιθεωρήσεις ή ένα συνδυασμό αυτών. Τα θεσμικά κείμενα των ΗΠΑ NSTISSAM TEMPEST/1-92 [62] της Εθνικής Υπηρεσίας Πληροφοριών των ΗΠΑ (NSA) και το Μνημόνιο Συμβουλευτικής TEMPEST 01-02 [63] από την Επιτροπή των Εθνικών Συστημάτων Ασφαλείας (CNSS), παρέχουν τη μεθοδολογία δοκιμών για την επαλήθευση της συμμόρφωσης με τις TEMPEST απαιτήσεις.

5.3.13.1 Απαίτηση

Οι αποκαλυπτικές εκπομπές (compromising emanations) είναι ακούσια σήματα που φέρουν πληροφορίες, οι οποίες αν υποκλαπούν και αναλυθούν, θα αποκαλύψουν πληροφορίες εθνικής ασφάλειας, που μεταδίδονται, λαμβάνονται, διακινούνται ή με άλλο τρόπο επεξεργάζονται από κάθε διαβαθμισμένο σύστημα επεξεργασίας πληροφοριών. Η απαίτηση για TEMPEST βρίσκεται στο DoDD C-5200.19 [64] (διαβαθμισμένο). Για τα αεροσκάφη της Πολεμικής Αεροπορίας, η απαίτηση αυτή γενικά εφαρμόζεται μόνο στο υποσύστημα επικοινωνιών.

Οι βασικές απαιτήσεις περιέχονται σε διάφορα θεσμικά κείμενα των υπηρεσιών Ασφαλείας των ΗΠΑ, όπως τα NSTISSAM TEMPEST/1-92 [62], στο NSTISSAM TEMPEST/1-93 [65], στο NSTISSAM TEMPEST/2-95 [66], στο CNNS Συμβουλευτικό Μνημόνιο TEMPEST 01-02 [63] και την έκδοση του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ IA PUB-5239-31 [67].

Η ανάγκη να εφαρμοστούν οι απαιτήσεις TEMPEST, καθορίζεται από την πιστοποιημένη TEMPEST τεχνική αρχή (CTTA). Η CTTA λαμβάνει υπόψη αρκετούς παράγοντες τρωτότητας και απειλής για τον προσδιορισμό του υπολειπόμενου κινδύνου στον οποίο η πληροφορία εκτίθεται. Η CTTA καθορίζει στη συνέχεια εάν απαιτούνται αντίμετρα για τη μείωση του κινδύνου σε ένα αποδεκτό επίπεδο και προσδιορίζει την πιο αποδοτική οικονομικά προσέγγιση για την επίτευξη των επιβαλλόμενων απαιτήσεων TEMPEST.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα όρια που περιλαμβάνονται στο φυλλάδιο RE102 (radiated emissions, electric field, 10 KHz to 18 GHz) του στρατιωτικού προτύπου MIL-STD-461F [11] του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ, θεωρούνται ένα αποδεκτό επίπεδο κινδύνου για τον έλεγχο TEMPEST των ακούσιων εκπομπών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Οι επιπλέον περιπτώσεις TEMPEST, σύμφωνα με την αντίστοιχη Εθνική Αρχή των ΗΠΑ ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- α. Σε περιπτώσεις όπου ανεπαρκείς απαιτήσεις επιβάλλονται στο σύστημα.

β. Σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις ήταν κατάλληλες, αλλά η εφαρμογή ή διαδικαστικά λάθη οδήγησαν δυνητικά σε αποκαλυπτικές εκπομπές.

γ. Σε περιπτώσεις όπου αδικαιολόγητα σκληρές απαιτήσεις επιβλήθηκαν στο σύστημα με αποτέλεσμα να είναι αμφισβητήσιμες οι δαπάνες των κονδυλίων του προγράμματος. Η πρώτη και τελευταία κατηγορία έχουν κριθεί ότι είναι εξίσου ακατάλληλες. Η δεύτερη πρέπει να θεωρηθεί ως κινήσεις κόστους και κινδύνου για το πρόγραμμα. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα τρία ζητήματα, θα πρέπει να υπάρχουν πιστοποιημένες Αρχές (όπως η CTTA στις ΗΠΑ), για να εξασφαλίζουν μία ισορροπία κινδύνων και κόστους μέσω της εφαρμογής της διαδικασίας διαχείρισης κινδύνων.

5.3.13.2 Διακρίβωση

Καλές πρακτικές σχεδιασμού EMC μπορεί να μειώσουν σημαντικά, αλλά όχι να εξαλείψουν εντελώς, τον κίνδυνο αποκάλυψης των πληροφοριών εθνικής ασφάλειας. Ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο αυτά τα συστήματα θα λειτουργούν, ο κίνδυνος αυτός μπορεί να είναι μη αποδεκτός. Η εκάστοτε τεχνική επιτροπή για θέματα TEMPEST (CTTA) πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον κίνδυνο (όπως η τοποθεσία, το επίπεδο που υποβάλλονται σε επεξεργασία, ο όγκος υπό επεξεργασία κτλ) και να σταθμίζει έναντι του κόστους πριν από την αποδοχή της συμμόρφωσης TEMPEST με ανάλυση ή επιθεώρηση.

Λόγω της φύσης των δοκιμών TEMPEST, τα διδάγματα ταξινομούνται συχνά. Ενώ τα περισσότερα προγράμματα λαμβάνουν το TEMPEST υπόψη, κατά τη φάση του σχεδιασμού, εξακολουθεί να εντοπίζεται ένας μεγάλος αριθμός ασυμφωνιών. Χρησιμοποιώντας αυστηρά την ανάλυση για τη διακρίβωση της απόδοσης του συστήματος μπορεί να είναι εγγενώς επικίνδυνο. Όταν οι δοκιμές πιστοποίησης έχουν εφαρμοσθεί σε συστήματα, οι δοκιμές αυτές έχουν μερικές φορές αποκαλύψει ότι ένα σύστημα δεν πληροί τις ισχύουσες προδιαγραφές. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η CTTA του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ, δύναται εξετάσει τη δυνατότητα ανάλυσης ή δοκιμής πιστοποίησης ως συνδυασμό (trade-off), για την πιθανή εξοικονόμηση κόστους σε σχέση με τον κίνδυνο που συνδέεται με ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα.

5.3.14 Εκπεμπόμενες Ακτινοβολίες Συστήματος

Το σύστημα πρέπει να ελέγχει τα εκπεμπόμενα πεδία που είναι απαραίτητα για να λειτουργεί με τα άλλα συστήματα που συστεγάζονται με αυτό και να περιορίσει την ικανότητα της απειλής για την ανίχνευση και την παρακολούθηση του συστήματος ανάλογα με τις λειτουργικές απαιτήσεις του.

5.3.14.1 Έλεγχος Εκπομπών (EMCON)

Όταν επιβάλλονται τακτικές συνθήκες EMCON, σε ναυτικά σκάφη επιφανείας, υποβρύχια και αερομεταφερόμενα συστήματα, οι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές που

ακτινοβολούνται δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα -110 dBm/m^2 ($5,8 \text{ dB}\mu\text{V/m}$) σε ένα ναυτικό μίλι ή -105 dBm/m^2 ($10,8 \text{ dB}\mu\text{V/m}$) σε ένα χιλιόμετρο σε κάθε κατεύθυνση από το σύστημα, πάνω σε ένα εύρος συχνοτήτων από 500 kHz έως 40 GHz, κατά τη χρήση της ανάλυσης του εύρους ζωνών, που αναφέρονται στον Πίνακα 5-23. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή και επιθεώρηση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-24: Εύρη Ζωνών EMCON

Εύρος συχνοτήτων (MHz)	6 dB Εύρος ζώνης (kHz)
0.5 - 1	1
1 - 30	10
30 - 1000	30
1000 - 40000	100

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

1. Το βίντεο φιλτραρίσματος δεν θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να περιορίσει το εύρος ζώνης της απόκρισης του δέκτη.
2. Μεγαλύτερο εύρος ζώνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αλλά δεν υπάρχουν συντελεστές διόρθωσης που να είναι επιτρεπτοί.

5.3.14.1.1 Απαίτηση

Ο EMCON παρέχει γενικά την προστασία από ανίχνευση εχθρικών δυνάμεων που μπορεί να παρακολουθούν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα για οποιοσδήποτε εκπομπές που καταδεικνύουν την παρουσία και λειτουργία στρατιωτικών ηλεκτρονικών συστημάτων. Αυτές οι «ακούσιες» εκπομπές μπορεί να προέρχονται από παρασιτικά σήματα, όπως οι τοπικοί ταλαντωτές, να παρουσιάζονται σε κεραιές ή να είναι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές παρεμβολών από την καλωδίωση της πλατφόρμας που προκαλούνται από αντικείμενα, όπως μικροεπεξεργαστές.

Οι λειτουργίες στα πλοία του Ναυτικού συχνά διεξάγονται σε σιγή ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών, η οποία είναι η πιο αυστηρή κατάσταση EMCON. Άλλα συστήματα που βρίσκονται επί του πλοίου (όπως αεροσκάφη, ελκυστήρες ρυμούλκησης, ραντάρ ελέγχου πυρός και τα συστήματα επικοινωνίας των πλοίων), δεν επιτρέπεται να εκπέμπουν σε ασυρμάτους, ραντάρ και εξοπλισμό πλοήγησης πάνω στην περιοχή συχνοτήτων των 500 kHz έως 40 GHz. Η ενέργεια αυτή έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται τα συστήματα που αναπτύσσονται επί των πλοίων, να είναι σε θέση να ελέγχουν τις εκπομπές από τους εν πλω ενεργούς πομπούς, μέσω ταχέως μεταβαλλόμενου τύπου λειτουργίας, για να λάμβάνουν, να είναι σε κατάσταση

αναμονής ή να απενεργοποιηθούν και να ελέγχουν όλες τις άλλες ακούσιες εκπομπές, προκειμένου να είναι μη ανιχνεύσιμες.

Όταν τα αεροσκάφη απογειώνονται από τα πλοία, ο EMCON χρησιμοποιείται συχνά για να αποφευχθεί ο εντοπισμός του αεροσκάφους. Η Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ θεωρεί τον EMCON, ότι είναι μία πτυχή της βελτίωσης των ιδιοτήτων της πλατφόρμας που αφορούν το «χαμηλό βαθμό παρατηρησιμότητας (low observable)».

Η υψηλότερη κατάσταση της EMCON, που χρησιμοποιείται στο κατάστρωμα των πλοίων του Πολεμικού Ναυτικού είναι η πλήρης σιγή RF. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες καταστάσεις EMCON. Με βάση τη δραστηριότητα των πιθανών απειλών και των επιχειρησιακών αναγκών για την ασφάλεια και την προστασία, κανονικές ενεργές εκπομπές επιτρέπονται για επιλεγμένες περιοχές συχνοτήτων. Για παράδειγμα, εάν επιτρέπονται κανονικές επικοινωνίες UHF, τότε θα μπορούσε αυτή η κατάσταση να ονομάζεται EMCON Άλφα. Περαιτέρω καταστάσεις καθορίζονται ανάλογα με ποιιοπομποί (εύρος συχνοτήτων) επιτρέπεται να είναι ενεργοί. Συνήθως, τα συστήματα που αναφέρονται στην παρούσα εργασία θα είναι όλα στη λειτουργία EMCON χωρίς υποκαταστάσεις. Μερικά υποσυστήματα είναι συνήθως σε μία λειτουργία μη-εκπομπής και δεν ελέγχονται από τη λειτουργία EMCON. Ένα σύστημα, όπως οι UHF επικοινωνίες είναι πάντα στην κατάσταση λήψης, εκτός εάν ο χειριστής πατήσει την μικροτηλεφωνική συσκευή (κομβίο push-to-talk). Ως εκ τούτου, είναι ήδη σε μία λειτουργία μη-εκπομπής και αν ο EMCON Άλφα είχε εγκριθεί, ο σταθμός ασυρμάτου θα μπορούσε να εκπέμψει χωρίς απενεργοποίηση της λειτουργίας EMCON. Είναι σημαντικό να σημειωθεί η ανάγκη για πλήρη ηλεκτρομαγνητική σιγή από όλες τις πτυχές του συστήματος. Δεν επιτρέπονται καθόλου εκπομπές με υπέρβαση του καθορισμένου επιπέδου από κεραιές συνδεδεμένες με πηγές ή από ακούσιες πηγές, όπως τα καλώδια και ο εξοπλισμός.

Το Πολεμικό Ναυτικό γενικά, βιώνει μία σημαντική αύξηση στον αριθμό και το είδος των ασύρματων τεχνολογιών που εγκαθίστανται σε πλοία, υποβρύχια και αεροσκάφη. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτές οι τεχνολογίες είναι εμπορικός εξοπλισμός που δύναται να αξιοποιηθεί από τις στρατιωτικές υπηρεσίες(COTS) και οι οποίες χρησιμοποιούνται στο εσωτερικό των διαμερισμάτων και τα πληρώματα συνήθως θέλουν να χρησιμοποιήσουν τις ασύρματες τεχνολογίες, ακόμη και κατά τη διάρκεια συνθηκών σιγής ασυρμάτου. Οι μετρήσεις EMCON σε επίπεδο πλατφόρμας μέχρι σήμερα σε πλοία του Ναυτικού, καταδεικνύουν ότι το όριο EMCON μπορεί να ξεπεραστεί με σημαντικό περιθώριο, ανάλογα με τη θέση του ασύρματου εξοπλισμού εντός πλατφόρμας και άλλους παράγοντες, όπως το αν οι θύρες ή οι καταπακτές είναι ανοικτές ή κλειστές. Συνιστάται ότι εάν το όριο EMCON που οφείλεται στη COTS ασύρματη τεχνολογία, χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα υπέρβασης του ορίου EMCON, ο διαχειριστής του προγράμματος θα πρέπει να εξασφαλίσει ότι η αξιολόγηση της ευαισθησίας γίνεται για τον προσδιορισμό του κινδύνου για την πλατφόρμα και να λάβει τα κατάλληλα μέτρα για τον μετριασμό του κινδύνου. Αναμένεται ότι αυτή η εκτίμηση, κατ' ελάχιστο, θα λάβει υπόψη τη γεωγραφική

περιοχή λειτουργίας (π.χ. κοντά στις ακτές μιας μητροπολιτικής περιοχής, σε μια προβλήτα στο λιμάνι ή στην ανοικτή θάλασσα μακριά από τη θαλάσσια κυκλοφορία) και τα συναφή ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα.

Η σιγή ασυρμάτου, που σήμερα ονομάζεται EMCN, χρησιμοποιήθηκε πολύ αποτελεσματικά κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, για να κρύψει τη θέση των πλοίων του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ, από τους Ιάπωνες. Ο EMCN χρησιμοποιήθηκε από τις ναυτικές δυνάμεις των ΗΠΑ στον Πόλεμο του Βιετνάμ και στον Πόλεμο της Κορέας, για την ανάπτυξη των αεροσκαφών πάνω από το εμπρόσθιο άκρο της περιοχής μάχης. Αυτές οι τακτικές συνεχίζουν και σήμερα στις σύγχρονες δυνάμεις του Πολεμικού Ναυτικού. Οι εκπομπές του τοπικού ταλαντωτή πρέπει να ελέγχονται, προκειμένου ένα σύστημα να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις EMCN.

5.3.14.1.2 Διακρίβωση

Σχεδόν όλα τα συστήματα έχουν μια ποικιλία ανοιγμάτων (ακτινοβολιών) που είναι πηγές ακούσιας ακτινοβολίας. Δεδομένου ότι πολλά από αυτά τα ανοίγματα (ακτινοβολίες) είναι ακούσια, είναι δυνατόν να βρεθούν με δοκιμή μόνο μερικές εκπομπές. Η ανάλυση δεν είναι αξιόπιστη.

Η μέτρηση του επιπέδου EMCN διεξάγεται κανονικά σε ανηχοϊκό θάλαμο σε μία απόσταση εγγύς του συστήματος, όπου κανονικός εργαστηριακός εξοπλισμός, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανιχνεύσει τις εκπομπές. Μετά από αρκετά χρόνια δοκιμών EMCN από την κοινότητα Ναυτικής Αεροπορίας των ΗΠΑ, η απόσταση που χρησιμοποιείται συνήθως, είναι τα 10 μέτρα από το σύστημα. Σε αυτή την απόσταση οι μετρούμενες τιμές σχετίζονται με το όριο EMCN, μέσω του νόμου του αντιστρόφου τετραγώνου της EM διάδοσης. Η ακόλουθη εξίσωση χρησιμοποιείται:

$$P_d = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} \quad (\text{Εξ. 5.13})$$

Όπου:

P_d = πυκνότητα ισχύος (*watts/μέτρα²*)

P_t = εκπεμπόμενη ισχύς (*watts*)

G_t = κέρδος εκπομπής της κεραίας

r = η ακτίνα από το αεροσκάφος (μέτρα)

Δεδομένου ότι η πυκνότητα ισχύος είναι ανάλογη προς $1/r^2$ με άλλες παραμέτρους να παραμένουν σταθερές, το όριο στα 10 μέτρα σε υποτιθέμενες συνθήκες μακρινού πεδίου, οι οποίες διατηρούνται, υπολογίζεται ως εξής:

Όριο = $-110 \text{ dBm/m}^2 + 20 \log (1852 \text{ μέτρα ανά ναυτικό μίλι}/10 \text{ μέτρα}) = -64.6 \text{ dBm/m}^2$
(Εξ. 5.14)

Οι μετρήσεις EMCON πραγματοποιούνται σε 4 θέσεις γύρω από το σύστημα, συνήθως στις 45, 135, 225 και 315 μοίρες από το μέτωπο. Οι επιπλέον θέσεις προστίθενται πάνω, κάτω και γύρω από το σύστημα, που βασίζονται στις θέσεις κεραιών και στα ανοίγματα (ακτινοβολίες). Ο εξοπλισμός μέτρησης που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της εκπομπής, είναι ένας αναλυτής φάσματος ενισχυόμενος (augmented) με έναν προενισχυτή ή δέκτη EMI με ένα ποσοστό θορύβου που μπορεί να έχει 6 dB ή μεγαλύτερο περιθώριο μεταξύ του χαμηλότερου επιπέδου θορύβου και του προερχόμενου από το EMCON όριο. Δεν γίνεται διάκριση ανάμεσα σε στενά ή ευρυζωνικά σήματα. Η περίοδος φωτισμού της δέσμης ακτινοβολίας (dwell time) του δέκτη, πρέπει να είναι επαρκής για να συλλάβει την μέγιστη τιμή (κορυφής) των σημάτων των οποίων το επίπεδο μεταβάλλεται με το χρόνο. Σε κάθε θέση, μια μέτρηση της περιρρέουσας κατάστασης που διεξάγεται με όλο τον εξοπλισμό και με το σύστημα απενεργοποιημένο, ακολουθείται αμέσως μετά από μια μέτρηση EMCON του συστήματος. Οι δύο μετρήσεις συγκρίνονται με την απομάκρυνση των κοινών εκπομπών και στις δύο. Οι εκπομπές που παραμένουν στην μέτρηση εκπομπών αξιολογούνται, εφόσον υπερβαίνουν το επίπεδο που παράγεται από τον EMCON. Οι εκπομπές που υπερβαίνουν το επίπεδο, υποβάλλονται σε περαιτέρω δοκιμές και αναλύσεις για να προσδιοριστεί η συμμόρφωση. Θέματα όπως οι επιδράσεις του κοντινού πεδίου και οι ανακλάσεις του εδάφους, πρέπει να εξεταστούν. Σε συστήματα που έχουν επιπλέον δυνατότητες, η μέτρηση της περιρρέουσας κατάστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση των ενεργών εκπομπών του συστήματος και η μέτρηση EMCON στη συνέχεια, ανιχνεύει την νέα δυνατότητα σε λειτουργία EMCON. Οι προϋπάρχουσες εκπομπές από το ώριμο σύστημα θα απομακρυνθούν από την αξιολόγηση.

Η ανάπτυξη της δραστηριότητας μπορεί να αποδείξει μέσω της ανάλυσης των κατά προσέγγιση μετρήσεων, ότι το σύστημα δεν ακτινοβολεί πάνω από το όριο EMCON. Το κατά προσέγγιση όριο του MIL-STD-461F [11] (για τα «εξωτερικά» σημεία των αεροσκαφών σταθερής πτέρυγας και εφαρμογές ελικοπτέρων) είναι μικρότερο από το όριο EMCON σε όλες τις συχνότητες. Για παράδειγμα, η μέγιστη τιμή της δοκιμής RE102 (radiated emissions, electric field, 10 KHz to 18 GHz), 69 dBμV/m εμφανίζεται σε 18 GHz και είναι 2 dB κάτω από το EMCON όριο. Συνάγοντας 69 dBμV/m σε 1 ναυτικό μίλι (1852 μέτρα), υποθέτοντας συνθήκες μακρινού πεδίου και χρησιμοποιώντας τη σχέση ότι $P_d = E^2/377$ (όπου P_d είναι η πυκνότητα ισχύος και E είναι η ένταση του πεδίου), έχουμε:

$$69 \text{ dB}\mu\text{V/m} - 116 \text{ (dBm/ m}^2\text{)/(dB}\mu\text{V/m)} - 20 \log (1852 \text{ μέτρα/1 μέτρο)} = -112 \text{ dBm/m}^2$$

(Εξ. 5.15)

Δεδομένου ότι αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί μετρήσεις κοντινού πεδίου για τον καθορισμό των τιμών του μακρινού πεδίου, υπάρχει κάποια αβεβαιότητα σχετικά με τα πραγματικά επίπεδα του μακρινού πεδίου. Τα επίπεδα του μακρινού πεδίου θα τείνουν να είναι υψηλότερα από αυτά που προβλέπονται. Ωστόσο, το παράδειγμα χρησιμοποιεί ένα σημείο της χειρότερης περίπτωσης για την καμπύλη (curve) της

δοκιμής RE102 και η τεχνική θεωρείται έγκυρη για τους σκοπούς της απαίτησης EMCON.

Για τον εξοπλισμό που απαιτείται για να πληροί τα όρια των ακτινοβολούμενων εκπομπών του MIL-STD-461F [11], υπάρχει η διασφάλιση ότι το συνολικό σύστημα θα συμμορφωθεί με την απαίτηση EMCON για τυχόν συμβολή (contributions) εκπομπών από αυτόν τον εξοπλισμό στις περισσότερες συχνότητες ενδιαφέροντος. Όταν επιβάλλονται άλλα πρότυπα EMI, η ανάλυση είναι απαραίτητη για να καθοριστεί εάν οι απαιτήσεις είναι επαρκείς για EMCON, στο επίπεδο συστήματος. Υποσυστήματα των πλοίων του Πολεμικού Ναυτικού, έχουν συνήθως μία κατάσταση αναμονής (μέσω επιλογής διακόπτη) για την ενεργοποίηση των υποσυστημάτων χωρίς σκόπιμη μετάδοση.

5.3.14.2 EMC Διασυστήματος

Οι ακούσιες ακτινοβολούμενες εκπομπές από όλα τα τακτικά οχήματα εδάφους του στρατού, θα πρέπει να ελέγχονται, έτσι ώστε οι κεραιές των δεκτών, να είναι τοποθετημένες πλησίον σε κέντρα τακτικών επιχειρήσεων (TOCs), σε φάλαγγες οχημάτων και άλλα συστήματα που πληρούν τις λειτουργικές απαιτήσεις απόδοσής τους. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή και ανάλυση.

5.3.14.2.1 Απαίτηση

Στο σύγχρονο κεντρικό πεδίο μάχης, αναπτύσσονται συστήματα με πακέτα διαφορετικού εξοπλισμού αποστολής (MEPs). Αυτά τα πακέτα έχουν διαφορές στον εξοπλισμό που περιλαμβάνει διαφορετικά πακέτα επικοινωνίας πέρα και πάνω από τα πρότυπα των VHF και UHF πομποδεκτών, δεκτών GPS και μη επικοινωνιακών συστημάτων λήψης. Ως εκ τούτου, το πρότυπο του ενδοσυστήματος EMC αντιμετωπίζει μόνο τον εξοπλισμό και τα υποσυστήματα που σχετίζονται με το υπό εξέταση σύστημα και δεν αντιμετωπίζει τις αλληλεπιδράσεις με άλλα συνεγκατεστημένα συστήματα λήψης σε μια ξεχωριστή σκηνή, σε κτίριο, σε ένα όχημα ή καταφύγιο. Παραδείγματα είναι, όταν η παρεμβολή του διασυστήματος, εμφανίζεται μέσα σε μία φάλαγγα οχημάτων ή όταν ένα όχημα πραγματοποιεί ελιγμούς ή σταθμεύει γύρω από τις σκηνές, τα κτίρια, ή τα καταφύγια. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα οχήματα μπορεί να έχουν συνεγκατεστημένα (collocated) συστήματα (συνδεδεμένα με κεραιές) με διαφορετικά πακέτα (MEP's). Ένα σύστημα μπορεί να εμφανίσει χαρακτηριστικά ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (EMR) που παρεμβάλλεται με τη βέλτιστη λειτουργία των άλλων συνεγκατεστημένων συστημάτων.

Οι επικοινωνίες περιλαμβάνουν συστήματα κεραιών, που εγκαθίστανται σε καταφύγια ή οχήματα, για την υποστήριξη της αποστολής. Μερικά από αυτά τα καταφύγια/οχήματα είναι πολύ κοντά μέχρι και στο ένα μέτρο. Στα στοιχεία ελιγμού, τα οχήματα μάχης με διάφορα MEPs, ομαδοποιούνται για να σχηματίσουν ένα προωθημένο κέντρο επιχειρήσεων (TOC) ή σταθμό διοικήσεως. Τα στοιχεία αυτά έχουν την τάση να διατηρούν τον εξοπλισμό στο όχημα/καταφύγιο έτσι ώστε να

δύνανται να μετακινηθούν γρήγορα στην επόμενη θέση ή να εξέλθουν από έναν επικίνδυνο δρόμο. Επιπρόσθετος προβληματισμός είναι ο εξοπλισμός και τα υποσυστήματα που προστίθενται στο πεδίο με βάση τις απαιτήσεις της αποστολής. Αυτά τα υποσυστήματα περιλαμβάνουν εξειδικευμένο εξοπλισμό ανίχνευσης ή αναβαθμισμένες επικοινωνίες.

Τα επιχειρησιακά σενάρια και προφίλ της αποστολής πρέπει να εξεταστούν, για να καθορισθεί η πιθανότητα των οχημάτων μάχης (επίγεια) να εμπíπτουν σε μια κατηγορία που θα μπορούσε να εγκατασταθεί πλησίον άλλων συστημάτων που χρησιμοποιούν δέκτες με συνδεδεμένες κεραίες.

Πολλά θέματα έχουν προκύψει κατά τη διάρκεια των προσπαθειών για την ψηφιοποίηση του πεδίου μάχης. Οι επικοινωνίες είναι πιο κρίσιμες ως πολλαπλασιαστής ισχύος και οι Διοικητές βασίζονται στις επικοινωνίες περισσότερο σε σχέση με το παρελθόν. Αυτή η αντίληψη επιβεβαιώνεται κατά τη διάρκεια των τωρινών συγκρούσεων και της ενσωμάτωσης πολύπλοκου ηλεκτρονικού εξοπλισμού, όπως υπολογιστές, αισθητήρες και ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου μηχανών σε ένα όχημα. Η ενσωμάτωση αυτών των στοιχείων μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές με τις κεραίες δεκτών που έχουν εγκατασταθεί στον ίδιο χώρο/όχημα.

5.3.14.2.2 Διακρίβωση

Οι δοκιμές και αναλύσεις που απαιτούνται για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων των ακούσιων εκπομπών ακτινοβολίας από τα οχήματα μάχης, να επηρεάζουν δέκτες με τις κεραίες εγκατεστημένες πλησίον των συνδεδεμένων συστημάτων.

Ιδανικά, μία αξιολόγηση διασυστήματος πηγής/θύματος EMC, παρόμοια με αυτή που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια των ενδοσυστημάτων EMC σε μια ενιαία πλατφόρμα, θα πρέπει να υλοποιείται σε ρεαλιστικές αποστάσεις. Επειδή το σύστημα θύμα, δεν είναι συνήθως διαθέσιμο για την υποστήριξη δοκιμών μεταξύ των συστημάτων, το παραπάνω σύστημα μπορεί να προσομοιωθεί. Η προσομοίωση αποτελείται από ένα σύστημα κεραίας ανυψωμένο πάνω από το χώρο της εγκατάστασης, σε ένα επίπεδο ανάλογο με τα σημεία ενδιαφέροντος σε όχημα και σύστημα του θύματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, εάν το σύστημα θύμα είναι μία μεταλλική πλατφόρμα, η ανύψωση αφορά ένα επίγειο μεταλλικό επίπεδο, που βρίσκεται στο επίπεδο των κορυφαίων τμημάτων του οχήματος θύματος, στο οποίο είναι εγκατεστημένες κεραίες. Κεραίες του ίδιου τύπου όπως χρησιμοποιούνται από τυπικά συστήματα θύματα (όπως σταθμοί ασυρμάτου εκπομπής δεδομένων και κινητά δορυφορικά συστήματα) εγκαθίστανται στο υπερυψωμένο επίπεδο. Αυτές οι κεραίες συνδέονται μέσω ομοαξονικών γραμμών μεταφοράς με δέκτες EMI σε ένα θάλαμο ελέγχου έξω από την εγκατάσταση δοκιμών ή σε κάποια απόσταση από την υπόψη εγκατάσταση. Τα κριτήρια απόδοσης θα πρέπει να σχετίζονται με τα επίπεδα ευαισθησίας των δεκτών του συστήματος θύματος, παρόμοια με τις μετρήσεις στην ενότητα 5.3.2.6.

5.3.15 Συμβατότητα ΕΜ Φάσματος

Συστήματα που εξαρτώνται από το ραδιοφάσμα, πρέπει να συμμορφώνονται με τις οδηγίες των Υπουργείων Αμύνης, τους εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς φάσματος για τη χρήση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, όπως για παράδειγμα για την περίπτωση των ΗΠΑ, η Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Διαχείρισης Πληροφοριών (NTIA) «Εγχειρίδιο των κανονισμών και των διαδικασιών για διαχείριση ραδιοσυχνοτήτων» και οι οδηγίες του Υπουργείου Αμύνης DoDI 4650.01 [68]. Η συμμόρφωση επαληθεύεται με δοκιμή, ανάλυση ή ένα συνδυασμό αυτών, ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης του συστήματος.

5.3.15.1 Απαίτηση

Η διαθεσιμότητα επαρκούς φάσματος για την υποστήριξη των στρατιωτικών ηλεκτρονικών συστημάτων και του εξοπλισμού, είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της αποστολής. Στη σχεδίαση του φάσματος και τη διαχείριση των συχνοτήτων πρέπει να δοθεί η δέουσα και έγκαιρη εξέταση κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, της προμήθειας και της ανάπτυξης των στρατιωτικών υλικών (assets) που χρησιμοποιούν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Για να εξασφαλισθεί η μέγιστη συμβατότητα μεταξύ των διαφόρων χρηστών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος παγκοσμίως, είναι απαραίτητο ο εξοπλισμός που εξαρτάται από το φάσμα, να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις χρήσης και διαχείρισης του φάσματος. Η χρήση του φάσματος από το εκάστοτε Υπουργείο Άμυνας, είναι συνεχώς υπό αμφισβήτηση από τον εμπορικό τομέα. Αναμένεται ότι ο έλεγχος του φάσματος από τον Στρατό, θα υποβαθμίζεται υπέρ των εμπορικών χρήσεων. Καθώς ολοένα και περισσότερο φάσμα αφαιρείται, το διαθέσιμο φάσμα πρέπει να διαχειρίζεται όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα για να εξασφαλισθεί η επιτυχία των στρατιωτικών επιχειρήσεων.

Σε κάθε κράτος πρέπει να οργανώνεται, θεσμοθετείται και υλοποιείται ένα αξιόπιστο σύστημα διαφόρων αρμόδιων φορέων διαχείρισης και ελέγχου του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων. Για παράδειγμα στις ΗΠΑ, στη διαχείριση του φάσματος εμπλέκεται η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) υπεύθυνη για την πολιτική χρήση του φάσματος, το Υπουργείο Εμπορίου και η Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Πληροφοριών (NTIA) υπεύθυνη για τη χρήση του φάσματος από την ομοσπονδιακή κυβέρνηση. Η NTIA, εκτελεί τα καθήκοντα αυτά μέσω της διατμηματικής συμβουλευτικής Επιτροπής Ασυρμάτων Μέσων (IRAC), η οποία αποτελείται από εκπρόσωπους κυβερνητικών υπηρεσιών και οργανισμών, συμπεριλαμβανομένου ενός εκπροσώπου από κάθε στρατιωτική υπηρεσία. Ο Αναπληρωτής Υπουργός Εθνικής Άμυνας για τα Δίκτυα και την ενσωμάτωση των Πληροφοριών/Επικεφαλής αξιωματούχος πληροφοριών του Υπουργείου Άμυνας [ASD (NII)/DoD CIO] επιβλέπει τη διαχείριση του φάσματος εντός του Υπουργείου Αμύνης. Επιπλέον, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) ορίζει σε παγκόσμιο επίπεδο τους κανονισμούς για τις ραδιοεπικοινωνίες.

Οι εκτιμήσεις κινδύνου ικανότητας υποστήριξης (supportability) του φάσματος, αποτελείται από έναν εξοπλισμό πιστοποίησης φάσματος (ESC), την αξιολόγηση πιστοποίησης φάσματος φιλοξενούντων εθνών και μια εκτίμηση E3, που απαιτούνται σύμφωνα και με το θεσμικό κείμενο των ΗΠΑ DoDI 4650.01 [68]. Για παράδειγμα στις ΗΠΑ η πιστοποίηση φάσματος είναι μία διαδικασία που καθορίζεται από τη νομοθεσία. Ο ESC υποδηλώνει την ικανότητα υποστήριξης ενός ηλεκτρονικού συστήματος ή εξοπλισμού για λειτουργία σε μια καθορισμένη ζώνη συχνοτήτων.

Οι οδηγίες οριοθετούνται από κάθε υπηρεσία για τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς του ESC. Μια εγκεκριμένη κατανομή συχνοτήτων επιτρέπει την ανάπτυξη ή προμήθεια των συστημάτων εξαρτώμενων από το φάσμα σε μια καθορισμένη ζώνη συχνοτήτων ή σε καθορισμένες συχνότητες. Χωρίς εγκεκριμένη κατανομή συχνοτήτων, ο διαχειριστής του προγράμματος δεν έχει τη δικαιοδοσία να προμηθευτεί εξοπλισμό εξαρτώμενο από το φάσμα, συμπεριλαμβανομένων των εμπορικών στοιχείων που εξαρτώνται από το φάσμα. Ο διαχειριστής του προγράμματος είναι υπεύθυνος για την απόκτηση εγκεκριμένης κατανομής συχνοτήτων για το σύστημά του. Οι ανάδοχοι (contractors) μπορούν να υποστηρίξουν το διαχειριστή του προγράμματος για την απόκτηση δεδομένων για την περιγραφή του αντικειμένου, αλλά ο διευθυντής του προγράμματος έχει την ευθύνη για την υποβολή της εφαρμογής της κατανομής συχνοτήτων. Τα διάφορα στάδια που ισχύουν για την απόκτηση του ESC ορίζονται παρακάτω:

α. Στάδιο 1 (εννοιολογικό): Απαιτείται έγκριση για τη φάση προ της ιδέας. Μια κατανομή συχνοτήτων για τη φάση 1, πρέπει να αιτηθεί με ανάλογο έντυπο (π.χ το έντυπο DD 1494 [h.] στις ΗΠΑ) και να εγκριθεί πριν από την αποδέσμευση των κονδυλίων για μελέτες ή οικοδόμηση των πεδίων δοκιμών για την «απόδειξη της ιδέας». Ο σκοπός του συστήματος που εξαρτάται από το φάσμα, το σχεδιαζόμενο φάσμα συχνοτήτων και η ισχύς, καθώς και τα προγραμματισμένα ή κατ' εκτίμηση στοιχεία που είναι διαθέσιμα επί του θέματος, πρέπει να παρέχονται.

β. Στάδιο 2 (πειραματικό): Απαιτείται έγκριση πριν από τις αναθέσεις για την εξερεύνηση της ιδέας και τη φάση του καθορισμού της. Μια εγκεκριμένη κατανομή συχνοτήτων για το στάδιο 2 απαιτείται, προτού λάβει χώρα η αποδέσμευση κεφαλαίων για την οικοδόμηση ενός μοντέλου δοκιμών ακτινοβολίας ή την απόκτηση μιας εγκεκριμένης εκχώρησης συχνοτήτων για πειραματική χρήση. Τα εκτιμώμενα ή υπολογισμένα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σχεδόν όλα τα πεδία στο έντυπο, όταν ζητηθεί μία κατανομή συχνοτήτων για το στάδιο 2.

γ. Στάδιο 3 (αναπτυξιακό): Απαιτείται έγκριση πριν την ανάθεση για τη φάση της μηχανικής και βιομηχανικής ανάπτυξης. Μια εγκεκριμένη κατανομή συχνοτήτων απαιτείται για το Στάδιο 3, πριν από την αποδέσμευση των κεφαλαίων για τις αναπτυξιακές και λειτουργικές δοκιμές. Οι εκχωρήσεις συχνοτήτων πρέπει επίσης να ληφθούν πριν από τη λειτουργία του εξοπλισμού που εξαρτάται από το φάσμα του. Τα υπολογισμένα δεδομένα είναι αποδεκτά κατά τη διάρκεια του σταδίου 3.

δ. Στάδιο 4 (επιχειρησιακό): Απαιτείται έγκριση πριν από την ανάθεση για τη φάση της παραγωγής και ανάπτυξης. Προηγουμένως της ανάθεσης για τις μονάδες παραγωγής, είναι υποχρεωτική μία εγκεκριμένη κατανομή συχνότητας για το Στάδιο 4. Τα μετρούμενα δεδομένα είναι υποχρεωτικά για το υπόψη στάδιο. Τα υπολογισμένα δεδομένα είναι γενικά αποδεκτά. Τα εμπορικά στοιχεία απαιτούν συνήθως την έγκριση του σταδίου 4. Ωστόσο, εάν προγραμματιστούν εκτεταμένες τροποποιήσεις στο εμπορικό αντικείμενο, τότε το στάδιο 3 μπορεί να είναι κατάλληλο.

Η εκτίμηση E3 θα πρέπει να βασίζεται στις ενέργειες που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της πιθανότητας για αλληλεπιδράσεις E3 μεταξύ του συστήματος και του EME. Τα θεσμικά κείμενα DoDD 3222.3 [69] και το MIL-STD-464C [13] του Υπουργείου Αμύνης των ΗΠΑ, απευθύνονται σε όλους τους ηλεκτρομαγνητικούς κλάδους της E3 και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως οδηγοί για τη δημιουργία ενός αποτελεσματικού προγράμματος ελέγχου E3 για όλους τους κλάδους E3 και για την εκτέλεση των απαιτούμενων εκτιμήσεων E3.

Πριν τη λειτουργία συστημάτων και του εξοπλισμού που εξαρτώνται από το φάσμα, απαιτείται μία εκχώρηση συχνοτήτων η οποία επιτρέπει τη χρήση συγκεκριμένων συχνοτήτων. Οι απαιτήσεις σχεδίασης για τα συστήματα ραντάρ που σχετίζονται με ικανότητα υποστήριξης (supportability) του φάσματος προβλέπεται στο εγχειρίδιο του NTIA «Κριτήρια Μηχανικής του Φάσματος των Ραντάρ» [70]. Τεχνικές ανάλυσης αντιμετώπισης της συμβατότητας του φάσματος, βρίσκονται στο έγγραφο της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ R-3046-AF [71].

Πρόσθετος συντονισμός απαιτείται για τα δορυφορικά συστήματα, σύμφωνα με τα σχετικά εγχειρίδια διαφόρων αρμόδιων φορέων [της Εθνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών και Πληροφοριών (π.χ NTIA για ΗΠΑ) και άλλοι διεθνείς κανονισμοί ραδιοεπικοινωνιών]. Στις ΗΠΑ οι πληροφορίες που απαιτούνται για την προχωρημένη έκδοση ενός διαστημικού συστήματος, πρέπει να υποβάλλονται στην Υποεπιτροπή Σχεδίασης Φάσματος της NTIA (SPS), μέσω του πίνακα συχνοτήτων της Στρατιωτικής Επιτροπής Επικοινωνιών Ηλεκτρονικών (MCEB) και των οδηγιών εξοπλισμού φάσματος της Μόνιμης Ομάδας Εργασίας (ESG PWG) κατά την υποβολή του σταδίου 2 του DD εντύπου 1494 [h.].

Η έγκριση της ικανότητας υποστήριξης (supportability) φάσματος σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων δεν εγγυάται ότι η ζητούμενη συχνότητα (εξ) θα είναι διαθέσιμες, για να ικανοποιήσουν τις επιχειρησιακές απαιτήσεις φάσματος του συστήματος κατά τον κύκλο ζωής του. Οι εκχωρήσεις συχνοτήτων πρέπει να υλοποιηθούν πριν το σύστημα λειτουργήσει σε εκπαιδευτικά ή επιχειρησιακά περιβάλλοντα. Οι εκχωρήσεις συχνοτήτων εκδίδονται από εντεταλμένες αρχές των Κρατών, όπως οι οργανισμοί τηλεπικοινωνιών (π.χ η NTIA για τις Ηνωμένες Πολιτείες). Κάτω από ορισμένες συνθήκες, άλλες εντεταλμένες αρχές, όπως οι συντονιστές της περιοχής συχνοτήτων του Υπουργείου Αμύνης του εκάστοτε Κράτους, μπορούν να πραγματοποιούν προσωρινές ή περιορισμένες εκχωρήσεις συχνότητας ή οι ενιαίοι και καθορισμένοι Διοικητές μπορούν να υπο-καταλείμουν

περιοχές συχνοτήτων. Οι διαδικασίες για την υλοποίηση εκχωρήσεων συχνοτήτων προσδιορίζονται στους υπηρεσιακούς κανονισμούς ή στις «Διαταγές Πεδίου Μάχης».

Υπάρχουν πολλά περιστατικά παρεμβολής εντός χώρου, εντός του πλοίου και μεταξύ των πλοίων, καθώς και παρεμβολές με την πολιτική - εμπορική κοινότητα. Για παράδειγμα στις ΗΠΑ, τα ραντάρ ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας του αεροδρομίου της Honolulu, έχουν υποβαθμιστεί από ραντάρ πλοίων που σταθμεύουν δίπλα στο Περλ Χάρμπορ. Ένας διαχειριστής προγράμματος ανέπτυξε ένα σύστημα χωρίς να ζητήσει την πιστοποίηση του φάσματος. Μετά ανάπτυξη, ανακαλύφθηκε ότι το σύστημα έχει τη δυνατότητα να παρεμβάλλει άλλα κρίσιμα συστήματα. Οι δαπανηρές δοκιμές EMC και οι λειτουργικοί περιορισμοί, επηρεάζουν την ικανότητα του συστήματος να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της αποστολής. Και τα δύο στοιχεία θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί εάν οι οδηγίες της διαχείρισης του φάσματος, είχαν ακολουθηθεί.

Ένας αξιωματικός μίας βάσης επικοινωνιών του Στρατού των ΗΠΑ, χρηματοδότησε την αγορά ενός εμπορικά εγκεκριμένου εξοπλισμού. Ο χρήστης δεν ήταν σε θέση να λάβει μια εκχώρηση συχνοτήτων, διότι ο εξοπλισμός λειτουργούσε σε ένα εύρος συχνοτήτων, εγκεκριμένο μόνο για μη Κυβερνητική λειτουργία. Ένα δεύτερο σύστημα έπρεπε να προμηθευτεί, για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της αποστολής. Ένας τακτικός χρήστης Στρατού των ΗΠΑ που η βάση του έδρευε σε άλλη χώρα, αγόρασε εμπορικά είδη, ως μέρος ενός υπό ανάπτυξη πακέτου επικοινωνιών. Επειδή ο εξοπλισμός πιστοποίησης (ESC) δεν αποκτήθηκε και ανάλογος συντονισμός του Κράτους που φιλοξενούσε τη στρατιωτική βάση για τη χρήση του εν λόγω εξοπλισμού δεν επιτεύχθηκε, ο χρήστης διαπίστωσε ότι δεν ήταν σε θέση να χρησιμοποιήσει τον εξοπλισμό στις ευρωπαϊκές και ασιατικές χώρες. Αυτό το πρόβλημα θα είχε εντοπιστεί πριν την προμήθεια, εάν είχε λάβει χώρα ο σωστός συντονισμός. Ο χρήστης δεν ήταν σε θέση να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις επικοινωνιών και έπρεπε να αγοράσει επιπλέον εξοπλισμό για να ικανοποιήσει αυτές τις απαιτήσεις.

5.3.15.2 Διακρίβωση

Οι πρακτικές του ESC πρέπει να ακολουθούνται σωστά συμπεριλαμβανομένης της διακρίβωσης των χαρακτηριστικών των συστημάτων που εξαρτώνται από το φάσμα, των υποσυστημάτων και του εξοπλισμού, για να εξασφαλισθεί ότι είναι σε συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της χρήσης του φάσματος.

Τα αιτήματα κατανομής συχνοτήτων, πρέπει να περιλαμβάνουν τις τεχνικές πληροφορίες σχετικά με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού, για να βοηθήσουν τις αρχές στον καθορισμό της ρύθμισης του αιτήματος. Όταν υποβάλλεται αίτημα για εκχώρηση συχνοτήτων, η Υπηρεσία Ανάπτυξης θα πρέπει να πιστοποιήσει ότι ο συντονιστής συχνοτήτων του Υπουργείου Άμυνας, έχει εγκρίνει το αίτημα όπως απαιτείται. Τα δεδομένα που απαιτούνται, αναλύονται λεπτομερώς στα σχετικά έντυπα (π.χ το έντυπο DD 1494 για τις ΗΠΑ). Το στάδιο της αίτησης

καθορίζει το επίπεδο των δοκιμών και των αναλύσεων που απαιτούνται. Τόσο το κείμενο MIL-STD-461F [11], όσο και το πρότυπο MIL-STD-449 [72] του Υπουργείου Αμύνης των ΗΠΑ, παρέχουν οδηγίες για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών του ηλεκτρομαγνητικού σήματος.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, σημαντικά στρατιωτικά περιουσιακά στοιχεία και υποδομές έχουν εκπέσει ή απωλεσθεί λόγω αποτυχίας στην αντιμετώπιση του Ε3 ελέγχου και στην ικανότητα υποστήριξης (supportability) του φάσματος, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απόκτησης/εκχώρησης. Επιπλέον, πολλά συστήματα στο πεδίο, λειτουργούν με περιορισμένες δυνατότητες και περιορισμούς αποστολής, λόγω ευπαθειών που θα είχαν ανακαλυφθεί, εάν οι Ε3 και ικανότητα υποστήριξης του φάσματος εξεταζόντουσαν νωρίτερα, κατά τη διάρκεια της απόκτησης/εκχώρησης.

5.3.16 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Μετά την τεράστια ανάπτυξη και διάδοση των νέων τεχνολογιών επικοινωνιών και ηλεκτρονικών συστημάτων - υποσυστημάτων που συνέβη τις τελευταίες δεκαετίες τόσο στον στρατιωτικό, όσο και στον εμπορικό τομέα, είναι προφανές ότι το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι ένας περιορισμένος πόρος, ο οποίος χρησιμοποιείται από πολλά συστήματα, με αποτέλεσμα να εγείρονται θέματα αλληλοπαρεμβολών των συστημάτων, που προέρχονται από τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά και τη θέση λειτουργίας τους. Συνεπώς πρέπει να υιοθετηθούν πρότυπα EMC που να πληρούν τις απαιτήσεις, έχοντας διακριβωθεί με αξιόπιστες μεθόδους και σε απολύτως προσομοιωμένα περιβάλλοντα.

Επειδή η τεχνολογία εξελίσσεται περιοδικά σε τακτά χρονικά διαστήματα (5-10 χρόνια), ειδικότερα στα διάφορα οπλικά συστήματα που χρησιμοποιεί ο Στρατός, το Πολεμικό Ναυτικό και η Πολεμική Αεροπορία, είναι απαραίτητο να επικαιροποιούνται τα διάφορα πρότυπα EMC σε ανάλογο χρονικό διάστημα, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικές αλλαγές και τη διαδικασία με την οποία επηρεάζουν την EMC ενός συστήματος.

Στην εξέλιξη ενός προτύπου EMC, εκτός από τις αλλαγές στα τεχνικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων, θα πρέπει να εξετάζονται ποικίλα χαρακτηριστικά του λειτουργικού - επιχειρησιακού περιβάλλοντος του συστήματος, που διαμορφώνουν την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του περιβάλλοντος. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι τα φυσικά φαινόμενα (π.χ κεραυνοί), εκούσιες ή ακούσιες εκπομπές γειτνιαζόντων συστημάτων, ανθρώπινος χειρισμός κτλ. Επιπλέον, θα πρέπει να μελετώνται όλα τα περιστατικά EMI που συνέβησαν στο παρελθόν κατά τη διάρκεια στρατιωτικών επιχειρήσεων, καθώς αναδεικνύονται παράμετροι και λεπτομέρειες που οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα ή σε συνδυασμό καταστάσεων που προκύπτουν αποκλειστικά σε μία ταχέως εξελισσόμενη στρατιωτική επιχείρηση και τα οποία δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν σε ένα προσομοιωμένο περιβάλλον.

Όπως φαίνεται και από τους σχετικούς πίνακες που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία, τα πρότυπα EMC δεν καλύπτουν όλο το φάσμα. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο και με την ολοένα αυξανόμενη χρήση του εμπορικού εξοπλισμού, τόσο με την υιοθέτηση του σε στρατιωτικές εφαρμογές, όσο και με τη γειννιάσή του σε κατάσταση λειτουργίας με στρατιωτικά συστήματα. Επομένως, απαιτείται μία επέκταση των παραπάνω προτύπων σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Επιπλέον, στο σχεδιασμό και υλοποίηση ενός συστήματος, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι μελλοντικές ανάγκες των στρατιωτικών επιχειρήσεων, καθώς και ενδεχόμενες δομικές-μηχανολογικές αλλαγές σε πλατφόρμες που λειτουργούν στρατιωτικά ηλεκτρονικά συστήματα και οι οποίες ενδεχομένως να προκαλούν αυξημένες ηλεκτρομαγνητικές περιβαλλοντολογικές επιδράσεις. Είναι πολύ σημαντικό να προβλεφθούν τα παραπάνω, καθότι μία τροποποίηση της EMC κατόπιν της υλοποίησης του συστήματος είναι μεγάλου κόστους.

Οι κυριότερες προτάσεις που αφορούν τη βελτίωση της EMC στα στρατιωτικά συστήματα, είναι:

α. Αυστηροποίηση των δοκιμών ελέγχου EMC/EMI, μέσω εξασφάλισης του πιο αξιόπιστου περιβάλλοντος προσομοίωσης, σε όλα τα επικοινωνιακά και ηλεκτρονικά συστήματα που χρησιμοποιούν οι υπηρεσίες του εκάστοτε Υπουργείου Αμύνης.

β. Επέκταση των προτύπων EMC σε μεγαλύτερες περιοχές του Η/Μ φάσματος (μέχρι και τα 10 GHz) και σε εμπορικό εξοπλισμό, ο οποίος εμμέσως ή άμεσα λειτουργεί μαζί με στρατιωτικά συστήματα.

γ. Καθορισμός του επιδιωκόμενου Η/Μ περιβάλλοντος λειτουργίας για όλα τα στρατιωτικά συστήματα, προκειμένου να μην σχεδιάζεται η χρήση τους από τους διάφορους φορείς του Υπουργείου Αμύνης σε μη κατάλληλα περιβάλλοντα, που θα τα επιβαρύνουν με δυσμενείς ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις.

δ. Συνεργασία στη σύνταξη των προτύπων, όλων των φορέων του Υπουργείου Αμύνης, για τον καλύτερο συγκερασμό λειτουργιών των επικοινωνιακών συστημάτων του κάθε κλάδου (Στρατός, Πολεμικό Ναυτικό, Πολεμική Αεροπορία), λόγω των κοινών επιχειρήσεων που διεξάγουν στα διάφορα τακτικά επιχειρησιακά πεδία.

ε. Συνεργασία των στρατιωτικών και πολιτικών φορέων του κυβερνητικού τομέα, για την καλύτερη διαχείριση του ραδιοφάσματος και την πιστοποίηση του εμπορικού εξοπλισμού σε θέματα EMC με στρατιωτικά κριτήρια.

ζ. Επανεξέταση των προτύπων EMC περιοδικά, προκειμένου να λαμβάνονται υπόψη όλες οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι μελλοντικές ανάγκες.

η. Υιοθέτηση διαδικασιών πιστοποίησης EMC υποχρεωτικά για όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα (στη φάση σχεδίασης - κατασκευής), που πρόκειται να χρησιμοποιήσουν οι φορείς των εκάστοτε Υπουργείων Αμύνης.

Βιβλιογραφία

- [1] Joint Army-Navy Specification, «Methods Of Radio Interference Measurement, Methods of 150 kc to 20 Mc», JAN-I-225, Army No. 71-3233, Navy No. 16-I-14, 1945
- [2] Army-Navy Aeronautical Specification, «Propeller Systems Radio Interference Limits», AN-1-40, 1947
- [3] National Aeronautics and Space Administration (NASA), «MSFC-SPEC-279 ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY», 15-11-1967
- [4] USAF, «MIL-STD-1541 MILITARY STANDARD ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY REQUIREMENTS FOR SPACE SYSTEMS», 15-10-1973 (30 -12-1987)
- [5] USAF, «MIL-STD-826 MILITARY STANDARD ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE TEST REQUIREMENTS AND TEST METHODS», 1964
- [6] Department of Defense, «MIL-STD-461A MILITARY STANDARD ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE CHARACTERISTICS REQUIREMENTS FOR EQUIPMENT», 1-8- 1968
- [7] Department of Defense, «MIL-STD-462D MILITARY STANDARD MEASUREMENT OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE CHARACTERISTICS», 11-1-1993
- [8] Department of Defense, «MIL-STD-463A MILITARY STANDARD: DEFINITIONS AND SYSTEM OF UNITS, ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE AND ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TECHNOLOGY», 1-6-1977
- [9] American National Standards Institute (ANSI), « C63.14 American National Standard Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD) (Dictionary of EMC/EMP/ESD Terms and Definitions», 21-4-1992
- [10] Department of Defense, «MIL-STD-461E DoD, INTERFACE STANDARD REQUIREMENTS FOR THE CONTROL OF ELECTRO-MAGNETIC INTERFERENCE EMISSIONS AND SUSCEPTIBILITY», 20-8-1999
- [11] Department of Defense, «MIL-STD-461F DoD INTERFACE STANDARD, REQUIREMENTS FOR THE CONTROL OF ELECTRO-MAGNETIC INTERFERENCE EMISSIONS AND SUSCEPTIBILITY», 10-12-2007
- [12] Department of Defense, «MIL-STD-464 DoD INTERFACE STANDARD ELECTROMAGNETIC ENVIROMENTAL EFFECTS REQUIREMENTS FOR SYSTEMS», 18-3-1997

- [13] Department of Defense, «MIL-STD-464C DoD INTERFACE STANDARD ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENTAL EFFECTS REQUIREMENTS FOR SYSTEMS », 1-12-2010
- [14] NASA, Reference Publication 1374, July 1995
- [15] Department of Defense, «MIL-HDBK 235-1C MILITARY OPERATIONAL ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT PROFILES PART 1C GENERAL GUIDANCE», 1-10-2010
- [16] Department of Defense, «MIL-STD-1385B MILITARY STANDARD: PRECLUSION OF ORDNANCE HAZARDS IN ELECTROMAGNETIC FIELDS; GENERAL REQUIREMENTS FOR», 1-8-1986
- [17] Department of Defense, «MIL-DTL-23659E DETAIL SPECIFICATION: INITIATORS, ELECTRIC, GENERAL DESIGN SPECIFICATION FOR 27-9- 2007
- [18] Department of Defense, «MIL-STD-1605A DEPARTMENT OF DEFENSE TEST METHOD STANDARD: PROCEDURES FOR CONDUCTING A SHIPBOARD ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE (EMI) SURVEY (SURFACE SHIPS), 8-10-2009
- [19] Federal Aviation Administration, «DOT/FAA/CT-89/22 Aircraft Lightning Protection Handbook», September 1989
- [20] SAE, «SAE ARP 5412 Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms»,11-1-2013
- [21] SAE, «SAE ARP 5415 User's Manual for Certification of Aircraft Electrical/Electronic Systems Against the Indirect Effects of Lightning» 16-2-2008
- [22] FAA, «20-136B - Aircraft Electrical and Electronic System Lightning Protection» 7-9-2011
- [23] SAE, «SAE ARP 5577 Aircraft Lightning Direct Effects Certification», 26-3-2008
- [24] SAE, «SAE ARP 5414 Aircraft Lightning Zoning», 28-9-2012
- [25] SAE, «SAE ARP 5416 Aircraft Lightning Test Methods», 7-1-2013
- [26] FAA, «20-53B - Protection of Aircraft Fuel Systems Against Fuel Vapor Ignition Caused by Lightning», 5-6-2006
- [27] RTCA, «DO-160 Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment», December 2010

[28] Department of Defense, «MIL-STD-2169B (NOTICE 1) DEPARTMENT OF DEFENSE INTERFACE STANDARD: HIGH-ALTITUDE ELECTRO-MAGNETIC PULSE (HEMP) ENVIRONMENT, 19-1-2012

[29] Department of Defense, «MIL-STD-188/125-1 (NOTICE 1), MILITARY STANDARD SHEET: HIGH-ALTITUDE ELECTROMAGNETIC PULSE (HEMP) PROTECTION FOR GROUND-BASED C4I FACILITIES PERFORMING CRITICAL, TIME-URGENT MISSIONS (PART 1 - FIXED FACILITIES), 7-4-2005

[30] Department of Defense, «MIL-STD-188/125-2, DEPARTMENT OF DEFENSE INTERFACE STANDARD: HIGH-ALTITUDE ELECTRO-MAGNETIC PULSE (HEMP) PROTECTION FOR GROUND-BASED C4I FACILITIES PER», 3-3-1999, 7-4-2005 (NOTICE 1)

[31] Department of Defense, «EPS-MIL-STD-461: Industry Electromagnetic Environmental Effects Standards Committee ENGINEERING PRACTICE STUDY Results Of Detailed Comparisons Of Individual EMC Requirements And Test Procedures Delineated In Major National And International Commercial Standards With Military Standard MIL-STD-461E», 2-3-2001

[32] Department of Defense, «DOD-STD-1399/070 - PART 1, MILITARY STANDARD: INTERFACE STANDARD FOR SHIPBOARD SYSTEMS (SECTION 070 - PART 1) D.C. MAGNETIC FIELD ENVIRONMENT» 26-2- 1979

[33] Electrostatic Discharge Association, «ANSI/ESD S20.20 For the Development of an Electrostatic Discharge Control Program for - Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment (Excluding Electrically Initiated Explosive Devices)», 1-3-2007

[34] Electrostatic Discharge Association, «ESD TR 20.20 For the Development of an Electrostatic Discharge Control Program for - Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment Handbook», 2008

[35] USAF, «TO 00-25-172 GROUND SERVICING OF AIRCRAFT AND STATIC GROUNDING/BONDING», 9-8-2013

[36] NASA, «NASA TP2361 TECHNICAL PAPER: Design Guidelines for Assessing and Controlling Spacecraft Charging Effects», 1984

[37] Department of Defense, «MIL-STD-331C, DEPARTMENT OF DEFENSE TEST METHOD STANDARD: FUZE AND FUZE COMPONENTS, ENVIRONMENTAL AND PERFORMANCE TESTS FOR», 5 -1- 2005

[38] NATO STANDARDISATION AGENCY (NSA), «AECTP-500 (ED 3), ELECTRICAL/ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENTAL TESTS», December 2009

[39] US NAVY, « NAVSEAINST 8020.19 ELECTROSTATIC DISCHARGE SAFETY PROGRAM FOR ORDNANCE», 13-9-2000

- [40] Department of Defense, «DOD INSTRUCTION 6055.11 Protecting Personnel from Electromagnetic Field Protectings Personnel from Electromagnetic Fields», 19-8-2009
- [41] Air Force, « TO 31Z-10-4 AF technical manual Electromagnetic Radiation (EMR) Hazards», 25-5-1989
- [42] Department of Navy, « NAVSEA OP 3565 Electromagnetic Radiation Hazards (Hazards to Ordnance)», 11-9-2008
- [43] US ARMY, « TB MED 523 CONTROL OF HAZARDS TO HEALTH FROM MICROWAVE AND RADIO FREQUENCY RADIATION AND ULTRASOUND», 15-7-1980
- [44] Department of Defense, «MIL-HDBK-240A, DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK: HAZARDS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION TO ORDNANCE (HERO) TEST GUIDE» 10-3-2011
- [45] Department of Defense, «MIL-HDBK-235-7 MILITARY OPERATIONAL ELECTROMAGNETIC ENVIROMENT PROFILES PART 7 EXTERNAL ELECTROMAGNETIC ENVIROMENT LEVELS FOR ORDNACE», 1-10-2010
- [46] NAVSEA, «30393 OD DESIGN PRINCIPLES AND PRACTICES FOR CONTROLLING HAZARDS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION TO ORDNANCE (HERO DESIGN GUIDE)», 1-4-2001
- [47] USAF, «MIL-STD-1576, MILITARY STANDARD: - SUBSYSTEM SAFETY REQUIREMENTS AND TEST METHODS FOR SPACE SYSTEMS», 31-7-1984
- [48] USAF, «MIL-HDBK-83578, DEPARTMENT OF DEFENSE HAND-BOOK: CRITERIA FOR EXPLOSIVE SYSTEMS AND DEVICES USED ON SPACE VEHICLES», 01-1-1999
- [49] USAF/Bureau of NAVAL Weapons, «MIL-B-5087B, MILITARY SPECIFICATION: BONDING, ELECTRICAL, AND LIGHTNING PROTE-CTION FOR AEROSPACE SYSTEMS», 15-10-1964
- [50] SAE, «SAE ARP1870 Aerospace Systems Electrical Bonding and Grounding for Electromagnetic Compatibility and Safety», 1-4-1999
- [51] Department of Defense, «MIL-HDBK-419A GROUNDING, BONDING, AND SHIELDING FOR ELECTRONIC EQUIPMENTS AND FACILITIES 29-12-1987
- [52] Department of Defense, «MIL-STD-1310H, DEPARTMENT OF DEFENSE STANDARD PRACTICE: SHIPBOARD BONDING, GROUNDING, AND OTHER TECHNIQUES FOR ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, ELECTROMAGNETIC PULSE (EMP) MITIGATION, AND SAFETY», 17 -9-2009

- [53] Department of Defense, «MIL-HDBK-1568, MILITARY HANDBOOK: MATERIALS AND PROCESSES FOR CORROSION PREVENTION AND CONTROL IN AEROSPACE WEAPONS SYSTEMS», 18-7-1996
- [54] Department of Defense, « MIL-STD-704F, DEPARTMENT OF DEFENSE INTERFACE STANDARD: AIRCRAFT ELECTRIC POWER CHARACTERISTICS», 12 -3- 2004
- [55] Department of Defense, «MIL-STD-1399/300B, DEPARTMENT OF DEFENSE INTERFACE STANDARD: (SECTION 300B) ELECTRIC POWER, ALTERNATING CURRENT», 24-4-2008
- [56] Department of Defense, «MIL-HDBK-454B, DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK: GENERAL GUIDELINES FOR ELECTRONIC EQUIPMENT», 15-4-2007
- [57] Department of Defense, «MIL-STD-188/124B, MILITARY STANDARD: GROUNDING, BONDING AND SHIELDING FOR COMMON LONG HAUL/TACTICAL COMMUNICATION SYSTEMS INCLUDING GROUND BASED COMMUNICATIONS-ELECTRONICS FACILITIES AND EQUIPMENTS», 01-2-1992
- [58] ISO, «ISO 46 Aircraft - Fuel nozzle grounding plugs and sockets», 1973
- [59] USAF, «TO 00-25-172 (W/CHANGE 12), TECHNICAL MANUAL: GROUND SERVICING OF AIRCRAFT AND STATIC GROUNDING/BONDING», 21-2-2008
- [60] Department of Defense, «MIL-HDBK-274A, DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK: ELECTRICAL GROUNDING FOR AIRCRAFT SAFETY», 14-11-2011
- [61] Department of Defense, «MIL-DTL-83413C, DETAIL SPECIFICATION: CONNECTORS AND ASSEMBLIES, ELECTRICAL, AIRCRAFT GROUNDING, GENERAL SPECIFICATION FOR», 15-8-2012
- [62] NSA, «NSTISSAM TEMPEST/1-92, COMPROMISING EMANATIONS LABORATORY TEST REQUIREMENTS ELECTROMAGNETICS», 15-12-1992
- [63] CNSS, «Advisory Memorandum TEMPEST 01-02»
- [64] ASD (NII), « DoDD C-5200.19 Control of Compromising Emanations (U)», 16-5-1995
- [65] NSTISS, «TEMPEST/1-93 Compromising Emanations Field Test. Requirements, Electromagnetics», 30-8-1993
- [66] NSTISS, «TEMPEST/2-95 RED/BLACK INSTALLATION GUIDANCE», 12 -12-1995
- [67] Department of the NAVY, « IA PUB-5239-31 Information Assurance Shipboard Red/Black Installation Publication», July 2001

[68] Department of Defense, «DoDI 4650.01 Policy and Procedures for Management and Use of the Electromagnetic Spectrum», 9-1-2009

[69] Department of Defense, «DoDD 3222.3 Electromagnetic Environmental Effects (E3) Program», 25-8-2014

[70] NTIA, «Technical Report TR-05-420 Measurement procedures for the radar spectrum engineering criteria (RSEC)»

[71] USAF, «R-3046-AF Techniques for the Analysis of Spectral and Congestion in Space Systems», March 1984

[72] Department of Defense, «MIL-STD-449D, MILITARY STANDARD: RADIO FREQUENCY SPECTRUM CHARACTERISTICS MEASUREMENT OF», 23 -2-1973

Ιστοσελίδες

[a.] http://www.c63.org/documents/c63/newsletters/2000_07_c63_newsletter.htm

[b.] http://wiki.dare.nl/wiki/index.php/Mil_std

[c.] http://www.ewh.ieee.org/soc/emcs/acstrial/newsletters/summer10/Standards_2000.pdf

[d.] <http://incompliancemag.com/article/mil-std-464c-a-review-of-the-latest-revisions-to-the-standard-part-2/>

[e.] <http://www.atcourses.com/sampler/IntroductionToEMI.pdf>

[f.] http://en.wikipedia.org/wiki/Data_Item_Descriptions

[g.] http://en.wikipedia.org/wiki/Marx_generator

[h.] <https://acc.dau.mil/CommunityBrowser.aspx?id=352872>