



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Τεχνικές Συσκευασίας για Μετατροπείς
Ηλεκτρονικών Ισχύος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΤΣΟΥΡΑΚΗ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

Επιβλέπων : Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Τεχνικές Συσκευασίας για Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΤΣΟΥΡΑΚΗ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

Επιβλέπων : Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17^η Ιουλίου 2015.

(Υπογραφή)

.....
Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

(Υπογραφή)

.....

ΠΑΤΣΟΥΡΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

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

Copyright Νικόλαος Π. Πατσουράκης, 2015

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

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση και επεξεργασία όλων των θεμάτων, που υφίστανται στη σχεδίαση ενός συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος. Συγκεκριμένα αναπτύχθηκαν τεχνικές συσκευασίας για μετατροπείς ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη σημαντικούς παράγοντες για την ομαλή διεξαγωγή της λειτουργίας αυτών.

Αναλυτικότερα, έγινε μελέτη για τη θερμική διαχείριση των τυπωμένων κυκλωμάτων (PCBs), ώστε να σχεδιασθούν κατάλληλα συστήματα ψύξης για την εντός ορίων λειτουργία του συστήματος. Επιπρόσθετα υπάρχουν αναφορές σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση, κάτι που απασχολεί ιδιαίτερα τον σχεδιαστή ηλεκτρονικών ισχύος, καθότι δεν επιτρέπεται η επιβολή σημάτων παρεμβολών προς αλλά κι από το κύκλωμα ισχύος στο περιβάλλοντα χώρο. Τέλος, αναφέρονται διάφορες μέθοδοι για την προστασία κυκλωμάτων ηλεκτρονικών ισχύος από υπερτάσεις, με σκοπό την αποφυγή σφαλμάτων στη λειτουργία τους, που οφείλονται είτε από κεραυνικά πλήγματα είτε από προβλήματα του δικτύου ηλεκτρικής παροχής.

Η εργασία αυτή μπορεί να γίνει οδηγός για την υλοποίηση κυκλωμάτων πλέον σε πραγματικό χρόνο κι όχι σε απλές αλλά πλην σημαντικές προσομοιώσεις. Ο ηλεκτρολόγος μηχανικός έχει στα χέρια του ένα εγχειρίδιο, που καταγραφεί όλα εκείνα τα βήματα, που θα πρέπει να λάβει υπόψη του πριν ένα τέτοιο σύστημα οδηγηθεί στη παραγωγή. Ως εκ τούτου, θα αποφευχθούν ενδεχόμενες εσφαλμένες καταστάσεις, που θα αποτρέψουν την ορθή λειτουργία.

Λέξεις Κλειδιά: Μετατροπείς Ισχύος, Τεχνικές Συσκευασίας Ισχύος, Θερμική Διαχείριση, Ηλεκτρομαγνητική Παρενόχληση (EMI), Προστασία από Υπερτάσεις

Abstract

The purpose of this thesis is to analyze and process all the issues, which employ in the design of a power electronics system. Specifically, developed packaging techniques for power converters, are taking into account important factors for the proper function of these systems.

Furthermore, a study is made for the thermal management of the printed circuits (PCBs), in order to design appropriate cooling systems within the operating limits of the system. In addition there are references relating to electromagnetic interference, which is especially the major problem of a power electronics designer, as interference signals may not be imposed to and from the power circuit to the environment. Finally, several methods for overvoltage protection power of electronic circuits are listed, in order to avoid errors in their operations, resulting from either lightning strikes or problems of power supply network.

This assignment can be a guide for the implementation of circuits in real time, and not in simple but important simulations. The electrical engineer has in his hands a manual, which records all these steps that should be taken into account before such a system brought to production. Under these circumstances, any false statements, that would prevent proper operation, will be avoided.

Keywords: Power Converter, Power Packaging, Thermal Management, Electromagnetic Interference (EMI), Overvoltage Protection

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, Στέφανο Μανιά, για την ευκαιρία που μου έδωσε να δουλέψω πάνω σε ένα θέμα το οποίο αρχίζει να απασχολεί ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα. Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας έγινε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015, την περίοδο Δεκεμβρίου 2014 – Ιούλιος 2015. Η εργασία σχετίζεται θεματικά με τις τεχνικές συσκευασίας των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος.

Επιπλέον, οφείλω να δώσω ιδιαίτερες ευχαριστίες στην Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) για το πρόγραμμα ΕΣΠΑ 2007-2013 «Συνεργασία» με κωδικό 09ΣΥΝ-32-1181 για την οικονομική υποστήριξη του έργου «Ανάπτυξη νέων τρανζίστορ και αντιστροφών ισχύος φωτοβολταϊκών συστημάτων με χρήση καρβιδίου του πυριτίου» υπό την αιγίδα της οποίας ολοκληρώθηκε η παρούσα εργασία.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη ψυχολογική και υλική υποστήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και τον αδελφικό μου φίλο, επιστήμονα και μέντορα, Γεώργιο Ρουσσάκη, που αποτελεί τη μόνιμη πηγή έμπνευσής μου.

Πίνακας περιεχομένων

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Εισαγωγή..... | 15 |
| 1.1 | Ο ρόλος των ηλεκτρονικών ισχύος..... | 15 |
| 1.1.1 | Ιστορική αναφορά..... | 16 |
| 1.2 | Σημερινές απαιτήσεις..... | 16 |
| 1.2.1 | Θερμική προσομοίωση..... | 17 |
| 1.3 | Η ικανοποίηση των απαιτήσεων των μελλοντικών εφαρμογών..... | 18 |
| 1.3.1 | Ηλεκτρική και θερμική απόδοση..... | 20 |
| 1.3.2 | Κόστος..... | 22 |
| 1.3.3 | Πυκνότητα ισχύος..... | 23 |
| 1.4 | Περιγραφή προβλήματος..... | 24 |
| 1.5 | Περίγραμμα διπλωματικής..... | 25 |
| 2 | Θεμελιώδεις τρόποι μεταφοράς θερμότητας..... | 27 |
| 2.1 | Αγωγή (Conduction)..... | 27 |
| 2.2 | Συναγωγή (Convection)..... | 30 |
| 2.3 | Θερμική ακτινοβολία (radiation)..... | 32 |
| 2.4 | Κατασκευή διαφορικής εξίσωσης αγωγής θερμότητας..... | 34 |
| 2.4.1 | Επιλύοντας τη μονοδιάστατη εξίσωση θερμότητας..... | 36 |
| 3 | Θερμικά μοντέλα για μετατροπείς ισχύος..... | 41 |
| 3.1 | Θερμικά μοντέλα μόνιμης κατάστασης..... | 41 |
| 3.1.1 | Δίκτυο αντιστάσεων..... | 41 |
| 3.2 | Θερμικά μοντέλα μεταβατικής κατάστασης..... | 44 |
| 3.2.1 | Ισοδύναμα κυκλώματα RC..... | 45 |
| 3.2.2 | Μοντέλα υποβιβασμού τάξης..... | 48 |
| 3.3 | Θερμικά μοντέλα με αριθμητικές μεθόδους..... | 51 |
| 3.3.1 | Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων..... | 52 |
| 3.3.2 | Μέθοδος πεπερασμένων όγκων..... | 53 |
| 3.3.3 | Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών..... | 53 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.4 | Μέθοδος συνοριακών στοιχείων | 54 |
| 3.4 | Αναλυτικές λύσεις | 54 |
| 3.4.1 | Τεχνική συνάρτησης Green | 55 |
| 3.4.2 | Επέκταση σειρών Fourier | 55 |
| 3.5 | Συμπεράσματα | 58 |
| 4 | Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα..... | 61 |
| 4.1 | Εισαγωγή..... | 61 |
| 4.2 | Ιστορική Αναδρομή | 62 |
| 4.3 | Σημασία ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής..... | 63 |
| 4.4 | Απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο | 65 |
| 4.4.1 | Ηλεκτρομαγνητική θεωρία..... | 65 |
| 4.4.2 | Χρήσιμοι ορισμοί..... | 68 |
| 4.4.3 | Τύποι ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής | 70 |
| 4.4.4 | Τρόποι σύζευξης EMC | 71 |
| 4.5 | Θέματα ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης σε συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος...77 | |
| 4.5.1 | Απώλειες | 78 |
| 4.5.2 | Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές | 82 |
| 4.5.3 | Αρμονικές..... | 82 |
| 4.5.4 | Συμπεράσματα..... | 83 |
| 4.6 | Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών παρενοχλήσεων | 84 |
| 4.6.1 | Ακτινοβολούμενες εκπομπές..... | 85 |
| 4.6.2 | Αγώγιμες εκπομπές..... | 86 |
| 4.7 | Θωράκιση..... | 88 |
| 4.7.1 | Βελτίωση αναφοράς ραδιοσυχνότητας (RF reference) | 91 |
| 4.7.2 | Απόζευξη της συνεχούς τροφοδοσίας (DC) | 91 |
| 4.7.3 | Φιλτράρισμα καλωδίωσης..... | 92 |
| 4.8 | Πρότυπα | 96 |
| 5 | Θέματα τυπωμένων κυκλωμάτων για ηλεκτρονικά ισχύος | 99 |
| 5.1 | Ιστορική αναδρομή συνδεσμολογιών ηλεκτρονικών ισχύος | 99 |
| 5.2 | Παρούσα τεχνική σχεδίασης και κατασκευής μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος 101 | |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2.1 | Μεγάλος αριθμός κατασκευαστικών τμημάτων | 102 |
| 5.2.2 | Μη βελτιστοποιημένα ηλεκτρομαγνητικά, θερμικά και χωρικά θέματα | 104 |
| 5.3 | Κατασκευή στοιχείων ηλεκτρονικών ισχύος | 106 |
| 5.3.1 | Κατασκευή ημιαγωγών ισχύος..... | 106 |
| 5.3.2 | Κατασκευή ψηκτρών | 108 |
| 5.3.3 | Κατασκευή παθητικών στοιχείων | 112 |
| 5.3.4 | Κατασκευή στοιχείων ελέγχου | 117 |
| 5.4 | Τεχνολογία συσκευασίας κυκλώματος | 119 |
| 5.5 | Αναλυτική κατασκευή μετατροπέα ισχύος..... | 125 |
| 5.5.1 | Βασικές και θεμελιώδεις λειτουργίες | 125 |
| 5.5.2 | Λειτουργικά στοιχεία και στοιχεία συσκευασίας | 126 |
| 5.5.3 | Περίπτωση μελέτης για τα λειτουργικά στοιχεία και στοιχεία συσκευασίας ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος | 128 |
| 5.5.4 | Προσέγγιση στοιχείων με βάση σχεδίασης ολοκληρωμένων..... | 132 |
| 5.6 | Συσκευασία και Ολοκλήρωση | 135 |
| 5.6.1 | Συσκευασία ηλεκτρονικών ισχύος | 135 |
| 5.6.2 | Ολοκλήρωση ηλεκτρονικών ισχύος | 137 |
| 6 | Προστασία διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος από υπερτάσεις | 145 |
| 6.1 | Εισαγωγή..... | 145 |
| 6.2 | Απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο περί υπερτάσεων | 146 |
| 6.2.1 | Ορισμός κρουστικής υπέρτασης..... | 146 |
| 6.2.2 | Αιτίες δημιουργίας κρουστικών υπερτάσεων | 147 |
| 6.2.3 | Προβλήματα λόγω κρουστικών υπερτάσεων | 149 |
| 6.3 | Απαγωγείς υπερτάσεων (SPD) | 150 |
| 6.3.1 | Γενικά | 150 |
| 6.3.2 | Τυπικά χαρακτηριστικά απαγωγέων τάσης..... | 152 |
| 6.3.3 | Ανασκόπηση τεχνολογιών SPD - Είδη απαγωγέων τάσης | 155 |
| 6.3.4 | Τρόποι εγκατάστασης | 158 |
| 6.4 | Διεθνή πρότυπα..... | 159 |
| 7 | Επίλογος | 165 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.1 | Σύνοψη και συμπεράσματα..... | 165 |
| 7.2 | Μελλοντικές επεκτάσεις | 166 |
| 7.3 | Παράδειγμα υλοποίησης μετατροπέα ισχύος..... | 168 |
| 8 | Βιβλιογραφία | 171 |

1 *Εισαγωγή*

1.1 Ο ρόλος των ηλεκτρονικών ισχύος

Η παρούσα εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους, τη βελτίωση απόδοσης και την ανάπτυξη διαδεδομένων εφαρμογών των ηλεκτρικών συστημάτων. Η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος αυξάνεται ολοένα σε βιομηχανικούς, εμπορικούς, οικιακούς, αεροδιαστημικούς και σε στρατιωτικούς χώρους για εφαρμογές όπως θέρμανση, έλεγχο φωτισμού, AC και DC τροφοδοτικά, ηλεκτρικές μηχανές κ.α. [1].

Ένας σημαντικός ρόλος των ηλεκτρονικών ισχύος είναι η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της ελεγχόμενης και πιο αποτελεσματικής χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Στις μέρες μας, πάνω από το 40% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην Αμερική είναι επανεπεξεργασία μέσω κάποιας μορφής των ηλεκτρονικών ισχύος [2]. Προβλέπεται ότι η εφαρμογή αποτελεσματικής και αποδοτικής τεχνολογίας ηλεκτρονικών ισχύος θα οδηγήσει σε 25% - 35% μείωση της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι το 2020, αναμένεται ότι έως το 85% της παραγόμενης ενέργειας θα υποβληθεί σε επεξεργασία με ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος. Αυτό όμως θα εξαρτηθεί από το αν τα ηλεκτρονικά ισχύος καταφέρουν να πληρούν τις απαιτήσεις των εν δυνάμει εφαρμογών.

Επίσημες έρευνες αναφέρουν ότι, επί του παρόντος, περίπου το 25% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος [3], το 30% της ευρωπαϊκής κατανάλωσης [4] και 55% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ [2] καταναλώνεται από βιομηχανία ηλεκτρικών μηχανών, 21% από τη βιομηχανία φωτισμού και 13% από την υποδομή του Διαδικτύου. Ας εξετάσουμε όμως που βρίσκουν πιθανή εφαρμογή τα ηλεκτρονικά ισχύος και ποιες είναι οι κύριες απαιτήσεις που χρειάζεται να πληρούνται.

Η παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να διπλασιαστεί στα επόμενα είκοσι χρόνια. Μέχρι τότε αναμένεται ότι σχεδόν όλη η ηλεκτρική ενέργεια θα παράγεται μέσω μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος. Οι μετατροπείς ισχύος καθιστούν την χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας πιο αποδοτική και ευέλικτη, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση και το κόστος ισχύος. Οι ημιαγωγικές διατάξεις, από τις οποίες αποτελείται ένας μετατροπέας ισχύος, παρέχουν τον έλεγχο και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας με τροποποίηση της τάσης ρεύματος ή συχνότητας.

1.1.1 Ιστορική αναφορά

Το τρανζίστορ με απομονωμένη πύλη (IGBT), που εμφανίστηκε αρχικά από το Baliga το 1979 [5], έχει καθιερωθεί ως η συσκευή διάταξης ισχύος για εφαρμογές μεσαίας ως υψηλής ισχύος. Η αύξηση ζήτησης κατανάλωσης ηλεκτρονικών ισχύος σε συνδυασμό με το ολοένα αυξημένο ενδιαφέρον για περιβαλλοντολογικά θέματα, οδήγησε τους ανθρώπους να λάβουν σοβαρά υπόψη τους την αγορά των μετατροπών ισχύος (με IGBT). Μερικές από τις βασικές εφαρμογές αυτών είναι στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι η αγορά των μετατροπών ισχύος στα ηλεκτρικά υβριδικά αυτοκίνητα ανήλθε στα 200 εκατομμύρια δολάρια και αναμένεται να αυξηθεί με ρυθμό 30% ως το 2020.

1.2 Σημερινές απαιτήσεις

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.1, το εύρος των πιθανών εφαρμογών των ηλεκτρονικών ισχύος είναι πολύ μεγάλο. Ο απώτερος στόχος είναι να κάνουμε τα ηλεκτρονικά ισχύος σε αυτά τα συστήματα όσο το δυνατόν πιο διαφανή για το τελικό χρήστη, πράγμα που σημαίνει μικρότερο κόστος, σωστή διαχείριση των ήδη υπαρχόντων χώρων και ελάχιστη ή καμία επιπλέον μονάδα θερμοηλεκτρικής διαχείρισης. Αυτό θέτει πολύ αυστηρές απαιτήσεις για τα ηλεκτρονικά ισχύος, σχετικά με την ηλεκτρική και θερμική απόδοση, το κόστος και το μέγεθος. Στις ενότητες που ακολουθούν, θα συζητηθούν τα κύρια εμπόδια και τα όρια για την εκπλήρωση των απαιτήσεων αυτών στη σημερινή τεχνολογία ηλεκτρονικών ισχύος.

Η ανάγκη για το μέγεθος των μετατροπών ισχύος, καθώς και για το κόστος τους οδήγησε την έρευνα για νέα υλικά διατάξεων, τοπολογίες κυκλωμάτων καθώς και διαφορετική μοντελοποίηση για τη θερμότητα, που εκλύουν. Τα προβλήματα, που σχετίζονται με την απαγωγή της θερμότητας και τη μεταφορά θερμότητας μέσω μετατροπών ισχύος είναι ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα, που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής για να παράγουν αξιόπιστες

και αποτελεσματικές λύσεις για τις τεχνικές συσκευασίας αυτών. Κατά τη λειτουργία οι διατάξεις ισχύος, που απαρτίζουν τους μετατροπείς ισχύος, δε φθάνουν ποτέ το 100% της απόδοσης τους. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας (περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο) και στις διακοπτικές απώλειες ισχύος ενός μετατροπέα.

Οι απώλειες θερμότητας λαμβάνουν χώρα, όταν οι διατάξεις ισχύος βρίσκονται σε λειτουργία και διαρρέονται από ρεύμα. Οι διακοπτικές απώλειες αναπαριστούν την ισχύ, που διασκορπίζεται κατά τη μεταβατική λειτουργία της συσκευής από ενεργή (ON) σε ανενεργή κατάσταση (OFF). Υπολογίζεται ότι περίπου το 2-10% ισχύος διασκορπίζεται μέσα στη διάταξη λόγω αυτών των μεταβάσεων. Η θερμότητα που παράγεται είναι αποτέλεσμα αυτών των απωλειών και για αυτό το λόγο θα πρέπει να απαχθεί από τις διατάξεις ισχύος και να διοχετευθεί στο περιβάλλον χρησιμοποιώντας κατάλληλα συστήματα ψύξης. Συνεπώς, αν δε εφαρμοσθεί κάποιο κατάλληλο μοντέλο θερμικής προσομοίωσης για τον υπολογισμό ενός κατάλληλου συστήματος ψύξης, τότε αυξημένες θερμοκρασίες μπορούν δυσμενώς να επηρεάσουν την λειτουργία της συσκευής και κατ' επέκταση την αξιοπιστία του μετατροπέα ισχύος.

1.2.1 Θερμική προσομοίωση

Η πολεμική αεροπορία των Η.Π.Α. αποκάλυψε σε μια έρευνα σχετικά με τις αιτίες, που προκαλούν την βλάβη σε ένα ηλεκτρονικό εξοπλισμό ότι πάνω από το 55% αυτών των αστοχιών οφείλεται στη θερμότητα. Κρίνεται λοιπόν, όπως διαφαίνεται, απαραίτητο ως εργαλείο σχεδιασμού τεχνικών συσκευασίας, η θερμική προσομοίωση με σκοπό να υπολογιστούν οι θερμοκρασίες των διατάξεων ισχύος. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να προσδιοριστεί η αξιοπιστία. Για τις ημιαγωγικές διατάξεις ισχύος, που χρησιμοποιούνται στους μετατροπείς ισχύος χρησιμοποιούνται τυπικά δυο κύρια στάδια για την εκτίμηση της αξιοπιστίας:

- Προσομοίωση μεταβατικής λειτουργίας
- Εκτίμηση συσσωρευμένης βλάβης, που οφείλεται σε θερμομηχανική πίεση που εφαρμόζεται μέσα στη συσκευασία που περικλείει το μετατροπέα ισχύος.

Τα θερμικά μοντέλα διατάξεων είναι απαραίτητο για να βοηθήσουν σε ένα αρχικό στάδιο στην αποτροπή πιθανών επιλογών για το σχεδιασμό του μετατροπέα ισχύος, που ενδεχομένως να οδηγήσουν στη μείωση της αξιοπιστίας αλλά και της απόδοσής του. Με τη χρήση κατάλληλης θερμικής προσομοίωσης είναι δυνατόν να δοκιμασθούν νέες ιδέες άμεσα, χωρίς να χρειασθεί

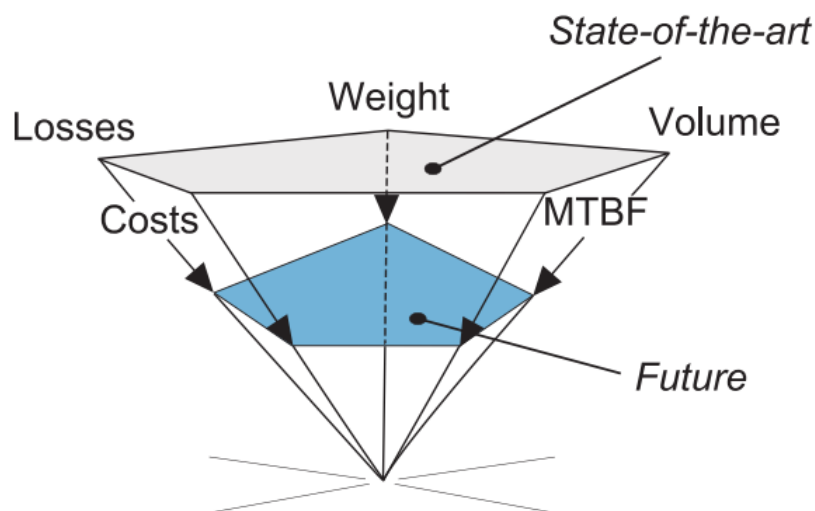
να κατασκευασθούν, καταναλώνοντας έτσι χρήμα ή χρόνο. Επιπλέον μπορεί να αποκαλύψει πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες λειτουργίες, οι οποίες οδηγούν σε αποτυχία ορθής λειτουργίας. Τα θερμικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέρος μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού συστήματος, εάν αυτά συνδεθούν με ηλεκτρικά και μηχανικά μοντέλα, ώστε να προσομοιωθούν με ρεαλιστικές συνθήκες όλες οι καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος και ειδικά εκείνες των μεταβατικών καταστάσεων.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι οι θερμικές προσομοιώσεις συχνά βασίζονται σε υποθέσεις και συνεπώς εξαρτάται από την εμπειρία και την γνώση του μηχανικού να επιβεβαιώσει τη χρησιμότητα και την ακρίβεια του αποτελέσματος μιας τέτοιας προσομοίωσης. Περιληπτικά θα λέγαμε ότι οι θερμικές προσομοιώσεις μπορούν να μειώσουν το χρόνο ανάπτυξης αλλά και το κόστος με τη σωστή πρόβλεψη όλων εκείνων των ενδεχόμενων καταστάσεων, που οδηγούν σε ολική ή μερική εσφαλμένη λειτουργία του συστήματος.

1.3 Η ικανοποίηση των απαιτήσεων των μελλοντικών

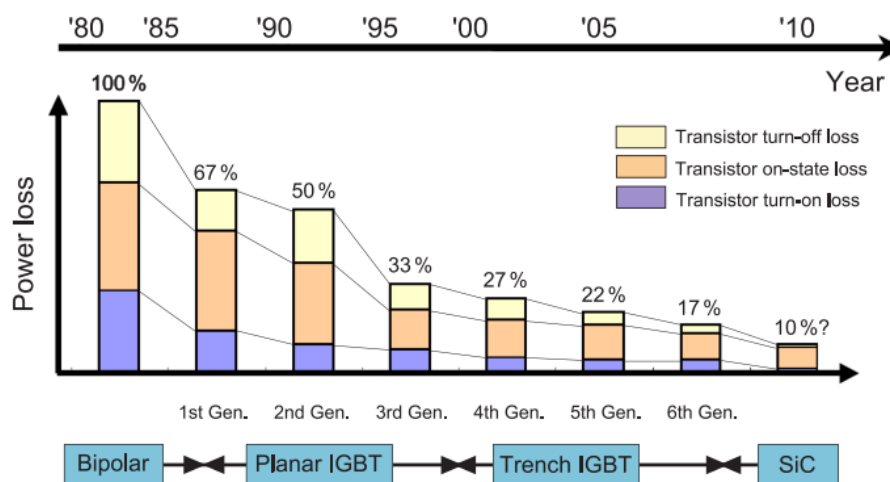
εφαρμογών

Η ανάπτυξη μονάδων ισχύος και ειδικότερα των μετατροπέων ισχύος έχει επικεντρωθεί στην αύξηση ρεύματος και επιπλέον τάσης, ώστε να μειωθεί ο αριθμός των συσκευών, που απαιτούνται αυξάνοντας τη θερμοκρασία λειτουργίας για να μειώσει τις απαιτήσεις του συστήματος ψύξης, βελτιώνοντας όμως την αξιοπιστία και μειώνοντας τις απώλειες καθώς και το αυξημένο μέγεθος, βάρος και κόστος. Ύστερα από μια τέτοια αναφορά, γίνεται αντιληπτό



Σχήμα 1.1 – Διάγραμμα που απεικονίζει τις τάσεις ανάπτυξης στους μετατροπείς ισχύος

πόσο πολύπλοκος είναι ο σχεδιασμός ενός μετατροπέα ισχύος μιας και οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι πολλές και αλληλοεξαρτώμενες. Το σχήμα 1.1 απεικονίζει αυτές τις παραμέτρους για τη σχεδίαση ενός μετατροπέα ισχύος με ακρίβεια. Οι σχεδιαστές οδηγούνται στο να παραδίδουν ολοένα και πιο αποτελεσματικούς μετατροπείς ισχύος, ώστε να εξασφαλίσουν μια καλή αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων και χαμηλό κόστος λειτουργίας. Οι λειτουργικές απώλειες για διαφορές διατάξεις ισχύος φαίνονται στο σχήμα 1.2. Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι οι απώλειες κινούνται αυτή τη χρονική περίοδο προς το 10%, όπως προαναφέρθηκε, λόγω εισαγωγής νέων υλικών στην αγορά κατασκευής μετατροπέων ισχύος.



Σχήμα 1.2 – Διάγραμμα που απεικονίζει τις απώλειες ισχύος για διάφορες συσκευές ισχύος από το 1980 κι έπειτα

Το κόστος είναι ένας επίσης σημαντικός παράγοντας, που ίσως ξεπερνά σε σημασία οποιονδήποτε άλλο παράγοντα. Στο κόστος περιλαμβάνεται το κόστος κατασκευής καθώς και το κόστος των υλικών. Οι σχεδιαστές επιλέγουν υλικά για τις τεχνικές συσκευασίας με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, ώστε να μεταφέρουν τη θερμότητα από την μικρή επιφάνεια της συσκευής στην επιφάνεια με το μεγαλύτερο εμβαδόν του συστήματος ψύξης με ευκολία. Είναι ζωτικής σημασίας για την λειτουργία μια συσκευής να μη ξεπεραστεί η μέγιστη λειτουργική θερμοκρασία της συσκευής. Η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία επαφής για IGBT's πυριτίου είναι 175°C. Όμως οι λειτουργικές θερμοκρασίες περιορίζονται για θερμοκρασίες κάτω των 150°C [6].

Επιπρόσθετα, εκτός της απαγωγής θερμότητας για τις συσκευές ισχύος, θα πρέπει οι συσκευές να είναι ηλεκτρικά μονωμένες. Αυτό είναι μια πρόκληση για ένα μηχανικό να βρει υλικά, που

να συνδυάζουν τα δυο προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, δηλαδή αυτό της καλής θερμοαγωγιμότητας και του μονωτικού υλικού. Η ηλεκτρική μόνωση είναι βασική, ώστε να εξασφαλισθεί η ασφαλής λειτουργία του μετατροπέα ισχύος. Ο συνδυασμός διαφορετικών υλικών, που χρησιμοποιείται σε μια τεχνική συσκευασίας, θα πρέπει να είναι μηχανικά συμβατή. Μια σημαντική θεώρηση που γίνεται συνήθως είναι ο συνδυασμός διαφορετικών υλικών να μπορεί να αντέχει τη θερμομηχανική πίεση κατά τη διάρκεια λειτουργίας του μετατροπέα. Επιπλέον η τοποθέτηση ημιαγωγικών διατάξεων μέσα στη μονάδα ισχύος θα πρέπει να είναι η βέλτιστη υπό το πρίσμα της θερμικής διαχείρισης.

Είναι επίσης σημαντικό να βελτιώσουμε το μέγεθος του συστήματος ψύξης. Η πυκνότητα ισχύος του μετατροπέα ισχύος διπλασιάζεται αυστηρά κάθε 10 χρόνια από το 1970 [7]. Η συνεχόμενη αυτή τάση έχει καταστεί αμφισβητήσιμη λόγω του γεγονότος ότι οι συσκευές πυριτίου, ειδικά αυτές των IGBT, έχουν αρχίσει να φθάνουν σε κορεσμό από άποψη βελτίωσης της απόδοσης. Η δυσκολία αυτή έχει προκύψει λόγω της επιθυμίας να αυξήσουν τα επίπεδα ρεύματος και τάσης μειώνοντας ταυτόχρονα το μέγεθος. Δυστυχώς όμως η απαίτηση για την ελαχιστοποίηση του μεγέθους του μετατροπέα ισχύος περιορίζεται από την ανάγκη να διατηρηθούν οι θερμοκρασίες των ημιαγωγικών διατάξεων ισχύος σε αποδεκτά επίπεδα. Για τον λόγο αυτό η έρευνα έχει πλέον στραφεί σε νέα ημιαγωγικά υλικά όπως το καρβίδιο του πυριτίου, το νιτρίδιο του γαλλίου και τον αδάμαντα. Συσκευές βασισμένες στα παραπάνω υλικά έχουν τη δυναμική να λειτουργούν σε θερμοκρασίες υψηλότερες, παρά το γεγονός ότι ακόμα οι τεχνικές συσκευασίας για τα υλικά αυτά παραμένουν ακόμα ασαφείς. Συνεπώς μια τεχνική συσκευασίας για ένα μετατροπέα ισχύος είναι ένα ισοζύγιο ανάμεσα σε διάφορους παράγοντες όπως αξιοπιστία, κόστος, αποτελεσματικότητα κι απόδοση [8], [9].

1.3.1 Ηλεκτρική και θερμική απόδοση

Τις τελευταίες δεκαετίες, ο μετατροπέας ισχύος κατασκευάζεται από τεχνολογία ημιαγωγικών διατάξεων [10]. Η μείωση της διακοπτικής περιόδου στις συσκευές ημιαγωγών ισχύος επέτρεψε να αυξηθεί τη συχνότητα λειτουργίας από 50Hz έως τη περιοχή των MHz. Αυτό οδήγησε σε τεράστιες βελτιώσεις την απόδοση, το μέγεθος και το κόστος των μετατροπέων ισχύος. Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία τεχνικών συσκευασίας παρέμεινε σχεδόν αμετάβλητη. Οι ημιαγωγικές διατάξεις ισχύος είτε αυτές συναντώνται ανεξάρτητες είτε ως στοιχεία που απαρτίζουν μονάδες ισχύος εξακολουθούν να χρησιμοποιούν σύρματα και μόνυβδο για τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις τους. Οι παρασιτικές επαγωγές, που σχετίζονται με αυτή την τεχνολογία σε συνδυασμό με βραχείς χρόνους μεταγωγής των ημιαγωγών περιορίζουν σημαντικά την ηλεκτρική απόδοση της συσκευής και ολόκληρου του μετατροπέα.

Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο σε εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη μεταφορά μεγάλων ρευμάτων σε μικρά χρονικά διαστήματα, όπως μικροεπεξεργαστές υψηλής ταχύτητας.

Για παράδειγμα, η παρασιτική επαγωγή της D2PAK τεχνικής συσκευασίας, που προέρχεται από συνδέσεις συρμάτων, είναι 5nH [11]. Αυτή η επαγωγή σε συνδυασμό με μεγάλες di/dt τιμές προκαλεί υπέρβαση της τάσης κατά μήκος των ημιαγωγικών διατάξεων, ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος και διακοπτικές απώλειες ισχύος [12]. Η τιμή της παρασιτικής αντίστασης της ίδιας συσκευασίας είναι 2mΩ σε σύγκριση με την αντίσταση αγωγής της συσκευής, η οποία μπορεί να είναι τουλάχιστον 4.5mΩ (για MOSFET's χαμηλής τάσης) [13]. Επιπλέον οι σύνδεσμοι καλωδίων (συρμάτων) είναι επίσης επιρρεπείς σε αποκόλληση από την επαφή του ημιαγωγού, λόγω ηλεκτρικής και θερμικής καταπόνησης, η οποία επηρεάζει σημαντικά την αξιοπιστία μετατροπέα. Οι επαγωγές διασυνδέσεων των πυκνωτών ενός μετατροπέα ισχύος, που υπάρχουν, μπορούν σε συνδυασμό με τη χωρητικότητα εξόδου των διακοπών ισχύος να αυξήσουν την τάση, που δέχονται στα άκρα τους οι ημιαγωγικοί διακόπτες.

Αναλυτικότερα, η συμβατική μέθοδος σχεδιασμού ενός μετατροπέα ισχύος αρχικά εξετάζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στοιχείων ξεχωριστά. Το στάδιο αυτό αφορά τον ηλεκτρικό σχεδιασμό για το σχηματικό του κυκλώματος. Στη συνέχεια ακολουθεί η φάση που έχει σχέση με τη τεχνική συσκευασίας ενός μετατροπέα ισχύος. Στο συγκεκριμένο σημείο, όλα τα προεπιλεγμένα στοιχεία, που έχουν επιλεγθεί αρχικά συνδυάζονται μεταξύ τους ώστε να κατασκευασθεί ο μετατροπέας, λαμβάνοντας υπόψη θέματα όπως αυτά της μηχανικής, ηλεκτρικές διασυνδέσεις, μηχανική προστασία και τη διαχείριση της θερμότητας. Αυτό καταλήγει σε μια προσέγγιση ράβε ξήλωνε (δοκίμασε και απέκλεισε επιλογή) για τη θερμική διαχείριση, όπου αφορούν και το τελευταίο στάδιο της υλοποίησης.

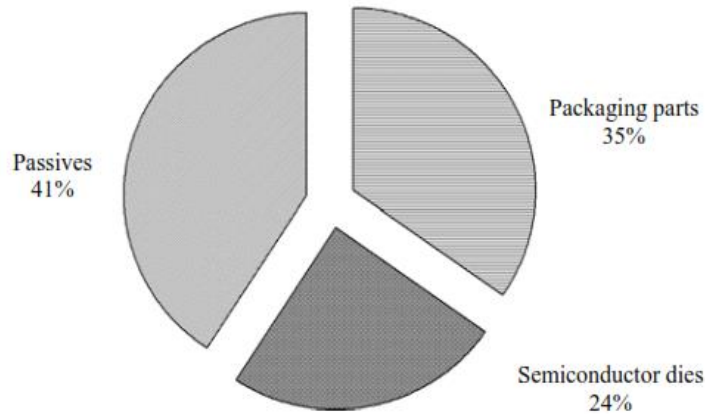
Κάθε στάδιο της συνολικής διαδικασίας για τη τεχνική συσκευασίας, από το σημείο δημιουργίας θερμότητας μέχρι το στοιχείο απαγωγής θερμότητας και το σύστημα ψύξης έχει τη δική του θερμική αντίσταση, η οποία κατ' επέκταση συμβάλλει στην συνολική θερμική αντίσταση του συστήματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο σε εφαρμογές όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες (όπως αυτοκινητοβιομηχανία) και πρέπει να διασφαλίζονται οι μέγιστες επιτρεπόμενες θερμικές αντιστάσεις, που θα εξασφαλίζουν την ορθή λειτουργία του συστήματος. Τέλος, δεδομένου ότι η θερμική συμπεριφορά είναι ισχυρά συνδεδεμένη με την κατασκευή σε χωροταξικό επίπεδο, θα πρέπει προφανώς να συμπεριληφθεί στη διαδικασία σχεδιασμού συσκευασίας ενός μετατροπέα ισχύος και να εξετασθεί αναλυτικότερα.

1.3.2 Κόστος

Το κόστος είναι συχνά μια κρίσιμη παράμετρος για να καθοριστεί αν τα ηλεκτρονικά ισχύος θα συμπεριλαμβάνονται ή όχι σε μια νέα εφαρμογή. Κατά το παρελθόν, το κόστος των ηλεκτρονικών ισχύος καθοριζόταν κυρίως από το κόστος των ημιαγωγικών διατάξεων. Καθώς η τεχνολογία των ημιαγωγών αναπτύχθηκε περισσότερο, η συνολική κατασκευή του μετατροπέα πλέον διαδραματίζει το κύριο ρόλο στο ολικό κόστος. Η παρούσα τεχνολογία κατασκευής των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος έχει φθάσει σε τέτοιο σε βαθμό, που καθιστά εξαιρετικά δύσκολο να μειωθεί το κόστος.

Η σημερινή φιλοσοφία βασίζεται κυρίως στην συναρμολόγηση των στοιχείων, που απαρτίζουν ένα μετατροπέα ισχύος. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, οι κατασκευαστές αυτών των στοιχείων εργάζονταν με γνώμονα τη μείωση του κόστους αυτών. Οι κατασκευαστές στοιχείων κυκλώματος, όπως πυκνωτές, αντιστάσεις, ακόμη και ημιαγωγικές διατάξεις, που έχουν μικρά περιθώρια κέρδους, δεν μπορούν να αντέξουν οικονομικά την έρευνα και την ανάπτυξη. Ως εκ τούτου, οι τεχνολογίες οδηγούνται ολοένα και περισσότερο σε ανάπτυξη, ενώ ακόμα κλάσματα του ενός Σεντ γίνονται σημαντικά, όταν το περιθώριο κέρδους υπολογίζεται [14].

Κατά την ανάλυση της φυσικής κατασκευής ενός τυπικού μετατροπέα, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι κάθε μονάδα του αποτελείται από έναν αριθμό άλλων επιμέρους στοιχείων. Εκτός από το κύριο ηλεκτρικό μέρος, κάθε στοιχείο εφοδιάζεται με επιπρόσθετο εξοπλισμό για ηλεκτρική διασύνδεση, προστασία και θερμική διαχείριση. Επιπλέον, η διάταξη του μετατροπέα περιλαμβάνει επίσης εξοπλισμό για ηλεκτρική διασύνδεση των μονάδων, μηχανική υποστήριξη και προστασία τους. Όλα αυτά τα μέρη πρέπει να κατασκευασθούν και συναρμολογηθούν, γεγονός που καθιστά το συνολικό κόστος της κατασκευής ενός μετατροπέα ισχύος πολύ υψηλό. Το σχ. 1.3 δείχνει πως κατανέμεται το συνολικό κόστος για κάθε υλικό, που υπάρχει σε ένα μετατροπέα [15]. Εύκολα μπορεί να φανεί από το σχήμα ότι το κόστος συσκευασίας αντιπροσωπεύει σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους υλικών. Επιπλέον, το επίπεδο της αυτοματισμού της κατασκευής μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος είναι μάλλον χαμηλό, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη ενός υψηλού εργατικού δυναμικού και κατά συνέπεια μετατρέπει το κόστος ιδιαίτερα δαπανηρό.

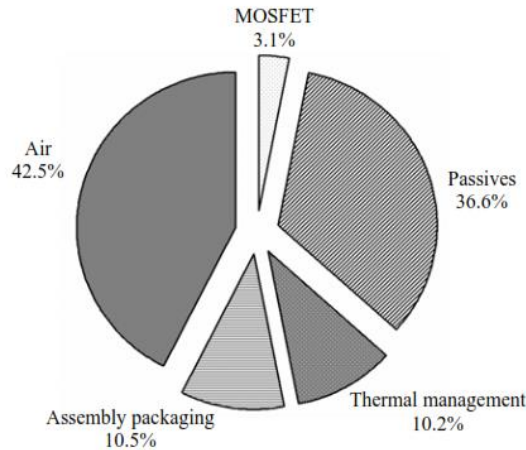


Σχήμα 1.4 – Διάγραμμα που απεικονίζει τη κατανομή του κόστους για κάθε υλικό ενός μετατροπέα ισχύος

1.3.3 Πυκνότητα ισχύος

Η πυκνότητα ισχύος έχει γίνει ένα ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης της απόδοσης του μετατροπέα, καθώς περιγράφει την ικανότητα να επεξεργάζεται μια ορισμένη ποσότητα ισχύος σε ένα συγκεκριμένο όγκο. Η πυκνότητα ισχύος εξαρτάται άμεσα από την θερμική διαχείριση και από τον όγκο του μετατροπέα. Στις μέρες μας, η θερμική διαχείριση των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος βασίζεται στα στοιχεία, που τον αποτελούν. Τα υψηλής πυκνότητας θερμότητας στοιχεία, όπως ημιαγωγοί ισχύος, συσκευάζονται ως ξεχωριστές συσκευές ή ως μια μονάδα ισχύος τοποθετημένα πάνω στην ψήκτρα. Η θερμότητα, που διαχέεται, μεταφέρεται σε μία κατεύθυνση μόνο, από την επαφή του στοιχείου μέσω του υποστρώματος ως τη ψήκτρα. Χαμηλής πυκνότητας θερμότητας στοιχεία, όπως όπως είναι παθητικά στοιχεία, που αποθηκεύουν ενέργεια, ψύχονται ξεχωριστά. Το κάθε στοιχείο έχει αυτόνομη μονάδα διαχείρισης θερμότητας. Αυτό τελικά οδηγεί σε μια αναποτελεσματική, ογκώδη δομή διαχείρισης θερμότητας, που δεν επιτρέπει υψηλές πυκνότητες ισχύος.

Όσον αφορά τον όγκο των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος, το μέγεθος των ημιαγωγών ισχύος έχει μειωθεί σε τέτοιο επίπεδο, όπου δεν είναι πλέον ο κύριος περιοριστικός παράγοντας στην επίτευξη υψηλών πυκνοτήτων ισχύος [1]. Πρόκειται λοιπόν για το χωρικό σχεδιασμό των παθητικών στοιχείων και του μετατροπέα ως σύνολο, καθώς και ο όγκος της δομής της συσκευασίας του μετατροπέα, που καταλαμβάνουν τον περισσότερο χώρο σε ένα μετατροπέα. Η δημοσίευση [16] δείχνει ότι ένα σημαντικό ποσοστό του όγκου των εμπορικών DC-DC μετατροπέων, σε ορισμένες περιπτώσεις τόσο υψηλές όσο 65%, καταλαμβάνονται από αέρα.



Σχήμα 1.5 – Διάγραμμα που απεικονίζει τον όγκο, που καταλαμβάνει κάθε στοιχείο μέσα σε ένα τροφοδοτικό laptop

Ένας από τους λόγους είναι η χρήση συμβατικών στοιχείων που απαρτίζουν τον μετατροπέα, τα οποία δεν έχουν σχεδιαστεί για την εν λόγω εφαρμογή, ούτε χωρικά αλλά ούτε ταιριάζει στην συσκευασία και στην τεχνολογία διασύνδεσης, που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

Το σχήμα 1.5 δείχνει την ογκομετρική κατανομή ενός τροφοδοτικού laptop, που χρησιμοποιεί συμβατική τεχνολογία. Φαίνεται λοιπόν ότι οι ημιαγωγοί ισχύος καταλαμβάνουν τον λιγότερο όγκο, ενώ τον περισσότερο τον καταλαμβάνει ο αέρας, υλικά της συσκευασίας καθώς και μια ογκώδης μονάδα θερμικής διαχείρισης.

1.4 Περιγραφή προβλήματος

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει το πρόβλημα με το οποίο έρχεται αντιμέτωπος ο ηλεκτρολόγος μηχανικός όσον αφορά τις τεχνικές συσκευασίας ηλεκτρονικών ισχύος. Σύμφωνα με τη δημοσίευση [143] η συσκευασία ηλεκτρονικών ισχύος ορίζεται ως εξής:

«Η συσκευασία ηλεκτρονικών ισχύος είναι ο συνδυασμός μηχανικής και τεχνολογιών κατασκευής, που απαιτούνται για να μετατραπεί ένα ηλεκτρικό και θερμικό κύκλωμα ως μια ηλεκτρομαγνητική σχεδίαση σε μια κατασκευαστική συνδεσμολογία».

Αναλυτικότερα, ο σχεδιαστής του συστήματος ισχύος πρέπει να γνωρίζει αρκετά καλά τα θέματα, που αφορούν τη μηχανική και συγκεκριμένα θέματα θερμοδυναμικής, ηλεκτρομαγνητικής και ηλεκτρικής θεωρίας. Ωστόσο, εκτός αυτών θα πρέπει να έχει υπόψη

του όλες εκείνες τις τεχνολογίες κατασκευής, με τις οποίες θα μπορεί να υλοποιήσει κάποιος ένα σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος. Στην επόμενη ενότητα γίνεται μια λεπτομερής περιγραφή του περιγράμματος αυτής της εργασίας, η οποία καλύπτει όλα τα παραπάνω θέματα.

1.5 Περίγραμμα διπλωματικής

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια επισκόπηση όλων των θεμελιωδών τρόπων μεταφοράς θερμότητας. Οι τρεις κυριότεροι είναι η αγωγή, η συναγωγή και η θερμική ακτινοβολία. Αναλύονται θεωρητικά και δίνεται όλο απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο, ώστε να γίνει εφικτή η προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας σε ένα μέσο. Στο κεφάλαιο 3, εφόσον ήδη έχουν περιγραφεί οι κυριότεροι τρόποι μεταφοράς θερμότητας, παρουσιάζονται αναλυτικά όλα εκείνα τα μοντέλα, που συναντώνται στη βιβλιογραφία, για τη θερμική προσομοίωση ενός συστήματος. Εξετάζονται μοντέλα που αναφέρονται τόσο στη μόνιμη όσο και στη μεταβατική κατάσταση, που είναι και το πιο σύνηθες πρόβλημα σε μια τέτοια προσομοίωση. Το κεφάλαιο 3 κρίνεται αρκετά σημαντικό, καθότι ο μηχανικός κατόπιν μιας θερμικής προσομοίωσης ενός συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος, είναι σε θέση να σχεδιάσει το κατάλληλο σύστημα ψύξης, που θα επιτρέπει τη ορθή λειτουργία του συστήματος σε επιτρεπόμενες, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, θερμοκρασιακές περιοχές. Στο κεφάλαιο 4, ο αναγνώστης έχει τη δυνατότητα να μελετήσει όλα εκείνα τα θέματα, που απασχολούν την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα ενός προϊόντος, που απαρτίζεται από ηλεκτρονικά ισχύος. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στους τρόπους, με τους οποίους είναι δυνατόν να υπάρξει ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή προς και από το υπό μελέτη σύστημα ισχύος. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τρόποι μέτρησις ηλεκτρομαγνητικών παρενοχλήσεων αλλά και οι τρόποι θωράκισης και προστασίας από κάθε είδους ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στο κεφάλαιο 5, γίνεται πλέον η ανάλυση των τεχνικών συσκευασίας σε επίπεδο πλέον πλακέτας ή τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Γίνεται μια θεωρητική προσέγγιση για την επιλογή στοιχείων, με μοναδικό γνώμονα την ηλεκτρική, ηλεκτρομαγνητική αλλά και χωροταξική οπτική γωνία. Στη συνέχεια, γίνεται μια μελέτη ολοκλήρωσης ή αλλιώς ενσωμάτωσης κάποιων στοιχείων, που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή ενός συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος, σε ένα στοιχείο ή τμήμα του συστήματος. Τέλος στο κεφάλαιο 6, αναλύεται ένα ακόμη αλλά εξίσου σημαντικό θέμα με το οποίο έρχεται αντιμέτωπος ο σχεδιαστής ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος, που είναι η προστασία των διατάξεων ισχύος από ενδεχόμενες κρουστικές υπερτάσεις. Γίνεται μια θεωρητική παρουσίαση, που αφορά τον ορισμό, τις αιτίες αλλά και τις συνέπειες που επιφέρουν αυτές οι υπερτάσεις. Επιπλέον, παρέχεται η λύση για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων, οι απαγωγείς υπερτάσεων (SPD), στους οποίους γίνεται εκτενής αναφορά όσον αφορά τα τυπικά χαρακτηριστικά που τους διέπουν, τα είδη τους αλλά και τους τρόπους εγκατάστασής τους.

Στον επίλογο αυτής της διπλωματικής εργασίας, ή αλλιώς στο κεφάλαιο 7 γίνεται μια σύνοψη όλων των κεφαλαίων, που αναπτύχθηκαν καθώς μελλοντικές επεκτάσεις για τις τεχνικές συσκευασίας των ηλεκτρονικών ισχύος.

2

Θεμελιώδεις τρόποι μεταφοράς

Θερμότητας

Από τη θερμοδυναμική γνωρίζουμε ότι η ενέργεια μπορεί να συναλλάσσεται μεταξύ συστημάτων υπό μορφή θερμότητας. Ως θερμότητα ορίζεται η μορφή ενέργειας, που μεταδίδεται μέσα από το όριο ενός θερμοδυναμικού συστήματος συγκεκριμένης θερμοκρασίας προς ένα άλλο σύστημα ή στο περιβάλλον, που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, λόγω ακριβώς αυτής της διαφοράς θερμοκρασίας των δυο συστημάτων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ένα κομμάτι θερμού μετάλλου, που αν τοποθετηθεί μέσα σε κρύο νερό, το κομμάτι του μετάλλου ψύχεται, ενώ το νερό θερμαίνεται έως ότου και τα δύο αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία. Η ροή αυτής της θερμότητας από το θερμό σώμα προς το ψυχρό οφείλεται στην εξίσωση θερμοκρασίας μεταξύ δυο συστημάτων διαφορετικής θερμοκρασίας. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι το κάθε σύστημα δε περιέχει θερμότητα. Η θερμότητα μπορεί να οριστεί μόνο κατά τη διαδικασία μεταφοράς της από ένα σύστημα σε ένα άλλο και για όσο χρόνο διαρκεί η μεταφορά. Για αυτό κρίνεται σημαντικό να ορίσουμε σε αυτό το σημείο ότι μετάδοση θερμότητας είναι η μεταφορά ενέργειας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς. Η θερμότητα μπορεί να μεταδίδεται από ένα σώμα σε ένα άλλο με τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς [17].

2.1 Αγωγή (Conduction)

Ο πρώτος μηχανισμός αναφέρεται σε ακίνητο μέσο (στερεό, υγρό ή αέριο) και ονομάζεται αγωγή (conduction). Η αγωγή θερμότητας αναφέρεται σε μακροσκοπικώς ακίνητα σώματα (στερεά ή ρευστά σε ακινησία) και συνδέεται με τη συναλλαγή ενέργειας σε μοριακό επίπεδο. Ουσιαστικά πρόκειται για τη μετάδοση ενέργειας από στοιχειώδη σωματίδια υψηλότερης προς σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας δια της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης.

Ας θεωρήσουμε ένα αέριο, το οποίο μακροσκοπικά βρίσκεται σε ακινησία. Έστω ότι το αέριο βρίσκεται μεταξύ δυο επιφανειών διαφορετικής θερμοκρασίας. Η υψηλότερη θερμοκρασία σε

κάποιο σημείο του αερίου συνδέεται με υψηλότερη ενέργεια των σωματιδίων του αερίου λόγω τυχαίας κίνησης, λόγω εσωτερικής περιστροφής και λόγω ταλάντωση των ατόμων του κάθε μορίου του αερίου. Τα σωματίδια σε επαφή με τη πιο θερμή επιφάνεια διαθέτουν υψηλότερη ενέργεια, την οποία μεταδίδουν στα γειτονικά τους σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας μέσω των μεταξύ τους συγκρούσεων. Έτσι στην περίπτωση παρουσίας θερμοκρασιακής κλίσης στο εσωτερικό του αερίου υπάρχει μετάδοση ενέργειας από την περιοχή της υψηλότερης θερμοκρασίας προς την περιοχή της χαμηλότερης θερμοκρασίας, μέσω ακριβώς των συγκρούσεων των μορίων. Η μετάδοση αυτής της ενέργειας μέσω των τυχαίων συγκρούσεων των μορίων καλείται διάχυση ενέργειας (diffusion).

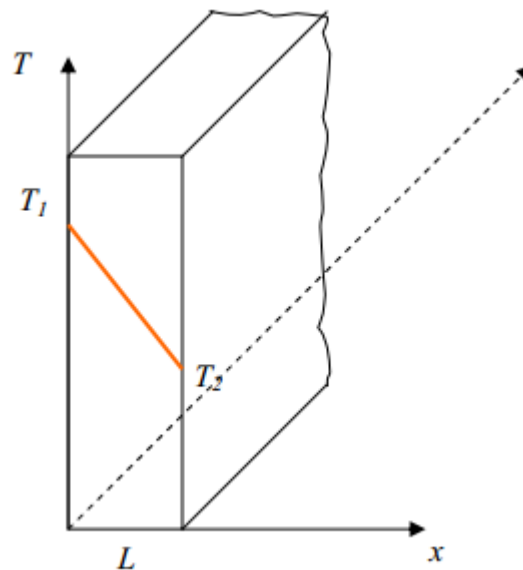
Παρόμοιος μηχανισμός εμφανίζεται και στην περίπτωση των ακίνητων υγρών. Στην περίπτωση όμως των υγρών οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων είναι πολύ πιο ισχυρές (παρουσία ισχυρών διαμοριακών δυνάμεων εκτός των συγκρούσεων), οπότε περιμένουμε λογικά το φαινόμενο της διάχυσης της ενέργειας μέσω της αλληλεπίδρασης των μορίων να είναι πιο έντονο. Στην περίπτωση των στερεών η διάδοση της ενέργειας πραγματοποιείται μέσω δυο μηχανισμών. Στην περίπτωση των μονωτών, η ενέργεια διαδίδεται με μορφή πλεγματοκινημάτων εντός της δομής του στερεού. Τα κύματα αυτά επάγονται από την ταλαντωτική κίνηση των ατόμων. Στη περίπτωση των αγωγών, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συμμετέχουν, μέσω της κίνησής τους στη διάχυση της θερμικής ενέργειας στον όγκο του στερεού, μαζί με τα πλεγματοκινημάτια. Σε αυτήν την περίπτωση, η αγωγή αναφέρεται σε θερμική αγωγιμότητα όπου οι απώλειες αγωγιμότητας αναφέρεται σε απώλειες, που σημειώθηκαν σε συσκευές ημιαγωγών, όπου διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή μακροσκοπικά περιγράφεται σε μια διάσταση από τον νόμο του Fourier. Ας θεωρήσουμε επίπεδο σώμα σταθερού πάχους L με τις άλλες δυο διαστάσεις του να εκτείνονται στο άπειρο. (βλ. Σχ. 2-1). Αν επικρατεί στη μια πλευρά του θερμοκρασία T_1 και στην άλλη πλευρά του θερμοκρασία T_2 μικρότερη της T_1 , ενώ η κλίση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του είναι σταθερή (γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας), τότε ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας κατά τη διεύθυνση x (κάθετα στο επίπεδο του σώματος) ανά μονάδα επιφανείας δίδεται από τον εξής τύπο:

$$q_x^n = -k \frac{dT}{dx} \quad (2-1)$$

Το παραπάνω μέγεθος ονομάζεται πυκνότητα ροής θερμότητας ή πυκνότητα θερμικής ροής (heat flux), ενώ η μονάδα μέτρησης του W/m^2 (ισχύς ανά μονάδα επιφανείας). Εκφράζει τη θερμική ενέργεια, που περνά από μοναδιαία επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου, λόγω της θερμοκρασιακής κλίσης σε διεύθυνση κάθετη στην εν λόγω επιφάνεια. Το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω σχέση οφείλεται στο γεγονός ότι η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται

από τις υψηλότερες στις χαμηλότερες θερμοκρασίες, δηλαδή κατά τη φορά των αρνητικών θερμοκρασιακών κλίσεων.



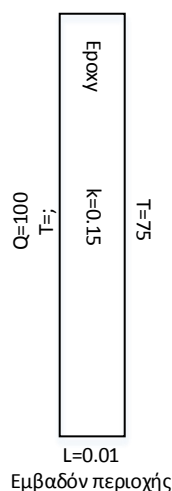
Σχ. 2.1 – Μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας με αγωγή σε σώμα πάχους L κατά τη διεύθυνση x και άπειρων διαστάσεων στις δυο άλλες διευθύνσεις.

Ο συντελεστής k στην παραπάνω σχέση ονομάζεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (thermal conductivity) με μονάδα μέτρησης ($Wm^{-1}K^{-1}$). Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από το υλικό στο οποίο εφαρμόζεται η θερμοκρασιακή κλίση, ενώ μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία [17].

Ας υποθέσουμε ένα παράδειγμα. Όπως αναφέρθηκε, η αγωγή λαμβάνει χώρα σε στερεά, όπου χρησιμοποιώντας απλή αναλογική, η θερμότητα μεταφέρεται από το μόριο ενός στερεού στο άλλο. Στο σχ. 2-2, υπάρχει ένα στρώμα κόλλας με θερμική αγωγιμότητα 0.15 και πάχους 0,01 με εμβαδόν 1. Μια πηγή θερμότητας από την αριστερή πλευρά του σχήματος παράγει ποσό θερμότητας τάξης 100. Η επιφανειακή θερμοκρασία από τη δεξιά πλευρά είναι 75. Αναζητούμε να βρούμε ποια είναι η θερμοκρασία στην αριστερή πλευρά. Με βάση τους τύπους που αναφέρθηκαν έχουμε:

$$Q = \frac{kA}{L}(T_{hot} - T_{cold}) \Rightarrow Q = \frac{kA}{L}(\Delta T) \Rightarrow$$

$$100 = \frac{0,15 \cdot 1}{0,01}(\Delta T) \Rightarrow \Delta T = 6,67 \Rightarrow T = 75 + 6,67 = 81,67$$



Σχ. 2.2 – Παράδειγμα εφαρμογής μεταφοράς θερμότητας με αγωγή – Υπολογισμός θερμοκρασίας.

2.2 Συναγωγή (Convection)

Ο δεύτερος μηχανισμός αναφέρεται σε μετάδοση θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού και ονομάζεται συναγωγή (convection). Στην περίπτωση αυτή συνυπάρχουν δυο μηχανισμοί μετάδοσης ενέργειας. Ο πρώτος είναι η διάχυση ενέργειας μέσω των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων (όπως και στην περίπτωση της αγωγής), ενώ ο δεύτερος μηχανισμός συνδέεται με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού. Κατά τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού τα στοιχειώδη σωματίδια, που απαρτίζουν τα στοιχεία του ρευστού, μεταφέρουν μαζί με τη μάζα τους και την θερμική ενέργεια, που σχετίζεται με την τυχαία μεταφορική κίνησή τους, την εσωτερική περιστροφή τους και την ταλάντωσή τους. Έτσι η συνολική μετάδοση θερμικής ενέργειας είναι το άθροισμα της μετάδοσης λόγω συγκρούσεων (διάχυση) και της μετάδοσης λόγω της μεταφοράς της θερμικής ενέργειας των σωματιδίων μέσω μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού.

Η κύρια περιοχή εφαρμογής της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή είναι η μετάδοση από στέρεη επιφάνεια προς κινούμενο ρευστό σε επαφή με την επιφάνεια, ή το αντίθετο. Γνωρίζουμε από τη μηχανική ρευστών ότι στην περιοχή επαφής του ρευστού με στέρεη επιφάνεια αναπτύσσεται το λεγόμενο οριακό στρώμα ταχύτητας ως αποτέλεσμα της δράσης των δυνάμεων συνεκτικότητας στο εσωτερικό του ρευστού. Στο οριακό στρώμα εμφανίζεται ομαλή μετάβαση από την ταχύτητα της ροής μακριά από το τοίχωμα (ταχύτητα ελεύθερης

ροής) στην μηδενική ταχύτητα στην επιφάνεια ακίνητου τοιχώματος. Στην περίπτωση κινούμενης επιφάνειας, η ταχύτητα της ροής πάνω στην επιφάνεια ισούται με την ταχύτητα της επιφάνειας.

Στην περίπτωση διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της στερεάς επιφάνειας και του ρευστού εμφανίζεται και το λεγόμενο θερμικό οριακό στρώμα (thermal boundary layer), του οποίου το πάχος μπορεί να είναι ίσο, μικρότερο ή μεγαλύτερο από αυτό του οριακού στρώματος ταχύτητας. Εντός του θερμικού οριακού στρώματος εμφανίζεται ομαλή μεταβολή της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία της στερεής επιφάνειας T_s έως τη θερμοκρασία της κύριας ροής T_∞ . Στην περίπτωση που η πρώτη είναι μεγαλύτερη της δεύτερης, η ροή θερμότητας πραγματοποιείται από την θερμή επιφάνεια στο ψυχρότερο ρευστό.

Η ροή που προκαλεί τη συναγωγή θερμότητας μπορεί να οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες ή στην ίδια τη μετάδοση θερμότητας. Έτσι, στην περίπτωση των σωμάτων κεντρικής θέρμανσης ενός σπιτιού, ο θερμαινόμενος ακίνητος αέρας λόγω μείωσης της πυκνότητας του ανέρχεται, προκαλώντας φυσική κυκλοφορία στο εσωτερικό δωματίου. Η φυσική αυτή κυκλοφορία δίνει την αναγκαία μεταφορική κίνηση για την εμφάνιση συναγωγής μεταξύ του θερμαντικού σώματος και του αέρα. Ο μηχανισμός της συναγωγής είναι πολύ πιο έντονος από τον αντίστοιχο της αγωγής. Στην παραπάνω περίπτωση έχουμε συναγωγή με φυσική κυκλοφορία.

Στην περίπτωση που η ροή του ρευστού συντηρείται από εξωτερικό αίτιο (μια αντλία ή έναν ανεμιστήρα), τότε έχουμε μετάδοση θερμότητας με συναγωγή με εξαναγκασμένη κυκλοφορία. Συνήθως με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία συνυπάρχει και φυσική κυκλοφορία λόγω των αντωτικών δυνάμεων από τη μεταβολή των πυκνοτήτων, μόνο που το πρώτο φαινόμενο είναι πιο έντονο στις περισσότερες των περιπτώσεων.

Συνήθως η συναλλαγή θερμότητας με συναγωγή αναφέρεται στην εσωτερική θερμική ενέργεια, η οποία συνδέεται με τη θερμική του κίνηση. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου η μετάδοση θερμότητας συνοδεύεται από αλλαγή φάσης, δηλαδή περιλαμβάνει και τη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης. Ένα παράδειγμα της παραπάνω περίπτωσης είναι η μετάδοση θερμότητας προς το ρευστό από τις φυσαλίδες ατμού που ανέρχονται προς την επιφάνεια, σε δοχείο με νερό που βράζει. Αυτές προκαλούν ισχυρή κίνηση εντός του ρευστού, με αποτέλεσμα να εντείνεται η συναγωγή. Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή, όταν υπάρχει και αλλαγή φάσης, είναι πολύ πιο έντονη από την απλή περίπτωση της συναγωγής.

Το φαινόμενο της συναγωγής εξαρτάται από την ροή του ρευστού (και τα χαρακτηριστικά της) και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και της στερεής επιφάνειας. Μια γενική σχέση που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι ο νόμος ψύξης του Νεύτωνα (Newton's law of cooling), όπου η μεταφορά θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός ρευστού δίνεται από τη σχέση:

$$q_s^n = h(T_s - T_\infty) \quad (2-2)$$

όπου $q_s^n = (W)$ η ροή θερμότητας επιφάνειας, $T_s (K)$ η θερμοκρασία επιφάνειας, T_∞ η θερμοκρασία του ρευστού και $h (WK^{-1})$ ο συντελεστής διάχυσης θερμότητας [17].

2.3 Θερμική ακτινοβολία (radiation)

Ο τρίτος μηχανισμός στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε σώμα πεπερασμένης θερμοκρασίας εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Συνεπώς μεταξύ δύο σωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας θα υπάρχει μετάδοση θερμότητας, χωρίς την ανάγκη παρουσίας κάποιου ενδιάμεσου σώματος, αλλά μέσω της θερμικής ακτινοβολίας (radiation). Αναλυτικότερα κάθε σώμα (στερεό, υγρό ή αέριο), το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία διαφορετική από 0K, εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία (σε μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – φωτονίων) δημιουργείται με αλλαγές στην ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων των ατόμων του σώματος. Σε αντίθεση με τους δυο προηγούμενους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας (αγωγή και συναγωγή), η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη ύλης, αλλά μπορεί να πραγματοποιείται και εν κενό (στην πραγματικότητα η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία πραγματοποιείται πιο αποδοτικά εν κενό). Στην παρούσα φάση θα ασχοληθούμε με ακτινοβολία στερεών επιφανειών και δε θα εξετάσουμε τις περιπτώσεις ακτινοβολίας από και προς υγρά και αέρια σώματα.

Ας θεωρήσουμε τη στερεή εξωτερική επιφάνεια ενός σώματος. Η ακτινοβολία που εξέρχεται από την επιφάνεια παράγεται στο εσωτερικό του σώματος και ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια εξέρχεται από μοναδιαίο εμβαδόν της επιφάνειας καλείται πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας E_b , ενώ η μέγιστη τιμή τις E_b δίδεται από τον νόμο Stefan – Boltzmann ως εξής:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2-3)$$

όπου T_s η απόλυτη θερμοκρασία επιφάνειας σε (K) και σ η σταθερά των Stefan – Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$).

Εκτός από την εκπομπή ακτινοβολίας από μια επιφάνεια, γίνεται και πρόσπτωση ακτινοβολίας, η οποία παράγεται εκτός της επιφάνειας. Αν G η πυκνότητα προσπίπτουσας ακτινοβολίας (ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας), τότε ένα τμήμα της μπορεί να απορροφηθεί από το σώμα (αυξάνοντας την εσωτερική ενέργεια), ένα τμήμα μπορεί να ανακλαστεί, ενώ το υπόλοιπο τμήμα μπορεί να διαπεράσει το σώμα (εάν αυτό είναι ημιδιαφανές).

Το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, που απορροφάται από το σώμα περιγράφεται με την απορροφητικότητα α , οπότε ισχύει:

$$G_{\text{απορρ}} = \alpha G \quad (2-4)$$

Προφανώς η απορροφητικότητα παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Η απορροφητικότητα της επιφάνειας δεν εξαρτάται μόνο από την επιφάνεια αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας. Η ίδια επιφάνεια να έχει διαφορετική απορροφητικότητα σε ακτινοβολίες διαφορετικού μήκους κύματος. Μόνο η απορροφούμενη ακτινοβολία μεταβάλλει την εσωτερική ενέργεια του σώματος, ενώ η ανακλώμενη και η ακτινοβολία που διαπερνά το σώμα δεν έχουν προφανώς καμία επίδραση σε αυτή.

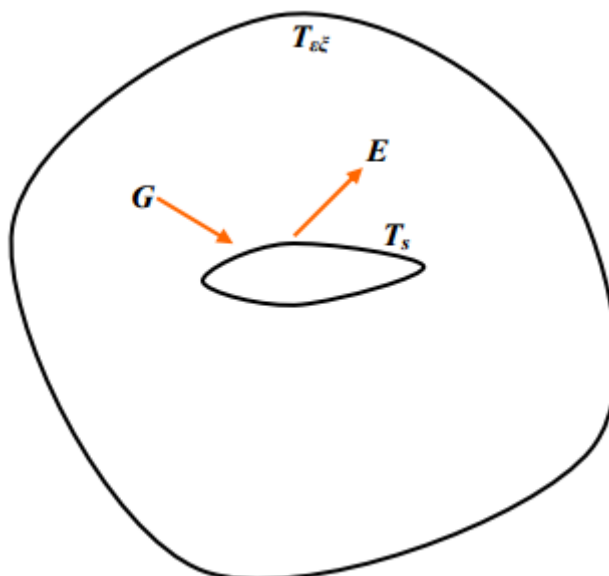
Μια ειδική περίπτωση της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία αφορά στην περίπτωση μιας μικρής επιφάνειας, η οποία περικλείεται ολοκληρωτικά από μια αρκετά μεγαλύτερη επιφάνεια, η οποία βρίσκεται σε διαφορετική σταθερή θερμοκρασία $T_{εξ}$ (βλ. σχ. 2.3). Μια τέτοια περίπτωση επιφάνειας είναι τα τοιχώματα ενός φούρνου. Στην περίπτωση αυτή η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην μικρή εσωτερική επιφάνεια θερμοκρασίας T_s μπορεί να προσεγγιστεί από την ακτινοβολία που παράγει ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας $T_{εξ}$, δηλαδή:

$$G = \sigma T_{εξ}^4 \quad (2-5)$$

Η καθαρή ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας που εξέρχεται από την μικρή εσωτερική επιφάνεια εμβαδού A θα δίδεται από τη σχέση:

$$q_{12} = \varepsilon_1 \sigma A_{11} (T_s^4 - T_{εξ}^4) \quad (2-6)$$

όπου ε_1 η ικανότητα εκπομπής (emissivity) της επιφάνειας, με τιμές μεταξύ 0 και 1. Η τιμή της εξαρτάται από το υλικό και τα χαρακτηριστικά επιφάνειας και δείχνει πόσο προσεγγίζει η συγκεκριμένη επιφάνεια με το μέλαν σώμα. Με A_{11} (m^2) συμβολίζουμε το εμβαδόν της περιοχής, T_s η απόλυτη θερμοκρασία στη μικρή εσωτερική επιφάνεια, ενώ $T_{εξ}$ η απόλυτη θερμοκρασία στη μεγάλη περιβάλλουσα επιφάνεια. Το σ είναι η σταθερά Stefan – Boltzmann (έχει αναλυθεί προηγουμένως) [17].



Σχ. 2.3 – Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δυο επιφανειών, όπου η μια περικλείει την άλλη. Οι δυο επιφάνειες βρίσκονται σε διαφορετικής θερμοκρασίες.

2.4 Κατασκευή διαφορικής εξίσωσης αγωγής θερμότητας

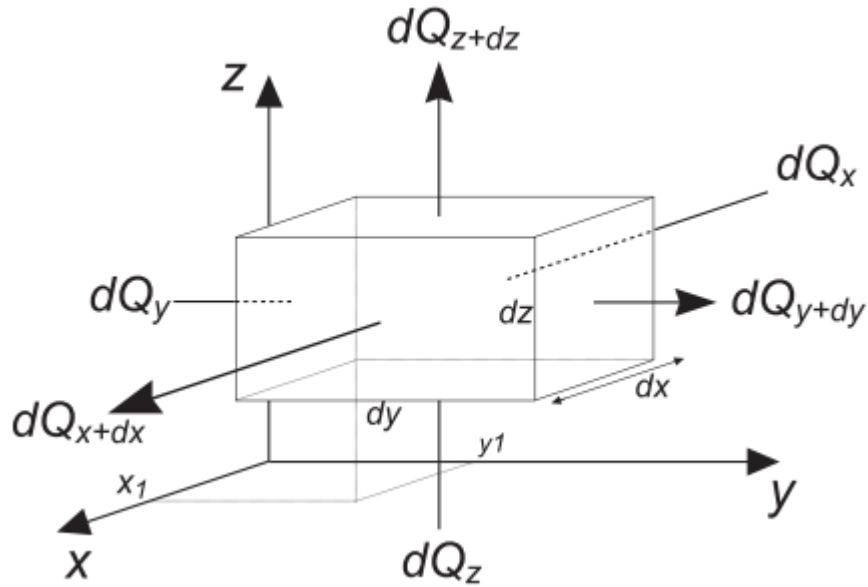
Η εξίσωση θερμότητας προκύπτει από τον νόμο Fourier και το νόμο διατήρησης της ενέργειας. Ας υποθέσουμε έναν όγκο θερμοαγωγίμου υλικού, όπως απεικονίζεται στο σχ. 2.4. Είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, του οποίου οι πλευρές είναι παράλληλες με τους άξονες ενός συστήματος συντεταγμένων και των οποίων τα μήκη είναι dx , dy και dz . Το στερεό υποτίθεται ότι είναι ομογενές, ιστροπικό και έχει θερμική αγωγιμότητα k , που είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας. Με Q (W) συμβολίζεται η ενέργεια της θερμότητας.

Σύμφωνα λοιπόν με το νόμο Fourier, η συνολική ποσότητα της θερμικής ροής μέσα από την επιφάνεια $dydz$ στο σημείο x_1 τη χρονική στιγμή dt είναι:

$$dQ_{x_1} = -dydzk(T) \frac{\partial T}{\partial x} dt \quad (2-7)$$

Όπου το ποσό των απωλειών θερμότητας μέσω της επιφάνειας $dydz$ τη χρονική στιγμή $x_1 + dt$ είναι:

$$dQ_{x_1+dx} = dQ_{x_1} + \frac{\partial}{\partial x} (dQ_{x_1}) dx \quad (2-8)$$



Σχ. 2.4 – Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο ενός θερμοαγώγιμου υλικού

Αντικαθιστώντας την (2-7) στην (2-8) λαμβάνουμε το εξής:

$$dQ_{x_1} - dQ_{x_1+dx} = dydz \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dt \quad (2-9)$$

Ομοίως από τις άλλες επιφάνειες έχουμε τις εξής αντίστοιχες εξισώσεις:

$$dQ_{y_1} - dQ_{y_1+dy} = dx dz \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dt \quad (2-10)$$

$$dQ_{z_1} - dQ_{z_1+dz} = dy dx \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dt \quad (2-11)$$

Υποθέτοντας ότι το υλικό δε παράγει δική του θερμότητα, ο βασικός νόμος διατήρησης της ενέργειας θερμότητας για τον όγκο αυτό δηλώνει το βαθμό μεταβολής της θερμότητας εσωτερικά του όγκου στο δίκτυο ροής θερμότητας μέσω συνόρων. Έτσι:

$$dQ_{net} = dQ_{x_1} - dQ_{x_1+dx} + dQ_{y_1} - dQ_{y_1+dy} + dQ_{z_1} - dQ_{z_1+dz} \quad (2-12)$$

Χρησιμοποιώντας βασικές γνώσεις φυσικής, η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας U ενός όγκου σε χρόνο dt μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$dU = \rho_1 c_p dx dy dz \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) dt \quad (2-13)$$

όπου ρ ($kg m^{-3}$) είναι η πυκνότητα και c_p ($J K^{-1} K^{-1}$) η ειδική θερμοχωρητικότητα. Σύμφωνα με το πρώτο θερμοδυναμικό νόμο γνωρίζουμε ότι η εσωτερική ενέργεια ισούται με το ποσό θερμότητας του δικτύου, δηλαδή:

$$dU = dQ_{net} \quad (2-14)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (2-9), (2-10), (2-11) στην εξίσωση (2-12), η εξίσωση που προκύπτει αν αντικατασταθεί στην (2-13), (2-14) έχουμε ότι:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (2-15)$$

Το πρώτο μέλος της παραπάνω εξίσωσης συμβολίζει τη μεταβολή της αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας, ενώ το δεύτερο μέλος τη μεταφορά θερμικής ενέργειας του δικτύου στον όγκο (εισοχής κι εκροής). Υποθέτοντας τώρα ότι οι φυσικές ιδιότητες παραμένουν αμετάβλητες (δηλ. το k είναι ανεξάρτητο της θερμοκρασίας) καταλήγουμε στην τρισδιάστατη εξίσωση της θερμότητας:

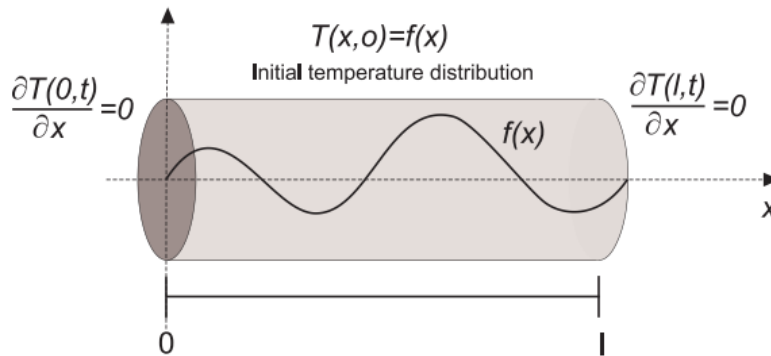
$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) \quad (2-16)$$

όπου $\alpha = \frac{k}{c\rho}$, η θερμική διαχυτότητα που αναπαριστά το λόγο της θερμικής αγωγιμότητας προς τη θερμική χωρητικότητα. Με άλλα λόγια εκφράζει πόσο γρήγορα η θερμότητα διαχέεται μέσω ενός δεδομένου υλικού.

2.4.1 Επιλύοντας τη μονοδιάστατη εξίσωση θερμότητας

Υποθέτουμε το πρόβλημα αγωγής θερμότητας σε μια διάσταση, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.5, το οποίο αποτελεί το κλασικό πρόβλημα αγωγής θερμότητας μέσω μιας ράβδου. Η

επίλυση αυτής της εξίσωσης είναι μια έκφραση $T(x, t)$. Η αρχική θερμοκρασιακή κατανομή και οι συνοριακές συνθήκες για τη ροή θερμότητας είναι γνωστές και ονομάζονται συνθήκες Neumann. Η υπόθεση ότι η ράβδος είναι ιδανικά μονωμένη, έτσι ώστε να μην υπάρχει αγωγή θερμότητας εκτός των ορίων της ράβδου.



Σχ. 2.5 – Αγωγή θερμότητας πάνω σε μια ράβδο με γνωστές συνοριακές συνθήκες

Υποθέτοντας ότι η ενέργεια της θερμότητας δε δημιουργείται αλλά ούτε χάνεται στο εσωτερικό της ράβδου, εφαρμόζουμε την ακόλουθη μονοδιάστατη εξίσωση θερμότητας:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \right), \text{ για όλα } 0 < x < l \text{ και } t > 0. \quad (2-17)$$

Συνοριακές συνθήκες:

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial t} = \frac{\partial T(l,t)}{\partial t} \quad (2-18)$$

Αρχικές συνθήκες:

$$T(x, 0) = f(x) \quad (2-19)$$

2.4.1.1 Γραμμικοποίηση της εξίσωσης θερμότητας

Όταν οι ιδιότητες του υλικού k, ρ, c παραμένουν σταθερές στην εξίσωση θερμότητας, τότε αυτή ονομάζεται γραμμική. Με βάση αυτή τη παραδοχή υπάρχουν πολλά μαθηματικά προτερήματα,

όπως ότι κάποιος μπορεί να χρησιμοποιήσει την αρχή της υπέρθεσης. Υπολογιστικά βέβαια είναι πολύ πιο εύκολο κάποιος να επιλύσει μια γραμμική μερική διαφορική εξίσωση, από ότι μια μη γραμμική. Σχεδόν όλες οι αναλυτικές εξισώσεις απαιτούν η εξίσωση της θερμότητας να είναι γραμμική. Για τις αριθμητικές μεθόδους δεν είναι απαραίτητη, αλλά εξακολουθεί να είναι επιθυμητό.

2.4.1.2 Μέθοδος χωριζομένων μεταβλητών

Η εξίσωση θερμότητας είναι μια μερική διαφορική εξίσωση, που μπορεί να λυθεί με τη κλασική μέθοδο ονομαζόμενη ως μέθοδος χωριζομένων μεταβλητών. Η μέθοδος αυτή αναπαριστά μια από τις πιο δυνατές και αναλυτικές τεχνικές για να λυθεί μια ευρεία γκάμα μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η προσέγγιση που ακολουθεί έχει προταθεί από τον Fourier στη κλασική εργασία "Thorie analytique de la chaleur" (1822: η αναλυτική θεωρία της θερμότητας).

Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι η λύση μπορεί να διαχωρισθεί ως εξής:

$$T(x, t) = X(x)T(t) \quad (2-20)$$

Αντικαθιστώντας την (2-20) στην (2-17) έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial t} [X(x)T(t)] = a \frac{\partial^2}{\partial x^2} [X(x)T(t)] \quad (2-21)$$

Στη συνέχεια διαχωρίζουμε την εξίσωση, ώστε το ένα μέλος να εξαρτάται μόνο από τη μεταβλητή του χρόνου t , ενώ το άλλο μέλος από τη χωρική μεταβλητή x . Κι οι δυο μεταβλητές θα πρέπει να ισούνται με μια σταθερά (λ), μιας και το ένα μέλος εξαρτάται από τη μεταβλητή t , ενώ το άλλο από τη x . Έτσι η εξίσωση γίνεται:

$$\frac{T'(t)}{aT(t)} = \frac{X''(x)}{X(x)} = -\lambda \quad (2-22)$$

Το πρόσημο μείον (-) χρησιμοποιείται για διευκόλυνση των πράξεων. Η εξίσωση (2-22) περιέχει ένα ζεύγος ξεχωριστών συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Η πρώτη είναι η:

$$T'(t) + \lambda \alpha T(t) = 0 \quad (2-23)$$

όπου η λύση της είναι: $T(t) = Ce^{-\lambda t}$.

Για τη δεύτερη συνήθη διαφορική εξίσωση θα πρέπει να βρεθούν οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα.

$$X''(t) + \lambda X(t) = 0 \quad (2-24)$$

Όταν το $\lambda > 0$, τότε υπάρχουν πραγματικοί αριθμοί D, E τέτοιοι ώστε:

$$X'(x) = \sqrt{-\lambda} D e^{\sqrt{-\lambda} x} - \sqrt{-\lambda} E e^{\sqrt{-\lambda} x} \quad (2-25)$$

Εφαρμόζοντας τις συνοριακές συνθήκες από τη σχέση (2-18) έχουμε ότι $D=E=0$, το οποίο μας δίνει ότι $X(x) = 0$. Επίσης, αν υποθέσουμε ότι $\lambda=0$, τότε υπάρχουν πραγματικοί αριθμοί για τα D, E, τέτοια ώστε:

$$X(x) = Dx + E \quad (2-26)$$

Από την εξίσωση (2-18), με παρόμοιο τρόπο λαμβάνουμε ότι $D=0$. Έτσι κάθε σταθερή συνάρτηση $X_0(x) = E$ είναι μια ιδιοτιμή $\lambda_0 = 0$.

Όταν το $\lambda > 0$, τότε υπάρχουν πραγματικοί αριθμοί D, E, τέτοιοι ώστε:

$$X'(x) = -D\sqrt{\lambda} \sin(\sqrt{\lambda} x) + E\sqrt{\lambda} \cos(\sqrt{\lambda} x) \quad (2-27)$$

Η συνοριακή συνθήκη $X'(0) = 0$, σημαίνει ότι $E=0$, και η συνοριακή συνθήκη $X'(l) = 0$ μας δίνει την εξίσωση:

$$D \sin(\sqrt{\lambda} l) = 0 \quad (2-28)$$

Για να ισχύει η παραπάνω εξίσωση θα πρέπει να ισχύει: $\sqrt{\lambda} l = n\pi$. Συνεπώς οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα είναι:

$$\lambda_n = \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2, \text{ για } n=0,1,2, \dots \quad (2-29)$$

$$X_n(x) = \cos\left(\frac{n\pi x}{l}\right), \text{ για } n=0,1,2, \dots \quad (2-30)$$

Παρατηρούμε ότι για $\lambda=0$, η λύση μετασχηματίζεται στην εξίσωση:

$$T_n(t) = C_n e^{-\lambda t} \quad (2-31)$$

Ο γραμμικός συνδυασμός των (2-30), (2-31), γραμμένος ως το άπειρο άθροισμα οποιουδήποτε ακέραιου αριθμού N και σταθερών C_n είναι:

$$T_n(x, t) = \frac{1}{2} C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{\left(\frac{n\pi}{\lambda}\right)^2 t} \cos\left(\frac{n\pi x}{\lambda}\right), \text{ για } n=0,1,2, \dots \quad (2-32)$$

Η αρχική συνθήκη από την εξίσωση (2-19) μας δίνει το ακόλουθο αποτέλεσμα:

$$T_n(x, 0) = f(x) = \frac{1}{2} C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos\left(\frac{n\pi x}{\lambda}\right), \text{ για } n=0,1,2, \dots \quad (2-33)$$

Αυτό δεν είναι τίποτε άλλο από συνημιτονοειδή σειρά Fourier της συνάρτησης $f(x)$ στο διάστημα $(0,1)$.

Το πρόβλημα με τεχνική χωριζομένων μεταβλητών είναι ότι μας παρέχει μια λύση μόνο στη μονοδιάστατη εξίσωση θερμότητας, δηλαδή για την εξίσωση $T(x,t)$, για γνωστές αναλυτικές οριακές συνθήκες. Για μη αναλυτικές οριακές συνθήκες η παραπάνω μέθοδος είναι ακατάλληλη για την εφαρμογή αυτή. Συνεπώς δε αξίζει να χρησιμοποιηθεί ως ένα θερμικό μοντέλο για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής εργασίας. Μη αναλυτικές αρχικές συνθήκες για τον σχηματισμό ροών θερμότητας πρέπει να κατασκευασθούν, ώστε να προσομοιώνουν επακριβώς διεπιφάνεια ενός υλικού, όπου είναι παρούσα στη δομή ενός στρώματος μιας συσκευής ισχύος. Σε παρακάτω παραγράφους θα εξετασθούν άλλα θερμικά μοντέλα, ώστε να δούμε ποιο από αυτά πληροί όλους τους στόχους που απαιτούμε για τα κίνητρα αυτής της εργασίας.

3

Θερμικά μοντέλα για μετατροπείς ισχύος

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα υπάρχοντα θερμικά μοντέλα, τα οποία συχνά εφαρμόζονται για υπολογίσουν τις θερμοκρασίες των ημιαγωγικών διατάξεων ισχύος στους μετατροπείς ισχύος και γενικότερα στα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος. Τα μοντέλα αυτά διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες: θερμικά μοντέλα μόνιμης κατάστασης, θερμικά μοντέλα μεταβατικής κατάστασης, μοντέλα με αριθμητικές μεθόδους και αναλυτικές λύσεις. Η θεωρία, που θεμελιώνει το κάθε θερμικό μοντέλο πρόκειται να αναλυθεί στις επόμενες παραγράφους. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού πραγματοποιείται μια εκτενής ανάλυση με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε υπάρχοντος θερμικού μοντέλου.

3.1 Θερμικά μοντέλα μόνιμης κατάστασης

Τα θερμικά μοντέλα μόνιμης κατάστασης παρέχουν μια ποσοτική περιγραφή μιας μοντελοποιημένης δομής συσκευασίας. Παρέχουν μια αφηρημένη συμπεριφορά συσκευασίας μιας μονάδας ισχύος, όταν οι λεπτομέρειες είναι τόσο λεπτές για να χρησιμοποιηθούν. Τα μοντέλα αυτά προσομοιώνουν σε γρήγορο χρόνο συγκρινόμενα με άλλα λεπτομερή θερμικά μοντέλα. Μια απαίτηση για αυτή τη κατηγορία των θερμικών μοντέλων είναι να καθίστανται λογικά ανεξάρτητα από τις συνοριακές συνθήκες, ώστε η διαφορετικότητα του περιβάλλοντος να μην επηρεάζει θερμικό μοντέλο μόνιμης κατάστασης.

3.1.1 Δίκτυο αντιστάσεων

Τα μοντέλα δικτύου αντιστάσεων σκοπό έχουν να προβλέψουν τη μόνιμη κατάσταση θερμοκρασίας σε μια συσκευασία με ακρίβεια αλλά μόνο σε κάποια κρίσιμα σημεία. Τα δίκτυα

αντιστάσεων δε βασίζονται στη γεωμετρία αλλά ούτε και στις ιδιότητες των υλικών. Αντί αυτών, προσπαθούν να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά μιας μονάδας ισχύος, δεδομένου της ύπαρξης μιας πηγής θερμότητας.

3.1.1.1 Μοντέλο μίας αντίστασης

Το δίκτυο μιας απλής αντίστασης R_{j-amb} παριστάνει τη θερμική αντίσταση μόνιμης κατάστασης μεταξύ επαφής και περιβάλλοντος σε μια δομή συσκευασίας, κι ορίζεται ως εξής:

$$R_{j-amb} = \frac{T_j - T_{amb}}{q_c} \quad (3-1)$$

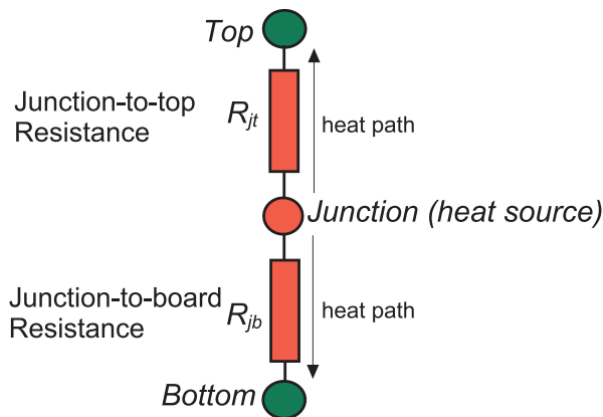
όπου T_j (K) είναι η θερμοκρασία επαφής, T_{amb} (K) η θερμοκρασία περιβάλλοντος της διάταξης και q_c (W) η απαγωγή θερμότητας της διάταξης. Η σχέση (3-1) είναι ανάλογη του νόμου Ohm, όπου η ηλεκτρική αντίσταση ορίζεται ως ο λόγος της πτώσης τάσης κατά μήκος μιας αντίστασης, προς το ρεύμα που ρέει την αντίσταση αυτή.

Η προσέγγιση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί για δεκαετίες και χρησιμοποιείται ευρέως ακόμη και σήμερα λόγω της απλότητας και της ευκολίας της εφαρμογής της. Ένα παράδειγμα χρήσης αυτού του πρωταρχικού δικτύου φαίνεται στη δημοσίευση [18]. Σύμφωνα με [18], [19] μια θερμική αντίσταση επαφής-περιβάλλοντος δεν επαρκεί για το σχεδιασμό συσκευασίας, διότι πάρα πολλές πληροφορίες σχετικά με τη κατανομή θερμοκρασίας σε όλη τη συσκευασία χάνεται. Αν ένα μοντέλο πρόκειται να είναι χρήσιμο από όλες τις οπτικές γωνίες, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα για οποιεσδήποτε συνοριακές συνθήκες [20], [21]. Δυστυχώς, η θερμική αντίσταση ισχύει μόνο για δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες, δηλαδή αυτές που μετρήθηκαν, και ως εκ τούτου δεν είναι ανεξάρτητη των συνοριακών συνθηκών. Συνεπώς το μοντέλο αυτό δε αποτελεί εργαλείο ακριβούς πρόβλεψης και συνεπώς έχει μικρή χρησιμότητα.

3.1.1.2 Μοντέλο δυο αντιστάσεων

Το μοντέλο των δυο αντιστάσεων προέρχεται από [22]. Διαιρεί τη πολύπλοκη γεωμετρία της συσκευασίας σε θερμικές αντιστάσεις, όπως φαίνεται από το σχήμα 3.1. Προσπαθεί να δημιουργήσει μοντέλα δυο αντιστάσεων, σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου JEDEC JC15.1 [23], και παρατηρήθηκε στα [24], [25]. Παρά το γεγονός ότι δε αναμένεται να έχουν πολύ μεγάλη ακρίβεια τα εν λόγω μοντέλα, αποτελούν σημαντική εξέλιξη του παραδοσιακού

μοντέλου με μια αντίσταση [26]. Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης κατηγορίας μοντέλου είναι η ευκολία της παραγωγής καθώς και το χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Παρά όλα αυτά



Σχήμα 3.1 – Διάγραμμα θερμικού μοντέλου δυο αντιστάσεων μόνιμης κατάστασης

όμως, η συγκεκριμένη προσέγγιση αποτυγχάνει να αναγνωρίσει ότι η θερμότητα μπορεί να ρέει σε περισσότερα από δυο μονοπάτια για να εγκαταλείψει το κόμβο επαφής. Επιπρόσθετα, η ακρίβεια του μοντέλου εξαρτάται από τη δομή της συσκευασίας και τις συνθήκες λειτουργίας, που μοντελοποιεί. Στο [27], η ακρίβεια του μοντέλου δυο αντιστάσεων διαφέρει από 2-20% σε σχέση με εκείνα ενός λεπτομερούς μοντέλου.

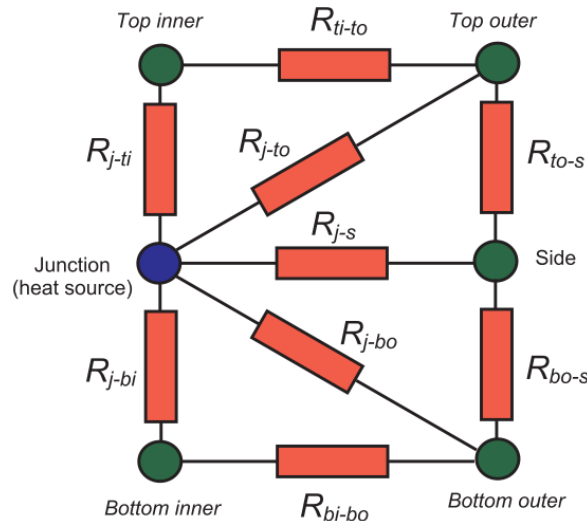
3.1.1.3 Δίκτυο αντιστάσεων σε σχήμα αστέρα

Το δίκτυο σε σχήμα αστέρα έχει μια υψηλότερου επιπέδου πολυπλοκότητα από εκείνη του μοντέλου δυο αντιστάσεων. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε στα [19], [28], [29]. Μια συσκευασία χαρακτηρίζεται από έναν περιορισμένο αριθμό καλά επιλεγμένων θερμικών αντιστάσεων. Το μοντέλο αυτό λοιπόν προσπαθεί να συλλάβει όλα τα κυρίαρχα μονοπάτια αγωγίμης θερμότητας, που ρέουν μέσα σε μια συσκευασία ισχύος.

Δυστυχώς όμως χρειάζονται πολλές διαφορετικές τοπολογίες ωμικών δικτύων σε σχήμα αστέρα για κάθε διαφορετική δομή συσκευασίας [30]. Στο [31], το μοντέλο σε σχήμα αστέρα αποτυγχάνει να προβλέψει με ακρίβεια τη θερμοκρασία επαφής για τις δομές συσκευασίας, που συνδέονται με συστήματα ψύξης, πράγμα που υποδηλώνει ότι το μοντέλο αυτό δεν είναι πλήρως ανεξάρτητο από τις περιβάλλουσες συνθήκες.

3.1.1.4 Μοντέλο Delphi

Το μοντέλο Delphi απεικονίζεται στο σχήμα 3.2. Είναι μια επέκταση της μεθόδου σε σχήμα αστέρα, γιατί θεωρούνται ωμικά μονοπάτια, τα οποία δε είναι ευθυγραμμισμένα με τη πηγή θερμότητας.



Σχήμα 3.2 – Τυπικό διάγραμμα ενός θερμικού μοντέλου πολλαπλών αντιστάσεων ή αλλιώς μοντέλου Delphi

Στο [27], το μοντέλο Delphi έχει μια ακρίβεια περί του 5% από ένα λεπτομερές μοντέλο. Σύμφωνα με το [32], το μοντέλο αυτό δεν εξαρτάται από τις περιβάλλουσες συνθήκες, μιας και δεν περιορίζεται σε κάποιες συγκεκριμένες συσκευασίες. Όμως η κατασκευή ενός τέτοιου μοντέλου είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, αφού το δίκτυο περιλαμβάνει αρκετούς κόμβους. Όπως δηλώνεται και στο [31], θα πρέπει να υποστηρίζεται από ειδικό λογισμικό, με σκοπό τη παραγωγή τέτοιων μοντέλων Delphi. Δυστυχώς όμως η διαδικασία αυτή απαιτεί ένα υψηλό υπολογιστικό κόστος σε σχέση με το μοντέλο δυο αντιστάσεων.

3.2 Θερμικά μοντέλα μεταβατικής κατάστασης

Τα μοντέλα της κατηγορίας αυτής προσομοιώνουν τη θερμική μεταβατική κατάσταση μιας θερμαινόμενης δομής συσκευασίας. Αυτό είναι εμφανές πλεονέκτημα σε σχέση με εκείνα τα μοντέλα της πρώτης κατηγορίας μοντέλων, που προσομοιώνουν μόνο τη μόνιμη κατάσταση. Οι κύριες μέθοδοι για την κατασκευή τέτοιων μοντέλων διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: τα ισοδύναμα RC κυκλώματα και τα μοντέλα υποβιβασμού.

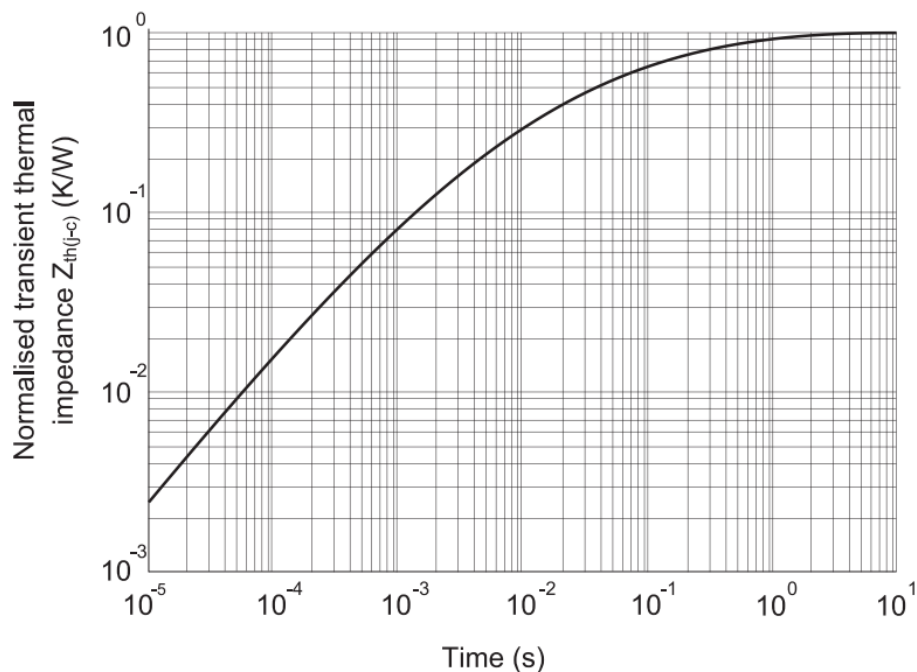
3.2.1 Ισοδύναμα κυκλώματα RC

Ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα παρέχει τη μεταβατική κατάσταση, που περιγράφει τη μεταβατική θερμική αντίδραση της δομής της συσκευασίας. Το κύκλωμα αυτό εφαρμόζει την καλά ορισμένη αντιστοιχία, υπάρχει μεταξύ ενός θερμικού και ηλεκτρικού κυκλώματος, όπως φαίνεται και στο πίνακα 3.1.

| Thermal | | ↔ | Electrical | |
|---------------------|---------------------|---|------------------------|-----|
| Temperature | (K) | | Voltage | (V) |
| Power | (W) | | Current | (A) |
| Thermal resistance | (KW ⁻¹) | | Electrical resistance | (Ω) |
| Thermal capacitance | (JK ⁻¹) | | Electrical capacitance | (F) |

Πίνακας 3.1 – Αντιστοίχιση φυσικών θερμικών και ηλεκτρικών μεγεθών

Τυπικά, απαιτείται μια καμπύλη μεταβατικής θερμικής αντίδρασης, που προκύπτει από μια μικρή μεταβολής ισχύος, ώστε να εξάγουμε ένα κύκλωμα RC. Οι κατασκευαστές μονάδων ισχύος συνήθως παρέχουν κανονικοποιημένες καμπύλες αντίδρασης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 – Γράφημα μιας τυπικής κανονικοποιημένης καμπύλης μεταβατικής θερμικής αντίδρασης, το οποίο παρέχεται από τον κατασκευαστή μονάδων ισχύος

Η αντίδραση $Z_{th(j-c)}(t)$ παριστάνει τη μεταβατική θερμική αντίδραση από την επαφή ως τη θήκη. Οι τιμές για την αντίδραση $Z_{th(j-c)}(t)$ μπορούν να προκύψουν πολλαπλασιάζοντας τη τιμή της αντίστασης μόνιμης κατάστασης $R_{th(j-c)}(t)$ με ένα κανονικοποιημένο παράγοντα, ο οποίος λαμβάνεται από τη καμπύλη για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η $R_{th(j-c)}(t)$ ορίζεται από τον κατασκευαστή και συνήθως βρίσκεται μεταξύ $0,2 - 0,4 K/W$ για μια μονάδα ισχύος [33]. Δυστυχώς όμως τα στοιχεία που δίνονται από τους κατασκευαστές δεν είναι τόσο αξιόπιστα. Επιπρόσθετα τα δεδομένα που αφορούν την $Z_{th(j-c)}(t)$ δε επιτρέπουν την ύπαρξη ενός συστήματος ψύξης.

Η καμπύλη μεταβατικής θερμικής αντίδραση $Z_{th(j-amb)}(t)$ είναι απαραίτητη. Αυτή παριστάνει τη μεταβατική θερμική αντίδραση μεταξύ επαφής και περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένου και της ψήκτρας/ ψυκτικού συστήματος. Ευτυχώς μια καμπύλη θέρμανσης/ ψύξης, που παριστάνει τη θερμοκρασία $T_j(t)$ μπορεί να προκύψει με ένα λογισμικό προσομοίωσης, που χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους ή πειραματικές μετρήσεις. Από τη καμπύλη $T_j(t)$ είναι πιθανό να παραχθεί η καμπύλη $Z_{th(j-amb)}(t)$ χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3-2).

$$Z_{th(j-amb)}(t) = \frac{T_j(t) - T_{amb}(t)}{P} \quad (3-2)$$

Όπου $t(s)$ είναι ο χρόνος, $T_{amb}(t)(K)$ είναι η γνωστή περιβάλλουσα θερμοκρασία και $P(W)$ είναι η ισχύς, που χάνεται ως θερμότητα. Σύμφωνα λοιπόν με όλα τα παραπάνω, ένα ισοδύναμο κύκλωμα μπορεί να παραχθεί που εφαρμόζει απόλυτα στην $Z_{th(j-amb)}(t)$ με τη χρήση της παρακάτω προσέγγισης:

$$Z_{th(j-amb)}(t) = \sum_{i=1}^n A_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (3-34)$$

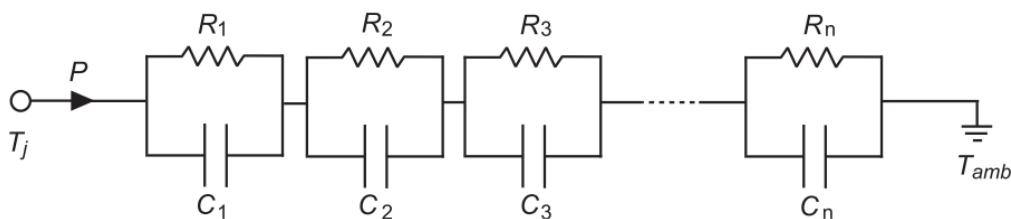
Όπου $A_i (KW^{-1})$ είναι ένας προεκθετικός συντελεστής και τ_i μια σταθερά χρόνου. Για περισσότερα παραδείγματα αυτής της προσέγγισης, ο αναγνώστης παραπέμπεται στα [34], [35],[36],[37],[38]. Οι δύο κυρίαρχοι τύποι των ισοδύναμων μοντέλων RC είναι το Foster και το Cauer μοντέλο.

3.2.1.1 Μοντέλο Foster

Το ισοδύναμο κύκλωμα από το μοντέλο Foster απεικονίζεται στο σχήμα 3.4. Οι τιμές των στοιχείων του δικτύου του σχετίζονται με την εξίσωση (3-3) ως εξής:

$$R_i = A_i \text{ και } C_i = \frac{\tau_i}{A_i}$$

Αυτή η ιδιότητα απλοποιεί τον προσδιορισμό των τιμών των ισοδύναμων στοιχείων και μπορεί εύκολα να προσαρμοσθεί, όπως αναφέρεται στο [39]. Η υπολογιστική του απλότητα εξηγεί και την ευρεία εφαρμογή και τη δημοτικότητα αυτού του μοντέλου.

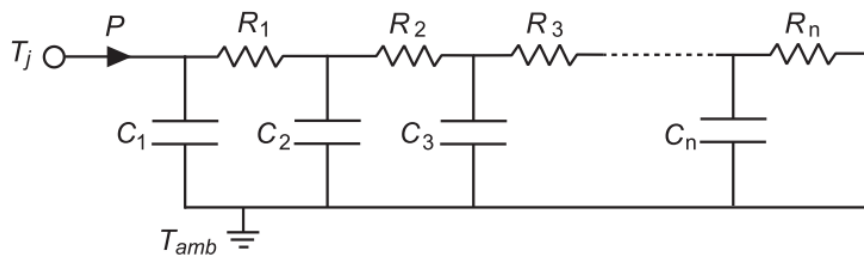


Σχήμα 3.4 – Ισοδύναμο κύκλωμα κατά μοντέλο Foster

Το δίκτυο Foster είναι μια προσέγγιση, που παρομοιάζεται με ένα μαύρο κουτί. Μπορεί να περιγράψει τη καμπύλη θερμοκρασίας επαφής με οποιαδήποτε διέγερση, αλλά επίσης δεν έχει καμιά φυσική σημασία, αφού τα στοιχεία RC δεν είναι άμεσα συνδεδεμένα με τα στρώματα της δομής. Ως εκ τούτου, το μοντέλο Foster δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φυσική ταυτοποίηση της ροής της θερμότητας μέσα από μια δομή [40],[41],[42]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι χωρητικότητες από κόμβο σε κόμβο δεν είναι φυσικά σταθερές, όπως δηλώνεται στα [43],[44],[45]. Για παράδειγμα, αν ένα παλμός θερμικής ισχύος απαχθεί στην είσοδο του μοντέλου, τότε η θερμοκρασία σε κάθε εσωτερικό κόμβο θα μεταβαλλόταν αμέσως λόγω του ότι οι χωρητικότητες βρίσκονται σε σύνδεση σειράς μεταξύ εισόδου και εξόδου. Αυτό βέβαια διαφέρει από τη πραγματικότητα, όπου υπάρχει μια χρονική καθυστέρηση πριν η θερμότητα διαχυθεί μέσα στη δομή. Μια άλλη αδυναμία αυτού της «μαύρου κουτιού» προσέγγισης είναι ότι θα χρειαστεί να παραχθεί ένα νέο γράφημα της μεταβατικής θερμοκρασίας επαφής και στη συνέχεια να επανυπολογισθούν οι τιμές για όλα τα στοιχεία του RC, αν προστεθεί ένα ακόμη στρώμα στη δομή, που προηγουμένως είχε μοντελοποιηθεί.

3.2.1.2 Μοντέλο Cauer

Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Cauer μοντέλο είναι αυτό, που απεικονίζεται στο σχήμα 4.5. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από πυκνωτές συνδεδεμένους σε γείωση και μεταβλητές αντιστάσεις [46],[47],[48]. Είναι δυνατόν να περιγραφεί η εσωτερική ροή θερμότητας της δομής, που έχει μοντελοποιηθεί. Υπάρχει μια σαφής σχέση μεταξύ των RC στοιχείων στο ισοδύναμο κύκλωμα και κάθε φυσικού στρώματος της συσκευασίας μονάδας ισχύος. Δυστυχώς όμως οι παράμετροι δικτύου δεν είναι άμεσα διαθέσιμες από τους κατασκευαστές.



Σχήμα 3.5 – Ισοδύναμο κύκλωμα κατά μοντέλο Cauer

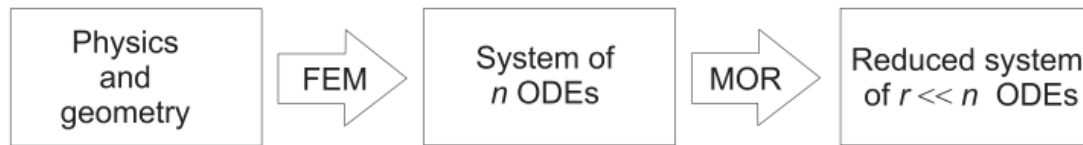
Συνεπώς, είναι απαραίτητο να προσδιορισθούν οι τιμές για τα RC στοιχεία στη δομή, μια διαδικασία γνωστή ως εξαγωγή παραμέτρων. Αυτό είναι μακρά και επίπονη διαδικασία, όταν χρησιμοποιείται η βηματική διέγερση στο δίκτυο Cauer, αφού είναι δύσκολο να επιτευχθεί μαθηματικά [49]. Επιτεύχθηκε όμως με περιορισμένη επιτυχία στο [50], όπου απαιτήθηκε μετασχηματισμός Laplace και η εφαρμογή κάποιων αλγορίθμων, που προσαρμόζουν τη καμπύλη. Το δίκτυο Cauer μπορεί επίσης να επιτευχθεί με τη μετατροπή ενός δικτύου Foster [50],[51]. Πάντως, η μετατροπή αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή καθώς είναι έγκυρη μόνο η θερμοκρασία T_{amb} , όπως φαίνεται στα σχ. 3.4, 3.5, θεωρηθεί σταθερή.

Δυστυχώς και οι δυο προσεγγίσεις, που αναφέρθηκαν, για να κατασκευασθούν δίκτυα Cauer εμπεριέχουν κάποιες αριθμητικές δυσκολίες, επειδή δεν υπάρχει καμία σχέση ανάμεσα σε στοιχείο του δικτύου και στους όρους της σχέσης (3-3), όπως υπάρχει στο δίκτυο Foster. Τέλος, ένα ακόμη μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι δε μπορεί να αναπαριστήσει με ακρίβεια τη διάχυση πλευρικής θερμότητας [52],[53].

3.2.2 Μοντέλα υποβιβασμού τάξης

Τελευταία έχει δημιουργηθεί μια απότομη αύξηση ενδιαφέροντος για τα μοντέλα υποβιβασμού τάξης (Model Order Reduction) για τα θερμικά μοντέλα [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60]. Τα μοντέλα αυτά είναι δυναμικά συστήματα μεγάλης κλίμακας, που λαμβάνονται μέσω τυπικών διαδικασιών μοντέλων υποβιβασμού, με βάση κάποιο μαθηματικό υπόβαθρο. Το

σχήμα 3.6 περιγράφει πως παράγονται τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιώντας ένα μπλοκ διάγραμμα.



Σχήμα 3.6 – Μοντέλο υποβιβασμού τάξης

Το αρχικό σημείο είναι ένα λεπτομερές θερμικό μοντέλο, το οποίο κατασκευάζεται με ένα προσομοιωτή πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element simulator). Δημιουργείται χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τις ιδιότητες των υλικών καθώς και τη γεωμετρία της δομής της συσκευασίας, που θα μοντελοποιηθεί. Έτσι, χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό, που επιλύει με μεγάλη ακρίβεια τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων υψηλής διαστασιολόγησης, διακριτοποιείται ο χώρος και έτσι είναι δυνατό να περάσουμε από μια 3D εξίσωση θερμότητας, που έχει προέλθει από ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων σε ένα σύστημα n συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Το σύστημα των συνήθων διαφορικών εξισώσεων σε μητρική μορφή εκφράζεται στην εξίσωση (3-4).

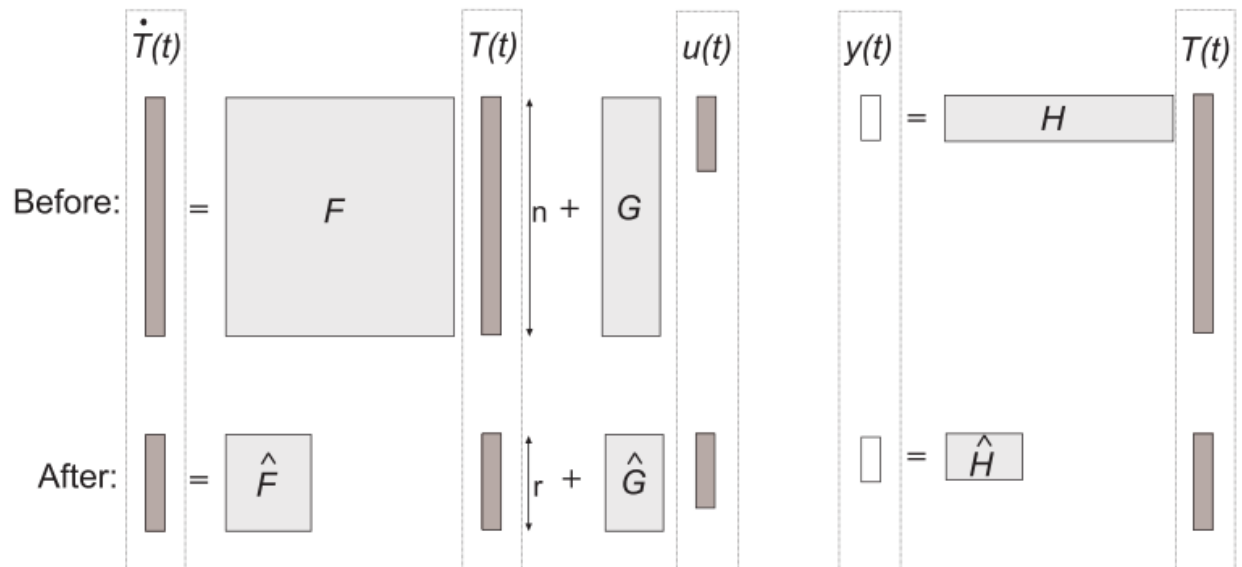
$$\dot{T} = FT(t) + GFu(t) \quad (3-35)$$

όπου $T(t)$ είναι το διάνυσμα των άγνωστων θερμοκρασιών σε κόμβους, όπου δημιουργήθηκαν κατά τη διακριτοποίηση του χώρου, G είναι το διάνυσμα φόρτου, F η μήτρα του συστήματος και $u(t)$ η συνάρτηση εισόδου. Χρησιμοποιώντας τη μήτρα εξόδου H , η επιθυμητή έξοδος $y(t)$ μπορεί να εκφρασθεί ως εξής:

$$y(t) = HT(t) \quad (3-36)$$

Το διάνυσμα $T(t)$ έχει υψηλή διαστασιολόγηση στο πρόγραμμα επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων, όταν προσομοιώνονται 3D γεωμετρίες. Αυτό εξηγεί την υψηλή χρονική πολυπλοκότητα, που σχετίζεται με αυτά τα πρόγραμμα επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι το μοντέλο υποβιβασμού τάξης, το οποίο δημιουργεί ένα σύστημα χαμηλής τάξης, το οποίο προσεγγίζει λογικά την υψηλή κλίμακα του δυναμικού συστήματος. Οι εισοδοί $u(t)$ και εξοδοί $y(t)$ παραμένουν στο ίδιο μέγεθος αλλά η διάσταση του διανύσματος κατάστασης $T(t)$ υποβιβάζεται από n σε r διαστάσεις. Το σχήμα 3.7 απεικονίζει πως οι διαστάσεις στην εξίσωση (3-5) και (3-4) μεταβάλλονται ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας του υποβιβασμού τάξης. Αυτός ο δραστηκός υποβιβασμός στις

διαστάσεις της μήτρας μας δίνει τη δυνατότητα κατασκευής ενός μοντέλου υποβιβασμού τάξης, που απαιτεί λιγότερο υπολογιστική πολυπλοκότητα για να προσομοιώσει τη διάχυση θερμότητας από ό,τι ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 3.7 – Μοντέλο υποβιβασμού τάξης από σύστημα συνήθων διαφορικών εξισώσεων (με λεπτομέρεια)

Κάθε τύπος των μοντέλων υποβιβασμού τάξης έχει τον ίδιο στόχο, που είναι να ελαττώσει τον αριθμό των όρων ή συναρτήσεων σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, διατηρώντας όμως ένα ανεκτό επίπεδο ακρίβειας.

3.2.2.1 Προσέγγιση κατά υποχώρο Krylov

Στη προσέγγιση κατά Krylov [55], [56], [57], [58], η ιδέα είναι να περιγραφεί η συμπεριφορά του διανύσματος $T(t)$, μέσω ενός υποχώρου χαμηλής διάστασης, που ονομάζεται υποχώρος Krylov. Αυτό τυπικά επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της διαδικασίας Arnoldi [59] ή τον αλγόριθμο Lanczos [60]. Αυτές οι επαναληπτικές διαδικασίες μειώνουν το σύστημα κατά μερικές τάξεις μεγέθους με ελάχιστη απώλεια ακρίβειας του αποτελέσματος. Οι προσεγγίσεις κατά τον υποχώρο Krylov είναι υπολογιστικά γρήγορες και μπορούν να εφαρμοσθούν σε υψηλής διάστασης πρώτης τάξης γραμμικά συστήματα. Ένα μικρό μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι ο χρήστης πρέπει να επιλέξει τη τάξη, στην οποία επιθυμεί να υποβιβασθεί το σύστημα. Δεν υπάρχει τρόπος να εκτιμηθεί το σφάλμα, που προκύπτει από αυτή τη προσέγγιση.

3.2.2.2 Προσέγγιση απλής αποσύνθεσης

Η προσέγγιση απλής αποσύνθεσης παρουσιάζει ένα καθολικό σφάλμα εκτίμησης και μπορούν να διαχειριστούν με ένα πλήρως αυτοματοποιημένο τρόπο. Η προσέγγιση αυτή αναπτύχθηκε στη θεωρία ελέγχου [61] και είναι ένας τρόπος παραγοντοποίησης μητρών σε μια σειρά γραμμικών προσεγγίσεων, που αναδεικνύουν τη δομή της μήτρας. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Μπορεί να περιγράψει συστήματα με μερικούς αντί για χιλιάδες αγνώστους. Υπάρχει ακόμη έλλειψη εμπειρίας σε αυτό το πεδίο και δυστυχώς δεν υπάρχει κάποιο διαφημιστικό πακέτο λογισμικού αυτής της μεθόδου.

3.2.2.3 Αλγόριθμος Guyan

Ο αλγόριθμος Guyan [62], [63] είναι μια μέθοδος μοντέλου υποβιβασμού τάξης, που προβάλλει ένα σύστημα συνήθων διαφορικών εξισώσεων υψηλής διάστασης σε ένα χαμηλότερης. Λειτουργεί απαλορίζοντας εξισώσεις από μη τερματικούς κόμβους με τη βοήθεια γραμμικών αλγεβρικών πράξεων. Είναι διαθέσιμος (διαφημιστικά) εντός του προγράμματος επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων ANSYS [64], το οποίο έχει ένα ενσωματωμένο αυτόματο διαχειριστή επιλογής κόμβων [65]. Η προσέγγιση αυτή οδηγεί σε ένα μη απαραίτητα μεγάλου υποβιβασμού μοντέλο κι ως εκ τούτου δε παρέχει την απαιτούμενη ακρίβεια για ηλεκτροθερμικές προσομοιώσεις [66].

3.3 Θερμικά μοντέλα με αριθμητικές μεθόδους

Κανένα μοντέλο από τα προαναφερθέντα δε μπορεί να είναι 100% ανεξάρτητο των συνοριακών συνθηκών. Αυτό είναι επιτεύξιμο μόνο με τη χρήση ενός γνωστού ως ονομαζόμενο λεπτομερές μοντέλο, που έχει ένα άπειρο αριθμό βαθμών ελευθερίας [67]. Τα λογισμικά πακέτα σχεδίασης μπορούν συχνά να προσφέρουν λεπτομερή θερμικά μοντέλα, το οποίο καθιστά δυνατό να απεικονίσουμε τη φυσική γεωμετρία με μεγάλη λεπτομέρεια. Ένα λεπτομερές θερμικό μπορεί να μοιάζει πολύ με τη πραγματική γεωμετρία της συσκευασίας. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί με ακρίβεια να προβλέψει τη θερμοκρασία σε διάφορα σημεία εντός της συσκευασίας, λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα ψύξης, το οποίο έχει τοποθετηθεί. Τέλος, απαιτούν υπερβολικά μεγάλους υπολογιστικούς πόρους και έχουν αρκετά μεγάλη χρονική πολυπλοκότητα.

Αν ο χώρος χωρισθεί σε πολλά μικρά τμήματα, ώστε ο χώρος να διακριτοποιηθεί, μπορεί κανείς να προσεγγίσει τη θερμοκρασία σε κάποιο στοιχείο, χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτοί περιγράφονται ως δυναμικά λεπτομερή μοντέλα, επειδή

παράσχουν μεταβατικές λύσεις. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που σχετίζονται με πλέγμα, το οποίο τμηματοποιεί ένα αυθαίρετο υπολογιστικό χώρο σε μικρότερα τμήματα. Αυτές είναι οι: μέθοδος πεπερασμένων διαφορών, μέθοδος πεπερασμένου όγκου, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων και μέθοδος συνοριακών στοιχείων. Κάθε μια από τις παραπάνω αριθμητικές μεθόδους περιγράφεται στις επόμενες ενότητες και επιπλέον γίνονται κάποιες θεωρήσεις σχετικά με την επίλυση 3Δ διάχυση θερμότητας σε μια συσκευασία μονάδα ισχύος.

3.3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Παρά το γεγονός ότι ήταν δημοφιλής αυτή η μέθοδος από το 1960, δε βρήκε μαθηματική θεμελίωση μέχρι το 1973 με τη δημοσίευση [68]. Η μέθοδος αυτή από τότε αποτελεί κλάδο των εφαρμοσμένων μαθηματικών για την αριθμητική μοντελοποίηση φυσικών συστημάτων της εφαρμοσμένης μηχανικής. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει χωρική διακριτοποίηση της υπό μελέτη περιοχής σε ένα πλέγμα πολυτόπων. Ως εκ τούτου, οι μερικές διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε μια σειρά μικρότερων στοιχείων, τα οποία απεικονίζουν το σύστημα των συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Ένα πρόγραμμα εισάγει όλα τα στοιχεία του πλέγματος, εισάγοντας σχετική πληροφορία σε ένα κατάλληλο υποπρόγραμμα και δέχεται πίσω συνήθεις διαφορικές εξισώσεις σε μητρική μορφή. Η συμπεριφορά σε όλο το πρόβλημα καθορίζεται από τη συνεισφορά των στοιχείων μέσα σε ένα μεγάλο καθολικό αραιό σύστημα μητρών. Μόλις ολοκληρωθεί, το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων προχωρά στην επίλυση του συστήματος συνήθων διαφορικών εξισώσεων [69]. Η δημοσίευση [70] δηλώνει ότι τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι οι νόμοι διατήρησης ικανοποιούνται ακόμη και με χοντρικές προσεγγίσεις. Επιπλέον ένα άλλο ελκυστικό χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου είναι η ικανότητα να χειρισθεί πολύπλοκες ακανόνιστες γεωμετρίες με σχετική ευκολία.

Στον ορισμό του τοπικού πλέγματος στην μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων είναι σημαντικό οι διαστάσεις των γειτονικών στοιχείων να είναι σημαντικά διαφορετικές. Η διαδικασία αυτή είναι μια προς τα εμπρός διαδικασία αλλά πολύ χρονοβόρα. Δυστυχώς, όμως είναι απαραίτητο να υλοποιηθεί αυτό το στάδιο όταν μοντελοποιούμε συσκευασίες για μονάδες ισχύος, καθότι το πάχος των στρωμάτων διαφέρει σημαντικά σε όλη τη δομή. Ένα επιπρόσθετο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι σημαντικοί υπολογισμοί τείνουν να λαμβάνουν χώρα από χρήστες που δεν έχουν εκπαιδευτεί κατάλληλα σε λογισμικά που υλοποιούν αυτή τη μέθοδο. Μια ακριβής 3Δ θερμική προσομοίωση μιας μονάδας ισχύος επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο ANSYS [64], το οποίο χρησιμοποιείται στις [71], [72], [73]. Το μεγαλύτερο πρόβλημα σε αυτή τη μέθοδο είναι ότι έχει μεγάλο βαθμό υπολογιστικής πολυπλοκότητας.

Συνεπώς, καθίσταται πολύ αργή για να ενσωματωθεί στο πλαίσιο ενός ηλεκτροθερμικού προσομοιωτή.

3.3.2 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων

Το πρώτο βήμα σε αυτή τη μέθοδο είναι να διαιρεθεί ο χώρος σε ένα αριθμό όγκων. Οι απαιτήσεις για τη κατασκευή του πλέγματος είναι όμοιες με την ακριβώς προηγούμενη μέθοδο. Υπάρχει όμως μια ειδοποιός διαφορά στον τρόπο υπολογισμού της συνεισφοράς των στοιχείων μητρικής μορφής. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ολοκλήρωση του νόμου διατήρησης παρά στη χρησιμοποίηση μιας μερικής διαφορικής εξίσωσης [74]. Η διατήρηση ικανοποιείται για κάθε όγκο όπως και για όλο τον υπολογιστικό χώρο.

Η μέθοδος πεπερασμένου όγκου είναι η πιο ευέλικτη τεχνική διακριτοποίησης. Τα λογισμικά επίλυσης αυτής της μεθόδου είναι πιο αποτελεσματικά από τα αντίστοιχα της προηγούμενης μεθόδου διότι απαιτούν λιγότερη μνήμη. Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί εύκολα να επιτρέψει πλέγματα που δεν έχουν κάποια δομή. Ακριβή 3D θερμικά μοντέλα αυτής της μεθόδου, που χρησιμοποίησαν τη διαφημιστική έκδοση του λογισμικού πακέτου FLOWTHERM [75], μπορεί μελετηθούν στις δημοσιεύσεις [76],[77],[78]. Ενώ η μέθοδος αυτή συγκεντρώνει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με αυτή των πεπερασμένων στοιχείων, εν τούτοις έχει αρκετά από τα ίδια μειονεκτήματα όπως ότι είναι απαραίτητος ο καθορισμός του πλέγματος και ότι είναι πολύ αργή με τη συνεργασία της με τον προσομοιωτή κυκλώματος.

3.3.3 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Ιστορικά, η μέθοδος αυτή είναι η πρώτη αριθμητική μέθοδος. Ξεκίνησε κερδίζοντας έδαφος το 1930 με τη δουλειά του R. Courant [79]. Αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο προσέγγισης λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Βασίζεται στο μετασχηματισμό των μερικών διαφορικών εξισώσεων σε μια ομάδα επιλύσιμων αλγεβρικών εξισώσεων [80]. Περιλαμβάνει τη διαίρεση μιας γεωμετρίας σε ένα πλέγμα διακριτών κόμβων. Το πλέγμα αυτό είναι βασικά καρτεσιανό παρά το γεγονός ότι μπορεί να ορισθεί και με κυλινδρικές συντεταγμένες [81]. Το πλέγμα δεν είναι τόσο ευέλικτο όπως στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και συνεπώς δε μπορεί να μοντελοποιήσει όλες τις γεωμετρίες με ακρίβεια, το οποίο εξηγεί για ποιο λόγο δεν είναι τόσο δημοφιλής μέθοδος.

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ο σχηματισμός των συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Επικεντρώνεται στη γειτονοποίηση κόμβων κατά μήκος γραμμών του πλέγματος, που σημαίνει ότι η διακριτοποίηση είναι μια απλή και διαισθητική διαδικασία. Υπάρχουν πολύ

γρήγορες μέθοδοι για να επιλύσουν μια ειδική περίπτωση και εύκολες να υλοποιηθούν [82]. Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών περιορίζεται σε πλέγματα που έχουν δομή, και έτσι μπορεί να εφαρμοσθεί μόνος σε κανονικές γεωμετρίες. Συνήθως οι συσκευασίες μονάδων ισχύος έχουν απλές κανονικές ορθογώνιες δομές, οπότε αυτό δε αποτελεί πρόβλημα. Στις [83], [84] μοντέλα που ανήκουν στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών έχουν προσομοιώσει τη διάχυση θερμότητας σε τέτοιες δομές.

Δυστυχώς, η ποιότητα της προσέγγισης μεταξύ των σημείων του πλέγματος τείνει να είναι μικρή, οπότε πολλοί κόμβοι απαιτούνται για να παραχθούν ακριβή αποτελέσματα. Αυτό είναι αναποτελεσματικό και οδηγεί σε μια πολύ αργή προσομοίωση, που καθιστά ακατάλληλη αυτή τη μέθοδο για χρήση σε ένα προσομοιωτή μετατροπέα ισχύος.

3.3.4 Μέθοδος συνοριακών στοιχείων

Παρά το γεγονός ότι κερδίζει έδαφος περίπου την ίδια εποχή, όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, η μέθοδος συνοριακών στοιχείων είναι αργή ώστε να κερδίσει αποδοχή όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, το πλέγμα είναι μιας διάστασης χαμηλότερο από ό,τι η υπολογιστική γεωμετρία λόγω του ότι τα σύνορα της γεωμετρίας μπορούν τμηματοποιηθούν για 3Δ ανάλυση. Αυτό δίνει μια σημαντική μείωση του χρόνου στη κατασκευή και τη τροποποίηση του πλέγματος και ελαχιστοποιεί τον αριθμό των αλγεβρικών εξισώσεων. Εκτός όλων αυτών των μειονεκτημάτων, η ταχύτητα της προσομοίωσης επίσης είναι ένα πρόβλημα. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη χρησιμοποίηση πυκνών μητρών. Αυτό σημαίνει ότι οι αποθηκευτικές απαιτήσεις και υπολογιστική πολυπλοκότητα είναι μεγαλύτερη για κάθε άγνωστο από ό,τι οι άλλες μέθοδοι, που τελικώς οδηγεί σε αργή ταχύτητα προσομοίωσης. Ο χρόνος που χρειάζεται για να σχηματισθούν οι εξισώσεις αυτή της μεθόδου έχουν αρνητική επιρροή στη ταχύτητα προσομοίωσης.

Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων εφαρμόζεται σε προβλήματα, όπου οι συναρτήσεις Green μπορούν να υπολογισθούν. Συνεπώς η χρήση συναρτήσεων Green παρέχουν μια ακριβή αναλυτική λύση στην εξίσωση θερμότητας και μπορεί αυτή η μέθοδος να χρησιμοποιηθεί για να επιλύσει τη διάχυση θερμότητας σε 3Δ ηλεκτρονικές συσκευασίες για μεταβατικές καταστάσεις, όπως αναφέρεται στα [85],[86],[87].

3.4 Αναλυτικές λύσεις

Οι αναλυτικές μέθοδοι επίλυσης της εξίσωσης θερμότητας βασίζονται στην ιδέα του υπολογισμού λύσεων ως αθροίσματα άπειρων σειρών, εφαρμόζοντας διαφορετικών ειδών

τεχνικές επέκτασης. Κατόπιν, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τέτοιες μέθοδοι για να επιτύχουν μια ακριβή μαθηματική σχέση, που θα περιγράφει τη κατανομή θερμοκρασίας σε ολόκληρη τη δομή. Συνήθως, τα αναλυτικά μοντέλα πάσχουν από το μειονέκτημα ότι η γεωμετρία της δομής είναι πολύπλοκο να μοντελοποιηθεί. Οι τεχνικές συσκευασίας μετατροπέων ισχύος όμως έχουν μια απλή ορθογώνια γεωμετρία. Οι δυο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες σειρές επέκτασης είναι οι συναρτήσεις Green και αυτή του Fourier.

3.4.1 Τεχνική συνάρτησης Green

Οι συναρτήσεις Green είναι ένα ευέλικτο μαθηματικό εργαλείο κατάλληλο για την επίτευξη λύσεων σε γραμμικά προβλήματα διάχυσης θερμότητας σε τεχνικές συσκευασίας ισχύος. Η κατανομή της θερμοκρασίας υπολογίζεται αθροίζοντας όλες τις στοιχειώδεις συνεισφορές. Αυτό επιτυγχάνεται ενσωματώνοντας τις πηγές σε όλες τις διευθύνσεις, που διαδίδεται η θερμότητα.

Οι συναρτήσεις Green μπορούν να παραχθούν χρησιμοποιώντας πολλές διαφορετικές μεθόδους, όπως τη μέθοδο εικόνας [88] και τη μέθοδο Fourier χωριζόμενων μεταβλητών [89]. Αυτές οι μέθοδοι αποδίδουν λύσεις με διαφορετικό τρόπο, αλλά μαθηματικά ταυτόσημες.

Οι συναρτήσεις Green είναι ικανές να προσομοιάσουν τη διάχυση θερμότητας από πολλαπλές πηγές θερμότητας. Ένα άλλο χαρακτηριστικό τους είναι ότι μπορούν εύκολα να επεκταθούν από 1Δ σε 2Δ ή 3Δ συναρτήσεις Green [90]. Δυστυχώς όμως δε μπορούν να παράγουν όλη τη θερμοκρασιακή κατανομή εύκολα και πάσχουν από χαμηλής ακρίβειας αποτελέσματα [91].

Ένα επιπλέον μειονέκτημα τους είναι ότι τείνουν να εμφανίζουν αργή σύγκλιση. Τα θερμικά μοντέλα, που βασίζονται στις συναρτήσεις Green, είναι πολύ αργά για να ενσωματωθούν στη προσομοίωση ενός μετατροπέα ισχύος. Ωστόσο στα [92], [93] ένα δίκτυο RC παράχθηκε από τα αποτελέσματα ενός μοντέλου, βασισμένου σε συνάρτηση Green, και ξεπέρασε το πρόβλημα της χαμηλής ταχύτητας προσομοίωσης.

3.4.2 Επέκταση σειρών Fourier

Όλες οι προσεγγίσεις επέκτασης σειρών Fourier χρησιμοποιούν την τεχνική διαχωρισμού μεταβλητών Fourier αλλά όχι με το παραδοσιακό τρόπο επιλύοντας μια μερική διαφορική εξίσωση με ένα σύνολο γνωστών αρχικών συνθηκών. Ονομάζεται διαχωρισμός μεταβλητών ή μέθοδος χωριζόμενων μεταβλητών, επειδή οι μεταβλητές χώρου και χρόνου επιλύονται χωριστά. Αυτό είναι δυνατό λόγω της γραμμικότητας της εξίσωσης θερμότητας. Η επέκταση σειρών Fourier χρησιμοποιείται πάντα για την τμηματοποίηση του χώρου.

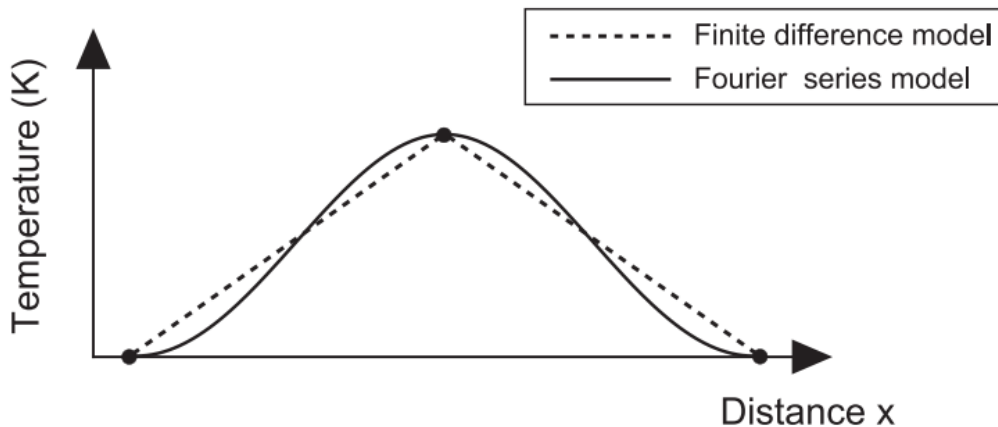
Το 1972, οι Lindsted και Surty [156] χρησιμοποίησαν αυτή τη τεχνική για να αξιολογήσουν τη 3Δ θερμοκρασιακή κατανομή, που παράγεται από μια ορθογώνια πηγή θερμότητας, η οποία είναι τοποθετημένη στην επιφάνεια μιας συσκευής. Λίγα χρόνια αργότερα, ο Kokkas [152] παρουσίασε μια λύση, η οποία υπολόγιζε τη κατανομή θερμοκρασίας στην πάνω επιφάνεια μιας πολυστρωματικής ορθογώνιας δομής. Ο Dorkel [157] προχώρησε την μελέτη αυτή, δημιουργώντας ένα μοντέλο, που θα μπορούσε να προσομοιώσει μια δομή με διάφορες διατομές. Η μέθοδος Fourier εφαρμόστηκε σε προσομοιωτές, με ονόματα Monstra [158] και Therman [159].

Ένα σημαντικό μειονέκτημα όλων των μοντέλων Fourier είναι ότι βρίσκονται σε θέση να περιγράψουν τη κατανομή θερμοκρασίας μόνο σε μια 3Δ δομή συσκευασίας στη μόνιμη κατάσταση. Δεν έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ένα 3Δ μεταβατικό θερμικό μοντέλο μιας δομής τεχνικής συσκευασίας χρησιμοποιώντας μια αμιγώς αναλυτική προσέγγιση. Στο [158], ένας προσομοιωτής, βασισμένος στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργήσει μεταβατικά αποτελέσματα, ενώ στο [159] εξαρτιόταν από πειραματικά αποτελέσματα. Τα [160] και [157] προσπαθούν να παράγουν μοντέλα μεταβατικής λειτουργίας, χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό Laplace για να τμηματοποιήσει προσωρινά. Δυστυχώς όμως, ήταν σε θέση μόνο να δημιουργήσει μεταβατικά αποτελέσματα για ένα μόνο μπλοκ του υλικού. Σαφώς, αυτό είναι περιορισμένο όφελος για τον σχεδιαστή της θερμικής διαχείρισης. Στη βιβλιογραφία, μόνο ένας περιορισμένος αριθμός δημοσιεύσεων εμφανίζεται να χρησιμοποιεί την τεχνική επέκτασης της σειράς Fourier για αυτόν ακριβώς τον λόγο. Αντί αυτού, οι ερευνητές έχουν την τάση να επικεντρώνονται τη προσπάθειά τους σε προσεγγίσεις πεπερασμένων διαφορών, των οποίων τα μοντέλα μεταβατικής λειτουργίας μπορούν να υλοποιηθούν εύκολα με έξυπνο τρόπο.

Πρόσφατη δουλειά του Du [161], [94], επανεξέτασε τη τεχνική της επέκτασης σειρών Fourier. Σε αυτό ένα μεταβατικό θερμικό μοντέλο, κατά Fourier, κατασκευάστηκε ώστε να περιγράψει τη 2Δ κατανομή θερμοκρασίας σε μια θερμαινόμενη, με τη πάροδο του χρόνου, δομή συσκευασίας. Αυτή η αναλυτική προσέγγιση είναι ικανή να μοντελοποιήσει δομές με ποικίλες διατομές επιφανειών. Το μοντέλο αρχικά κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας συνημιτονοειδή επέκταση Fourier, για να τμηματοποιήσει το χώρο, μετατρέποντας έτσι τη μερική διαφορική εξίσωση της διάχυσης της θερμότητας σε ένα σύνολο συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Οι συνήθεις διαφορικές εξισώσεις, κατά τα γνωστά, μπορούν να γραφούν σε μητρική μορφή ως μια ομάδα επιλύσιμων αλγεβρικών εξισώσεων. Αυτές επιλύονται χρησιμοποιώντας το μαθηματικό πακέτο MATLAB/ Simulink, που τμηματοποιεί το χώρο προσωρινά. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να δεχθεί μη αναλυτικές αρχικές συνθήκες (χρόνου) και συνεπώς μπορεί να προσομοιώσει τη διάχυση θερμότητας για γενικές περιπτώσεις. Το μοντέλο μπορεί να ενσωματωθεί μέσα σε ένα προσομοιωτή μετατροπέα ισχύος και έτσι το θερμικό μοντέλο θα

είναι ικανό να μοντελοποιήσει τις μεταβατικές θερμοκρασίες της διάταξης, κατά τη διάρκεια πραγματικής λειτουργίας του μετατροπέα.

Το μοντέλο Fourier έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών. Η προσέγγιση επέκτασης σειρών Fourier μπορεί να περιγράψει τη θερμοκρασιακή κατανομή μιας διάταξης πυριτίου σε μια ομαλή καμπύλη, ακόμα και με πολύ χαμηλή ανάλυση, ειδικά εάν το σχήμα είναι παρόμοιο με ένα των αρμονικών. Η αριθμητική μέθοδος πεπερασμένων διαφορών υστερεί σε αυτό το κομμάτι, διότι μπορεί μόνο να περιγράψει το προφίλ της θερμοκρασίας ως μια ευθεία γραμμή μεταξύ των κόμβων, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8 – Σύγκριση θερμοκρασιακής κατανομής μιας διάταξης μεταξύ μεθόδου κατά Fourier και πεπερασμένων διαφορών με χαμηλή ανάλυση

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών απαιτεί ένα μεγαλύτερο αριθμό κόμβων για να μοντελοποιήσει μια καμπύλη κατανομή με αποτελεσματική ακρίβεια. Έτσι, το μοντέλο κατά Fourier τείνει να απαιτεί λιγότερους όρους από το μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, ειδικά στη 3Δ περίπτωση, που δυναμικά παρέχει μια γρηγορότερη ταχύτητα προσομοίωσης.

Ένα ευεργετικό χαρακτηριστικό των μοντέλων κατά Fourier, είναι ότι είναι δυνατόν να υπολογίσουν τη λύση άμεσα από τις ιδιότητες των υλικών καθώς και τη γεωμετρία της δομής. Επομένως, είναι πιθανόν να είναι ένα χρήσιμο σχεδιαστικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει ένα βέλτιστο σύνολο γεωμετρικών παραμέτρων. Τα μοντέλα αυτά επίσης είναι ικανά να απεικονίσουν τη καθολική θερμοκρασιακή κατανομή μέσα σε μια δομή συσκευασίας. Με τον τρόπο αυτό, το μοντέλο μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τον υπεύθυνο της θερμικής διαχείρισης.

Στη πράξη, μόνο ένας πεπερασμένος αριθμός όρων Fourier μπορεί να συνοψιστεί, χρησιμοποιώντας τη προσέγγιση αυτή. Συνεπώς, τα μοντέλα κατά Fourier βασίζονται στη περικοπή των θεωρητικά άπειρων σειρών Fourier, το οποίο αναπόφευκτα θα οδηγήσει σε

σφάλμα. Ευτυχώς, οι υψηλής τάξης όροι Fourier έχουν αμελητέα επίδραση στη λύση, επειδή οι σειρές συγκλίνουν ραγδαία στο μηδέν. Ο αριθμός συντελεστών επέκτασης εξαρτάται από την απαιτούμενη ακρίβεια. Όπως και να έχει όμως, δεν υπάρχουν αυστηρές κατευθυντήριες γραμμές για το πόσους συντελεστές Fourier να επιλεγούν, για να επιτευχθεί μια επιθυμητή ακρίβεια.

3.5 Συμπεράσματα

Κανένα από τα δίκτυα ωμικών αντιστάσεων, που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, δεν είναι κατάλληλο για θερμικά μοντέλα για τεχνικές συσκευασίας μετατροπέων ισχύος. Όπως αναφέρθηκε στο [67], το πρόβλημα με όλα τα ωμικά δίκτυα είναι το γεγονός ότι η θερμότητα δε ρέει από το ένα σημείο στο άλλο και ότι η ροή της θερμότητας είναι εντελώς διαφορετική από τη 1Δ ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στα καλώδια. Στην ουσία είναι μια 3Δ διάχυση θερμότητας.

Το πιο σημαντικό μειονέκτημα των ωμικών δικτύων είναι ότι είναι μοντέλα μόνιμης κατάστασης. Συνεπώς δε μπορούν να ακολουθήσουν τη θερμική προσομοίωση των μετατροπέων ισχύος για μεταβατικές καταστάσεις, πράγμα το οποίο είναι βασικό για να υπολογισθεί η αξιοπιστία της τεχνικής συσκευασίας ισχύος. Το προφίλ των θερμοκρασιών μεταβατικής λειτουργίας είναι κατά πολύ πιο σημαντικό από εκείνο της μόνιμης, το οποίο παρέχεται από τα ωμικά δίκτυα, γιατί οι ημιαγωγικές διατάξεις στις μονάδες ισχύος υποβάλλονται σε μεγαλύτερο φόρτο θέρμανσης στη μεταβατική λειτουργία, που είναι μερικές τάξεις μεγαλύτερο από τον αντίστοιχο φόρτο μόνιμης κατάστασης. Αυτός ο φόρτος θέρμανσης στη μεταβατική λειτουργία οδηγεί δυναμικά σε θερμικές καταπονήσεις, οι οποίες είναι επιζήμιες λόγω της επαναληπτικής τους φύσης. Συνεπώς, τα θερμικά μοντέλα μεταβατικής λειτουργίας είναι απαραίτητα.

Η κατασκευή ισοδύναμων RC κυκλωμάτων μεταβατικής λειτουργίας ως θερμικά μοντέλα είναι ιδιαίτερη δημοφιλής, επειδή τα θερμικά μοντέλα μπορούν εύκολα να εφαρμοσθούν σε προσομοιωτή ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Η κατασκευή τους είναι μια μη αυτοματοποιημένη διαδικασία και συνεπώς η πιθανότητα για ένα ανθρώπινο σφάλμα είναι μεγάλη, ειδικά όταν επιχειρείται η 3Δ μοντελοποίηση διάχυσης της θερμότητας σε ένα εκτεταμένο RC δίκτυο. Ένας σχεδιαστής πρέπει επίσης να επιλέξει ένα αριθμό και τη θέση των επιπέδων RC, χωρίς κάποιες αυστηρές οδηγίες. Η εξαγωγή παραμέτρων δεν είναι δυνατή για ένα σχεδιαστή, καθώς πρόκειται για μια μη αυτοματοποιημένη χρονοβόρα διαδικασία. Για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης της τεχνικής συσκευασίας του μετατροπέα, θα πρέπει να δοκιμασθούν πολλές διαφορετικές διατάξεις. Για κάθε μια γεωμετρική διάταξη της δομής της συσκευασίας, που ελέγχεται, θα πρέπει ο υπεύθυνος να επιστρέφει στο αρχικό σημείο, το οποίο είναι είτε μια

προσομοίωση με μοντέλο πεπερασμένων διαφορών ή στοιχείων ή ένα πρακτικό πείραμα. Και τα δυο μοντέλα προσπαθούν να μοντελοποιήσουν τον συνδυασμό πολλαπλών πηγών θερμότητας.

Μεγάλη σημασία έχει δοθεί στα κυρίαρχα μοντέλα υποβιβασμού τάξης που υπάρχουν. Η προσέγγιση κατά Krylon φαίνεται να είναι η πιο κατάλληλη για να μοντελοποιηθεί ο τύπος δομών, που συναντάται σε ένα μετατροπέα ισχύος, μιας και μπορεί να διαχειρισθεί μεγάλα γραμμικά μοντέλα. Μπορούν να ενσωματωθούν σε ηλεκτροθερμικούς προσομοιωτές. Αυτό ήταν πλεονέκτημα επίσης των RC δικτύων. Τα μοντέλα υποβιβασμού τάξης υπερτερούν στα εξής πλεονεκτήματα έναντι των RC δικτύων:

- Δεν υπάρχει χρονοβόρα παραμετροποίηση
- Η όλη διαδικασία ακολουθεί καθαρές κατευθυντήριες γραμμές
- Μπορεί να προσομοιώσει με μεγάλη ακρίβεια τη περίπτωση πολλαπλών πηγών θερμότητας

Μοιράζονται όμως ένα σημαντικό μειονέκτημα με τα RC δίκτυα. Τα μοντέλα υποβιβασμού τάξης παράγονται από προσομοιώσεις με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και συνεπώς έχουν συγκεκριμένη δομή. Έτσι, τα μοντέλα αυτά μπορούν γρήγορα να προσομοιώσουν θερμικά τη μεταβατική κατάσταση για μια δεδομένη δομή υπό ένα σύνολο συνωριακών συνθηκών. Άρα δεν είναι δυνατόν να γενικευθεί το μοντέλο και να επαναχρησιμοποιηθεί για όλες τις δομές. Σαφώς, είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθούν μοντέλα, τα οποία δε βασίζονται σε χρονοβόρες αναλυτικές προσομοιώσεις, βασισμένες στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, ως αρχικό σημείο. Χρειάζεται ένα θερμικό μοντέλο, που μπορεί να υλοποιηθεί άμεσα από τις ιδιότητες του υλικού και τη γεωμετρία της δομής.

Οι αριθμητικές μέθοδοι, που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο, είναι εύρωστα εργαλεία προσομοίωσης, τα οποία μπορούν να αναλύσουν πολύπλοκες δομές και να παρέχουν ακριβή αποτελέσματα. Οι αριθμητικές μέθοδοι δεν είναι υπολογιστικά αποτελεσματικές και χρειάζονται μεγάλο υπολογιστικό χρόνο για προσομοιώσουν με μεγάλη ακρίβεια τον μετατροπέα, ειδικά για 3D δομές. Επιπρόσθετα, ο χρήστης συχνά απαιτείται να υλοποιήσει μια δομή μοντέλου και ένα κατάλληλο πλέγμα, το οποίο καταναλώνει ακόμη περισσότερο χρόνο. Υπάρχουν διαθέσιμα διαφημιστικά λογισμικά πακέτα προσομοίωσης, τα οποία εφαρμόζουν αριθμητικές μεθόδους, αλλά δε μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στη προσομοίωση του μετατροπέα. Επιπλέον, το κόστος της άδειας ενός τέτοιου λογισμικού πακέτου μπορεί να είναι πολύ ακριβό και ο χρήστης μπορεί να χρειαστεί εκπαίδευση.

Η πιο πολλά υποσχόμενη προσέγγιση είναι αυτή της τεχνικής επέκτασης Fourier. Είναι μια αναλυτική μέθοδος επίλυσης της εξίσωσης της θερμότητας βασισμένη στην ιδέα υπολογισμού λύσεων ως αθροίσματα άπειρων σειρών. Σε αυτή τη τεχνική είναι πιθανόν να υπολογισθεί η θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος μιας διάταξης καλύτερα από ότι να υπολογισθεί με βάση την αναπαράσταση κόμβων, όπως συμβαίνει σε κάποια θερμικά μοντέλα. Το μοντέλο Fourier προσφέρει ένα πολύ καλό ισοζύγιο ανάμεσα στη ταχύτητα προσομοίωσης και την ακρίβεια αποτελεσμάτων σε σχέση με τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων ή διαφορών. Η προσέγγιση αυτή είναι ανώτερη με μοντέλα, που βασίζονται στις συναρτήσεις Green. Τα τελευταία είναι πολύ αργά σε ταχύτητα σύγκλισης και απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Αυτό σημαίνει ότι τα μοντέλα, που χρησιμοποιούν συναρτήσεις Green δεν είναι κατάλληλα για να ενσωματωθούν για τη προσομοίωση ενός μετατροπέα ισχύος.

4

Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα σε συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά κριτήρια, που απαιτούνται και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από το πρώτο κιόλας στάδιο σχεδίασης μιας συσκευασίας ηλεκτρονικών ισχύος. Αυτό όμως καθιστά τη σχεδίαση ηλεκτρονικών ισχύος ακόμα πιο δύσκολη, πολύπλοκη, και απαιτεί ένα καλό συνδυασμό γνώσεων ηλεκτρονικών ισχύος καθώς και ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Υπάρχουν τρία σημαντικά θέματα, που αποτελούν αγκάθι στη σχεδίαση ηλεκτρονικών ισχύος. Αυτά είναι οι απώλειες, η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή καθώς και οι αρμονικές. Όλα αυτά επηρεάζουν το κόστος, το μέγεθος, την απόδοση και τη αξιοπιστία του συστήματος. Τελικά, το πρόβλημα καταλήγει να είναι ένα ισοζύγιο ανάμεσα σε όλες αυτές τις παραμέτρους, όταν πρόκειται να σχεδιάσουμε ένα μετατροπέα ισχύος [95].

4.1 Εισαγωγή

Στις αρχές του 19ου αιώνα σηματοδοτείται η απαρχή της τηλεπικοινωνιακής επανάστασης με το πείραμα εκπομπής και λήψης ηλεκτρομαγνητικού σήματος, που πραγματοποίησε ο Marconi πάνω από τον ατλαντικό ωκεανό. Έκτοτε οι τηλεπικοινωνίες βρήκαν έναν ανεξάντλητο αριθμό εφαρμογών. Η πληθώρα εν τούτοις των εφαρμογών αυτών απαιτούσε ολοένα και μεγαλύτερο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με αποτέλεσμα στις ημέρες μας οι συχνότητες λειτουργίας να εκτείνονται μέχρι αυτές του φωτός.

Σχεδόν όμως παράλληλα με την ανάπτυξη και εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών, οι επιστήμονες παγκοσμίως άρχισαν να παρατηρούν φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης μεταξύ των συσκευών και των συστημάτων. Ως ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση (electromagnetic interference) ορίζεται οποιοδήποτε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο, το οποίο μπορεί να μειώσει

την επίδοση μιας συσκευής ή ενός συστήματος. Αρχικά, τέτοια φαινόμενα παρατηρήθηκαν σε συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και σε ραδιοφωνικές εκπομπές και λήψεις σημάτων.

Είναι γνωστό ότι ένας σπινθηρισμός προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, πλούσιων σε φασματικό περιεχόμενο, που μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές ή θόρυβο σε διάφορες ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές. Πολυάριθμες άλλες πηγές ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών, όπως οι κεραυνοί, οι DC ηλεκτρικοί κινητήρες και οι λαμπτήρες φθορισμού, επίσης μπορούν να προκαλέσουν τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και παρεμβολών σε ηλεκτρικές συσκευές.

Στις ημέρες μας, όπου η χρήση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών είναι εκτεταμένη, η μελέτη των προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης είναι κρίσιμη για τη σχεδίαση και την απρόσκοπτη λειτουργία τους σε όλο το εύρος των εφαρμογών τους όπως: στα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, στα κινητά τηλέφωνα, στις οικιακές συσκευές και στα ιατρικά μηχανήματα [96].

4.2 Ιστορική Αναδρομή

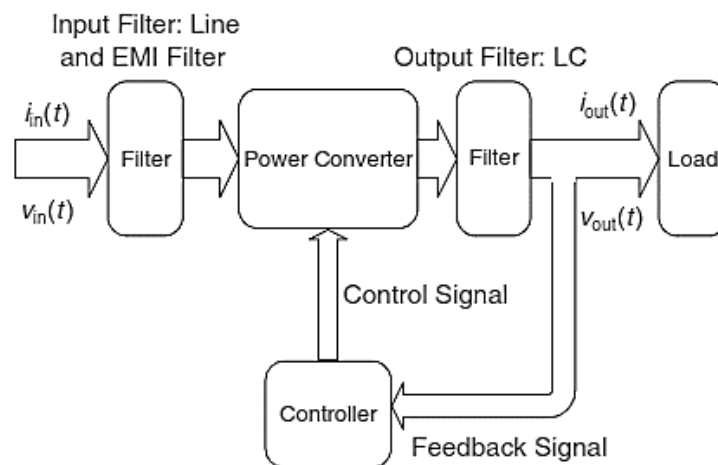
Μπορεί να ειπωθεί ότι το πρόβλημα των παρεμβολών άρχισε να υφίσταται από τον πρώτο σπινθηρισμό στο πείραμα του Marconi στο τέλος του 19ου αιώνα. Το 1901, ο Marconi δημιούργησε την πρώτη υπερατλαντική ζεύξη χρησιμοποιώντας ένα πλαίσιο από σύρματα χαλκού. Οι μόνοι δέκτες ουσιαστικής σημασίας τότε ήταν οι ραδιοφωνικοί δέκτες. Ήταν λίγοι και ευρέως διασκορπισμένοι, οπότε το πρόβλημα των παρεμβολών ήταν εύκολο να λυθεί. Τα πρώτα τεχνικά έγγραφα σχετικά με τις ραδιοπαρεμβολές εμφανίστηκαν το 1920. Οι κακοσχεδιασμένες αντένες και δέκτες εκείνης της εποχής ήταν ευαίσθητες σε παρεμβολές. Η βελτίωση στη σχεδίαση των συστημάτων πομπών/ δεκτών έλυσε το πρόβλημα.

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκόσμιου Πολέμου, η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών, κυρίως ραδιοπομπών, συσκευών πλοήγησης και radar, αυξήθηκε με αποτέλεσμα την αύξηση των εμφανιζόμενων παρεμβολών. Η χρήση της τεχνικής επανατοποθέτησης συχνότητας σε ένα όχι ευρέως χρησιμοποιούμενο φάσμα συχνοτήτων διόρθωσε σημαντικά τα προβλήματα που προκλήθηκαν. Η μεγάλη αύξηση των προβλημάτων παρεμβολών εμφανίστηκε στη δεκαετία του '50 με την εφεύρεση των υψηλής πυκνότητας ηλεκτρονικών παραγόντων όπως το διπολικό τρανζίστορ, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και τα chip μικροεπεξεργαστών στη δεκαετία του '70. Επίσης οι αυξανόμενες ανάγκες για υπηρεσίες φωνής και δεδομένων κατέστησε περισσότερο «συνωστισμένο» το φάσμα συχνοτήτων. Οι προσπάθειες για εξεύρεση λύσης

εναπόκεινται στον προσεκτικό σχεδιασμό, που λαμβάνει υπόψη του τη χρησιμοποίηση του φάσματος, και συνεχίζονται μέχρι σήμερα [96],[97].

4.3 Σημασία ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής

Ο μετατροπέας ισχύος, όπως έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, μετατρέπει μια ακανόνιστης μορφής ισχύ από AC ή DC σε μια κανονικής μορφής AC ή DC τάση ή ρεύμα και το μεταφέρει σε ένα φορτίο. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχει τον μετατροπέα λαμβάνοντας μετρήσεις τάσης ή/ και ρεύματος από την είσοδο και την έξοδο και παράγει σήματα για το κύκλωμα ισχύος. Σε ένα σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος, η ροή της ηλεκτρικής ενέργειας ελέγχεται βάση της απαίτησης του φορτίου. Σε ένα τέτοιο σύστημα, τα φίλτρα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής είναι σημαντικά τμήματα αυτού. Υπάρχουν διάφορες απαιτήσεις όσον αφορά το φορτίο, και αυτές θα πρέπει να πληρούνται, ώστε να μειωθεί ο θόρυβος και επίπεδα αρμονικών του συστήματος. Το σχ. 4.1 απεικονίζει ένα μπλοκ διάγραμμα ενός μετατροπέα ισχύος.



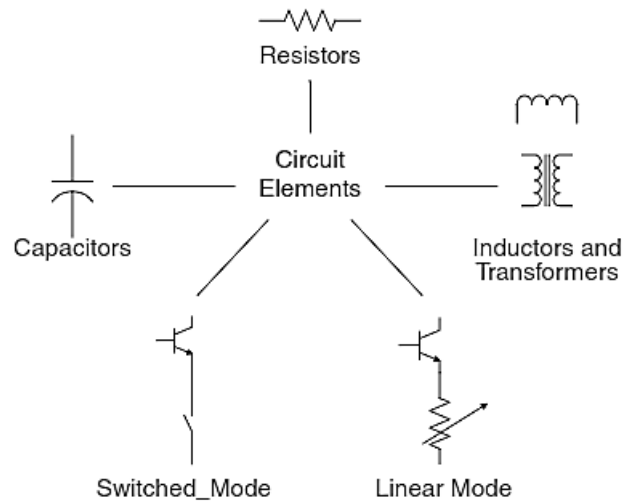
Σχήμα 4.1 – Μπλοκ διάγραμμα μετατροπέα ισχύος.

Κύριοι στόχοι των μοντέρνων συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος είναι να μεταφέρουν ισχύ με τη μέγιστη απόδοση, με ελάχιστο κόστος και βάρος μέσα σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Τα στοιχεία ενός κυκλώματος είναι αντιστάσεις, πυκνωτές, μαγνητικά στοιχεία και τρανζίστορ στα περισσότερα ηλεκτρικά συστήματα, όπως απεικονίζεται στο σχ. 4.2. Κάποια από αυτά τα στοιχεία μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα υψηλής ή χαμηλής ισχύος.

Στα περισσότερα ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπου η απόδοση δεν είναι το κύριο ενδιαφέρον, τα στοιχεία του κυκλώματος αποτελούνται από αντιστάσεις, πυκνωτές και τρανζίστορ. Είναι δύσκολο να ενσωματωθούν μαγνητικά στοιχεία μέσα σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, αφού το

μέγεθος τους σε σχέση με πυκνωτές και αντιστάσεις είναι μεγαλύτερο. Τα τρανζίστορ μπορούν να λειτουργήσουν σε γραμμική ή μεταβατική λειτουργία, αφού μεταφέρουν σήματα χαμηλής ισχύος.

Στους μετατροπείς ισχύος όμως η απόδοση είναι το κύριο ζήτημα. Τα κυκλώματα ισχύος αποτελούνται από πυκνωτές, μαγνητικά στοιχεία και τρανζίστορ σε μεταβατική λειτουργία.



Σχήμα 4.2 – Στοιχεία κυκλώματος σε ηλεκτρικά συστήματα

Οι αντιστάσεις καθώς και οι διακόπτες ισχύος σε γραμμική λειτουργία δε χρησιμοποιούνται στα περισσότερα κυκλώματα ισχύος, λόγω των σημαντικών απωλειών που παράγονται και που τελικώς οδηγούν σε μείωση της απόδοσης και προκαλούν θερμικά προβλήματα.

Στα ηλεκτρονικά ισχύος, οι υψηλές τάσεις και τα υψηλά ρεύματα επεξεργάζονται με γρήγορη εναλλαγή για να μειωθούν οι απώλειες, που αποτελούν τις σημαντικές πηγές ηλεκτρομαγνητικού θορύβου, που προκαλεί επιπρόσθετα προβλήματα. Η κύρια έρευνα της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής στα ηλεκτρονικά ισχύος εστιάζεται στην ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών από μετρήσεις, μοντελοποίηση και προσομοιώσεις και στην ανάπτυξη ενεργών φίλτρων ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής σε μετατροπείς ισχύος για να καταστείλει τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών επέτρεψε την αύξηση της διακοπτικής συχνότητας, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης και της πυκνότητας ισχύος στα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος. Αυτό συντέλεσε στο να βοηθήσει τους σχεδιαστές μετατροπέων ισχύος να αυξήσουν την αξιοπιστία και την απόδοση των συστημάτων αλλά από την άλλη αύξησε τις απαιτήσεις και τα μέτρα προστασίας για την ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση [95].

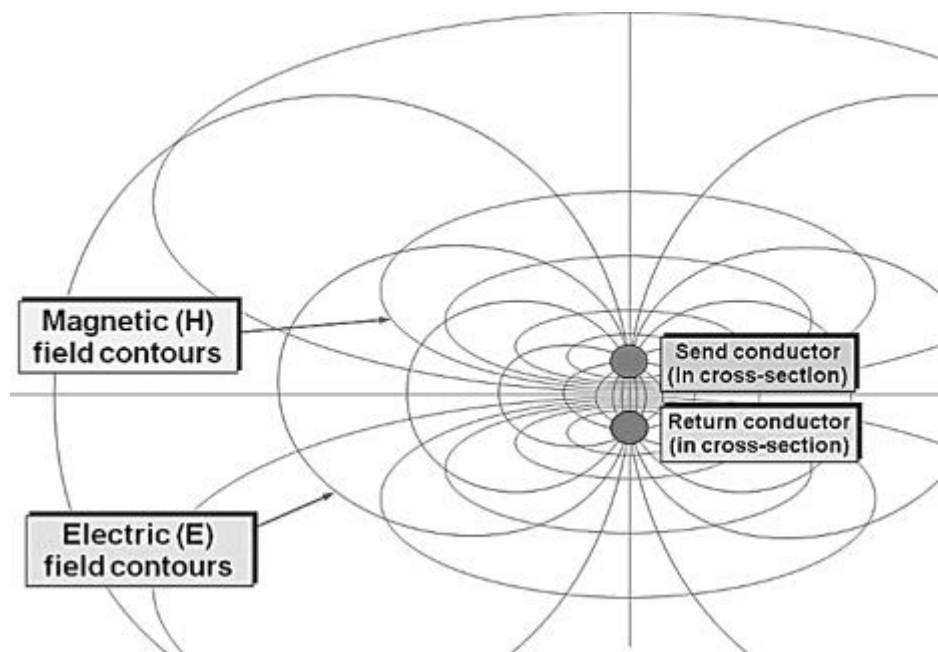
4.4 Απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο

Προτού προχωρήσουμε στην ανάλυση και περιγραφή μέτρων προστασίας από την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, κρίνεται αναγκαίο να γίνει μια θεωρητική αναφορά σε κάποιες έννοιες, οι οποίες θα βοηθήσουν στη καλύτερη κατανόηση του εν λόγω αντικειμένου.

4.4.1 Ηλεκτρομαγνητική θεωρία

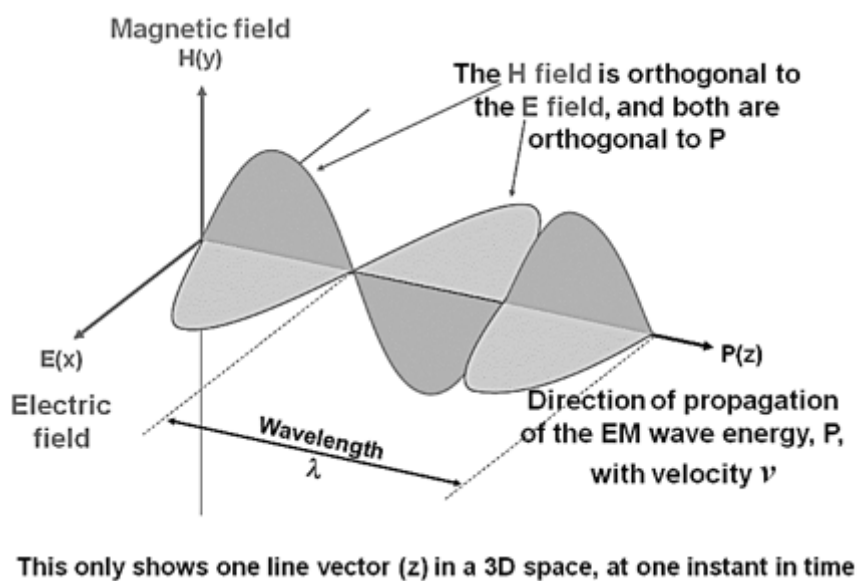
Κάθε υλικό στο κόσμο φέρει μια αγωγιμότητα, διαπερατότητα (μ_0) και επιτρεπτότητα (ϵ_0). Για το κενό η διαπερατότητα και η επιτρεπτότητα αντίστοιχα είναι $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ και $\epsilon_0 = 1/36 \cdot \pi \cdot 10^{-9} F/m$. Άλλα υλικά χαρακτηρίζονται από τη σχετική διαπερατότητα (μ_R) και επιτρεπτότητα (ϵ_R), τα οποία είναι αδιάστατα νούμερα, απλά πολλαπλασιαστές για την διαπερατότητα και την επιτρεπτότητα του κενού. Συνεπώς, η συνολική διαπερατότητα και επιτρεπτότητα είναι αντίστοιχα $\mu_0 \cdot \mu_R$ και $\epsilon_0 \cdot \epsilon_R$.

Πιο συγκεκριμένα, η διαπερατότητα είναι συνδεδεμένη με την επαγωγική ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, που σχεδιάζεται στο σχ. 4.3 ως οι καμπύλες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Αντίστοιχα η επιτρεπτότητα είναι συνδεδεμένη με την χωρητική ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, που σχεδιάζεται επίσης στο σχ. 4.3 ως οι καμπύλες του ηλεκτρικού πεδίου. Τέλος, η αγωγιμότητα είναι συνδεδεμένη με την απώλεια ενέργειας από τη μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (μαγνητικής ή ηλεκτρικής) σε θερμική ενέργεια [95].



Σχήμα 4.3 – Συνένωση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου μεταξύ δυο αγωγικών επαφών

Το σχήμα καθώς και το μέγεθος των αγώγιμων δομών, που διαρρέονται από ρεύμα, καθώς και η συνολική διαπερατότητα $\mu_0 \cdot \mu_R$ και επιτρεπτότητα $\epsilon_0 \cdot \epsilon_R$ των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένες, προκαλούν επαγωγή (L) και χωρητικότητα (C) αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι όποτε υπάρχει μια κυμαινόμενη τάση (V), τότε υπάρχει πάντα κι ένα ανάλογο ρεύμα (I) και αντίστροφα. Κάθε κυμαινόμενη τάση ή ρεύμα είναι ηλεκτρομαγνητική ισχύς στην πραγματικότητα (ρυθμός ροής ηλεκτρικής ενέργειας), που δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Στο σχ. 4.4, απεικονίζεται ένα οδεύον ηλεκτρομαγνητικό κύμα μιας συγκεκριμένης συχνότητας.



Σχήμα 4.4 – Απεικόνιση ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο χώρο

Παρατηρούμε ότι τα πεδία E , B είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Με άλλα λόγια το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, καθώς το κύμα ταξιδεύει στο χώρο, είναι πάντα κάθετα μεταξύ τους και κυμαίνονται σε διαστάσεις κάθετες προς τη κατεύθυνση, που κινείται η ηλεκτρομαγνητική ισχύς.

Ένας συνήθης τρόπος να απεικονίσουμε τα πεδία E , B σε σχέση με τις τάσεις και τα ρεύματα των αγωγών φαίνεται στο σχ. 4.3. Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες του πεδίου E τερματίζουν πάντα πάνω σε αγωγούς, κάθετα στις επιφάνειες αυτών, ενώ οι καμπύλες του πεδίου H δε τερματίζουν πουθενά και ποτέ. Ενδιαφέρον σε ένα τέτοιο σχήμα όπως αυτό του σχ. 4.3 αποτελεί η πυκνότητα των γραμμών ανά εκατοστό του διαγράμματος, και δηλώνει το πόσο ισχυρό είναι το κάθε πεδίο στο εν λόγω σημείο. Έτσι εύκολα διαπιστώνουμε ότι τα πεδία είναι πιο ισχυρά μεταξύ των δυο αυτών αγωγών. Στο σημείο αυτό επιβεβαιώνονται και οι τέσσερις γνωστές εξισώσεις του Maxwell, που περιέχουν το νόμο του Ampere, που λέει ότι τα ρεύματα

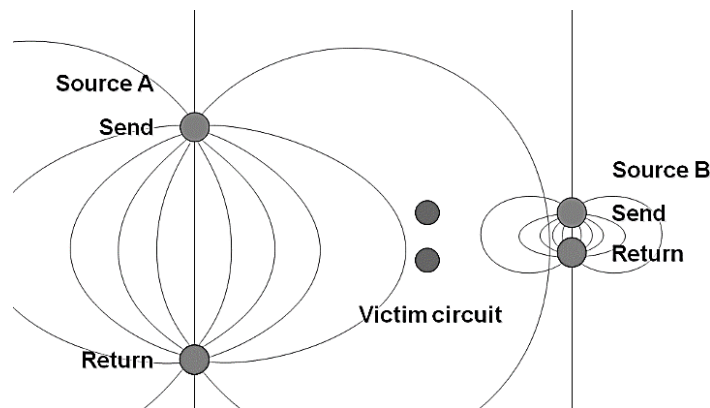
ρέουν πάντα σε κλειστούς βρόχους, και το νόμο του Faraday, που λέει ότι τα ρεύματα ρέουν πάντα κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιήσουν τις επιφάνειες, που καταλαμβάνουν οι βρόχοι τους.

Όλα τα παραπάνω σηματοδοτούν ότι η ηλεκτρομαγνητική ισχύς σε οποιοδήποτε σημείο στο χώρο είναι μηδέν, δηλαδή όση εισέρχεται στο σημείο αυτό άλλη τόση εξέρχεται από αυτό. Φυσικά αυτό είναι ο νόμος ρεύματος του Kirchhoff, ο οποίος λέει ότι το άθροισμα των ρευμάτων σε οποιοδήποτε σημείο είναι μηδέν, και είναι ισοδύναμος με το νόμο του Ampere. Ένας άλλος τρόπος να εκφρασθεί το ίδιο πράγμα, θα ήταν να πούμε ότι όλα τα ρεύματα ρέουν σε κλειστούς βρόχους. Έτσι αν κάποιο ρεύμα μπορούσε να δραπετεύσει από το βρόχο του χωρίς να επιστρέψει σε αυτόν, τότε στο σημείο διαφυγής θα υπήρχε μια ανισορροπία ως προς τα ρεύματα. Αυτό σημαίνει λοιπόν, ότι ο νόμος διατήρησης της ενέργειας δε θα ίσχυε, κάτι το οποίο φυσικά δε μπορεί να συμβεί στο σύμπαν.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να διαδοθεί μέσω μιας κυματικής εμπέδησης (αντίστασης) μέσω αέρα ή κενού ή κάποιου άλλου μέσου. Για το κενό ή τον αέρα η κυματική αυτή αντίσταση είναι της τάξης των 377Ω κι ισούται με $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi\Omega$, ενώ για άλλα μέσα (όπως PVC, λάδι, οπτική ίνα κ.α.) ισούται με $120\pi\Omega\sqrt{\mu_R/\epsilon_R}$. Αυτοί οι τύποι βέβαια ισχύουν σε μακρινό πεδίο. Σε κοντινό πεδίο τα πράγματα είναι πιο πολύπλοκα και τα αποτελέσματα στην αντίσταση της διαδρομής, που ακολουθεί το κύμα μέσω του αέρα ή κάποιου άλλου διηλεκτρικού είναι επαγωγική ή χωρητική σύζευξη, που συχνά καλείται παρασιτική επαγωγή ή χωρητικότητα. Για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται μέσα από αγωγικές δομές, αυτό που ονομάζουμε ισχύ, σήματα ή ρεύματα που ρέουν μέσα από καλώδια ή ίχνη τυπωμένων κυκλωμάτων, το περιβάλλον γύρω τους έχει πολύ μεγάλη σημασία για την εμπέδηση, αλλά το ίδιο σημαντικό είναι και το σχήμα των δομών, που μεταφέρουν το ρεύμα καθώς και το σχήμα και την εγγύτητα των γειτονικών αγωγών. Συνεπώς, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ταξιδεύουν κατά μήκος των αγωγών μπορεί να συναντήσουν εμπέδηση, που είναι χαμηλότερες ή υψηλότερες από εκείνη που υπάρχει γειτονικά, και τους περιβάλλει. Αυτό σημαίνει ότι ένα ρεύμα που διαρρέεται μέσω ενός αγωγού έχει εναλλακτικά μονοπάτια από τον αέρα ή άλλα διηλεκτρικά. Στόχος μας είναι να περιορίσουμε αυτά τα εναλλακτικά μονοπάτια, ώστε να αυξήσουμε την ακεραιότητα των σημάτων, ισχύος καθώς και την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα.

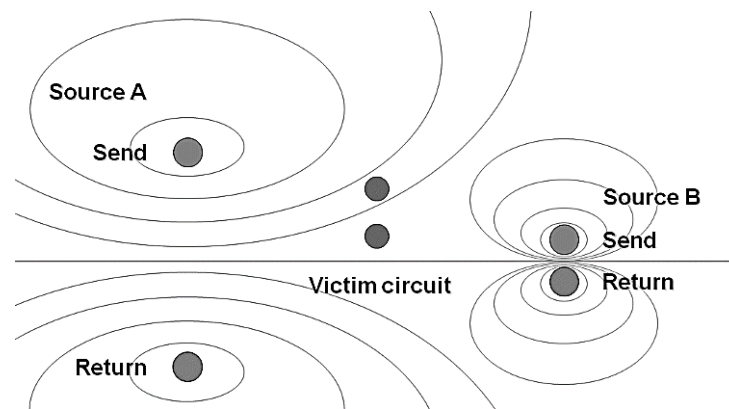
Η μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ισχύος από ένα κύκλωμα αγωγής σε ένα άλλο είτε σκοπίμως είτε όχι ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική σύζευξη. Όσο μεγαλύτερο είναι η περιοχή που καταλαμβάνει ένα μονοπάτι αγωγής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η εμπέδηση του, τόσο μεγαλύτερα τα πεδία E, H και συνεπώς και η σύζευξη μεταξύ των αγωγών. Όπως φαίνεται στο σχ. 4.5 και 4.6 όσο μεγαλύτερος είναι ο βρόχος του ρεύματος τόσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία του ανεπιθύμητου ρεύματος, το οποίο διαρρέει κυκλώματα

«θύματα», προκαλώντας υψηλά επίπεδα θορυβωδών ρευμάτων σε ανεπιθύμητους βρόχους, μειώνοντας έτσι την ατρωσία και τις εκπομπές.



Σχήμα 4.5 – Απεικόνιση σύζευξης ηλεκτρικού πεδίου

Επιπλέον τα σχ. 4.5 και 4.6 μας δείχνουν πόσο σημαντικό είναι να ελαχιστοποιήσουμε την επιφάνεια, που καταλαμβάνουν οι βρόχοι ρευμάτων, ώστε να μεγιστοποιήσουμε την ακεραιότητα του σήματος, ισχύος και την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα [95].

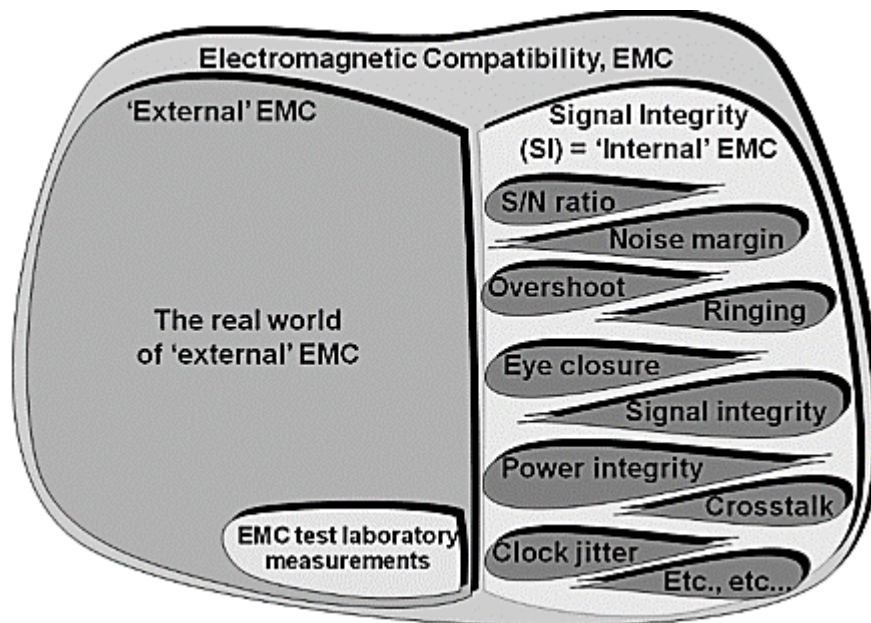


Σχήμα 4.6 – Απεικόνιση σύζευξης μαγνητικού πεδίου

4.4.2 Χρήσιμοι ορισμοί

Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον μπορεί να οριστεί ως ένα σύνολο όλων των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, που υπάρχουν σε μια ορισμένη θέση. Περιγράφεται από την απαρτίωση και το χαρακτηρισμό των πηγών και των ποσοτήτων παρεμβολής στην εξεταζόμενη θέση. Ως ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα ορίζεται η ικανότητα των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών στοιχείων, συσκευών και συστημάτων να λειτουργούν ικανοποιητικά στο

ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον για το οποίο προορίζονται, χωρίς να υφίστανται ούτε να προκαλούν ανεπιθύμητες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε οτιδήποτε εντός κι εκτός τους. Συνεπώς η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα διακρίνεται σε δυο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκει η εσωτερική, ενώ στη δεύτερη η εξωτερική ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (βλ. Σχ. 4.7). Κύριο χαρακτηριστικό των διαταραχών αυτών είναι ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος, που είναι ένα χρονικώς μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο, το οποίο δε μεταφέρει προφανώς ωφέλιμη πληροφορία και μπορεί να υπερτίθεται ή να συνδυάζεται με το επιθυμητό σήμα.



Σχήμα 4.7 – Διάγραμμα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Ως ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή ορίζεται οποιοδήποτε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο ενδέχεται να αλλοιώσει τη λειτουργία μιας συσκευής ή ενός συστήματος, ενώ ηλεκτρομαγνητική εκπομπή ονομάζεται το φαινόμενο, κατά το οποίο ακτινοβολείται με ηλεκτρομαγνητική ενέργεια από την πηγή.

Συχνά στη βιβλιογραφία συναντώνται οι όροι της ατρωσίας ή της ηλεκτρομαγνητικής ευπάθειας. Συγκεκριμένα λοιπόν, ατρωσία (αντοχή) σε μια διαταραχή είναι η ικανότητα ενός στοιχείου, μιας συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς υποβιβασμό της απόδοσής του υπό παρουσία ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών. Τέλος, ηλεκτρομαγνητική ευπάθεια είναι η αδυναμία ενός στοιχείου, μιας συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς υποβιβασμό της απόδοσής του υπό τη δράση ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών. Προφανώς η ευπάθεια είναι η έλλειψη ατρωσίας. Τέλος, ως ηλεκτρομαγνητική εκφόρτιση καλείται η μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου μεταξύ σωμάτων διαφορετικού ηλεκτροστατικού φορτίου.

Μερικές από τις πηγές και τις συσκευές, που παράγουν ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό θόρυβο είναι:

- Βιομηχανικός εξοπλισμός
- Κεραίες ΑΜ
- Ηλεκτρικοί κινητήρες
- Μετατροπείς ισχύος
- Ραντάρ
- Κινητή τηλεφωνία
- Ανελκυστήρες
- Λαμπτήρες φθορισμού ή πυράκτωσης σε περίπτωση κάποιου σφάλματος
- Τροφοδοτικά διακοπόμενου τύπου

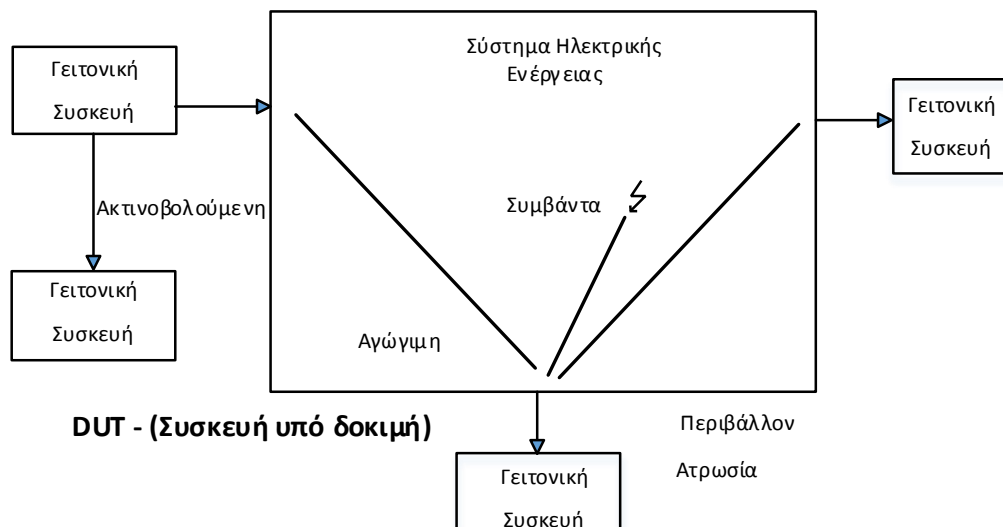
4.4.3 Τύποι ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής

Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή διακρίνεται σε δυο βασικούς τύπους, με κριτήριο τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδεται. Αυτοί είναι οι εξής:

- Ακτινοβολούμενες παρενοχλήσεις, που εκπέμπονται από μια συσκευή και λαμβάνονται από μια άλλη χωρίς την ανάγκη κάποιου ενδιάμεσου αγωγίμου υλικού, αλλά με τη παρουσία μόνο αέρα. Το εύρος των συχνοτήτων αυτών των εκπομπών είναι 30MHz έως 1GHz.
- Αγώγιμες παρενοχλήσεις, οι οποίες χρειάζονται τη παρουσία ενός αγωγού για να τις μεταφέρει από μια συσκευή σε μια άλλη. Το εύρος συχνοτήτων αυτής της κατηγορίας είναι από 10kHz έως 30MHz. Οι παρενοχλήσεις αυτές αποτελούνται από δυο ανεξάρτητες συνιστώσες. Η πρώτη είναι η συνιστώσα κοινού τρόπου κι η δεύτερη είναι η συνιστώσα διαφορικού τρόπου. Η συνιστώσα κοινού τρόπου παρουσιάζεται ως μια τάση τόσου του αγωγού φάσης όσο και του ουδέτερου, ως προς γη, ενώ η συνιστώσα διαφορικού τρόπου ως μια τάση ανάμεσα στον αγωγό φάσης και τον ουδέτερο.

Στο σχ. 4.8 απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρά μια συσκευή με το ηλεκτρομαγνητικό της περιβάλλον. Όπως φαίνεται η εκπομπή της συσκευής μπορεί να αποτελείται κι από αγώγιμες αλλά κι από ακτινοβολούμενες παρενοχλήσεις. Οι ακτινοβολούμενες παρενοχλήσεις μπορούν να επηρεάσουν κάποια άλλη συσκευή, όταν αυτή βρίσκεται σε σχετικά κοντινή απόσταση, από τη συσκευή, η οποία εκπέμπει τη παρεμβολή αυτή. Από την άλλη μεριά, οι αγώγιμες παρενοχλήσεις επηρεάζουν μια συσκευή μέσω ενός ηλεκτρικά αγωγίμου μέσου και είναι πιθανότερο η τελευταία να επηρεαστεί, όταν είναι ηλεκτρικά κοντινότερα, δηλαδή όταν υφίσταται μικρότερη σύνθετη αντίσταση ανάμεσα τους.

Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε μια συσκευή που συνδέεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, τότε αυτή εκτίθεται σε ένα ηλεκτρικό περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει όχι μόνο λόγω των εκπομπών των άλλων συσκευών, που συνδέονται στο ίδιο δίκτυο, αλλά και λόγω των διάφορων φαινομένων που συμβαίνουν στο σύστημα, όπως για παράδειγμα διακοπτικά φαινόμενα (δηλαδή το άνοιγμα ή κλείσιμο διακοπών στο δίκτυο από τη μεταφορά σε άλλο επίπεδο τάσης), βραχυκυκλώματα, κεραυνικά πλήγματα (κάτι που εξετάζεται σε άλλο κεφάλαιο, κι αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα, που λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση ενός μετατροπέα ισχύος) κ.α. [100].



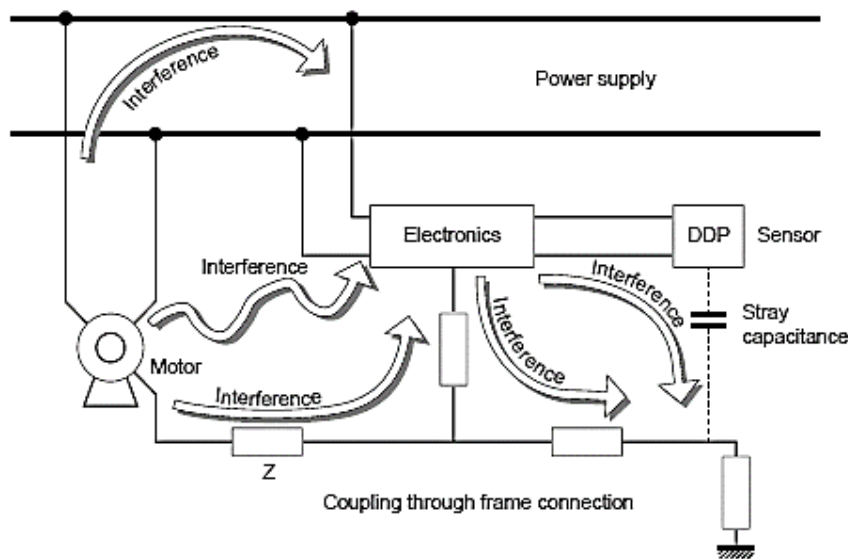
Σχήμα 4.8 – Διάγραμμα με περιληπτική σύνοψη της ορολογίας για την Η/Μ συμβατότητα

4.4.4 Τρόποι σύζευξης EMC

Ο όρος σύζευξη αναφέρεται στη σύνδεση, τη μεταφορά ή τη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών από τον πομπό σε ευαίσθητες συσκευές. Στο σχ. 4.8 βλέπουμε διάφορους τρόπους μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών, από έναν κινητήρα στην παροχή ισχύος και στα ηλεκτρονικά συστήματα και από τα ηλεκτρονικά συστήματα σε επιμέρους τμήματα του κυκλώματος και στο φορτίο. Η σύζευξη εκφράζεται από τις τιμές του συντελεστή σύζευξης K , που έχει μονάδες dB. Ο συντελεστής αυτός δείχνει πόσο μπορεί να επηρεάσει η διαταραχή, που μεταδίδει μια πηγή, τον πιθανό δέκτη. Δίνεται από την σχέση: $K = 20 \log A_{\lambda\mu\beta\alpha\nu\acute{\alpha}\nu\omicron\mu\epsilon\nu\omicron} / A_{\mu\epsilon\tau\alpha\delta\iota\delta\omicron\mu\epsilon\nu\omicron}$, όπου A το πλάτος της διαταραχής που παράγει η πηγή. Ο συντελεστής K είναι σημαντικός, όταν η μεταφορά των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών είναι ανάλογη προς τη συχνότητα, πράγμα που συμβαίνει συχνά στην πράξη. Γενικά διακρίνονται τρεις διαφορετικοί τρόποι σύζευξης:

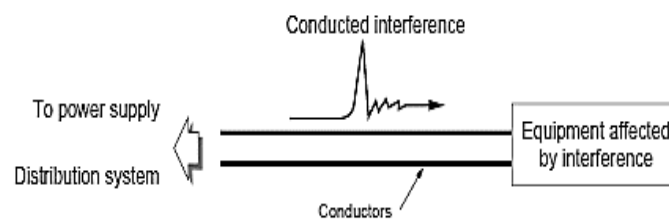
- Κοινός και διαφορικός τρόπος σύζευξης μέσω αγωγού.
- Κοινή σύζευξη εμπέδησης.
- Διαφορικός τρόπος σύζευξης μέσω ακτινοβολίας ή crosstalk.

Μια διαταραχή μπορεί να διαδοθεί κατά μήκος ενός κυκλώματος δυο καλωδίων. Αυτός ο τύπος σύζευξης καλείται αγωγήμη σύζευξη. Επομένως η διαταραχή σε αυτού του είδους τις περιπτώσεις μπορεί να μεταδοθεί μέσω εσωτερικών γραμμών παροχής ισχύος ή συστημάτων διανομής, συρμάτων ελέγχου, γραμμών μεταφοράς δεδομένων, διαύλων, καλωδίων γείωσης, κατανεμημένων χωρητικότητας κλπ.



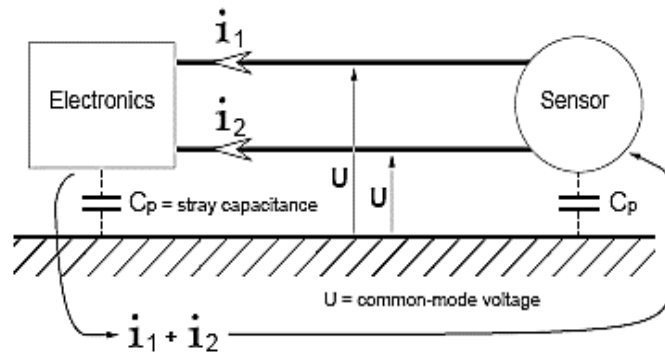
Σχήμα 4.8 – Τρόποι μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών.

Ένα παράδειγμα σύζευξης σε αγωγό βλέπουμε στο σχ. 4.9, όπου ένα σύστημα διανομής ισχύος επιδρά αρνητικά σε έναν ευαίσθητο εξοπλισμό. Υπάρχουν δύο τρόποι αγωγήμη σύζευξης: ο κοινός κι ο διαφορικός.



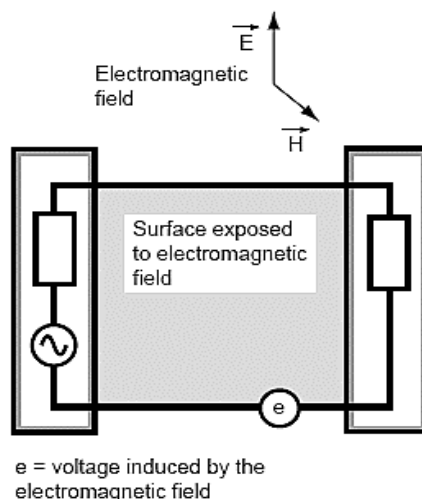
Σχήμα 4.9 – Γενικό παράδειγμα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής μέσω αγωγών.

Ο κοινός τρόπος σύζευξης μέσω αγωγού παράγει τάση ή ρεύμα διαταραχής κοινού τρόπου. Η τάση διαταραχής κοινού τρόπου, όπως βλέπουμε στο σχ. 4.10, είναι η τάση των αγωγών με σημείο αναφοράς το σασί ή την γείωση και έχει επιπτώσεις σε όλους τους ενεργούς αγωγούς. Έτσι στα ηλεκτρικά συστήματα οι δοκιμές σε διακόπτες κυκλωμάτων χαμηλής τάσης γίνονται μμεταξύ της γείωσης και όλων των φάσεων. Το ρεύμα κοινού τρόπου είναι το ρεύμα που διαρρέει όλους τους ενεργούς αγωγούς κατά την ίδια κατεύθυνση. Στο σχ. 4.10 παρατηρούμε ότι το ρεύμα επιστρέφει μέσω της κατανεμημένης χωρητικότητας. Παράδειγμα ρεύματος κοινού τρόπου είναι το ρεύμα, που δημιουργείται σε γραμμή χαμηλής τάσης από κεραυνικό ρεύμα (lightning impulse). Οι διαταραχές κοινού τρόπου αποτελούν το κύριο πρόβλημα σε θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, γιατί η διαδρομή διάδοσης τους είναι δύσκολο να διαπιστωθεί.



Σχήμα 4.10 – Παράδειγμα κοινού τρόπου σύζευξης μέσω αγωγού.

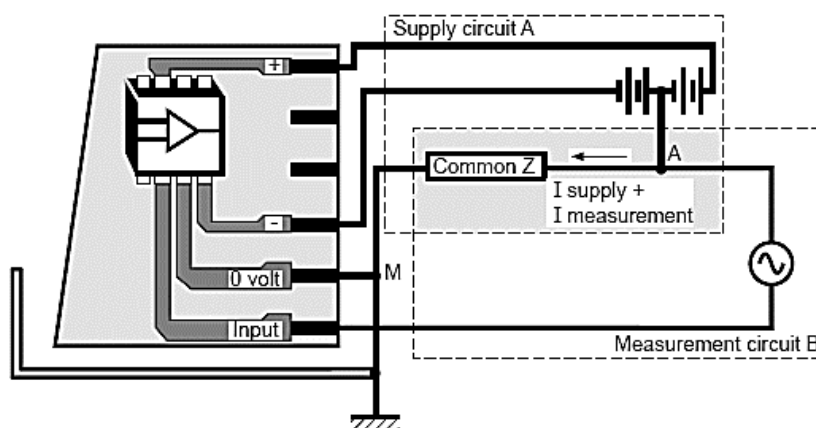
Στο διαφορικό τρόπο σύζευξης μέσω αγωγού το ρεύμα διαδίδεται σε έναν από τους αγωγούς, περνάει μέσα από τον εξοπλισμό και επιστρέφει μέσω ενός άλλου αγωγού, όπως βλέπουμε και στο σχ. 4.11. Έτσι το ρεύμα και η τάση σε αυτόν τον τρόπο σύζευξης λαμβάνουν μέρος μεταξύ δυο φάσεων σε ηλεκτρικά συστήματα (όπως σε διακόπτες κυκλωμάτων) ή μεταξύ δύο καλωδίων, που μεταφέρουν ευαίσθητα δεδομένα σε ηλεκτρονικά συστήματα.



Σχήμα 4.11 – Παράδειγμα διαφορικού τρόπου σύζευξης μέσω αγωγού.

Ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να συζευχθεί με οποιαδήποτε μορφή αγωγού και να παράγει τάσεις κοινού τρόπου ή διαφορικού τρόπου ή, όπως γενικά παρατηρείται, και τα δύο. Στην περίπτωση του διαφορικού τρόπου οι εξισώσεις που περιγράφουν τη σύζευξη μεταξύ του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και του αγωγού είναι πολύ σύνθετες. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν μπορούν ούτε να λυθούν αναλυτικά ούτε αριθμητικά. Εν τούτοις, ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους σύζευξης μπορεί να εκφραστεί αναλυτικά ως εξής: η σύζευξη μεταξύ του μαγνητικού μέρους του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και του βρόγχου της περιοχής A ισοδυναμεί με το κύκλωμα του σχ. 4.12. Το μαγνητικό μέρος του πεδίου H προκαλεί στον βρόγχο A μια τάση (V), όπως φαίνεται, ίση με:

$$V = \mu_0 \cdot A \cdot \frac{dH}{dt}, \text{ όπου } \mu_0 = 10^{-7} \text{ H/m είναι η διαπερατότητα στο κενό} \quad (4-1)$$



Σχήμα 4.12 - Κοινή σύζευξη εμπέδησης.

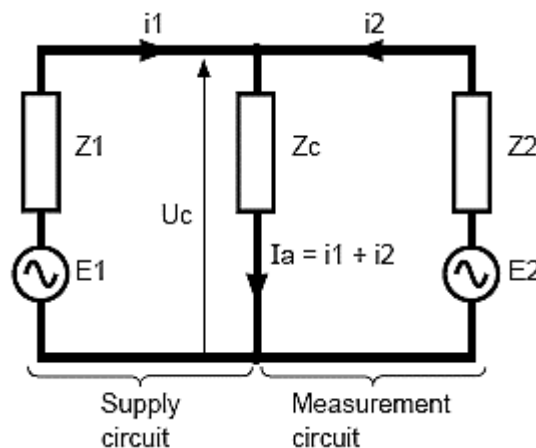
Κοινή σύζευξη εμπέδησης έχουμε όταν μια εμπέδηση είναι κοινή για δύο ή περισσότερα κυκλώματα. Η κοινή εμπέδηση μπορεί να είναι η σύνδεση της γείωσης, το δίκτυο της γείωσης στη γη, το δίκτυο διανομής ισχύος, ο αγωγός επιστροφής που διέρχονται πολλά σήματα χαμηλής ισχύος κ.α.

Ακολουθεί το παράδειγμα του σχ. 4.12, όπου δύο κυκλώματα έχουν κοινή εμπέδηση, για να γίνει κατανοητή η επιρροή αυτής της σύζευξης. Ένα ρεύμα διαταραχής στο κύκλωμα A, λίγων δεκάδων mA, είναι αρκετό για να προκαλέσει τάση διαταραχής (της τάξης των V) στο κύκλωμα B. Αν το σημείο αναφοράς του κυκλώματος B (πιθανό σημείο γείωσης) είναι το σημείο M, τότε η τάση αναφοράς μπορεί να ποικίλει για αρκετές τιμές των Volt. Αυτό επιδρά σε ηλεκτρονικά κυκλώματα που λειτουργούν με τάσεις ίδιας τάξης μεγέθους.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχ. 4.12 δίνεται στο σχ. 4.13. Η διαταραχή είναι της τάξεως:

$$U_c = I_a \cdot Z_c, \quad I_a: \text{το ρεύμα διαταραχής και } Z_c: \text{η κοινή εμπέδηση} \quad (4-2)$$

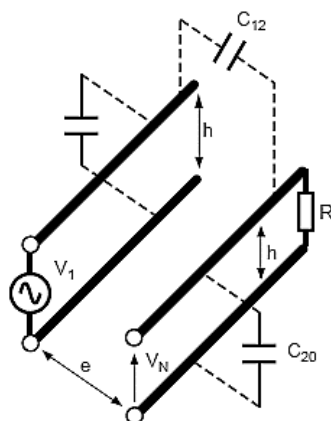
Σε χαμηλές συχνότητες η κοινή εμπέδηση είναι πολύ μικρή. Στη σύζευξη μέσω ακτινοβολίας



Σχήμα 4.13 - Ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1-9.

οι διαταραχές διαδίδονται μέσω του περιβάλλοντος (π.χ. τον αέρα κλπ.). Ανάλογα με τη φύση της διαταραχής, δηλαδή αν προκλήθηκε από αλλαγή του ρεύματος ή της τάσης, χωρίζεται σε δυο είδη: χωρητική και επαγωγική σύζευξη.

Υπάρχει πάντα μια μη μηδενική χωρητικότητα μεταξύ ενός ηλεκτρικού κυκλώματος (καλώδιο, εξαρτήματα κλπ.) και ενός άλλου κυκλώματος που βρίσκεται κοντά στο πρώτο, όπως βλέπουμε και στο σχ. 4.14. Μια απότομη μεταβολή της τάσης στο ένα κύκλωμα δημιουργεί ένα πεδίο που για κοντινές αποστάσεις μπορεί να θεωρηθεί μόνο ηλεκτρικό. Αυτό το πεδίο επιδρά στο άλλο με αποτέλεσμα τη δημιουργία τάσης.

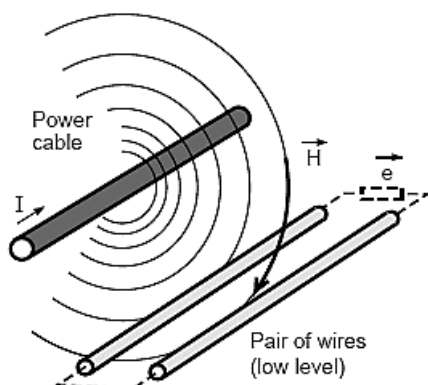


Σχήμα 4.14 - Χωρητικότητες που δημιουργούνται μεταξύ κυκλωμάτων.

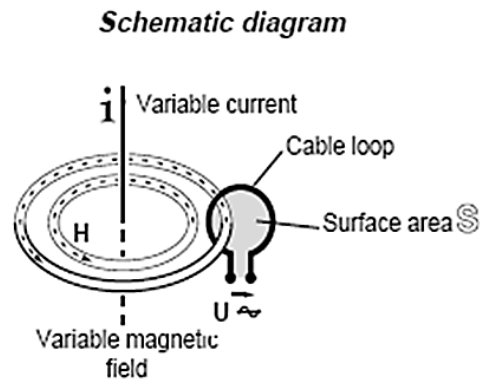
Αντίστοιχα μια ραγδαία αλλαγή ρεύματος σε έναν αγωγό παράγει ένα πεδίο γύρω από τον αγωγό που μπορεί να θεωρηθεί μόνο μαγνητικό. Αυτό το πεδίο μπορεί να επιδράσει σε οποιοδήποτε ζεύγος αγωγών (σχ. 4.14) ή σε οποιοδήποτε βρόγχο (σχ. 4.15) που βρίσκεται κοντά, προκαλώντας τάση διαταραχής στα άκρα τους. Αυτή η σύζευξη ονομάζεται επαγωγική. Για τη δημιουργία του φαινομένου το ρεύμα θα πρέπει να είναι μεγάλο, πράγμα που συναντάμε συνήθως σε κυκλώματα ισχύος. Στην περίπτωση του σχ. 4.15, το ρεύμα δίνεται από τις εξής σχέσεις:

$$I = \frac{U}{Z}, \text{ όπου με αντικατάσταση του } Z = 1/(C \cdot \omega) \tag{4-37}$$

$$I = U \cdot C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$$



Σχήμα 4.15 - Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου, που δημιουργεί ένας αγωγός, σε ένα ζεύγος αγωγών.



Σχήμα 4.16 - Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου, που δημιουργεί ένας αγωγός, σε ένα βρόγχο.

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα αυξάνει με την αύξηση της τάσης στα άκρα του βρόγχου. Χωρητική και επαγωγική σύζευξη έχουμε όταν οι αγωγοί βρίσκονται σε παράλληλη θέση ή όταν συνυπάρχουν σε κοντινή απόσταση. Η ηλεκτρομαγνητική διαταραχή αυξάνει με την αύξηση του μήκους των παράλληλων αγωγών, με τη μείωση της απόστασης δυο αγωγών και με την αύξηση της συχνότητας της διαταραχής. Στην πράξη, αυτού του είδους η χωρητική και επαγωγική σύζευξη εξαλείφεται με τη χρήση συνεστραμμένων ζευγών και θωρακισμένων καλωδίων [95],[99].

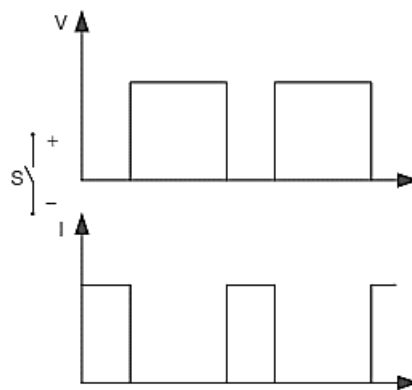
4.5 Θέματα ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης σε συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος

Τα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος βασίζονται στη τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM technique). Το επιθυμητό PWM σήμα κατασκευάζεται και μεταφέρεται στους ημιαγωγικούς διακόπτες ισχύος μέσω πυλών, ώστε να παραχθεί η ίδια κυματομορφή σε διαφορετικό επίπεδο τάσης ή ρεύματος. Συνεπώς, οι διακόπτες ισχύος ψαλιδίζουν υψηλές τάσεις ή ρεύματα, όταν αυτοί βρίσκονται σε αγωγή ή αποκοπή.

Αν θεωρήσουμε ένα ιδανικό ημιαγωγικό διακόπτη ισχύος, τότε αυτό σημαίνει ότι ο διακόπτης αυτός μπορεί να διαχειρισθεί άπειρο ρεύμα και ότι μπορεί να περιορίσει άπειρη τάση. Η πτώση τάσης στα άκρα του διακόπτη και το ρεύμα διαρροής μέσω του διακόπτη θεωρούνται μηδενικά, όπως φαίνεται στο σχ. 4.17. Αυτή η υπόθεση συντελεί στην ανάλυση ενός κυκλώματος ισχύος χαμηλής συχνότητας αλλά για πρακτικούς λόγους θεωρούμε πραγματικούς διακόπτες ισχύος, τους οποίους συνοδεύουν τρία κυρίαρχα ζητήματα:

- οι απώλειες
- οι ηλεκτρομαγνητικές παρενοχλήσεις
- και οι αρμονικές

Στην πραγματικότητα βέβαια δεν υφίστανται ιδανικοί ημιαγωγικοί διακόπτες. Κατά τη διάρκεια των διακοπτικών μεταβάσεων, υπάρχουν σημαντικές διακοπτικές απώλειες που σχετίζονται με τις κλίσεις τάσης και ρεύματος αντίστοιχα. Αυτά τα φαινόμενα βασίζονται σε διάφορους παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά των ημιαγωγικών διακοπών, σήματα ελέγχου, οδήγηση πυλών κ.ά.



Σχήμα 4.17 – Κυματομορφές τάσης και ρεύματος σε ένα ιδανικό διακόπτη ισχύος

4.5.1 Απώλειες

Σχετικά με τις απώλειες σε ένα μετατροπέα ισχύος υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι. Αυτοί είναι:

- Απώλειες λόγω επαγωγής και διακοπτικές απώλειες στους ημιαγωγικούς διακόπτες ισχύος.
- Απώλειες λόγω φόρτισης και εκφόρτισης στοιχείων σε ένα μετατροπέα ισχύος.

Όταν ο διακόπτης είναι σε θέση αγωγής ή αποκοπής, χάνεται ενέργεια λόγω των μεταβάσεων του διακόπτη από τη θέση ON στη θέση OFF. Ο τύπος αυτής της ενέργειας που χάνεται ονομάζεται διακοπτική απώλεια του ημιαγωγικού διακόπτη ισχύος και εξαρτάται από την τάση στα άκρα του διακόπτη, το ρεύμα που διαρρέεται μέσω του διακόπτη καθώς και τον διακοπτικό χρόνο μεταγωγής.

Όταν ο διακόπτης είναι σε κατάσταση αποκοπής (OFF), τότε ένα μικρό ρεύμα διαρροής υπάρχει αλλά αυτό αγνοείται καθώς και η ενέργεια αυτού που χάνεται στη κατάσταση

αποκοπής. Όμως σε κατάσταση αγωγής, η ενέργεια αυτή που χάνεται εξαρτάται από το ρεύμα που περνά μέσα από το διακόπτη και από τη τάση αυτού. Ο τύπος της ενέργειας αυτής ονομάζεται απώλειες επαγωγής του διακόπτη. Ο μέσος όρος απωλειών σε ένα ημιαγωγικό διακόπτη ισχύος σε ένα κύκλο μεταγωγής δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\overline{P_s} = \frac{1}{T_w} \int_0^{T_{sw}} i_s v_s dt = \overline{P_{cond}} + \overline{P_w} \quad (4-38)$$

Όπως διαφαίνεται από την εξίσωση 4.4, ο μέσος όρος απωλειών ισχύος κατά τη διάρκεια ενός κύκλου μεταγωγής αποτελείται από τις απώλειες επαγωγής καθώς και τις διακοπτικές απώλειες του ημιαγωγικού διακόπτη ισχύος. Υποθέτοντας ότι οι χρόνοι αγωγής και αποκοπής είναι πολύ μικρότεροι σε σχέση με το κύκλο μεταγωγής, T_{sw} , και το ρεύμα διαρροής είναι αμελητέο, δηλαδή $I_{off} = 0$. Έτσι οι απώλειες επαγωγής δίνονται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \overline{P_{cond}} &= V_{on} \cdot I_{on} \cdot D \\ D &= \frac{t_{on}}{T_{sw}} \end{aligned} \quad (4-5)$$

Όπου t_{on} είναι ο χρόνος που ο διακόπτης παραμένει ανοιχτός, V_{on} είναι η πτώση τάση στα άκρα του διακόπτη, I_{on} το ρεύμα που περνά μέσα από αυτόν, θεωρώντας ότι D είναι ο κύκλος λειτουργίας του διακόπτη. Οι διακοπτικές απώλειες μπορούν να υπολογισθούν χρησιμοποιώντας κυματομορφές στιγμιαίες τιμές τάσης και ρεύματος.

$$\overline{P_w} = f_{sw} \left(\int_{t_1}^{t_1+t_{sw,on}} i_s v_s dt + \int_{t_2}^{t_2+t_{sw,off}} i_s v_s dt \right) \quad (4-6)$$

Όπου t_1, t_2 είναι οι χρόνοι που εφαρμόζονται τα σήματα στη πύλη του ημιαγωγικού διακόπτη για να βρεθούν σε κατάσταση ON και OFF αντίστοιχα. Οι χρόνοι $t_{sw,on}$ και $t_{sw,off}$ είναι οι διακοπτικοί χρόνοι αγωγής και αποκοπής αντίστοιχα. Η εξίσωση 4.6 απεικονίζεται ότι οι διακοπτικές απώλειες είναι ανάλογες με τη διακοπτική συχνότητα. Συνεπώς αυξάνοντας τη διακοπτική συχνότητα αυξάνονται κι οι διακοπτικές απώλειες.

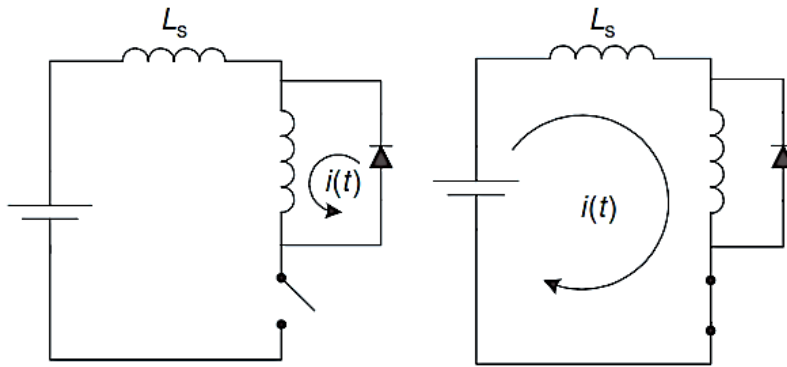
Σε όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος, υπάρχουν επαγωγές και χωρητικότητες, όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενους παραγράφους, που οφείλονται στις διασυνδέσεις μεταξύ των στοιχείων τροφοδοσίας μέσω καλωδίων, ή αγώγιμων πλακών ή οποιουδήποτε αγώγιμου υλικού. Έτσι, σε ένα κύκλωμα ηλεκτρονικών ισχύος, όταν ένας διακόπτης ισχύος βρίσκεται σε αγωγή ή αποκοπή, τότε μια επαγωγή που σχετίζεται με το ρεύμα του βρόχου φορτίζεται και

εκφορτίζεται, όπως φαίνεται στο σχ. 4.18. Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο πηνίο/ επαγωγέα εξαρτάται από το πλάτος του ρεύματος καθώς και τη τιμή της επαγωγής (βλ. εξίσωση 4.7).

$$E_L = L_s \cdot i^2$$

$$V_{over} = L_s \cdot \frac{di}{dt} \quad (4-7)$$

Κάθε φορά που ο διακόπτης τίθεται σε κατάσταση ON ή OFF, ενέργεια χάνεται μέσα από το πηνίο και επηρεάζει τις συνολικές απώλειες καθώς και τη αποδοτικότητα. Επιπλέον μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές υπερτάσεις κατά τη διάρκεια των διακοπτικών μεταβάσεων λόγω του υψηλού βαθμού μεταβολής του ρεύματος.



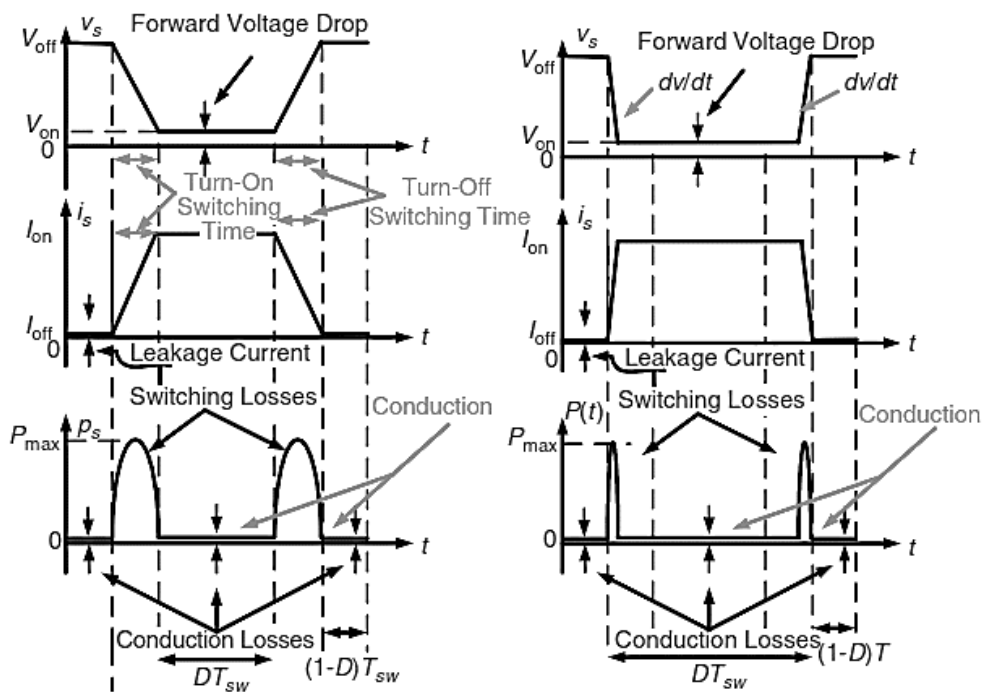
Σχήμα 4.18 – Επαγωγή ενός τρέχοντος βρόχου και το αποτέλεσμα της μετάβασης κατάστασης του διακόπτη

Λόγω των χωρητικών ζεύξεων στους μετατροπείς ισχύος, μπορεί να συμβεί η φόρτιση και η εκφόρτιση αυτών των χωρητικότητας, όταν οι διακόπτες ισχύος μεταβαίνουν από ON σε OFF και αντίστροφα. Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο πυκνωτή εξαρτάται από το πλάτος της τάσης και την τιμή της χωρητικότητας. Επιπροσθέτως, μπορεί να δημιουργηθεί σημαντικός παλμός ρεύματος, όταν ο διακόπτης είναι σε αγωγή και ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω του διακόπτη. Οι σχέσεις που διέπουν την ενέργεια που αποθηκεύεται στο πυκνωτή καθώς και το ρεύμα διαρροής δίνονται από τη σχέση 4.8.

$$E_{c_s} = C_s \cdot \frac{v^2}{2}$$

$$i_{leakage} = C_s \cdot \frac{dv}{dt} \quad (4-8)$$

Με βάση όλα τα παραπάνω γίνεται άμεσα αντιληπτό, ότι αυτές οι απώλειες πρέπει να περιοριστούν. Ο λόγος είναι ότι οι αυξανόμενες απώλειες μειώνουν τη αποδοτικότητα του συστήματος. Επιπλέον, αυξάνουν ολόένα και πιο πολύ τη θερμοκρασία επαφής του ημιαγωγικού διακόπτη ισχύος, θέτοντας έτσι σε μεγάλο κίνδυνο τους διακόπτες και με ενδεχόμενη μόνιμη ζημιά, αν η θερμότητα δε διοχετευθεί στο περιβάλλον. Συνεπώς, το σύστημα μπορεί να χρειασθεί τη παρουσία μιας ψήκτρας ή γενικότερα ενός συστήματος ψύξης, το οποίο θα μεταφέρει τη θερμότητα από την επαφή στο περιβάλλον αυξάνοντας έτσι το κόστος, το μέγεθος και το βάρος ενός μετατροπέα ισχύος.



Σχήμα 4.19 – Κυματομορφές τάσης, ρεύματος και ισχύος ενός διακόπτη σε δυο διαφορετικούς χρόνους μεταγωγής

Ένα κύριο μέρος των συνολικών απωλειών είναι οι διακοπτικές απώλειες, που εξαρτώνται από τους χρόνους μεταγωγής και τη διακοπτική συχνότητα. Το σχ. 4.19 απεικονίζει δυο κυματομορφές με διαφορετικούς χρόνους μεταγωγής. Οι διακοπτικές απώλειες μπορεί να μειωθούν με τη μείωση του χρόνου μεταγωγής αλλά οι γρήγορες όμως μεταβάσεις αυξάνουν τις κλίσεις di/dt , dv/dt , τα οποία επηρεάζουν σημαντικά το θόρυβο που δημιουργείται λόγω ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, μειώνοντας τη διακοπτική συχνότητα μειώνονται οι διακοπτικές απώλειες αλλά αυξάνονται οι

ριπές τάσεων και ρεύματος. Για να βελτιώσουμε τη ποιότητα της τάσης εξόδου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα καλύτερο φίλτρο με μεγαλύτερο πυκνωτή και πηνίο, το οποίο φυσικά θα αυξήσει το κόστος αλλά και το βάρος του συστήματος [95].

4.5.2 Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές

Δυο κύριες πηγές ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης στα ηλεκτρονικά ισχύος είναι οι di/dt , dv/dt κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων των καταστάσεων των ημιαγωγικών διακοπών. Στη πράξη, μια συνεχής τάση μερικών εκατοντάδων volt ψαλιδίζεται από ένα διακόπτη ισχύος σε ένα κλάσμα ενός μsec . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η επαγόμενη εκπομπή που παράγεται από τα παραπάνω, να είναι ένα σημαντικό θέμα στα περισσότερα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος λόγω της υπέρτασης και του ρεύματος διαρροής, που παράγεται από τη γρήγορη μετάβαση καθώς και των διάφορων παθητικών στοιχείων του κυκλώματος. Αναλυτικότερα,

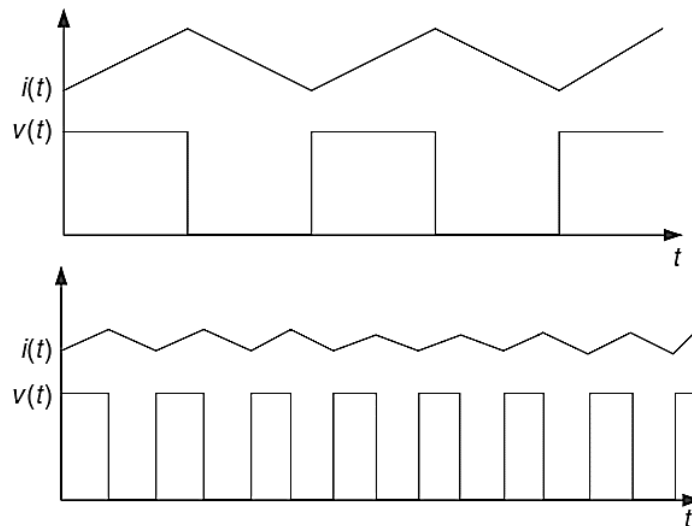
Η υψηλή κλίση di/dt μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές υπερτάσεις στους μετατροπείς ισχύος λόγω της επαγωγής των βρόχων ρεύματος. Η υψηλή κλίση dv/dt μπορεί να δημιουργήσει σημαντικά ρεύματα διαρροής σε μαγνητικά στοιχεία και σε ηλεκτρικούς κινητήρες λόγω των χωρητικών ζεύξεων μεταξύ των τυλιγμάτων και του πλαισίου.

Όπως συζητήθηκε παραπάνω, μειώνοντας τις κλίσεις di/dt , dv/dt , αυξάνεται ο διακοπτικός χρόνος, ο οποίος αυξάνει τις απώλειες. Συνεπώς παρατηρούμε ότι το θέμα επιλογή του διακοπτικού χρόνου είναι ένα ισοζύγιο μεταξύ των απωλειών και της ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης. Άλλη εναλλακτική λύση είναι να μειώσουμε την επαγωγή και τη χωρητικότητα ενός συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος χρησιμοποιώντας μια καλύτερη διασύνδεση των στοιχείων και τοποθέτηση αυτών, κάτι που αφορά το τυπωμένο κύκλωμα (PCB – Printed Circuit Board) και θα αναφερθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

4.5.3 Αρμονικές

Οι κυματομορφές τάσης εξόδου ή ρεύματος φέρουν αρμονικές γύρω από τη διακοπτική συχνότητα και αυτές οι αρμονικές περιορίζονται με ένα χαμηλό περατό φίλτρο. Στους μετατροπείς ισχύος η διακοπτική συχνότητα καθώς και τα παθητικά φίλτρα διαδραματίζουν ένα σημαντικό ρόλο στη μείωση του πλάτους των αρμονικών και στην είσοδο αλλά και στην έξοδο. Το σχ. 4.20 απεικονίζει τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος ενός πηνίου σε δυο διαφορετικές διακοπτικές συχνότητες. Είναι φανερό ότι αυξάνοντας τη διακοπτική συχνότητα μειώνεται το πλάτος της εξόδου αλλά ένα κύριο μειονέκτημα είναι οι επιπρόσθετες διακοπτικές απώλειες.

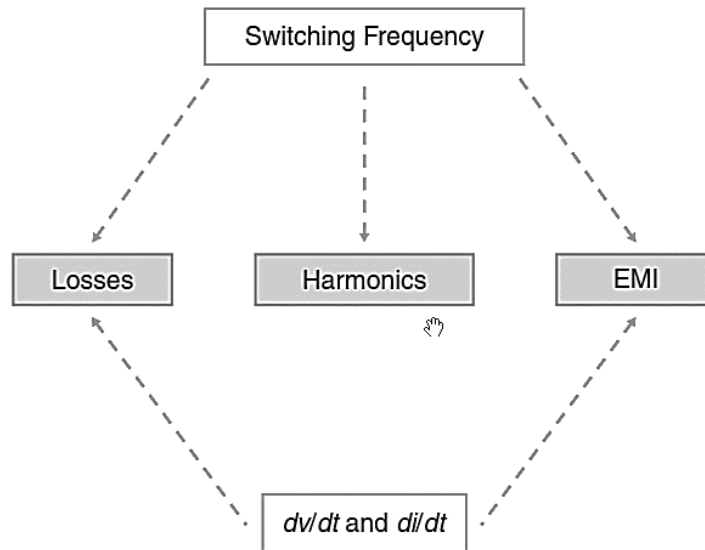
Αυξάνοντας τη διακοπτική συχνότητα μπορεί να περιορισθούν οι αρμονικές χαμηλής τάξης και να βελτιωθεί η ποιότητα τάσης εξόδου. Επιπλέον το μέτρο αυτό συντελεί στη μείωση του μεγέθους του χαμηλό περατού φίλτρου (LC), με τις διακοπτικές απώλειες όμως να αυξάνονται σημαντικά. Άρα και σε αυτή τη περίπτωση υπάρχει ένα ισοζύγιο ανάμεσα στις απώλειες και τη ποιότητα.



Σχήμα 4.20 – Κυματομορφές τάσης, ρεύματος σε δυο διαφορετικούς χρόνους μεταγωγής

4.5.4 Συμπεράσματα

Από τις προηγούμενες παραγράφους γίνεται αντιληπτό πως υπάρχει ένας κοινός παρονομαστής ανάμεσα στους τρεις αυτούς παράγοντες: απώλειες, ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή και αρμονικές. Δυο κύριες παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν αυτούς τους παράγοντες είναι οι αρμονικές και ο χρόνος μεταγωγής όπως φαίνεται από το σχ. 4.21. Αν ο κύκλος μεταγωγής είναι πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο μετάβασης, τότε η επιρροή των κλίσεων di/dt , dv/dt , στις αρμονικές είναι αμελητέα σε μεγάλες διακοπτικές συχνότητες. Είναι λοιπόν μεγάλη πρόκληση για ένα μηχανικό, που πρόκειται να ασχοληθεί με τη κατασκευή ενός μετατροπέα ισχύος, να αποφασίσει τη διακοπτική συχνότητα και τους χρόνους μεταγωγής των ημιαγωγικών διακοπών ισχύος, το οποίο απαιτεί μεγάλη γνώση εις βάθος και εις πλάτος της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και των ηλεκτρονικών ισχύος εν γένει, ώστε να βελτιστοποιήσει το σύστημα από την πολύ αρχή της σχεδίασης του.



Σχήμα 4.21 – Σχέση μεταξύ απωλειών, ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης και αρμονικών

Είναι φανερό λοιπόν ότι ένα καλό σχέδιο για ένα μετατροπέα ισχύος μπορεί να ελαχιστοποιήσει τα παρασιτικά στοιχεία, πράγμα που θα οδηγήσει στη μείωση απωλειών και του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου. Έτσι ένας σχεδιαστής θα έπρεπε να λάβει υπόψη ότι η διακοπτική συχνότητα καθώς και η διαμόρφωση PWM θα πρέπει να βασίζεται στα εξής:

- Αιχμές πλατών στη τάση εξόδου
- Συνολικές απώλειες, θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμική αντίσταση μεταξύ διακοπών ισχύος και περιβάλλοντος
- Μέγεθος και κόστος παθητικού φίλτρου
- Διακοπτικές απώλειες
- Μεγάλη κλίση di/dt , dv/dt των διακοπών ισχύος

Πλάτη των υπερτάσεων και ρευμάτων διαρροής, που επηρεάζουν το κόστος αλλά και το μέγεθος του ηλεκτρομαγνητικού φίλτρου.

4.6 Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών παρενοχλήσεων

Για να μπορέσουμε να επιληφθούμε του θέματος επί των ηλεκτρομαγνητικών παρενοχλήσεων πρέπει πρώτα να είμαστε σε θέση να μετρήσουμε αν υπάρχουν και σε τι ένταση. Για το λόγο αυτό στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι μέθοδοι μετρήσεων τους ανάλογα με το τύπο τους.

4.6.1 Ακτινοβολούμενες εκπομπές

Οι μετρήσεις των ακτινοβολούμενων εκπομπών μπορούν να υλοποιηθούν στους εξής τρεις χώρους:

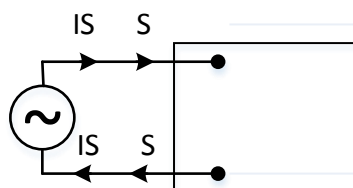
- Ανοιχτό πεδίο (open field test site ή open area test site)
Ορίζεται ο χώρος εκείνος, ο οποίος μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μόνο το απ' ευθείας και το ανακλώμενο από το έδαφος κύμα φθάνουν στο δοκίμιο, ενώ τα υπόλοιπα ανακλώμενα κύματα δε φθάνουν ποτέ σε αυτό.
- Ημιανηχοϊκό θάλαμο (semianechoic chamber)
Ο χώρος αυτός χρησιμοποιείται για πιστοποίηση μικρότερων διαστάσεων συσκευών. Έχει παρόμοια συμπεριφορά με το ανοιχτό πεδίο κι οι πλάγιες επιφάνειές του είναι καλυμμένες με απορροφητικά υλικά, τα οποία εξασφαλίζουν αρκετή εξασθένηση των κυμάτων, που προσπίπτουν σε αυτά.
- Screened room
Είναι ένας ειδικός θάλαμος, ο οποίος δημιουργεί μια προστασία της συσκευής που βρίσκεται εντός αυτού από εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Επιπλέον εμποδίζει τα πεδία, που δημιουργούνται εσωτερικά να επηρεάσουν άλλες συσκευές που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από το δοκίμιο. Είναι κατασκευασμένο από απορροφητικό πέτασμα και χρησιμοποιεί ειδικά φίλτρα για την τροφοδοσία και για την αποκοπή αρμονικών που μπορεί να προκληθούν από το δίκτυο τροφοδοσίας και να επηρεάσουν τις μετρήσεις.

Σκοπός των μετρήσεων αυτών είναι η πιστοποίηση ότι οποιαδήποτε ακτινοβολούμενη εκπομπή από το δοκίμιο δε θα επηρεάσει τα εσωτερικά κυκλώματα άλλης συσκευής. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία των μετρήσεων αυτών. Για δοκιμή λοιπόν σε χώρο ανοικτού πεδίου επιλέγεται μια επίπεδη ελλειψοειδής περιοχή, όπου το δοκίμιο και η κεραία τοποθετούνται στις εστίες της έλλειψης. Το ύψος της κεραίας πρέπει να ρυθμίζεται από 1 μέχρι 4 μέτρα. Τα όργανα μέτρησης όπως παλμογράφος, αναλυτής φάσματος κ.α. πρέπει να βρίσκονται εκτός της έλλειψης ή σε δωμάτιο, που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της γης. Η κεραία θα πρέπει να βρίσκεται σε καθορισμένο ύψος, ενώ η θέση και ο προσανατολισμός του δοκιμίου να ρυθμίζεται έτσι ώστε η εκπομπή της να είναι μέγιστη. Για τον προσδιορισμό των στοιχείων που ακτινοβολούν πιο πολύ αλλά και για τη θέση του δοκιμίου για την οποία

συμβαίνει αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα probe. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον αναλυτή φάσματος ελέγχεται το ύψος και της κεραίας και σταθεροποιείται στη θέση, όπου πραγματοποιείται η μέγιστη ακτινοβολία στο δοκίμιο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου καλυφθούν όλα τα εύρη συχνοτήτων, για να είναι σίγουρο ότι δε θα παραληφθεί καμιά περιοχή με μεγάλη ακτινοβολούμενη ενέργεια. Αν τα αποτελέσματα είναι κάτω από τα όρια (τουλάχιστον κατά 6db), τότε το δοκίμιο θεωρείται ότι ικανοποιεί τις απαιτήσεις του προτύπου, που απαιτείται να εφαρμοσθεί. Αν όμως οι τιμές αυτών είναι κοντά στα όρια ή λίγο παραπάνω από τα επιτρεπόμενα όρια, τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε εύρος συχνοτήτων μικρότερο του 1MHz. Τέλος, όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται για άλλη πόλωση της κεραίας [100].

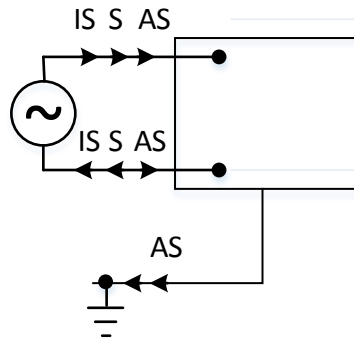
4.6.2 Αγώγιμες εκπομπές

Το σχ. 4.21 δείχνει μια συσκευή, που συνδέεται σε μονοφασική παροχή χωρίς αγωγό γης. Δυο ρεύματα υπάρχουν, το ρεύμα IS και το ρεύμα παρενόχλησης S. Το τελευταίο αντιπροσωπεύει το συμμετρικό ρεύμα παρενόχλησης. Ένα ρεύμα μπορεί να ρέει με δυο τρόπους προς τη συσκευή. Ο πρώτος είναι προς τα μέσα κι ο άλλος προς τα έξω. Αυτά τα ρεύματα, όπως προαναφέρθηκε, ονομάζονται συμμετρικά ή διαφορικού τρόπου ρεύματα. Η κατεύθυνση εξαρτάται από το που βρίσκεται η πηγή εκπομπής των ρευμάτων παρενόχλησης και τη συχνότητα που αντιστοιχεί στο ρεύμα φορτίου. Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως είναι πολύ βασικό να γνωρίζει κανείς που παράγονται τα ρεύματα παρενόχλησης, μιας κι ο σχεδιασμός φίλτρου, που θα καταστείλει αυτά τα ρεύματα, βασίζεται κατά μεγάλο ποσοστό στη γνώση του σημείου προέλευσης τους.



Σχήμα 4.21 – Σχέση μεταξύ απωλειών, ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης και αρμονικών

Στο σχ. 4.22, η συσκευή συνδέεται με τη γη μέσω ενός ειδικού καλωδίου. Τα ρεύματα παρενόχλησης σε αυτή τη περίπτωση έχουν τρεις τρόπους ροής. Υπάρχει το συμμετρικό ρεύμα αλλά υπάρχει επίσης και ένα ρεύμα στο καλώδιο γείωσης. Το ρεύμα αυτό ρέει στην ίδια κατεύθυνση και στα δυο καλώδια τροφοδοσίας. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ασύμμετρο ή κοινού τρόπου ρεύμα και σημειώνεται στο σχ. 4.22 με AS.



Σχήμα 4.22 – Σχέση μεταξύ απωλειών, ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης και αρμονικών

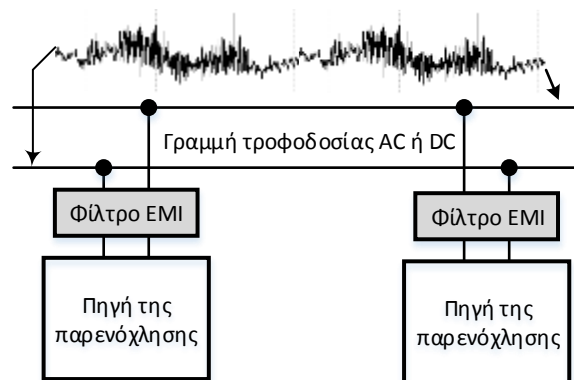
Τόσο τα συμμετρικά ρεύματα όσο και τα ασύμμετρα ρεύματα, που ρέουν στα καλώδια τροφοδοσίας μιας συσκευής μπορούν να μετρηθούν. Η μέτρηση τους γίνεται με επαγωγή χρησιμοποιώντας ένα τοροειδές τύλιγμα. Η αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται η μέθοδος μέτρησης είναι ότι γύρω από ένα αγωγό, που διαρρέεται από ρεύμα δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό έχει κυκλικό σχήμα και ταιριάζει με το σχήμα του τοροειδούς τυλίγματος. Έτσι στο τύλιγμα επάγεται μια τάση, η οποία είναι ανάλογη προς το ρεύμα του αγωγού. Το όργανο μέτρησης, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των συμμετρικών και ασύμμετρων ρευμάτων παρενόχλησης είναι έτσι σχεδιασμένο, ώστε να μπορεί να επιλέγει τη συχνότητα του ρεύματος, που πρόκειται να μετρηθεί. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η μέτρηση του είδους του ρεύματος, που μετράται αλλά και της συχνότητας του. Η αρχή της επιλογής συχνότητας του οργάνου μέτρησης χρησιμοποιείται επίσης για την εξάλειψη των συμμετρικών και ασύμμετρων ρευμάτων παρενόχλησης. Αναλυτικότερα, το ρεύμα παρενόχλησης διοχετεύεται στην επιθυμητή κατεύθυνση. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται ένας πυκνωτής. Ο πυκνωτής αυτό συμπεριφέρεται σα βραχυκύκλωμα για τα ρεύματα παρενόχλησης αλλά όχι και για το ρεύμα φορτίου λόγω της διαφοράς στη συχνότητα των δυο ρευμάτων [101].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, οι αγωγίμες εκπομπές παράγονται σχεδόν από κάθε ηλεκτρονικό ή ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Αυτή η υψηλής συχνότητας εκπεμπόμενη ενέργεια μεταφέρεται σε άλλα ηλεκτρονικά στοιχεία μέσω αγωγών ή καλωδίωσης ή άλλων μεταλλικών μερών, τα οποία συμπεριφέρονται ως κεραίες. Για το λόγο αυτό θα πρέπει κάθε ηλεκτρονικό στοιχείο να είναι άτρωτο σε τέτοιου είδους ηλεκτρομαγνητικές παρενοχλήσεις, ώστε να μειώνεται κι η πιθανότητα δυσλειτουργίας κάθε εξοπλισμού, που βρίσκεται στο ίδιο περιβάλλον. Οι τρεις βασικοί τρόποι για τον έλεγχο αλλά και την ελαχιστοποίηση της επίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης είναι:

- Μείωση της ποσότητας ενέργειας της ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης, που παράγεται από τον εξοπλισμό.
- Πρόληψη, ώστε η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης να μην διαφεύγει από τον εξοπλισμό, που τη παράγει.
- Προστασία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού από την επίδραση της ενέργειας της ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης, που προέρχεται από το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον.

Ένας τρόπος για την υλοποίηση των δυο τελευταίων παραπάνω βημάτων είναι η εφαρμογή ενός φίλτρου LC ανάμεσα στον εξοπλισμό και στην τροφοδοσία του από το δίκτυο (βλ. σχ.4.23) [101]. Τα φίλτρα αυτά είναι βαθυπερατά κι εκτελούν τα εξής:

- Απαγορεύουν την είσοδο ηλεκτρομαγνητικών παρενοχλήσεων υψηλής συχνότητας, που μεταφέρεται από το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος στον υπό προστασία εξοπλισμό.
- Απαγορεύουν την έξοδο ηλεκτρομαγνητικών παρενοχλήσεων υψηλής συχνότητας, που παράγεται μέσα στον υπό προστασία εξοπλισμό προς το δίκτυο παροχής εναλλασσόμενου ρεύματος.



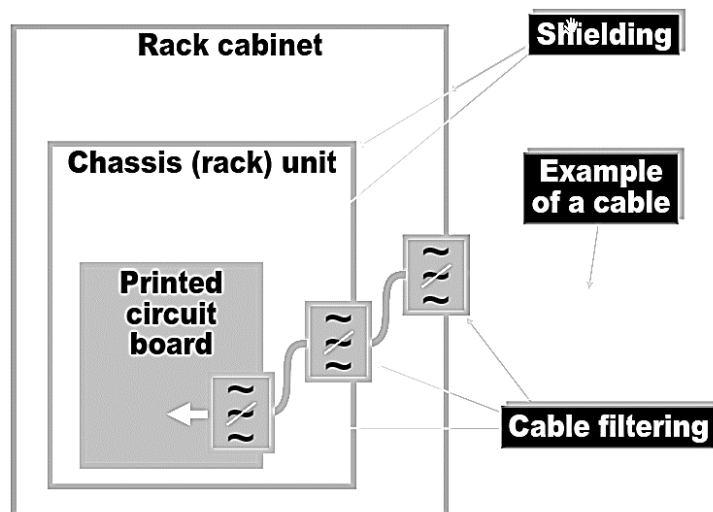
Σχήμα 4.23 - Φίλτρο EMI που απαγορεύει τις εισερχόμενες κι εξερχόμενες παρεμβολές

4.7 Θωράκιση

Η ελαχιστοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης σε ένα σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος, όπως είναι ο μετατροπέας ισχύος, που διαπραγματεύεται αυτή η διπλωματική εργασία, λαμβάνει χώρα σε διάφορα επίπεδα, όπως φαίνεται στο σχ. 4.24. Ξεκινώντας από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο επίπεδο, αυτά είναι το τυπωμένο κύκλωμα, το σασί καθώς και

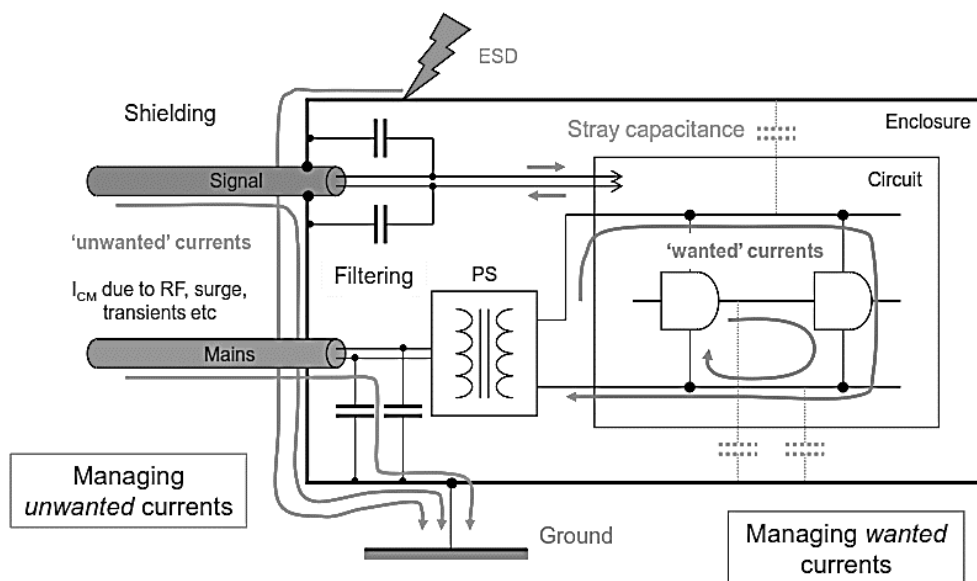
το κουτί που περιβάλλει όλο το σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος. Η θωράκιση καθώς και η κατασκευή φίλτρων, που θα επιτρέψουν την ελαχιστοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης θα οδηγήσουν επίσης στη μείωση του συνολικού κόστους της κατασκευής του συστήματος και του χρόνου κατασκευής καθώς και στο περιορισμό του βάρους αλλά και του μεγέθους αυτού. Σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθούν όλες εκείνες οι πηγές που δύνανται να παράγουν ανεπιθύμητα ρεύματα στο σύστημα (βλ. σχ.4.25).

Μια λάθος πρακτική είναι η χρήση του αποκαλούμενου ενός σημείου γείωσης (γείωση αστέρα) σε δυναμικό 0V. Αυτό υποτίθεται ότι διατηρεί τα ρεύματα σε βρόχους, όπου πρέπει να βρίσκονται κι όχι να μεταπηδάνε, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, σε άλλους βρόχους λόγω χαμηλότερης εμπέδησης. Αυτό όμως είναι θεμιτό μόνο σε συχνότητες κάτω από μερικές δεκάδες kHz (βλ. σχ. 4.26).



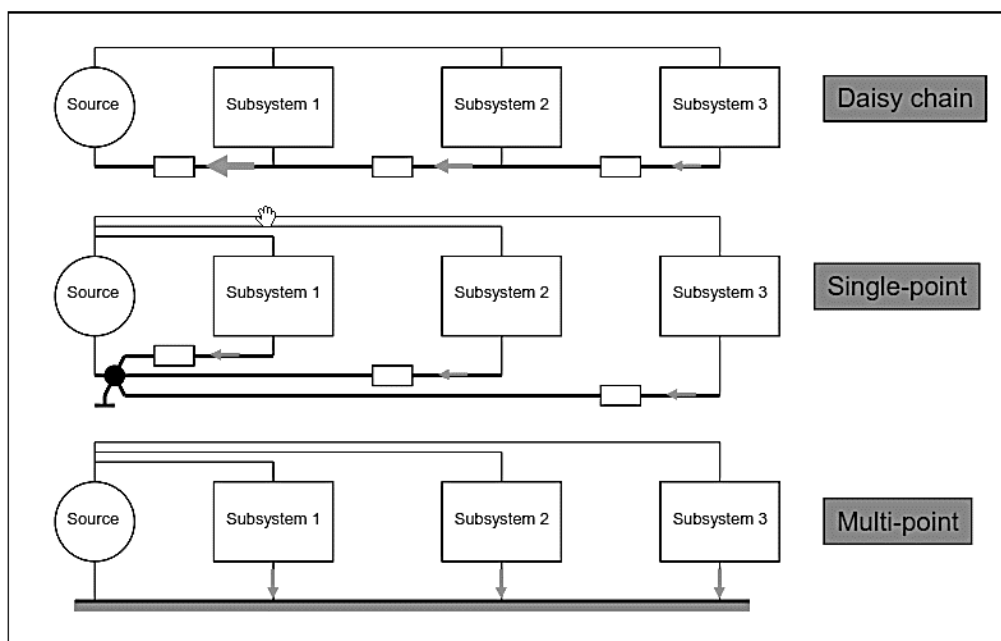
Σχήμα 4.24 – Προστασία – Θωράκιση από ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή σε διάφορα επίπεδα

Μια άλλη κακή πρακτική είναι η υπόθεση της επίτευξης χαμηλότερου κόστους υλικών (BOM – bill of materials). Με βάση αυτή την τεχνική είναι προφανές πως επιτυγχάνεται το πιο επικερδές προϊόν. Με τη λογική αυτή ο αριθμός των πλακετών και των ο αριθμός ανεπιθύμητων ρευμάτων περιορίζονται στο βαθμό εκείνο που υποστηρίζονται ακόμη όλες οι απαραίτητες προϋποθέσεις ομαλής λειτουργίας. Όμως στη πράξη ένα προϊόν που στηρίζεται σε μια τέτοια τεχνική, ενώ μπορεί να έχει το μισό ή λιγότερο κόστος από όλους τους ανταγωνιστές του, έχει επιστροφή λόγω εγγύησης με ρυθμό 100%. Αυτό καταδεικνύει πως μια τέτοια κατασκευή δεν θα ήταν επιτυχής, οπότε είναι πολλά περισσότερα εκείνα που πρέπει να σκεφτεί ένας μηχανικός από μια τόσο απλή στρατηγική.



Σχήμα 4.25 – Αποφυγή ανεπιθύμητων ρευμάτων

Γίνεται λοιπόν εύκολα αντιληπτό ότι θα πρέπει να ληφθούν ένας αριθμός βελτιώσεων στη σχεδίαση ενός συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος σε όλα τα επίπεδα, ώστε να μειωθούν οι



Σχήμα 4.26 – Τεχνική ενός σημείου ή πολλαπλών σημείων γείωσης ή αλυσίδα γείωσης

πιθανότητες, κατά το δυνατόν, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Στις επόμενες ενότητες θα παρατεθούν οι πιο σημαντικές στρατηγικές για την ελαχιστοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης.

4.7.1 Βελτίωση αναφοράς ραδιοσυχνότητας (RF reference)

Αντικαθιστούμε τις πολλαπλές πλακέτες με μια πλακέτα, η οποία έχει ένα κοινό αγωγό (με 0V δυναμικό) σε ολόκληρη τη περιοχή, το οποίο καλείται αναφορά ραδιοσυχνότητας (RF). Αποφεύγεται να δίνεται η ονομασία γη ή γείωση για να συγγέεται με το δυναμικό αναφοράς μέσω του οποίου κλείνουν οι βρόχοι του κυκλώματος. Η αναφορά RF συνήθως είναι τουλάχιστον ένα στέρεο συνεχές στρώμα χαλκού, το οποίο βρίσκεται κάτω από τις συσκευές, στοιχεία και τροφοδοσίες. Δε θα πρέπει να υπάρχουν κενά σε αυτό το στρώμα και θα πρέπει να είναι όσο μικρό γίνεται.

Μια αναφορά RF πετυχαίνει πολύ χαμηλή εμπέδηση (Z), η τιμή της οποίας εξαρτάται από τις συσκευές και τις απαιτήσεις της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, που πρέπει να υφίστανται, και θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερη του ενός Ω κατά μήκος της περιοχής συχνοτήτων, η οποία θα ελέγχεται για την αποφυγή ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης. Η περιοχή συχνοτήτων ορίζεται από όλες τις συχνότητες διαφορικού τρόπου και όλες τις συχνότητες που υπάρχουν στο περιβάλλον λειτουργίας.

Ο σκοπός δημιουργίας μιας αναφοράς RF είναι ότι παρέχεται αυτόματα μια διαδρομή χαμηλής εμπέδησης για όλα τα πιθανά ανεπιθύμητα ρεύματα, που οφείλονται είτε σε ρεύματα ισχύος, σημάτων, θορύβου είτε σε ρεύματα κοινού τρόπου πάνω στη πλακέτα. Επειδή η αναφορά RF βρίσκεται πολύ κοντά στα στοιχεία και τις συσκευές της πλακέτας, οι περιοχές των βρόχων των ρευμάτων είναι πολύ μικρές, με αποτέλεσμα να έχουμε καλή ακεραιότητα σήματος, ισχύος και καλή ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Είναι λοιπόν σημαντικό να συνειδητοποιηθεί ότι δε χρειάζεται τα ρεύματα επιστροφής να ρέουν προς την αναφορά RF κι ως εκ τούτου να έχουμε λιγότερες εκπομπές πεδίου E και H, αλλά να παρέχεται ένα σχέδιο αναφοράς RF και τα ρεύματα θα επιλέξουν με φυσικό τρόπο να ρέυσουν σε αυτό παρά κάπου αλλού [102].

4.7.2 Απόξευση της συνεχούς τροφοδοσίας (DC)

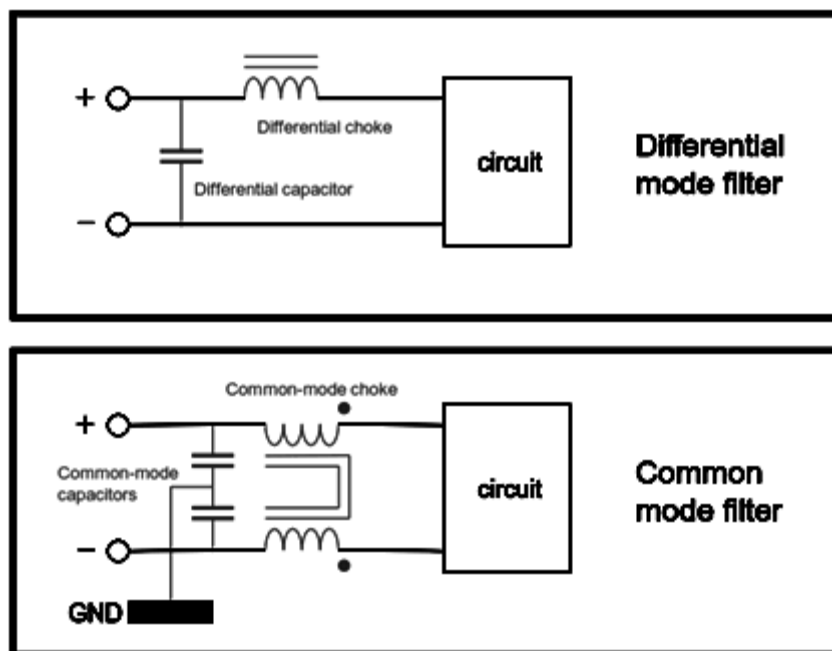
Σχεδιάζεται η απόξευση μεταξύ των γραμμών τροφοδοσίας και της αναφοράς RF, ώστε να επιτευχθεί χαμηλή εμπέδηση (Z). Αυτό επιτρέπει τα κυμαινόμενα ρεύματα διαφορικού τρόπου στις γραμμές τροφοδοσίας να ρέουν σε αρκετά μικρότερους βρόχους πολύ κοντά σε διατάξεις, που τα προκαλούν. Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται μικρές περιοχές λόγω ρευμάτων

διαφορικού τρόπου, οι οποίες δημιουργούν μικρότερες εκπομπές θορύβου από ό,τι θα δημιουργούνταν με μεγαλύτερες περιοχές.

Σε πλακέτες, όπου χρειάζεται συχνότητα λειτουργίας αρκετά μεγαλύτερη του ενός kHz, δεν είναι εφικτό να χρησιμοποιήσουμε πυκνωτές απόζευξης για να επιτύχουμε εμπέδηση πάρα πολύ μικρή (1mΩ). Ο λόγος είναι ότι πάνω από 300MHz, οι πυκνωτές απόζευξης λειτουργούν επαγωγικά, με αποτέλεσμα η εμπέδηση τους να είναι ανάλογη με τη συχνότητα και συνεπώς να αυξάνεται με την αύξηση της. Επειδή όμως τώρα έχουμε μια αναφορά RF στη πλακέτα, υπάρχει η δυνατότητα να ζευγοποιηθεί με κοντινές γραμμές τροφοδοσίας, ώστε να παραχθούν κατανεμημένους αποζευγμένους πυκνωτές εντός του διηλεκτρικού της τυπωμένης πλακέτας, και έτσι δύναται να επιτευχθούν πολύ χαμηλές εμπεδήσεις μέχρι οποιοδήποτε αριθμό GHz [104].

4.7.3 Φιλτράρισμα καλωδίωσης

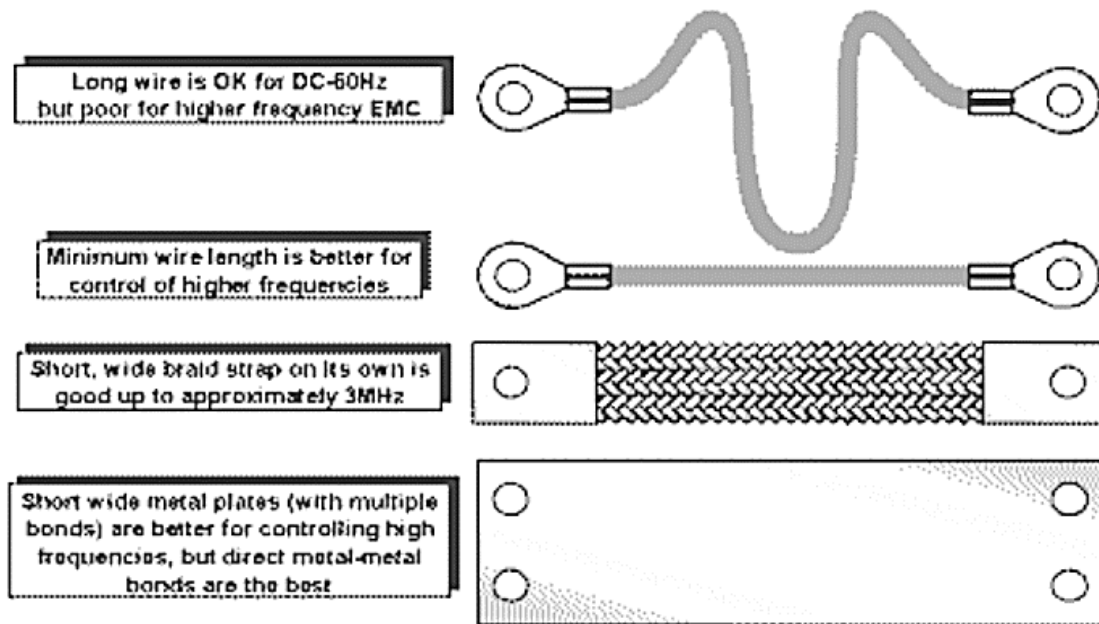
Προστίθενται άμεσοι σύνδεσμοι ή φίλτρα στην αναφορά RF σε όλα τα ίχνη που συνδέονται σε



Σχήμα 4.27 – Φίλτρα για τον μηδενισμό ρευμάτων διαφορικού και κοινού τρόπου

αγωγούς εκτός τυπωμένου κυκλώματος. Τα φίλτρα στην είσοδο μπορεί να είναι ένας απλός πυκνωτής που συνδέεται στην αναφορά RF, αλλά τα φίλτρα στην έξοδο γενικά απαιτείται να είναι μια εν σειρά αντίσταση ή ένα τσοκ από μαλακό φερρίτη, ώστε προστιθέμενος ο πυκνωτής στην αναφορά RF να μην αυξάνει σημαντικά την αιχμή του ρεύματος εξόδου (βλ. σχ. 4.27).

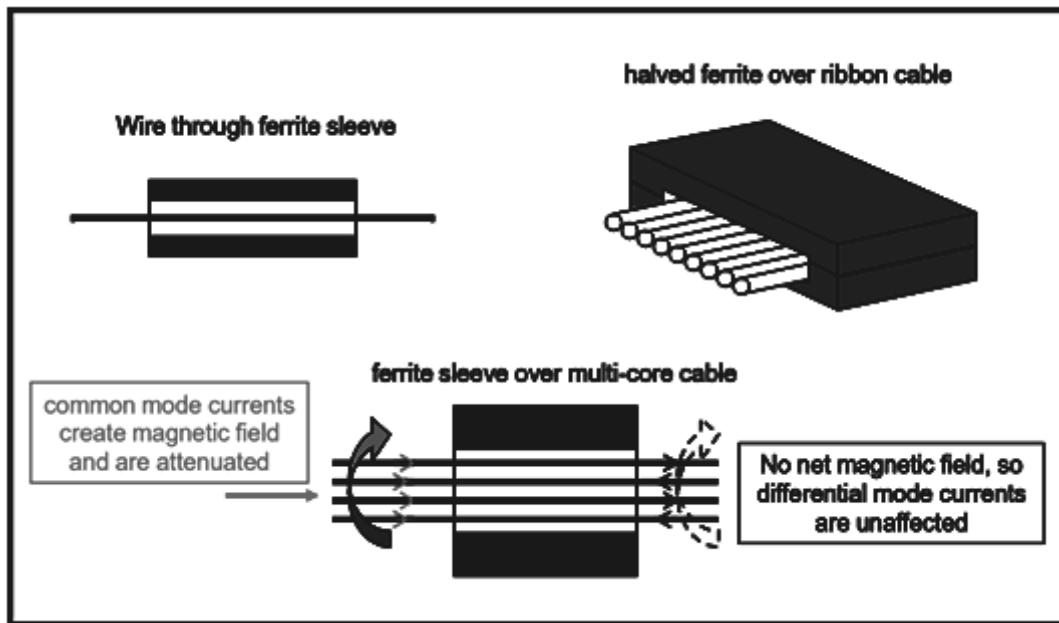
Φυσικά υπάρχει η δυνατότητα να υλοποιηθούν πιο πολύπλοκα φίλτρα συνδυάζοντας πυκνωτές με αντιστάσεις με ή χωρίς τσοκ μαλακού φερρίτη και με ή χωρίς τσοκ κοινού τρόπου. Αυτοί οι άμεσοι σύνδεσμοι ή τα φίλτρα τοποθετούνται στο σημείο όπου τα ίχνη συνδέονται με αγωγούς εκτός τυπωμένου κυκλώματος, παρέχοντας έτσι μονοπάτια χαμηλής εμπέδησης (Z) για τα ρεύματα κοινού τρόπου, τα οποία σε κάθε άλλη περίπτωση θα περνούσαν μέσα από τους αγωγούς του τυπωμένου κυκλώματος.



Σχήμα 4.28 – Άμεσοι σύνδεσμοι για διάφορες συχνότητες

Αξίζει να σημειωθεί επίσης, όπως φαίνεται από το σχ. 4.28, ότι ένας σχεδιαστής θα πρέπει να λάβει σοβαρά υπόψη του τη συχνότητα ή τη περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας του συστήματος, για να χρησιμοποιηθούν κι οι αντίστοιχοι εξωτερικοί σύνδεσμοι. Αναλυτικότερα, για συχνότητες μέχρι 60Hz, μπορεί να χρησιμοποιηθούν μακριές καλωδιώσεις, όμως για υψηλότερες συχνότητες είναι απαραίτητο να υφίστανται όσο το δυνατόν ελαχιστοποιημένα μήκη καλωδιώσεων. Για συχνότητες μέχρι 3MHz, είναι καλό να χρησιμοποιηθούν καλωδιώσεις τύπου πλεξούδας λουρί, ενώ για πολύ υψηλές συχνότητες εφαρμόζονται φαρδιές μεταλλικές πλάκες μικρού μήκους. Επιπρόσθετα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικοί υποδοχείς από φερρίτη, όπως φαίνεται στο σχ. 4.29, μέσα από τα οποία περνάνε οι καλωδιώσεις, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών πεδίων λόγω των αυτεπαγωγών και των χωρητικοτήτων που σχηματίζονται [105]. Στο σχήμα 4.30 απεικονίζονται ειδικές κατασκευές, όπως φίλτρο για τη γραμμή τροφοδοσίας, ή φίλτρα εισόδου

και εξόδου, που συναντώνται συχνά σε συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος, για τη βελτίωση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.



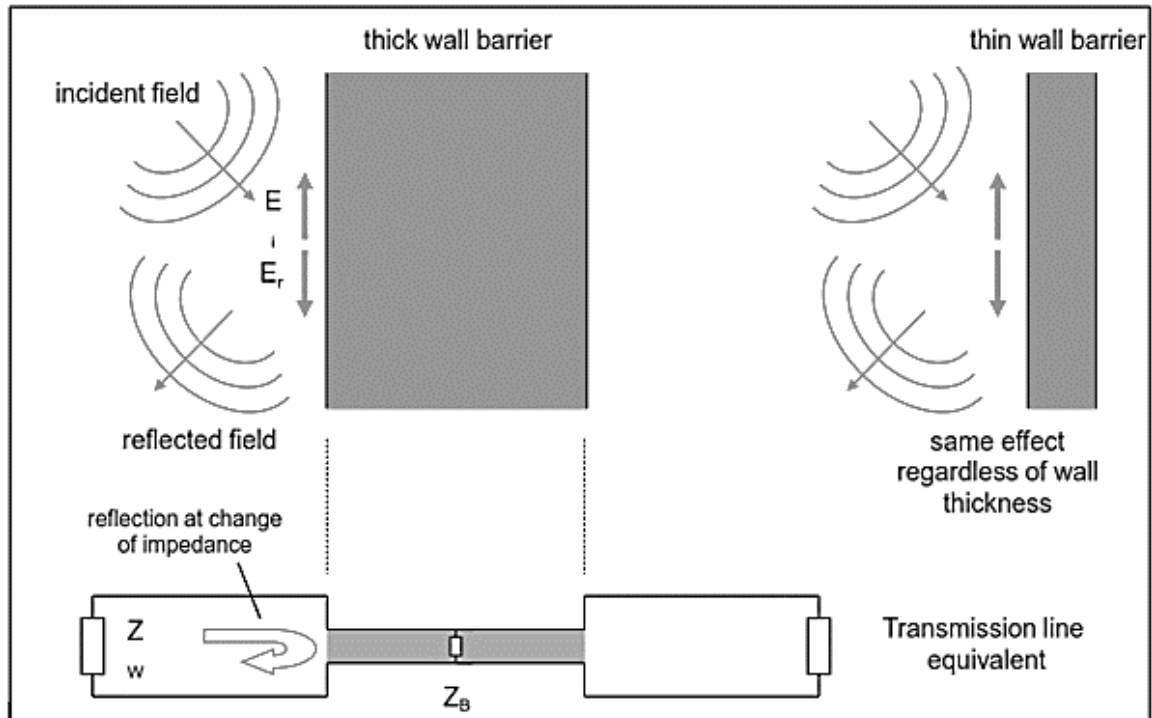
Σχήμα 4.29 – Ειδικοί υποδοχείς από φερρίτη για την θωράκιση καλωδίων



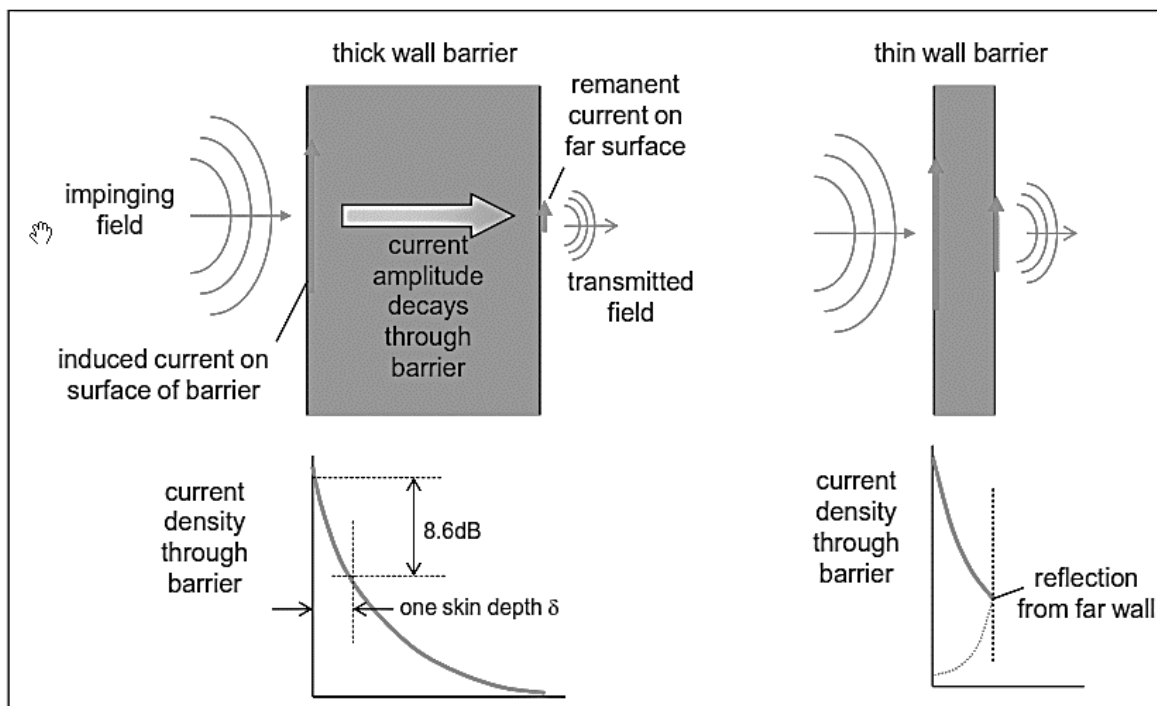
Σχήμα 4.30 – Ειδικές κατασκευές για ελαχιστοποίηση ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής

Στα σχήματα 4.31 και 4.32, παρουσιάζονται οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ανάκλαση αλλά και την απορρόφηση της ανεπιθύμητης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Πιο

συγκεκριμένα, με τη χρήση φέρρομαγνητικών υλικών (υλικά κατασκευασμένα από φερρίτη) στην εξωτερική επιφάνεια της συσκευασίας, που πρόκειται να στεγάσει όλο το σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος, επιτυγχάνεται η ανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Ως εκ

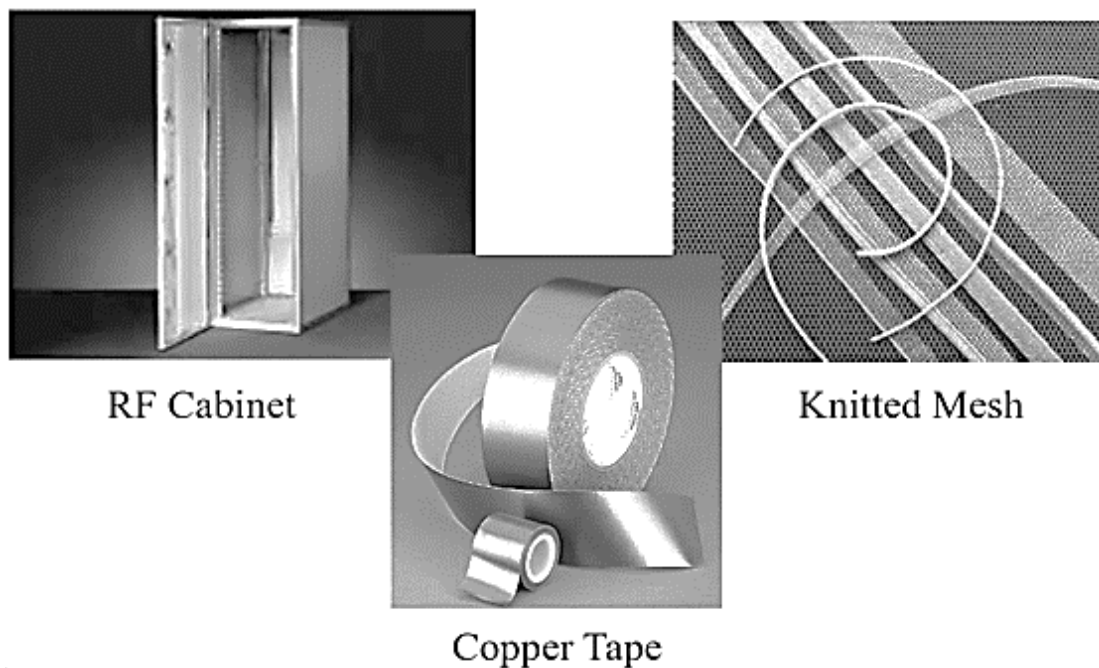


Σχήμα 4.31 – Ανάκλαση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



Σχήμα 4.32 – Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

τούτου το σύστημα δε κινδυνεύει από τη δημιουργία άλλων πεδίων λόγω λειτουργίας κοντινών συστημάτων. Από την άλλη μεριά, η εσωτερική επένδυση της συσκευασίας με ταινία χαλκού (βλ. σχ. 4.33) εμποδίζει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που δημιουργείται λόγω της λειτουργίας του συστήματος να εξέλθει εκτός αυτού, και να επηρεάζει έτσι τη λειτουργία πιθανών κοντινών συσκευών. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνονται και οι δυο τρόποι προστασίας, τόσο της ατρωσίας όσο και της εκπομπής ακτινοβολίας του υπό μελέτη και κατασκευής μετατροπέα ισχύος [105], [106].



Σχήμα 4.33 – Κλωβός Faraday, ταινία χαλκού, δικτυωτό πλέγμα

4.8 Πρότυπα

Δεδομένου ότι μπορεί να προκύψουν προβλήματα λόγω της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας μεταξύ των ηλεκτρικών συσκευών, κρίνεται αναγκαίο και σαφές ότι πρέπει να υφίσταται κάποια προτυποποίηση, δηλαδή κανόνες στους οποίους υποχρεώνονται να υπόκεινται οι συσκευές.

Ιστορικά, το 1989, η ευρωπαϊκή ένωση υιοθέτησε την ντιρεκτίβα EMC, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες έως τότε δημοσιευμένες εργασίες. Όμως η ντιρεκτίβα αυτή, ενώ ήταν μια καλή αρχή για τη προτυποποίηση, υπήρχαν αρκετές ασάφειες για διάφορα προϊόντα. Το 1992, συστάθηκε ένα ευρωπαϊκό όργανο τυποποίησης, η CENELEC, που άρχισε να παρουσιάζει μια σειρά προδιαγραφών για διάφορες κατηγορίες συσκευών. Εκεί καταγράφεται η διαδικασία μετρήσεων των συσκευών, τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπής και ατρωσίας, τα μετρητικά όργανα, που πρέπει να χρησιμοποιηθούν κ.ά. Αξίζει να σημειωθεί τέλος, ότι αρκετές χώρες πριν ακόμη τη δημιουργία της CENELEC, είχαν ήδη αναπτύξει δικά τους πρότυπα. Μια από αυτές τις χώρες ήταν κι η Ελλάδα με τον ΕΛΟΤ (Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης). Κάθε εταιρεία κατασκευής ή διάθεσης συσκευών εντός της ευρωπαϊκής ένωσης υποχρεούται να είναι εναρμονισμένη με τα αντίστοιχα πρότυπα των συσκευών και να φέρει την ειδική σήμανση (CE Mark) [103].

Η Ευρωπαϊκή οδηγία 89/336/EEC περί ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας δίνει ένα γενικό ορισμό των ουσιαστικών απαιτήσεων προστασίας, εφαρμόσιμων σε κάθε ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό [100]. Ορίζει δυο ουσιαστικές απαιτήσεις προστασίας:

- Απαίτηση εκπομπής: Κάθε μέρος του εξοπλισμού πρέπει να έχει κατασκευασθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να διασφαλίζεται κάθε ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση που παράγει, να επιτρέπει σε άλλες συσκευές να λειτουργούν σε συνθήκες τέτοιες όπως προορίζονταν.
- Απαίτηση ατρωσίας: Κάθε μέρος του εξοπλισμού πρέπει να κατασκευάζεται με ένα δομικό επίπεδο ατρωσίας σε εξωτερικές παραγόμενες ηλεκτρομαγνητικές παρενοχλήσεις.

Τα πρότυπα, που αναφέρονται στην οδηγία αυτή κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Βασικά πρότυπα: Αποσκοπούν στον καθορισμό βασικών απαιτήσεων και διαδικασιών των δοκιμών.
- Γενικά πρότυπα: Αποσκοπούν στον καθορισμό απαιτήσεων για τη χρήση προϊόντων σε συγκεκριμένα ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα.
- Πρότυπα προϊόντων: Περιέχουν τις απαιτήσεις για βασικά προϊόντα ή οικογένειες προϊόντων. Ο πίνακας 4.7 απεικονίζει τα πρότυπα για συγκεκριμένες οικογένειες προϊόντων.

| | Οικιακά, εμπορικά και μικρά βιομηχανικά | Βιομηχανικό περιβάλλον |
|----------------|--|-------------------------------|
| Εκπομπή | EN 50081-1 (1992) | EN 50081-2 (1993) |
| Ατρωσία | EN 50082-1 (1992) | EN 50082-2 (1995) |

Πίνακα 4.7 – Γενικά Πρότυπα

5

Θέματα τυπωμένων κυκλωμάτων για

ηλεκτρονικά ισχύος

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η παρούσα κατάσταση τεχνολογίας κατασκευής συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος. Με άλλα λόγια περιγράφεται η ανάλυση που γίνεται για τις τεχνικές συσκευασίας ηλεκτρονικών ισχύος σε επίπεδο όμως τυπωμένου κυκλώματος. Αναλυτικά στην ενότητα 5.1 γίνεται μια ιστορική αναδρομή της συνδεσμολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος και των ηλεκτρονικών γενικότερα. Η ενότητα 5.2 περιγράφει τη παρούσα τεχνική κατασκευής και σχεδίασης μετατροπέων ισχύος. Οι ενότητες 5.3 και 5.4 ασχολούνται με τη τεχνολογία κατασκευής διακριτών στοιχείων και τη φάση συσκευασίας κυκλώματος (Circuit Packaging Phase) αντίστοιχα.

5.1 Ιστορική αναδρομή συνδεσμολογιών ηλεκτρονικών ισχύος

Για να κατανοηθεί ο τρόπος, με τον οποίο κατασκευάζονται σήμερα τα κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος, θα πρέπει να γίνει μια σύντομη αναφορά στο παρελθόν και πως εξελίχθηκε ως σήμερα. Η έναρξη των συνδεσμολογιών με διακριτά στοιχεία ξεκινά με την εμφάνιση ηλεκτρικών στοιχείων [107], δηλαδή με τις ανακαλύψεις φαινομένων όπως αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, ηλεκτρομαγνητική επαγωγή κ.ά. Τα ηλεκτρικά κυκλώματα είναι κατασκευασμένα με τέτοια στοιχεία κατά κανόνα, χρησιμοποιώντας θεωρία κυκλωμάτων για μοντελοποίηση και σχεδίαση. Η προσέγγιση του διαχωρισμού ανάμεσα στη σχεδίαση και τη φυσική υπόσταση ή την κατασκευή όλα αυτά τα χρόνια κατέληξε σε μια σχέση ένα προς ένα μεταξύ συμβόλων στο ηλεκτρικό κύκλωμα και τα στοιχεία. Αυτό σημαίνει ότι κάθε σύμβολο του κυκλώματος απεικονίζει ένα φυσικό στοιχείο. Επιπρόσθετα, οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις στο σχηματικό του κυκλώματος και οι καλωδιώσεις έχουν επίσης μια σχέση ένα προς ένα.

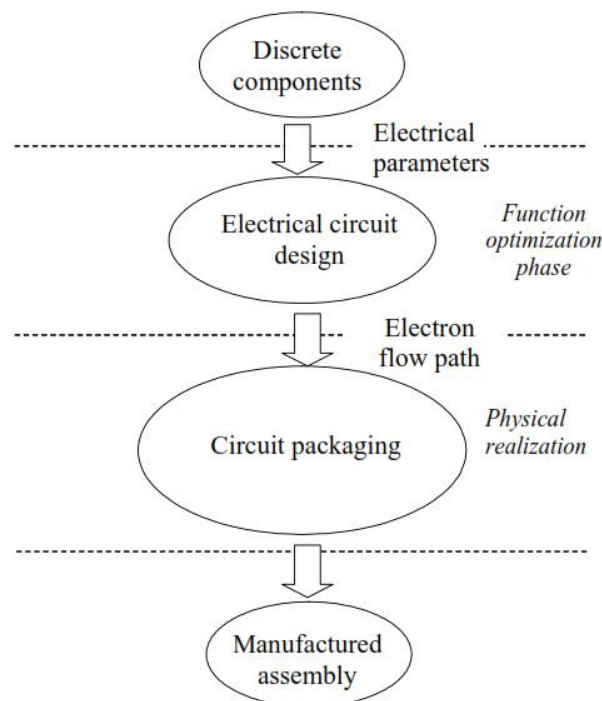
Η ολοένα όμως αυξανόμενη απαίτηση για ηλεκτρονικά κυκλώματα στα ραδιοηλεκτρονικά συστήματα πριν από έξι δεκαετίες, ανάγκασε τη βιομηχανία ηλεκτρονικών να αναζητήσει ένα καλύτερο τρόπο διασύνδεσης των στοιχείων από ό,τι η τεχνική καλωδίωσης σημείο προς σημείο. Οι προσπάθειες αυτές κατέληξαν στην εύρεση της τυπωμένης καλωδίωσης, η οποία κατέστησε πιθανό να εφαρμόσει ηλεκτρικές διασυνδέσεις μέσω μεταλλικών επιφανειών, οι οποίες κατασκευάζονται κατά την διαδικασία κατασκευής. Αυτό οδήγησε σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση κόστους μέσω της αυτοματοποιημένης διαδικασίας, κι είχε ως αποτέλεσμα η βιομηχανία να βρει τρόπους να τερματίσει την ένα προς ένα σχέση μεταξύ συμβόλων κυκλώματος και στοιχείων μέσω κατασκευής ενός αριθμού εξαρτημάτων σε μια αναπόσπαστη διαδικασία με μια πολυλειτουργική μονωτική πλάκα στήριξης [108].

Η εφεύρεση του ολοκληρωμένου κυκλώματος έδωσε τη δυνατότητα κατασκευής ενός ολόκληρου ηλεκτρονικού κυκλώματος σε ένα φυσικό στοιχείο. Στη μικροηλεκτρονική, μια τεράστια βελτίωση στο κόστος, μέγεθος, κι απόδοση επιτεύχθηκε με τη μονολιθική ολοκλήρωση. Τα επίπεδα τάσης, ρεύματος και αποθήκευσης ενέργειας στα κυκλώματα μικροηλεκτρονικής είναι αρκετά πιο χαμηλά από εκείνα των ηλεκτρονικών ισχύος. Αυτό επιτρέπει την ολοκλήρωση όλων των κυκλωματικών λειτουργιών σε ένα τσιπ. Ωστόσο, ο αριθμός των διακριτών στοιχείων εξακολουθεί να είναι υψηλός στα συστήματα μικροηλεκτρονικής. Αυτό οφείλεται σε ένα αριθμό παραγόντων, εκ των οποίων το κόστος είναι το πιο σημαντικό.

Το επίπεδο ολοκλήρωσης σε συνδεσμολογίες ηλεκτρονικών ισχύος είναι ακόμη χαμηλό. Συνδεσμολογίες από διακριτά στοιχεία εξακολουθούν να είναι η συντριπτική πλειοψηφία των κυκλωμάτων ηλεκτρονικών ισχύος. Η μονολιθική ολοκλήρωση ολόκληρων κυκλωμάτων είναι εφικτή μόνο σε πολύ χαμηλά επίπεδα ισχύος λόγω των υψηλότερων τάσεων και ρευμάτων, που διαχειρίζονται τα κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος. Η χρησιμοποίηση ενός αριθμού ημιαγωγικών διατάξεων ισχύος σε μια συσκευασία αναφέρεται ως μονάδα ισχύος και η έννοια αυτή εισήχθη μερικές δεκαετίες πριν [109]. Αυτή τη στιγμή, αποτελεί τη καλύτερη τεχνική για ισχύεις μέτριας κλίμακας (μέχρι μερικά kW). Από την άλλη, η ολοκλήρωση των παθητικών στοιχείων βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο. Σε ισχύεις χαμηλής κλίμακας, αναδύονται τεχνολογίες που ολοκληρώνουν τα παθητικά στοιχεία σε ένα κύκλωμα. Σε ισχύεις μέτριας κλίμακας, η ηλεκτρομαγνητική ολοκλήρωση των παθητικών γίνεται με τη χρησιμοποίηση κεραμικών στοιχείων [110].

5.2 Παρούσα τεχνική σχεδίασης και κατασκευής μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος

Όπως περιγράφηκε στη προηγούμενη ενότητα, οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος σήμερα κατασκευάζονται με συνδεσμολογίες διακριτών στοιχείων. Οι ηλεκτρικές παράμετροι των στοιχείων αυτών κυρίως βρίσκονται στα εγχειρίδια των κατασκευαστών και χρησιμοποιούνται ως παράμετροι εισόδου για τον ηλεκτρολογικό σχεδιασμό, όπως απεικονίζεται στο σχ. 5.1 [111]. Ο σχεδιασμός της ηλεκτρικής λειτουργίας του κυκλώματος αναπαρίσταται από το σχηματικό του ηλεκτρικού κυκλώματος. Το αποτέλεσμα αυτής της φάσης είναι οι διαδρομές ροής ηλεκτρονίων, ή διαφορετικά του ρεύματος. Στη συνέχεια, ακολουθεί η φάση συσκευασίας του κυκλώματος, όπου οι διαδρομές ροές ηλεκτρονίων χαρτογραφούνται πάνω σε φυσικές ηλεκτρικές διασυνδέσεις. Με σκοπό τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας του μετατροπέα, επιπρόσθετα θέματα όπως η μηχανική ακεραιότητα (περιλαμβάνεται η μηχανική υποστήριξη και προστασία) και η θερμική διαχείριση σχεδιάζονται σε αυτή τη φάση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διευθέτηση των διακριτών στοιχείων και των απαραίτητων πρόσθετων τμημάτων σε ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές δομές.



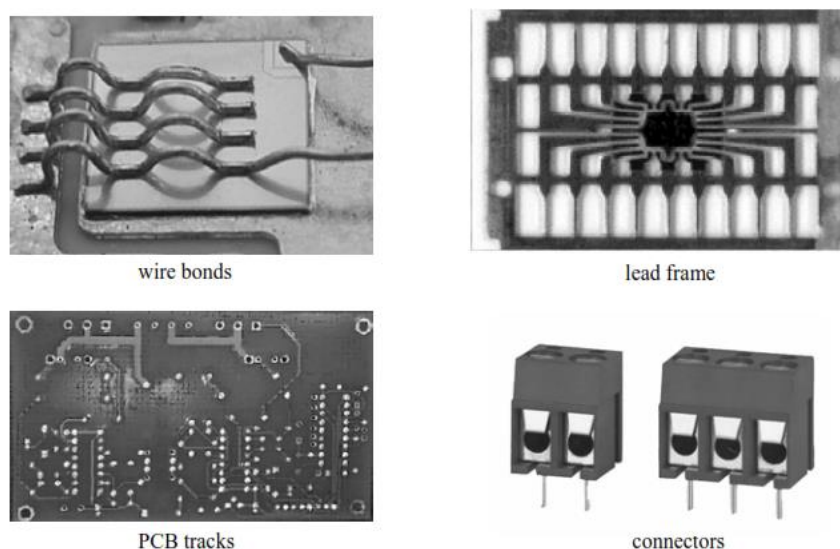
Σχήμα 5.1 – Διάγραμμα θεωρητικής κατασκευής μετατροπέα ισχύος.

5.2.1 Μεγάλος αριθμός κατασκευαστικών τμημάτων

Κάθε διακριτό στοιχείο, που χρησιμοποιείται σε μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος, αποτελείται από ένα αριθμό τμημάτων. Εκτός από το γεγονός ότι επιτελεί τη κύρια ηλεκτρική λειτουργία, κάθε στοιχείο περιλαμβάνει ένα αριθμό τμημάτων, που διασφαλίζουν την ακεραιότητα του στοιχείου. Έτσι, περιέχονται μέρη για την ηλεκτρική διασύνδεση με τον έξω κόσμο, περιβαλλοντολογική προστασία, μηχανική υποστήριξη, απαγωγή θερμότητας κ.ά. Τα στοιχεία αυτά μπορεί να είναι πλήρως τοποθετημένα σε μια συσκευασία και αυτόνομα.

Η φάση συσκευασίας του κυκλώματος περιλαμβάνει επιπρόσθετα τμήματα και διαδικασίες συνδεσμολογίας για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας του μετατροπέα. Αναλυτικότερα, περιλαμβάνονται τα εξής: η ηλεκτρική διασύνδεση των στοιχείων μεταξύ τους καθώς και η συνδεσμολογία με το περιβάλλον εκτός συστήματος, η παροχή μηχανικής υποστήριξης, η προστασία από το περιβάλλον, η συναλλαγή θερμότητας των στοιχείων του μετατροπέα με το περιβάλλον, κ.ά.

Η ακολουθιακή αυτή προσέγγιση σε συνδυασμό με τη χρήση διακριτών στοιχείων οδηγεί σε ένα συνολικά μεγάλο αριθμό τμημάτων κατασκευής του μετατροπέα. Ένας μεγάλος αριθμός μερών σε μια τυπική συνδεσμολογία ηλεκτρονικών ισχύος μπορεί να απεικονισθεί στο σχ. 5.2. Το πρώτο επίπεδο είναι το επίπεδο στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει συνδέσεις και πλαίσια συνδέσεων, που ενώνουν το στοιχείο με τον έξω κόσμο και συρμάτινες συνδέσεις, που συνδέουν το βασικό ηλεκτρικό τμήμα του στοιχείου με τις συνδέσεις αυτού. Το επόμενο στάδιο των διασυνδέσεων είναι το επίπεδο του κυκλώματος, που έχει υλοποιηθεί, επί το πλείστο, στην επιμετάλλωση του φορέα κυκλώματος. Το τρίτο στάδιο είναι η σύνδεση του κυκλώματος με το σύστημα, υπό την έννοια συνδέσεων επαφών ή μεταλλικών ακροδεκτών. Στο επίπεδο



Σχήμα 5.2 – Τμήματα ηλεκτρικής διασύνδεσης.

στοιχείου, τα στοιχεία περιλαμβάνουν μέρη με σκοπό την απομάκρυνση θερμότητας, όπως μεταλλικών επιφανειών στη θήκη του ημιαγωγού ισχύος. Επιπρόσθετα μέρη υπάρχουν στο επίπεδο συνδεσμολογίας, όπως θερμικά υλικά διασύνδεσης, θερμικά αγωγίμα υποστρώματα κ.ά. Τα τμήματα διαχείρισης θερμότητας του τρίτου σταδίου είναι συνήθως εναλλάκτες θερμότητας, όπως ψήκτρες με σκοπό τη μεταφορά θερμότητας, που διαχέεται από τα στοιχεία του μετατροπέα στο περιβάλλοντα χώρο.

Θέματα κατασκευής και συνδεσμολογίας

Οι προσπάθειες να ενσωματωθούν οι ανησυχίες για τη κατασκευή και τη συνδεσμολογία από τα πρώτα στάδια της σχεδίασης του προϊόντος, με σκοπό να επιτευχθεί ένα αποτελεσματικό ως προς το κόστος προϊόν, σχηματοποιήθηκαν στις τεχνικές για τη κατασκευή και τη σχεδίαση (Design For Manufacture and Assembly – DFMA) από τον G. Boothroyd [112].

Σύμφωνα με τις κύριες αρχές του DFMA, μειώνοντας τον αριθμό των τμημάτων σε μια συνδεσμολογία είναι ο πιο δυνατός τρόπος για να μειώσουμε το κόστος συνδεσμολογίας [113]. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο αριθμός τμημάτων σε τυπικές συνδεσμολογίες ηλεκτρονικών ισχύος είναι μεγάλος. Αν όλα τα κατασκευαστικά τμήματα σε ένα μετατροπέα ισχύος προστεθούν, τότε μπορεί κανείς να καταλήξει με ένα αριθμό που είναι πολλές φορές μεγαλύτερος από τον αριθμό συμβόλων στο σχηματικό ηλεκτρικό κύκλωμα. Κάθε ένα από αυτά τα μέρη πρέπει να κατασκευάζεται και να συνδέεται με το υπόλοιπο της συνδεσμολογίας, που καθιστά το συνολικό κόστος του μετατροπέα, συμπεριλαμβανομένου υλικών, κατασκευής και συναρμολόγησης υψηλό.

Μια άλλη κύρια αρχή DFMA είναι η πολυλειτουργικότητα των κατασκευαστικών τμημάτων. Σχετικά με τη πολυλειτουργικότητα ή την έλλειψη αυτής σε μια συνδεσμολογία ηλεκτρονικών ισχύος, κάθε διακριτό στοιχείο περιέχει μέρη, που υπηρετούν μόνο ένα στοιχείο. Παραδείγματα είναι θήκη στοιχείων, σύνδεσμοι, κ.ά. Επιπρόσθετα, αυτά τα τμήματα εκτελούν μόνο μια λειτουργία, όπως ηλεκτρική διασύνδεση ή αγωγή θερμότητας. Η λειτουργικότητα των βασικών ηλεκτρικών τμημάτων είναι χαμηλή, αφού το ηλεκτρικό τμήμα ενός διακριτού στοιχείου υλοποιεί ένα μόνο σύμβολο σχηματικού κυκλώματος.

Η επόμενη DFMA ανησυχία είναι η τυποποίηση των τμημάτων σε μια συνδεσμολογία. Η ανάγκη για τυποποίηση των εξαρτημάτων είχε αναγνωριστεί μαζί με την ανάγκη για την αυτοματοποίηση σε ηλεκτρονικά κυκλώματα [114]. Σε ένα τυπικό μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος, μια μεγάλη γκάμα στοιχείων χρησιμοποιείται. Αυτά τα στοιχεία έχουν βελτιστοποιηθεί από τους κατασκευαστές τους με τα χρόνια, προκειμένου να μειωθεί το κόστος και το μέγεθος τους. Διάφοροι τύποι στοιχείων έχουν ακολουθήσει διαφορετικές τεχνικές ανάπτυξης. Αυτό οδήγησε σε μια σειρά από ασύμβατες τεχνολογίες, που μπορούν να βρεθούν σε ένα τυπικό μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Υπάρχουν τμήματα σε διάφορα στοιχεία που επιτελούν την

ίδια λειτουργία, αλλά δεν είναι συμβατά μεταξύ τους από κατασκευαστική άποψη και επομένως αποτελεί εμπόδιο στην προοπτική κατασκευής τμημάτων του μετατροπέα και συναρμολόγησής τους μαζί σε μια γραμμή παραγωγής.

Η ενοποίηση (modularization) είναι μια άλλη τεχνική DFMA. Η χρήση της κατασκευής, κατά μονάδες, κατά τη διάρκεια της κατασκευής επιτρέπει μια μεγάλη και πολύπλοκη μονάδα να κατανεμηθεί σε μικρά και συχνά επαναλαμβανόμενες υπομονάδες, που μπορεί να κατασκευαστούν αποτελεσματικά [115]. Καθιστά επίσης την επισκευή μιας αποτυχίας απλούστερη, επειδή η αποτυχημένη υπομονάδα, παρά ολόκληρη η μονάδα, μπορεί να αντικατασταθεί. Τέλος, ελαχιστοποιώντας το χρόνο συναρμολόγησης είναι μια άλλη ανησυχία του DFMA. Ο εξοπλισμός των ηλεκτρονικών ισχύος βρίσκεται σε λειτουργία συνεχώς και αδιαλείπτως, λόγω της συνδεσμολόγησης τμημάτων, που δεν επιδέχονται αυτοματοποιημένη συναρμολόγηση.

Ηλεκτρική, θερμική και χωρική απόδοση του μετατροπέα

Ο μεγάλος αριθμός τμημάτων στην συναρμολόγηση των ηλεκτρονικών ισχύος επηρεάζει επίσης ηλεκτρική, ηλεκτρομαγνητική και θερμική απόδοση του μετατροπέα. Η πολυεπίπεδη ιεραρχία της συσκευασίας προσθέτει παρασιτικές επιδράσεις όπως ηλεκτρική επαγωγή, χωρητικότητα και αντίσταση, λόγω της ηλεκτρικής διασύνδεσης και στην αναντιστοιχία αντίστασης μεταξύ των επιπέδων συσκευασίας ή στα στοιχεία [116]. Αυτά τα παρασιτικά στοιχεία προκαλούν στρέβλωση διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ροής ενέργειας. Οι παρασιτικές επαγωγές αυτών των τμημάτων στα στοιχεία περιορίζει την ηλεκτρική απόδοση των διακοπτικών συσκευών. Οι παρασιτικές αντιστάσεις προκαλούν πρόσθετες απώλειες αγωγιμότητας στο στοιχείο ή στη συναρμολόγηση. Οι παρασιτικές χωρητικότητες των μερών αυτών σε συνδυασμό με μεγάλες κλίσεις τιμών dv/dt προκαλούν ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο κοινού τρόπου, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Επιπλέον, κάθε τμήμα στη διαδρομή που ακολουθεί η θερμότητα, από το στοιχείο που διαχέεται η θερμότητα προς την ατμόσφαιρα συνεισφέρει με τη δική του θερμική αντίσταση και χωρητικότητα του στην συνολική θερμική αντίσταση της διαδρομής της θερμότητας, επηρεάζοντας την θερμική απόδοση του μετατροπέα. Τέλος, ο μεγάλος αριθμός των κατασκευαστικών μερών επηρεάζει αρνητικά τον συνολικό όγκο του μετατροπέα, δεδομένου ότι κάθε τμήμα της κατασκευής καταλαμβάνει ένα συγκεκριμένο όγκο.

5.2.2 Μη βελτιστοποιημένα ηλεκτρομαγνητικά, θερμικά και χωρικά θέματα

Εκτός από την ύπαρξη ενός μεγάλου αριθμού τμημάτων και προβλημάτων, που προκαλεί (όπως συζητήθηκε παραπάνω) η παρούσα προσέγγιση του σχεδιασμού (βλ. Σχ. 5.1) έχει άλλο

ένα σημαντικό μειονέκτημα. Η φάση βελτιστοποίησης λειτουργίας ασχολείται με την βελτιστοποίηση της ηλεκτρικής λειτουργίας, ενώ τα θέματα ηλεκτρομαγνητικής, θερμικής και χωρικής σχεδιάζονται στη φάση συσκευασίας του κυκλώματος. Αυτή η προσέγγιση ήταν αποδεκτή στο παρελθόν, δεδομένου ότι οι μετατροπείς λειτουργούσαν σε χαμηλές διακοπτικές συχνότητες, τα στοιχεία ήταν μεγαλύτερα και χωροταξικά απλωμένα, οι περιοχές των επιφανειών για την απομάκρυνση της θερμότητας ήταν μεγαλύτερες, η ηλεκτρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των στοιχείων θα μπορούσε να παραμεληθεί και το μέγεθος των συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος δεν ήταν κρίσιμο.

Με τις πρόσφατες εξελίξεις στις ημιαγωγικές διατάξεις ισχύος (MOSFET's, IGBT's), οι διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας συνεχώς αυξάνονται, και αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση μεγέθους των παθητικών στοιχείων και των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος στο σύνολο τους. Αυτό με τη σειρά οδηγεί σε αύξηση του απώλεια πυκνότητες ισχύος στα συστατικά. Επιπρόσθετα, η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για μικρότερους όγκους και υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος οδήγησε σε στοιχεία με κοντινή γειτνίαση, επηρεάζοντας κατ' αυτό τον τρόπο το ένα τη θερμοκρασία λειτουργίας του άλλου. Αυτό θέτει αυστηρότερες απαιτήσεις σχετικά με τη διαχείριση θερμότητας των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος. Δεδομένου ότι η θερμική συμπεριφορά θεωρείται ένα από τα κύρια ζητήματα αξιοπιστίας στα ηλεκτρονικά ισχύος, είναι ζωτικής σημασίας να εξασφαλιστεί ότι όλα τα εξαρτήματα λειτουργούν σε επιτρεπόμενες περιοχές θερμοκρασίας τους.

Η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος είναι ένα άλλο ζήτημα που έγινε σημαντικό με την αύξηση της διακοπτικής συχνότητας και τις πυκνότητες ισχύος. Οι γρήγορες μεταβάσεις καταστάσεων των διατάξεων ισχύος, σε συνδυασμό με παρασιτικά στοιχεία των συσκευών, παράγουν το ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο) έχει γίνει ένα σημαντικό θέμα στα ηλεκτρονικά ισχύος και διάφορα πρότυπα έχουν θεσπιστεί για τον έλεγχο των επιπέδων του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου, που πρέπει να πληρούνται στους μελλοντικούς μετατροπείς ισχύος.

Επιπλέον, η ανάγκη για τη μείωση του μεγέθους οδηγεί σε πιο πυκνή χωροταξική διάταξη των στοιχείων, κι ως εκ τούτου αυτό οδηγεί στη δημιουργία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [117]. Από την άλλη όμως, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ηλεκτρομαγνητική σύζευξη αυτών των τμημάτων. Στη συμβατική προσέγγιση (βλ. Σχ. 5.1), τόσο τα θερμικά όσο και τα ηλεκτρομαγνητικά θέματα λαμβάνονται υπόψη στη φάση συνδεσμολογίας του κυκλώματος. Τα θέματα αυτά συχνά προσεγγίζονται με τη βοήθεια της τεχνικής «αφαίρεσε και δοκίμασε» (“Cut – Try”) εκτελώντας ηλεκτρομαγνητικές και θερμικές μετρήσεις για το υλικό και, αν δεν επιτυγχάνονται ικανοποιητικά αποτελέσματα, τότε μια χρονοβόρα επανασχεδίαση και η

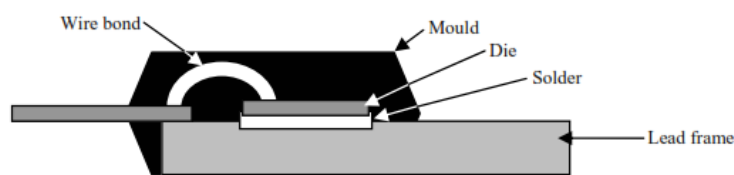
χρησιμοποίηση επιπρόσθετου υλικού είναι απαραίτητα. Αυτό οδηγεί σε κυρώσεις στο μέγεθος και το κόστος.

5.3 Κατασκευή στοιχείων ηλεκτρονικών ισχύος

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, μια μεγάλη γκάμα στοιχείων συναντώνται στους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος. Στις ενότητες που ακολουθούν, η τεχνολογία κατασκευής στοιχείων, που τυπικά χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά ισχύος, περιγράφονται με έμφαση στα τμήματα κατασκευής και τις λειτουργίες που επιτελούν.

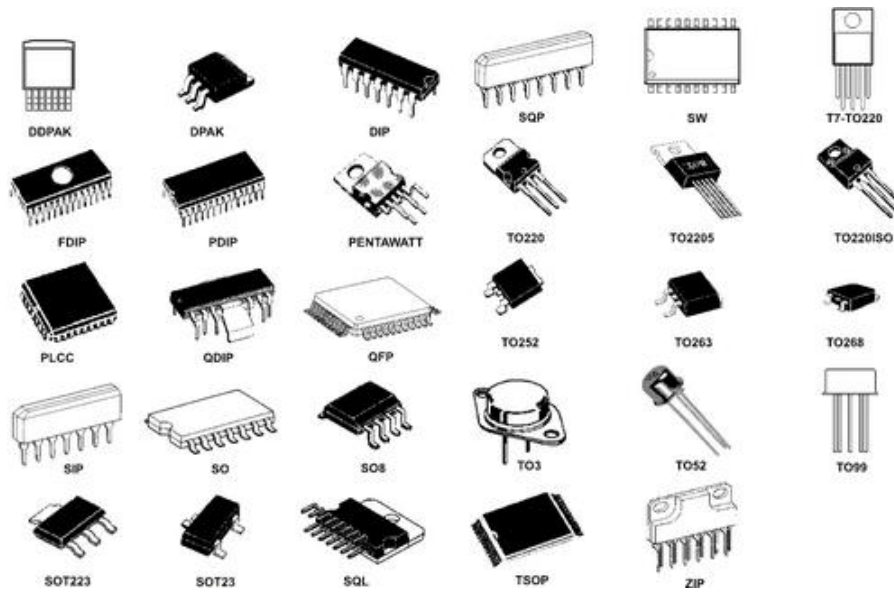
5.3.1 Κατασκευή ημιαγωγών ισχύος

Το σχ. 5.3 απεικονίζει τη πλάγια όψη ενός τυπικού ημιαγωγικού στοιχείου. Η πίσω



Σχήμα 5.3 – Συσκευασία ημιαγωγού ισχύος (πλάγια όψη)

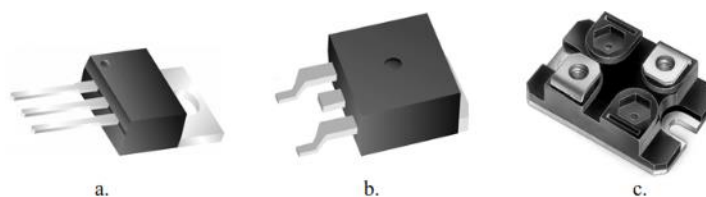
πλευρά της επαφής του ημιαγωγού ισχύος είναι συνδεδεμένη με ένα μολύβδινο πλαίσιο από κράμα χαλκού, μέσω μιας ήπιας κόλλας. Αυτό το μέρος του μολύβδινου πλαισίου παρέχει την ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ του ακροδέκτη της υποδοχής (συλλέκτη) και τον έξω κόσμο, μηχανική υποστήριξη για την επαφή και μια διαδρομή ροής για τη θερμότητα, που διαχέεται από την επαφή. Οι υπόλοιπες ηλεκτρικές διασυνδέσεις μεταξύ της επαφής και του μολύβδινου πλαισίου υλοποιούνται μέσω συρμάτων συνδέσεων. Τέλος, η επαφή ενθυλακώνεται για προστασία με ένα καλούπι κατασκευασμένο από χημική ένωση, όπως η εποξειδική ρητίνη. Το μολύβδινο πλαίσιο προεξέχει από τα άκρα της συσκευασίας. Είναι δυνατόν να σχεδιαστούν διαφορετικοί τύποι συσκευασιών (βλ. Σχ. 5.4.α,β). Ένα πακέτο μπορεί να είναι ως μια διαμπερής οπή (βλ. Σχ. 5.5.α), που σχεδιάστηκε για να συνδεθεί π.χ. απευθείας στο τυπωμένο κύκλωμα. Μπορεί επίσης να είναι επιφανειακής σύνδεσης (βλ. Σχ. 5.5.β), όπου το στοιχείο είναι κολλημένο πάνω στη πλακέτα.



Σχήμα 5.4α. – Διάφοροι τύποι συσκευασιών ημιαγωγών ισχύος



Σχήμα 5.4β. – Τύποι συσκευασιών: δυο ημιαγωγικοί διακόπτες σε μια συσκευασία για την κατασκευή της μιας φάσης



Σχήμα 5.5 – Συσκευασίες ημιαγωγού ισχύος: α. μέσω οπής, β. επιφανειακής σύνδεσης, γ. ηλεκτρικά μονωμένη

Κάποιες εφαρμογές απαιτούν ηλεκτρική μόνωση από την επιφάνεια στήριξης (ψήκτρα). Σε αυτή τη περίπτωση, η επαφή του ημιαγωγού ισχύος κολλάται σε ένα υπόστρωμα μονωτικό. Αυτό το υπόστρωμα είναι στερεωμένο πάνω σε μια μεταλλική πλάκα βάσης (βλ. Σχ. 5.5.C). Δεδομένου ότι αυτό είναι η κύρια διαδρομή θερμότητας, υποστρώματα με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, όπως κεραμικά υποστρώματα, είναι τα πλέον κατάλληλα. Η ίδια τεχνική κατασκευής χρησιμοποιείται όταν αρκετοί ημιαγωγοί ισχύος είναι τοποθετημένοι σε μια συσκευασία, η οποία αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως μονάδα ισχύος.

Οι συμβατικές μέθοδοι συσκευασίας, που περιγράφονται παραπάνω, έχουν έναν αριθμό μειονεκτημάτων. Η τεχνολογία διασύνδεσης, συρμάτινες συνδέσεις, υποβαθμίζουν την ηλεκτρική απόδοση με την αύξηση της παρασιτικής επαγωγής και αντίστασης, επηρεάζει την αξιοπιστία και εγγενώς περιορίζει τη θερμική διαχείριση της συσκευής σε μονής όψης ψύξη. Επιπλέον, τα επίπεδα συσκευασίας στη διαδρομή ροής θερμότητας της συσκευής αυξάνουν τη θερμική αντίσταση του, περιορίζοντας έτσι την ικανότητα παροχής ισχύος της συσκευασίας. Επίσης, το μέγεθος της συσκευασίας είναι τρεις ή περισσότερες φορές μεγαλύτερο από το μέγεθος της επαφής [118], τόσο που επηρεάζουν την πυκνότητα ισχύος. Τέλος, το κόστος συσκευασίας συμβάλλει περίπου στο ένα τρίτο του συνολικού κόστους της ημιαγωγικής διάταξης ισχύος.

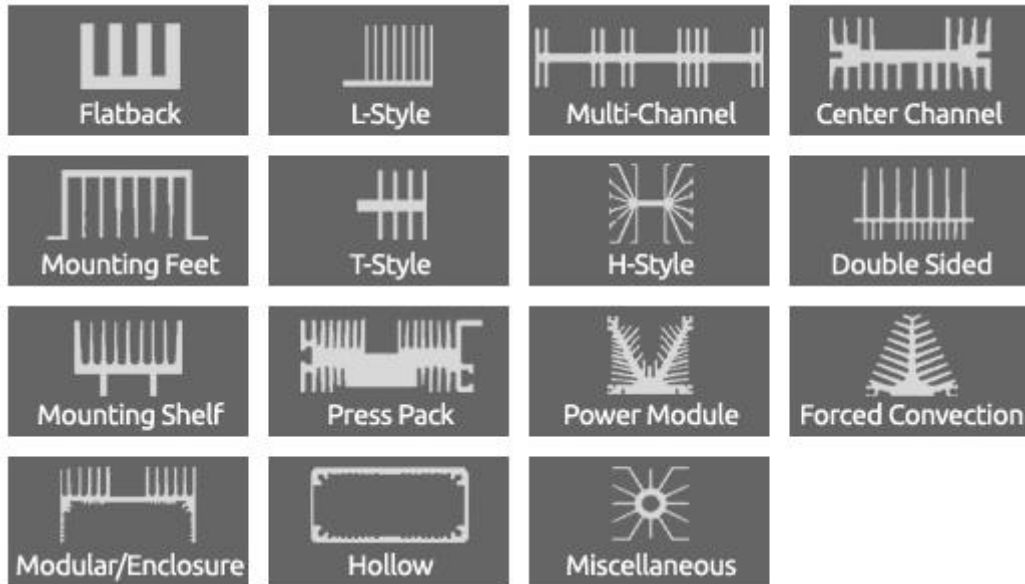
5.3.2 Κατασκευή ψηκτρών

Για να αντιμετωπίσουμε αυτά τα θέματα, μια σειρά από τεχνικές συσκευασίας με προηγμένες μεθόδους διασύνδεσης και διαχείρισης θερμότητας αναδύονται. Μερικές από αυτές εφαρμόζουν προχωρημένες τεχνολογίες διασύνδεσης, όπως flip-chip αντί για συρμάτινες συνδέσεις σε συνδυασμό με συσκευασία chip-scale (FlipFET [119], MOSFET BGA [120]). Άλλες τεχνικές παρέχουν διπλής όψης ψύξη με τη βοήθεια μιας ειδικής επαφής, ώστε να παρέχει μια συγκολλησιμη πύλη και υποδοχή στην κάτω πλευρά της διάταξης, ενώ ο ακροδέκτης της υποδοχής από τη πάνω πλευρά συνδέεται με το περίβλημα χαλκού, που εκτείνεται στις πλευρές και κάνει τη σύνδεση υποδοχής (DirectFET [119]).

Οι ημιαγωγικοί διακόπτες υψηλής ισχύος, που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, λόγω της υψηλής πυκνότητας ρεύματος, που διαρρέει στις επαφές τους, προκαλούν απώλειες ισχύος και συνεπώς παράγουν εσωτερικά υψηλής στάθμης θερμοκρασίες. Αφού οι στάθμες υψηλής θερμοκρασίας επηρεάζουν αρνητικά τη λειτουργία και τη διάρκεια ζωής του ημιαγωγικού διακόπτη, θεωρείται αναγκαίο να σχεδιασθεί το κατάλληλο σύστημα ψύξης ή αλλιώς ψήκτρα όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, για τη διάχυση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον και να παραμείνει η θερμοκρασία κάτω από τις προδιαγραφόμενες τιμές. Ο σκοπός του συστήματος ψύξης είναι να αυξήσει τη θερμοκρασιακή αγωγιμότητα μεταξύ του πλαισίου

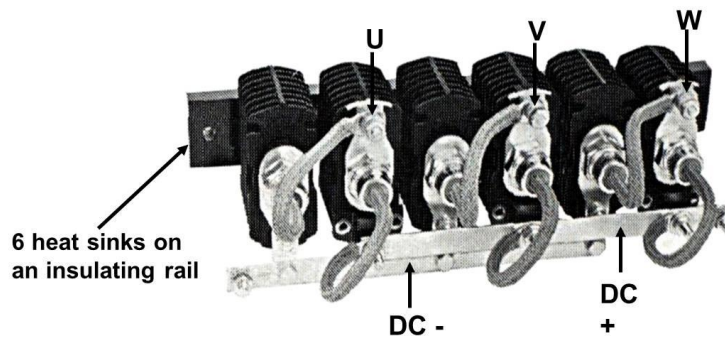
της διάταξης και της περιβάλλουσας θερμοκρασίας, ώστε η διάχυση της θερμοκρασίας να γίνει ακόμα πιο αποτελεσματική.

Στο σχ. 5.6 απεικονίζονται διάφοροι τύποι ψηκτρών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ώστε να ψύξουν και να διατηρήσουν τις ημιαγωγικές διατάξεις σε επίπεδα θερμοκρασιών του κατασκευαστή. Το σχ. 5.7 δείχνει μια ψήκτρα με φυσικό αερισμό για ημιαγωγικές



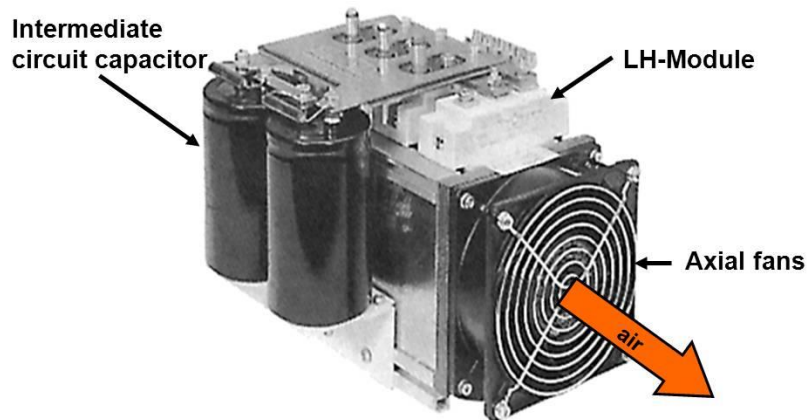
Σχήμα 5.6 – Διάφοροι τύποι ψηκτρών

συσκευές ισχύος. Εκτός από τα συστήματα ψύξης φυσικού αερισμού υπάρχουν και εκείνα του εξαναγκασμένου αερισμού ή υγρού, όπου χρησιμοποιούν ανεμιστήρες ή αντλίες υγρού για τη

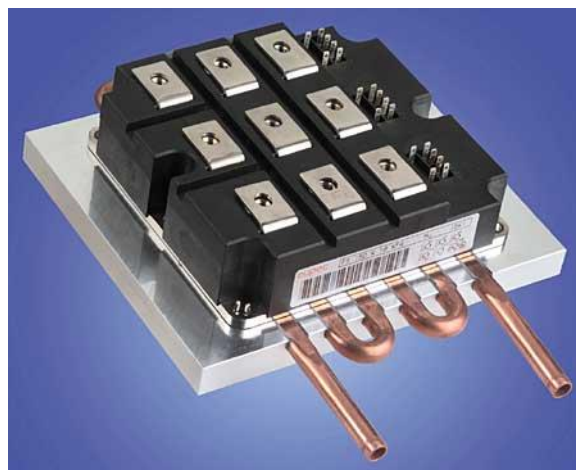


Σχήμα 5.7 – Ψήκτρα με φυσικό αερισμό

διάχυση της θερμότητας στο περιβάλλον. Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπου ο μετατροπές ηλεκτρονικών ισχύος χρειάζεται υψηλή πυκνότητα ισχύος. Το σχ. 5.8 και 5.9 απεικονίζει δυο διαφορετικές τεχνικές, όπως αυτές που περιγράφηκαν.



Σχήμα 5.8 – Ψήκτρα με εξαναγκασμένο αερισμό

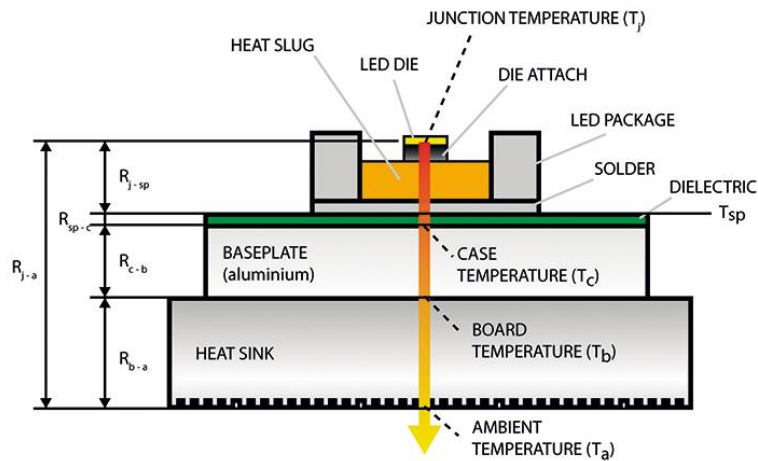


Σχήμα 5.9 – Ψήκτρα υγρού τύπου

Όταν οι ημιαγωγικές συσκευές ισχύος λειτουργούν παράγουν διακοπτικές απώλειες ισχύος και απώλειες επαφών, που μετατρέπονται σε θερμότητα. Αν η θερμοκρασία επαφής του ημιαγωγού ξεπεράσει τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, η διάταξη καταστρέφεται. Ως εκ τούτου, η υψηλή αυτή τιμή θερμοκρασίας πρέπει να ελαττωθεί. Ο σύνηθες τρόπος για να αυξήσουμε τη μεταφορά της θερμότητας από τον κρύσταλλο της ημιαγωγικής διάταξης στον περιβάλλοντα χώρο (αέρα συνήθως) είναι να συνδέσουμε τη διάταξη αυτή με μια ψήκτρα. Πολλές φορές μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένας ανεμιστήρας, ώστε να επιταχυνθεί η ροή του αέρα.

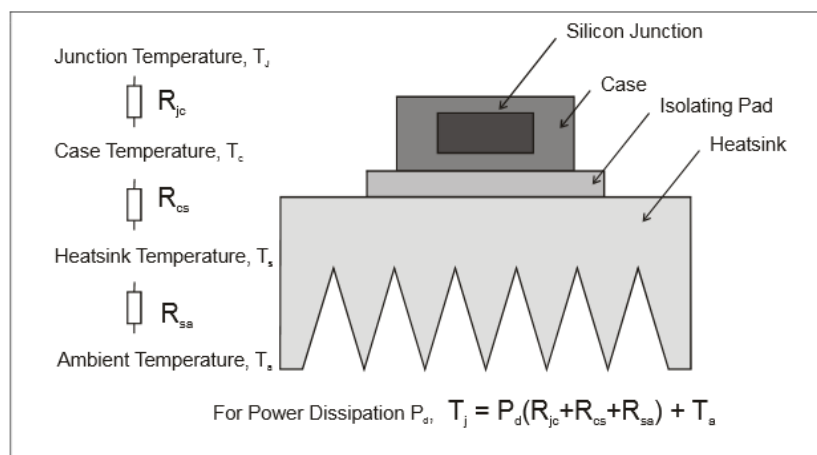
Η ψήκτρα είναι κατασκευασμένη από μέταλλο και τις περισσότερες φορές από αλουμίνιο και δομείται από πτερύγια, ώστε να επιτρέπει τη μέγιστη επαφή με τον αέρα. Η ισχύς της ροής

θερμότητας ισούται με τις απώλειες ισχύος. Η θερμότητα ταξιδεύει από περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες, όπου είναι η επαφή του κρυστάλλου, σε χαμηλότερες, που είναι ο περιβάλλοντας αέρας. Η θερμότητα ρέει από την επαφή στο περιβάλλοντα χώρο μέσω μιας θερμικής διαδρομής, που αποτελείται από τη θήκη της διάταξης, μια θερμική αλοιφή ή μονωτικό και μια ψήκτρα. Το σχ. 5.10 απεικονίζει τη κατεύθυνση της ροής θερμότητας και τις θερμικές αντιστάσεις μόνιμης κατάστασης μεταξύ διαφορετικών σημείων.



Σχήμα 5.10 – Θερμικές αντιστάσεις ψήκτρας (α)

Επιπρόσθετα το σχ. 5.11 απεικονίζει τη μόνιμη κατάσταση των θερμικών αντιστάσεων ισοδύναμου μοντέλου, όπου η θερμική αντίσταση της θερμικής αλοιφής και η θερμική αντίσταση προστίθενται σε μια θερμική αντίσταση μεταξύ θήκης και ψήκτρας (R_{cs}). Οι απώλειες ισχύος της ημιαγωγικής διάταξης είναι ίσες με την μεταφορά ισχύος θερμότητας.



Σχήμα 5.11 – Θερμικές αντιστάσεις ψήκτρας (β) – Υπολογισμός θερμοκρασίας επαφής

Προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα τη θερμική ανάλυση ενός ημιαγωγικού διακόπτη, όπου είναι εγκατεστημένος πάνω σε μια ψήκτρα. Οι ηλεκτρικές παράμετροι που σχετίζονται με τις θερμικές παρουσιάζονται στο πίνακα 3.1, όπως ήδη έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3. Για να εκτιμηθεί και να επιλεγεί η σωστή ψήκτρα για τη κατάλληλη εφαρμογή είναι απαραίτητο να έχουμε κατανοήσει πρώτα το κεφάλαιο 2. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας κάποιο μοντέλο θερμικής προσομοίωσης, όπως αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, υπολογίζεται η θερμική αντίσταση της ψήκτρας, ώστε η θερμοκρασία της επαφής του κρυστάλλου της ημιαγωγικής διάταξης να μην υπερβεί τη μέγιστη θερμοκρασία, που ορίζει ο κατασκευαστής. Αξίζει εδώ να υπενθυμίσουμε ότι τα μοντέλα θερμικής προσομοίωσης που περιγράφονται, δε αναλύουν τις θερμικές αντιστάσεις μόνο κατά τη μόνιμη κατάσταση αλλά και κατά τις μεταβατικές καταστάσεις, κάτι που είναι πιο ρεαλιστικό ακόμη. Συνεπώς, η ανάλυση μόνιμης κατάστασης δεν είναι αρκετή για τον υπολογισμό των αιχμών των θερμοκρασιών της επαφής για εφαρμογές παλμικού ρεύματος. Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός κι η επιλογή ψήκτρας δε θα είναι η καταλληλότερη, καθώς η ανάλυση αυτή οδηγεί σε υπερεκτίμηση της πραγματικής θερμοκρασίας της επαφής. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης αυτής της εργασίας παραπέμπεται στο κεφάλαιο 3.

5.3.3 Κατασκευή παθητικών στοιχείων

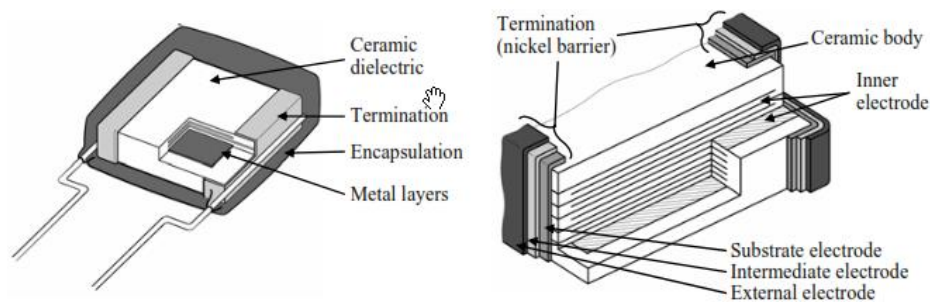
Πυκνωτές

Η ανάγκη να ληφθούν υψηλές τιμές χωρητικότητας σε μικρούς όγκους και να ελεγχθούν άλλες παράμετροι, οδήγησε στη χρήση πολλών υλικών για ηλεκτρόδια και για διηλεκτρικά. Τα διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιούνται για διηλεκτρικά, ηλεκτρόδια, συσκευασία και διαφορετικές διαδικασίες κατασκευής έχουν ως αποτέλεσμα πυκνωτές με διάφορα χαρακτηριστικά. Η κύρια διαφορά είναι στο τύπο του διηλεκτρικού, το οποίο καθορίζει κυρίως την εφαρμογή του πυκνωτή. Τα ηλεκτρονικά ισχύος κάνουν μεγάλη χρήση των πυκνωτών για έναν αριθμό λειτουργιών, όπως αποθήκευση ενέργειας, φιλτράρισμα, απόζευξη, χρονισμός, κ.ά. Για να εκτελέσει μια συγκεκριμένη λειτουργία, οι απαιτήσεις που επιβάλλονται σε ένα πυκνωτή μπορεί να ποικίλλουν, κι ως εκ τούτου οι πυκνωτές πραγματοποιούνται με διαφορετικές τεχνολογίες και χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές συσκευασίας. Υπάρχουν τρεις κύριες τεχνολογίες πυκνωτή: κεραμικοί, με μεταλλικά φιλμ και ηλεκτρολυτικοί. Δεδομένου ότι χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους διηλεκτρικών, οι τεχνολογίες συνολικής κατασκευής διαφέρουν. Αναλυτικά έχουμε,

- Κεραμικοί πυκνωτές

Τα κεραμικά διηλεκτρικά είναι κατασκευασμένα από μια ποικιλία τιτανικών (οξειδία του τιτανίου - TiO_2), τιτανικό βάριο ($BaTiO_3$) και οξειδία. Κοινά συστατικά περιλαμβάνουν διοξείδιο τιτανίου, τιτανικό βάριο και τιτανικό στρόντιου. Στο σχ. 5.12 απεικονίζεται τα τμήματα σε γενική μορφή, από τα οποία αποτελείται ένας κεραμικός πυκνωτής. Στους κεραμικούς πυκνωτές το διηλεκτρικό είναι κεραμικό υλικό, όπως μίγματα πυριτιούχου μαγνησίου, αλουμίνιας, οξειδίου του ζirkονίου, κ.ά. Σε αυτά τα υλικά γίνεται πρόσμιξη με τιτάνιο, βάριο ή ασβέστιο. Το κεραμικό υλικό διαμορφώνεται μέσα σε μήτρες και παίρνει την τελική του μορφή. Στη συνέχεια ψήνεται σε φούρνο σε θερμοκρασία 700 έως 1000°C, οπότε στερεοποιείται το υλικό. Αφού καθαριστεί, στην επιφάνεια του σχηματίζονται με επιμετάλλωση οι οπλισμοί του. Σαν μέταλλο επιμετάλλωσης χρησιμοποιείται ο άργυρος. Οι ακροδέκτες κολλιούνται στην επιμεταλλωμένη επιφάνεια και στη συνέχεια, για προστασία τοποθετείται σε προστατευτικό περίβλημα από σμάλτο ή πλαστικό υλικό. Το υλικό μίγμα για την σταθεροποίησή του ψήνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και οι οπλισμοί του πυκνωτή μπαίνουν στο κεραμικό υλικό με επιμετάλλωση. Η μορφή των κεραμικών πυκνωτών μπορεί να είναι σωληνωτοί, σφαιρικοί, σε μορφή δίσκων, κτλ.

Οι κεραμικοί πυκνωτές χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα υψηλών συχνοτήτων και οι ονομαστικές τους χωρητικότητες κυμαίνονται από 0,1pF έως 12μF περίπου. Κατασκευάζονται για να λειτουργούν σε πολύ υψηλές τάσεις λειτουργίας που φτάνουν την περιοχή των KV.



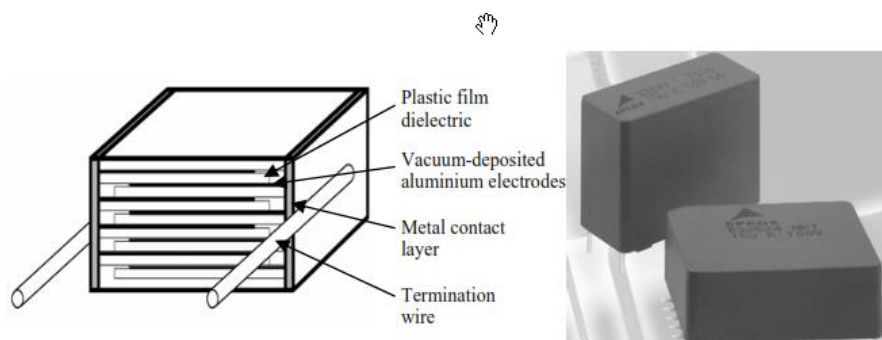
Σχήμα 5.12 – Κεραμικός πυκνωτής πολλαπλών στρώσεων

- Πυκνωτές μεταλλικού φιλμ

Οι πυκνωτές αυτοί στηρίζονται σε ένα φιλμ διηλεκτρικού, στο οποίο ένα πολύ λεπτό στρώματα μετάλλου τοποθετείται σε κενό. Το πάχος του μεταλλικού στρώματος είναι περιοχή 80-300Å. Τα μέταλλα, που χρησιμοποιούνται είναι αλουμίνιο, ψευδάργυρος, άργυρος ή συνδυασμός τέτοιων μετάλλων, όπως και μια

ποικιλία από διάφορα κράματα. Διηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται είναι από πολυεστέρα, πολυπροπυλένιο και ενώσεις άνθρακα. Τα επιμεταλλωμένα φιλμ (ταινίες) κόβονται και τυλίγονται σε πυκνωτές (βλ. σχ. 5.13). Στους πυκνωτές αυτούς τοποθετείται με χημική κατεργασία στις επιφάνειες του μεταλλικού φιλμ, λεπτό στρώμα οξειδίου του αργύρου για τον σχηματισμό των οπλισμών. Ακολουθεί η τοποθέτηση των ακροδεκτών και το σύστημα αυτό τοποθετείται σε προστατευτικό περίβλημα.

Οι πυκνωτές αυτοί χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα υψηλών συχνοτήτων των τηλεπικοινωνιών και σ' άλλες περιπτώσεις κυκλωμάτων όπου απαιτείται καλή σταθερότητα, μικρές απώλειες και μεγάλη αντίσταση μονώσεως.

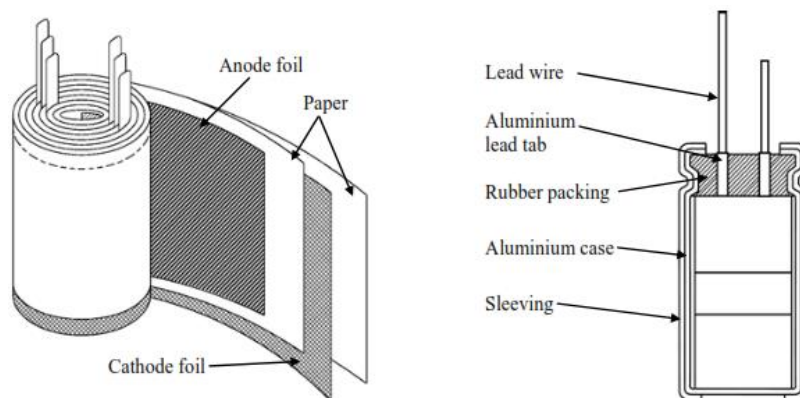


Σχήμα 5.13 – Πυκνωτής μεταλλικού φιλμ

- Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές

Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές αλουμινίου αποτελούνται από τυλιγμένες εναλλάξ μεταλλικές λωρίδες, μια από αλουμίνιο για την άνοδο και μια από χαλκό για την κάθοδο. Οι λωρίδες είναι διάσπαρτες μ' έναν πορώδη ιστό, πού εμβαπτίζεται σ' έναν ηλεκτρολύτη και περιτυλίσσονται σ' ένα κυλινδρικό πηνίο. Το αρχικά διαμορφωμένο φύλλο αλουμινίου χαράσσεται με οξύ, για να δημιουργηθούν πόροι στην επιφάνεια του φύλλου. Η κατεργασία αυτή αυξάνει μέχρι και 50 φορές παραπάνω την ωφέλιμη επιφάνεια. Οι λωρίδες αλουμινίου συγκολλώνται επάνω στα φύλλα, πού αποτελούν την ηλεκτρική επαφή, ενώ ο αριθμός των λωρίδων εξαρτάται από το μήκος του φύλλου, πού χρησιμοποιείται. Το φύλλο της καθόδου (πού είναι κατασκευασμένο από χαλκό) χαράσσεται κατά τον ίδιο τρόπο και επικαλύπτεται προσθέτοντας ένα πολύ λεπτό στρώμα οξειδίου, πού αυξάνει σημαντικά τη χωρητικότητα του. Αν τα δύο φύλλα συνδεθούν σε σειρά στη συνολική χωρητικότητα θα επικρατεί τελικά ή χωρητικότητα της ανόδου. Κατασκευάζονται επίσης πυκνωτές τανταλίου με τη μορφή φύλλου, οι όποιοι είτε έχουν χαραχθεί με οξύ, είτε όχι. Μέχρι σήμερα τη μεγαλύτερη ζήτηση έχουν οι στερεοί πυκνωτές τανταλίου. Το ταντάλιο με τη μορφή σκόνης λιώνεται σε φούρνο

και παίρνουμε ένα πορώδες σώμα πού διαμορφώνεται κυλινδρικά ή ως δίσκος. Το πορώδες σώμα στην περίπτωση αυτή αποτελεί την άνοδο του ηλεκτρολύτη. Το διηλεκτρικό στρώμα του οξειδίου του τανταλίου σχηματίζεται με ανοδική οξείδωση. Το ηλεκτρόδιο της καθόδου μπορεί να είναι είτε υγρός είτε στερεός ηλεκτρολύτης. Ο στερεός ηλεκτρολύτης παρασκευάζεται με εμβάπτιση της πορώδους ανόδου, πού σχηματίστηκε σε νιτρικό μαγγάνιο. Ακολουθεί χημική διάσπαση του νιτρικού μαγγανίου με θέρμανση της ανόδου σε φούρνο και σχηματισμός στερεού στρώματος οξειδίου του μαγγανίου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται αρκετές φορές, για να πάρουμε ικανοποιητικά παχύ στρώμα, ώστε να παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση. Βυθίζοντας τελικά το οξείδιο του μαγγανίου σε συγκολλητικό λουτρό, σχηματίζεται επαφή, πού προσκολλάται στο μεταλλικό περίβλημα του πυκνωτή. Το στρώμα οξειδίου στους πυκνωτές τανταλίου είναι πολύ σταθερό και δεν φθείρεται μετά από μεγάλες χρονικές περιόδους ακινησίας. Έτσι, η ιδιότητα του αυτή κάνει τους πυκνωτές ιδανικούς για στρατιωτικές και τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, όπου βασική απαίτηση είναι ή αξιοπιστία. Τα διάφορα τμήματα ενός ηλεκτρολυτικού πυκνωτή απεικονίζονται στο σχ. 5.14.



Σχήμα 5.14 – Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής

Μαγνητικά στοιχεία

Τα μαγνητικά στοιχεία χρησιμοποιούνται για μια ευρεία γκάμα λειτουργιών στα ηλεκτρονικά ισχύος, όπως αποθήκευση ενέργειας, φιλτράρισμα, απομόνωση πεδίου, κ.ά. Η κατασκευή των μαγνητικών στοιχείων είναι πολύ διαφορετική. Υπάρχει ένας αριθμός των υλικών που χρησιμοποιούνται για τους μαγνητικούς πυρήνες και μια ποικιλία τεχνολογιών τυλιγμάτων. Οι τέσσερις βασικοί τύποι μαγνητικών υλικών είναι πλαστικοποιημένα πολυκρυσταλλικά κράματα, πολυκρυσταλλική σκόνη μετάλλου, φερρίτης και άμορφους πυρήνες. Κάθε ένα από αυτά τα υλικά έχει εξειδικευμένες εφαρμογές της, ανάλογα με τις απαιτήσεις σχεδιασμού, όπως

συχνότητα λειτουργίας, θερμικό περιβάλλον κλπ. Η κατασκευή μαγνητικών στοιχείων και η διαδικασία συναρμολόγησης κυρίως προσδιορίζεται από τη τεχνολογία τυλιγμάτων. Οι πιο ευρέως διαδεδομένες τεχνολογίες τυλιγμάτων είναι:

- Ελικοειδή τυλίγματα (wire wound technology)

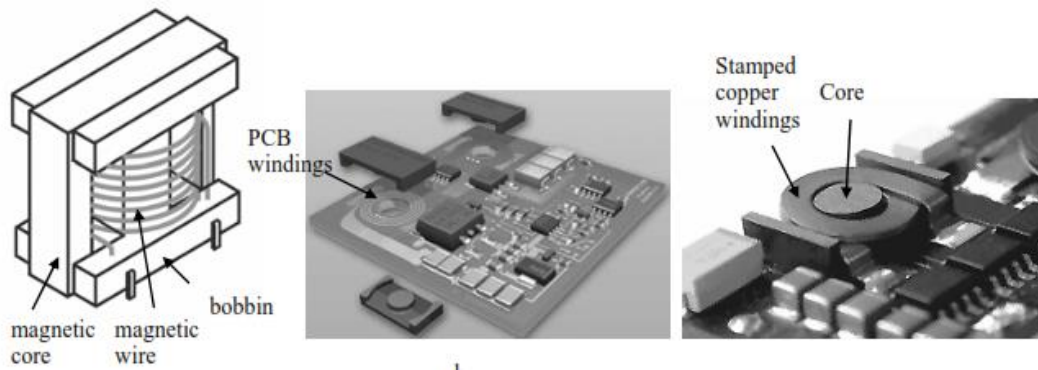
Η τεχνολογία αυτή είναι η πιο «ώριμη» τεχνολογία τυλιγμάτων. Το μονωμένο συμπαγές καλώδιο ή η καλωδιοταινία (ένας αριθμός ξεχωριστά μονωμένων συρμάτων, τα οποία είναι συνεστραμμένα μεταξύ τους, είναι τυλιγμένα γύρω από μια πλαστική σπείρα (μπομπίνα), η οποία παρέχει τη μηχανική υποστήριξη αλλά και τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις (βλ. 5.15.α).

- Σπειροειδή τυλίγματα (foil winding technology)

Αυτός ο τύπος τυλίγματος είναι κατασκευασμένος κυρίως από ένα μη-μονωμένο χάλκινο φύλλο, εξουδετερώνει ελαφρώς στενότερο από το άνοιγμα του τυλίγματος σε ένα φύλλο. Κάθε σειρά σχηματίζει ένα στρώμα τυλίγματος. Η μόνωση μεταξύ των περιελίξεων παρέχεται από εισαχθέντα στρώματα Karton ή παρόμοιου υλικού μεταξύ των σπειρών, όπως το φύλλο τυλίγεται. Το τύλιγμα του φύλλου είναι μια μη αυτοματοποιημένη διαδικασία. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι οι τερματικές ηλεκτρικές συνδέσεις είναι πάντοτε μια πρόκληση (βλ. 5.15.β).

- Επίπεδα τυλίγματα (planar technology)

Διάφοροι τύποι τεχνολογιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κατασκευασθούν επίπεδα τυλίγματα. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι το τυπωμένο κύκλωμα (PCB) [121]. Η τεχνολογία τυπωμένων κυκλωμάτων προσφέρει έναν υψηλά επαναλαμβανόμενο και κατασκευαστικό τρόπο παραγωγής επίπεδων τυλιγμάτων. Οι περιελίξεις αυτές μπορούν να υλοποιηθούν στη πλακέτα του κυκλώματος, απλοποιώντας έτσι τη διαδικασία συναρμολόγησης (βλ. σχ. 5-15β). Τα τυλίγματα αυτής της τεχνολογίας είναι κατάλληλα για σχετικά χαμηλή τάση και υψηλό τάσης ρεύμα. (βλ. 5.15.γ).



Σχήμα 5.15 – Τυλίγματα: α. συρμάτινα, β. φύλλου, γ. επίπεδα

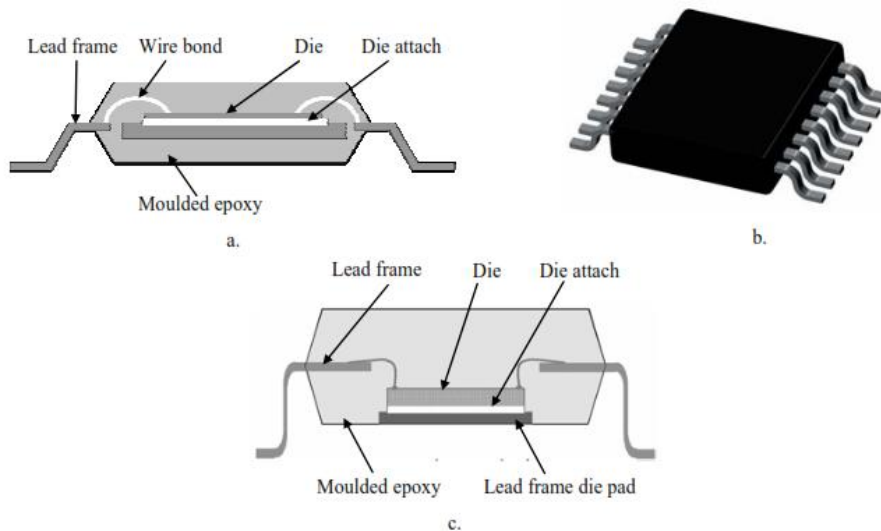
5.3.4 Κατασκευή στοιχείων ελέγχου

Στην ενότητα αυτή, τα κύρια χαρακτηριστικά της τεχνολογίας κατασκευής των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ελέγχου, αντιστάσεων, πυκνωτών και πηνίων, που χρησιμοποιούνται στο τμήμα ελέγχου του κυκλώματος, θα παρουσιαστούν.

Ολοκληρωμένα κυκλώματα ελέγχου

Το σχ. 5.16.α απεικονίζει τη πλάγια όψη μιας τυπικής συσκευασίας ενός ελεγκτή στα ηλεκτρονικά ισχύος. Η επαφή του πυριτίου είναι συγκολλημένη σε ένα κράμα χαλκού με μολύβδινο πλαίσιο για μηχανική υποστήριξη. Οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις μεταξύ της επαφής και του μολύβδινου πλαισίου υλοποιούνται μέσω συρμάτινων συνδέσεων. Το στοιχείο στη συνέχεια ενθλακώνεται σε ένα πλαστικό καλούπι για προστασία. Η θερμότητα διαχέεται μέσω της ενθλάκωσης και τις μολύβδινες ακίδες του πλαισίου. Το μολύβδινο πλαίσιο μπορεί να σχηματισθεί είτε ως μέσω οπής είτε ως επιφανειακή συνδεσμολογία (βλ. σχ. 5.16.β).

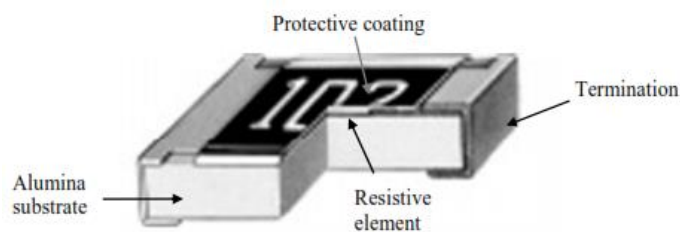
Σε κάποιες περιπτώσεις, τα κυκλώματα που οδηγούν τους ημιαγωγούς ισχύος συμπεριλαμβάνονται στην ίδια επαφή με το ολοκληρωμένο κύκλωμα ελέγχου. Αυτά τα ολοκληρωμένα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος (διαχέουν περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας) και ως εκ τούτου απαιτείται βελτιωμένη θερμική διαχείριση σε σχέση με το πρότυπο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Για το λόγο αυτό, η επαφή είναι τοποθετημένη στο πλαίσιο μολύβδου, το οποίο εκτίθεται στη πίσω πλευρά της συσκευασίας, σχηματίζοντας μια διαδρομή ροής θερμότητας χαμηλής θερμικής αντίστασης από την επαφή μέσω του μολύβδινου πλαισίου μέχρι τη πλακέτα. (βλ. σχ. 5.16.γ).



Σχήμα 5.16 - α. πλάγια όψη πρότυπης συσκευασίας, β. επιφανειακή σύνδεση ολοκληρωμένου, γ. θερμικά ενισχυμένη συσκευασία

Αντιστάσεις

Οι αντιστάσεις, που χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα ελέγχου είναι ως επί το πλείστο σε μορφή επιφανειακής σύνδεσης. Εναλλακτικά, μπορούν να ενσωματωθούν στο υπόστρωμα σε τεχνολογία παχέος ή λεπτού φιλμ πάνω σε κεραμικά υποστρώματα [122]. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι αντιστάσεων ορθογώνιας επιφανειακής τοποθέτησης: το παχύ φιλμ και το λεπτό φιλμ. Οι αντιστάσεις επιφανειακής τοποθέτησης παχέος φιλμ κατασκευάζονται από ένα φιλμ (ταινία) αντίστασης διαλογής (διοξείδιο ρουθηνίου στερεωμένο σε μια πάστα ή παρόμοιο υλικό) σε ένα επιφανειακό υπόστρωμα από υψηλής καθαρότητας αλουμίνιο, που χρησιμεύει ως μηχανική στήριξη για το ωμικό φιλμ (ταινία). Η τιμή της αντίστασης λαμβάνεται, μεταβάλλοντας τη σύνθεση της ωμικής πάστας πριν τη διαλογή και πάστα πριν τη διαλογή και φινίρισμα με λέιζερ μετά την διαλογή. Το Σχήμα 5.17 δείχνει την κατασκευή μιας αντίστασης αντίστασης παχέος φιλμ.



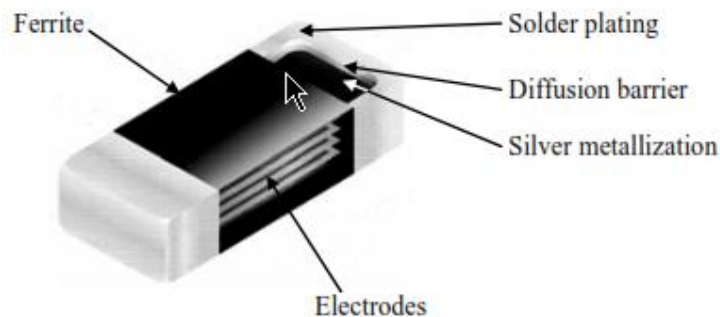
Σχήμα 5.17 – Αντίσταση επιφανειακής τοποθέτησης με παχύ φιλμ

Πυκνωτές

Οι κεραμικοί πολυστρωματικοί πυκνωτές επιφανειακής τοποθέτησης (όπως φαίνεται στο σχ. 5.12) χρησιμοποιούνται κυρίως στο τμήμα ελέγχου του κυκλώματος. Αν το κύκλωμα ελέγχου είναι σχεδιασμένο με τεχνολογία παχέος φιλμ, τότε πάστες για διηλεκτρικά, καθώς και επιμεταλλωμένα στρώματα για ηλεκτρόδια μπορούν να τυπωθούν απευθείας στο υπόστρωμα.

Πηνία

Ένα μονολιθικό τσιπ πηνίου φαίνεται στο σχ. 5.18. Ένα τέτοιο πηνίο κατασκευάζεται με στρωματοποίηση των σπειροειδών τυλιγμάτων μεταξύ των στρωμάτων του υλικού του πυρήνα (πυρήνας από φερριτή ή κεραμικό υλικό). Η τιμή της επαγωγής μπορεί να γίνει μεγαλύτερη, προσθέτοντας επιπρόσθετα στρώματα.



Σχήμα 5.18 – Πολυστρωματικό πηνίο επιφανειακής τοποθέτησης [123]

5.4 Τεχνολογία συσκευασίας κυκλώματος

Η φάση συσκευασίας κυκλώματος, όπως φαίνεται στο σχ. 5.1, εμπεριέχουν τη σύνδεση κατασκευαστικών στοιχείων στο τελικό προϊόν, χρησιμοποιώντας τμήματα και διαδικασίες απαραίτητες για να παρέχουν τα ακόλουθα:

- Ολοκλήρωση του ηλεκτρικού κυκλώματος, παρέχοντας διαδρομές για ροή ρεύματος χαμηλής αντίστασης και παρέχοντας ηλεκτρική μόνωση.
- Μηχανική ακεραιότητα, που περιλαμβάνει μηχανική υποστήριξη και περιβαλλοντική προστασία.
- Διαδρομές για απαγωγή θερμότητας, που παράγεται από τη κατανάλωση ισχύος των στοιχείων.

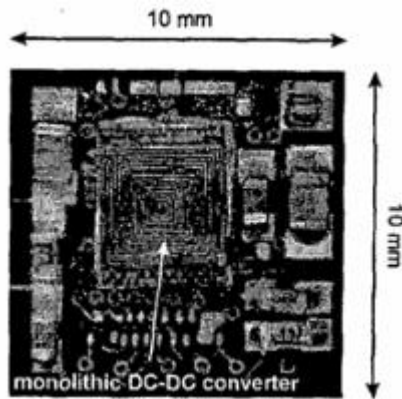
Τα χαρακτηριστικά του μετατροπέα ισχύος θέτουν στην ουσία και τις απαιτήσεις για τη τεχνολογία συσκευασίας κυκλώματος. Τα επίπεδα ρεύματος καθώς και το λειτουργικό περιβάλλον καθορίζουν τις απαιτήσεις της θερμικής διαχείρισης. Τα επίπεδα τάσης επιβάλουν τις απαιτήσεις για τα μονωτικά υλικά και τις τεχνικές. Τα χαρακτηριστικά, που σχετίζονται με το λειτουργικό περιβάλλον (όπως υγρασία, σκόνη, δονήσεις) προσδιορίζουν τις ανάγκες προστασίας.

Οι τεχνολογίες συσκευασίας κυκλωμάτων για τους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος κατηγοριοποιούνται, με βάση το δεδομένο επίπεδο ισχύος. Διακρίνονται λοιπόν 5 επίπεδα ισχύος:

- Πολύ χαμηλό επίπεδο ισχύος (< μερικά Watts)

Η μονολιθική ολοκλήρωση των διακοπών ισχύος, των κυκλωμάτων οδήγησης και προστασίας και σε μερικές περιπτώσεις ολόκληρος ο μετατροπέας είναι περιορισμένος σε πολύ χαμηλό εύρος ισχύος [124]. Σε αυτή την τεχνολογία, όλα τα σχηματικά σύμβολα των κυκλωμάτων και οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις υλοποιούνται με πυρίτιο. Η τεχνολογία συσκευασίας του κυκλώματος στην περίπτωση αυτή εμπίπτει στη συσκευασία ενός συμβατικού ολοκληρωμένου.

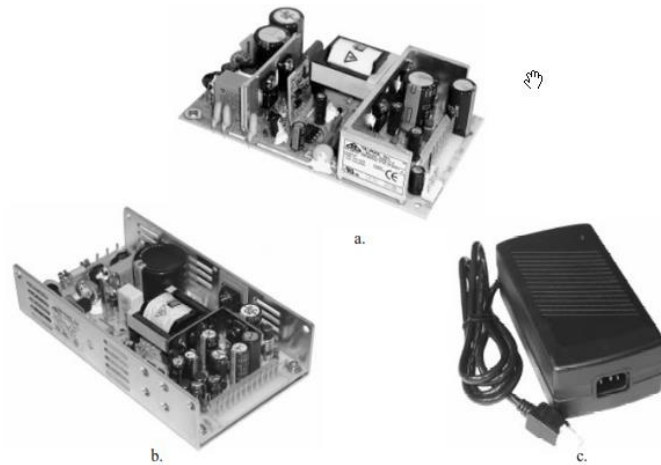
Ένας από τους περιορισμούς αυτής της τεχνολογίας είναι ότι δεν είναι οικονομικό να επεξεργαστούμε ημιαγωγικές διατάξεις διαμέσου όλων των απαραίτητων βημάτων για τη διαδικασία ελέγχου του ημιαγωγού. Επίσης, αυτοί οι διακόπτες είναι ικανοί να μπλοκάρουν τις μικρές τάσεις. Η μονολιθική ολοκλήρωση των παθητικών στοιχείων περιορίζεται επίσης λόγω των ακατάλληλων διηλεκτρικών και μαγνητικών ιδιοτήτων του πυριτίου. Ακόμη σε εξαιρετικά χαμηλής τάσης μετατροπείς, η ηλεκτρική επίδοση των παθητικών στοιχείων, ιδιαιτέρως των πηνίων που πραγματοποιούνται στην CMOS τεχνολογία, είναι χαμηλή. Για αυτό πολλές τεχνικές κατασκευής πηνίων πάνω στο τσιπ χρησιμοποιούνται είτε με τεχνολογίες λεπτό φιλμ [125] ή μικρά ηλεκτρομηχανικά συστήματα [124] (βλ. σχ. 5.19). Επιπλέον, μόνο ένα κομμάτι της αγωγίμης λειτουργίας πρέπει να υλοποιηθεί από επιμεταλλωμένες δομές. Τέλος, τα συστήματα ψύξης δε μπορούν να υλοποιηθούν με μονολιθική τεχνολογία.



Σχήμα 5.19 – DC-DC μονολιθικός μετατροπές με λεπτού φιλμ πηνίο κατασκευασμένο σε τσιπ [123]

- Χαμηλό επίπεδο ισχύος (μερικά Watts ως μερικές εκατοντάδες Watts)

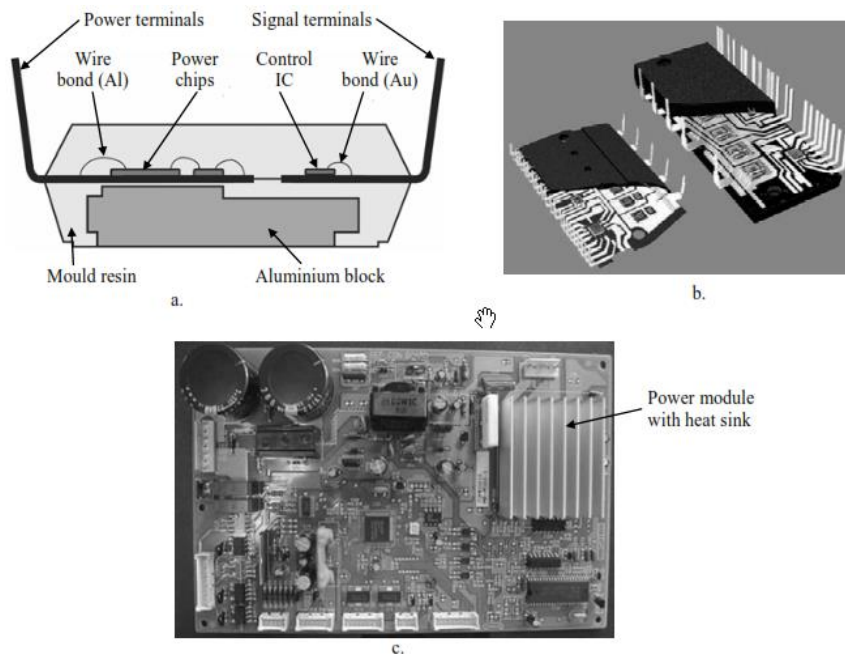
Η πλειοψηφία των μετατροπέων ισχύος, σε αυτή τη κατηγορία, χρησιμοποιούν τυπωμένο κύκλωμα για ηλεκτρικές συνδέσεις και μηχανική στήριξη. Τυπικά τροφοδοτικά τυπωμένου κυκλώματος (PCB) φαίνονται στο σχ. 5.20. Η διαδικασία κατασκευής τυπωμένου κυκλώματος είναι οικονομική. Συγκεκριμένα, τα διακριτά στοιχεία χρησιμοποιούνται κυρίως τόσο για τους ημιαγωγούς ισχύος όσο και τα παθητικά στοιχεία. Αυτά τα στοιχεία βρίσκονται κολλημένα πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα. Τα ίχνη του τυπωμένου κυκλώματος μαζί με τα στοιχεία και τις συρμάτινες συνδέσεις παρέχουν τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις. Ανάλογα τα επίπεδα κατανάλωσης ισχύος, τους ημιαγωγούς ισχύος που συνδέονται με σύστημα ψύξης, με τη βοήθεια υλικών θερμικής σύνδεσης (όπως θερμική πάστα, μονωτικές ταινίες κ.τ.λ.). Το σύστημα ψύξης μπορεί να είναι αυτόνομο μεταλλικό μπλοκ συνδεδεμένο στο προστατευτικό κάλυμμα ή ένα σύστημα που προστατεύει την υπόσταση του [126]. Τα υπόλοιπα στοιχεία ψυχραίνονται συνήθως λόγω της μεταφοράς θερμότητας (φυσική ή εξαναγκασμένη). Ανάλογα το περιβάλλον λειτουργίας, η όλη συναρμολόγηση μπορεί να εγκλειστεί σε ένα μεταλλικό κουτί (βλ. σχ. 5.20.β, γ) για μηχανική στήριξη και ηλεκτρομαγνητική θωράκιση.



Σχήμα 5.20 – Συναρμολόγηση τροφοδοτικού (τυπωμένο κύκλωμα) α. ανοικτό πλαίσιο (75W), β. μεταλλικό κουτί (200W), γ. Ενθυλακωμένο (120W)

- Μεσαίο επίπεδο ισχύος (μερικές εκατοντάδες Watts ως μερικά kW)

Για εφαρμογές ως μερικά kW, οι ημιαγωγοί ισχύος, οι πύλες οδήγησης και τα κυκλώματα προστασίας μπορούν να συμπεριληφθούν σε μια συσκευασία, όπως φαίνεται στο σχ. 5.21 [127].

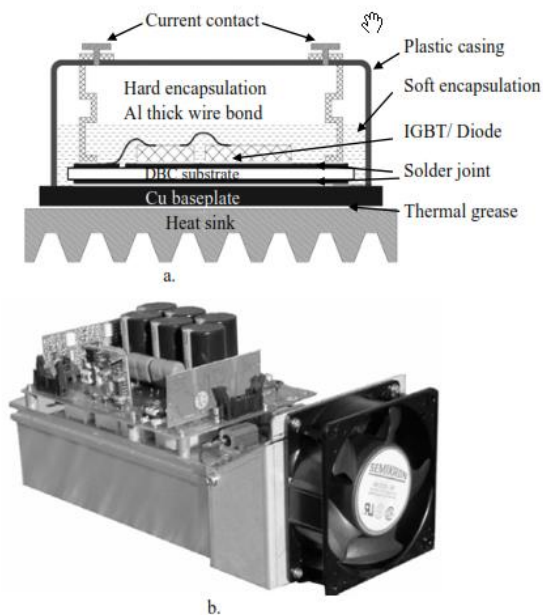


Σχήμα 5.21 – Μονάδα ισχύος πάνω σε μολύβδινο πλαίσιο: α. κατασκευή συσκευασίας, β. μονάδα ισχύος, γ. ολόκληρος μετατροπέας

Ανάλογα με την ονομαστική ισχύ της μονάδας, ένα μπλοκ αλουμινίου μπορεί να εισαχθεί για να μεταβιβάσει τη θερμότητα από την επαφή ισχύος μέσω του μολύβδινου πλαισίου και ένα λεπτό στρώμα από αγωγίμη θερμική εποξεική ρητίνη, που έχει σχηματισθεί πάνω στο αλουμινένιο μπλοκ ως τη επιφάνεια του συστήματος ψύξης της μονάδας ισχύος. Για χαμηλότερα επίπεδα ισχύος, το μολύβδινο πλαίσιο με τη στρώση της εποξεικής ρητίνης πάνω του να λυγίζει, επιτρέπει τη καλή μεταφορά της θερμότητας. Το υπόλοιπο του κυκλώματος, όπως τα παθητικά στοιχεία, η εφεδρική παροχή ισχύος, υψηλά επίπεδα ελέγχου και άλλων ηλεκτρονικών, συναρμολογούνται με τεχνολογία τυπωμένου κυκλώματος. (βλ. σχ. 5.21. γ).

- Υψηλό επίπεδο ισχύος (μερικά kW ως 100kW)

Για ακόμη υψηλότερα επίπεδα ισχύος, υψηλά θερμικά αγωγιμα υποστρώματα άμεσα συνδεδεμένου χαλκού (DBC – Direct Bonded Copper) εφαρμόζονται. Αυτά αποτελούνται από έναν κεραμικό μονωτή, αλούμινα (Al_2O_3) ή νιτρίδιο του αλουμινίου (AlN), πάνω στα οποία στερεός χαλκός συνδέεται με μια υψηλής θερμοκρασίας διαδικασία διάχυσης. Το σχ. 5.22 απεικονίζει τη πλάγια όψη μιας μονάδας ισχύος ημιαγωγών, που χρησιμοποιεί αυτή τη τεχνολογία.

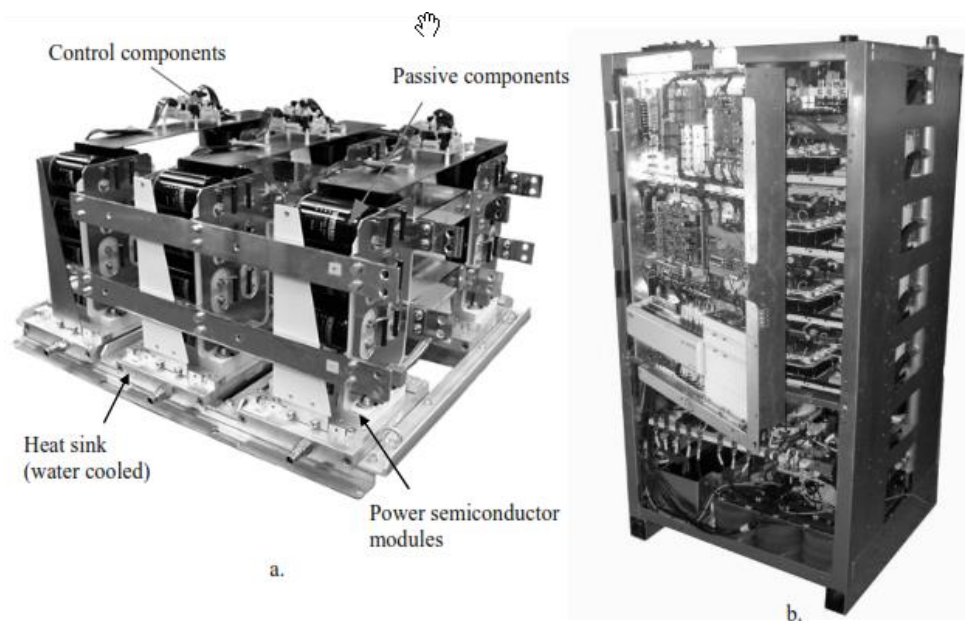


Σχήμα 5.22 – Μετατροπέας ισχύος με τεχνολογία DBC: α. πλάγια όψη, β. ολόκληρος μετατροπέας

- Πολύ υψηλό επίπεδο ισχύος (>100kW)

Για μετατροπείς ισχύος στη κατηγορία ισχύος εκατοντάδων kW, οι μονάδες ισχύος, που περιγράφηκαν στη προηγούμενη ενότητα, είναι συνδεδεμένες παράλληλα και σε σειρά για

να επιτύχουν τις επιθυμητές ισχύεις και ρεύματα. Οι μονάδες ισχύος τοποθετούνται πάνω σε μια ψήκτρα υγρού τύπου (με νερό ή λάδι). Τα παθητικά στοιχεία στην διακριτή τους μορφή είναι ηλεκτρικά διασυνδεδεμένα με τις μονάδες ισχύος ημιαγωγών με τη βοήθεια αγωγών ή καλωδίων (βλ. σχ. 5.23). Οι αγωγοί μπορούν επίσης να παρέχουν μηχανική στήριξη της δομής για τα παθητικά στοιχεία. Τα παθητικά στοιχεία συχνά τοποθετούνται στο πάνω μέρος των μονάδων ισχύος ημιαγωγών ή μέσα σε ένα θάλαμο για μηχανική υποστήριξη (βλ. σχ. 5.23β). Τα ηλεκτρονικά ελέγχου, οι πύλες οδήγησης καθώς και οι βοηθητικές παροχές ισχύος συνδεσμολογούνται σε ένα αριθμό τυπωμένων κυκλωμάτων και τοποθετούνται στην αντίστοιχη μονάδα ισχύος.



Σχήμα 5.23 – Συναρμολόγηση μετατροπέα πολύ υψηλής ισχύος: α. μετατροπέας ισχύος με αδιάλειπτη παροχή ισχύος (UPS) [128] (~μερικές εκατοντάδες kW), β. μετατροπέας για σιδηροδρομικά οχήματα (1MW)

Φυσικά αυτά τα όρια δεν είναι αυστηρά, καθώς υπάρχουν μετατροπείς που ανήκουν σε δεδομένο επίπεδο ισχύος αλλά χρησιμοποιούν τεχνολογίες, που σχετίζονται με άλλα επίπεδα ισχύος. Επιπρόσθετα, οι τεχνολογίες για τη κατασκευή μετατροπέων ισχύος, ίδιου επιπέδου ισχύος αλλά με διαφορετικά επίπεδα ρεύματος και τάσης, μπορεί να διαφέρουν. Η παραπάνω κατηγοριοποίηση σκοπό έχει να καλύψει τις πιο ευρέως γνωστές τεχνολογίες για τη συσκευασία κυκλωμάτων στις σημερινές συνδεσμολογίες ηλεκτρονικών ισχύος.

5.5 Αναλυτική κατασκευή μετατροπέα ισχύος

Για να επιλύσουμε το πρόβλημα να μην έχουμε μεγάλο αριθμό κατασκευαστικών τμημάτων στους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, θα πρέπει κάποιος να εξετάσει βαθύτερα και πέρα από τα διακριτά στοιχεία, από τα οποία αποτελείται ένας μετατροπέας. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει ο μετατροπέας ισχύος να αναλυθεί στα επιμέρους τμήματα κατασκευής του, με βάση τη λειτουργία που επιτελεί το καθένα. Αρχικά λοιπόν θα αναγνωρισθούν, οι λειτουργίες που εκτελεί ένας μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος.

5.5.1 Βασικές και θεμελιώδεις λειτουργίες

Η κύρια λειτουργικότητα ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος καθορίζεται από τις εξής λειτουργίες [129], [130]:

- Διακοπτική λειτουργία, που ελέγχει τη ροή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μέσω του μετατροπέα.
- Λειτουργία αποθήκευσης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, που παρέχει τη συνέχεια της ροής ενέργειας, όταν αυτή διακόπτεται από τη διακοπτική λειτουργία.
- Λειτουργία εναλλαγής θερμότητας, που διαχέεται στο μετατροπέα με το περιβάλλον.
- Λειτουργία ελέγχου/ πληροφορίας, που ενεργοποιεί την επιθυμητή σχέση ανάμεσα στις προαναφερθείσες λειτουργίες.

Οι παραπάνω λειτουργίες ονομάζονται ως θεμελιώδεις λειτουργίες. Από την άλλη μεριά, υπάρχουν λειτουργίες οι οποίες είναι απαραίτητες να παρέχουν την ακεραιότητα των θεμελιωδών λειτουργιών ενός μετατροπέα, όπως για παράδειγμα η διασφάλιση ομαλής λειτουργίας του μετατροπέα. Αυτές οι λειτουργίες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Λειτουργίες ηλεκτρικής ακεραιότητας, οι οποίες παρέχουν την:
 - ✓ Ηλεκτρική διασύνδεση (παροχή ηλεκτρικών διαδρομών για ισχύεις και σήματα)
 - ✓ Ηλεκτρική μόνωση (παροχής ακεραιότητας ηλεκτρικών σημάτων)
- Λειτουργίες θερμική ακεραιότητας, οι οποίες παρέχουν θερμικές διαδρομές για τη θερμότητα, που προέρχεται από το τμήμα που εκλύεται αυτή στον εναλλάκτη θερμότητας (ψήκτρα), με σκοπό τη διασφάλιση ορθής λειτουργίας αυτών των τμημάτων σε επιτρεπόμενα όρια θερμοκρασιών.
- Λειτουργίες μηχανικής ακεραιότητας, οι οποίες παρέχουν:

- ✓ Μηχανική υποστήριξη (παρέχει μηχανική προστασία, ατρωσία από υγρασία και σκόνη)
- ✓ Περιβαλλοντική προστασία (παρέχει προστασία και συναρμολόγηση τμημάτων λόγω διαχείρισης περιβαλλοντικών συνεπειών, ειδικά υγρασίας)

5.5.2 Λειτουργικά στοιχεία και στοιχεία συσκευασίας

Με βάση τον παραπάνω διαχωρισμό, τα τμήματα που συναρμολογούν ένα μετατροπέα ισχύος διακρίνονται σε κατηγορίες:

- Λειτουργικά στοιχεία (Function Elements), στοιχεία που εκτελούν μια ή παραπάνω θεμελιώδεις λειτουργίες.
- Στοιχεία συσκευασίας (Packaging Elements), στοιχεία που εκτελούν μια ή παραπάνω λειτουργίες συσκευασίας.

Κάποια παραδείγματα λειτουργικών στοιχείων είναι οι επαφές ημιαγωγών ισχύος ως λειτουργικά διακοπτικά στοιχεία, οι επαφές ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος ημιαγωγών ως λειτουργικά στοιχεία ελέγχου, επιμεταλλωμένο φιλμ (ταινία ή φύλλο) ως λειτουργικό χωρητικό στοιχείο, καλώδιο ή επίπεδα χάλκινα πηνία ή μαγνητικά πηνία ως λειτουργικά μαγνητικά στοιχεία.

Παραδείγματα στοιχείων συσκευασίας είναι μολύβδινα πλαίσια ημιαγωγών και μολύβδινες στηρίξεις των στοιχείων ως ηλεκτρική διασύνδεση των στοιχείων συσκευασίας, η ενθυλάκωση και η θαλαμοποίηση ως προστασία των στοιχείων συσκευασίας, το διηλεκτρικό ως μονωτικό στοιχείο συσκευασίας, μπομπίνες ή μολύβδινα πλαίσια ως μηχανική υποστήριξη, θερμικά πρόσθετα ως θερμικά στοιχεία συσκευασίας κ.ά.

Σε κάποιες περιπτώσεις, ο καθορισμός όλων των λειτουργιών, όπου εκτελεί ένα στοιχείο δεν είναι μια τόσο απλή διαδικασία. Για παράδειγμα οι συρμάτινες συνδέσεις παρέχουν τη λειτουργία της ηλεκτρικής διασύνδεσης, αλλά επίσης επάγουν και την εκλυόμενη θερμότητα της επαφής και συνεπώς συνεισφέρουν στη θερμική λειτουργία συσκευασίας. Στην περίπτωση των ημιαγωγών ισχύος, το ποσό θερμότητας, που επάγουν οι συρμάτινες συνδέσεις είναι αμελητέα σε σχέση με τη θερμότητα, που αφαιρείται από τη κύρια θερμική διαδρομή, από τη πίσω πλευρά της επαφής του ημιαγωγού, δια μέσου του μολύβδινου πλαισίου ή κάποιου άλλου υποστρώματος στη ψήκτρα. Παρ' όλ' αυτά, στα ολοκληρωμένα κυκλώματα επεξεργασία σημάτων (DSP) η συνεισφορά αυτή μπορεί να είναι συγκρίσιμη με άλλες θερμικές διαδρομές [131]. Ως εκ τούτου, όταν αναθέτονται λειτουργίες σε στοιχεία, θα θεωρείται ότι ένα στοιχείο

επιτελεί μια λειτουργία, αν η συνεισφορά αυτού του στοιχείου στη λειτουργία είναι ουσιαστική.

Τα στοιχεία συσκευασίας μπορούν να διακριθούν σε επίπεδα συσκευασίας ανάλογα με τη φυσική τους τοποθεσία. Η επέκταση αυτή της κατηγοριοποίησης μπορεί να βρεθεί σε βιβλιογραφία σχετικά με τη συσκευασία ηλεκτρονικών [132].

Typical functional elements

| Fundamental function | Functional elements |
|--------------------------------|---|
| Switching | power semiconductor die (MOSFET, IGBT, diodes) |
| Control/information | control semiconductor die |
| Electromagnetic energy storage | magnetic core magnetic wire and planar copper conductors metallized film foil metallized ceramic layer |
| Heat exchange | heat sink heat pipes |

Typical packaging elements

| Packaging function | | Packaging elements | |
|----------------------|--------------------|---|---|
| Electrical integrity | Interconnection | Component level | wire bonds semiconductor lead frames bobbin (pins) leads |
| | | Assembly level | copper tracks via holes copper bus bars pins |
| | Insulation | Component level | wire insulation |
| | | Assembly level | dielectric carrier (PCB dielectric, ceramic) dielectric tapes, adhesives |
| Mechanical integrity | Mechanical support | Component level | leads and lead frames bobbin |
| | | Assembly level | circuit carrier base plate bus bars |
| | Protection | Component level | polymer case (moulded plastic, epoxy coating) |
| | | Assembly level | silicone gel metal housing |
| Thermal integrity | Component level | cases lead frames | |
| | Assembly level | thermally conductive circuit carrier thermal interface materials | |

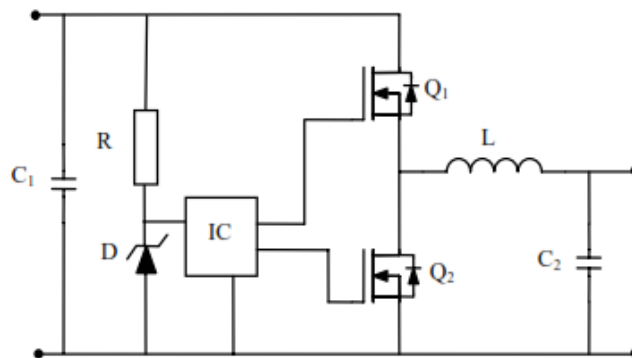
Στην εργασία αυτή θα διαχωρισθούν μόνο δυο επίπεδα συσκευασίας:

- Επίπεδο συσκευασίας στοιχείου, που εμπεριέχει στοιχεία συσκευασίας, που είναι φυσικό τμήμα ενός αυτόνομου στοιχείου.
- Επίπεδο συναρμολόγησης συσκευασίας, που εμπεριέχει όλα τα υπόλοιπα στοιχεία συσκευασίας του μετατροπέα.

Οι συρμάτινες συνδέσεις και τα μολύβδινα πλαίσια είναι παραδείγματα επιπέδου συσκευασίας στοιχείου για την ηλεκτρική διασύνδεση, ενώ η επιμετάλλωση της πλακέτας είναι επιπέδου συναρμολόγησης συσκευασίας. Στη περίπτωση της λειτουργίας μηχανικής υποστήριξης, π.χ. πολυμερείς επενδύσεις ή θήκες είναι επιπέδου συσκευασίας στοιχείου, ενώ η θαλαμοποίηση του μετατροπέα είναι επίπεδο συναρμολόγησης συσκευασίας. Ο πίνακας 5.1, 5.2 απεικονίζουν τα λειτουργικά στοιχεία και τα στοιχεία συσκευασίας αντίστοιχα σε επίπεδο στοιχείου καθώς και σε επίπεδο συναρμολόγησης συσκευασίας.

5.5.3 Περίπτωση μελέτης για τα λειτουργικά στοιχεία και στοιχεία συσκευασίας ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος

Το σχ. 5.23 απεικονίζει το ηλεκτρικό κύκλωμα ενός μετατροπέα ισχύος, που αποτελείται από τμήματα, που εκτελούν τη διακοπτική λειτουργία, λειτουργία ελέγχου, λειτουργία αποθήκευσης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και τη λειτουργία της μεταφοράς θερμότητας.

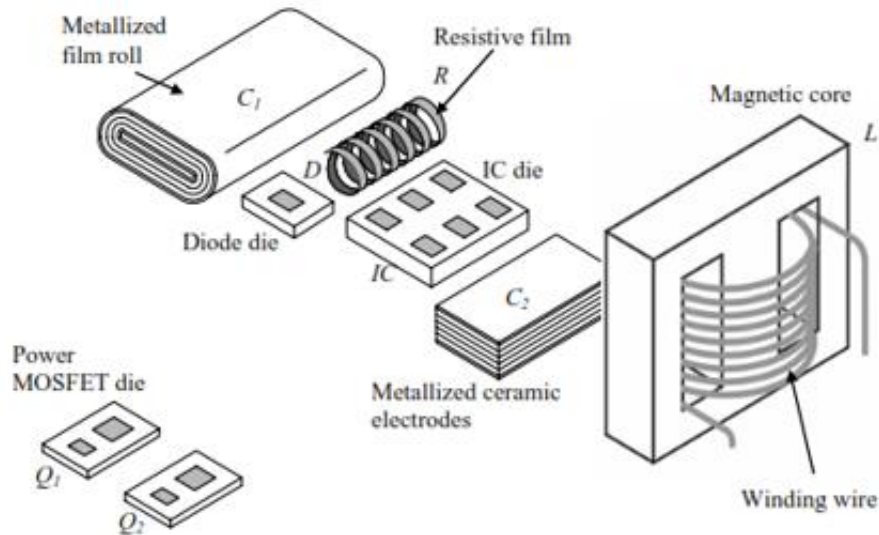


Σχήμα 5.23 – Διάγραμμα κυκλώματος ενός μετατροπέα ισχύος

Το σχ. 5.24 απεικονίζει τα λειτουργικά στοιχεία του μετατροπέα με τα αντίστοιχα σχηματικά σύμβολα του κυκλώματος. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι κάθε σχηματικό σύμβολο του κυκλώματος απεικονίζεται με ένα στοιχείο λειτουργίας (FE) (εκτός του πηνίου, που αποτελείται από το τύλιγμα και τον πυρήνα). Με άλλα λόγια δεν υπάρχουν λειτουργικά στοιχεία, τα οποία υλοποιούν παραπάνω από ένα σχηματικό σύμβολο.

Το σχ. 5.25 απεικονίζει τα πλήρως συσκευασμένα διακριτά στοιχεία, που αποτελούνται από λειτουργικά στοιχεία μαζί με το επίπεδο συσκευασίας του στοιχείου. Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι αυτά τα στοιχεία, ασχέτως της λειτουργίας που επιτελούν, έχουν σίγουρα κοινά στοιχεία συσκευασίας. Πολλά από τα στοιχεία κάνουν χρήση χάλκινων καλωδίων για ηλεκτρικές

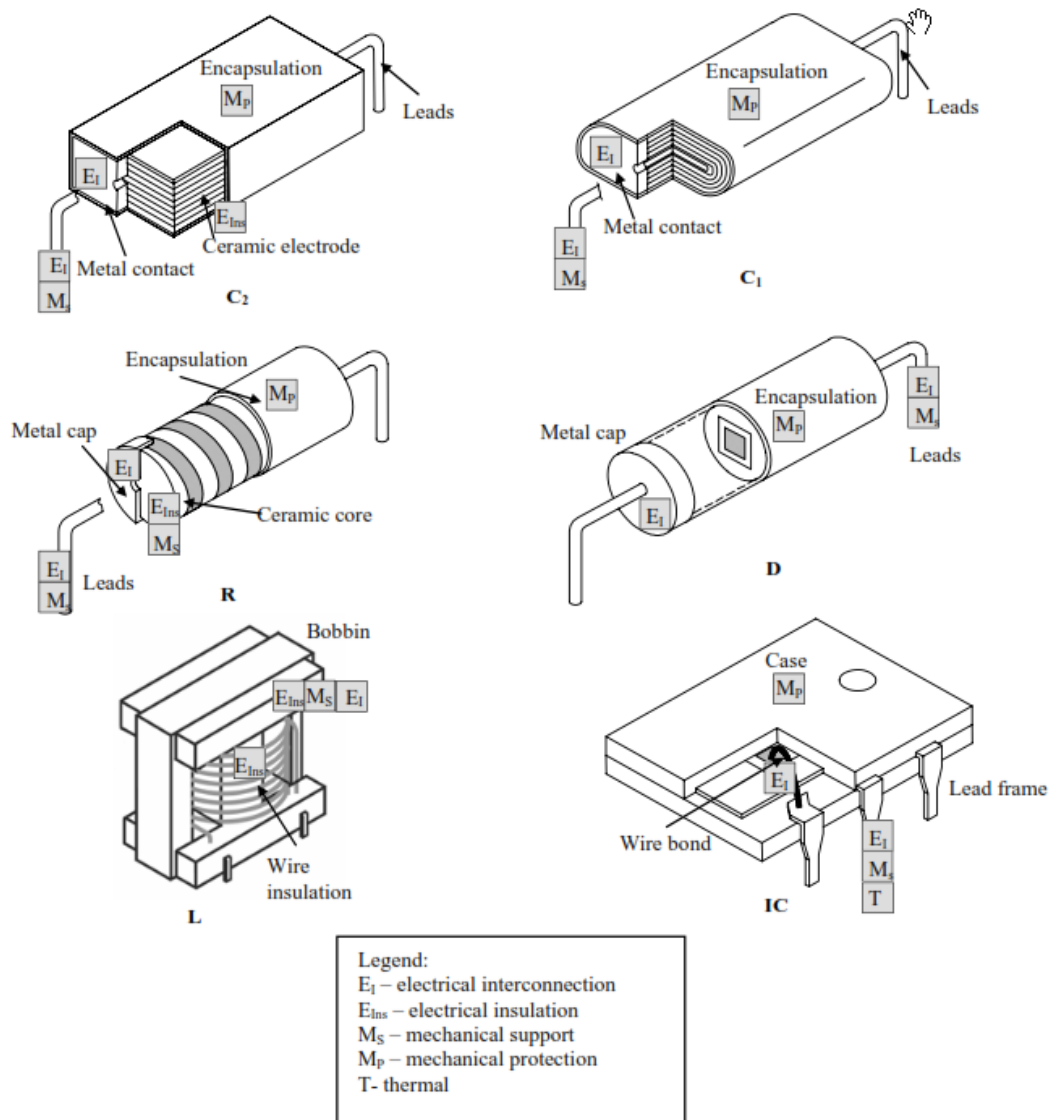
διασυνδέσεις, μηχανική υποστήριξη και απαγωγή θερμότητας. Κάποιου είδους πολυμερούς επένδυσης χρησιμοποιείται σε όλα τα στοιχεία, εκτός από το πηνία, για προστασία και απαγωγή θερμότητας. Επιπλέον, η ηλεκτρική διασύνδεση μεταξύ των



Σχήμα 5.24 – Λειτουργικά στοιχεία εντός του μετατροπέα ισχύος

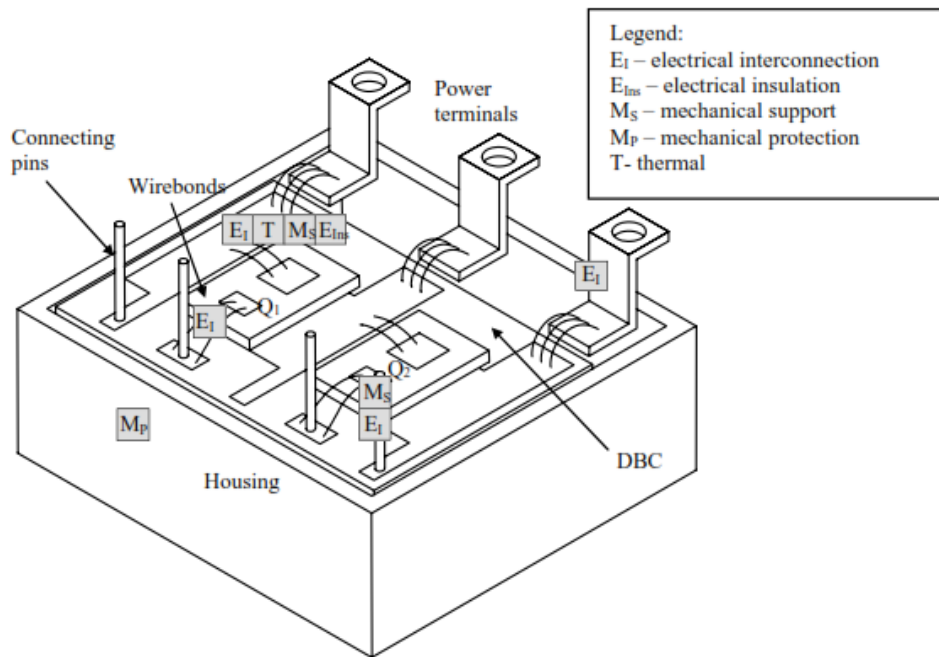
λειτουργικών στοιχείων και του μολύβδου γίνεται με μια μεταλλική διεπιφάνεια. Η μηχανική υποστήριξη και λειτουργία μόνωσης στο πηνίο υλοποιούνται με ένα πλαστικό καρούλι υποστήριξης τυλιγμάτων (μπομπίνα). Η ηλεκτρική διασύνδεση μεταξύ του σύρματος του πηνίου ως λειτουργικό στοιχείο και το υπόλοιπο του κυκλώματος υλοποιείται από τις μεταλλικές ακίδες της μπομπίνας. Για λόγους μόνωσης, το συρμάτινο τύλιγμα είναι επενδυμένο με ένα πολυμερές. Στη θέση του ολοκληρωμένου ελέγχου. Η λειτουργία διασύνδεσης γίνεται με μεταλλικές συρμάτινες συνδέσεις, που δίνουν μια επιπλέον μηχανική υποστήριξη και εξυπηρετούν ως διαδρομή απαγωγής θερμότητας.

Τα στοιχεία διαχωρίζονται σε δυο κατηγορίες με βάση το ποσό θερμότητας, που εκλύουν. Έτσι η υψηλής πυκνότητα απώλεια ισχύος της επαφής MOSFET μαζί με τη ψήκτρα και το κεραμικό υπόστρωμα υψηλής θερμικής αγωγιμότητας αναπαριστούν μέρος της συνδεσμολογίας (βλ. Σχ. 5.26). Τα υπόλοιπα λειτουργικά στοιχεία συνδεσμολογούνται με χαμηλή θερμικής αγωγιμότητας εποξεική ρητίνη πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα (PCB) για διασύνδεση, μόνωση και μηχανική υποστήριξη.



Σχήμα 5.25 – Στοιχεία συσκευασίας των διακριτών τμημάτων ενός μετατροπέα ισχύος

Αξίζει να παρατηρηθεί ότι οι ημιαγωγοί ισχύος χρησιμοποιούνται στην απλή τους μορφή, όπου σημαντικά μειώνουν τον αριθμό των στοιχείων συσκευασίας σε σύγκριση με τα πλήρως διακριτά στοιχεία συσκευασίας. Όλες οι λειτουργίες συσκευασίας υλοποιούνται στο επίπεδο συναρμολόγησης από τα στοιχεία συσκευασίας (π.χ. κεραμικό υπόστρωμα), που είναι πολυλειτουργικά (π.χ. μονωτικά, μηχανική υποστήριξη, διασύνδεση κ.ά.) και μοιράζονται ένα αριθμό λειτουργικών στοιχείων. Από την άλλη πλευρά, καθένα από τα πλήρως συσκευασίμα διακριτά τμήματα, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο καθώς και τα τμήματα αποθήκευσης ενέργειας έχουν το δικό τους στοιχείο συσκευασίας για κάθε λειτουργία συσκευασίας. Για παράδειγμα, η λειτουργία της ηλεκτρικής διασύνδεσης του ολοκληρωμένου κυκλώματος



Σχήμα 5.26 – Στοιχεία συσκευασίας της μονάδας ισχύος

ελέγχου εκτελείται από μια ολόκληρη συστοιχία στοιχείων συσκευασίας, όπως οι συρμάτινες συνδέσεις του ολοκληρωμένου, μολύβδινο πλαίσιο, ίχνη χαλκού στο τυπωμένο κύκλωμα, συρμάτινες συνδέσεις του MOSFET ισχύος.

Ο συνολικός αριθμός των λειτουργικών στοιχείων στο μετατροπέα είναι 9: επιμεταλλωμένα κεραμικά ηλεκτρόδια, επιμεταλλωμένο ρολό φιλμ, συρμάτινο τύλιγμα, μαγνητικός πυρήνας, επαφή διόδου, επαφή ολοκληρωμένου, ωμικό φιλμ και δυο επαφές MOSFET. Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων συσκευασίας είναι 24.

Σε επίπεδο στοιχείου είναι:

- ✓ Ενθυλάκωση πυκνωτή C_2 .
- ✓ Μολύβδινες και μεταλλικές επαφές
- ✓ Επιμετάλλωση πυκνωτή C_1 , ενθυλάκωση
- ✓ Μόνωση συρμάτινου τυλίγματος
- ✓ Μπομπίνα
- ✓ Κεραμικός πυρήνας αντίστασης, ενθυλάκωση, μεταλλικό καπάκι
- ✓ Ενθυλάκωση διόδου, μεταλλικό καπάκι
- ✓ Θήκη ολοκληρωμένου κυκλώματος, μολύβδινο πλαίσιο και συρμάτινες συνδέσεις

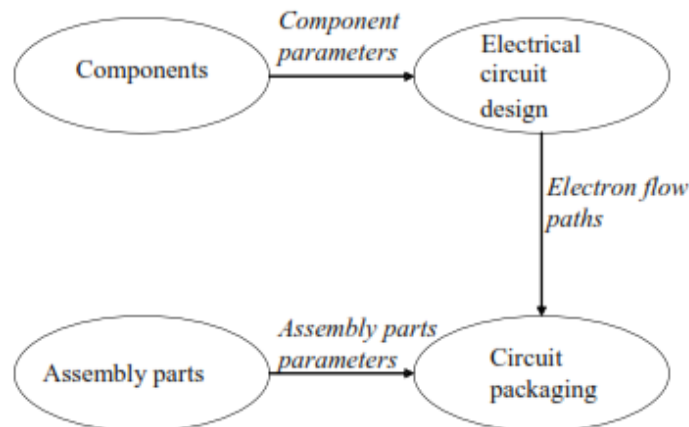
Σε επίπεδο συναρμολόγησης:

- ✓ Ακίδες
- ✓ Συρμάτινες συνδέσεις

- ✓ Τερματικά ισχύος
- ✓ Θαλαμοποίηση μονάδας ισχύος
- ✓ Πλακέτα

5.5.4 Προσέγγιση στοιχείων με βάση σχεδίασης ολοκληρωμένων

Όπως φαίνεται από το σχ. 5.27, η παραδοσιακή προσέγγιση σχεδίασης του κυκλώματος δε ασχολείται με θερμικά και ηλεκτρομαγνητικά θέματα στη φάση βελτιστοποίησης λειτουργίας. Επιπλέον, η χωρική σχεδίαση, που είναι σημαντική για την ελαχιστοποίηση του όγκου και για την επίτευξη υψηλών πυκνοτήτων ισχύος, δεν αντιμετωπίζεται σε αυτή τη φάση. Επιπλέον, ο μεγάλος αριθμός τμημάτων αναγνωρίζεται ως μειονέκτημα, όσον αφορά τα θέματα κατασκευής, συναρμολόγησης αλλά και ηλεκτρικής, θερμικής, ηλεκτρομαγνητικής καθώς χωρικής απόδοσης.



Σχήμα 5.27 – Παραδοσιακή σχεδίαση μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος

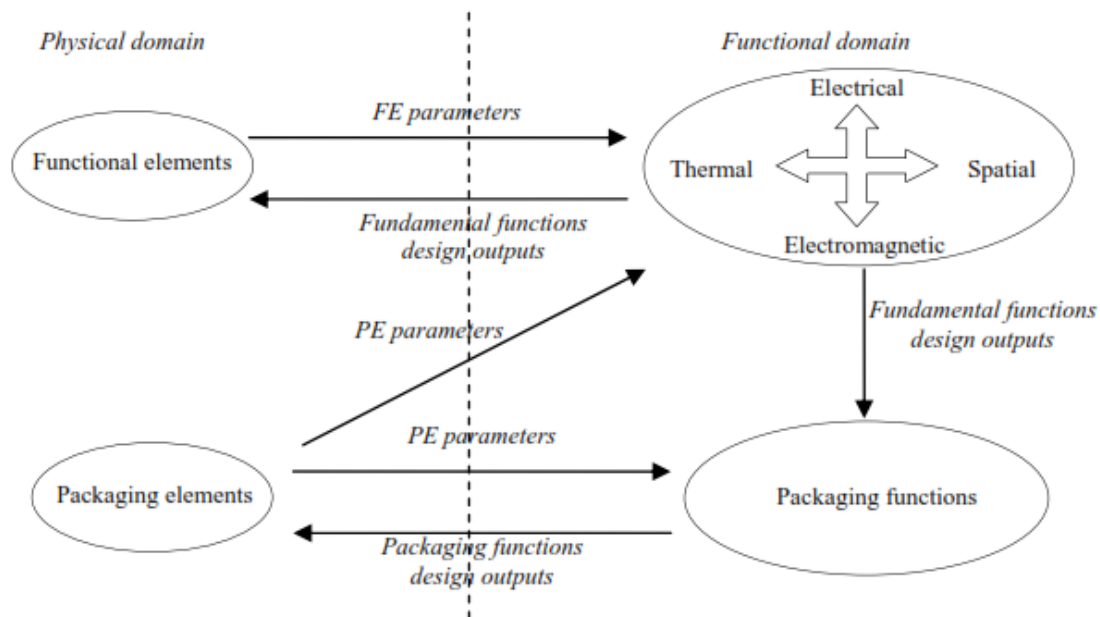
Μια τροποποιημένη προσέγγιση της σχεδίασης βασίζεται στα λειτουργικά στοιχεία και στοιχεία συσκευασίας, αντί για τα διακριτά στοιχεία, ηλεκτρομαγνητική, θερμική και χωρική σχεδίαση της βελτιστοποίησης της λειτουργίας, όπως φαίνεται στο σχ. 5.28. Δυο χώροι μπορούν να διαχωρισθούν από το σχήμα: λειτουργικός χώρος (θεμελιώδεις λειτουργίες ή λειτουργίες συσκευασίας) και ο φυσικός χώρος (λειτουργικά στοιχεία και στοιχεία συσκευασίας).

Τα λειτουργικά στοιχεία και οι θεμελιώδεις λειτουργίες συνδέονται με ηλεκτρικές, θερμικές, ηλεκτρομαγνητικές και χωρικές παραμέτρους των λειτουργικών στοιχείων σε πρώτο πλάνο και οι έξοδοι σχεδίασης των θεμελιωδών λειτουργιών (ηλεκτρικό κύκλωμα, θερμικές διαδρομές, κατανομή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, χωρικός σχεδιασμός) σε δεύτερο πλάνο. Τα στοιχεία συσκευασίας και οι λειτουργίες συσκευασίας συνδέονται με παραμέτρους των στοιχείων

συσκευασίας (ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές παράμετροι) και οι εξόδοι σχεδιάσεις των λειτουργιών συσκευασίας, οι οποίες προέρχονται από τις εξόδους σχεδίασης θεμελιωδών λειτουργιών και τα χαρακτηριστικά εισόδου του μετατροπέα (μηχανικές, περιβαλλοντικές, κ.ά.).

Ολοκληρωτική σχεδίαση θεμελιωδών λειτουργιών

Οι ηλεκτρικές, θερμικές, ηλεκτρομαγνητικές και οι χωρικές παράμετροι των λειτουργικών στοιχείων είναι εισοδοί στη φάση βελτιστοποίησης της θεμελιώδους λειτουργίας. Το σχήμα 5.28 απεικονίζει τη φάση ως εσωτερική διασύνδεση ηλεκτρικής, θερμικής, ηλεκτρομαγνητικής και χωρικής σχεδίασης. Στη δημοσίευση [133] εμβαθύνει σε εσωτερικές εξαρτήσεις μεταξύ ηλεκτρικής, θερμικής και χωρικής σχεδίασης και δείχνει ότι για να επιτευχθούν υψηλής πυκνότητας ισχύεις σε υψηλές θερμοκρασίας λειτουργίας, ο μετατροπέας πρέπει να σχεδιασθεί με ολοκληρωτικό τρόπο. Η επιλογή σχεδίασης ηλεκτρικού κυκλώματος, όπως τοπολογία, διακοπτική μέθοδο κι ο αριθμός στοιχείων καθορίζουν τις απώλειες του μετατροπέα. Από την άλλη μεριά, οι απώλειες του μετατροπέα και η σχεδίαση λειτουργίας απαγωγής θερμότητας επηρεάζουν τη χωρική σχεδίαση του μετατροπέα. Η αποθήκευση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας απαιτεί όγκο και συνεπώς επηρεάζει τη χωρική σχεδίαση.



Σχήμα 5.28 – Προσέγγιση στοιχείου με βάση την ολοκληρωτική σχεδίαση

Το θερμικό κύκλωμα μπορεί να σχεδιασθεί και να βελτιστοποιηθεί. Ισχυρά λογισμικά σχεδίασης υποβοηθούμενα από υπολογιστή (CAD – Computer Aided Design) εφαρμόζουν διάφορες μεθόδους για θερμική ανάλυση, όπως επίλυση με σειρές Fourier, μέθοδο θερμικού δικτύου, πεπερασμένες διαφορές και πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώσεις (βλ. Κεφάλαιο

3) [134] μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση θερμικών κυκλωμάτων και βελτιστοποίηση. Επίσης, ηλεκτρική και θερμική βελτιστοποίηση του κυκλώματος μπορεί να υλοποιηθεί ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας μέθοδο ηλεκτροθερμικού δικτύου [135]. Η μέθοδος αυτή συνδυάζει ηλεκτρικό και θερμικό δίκτυο κυκλώματος, εφαρμόζοντας το δίκτυο του θερμικού δικτύου σε υπάρχοντες προσομοιωτές ηλεκτρικών κυκλωμάτων, επιτρέποντας τη διασύνδεση ηλεκτρικής και θερμικής σχεδίασης του κυκλώματος.

Στη δημοσίευση [136] απεικονίζεται η ηλεκτρομαγνητική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής ροής, που μπορεί να εκτελεστεί χρησιμοποιώντας τη ροή ενέργειας ή θεωρία δεικτών Poynting. Σε αυτή τη δημοσίευση, ένας αλγόριθμος αναφέρεται για να μοντελοποιήσει δομές εμπεδήσεων των ηλεκτρικών διασυνδέσεων στους μετατροπείς. Με σκοπό να αναλύσει την απόδοση της αγωγίμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής του μετατροπέα είναι βασικό να μοντελοποιηθούν τα παρασιτικά στοιχεία του κυκλώματος [137]. Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ή μέθοδοι ισοδυνάμου κυκλώματος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται για να εξάγουν τα παρασιτικά στοιχεία του κυκλώματος και λογισμικά εργαλεία θεωρίας κυκλωμάτων (όπως το Saber) χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν την απόδοση της αγωγίμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής.

Συμπεριλαμβάνοντας τη χωρική σχεδίαση στη φάση βελτιστοποίησης λειτουργίας, μικρότεροι όγκοι στοιχείων συσκευασίας, λειτουργικών στοιχείων και του μετατροπέα στο σύνολο τους μπορούν να επιτευχθούν με την ίδια απόδοση [138]. Οι μέθοδοι ολοκληρωτικής σχεδίασης γενικά υλοποιούνται με επαναληπτικές παρεμβολές λογισμικών ανάμεσα σε ξεχωριστές λειτουργίες σχεδίασης. Οι αρχικές προσπάθειες, που συμπεριλαμβάνουν ηλεκτρική, θερμική και χωρική σχεδίαση των μετατροπέων ισχύος αναφέρονται στις εξής δημοσιεύσεις [139], [133].

Σχέσεις μεταξύ λειτουργικού και φυσικού χώρου

Οι έξοδοι του λειτουργικού χώρου υλοποιούνται φυσικά με τη βοήθεια των στοιχείων συσκευασίας και των λειτουργικών στοιχείων. Η εφαρμογή των στοιχείων αυτών κάνει χρήση ενός αριθμού κανόνων, όπως τεχνολογία στοιχείων, τεχνολογία υλικών, τεχνολογία κατασκευής κ.ά. Ενώ στη παραδοσιακή προσέγγιση σχεδίασης, η φάση βελτιστοποίησης λειτουργίας και βάση φυσικής κατασκευής ήταν ξεχωριστές, στη νέα προσέγγιση ο λειτουργικός και φυσικός χώρος συνεχώς αλληλοεπιδρούν ο ένας με τον άλλο μέσω της σχεδίασης του μετατροπέα.

Θερμική λειτουργία και φυσικός χώρος

Αντίθετα με την ηλεκτρική λειτουργία, όπου ηλεκτρικές διασυνδέσεις στοιχείων συσκευασίας γενικά δε συμπεριλαμβάνονται στη φάση βελτιστοποίησης της ηλεκτρικής λειτουργίας, η θερμική διασύνδεση των στοιχείων συσκευασίας πρέπει να αντιμετωπισθεί στη

βελτιστοποίηση θερμικής λειτουργίας. Η θερμική διαχείριση είναι σε μεγάλο βαθμό εξαρτημένο από τις ιδιότητες του υλικού και τις διεπιφάνειες των στοιχείων συσκευασίας κ.ά. [140]. Επιπλέον, λόγω των διαφορών τάξης πλάτους στη μόνωση και στην αγωγιμότητα στο ηλεκτρικό και θερμικό κόσμο, η ροή θερμότητας είναι μιας διάστασης λιγότερη από ότι η ροή ηλεκτρικού ρεύματος [141] και συνεπώς υπάρχει πάνω από μια συνήθως διαδρομή ροής θερμότητας.

Ηλεκτρομαγνητική λειτουργία και φυσικός χώρος

Για μια βέλτιστη σχεδίαση, όσον αφορά τα παρασιτικά στοιχεία του κυκλώματος και τα ηλεκτρομαγνητικά θέματα, η ηλεκτρική διασύνδεση των στοιχείων συσκευασίας, που αποτελεί ένα σημαντικό θέμα στους μετατροπείς ισχύος, ειδικά όταν η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας αυξάνεται, πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στη λειτουργία βελτιστοποίησης. Είναι ισχυρά εξαρτώμενα από τον χωρικό σχεδιασμό του μετατροπέα. Επιπλέον, η ηλεκτρομαγνητική μοντελοποίηση και οι προσομοιώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιστοποιήσουν την αποθήκευση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας των λειτουργικών στοιχείων, μειώνοντας τον όγκο τους, ενσωματώνοντας κι άλλες λειτουργίες στον ίδιο χώρο, και επιπλέον μειώνει το χώρο των ηλεκτρικών διασυνδέσεων των στοιχείων συσκευασίας. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό, όταν ο σχετικός χώρος που καταλαμβάνουν αυξάνει με τη συχνότητα [117]. Τα ηλεκτρομαγνητικά μοντέλα των λειτουργικών στοιχείων σχετίζονται με τη γεωμετρική σχεδίαση, η οποία φέρνει μαζί το φυσικό χώρο και τη βελτιστοποίηση λειτουργίας. Με βάση όλα τα παραπάνω, ο φυσικός και λειτουργικός χώρος στη σχεδίαση του μετατροπέα δε θα πρέπει να είναι μελετώνται χωριστά αλλά να αντιμετωπίζονται μαζί, μιας κι είναι αλληλεξαρτώμενοι.

5.6 Συσκευασία και Ολοκλήρωση

Η συσκευασία κι η ολοκλήρωση αναγνωρίζονται ως δυο σημαντικές πλευρές της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος. Κι οι δυο παρουσιάζουν έλλειψη ακρίβειας στη χρησιμοποιούμενη ορολογία στη βιβλιογραφία. Στις παρακάτω ενότητες αναλύεται ο διαχωρισμός κι ο ορισμός με βάση τη προσέγγιση σχεδίασης και την προτεινόμενη ανάλυση κατασκευής.

5.6.1 Συσκευασία ηλεκτρονικών ισχύος

Ο πιο κοινά αποδεκτός ορισμός της συσκευασίας ηλεκτρονικών [142] είναι:

«Συσκευασία ηλεκτρονικών είναι ο κανόνας μηχανικής, ο οποίος συνδυάζει μηχανική και τεχνολογίες κατασκευής, που απαιτούνται για να μετατραπεί ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε μια κατασκευαστική συνδεσμολογία».

Ο ορισμός αυτός αναφέρεται στη παραδοσιακή προσέγγιση σχεδίασης, που αναφέρθηκε σε προηγούμενες ενότητες. Σε αυτή τη προσέγγιση, η συσκευασία υλοποιείται σε δυο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η συσκευασία διακριτών στοιχείων. Δε διακρίνεται ως ξεχωριστή φάση στο σχήμα 5.27, αφού υλοποιείται από κατασκευαστές στοιχείων ή γενικά δεν είναι προσβάσιμα από ένα μηχανικό ηλεκτρονικών ισχύος. Το δεύτερο στάδιο ορίζεται ως η συσκευασία κυκλώματος και περιλαμβάνει συναρμολόγηση τμημάτων, διασύνδεση και τεχνολογίες σχεδίου για να μετατραπεί μια ομάδα διακριτών στοιχείων σε μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος, σύμφωνα με την έξοδο της φάσης βελτιστοποίησης λειτουργίας, η οποία όπως ήδη έχει αναφερθεί είναι ένα σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος.

Ακολουθώντας την νέα προσέγγιση, που περιλαμβάνει θερμική ή ηλεκτρομαγνητική σχεδίαση στη φάση βελτιστοποίησης της λειτουργίας, ο παραπάνω ορισμός μπορεί να τροποποιηθεί, ώστε να αρμόζει καλύτερα με τη φύση των ηλεκτρονικών ισχύος [143]:

«Η συσκευασία ηλεκτρονικών ισχύος είναι ο συνδυασμός μηχανικής και τεχνολογιών κατασκευής, που απαιτούνται για να μετατραπεί ένα ηλεκτρικό και θερμικό κύκλωμα ως μια ηλεκτρομαγνητική σχεδίαση σε μια κατασκευαστική συνδεσμολογία».

Σε αυτή τη προσέγγιση, η συσκευασία υλοποιείται στο επίπεδο συναρμολόγησης και περιλαμβάνει στοιχεία συσκευασίας για να μετατρέψει το σύνολο των λειτουργικών στοιχείων σε μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος σύμφωνα με την έξοδο της βελτιστοποίησης της θεμελιώδους λειτουργίας (σχηματικό ηλεκτρικού κυκλώματος, σχηματικό θερμικού κυκλώματος, ροή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας). Στο σχήμα 5.28, η συσκευασία ασχολείται με τα στοιχεία συσκευασίας στο φυσικό χώρο, λειτουργίες συσκευασίας στο λειτουργικό χώρο με τους ακόλουθους τρόπους:

- ✓ Επιλογή τεχνολογιών για την υλοποίηση στοιχείων συσκευασίας, οι οποίες θα επιτελούν λειτουργίες συσκευασίας με βάση τις εξόδους σχεδίασης θεμελιωδών λειτουργιών.
- ✓ Ανάλυση συμπεριφοράς των στοιχείων συσκευασίας, που επηρεάζουν τις θεμελιώδεις λειτουργίες και αντίστοιχη σχεδίαση τους
- ✓ Ανάλυση απόδοσης λειτουργιών συσκευασίας και αντίστοιχη σχεδίαση στοιχείων συσκευασίας.

Η συσκευασία γενικά δεν αλλάζει ή τροποποιεί τα λειτουργικά στοιχεία εκτός κάποιων συγκεκριμένων περιπτώσεων. Η λειτουργικότητα της συσκευασίας μπορεί να απεικονισθεί με ένα παράδειγμα υλοποίησης ηλεκτρικών διασυνδέσεων ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Η έξοδος σχεδίασης της ηλεκτρικής λειτουργίας είναι ένα σχηματικό ηλεκτρικού κυκλώματος. Στη συνέχεια, τα στοιχεία συσκευασίας ηλεκτρικής διασύνδεσης επιλέγονται με μια τεχνολογία, η οποία ταιριάζει στα χαρακτηριστικά του μετατροπέα. Μετέπειτα, οι παρασιτικές παράμετροι σχεδίου για την συμπεριφορά της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, όπως επίσης κι η θερμική συμπεριφορά όπως η διάχυση θερμότητας στους αγωγούς της πλακέτας (τυπωμένου κυκλώματος) καθώς και οι θερμικές διαδρομές στο περιβάλλον ή στη ψήκτρα, πρέπει να αναλυθούν οι ηλεκτρομαγνητικές και οι θερμικές θεμελιώδεις λειτουργίες. Στη συνέχεια οι λειτουργίες συσκευασίας αναλύονται και πρόσθετα στοιχεία συσκευασίας τοποθετούνται, όπως για παράδειγμα ότι ολόκληρος ο μετατροπέας μπορεί να θαλαμοποιηθεί για προστασία.

Η διαδικασία αυτή είναι μάλλον επαναληπτική παρά ακολουθιακή, αφού όπως ήδη έχει αναλυθεί (βλ. σχ. 5.28) οι θεμελιώδεις λειτουργίες εξαρτώνται η μία από την άλλη, οι λειτουργίες συσκευασίας επηρεάζουν τις θεμελιώδεις λειτουργίες και το λειτουργικό χώρο, αφού στο σύνολο του σχετίζεται με το φυσικό χώρο. Για παράδειγμα, τροποποιώντας το σχέδιο χωροταξίας, με σκοπό να βελτιστοποιήσουμε την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά, η θερμική συμπεριφορά θα μεταβληθεί. Αν η αλλαγή στη θερμική συμπεριφορά καταλήξει σε μια κατάσταση, όπου τα λειτουργικά στοιχεία αλλά και τα στοιχεία συσκευασίας δε λειτουργούν στην επιτρεπόμενη θερμοκρασιακή περιοχή, το σχέδιο και/ ή οι ιδιότητες υλικών πρέπει να τροποποιηθούν, όπου στη συνέχεια επηρεάζει την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά. Επιπρόσθετα, όσο αφορά τη λειτουργία της μηχανικής υποστήριξης, οι φυσικές ιδιότητες ενός στοιχείου συσκευασίας (π.χ. θαλαμοποίηση) όπως επιτρεπτότητα, διαπερατότητα και η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να επηρεάσουν την ηλεκτρομαγνητική και θερμική συμπεριφορά της συνδεσμολογίας.

5.6.2 Ολοκλήρωση ηλεκτρονικών ισχύος

Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενες ενότητες, η ανάλυση κατασκευής μετατροπέα καθώς και η προσέγγιση σχεδίαση του στηρίζονται σε τμήματα κατασκευής ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος και των λειτουργιών, που επιτελεί. Με βάση αυτή την ανάλυση είναι εφικτό να μετατρέψουμε την ολοκλήρωση, δηλαδή την ενσωμάτωση, λειτουργιών σε φυσικές δομές. Έτσι ενσωματώνοντας δυο ή περισσότερα τμήματα σε ένα, αναμένεται ελαχιστοποίηση του κόστους και του μεγέθους λόγω λιγότερων χρησιμοποιούμενων υλικών, λιγότερη κατασκευαστική διαδικασία και απλοποιημένη συνδεσμολογία [143]. Παρατηρώντας το σχήμα

5.28, η ολοκλήρωση συμβαίνει σε 2 χώρους [111], τόσο στο φυσικό όσο και στο λειτουργικό χώρο.

Ολοκλήρωση στο φυσικό χώρο

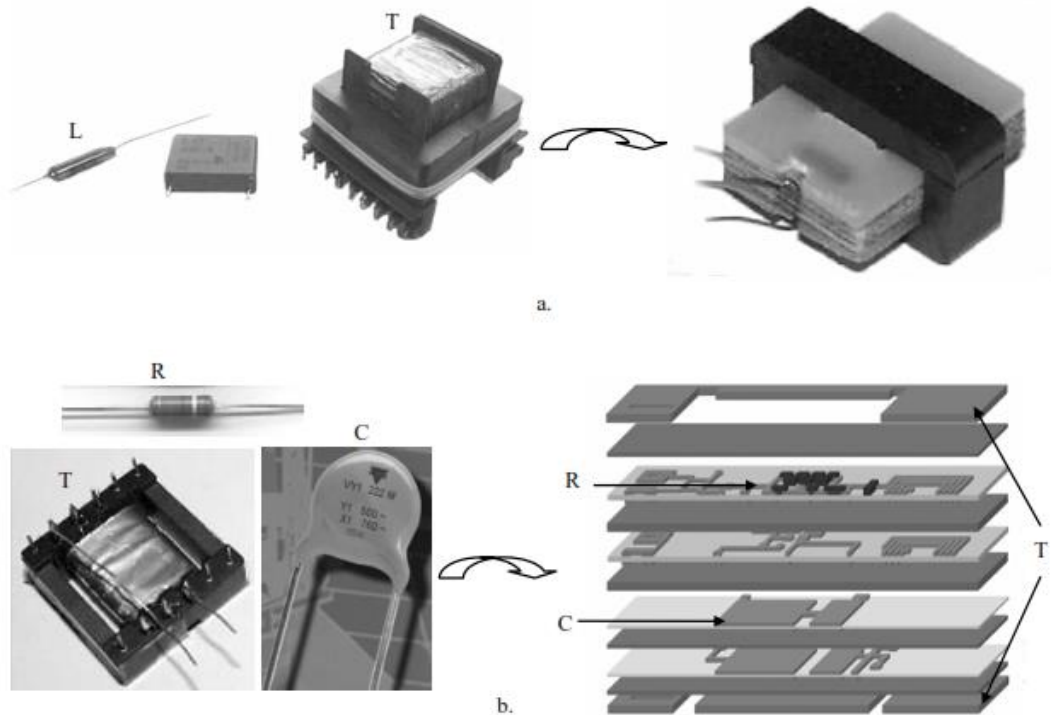
Στο φυσικό χώρο, η ολοκλήρωση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με το τύπο των στοιχείων, που αποτελούν το αντικείμενο της ενσωμάτωση σε δυο ομάδες: λειτουργική ολοκλήρωση στοιχείων και ολοκλήρωση στοιχείων συσκευασίας.

Ολοκλήρωση λειτουργικών στοιχείων

- Ολοκληρωμένες συσκευές:
 - ✓ Μονολιθική ολοκλήρωση, όπου όλο το κύκλωμα ενσωματώνεται σε μια διάταξη.
 - ✓ Ηλεκτρομαγνητική ολοκλήρωση παθητικών [144], όπου παθητικά στοιχεία όπως πηνίο, πυκνωτής, μετασχηματιστής ενσωματώνονται σε μια διάταξη (βλ. Σχ. 5.29.α)
- Ολοκληρωμένες τεχνολογίες
 - ✓ Παθητικά ενσωματωμένα σε τυπωμένα κυκλώματα (πλακέτα), όπου παθητικά στοιχεία όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, μαγνητικά στοιχεία υλοποιούνται σε μια τυπική πολυστρωματική διαδικασία PCB με το υπόλοιπο του κυκλώματος (βλ. Σχ. 5.29.β)
 - ✓ Παχύ φιλμ και χαμηλής θερμοκρασίας κεραμική τεχνολογία όπου τα παθητικά στοιχεία όπως αντιστάσεις και πυκνωτές κατασκευάζονται με τη βοήθεια του τυπωμένου πάνω σε κεραμικό υπόστρωμα.

Τα εν δυνάμει πλεονεκτήματα της ολοκλήρωσης των λειτουργικών στοιχείων είναι:

- Μείωση αριθμού τμημάτων, όχι μόνο λειτουργικών στοιχείων αλλά και στοιχείων συσκευασίας, αφού υπάρχουν λιγότερα λειτουργικά στοιχεία να εξυπηρετήσουν.
- Μικρότερη διαδικασία κατασκευής, αφού υπάρχουν λιγότερα τμήματα να κατασκευασθούν.
- Λιγότερα βήματα συνδεσμολογίας, αφού υπάρχουν λιγότερα τμήματα να συνδεθούν.
- Μείωση μεγέθους
- Καλύτερη απόδοση λόγω χαμηλότερων τιμών των παρασιτικών στοιχείων.

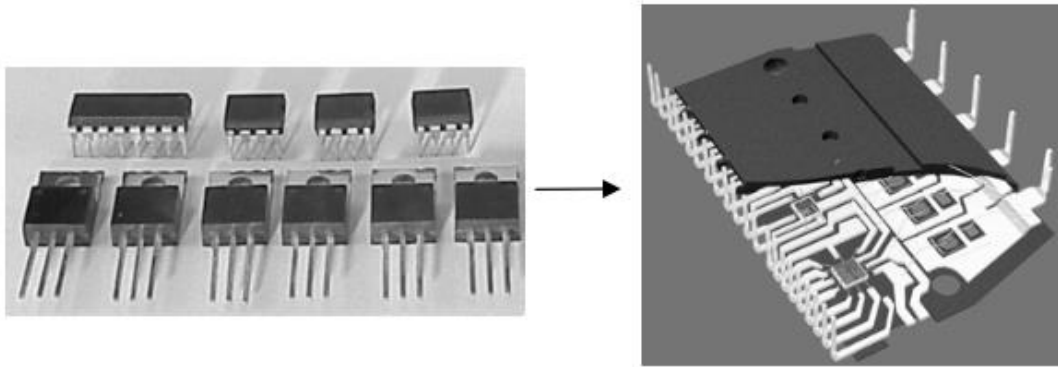


Σχήμα 5.29 – Ολοκλήρωση λειτουργικών στοιχείων - α) διάταξη ολοκλήρωσης, β) τεχνολογίες ολοκλήρωσης

Ολοκλήρωση στοιχείων συσκευασίας

Η ολοκλήρωση στοιχείων συσκευασίας συμβαίνει όταν ένας αριθμός στοιχείων συσκευασίας μπορεί να αντικατασταθεί με ένα, το οποίο επιτελεί τις ίδιες λειτουργίες συσκευασίας. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με την ενσωμάτωση ενός αριθμού λειτουργικών στοιχείων σε μια συσκευασία, όπου μοιράζονται τα ίδια στοιχεία συσκευασίας, όπως θάλαμο, μηχανική υποστήριξη, θερμικές διαδρομές, κ.ά.

Το σχήμα 5.30 απεικονίζει μια μονάδα ισχύος, που περιλαμβάνει έναν αριθμό ημιαγωγών ισχύος και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ελέγχου σε ένα κοινό μολύβδινο πλαίσιο [145]. Σε αυτή τη περίπτωση, οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις, η θερμική και μηχανική υποστήριξη των λειτουργικών στοιχείων των διακριτών στοιχείων ενσωματώνονται σε ένα, το μολύβδινο πλαίσιο. Επιπλέον, η προστασία των στοιχείων συσκευασίας των διακριτών στοιχείων ολοκληρώνεται σε ένα καπάκι/ καλούπι στη μονάδα ισχύος.

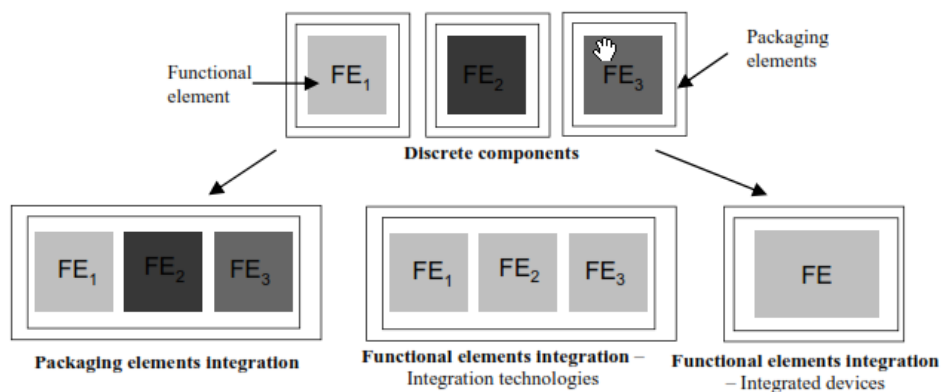


Σχήμα 5.30 – Ολοκλήρωση στοιχείων συσκευασίας – μονάδα ισχύος πάνω σε μολύβδινο πλαίσιο

Τα εν δυνάμει πλεονεκτήματα της ολοκλήρωσης των στοιχείων συσκευασίας είναι:

- Μείωση αριθμού τμημάτων, κυρίως των στοιχείων συσκευασίας, αφού η ενσωμάτωση τους δε επηρεάζει τα λειτουργικά στοιχεία.
- Μικρότερη διαδικασία κατασκευής, αφού υπάρχουν λιγότερα τμήματα να κατασκευασθούν.
- Λιγότερα βήματα συνδεσμολογίας, αφού υπάρχουν λιγότερα τμήματα να συνδεθούν.
- Μείωση μεγέθους
- Καλύτερη απόδοση λόγω χαμηλότερων τιμών των παρασιτικών στοιχείων.

Το σχήμα 5.31 απεικονίζει δυο τύπους ολοκλήρωσης λειτουργικών στοιχείων απεικονίζονται ως ορθογώνια πλαίσια. Τα διαφορετικά ορθογώνια στα λειτουργικά στοιχεία αναπαριστούν διαφορετική διαδικασία κατασκευής. Τα στοιχεία συσκευασίας αναπαρίστανται ως τα εξωτερικά ορθογώνια πλαίσια. Η παραδοσιακή τεχνική, η οποία έχει ήδη αναλυθεί σε

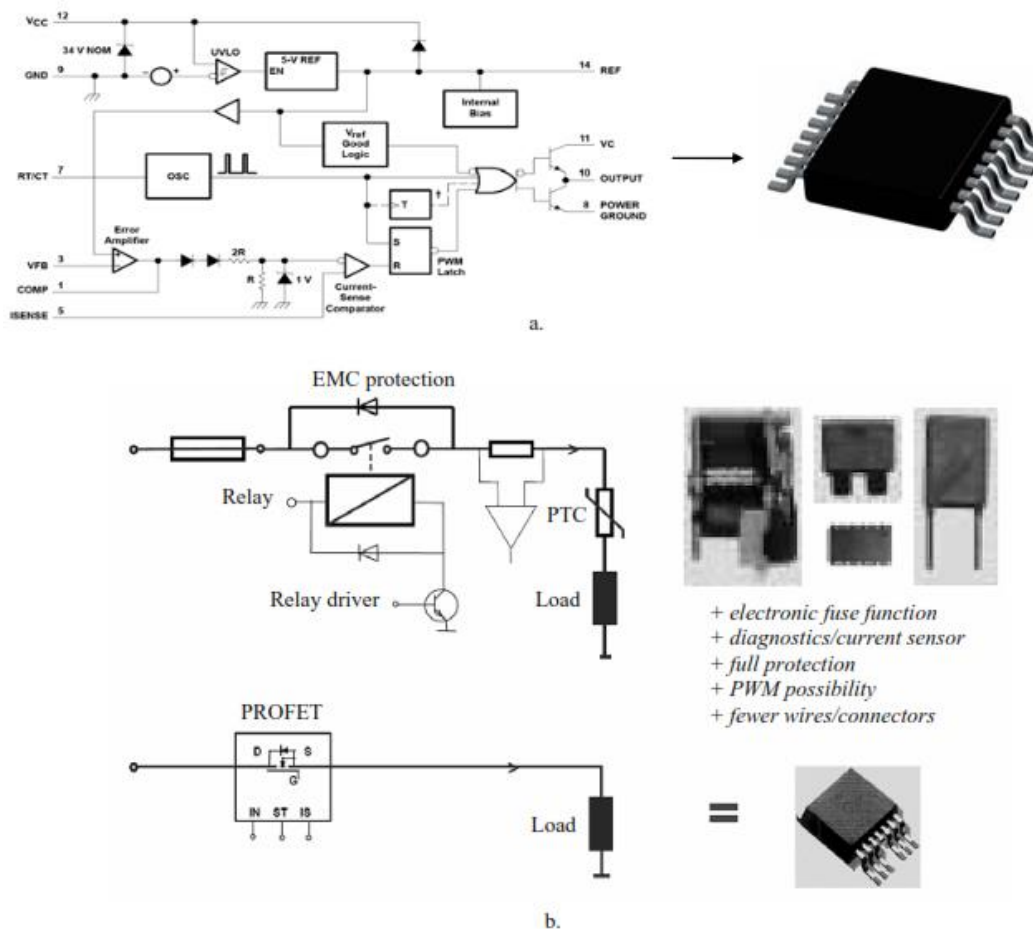


Σχήμα 5.31 – Ολοκλήρωση λειτουργικών στοιχείων έναντι ολοκλήρωσης στοιχείων συσκευασίας

προηγούμενες παραγράφους, χρησιμοποιεί διακριτά στοιχεία που αποτελούνται από ένα αριθμό λειτουργικών στοιχείων και ένα αριθμό στοιχείων συσκευασίας. Στη περίπτωση ολοκλήρωσης στοιχείων συσκευασίας, ο αριθμός των λειτουργικών στοιχείων παραμένει ίδιος αλλά τα πλεονεκτήματα βρίσκονται στη μείωση αριθμού στοιχείων συσκευασίας. Όσο αφορά την ενσωμάτωση των λειτουργικών στοιχείων, οι τεχνολογίες ολοκλήρωσης έχουν ακόμη διακριτά λειτουργικά στοιχεία αλλά αυτά τα στοιχεία κατασκευάζονται με την ίδια διαδικασία. Τέλος, η ενσωμάτωση διατάξεων καταλήγει σε ένα λειτουργικό στοιχείο.

Ολοκλήρωση στο λειτουργικό χώρο

Στο λειτουργικό χώρο, η ολοκλήρωση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με βάση την θεμελιώδη λειτουργία, που είναι το αντικείμενο της ολοκλήρωσης, όπως ενσωμάτωση ηλεκτρονικού κυκλώματος, ολοκλήρωση ηλεκτρομαγνητικού ή θερμικού κυκλώματος κ.ο.κ.



Σχήμα 5.32 – Ολοκλήρωση ηλεκτρονικών – α. Ελεγκτής PWM, β. Ολοκληρωμένο διακοπτικό και ελεγκτικό κύκλωμα

Ολοκλήρωση ηλεκτρονικού κυκλώματος

Η ολοκλήρωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων εφαρμόζει ολοκλήρωση λειτουργικών στοιχείων, που επιτελούν διακοπτικές και/ή λειτουργίες ελέγχου. Μονολιθικά ολοκληρωμένα κυκλώματα ελέγχου έχουν χρησιμοποιηθεί στα ηλεκτρονικά ισχύος για δεκαετίες. Τα κυκλώματα ελέγχου καθώς και οι ημιαγωγικές διατάξεις ισχύος μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα. (βλ. σχ. 5.32.β) [146][147]. Οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις των στοιχείων συσκευασίας μπορούν να ενσωματωθούν, όπως στη περίπτωση της μονάδας ισχύος σε μολύβδινο πλαίσιο (βλ. σχ. 5.30).

Ολοκλήρωση ηλεκτρομαγνητικού κυκλώματος

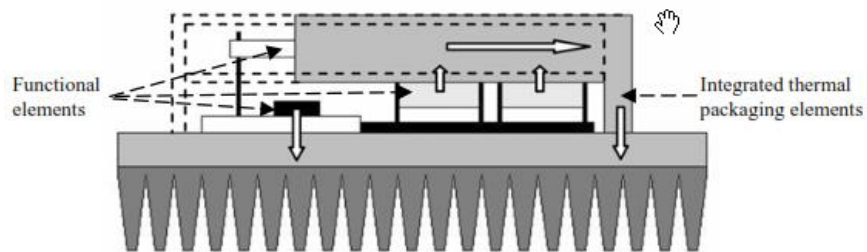
Η ενσωμάτωση ηλεκτρομαγνητικού κυκλώματος με την ενσωμάτωση των λειτουργικών στοιχείων, που επιτελούν τη λειτουργία της μεταφοράς ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας [144]. Ένα παράδειγμα αυτού του τύπου ενσωμάτωσης φαίνεται στο σχ. 5.29, όπου ένα πηνίο, πυκνωτής και μετασχηματιστής ενσωματώνονται σε ένα μόνο στοιχείο. Τα στοιχεία συσκευασίας, όπου εξυπηρετούν ηλεκτρομαγνητικά λειτουργικά στοιχεία μπορούν επίσης να ενσωματωθούν, ώστε ένας αριθμός λειτουργικών στοιχείων να συσκευασθεί σε ένα μόνο θάλαμο. Στη δημοσίευση [138] δείχνει ότι ο όγκος ενός χαμηλοπερατού φίλτρου μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, αν το πηνίο και οι πυκνωτές μοιράζονται τα ίδια στοιχεία συσκευασίας για μηχανική υποστήριξη, ηλεκτρική διασύνδεση και απαγωγή θερμότητας.

Ολοκλήρωση θερμικού κυκλώματος

Η ολοκλήρωση θερμικού κυκλώματος εφαρμόζεται με την ολοκλήρωση των λειτουργικών στοιχείων, που επιτελούν τη λειτουργία μεταφοράς θερμότητας. Στη μικροηλεκτρονική, αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με μονολιθική ολοκλήρωση μιας ψήκτρας σε μια διάταξη πυριτίου [148]. Αυτό φυσικά δεν είναι εφικτό για διατάξεις ισχύος, αφού και οι δυο πλευρές της επαφής πυριτίου είναι επιμεταλλωμένες για ηλεκτρικές διασυνδέσεις. Ως εκ τούτου, κοινά θερμικά λειτουργικά στοιχεία (ψήκτρες, εναλλάκτες θερμότητας) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ψύξη τόσο του μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος όσο και των άλλων υποσυστημάτων (π.χ. ηλεκτρικές μηχανές), επιτυγχάνοντας έτσι ενσωμάτωση σε ένα υψηλότερο επίπεδο συσκευασίας.

Επιπλέον, αντί να χρησιμοποιηθούν ξεχωριστά θερμικά στοιχεία συσκευασίας για κάθε στοιχείο, θερμικά στοιχεία συσκευασίας μπορούν να ενσωματωθούν σε μια δομή, που υπηρετεί ένα λειτουργικό στοιχείο με τον ίδιο τρόπο, όπου ένα μολύβδινο πλαίσιο συνδέει πολλαπλά λειτουργικά στοιχεία ημιαγωγού με τον εξωτερικό κόσμο. Στη δημοσίευση [140] περιγράφεται πώς αυτή η ιδέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια συσκευασία και για παθητικά και για ενεργά

λειτουργικά στοιχεία, ώστε να επιτύχει υψηλής πυκνότητας ισχύεις σε DC/ DC μετατροπείς για εφαρμογές αυτοκινητοβιομηχανίας (βλ. σχ. 5.33).



Σχήμα 5.33 – Ολοκλήρωση θερμικού κυκλώματος στοιχείων συσκευασίας

6

Προστασία διατάξεων ηλεκτρονικών

ισχύος από υπερτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αναφορά σε ένα άλλο σημαντικό θέμα, που απασχολεί τον μηχανικό σχεδίασης των συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος. Αυτό είναι η δημιουργία υπερτάσεων στην είσοδο του συστήματος, που μπορεί να προκαλέσει από μερική ως ολική βλάβη αυτού. Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων κρίνεται αναγκαίο ο μηχανικός να καταφύγει σε μέτρα προστασίας των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος από υπερτάσεις. Στις επόμενες ενότητες ο αναγνώστης έχει τη δυνατότητα να ασχοληθεί με όλο το θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο πρέπει να γνωρίζει, καθώς και τις μεθόδους προστασίας των συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος από υπερτάσεις.

6.1 Εισαγωγή

Η συνηθέστερη αιτία προβλημάτων στην λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού είναι οι κρουστικές υπερτάσεις, που διαδίδονται μέσω των καλωδίων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα, που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, όπως είναι τα συστήματα ρύθμισης στροφών ηλεκτροκινητήρων (Variable Speed Drives, VSDs), οι μονάδες ελέγχου και επιτήρησης της γραμμής παραγωγής, συστήματα ηλεκτρικών μετρήσεων, συστήματα αυτομάτου ελέγχου, τα οποία χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος, τροφοδοτικά αδιάλειπτου παροχής (UPS), καθώς και πλήθος άλλων βιομηχανικών συστημάτων, είναι ευαίσθητα σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και καταστρέφονται από τις κρουστικές υπερτάσεις. Κρουστικές υπερτάσεις δημιουργούνται στο δίκτυο εξαιτίας του φαινομένου της επαγωγής κατά τη διάρκεια των κεραυνοπτώσεων, καθώς επίσης και από προβλήματα του

δικτύου ηλεκτρικής παροχής. Προκειμένου να προστατευθεί ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός από υπερτάσεις, απαιτείται η εγκατάσταση ειδικών συστημάτων απαγωγής κρουστικών υπερτάσεων (Surge Suppression Device, SPD) στην παροχή ηλεκτρικής τροφοδοσίας τους.

Στις ενότητες που ακολουθούν, θα παρουσιασθεί εν συντομία το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο περί υπερτάσεων καθώς και τα αίτια που τις δημιουργούν. Εκτεταμένη αναφορά γίνεται στα διεθνή πρότυπα που καθορίζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά, την απόδοση, καθώς και τις απαιτήσεις ασφάλειας που πρέπει να πληρούνται από τις διατάξεις SPD. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα για την προστασία του βιομηχανικού εξοπλισμού από υπερτάσεις, οι οποίες στηρίζονται κυρίως στην τεχνολογία των παράλληλων βαρίστορ. Τέλος, παρουσιάζονται οι νέες τεχνολογίες αντικεραυνικής προστασίας που διατίθενται σήμερα, οι οποίες ακολουθούν τα πρόσφατα διεθνή πρότυπα και εξαλείφουν τα προβλήματα που παρουσιάζουν οι συμβατικού τύπου τεχνολογίες.

6.2 Απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο περί υπερτάσεων

Το αντικείμενο των κρουστικών υπερτάσεων μελετάται από το 1960 [149], όμως λόγω της εκτεταμένης χρήσης των ημιαγωγών και των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στα σύγχρονα βιομηχανικά συστήματα, το ενδιαφέρον για την προστασία από τις υπερτάσεις έχει ενταθεί.

6.2.1 Ορισμός κρουστικής υπέρτασης

Με τον όρο κρουστικές υπερτάσεις, εννοούμε τις απότομες αυξήσεις της απόλυτης τιμής του δυναμικού, η διάρκεια των οποίων κυμαίνεται από ένα μsec έως και ένα msec . Η αύξηση της απόλυτης τιμής του δυναμικού κυμαίνεται από μερικά Volts, μέχρι χιλιάδες Volts. Αναλυτικότερα, οι κρουστικές υπερτάσεις που εμφανίζονται στους αγωγούς τροφοδοσίας είναι παλμοί μεγάλου πλάτους και διάρκειας μερικών μs . Η κρουστική υπέρταση συχνά υπερβαίνει την τάση διάσπασης του διηλεκτρικού που χρησιμοποιείται για την μόνωση του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, προκαλώντας έτσι βαθμιαία εξασθένηση της μόνωσης και τελικά την καταστροφή του εξοπλισμού. Επαναλαμβανόμενες κρουστικές υπερτάσεις, προκαλούν ελάττωση του αναμενόμενου χρόνου ζωής του εξοπλισμού (Mean Time Before Failure, MTBF). Αποτέλεσμα αυτού είναι να απαιτείται συχνή συντήρηση του εξοπλισμού αυξάνοντας έτσι το κόστος λειτουργίας.

6.2.2 Αιτίες δημιουργίας κρουστικών υπερτάσεων

Τα αίτια δημιουργίας κρουστικών υπερτάσεων είναι είτε φυσικά, είτε τεχνητά. Φυσικές πηγές είναι οι κεραυνοί (Lightning Electromagnetic Pulses ή LEMP), τόσο μεταξύ νέφους και γης, όσο και μεταξύ νεφών, και οι διάφορες ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις (Electrostatic Discharges ή ESD). Τεχνητές πηγές είναι τα ηλεκτρικά δίκτυα που αναπτύσσουν κρουστικές υπερτάσεις, είτε από χειρισμούς διακοπών, είτε από βραχυκυκλώματα (Switching Electromagnetic Pulses ή SEMP).

Οι κρουστικές υπερτάσεις εμφανίζονται εξαιτίας:

- φυσικών φαινομένων, όπως κεραυνοί που είτε πλήττουν άμεσα το σύστημα τροφοδοσίας είτε επάγουν υπερτάσεις πλήττοντας παρακείμενα αντικείμενα ή εγκαταστάσεις.
- σκόπιμων ενεργειών στο σύστημα, όπως σύνδεση/αποσύνδεση πυκνωτών για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος, μεγάλων φορτίων ή μετασχηματιστών και διακοπή/επανασύνδεση ηλεκτρικής τροφοδοσίας όσον αφορά το σύστημα μεταφοράς και διανομής της ενέργειας, καθώς επίσης και λανθασμένοι χειρισμοί από τερματικούς χρήστες σε επίπεδο κατανάλωσης.
- τυχαίων συμβάντων, όπως σφάλματα στο δίκτυο ή σύζευξη διαφορετικών συστημάτων όπως αλληλεπίδραση μεταξύ του συστήματος ενεργείας και τηλεπικοινωνιακού συστήματος.

Διαφορετική προσέγγιση, ως προς την κατηγοριοποίηση των αιτιών δημιουργίας κρουστικών υπερτάσεων με βάση αν οι υπερτάσεις προέρχονται από το εξωτερικό ή εσωτερικό ηλεκτρικής εγκατάστασης μιας μονάδας είναι η εξής:

- Στο εξωτερικό της ηλεκτρικής εγκατάστασης
 - ✓ Κεραυνοί
 - ✓ Σύνδεση / αποσύνδεση πυκνωτών για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος
 - ✓ Διακοπή / επανασύνδεση ηλεκτρικής τροφοδοσίας
 - ✓ Σύνδεση / αποσύνδεση μετασχηματιστών διανομής
- Στο εσωτερικό της ηλεκτρικής εγκατάστασης
 - ✓ Τη λειτουργία ασφαλειών και αυτόματων διακοπών (circuit breakers)

- ✓ Τις ηλεκτρικές μηχανές ισχύος, π.χ. ανελκυστήρες
- ✓ Τα κλιματιστικά μηχανήματα
- ✓ Τα συστήματα ρύθμισης στροφών κινητήρων (Variable Speed Drives, VSD)

Παρακάτω θα δοθεί περαιτέρω ανάλυση για τα παραπάνω αίτια. Τα κρουστικά κύματα δημιουργούν ρεύματα με πολύ μεγάλη ένταση, ικανά να καταστρέψουν κάθε μορφής ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων και να βλάψουν την ανθρώπινη ζωή. Τα ρεύματα αυτά περνάνε μέσα στις συσκευές και στις εγκαταστάσεις διαμέσου των καλωδίων ισχύος, των τηλεφωνικών καλωδίων, των κεραιών, των γειώσεων, των δικτύων ύδρευσης, θέρμανσης, ψύξης, αερισμού κλπ. Ακόμα και αν ο κεραυνός πέσει εκατοντάδες μέτρα μακριά από μια κατασκευή, η σχετικά υψηλή ιδιοσυχνότητα του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του επιτρέπει να ταξιδεύσει σε μεγάλη απόσταση και πιθανότατα να προσβάλλει τη συγκεκριμένη κατασκευή μέσω κάποιων από τους παραπάνω «δρόμους». Ένας κεραυνός λοιπόν μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργία στα ηλεκτρικά μέρη μιας κατασκευής ακόμα και αν πέσει ένα χιλιόμετρο μακριά. Η απόσταση που μπορεί να πλήξει μία κατασκευή, είναι συνάρτηση της έντασής του.

Ο τρόπος που ένας κεραυνός επιδρά μπορεί να είναι είτε επαγωγικός, είτε ωμικός, είτε χωρητικός, είτε κάποιος συνδυασμός αυτών, όπως εξηγείται παρακάτω. Υπάρχει, φυσικά, και η ακραία περίπτωση να πέσει απευθείας πάνω σε κάποια καλώδια ή σωλήνες που καταλήγουν στο συγκεκριμένο κτίριο. Δύο διαφορετικές περιπτώσεις επαγωγικών επιδράσεων έχουν παρατηρηθεί. Όταν ένας κεραυνός πέσει σε ένα κτίριο που έχει αντικεραυνική προστασία, το ρεύμα του θα διοχετευθεί μέσω του αγωγού καθόδου στη γη. Το ισχυρό μαγνητικό πεδίο όμως που θα δημιουργηθεί γύρω από τον αγωγό, μπορεί να μεταφέρει επαγωγικά φορτία στις διάφορες καλωδιώσεις του κτιρίου ή ακόμα και σε γειτονικά κτίσματα. Στη δεύτερη περίπτωση, αποφορτίσεις κεραυνών στην ύπαιθρο φορτίζουν επαγωγικά, καλώδια ηλεκτρικής παροχής, μεταφοράς δεδομένων ή τηλεφωνικά και μέσω αυτών εισχωρούν μέσα σε κατασκευές προκαλώντας φθορές στα ηλεκτρικά τους μέρη.

Οι ωμικές επιδράσεις είναι ένας άλλος τρόπος μετάδοσης κρουστικών ρευμάτων και πλήττουν, τόσο υπόγειες, όσο και υπέργειες ή εναέριες γραμμές και σωληνώσεις. Συναντάται και ως γαλβανικό φαινόμενο. Όταν ένας κεραυνός πλήξει ακόμα και το έδαφος σε κοντινή κατασκευή, το κεραυνικό ρεύμα που διαχέεται ψάχνει διόδους εκτόνωσης μέσα στη γη. Επειδή ακολουθείται πάντα η ευκολότερη δίοδος, δηλαδή με την μικρότερη ωμική αντίσταση, ένα ποσοστό του ρεύματος θα περάσει μέσα στα κοντινά κτίσματα, είτε διαμέσου των ηλεκτροδίων της γείωσης των κατασκευών, είτε διαμέσου διαφόρων μεταλλικών σωληνώσεων (ύδρευση, αποχέτευση κλπ.). Η μόνωση των καλωδίων έχει μεγαλύτερη αντίσταση από ότι το έδαφος, αλλά λόγω μεγάλης διαφοράς δυναμικού μεταξύ γης και μονωμένων μερών, η μόνωση αυτή

διασπάται και η υπέρταση διοχετεύεται στους αγωγούς καταστρέφοντας ηλεκτρονικές συσκευές συνδεδεμένες στο δίκτυο. Ακόμα περισσότερο, όταν αυτό το κτίριο συνδέεται ηλεκτρικά με άλλα κτίρια, λόγω της διαφοράς δυναμικού που δημιουργείται στην άκρες των γραμμών, το ρεύμα θα συνεχίσει την πορεία του καταστρέφοντας και συσκευές γειτονικών κτιρίων.

Όσον αφορά τις χωρητικές επιδράσεις, αυτές δημιουργούνται όταν ένα νέφος χάσει απότομα το ηλεκτρικό του φορτίο, με συνέπεια τα δίκτυα που βρίσκονται κάτω από αυτό, να χάσουν και αυτά χωρητικά το φορτίο τους. Ως αποτέλεσμα αυτού, αναπτύσσονται οδεύοντα κύματα προς τις δύο κατευθύνσεις. Αν μάλιστα τα δίκτυα αυτά είναι μεγάλου μήκους και καλά μονωμένα χειροτερεύει η κατάσταση, καθώς το κύμα αντανακλάται και μεγαλώνει αλλά και δεν μπορεί να αποφορτιστεί. Σε περίπτωση λοιπόν, που το δυναμικό του δικτύου φτάσει σε τιμή μεγαλύτερη της αντοχής των ηλεκτρικών μονώσεων των συσκευών που υπάρχουν στα άκρα του, αυτές θα καταστραφούν.

Τέλος, υπερτάσεις δημιουργούνται και από χειρισμούς διακοπών ισχύος, μαγνητική ζεύξη μετασχηματιστών ισχύος, βραχυκυκλώματα και ζεύξη-απόζευξη συστοιχιών πυκνωτών, κυρίως διότι τα ρεύματα που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των φαινομένων αυτών αποκτούν κρουστική μορφή με δραματικές συνέπειες στη μονωτική ικανότητα των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών. Όπως είναι γνωστό, το ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο στο οποίο αποθηκεύεται ενέργεια. Αν αυτό το ρεύμα διακοπεί ξαφνικά, η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου απελευθερώνεται. Στην προσπάθειά της να αναλωθεί, παίρνει τη μορφή ενός κρουστικού κύματος. Όσο περισσότερη, φυσικά, είναι η αποθηκευμένη ενέργεια, τόσο μεγαλύτερο και το κύμα. Μεγάλα ρεύματα και μεγάλα μήκη αγωγών δυσχεραίνουν την κατάσταση. Αυτός είναι και ο λόγος που επαγωγικά φορτία όπως κινητήρες ή μετασχηματιστές, αποτελούν συχνά αιτίες δημιουργίας κρουστικών υπερτάσεων.

6.2.3 Προβλήματα λόγω κρουστικών υπερτάσεων

Πολλά είναι τα προβλήματα που μπορεί να δημιουργήσει η είσοδος ενός κρουστικού κύματος στα δίκτυα μιας κατασκευής, από απλά μέχρι ανεπανόρθωτα. Αναλυτικά αυτά είναι:

- Απώλειες μνήμης: αν και δεν έχουμε μόνιμη ζημία, παρατηρούνται συχνά απώλειες μνήμης, «πάγωμα» οθονών, αδικαιολόγητη επανεκκίνηση ηλεκτρονικών συσκευών, κλπ. χωρίς μόνιμες ή ανεπανόρθωτες βλάβες. Συνήθης αιτία απώλειας εργατοωρών, και κίνδυνος δυσάρεστων καταστάσεων σε περιπτώσεις ευαίσθητου και σημαντικού λογισμικού (π.χ. τράπεζες).
- Βαθμιαία φθορά: μακροπρόθεσμη έκθεση σε κρουστικά κύματα μικρής έντασης, οδηγεί σε μερική φθορά ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, μικραίνοντας τη διάρκεια ζωής και αυξάνοντας την πιθανότητα αστοχίας υλικού ή καταστροφής.

- Ολική καταστροφή: κρουστικά κύματα μπορούν να καταστρέψουν συσκευές, ηλεκτρονικά κυκλώματα, οθόνες ακόμα και σε σημείο που να είναι αδύνατη η επισκευή τους. Αυτό συμβαίνει όταν διασπαστεί το μονωτικό μέσο της συσκευής. Σπινθήρες, τόξα ή εκρήξεις μπορεί να αποτελέσουν εστίες φωτιάς και απαρχή επικίνδυνων καταστάσεων όπως ηλεκτρικά σοκ κλπ. Ο κίνδυνος είναι ακόμα μεγαλύτερος σε περιπτώσεις που σε μια κατασκευή περιέχονται εύφλεκτα ή εκρηκτικά υλικά ή υπάρχει μεγάλη πυκνότητα ανθρώπων.
- Έμμεσες συνέπειες: όλα τα παραπάνω οδηγούν σε αδυναμία εργασίας, κόστος αντικατάστασης και επισκευής, απώλεια παραγωγικού χρόνου, καθυστερήσεις και απώλειες πελατών, αναγκαιότητα υπερωριών, περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις λόγω κακής λειτουργίας ή υπολειτουργίας κλπ.

6.3 Απαγωγείς υπερτάσεων (SPD)

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες, οι κρουστικές υπερτάσεις μπορούν να περάσουν μέσα στα ηλεκτρικά κυκλώματα είτε μέσα από την ηλεκτρική παροχή, συμπεριλαμβανομένου και του αγωγού γειώσεως, είτε μέσα από τις τηλεφωνικές γραμμές, τις γραμμές μεταφοράς δεδομένων και τις γραμμές μεταφοράς αναλογικών σημάτων (από κεραία τηλεόρασης, κάμερα παρακολούθησης κλπ.) και γενικά μέσα από οποιοδήποτε ηλεκτρικά αγωγίμο δίκτυο. Κάθε ηλεκτρική ή ηλεκτρονική συσκευή που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία εκτίθεται σε κρουστικές υπερτάσεις οι οποίες προέρχονται είτε από το δίκτυο της ΔΕΗ είτε από τη λειτουργία γειτονικού εξοπλισμού εντός του εργοστασίου. Προκειμένου να προστατευθεί ο εξοπλισμός από τις υπερτάσεις αυτές χρησιμοποιούνται οι διατάξεις προστασίας από κρουστικές υπερτάσεις (SPD).

6.3.1 Γενικά

Οι απαγωγείς τάσης (Surge Protective Devices – SPD's) είναι συσκευές για την προστασία έναντι των υπερτάσεων. Συνδέονται παράλληλα με τον εξοπλισμό που πρόκειται να προστατέψουν και σε γενικές γραμμές η λειτουργία τους είναι η εξής:

- ✓ Απουσία υπερτάσεων δεν επηρεάζουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος στο οποίο εφαρμόζονται. Αυτό οφείλεται στην υψηλή εμπέδηση που παρουσιάζουν. Κατά συνέπεια, ο κλάδος στον οποίο βρίσκονται δεν διαρρέεται από ρεύμα κι έτσι δεν υπάρχουν απώλειες.
- ✓ Κατά την διάρκεια μιας υπέρτασης μειώνουν την εμπέδηση τους έτσι ώστε να απορροφήσουν ένα μεγάλο μέρος του ρεύματος, το οποίο διαρρέει το φορτίο, μέχρις

όπου η τιμή της τάσης στα άκρα τους φτάσει την τάση προστασίας που ορίζει ο κατασκευαστής.

- ✓ Αφότου παρέλθει το συμβάν της υπέρτασης επανέρχονται σε υψηλές τιμές εμπέδησης.

Οι διατάξεις SPD που διατίθενται στο εμπόριο ποικίλουν όσο αφορά την τεχνολογία, τον τρόπο διασύνδεσής τους, την αντοχή τους σε αλληπάλληλα κρουστικά πλήγματα καθώς και στο επίπεδο προστασίας που προσφέρουν. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των διατάξεων SPD στη βιομηχανία έχουν δείξει σοβαρά προβλήματα όσο αφορά την ασφάλεια που παρέχουν σε εξοπλισμό και προσωπικό. Οι απαγωγείς κρουστικών υπερτάσεων (Surge Protection Devices ή SPD's), που συχνά θα συναντηθούν και ως αλεξικέραυνα ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων, είναι οι συσκευές αυτές που τοποθετούνται πριν από τα μηχανήματα που θέλουμε να προστατεύσουμε ή σε συγκεκριμένα σημεία μέσα στο δίκτυο, με στόχο να μειώσουν το κρουστικό κύμα άμεσα σε μεγέθη ακίνδυνα.

Η αρχή λειτουργίας τους είναι η εξής: ο κάθε απαγωγός κρουστικών υπερτάσεων, SPD, χαρακτηρίζεται σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας του, από μία πολύ υψηλή αντίσταση μεταξύ των άκρων του. Όταν στο δίκτυο που είναι συνδεδεμένος εφαρμοστεί μία κρουστική τάση με τιμή μεγαλύτερη από την τάση διάσπασης του SPD, βραχυκυκλώνει τα άκρα του σε χρόνο της τάξης ns, μειώνοντας έτσι τις διαφορές δυναμικού μεταξύ των ηλεκτρικά μονωμένων αγωγών και μεταξύ των γειωμένων μερών, σε στάθμη που πρέπει να είναι χαμηλότερη της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών της εγκατάστασης, όπως αυτή ορίζεται στο Διεθνές πρότυπο IEC 60664-1 (Πίνακας 6.1). Η τάση αυτή ονομάζεται τάση προστασίας (U_p) και είναι το βασικότερο κριτήριο επιλογής του SPD. Θα αναφερθούμε σε αυτήν εκτενέστερα στη συνέχεια.

| Δυναμικό μεταξύ φάσης και ουδέτερου, εξαγόμενο από τις ονομαστικές τάσεις λειτουργίας a.c. ή d.c. (Volts) | Διηλεκτρική αντοχή συσκευής, U_s (Volts) | | | |
|---|--|------|------|-------|
| | Κατηγορία Συσκευής (*) | | | |
| | I | II | III | IV |
| 50 | 330 | 500 | 800 | 1500 |
| 100 | 500 | 800 | 1500 | 2500 |
| 150 | 800 | 1500 | 2500 | 4000 |
| 300 | 1500 | 2500 | 4000 | 6000 |
| 600 | 2500 | 4000 | 6000 | 8000 |
| 1000 | 4000 | 6000 | 8000 | 12000 |

Πίνακας 6.1. Αντοχή των μονωτικών των συσκευών που τροφοδοτούνται από το δίκτυο, όπως αυτές ορίζονται στο IEC 60664-1, Table 1.

(*) Οι παραπάνω αναφερόμενες κατηγορίες συσκευής του Πίνακα 1 ορίζονται ως εξής:

- ✓ Κατηγορία I : σε αυτή ανήκουν οι ηλεκτρονικές συσκευές και γενικά κάθε ηλεκτρονικό κύκλωμα.
- ✓ Κατηγορία II : διατάξεις και συσκευές οικιακής χρήσης μόνιμα συνδεδεμένες στην ηλεκτρική εγκατάσταση, φορητές συσκευές και εργαλεία.
- ✓ Κατηγορία III : διατάξεις μόνιμα συνδεδεμένες στην ηλεκτρική εγκατάσταση των οποίων η αξιοπιστία λειτουργίας τους διέπεται από ειδικές απαιτήσεις όπως διακόπτες, κινητήρες και γενικά συσκευές και μηχανήματα βιομηχανικών εγκαταστάσεων.
- ✓ Κατηγορία IV : υλικά, διατάξεις ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων, όπως καλώδια, τηκτές ασφάλειες, κιλοβατοωρόμετρα.

Όταν η τάση του δικτύου επανέλθει στα φυσιολογικά επίπεδα, ο απαγωγός κρουστικών υπερτάσεων, SPD, αυτόματα επανέρχεται στην αρχική φυσιολογική του θέση, χωρίς την ανάγκη διακοπής της παροχής του ηλεκτρικού δικτύου, αντικατάσταση τηκτών, ή επαναοπλισμού αυτόματων διακοπών.

6.3.2 Τυπικά χαρακτηριστικά απαγωγέων τάσης

Οι απαγωγοί κρουστικών υπερτάσεων επιλέγονται λαμβάνοντας υπόψη τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητες του συστήματος στο οποίο τοποθετούνται. Πιο αναλυτικά οι παράμετροι που παίζουν ρόλο στην επιλογή τους είναι οι εξής:

- Χαρακτηριστικά δικτύου: Για να εξασφαλιστεί η συμβατότητα με το δίκτυο είναι αναγκαία η γνώση των τριών επόμενων παραμέτρων. Η Ονομαστική τάση λειτουργίας (Voltage rating, UN, ή Continuous operating voltage, UC) καθορίζεται με βάση την ονομαστική τάση της ηλεκτρικής γραμμής. Η μέγιστη τάση λειτουργίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές κυμαίνεται περίπου στο +15% της ονομαστικής τιμής. Για τα Ελληνικά δεδομένα, όπως και για ολόκληρη την Ευρώπη, σύμφωνα με οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η ονομαστική τάση λειτουργίας για όλα τα δίκτυα χαμηλής τάσης είναι 230/400V. Για τα ασθενή ρεύματα (π.χ. σήματα data) ονομαστική τάση είναι η θετική ή αρνητική τιμή κορυφής του σήματος (Voltage peak value, Upk). Το Ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας, (Continuous operating current, IC), ενδιαφέρει μόνο στην περίπτωση που ο απαγωγός συνδέεται σε σειρά με το δίκτυο. Τέλος, ανάλογα

με τη Συχνότητα λειτουργίας, f , του δικτύου, επιλέγεται και ο απαγωγός που λειτουργεί στην ανάλογη συχνότητα.

- Τάση εκφόρτισης ή Παραμένουσα τάση (Residual voltage, U_{res}): είναι η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του απαγωγού κρουστικών υπερτάσεων κατά τη διάρκεια της διέλευσης του ονομαστικού ρεύματος εκφόρτισης, το οποίο ορίζεται παρακάτω. Η μέγιστη παραμένουσα τάση (Voltage limiting) είναι αυτή που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης που μπορεί να αντέξει ο συγκεκριμένος απαγωγός. Στην περίπτωση απαγωγού τύπου σπινθηριστή η παραμένουσα τάση ισούται με την Τάση διάσπασης (Sparkover voltage), την τάση δηλαδή στην οποία έχουμε έναρξη του σπινθήρα. Όπως γίνεται σαφές, όσο μικρότερη είναι η τάση προστασίας ενός απαγωγού τόσο το καλύτερο, και τόσο πιο ευαίσθητες συσκευές μπορεί να προστατεύσει.
- Τάση προστασίας (Voltage Protection Level, U_P): η συγκεκριμένη παράμετρος χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του απαγωγού και πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη παραμένουσα τάση ή την τάση διάσπασης. Η χρησιμότητα της παραμέτρου αυτής είναι ίσως η σημαντικότερη όλων, καθώς μεγαλύτερη τάση προστασίας από αυτή που αντέχει η υπό προστασία συσκευή, θα οδηγήσει σε ανεπαρκή προστασία της και ενδεχόμενη καταστροφή της.
- Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης (Maximum discharge current, I_{max} ή Maximum impulse current, I_{imp}): είναι το μεγαλύτερο ρεύμα εκφόρτισης που διέρχεται μέσα από το αλεξικέρανο δικτύου τουλάχιστον για μία φορά, χωρίς αυτό να καταστραφεί. Με βάση αυτή τη μεταβλητή εξασφαλίζεται η βιωσιμότητα του απαγωγού. Το μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφή κρούσης του κύματος. Όταν λέμε μορφή κρούσης (Impulse wave shape) εννοούμε το πηλίκιο του χρόνου που φτάνει το ρεύμα στη μέγιστη τιμή του, προς το χρόνο που πέφτει στο μισό της μέγιστης τιμής. Ο λόγος που χρησιμοποιείται είναι το γεγονός ότι κάθε κρουστικό κύμα έχει απρόβλεπτη μορφή κρούσης και συνεπώς τα μεγέθη δεν είναι συγκρίσιμα. Εισάγοντας αυτή την παράμετρο είμαστε πιο ακριβής στον καθορισμό του I_{max} της αντικεραυνικής συσκευής. Για παράδειγμα, ένας απαγωγός στο οποίο εφαρμόζεται κρούση μορφής 8/20 μ s έχει ικανότητα $I_{max}=5kA$. Στον ίδιο απαγωγό αν εφαρμοστεί κρούση μορφής 4/10 μ s για παράδειγμα, έχει ικανότητα $I_{max}=65kA$. Η μορφή κρούσης καθορίζεται από τα Διεθνή πρότυπα IEC σε 8/20 μ s, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις για τη μέτρηση του I_{max} φτάνει και σε διάρκεια τα 10ms (IEC 61643–

1). Από εδώ και στο εξής ότι τιμές έντασης και αν αναφέρονται, ως μορφή κρούσης θα εννοείται η 8/20μs.

- Ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης (Nominal discharge current, I_n): Έτσι ονομάζεται το ρεύμα αυτό που μπορεί να αντιμετωπιστεί από τον απαγωγό για τουλάχιστον είκοσι φορές, χωρίς αυτός να παρουσιάσει δυσλειτουργία. Όταν για παράδειγμα λέμε ότι ο συγκεκριμένος απαγωγός έχει $I_{max}=40kA$ και $I_n=15kA$, ρεύματος 8/20μs εννοούμε ότι μπορεί να ανταπεξέλθει χωρίς να καταστραφεί σε ρεύμα 40kA τουλάχιστον μία φορά και σε ρεύμα 15kA τουλάχιστον για είκοσι φορές, πάντα μορφής 8/20μs.
- Υπέρταση μεγάλης διάρκειας του ηλεκτρικού πεδίου διανομής, UTOV: μία σημαντική παράμετρος που πρέπει να συνεκτιμάται κατά την επιλογή του απαγωγού, κυρίως στα ενεργειακά συστήματα, είναι οι υπερτάσεις του συστήματος μακράς διάρκειας UTOV, με χρονική διάρκεια $0,05 < t < 10s$. Οι τάσεις αυτές λόγω της διάρκειάς τους δεν έχουν κρουστική μορφή και ο απαγωγός υπερτάσεων, αν λειτουργήσει για να τις μειώσει υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να καταστραφεί, καθώς καταπονείται για μεγάλη χρονική διάρκεια από το ρεύμα του συστήματος που ρέει μέσα σε αυτόν. Στατιστικά, έχει αποδειχθεί ότι σε απομονωμένα δίκτυα η καταστροφή των απαγωγών κρουστικών υπερτάσεων από αυτό το αίτιο, είναι συνηθέστερη από ότι η καταστροφή τους από ένα κεραυνικό ρεύμα. Το Διεθνές πρότυπο IEC της σειράς 60364 συνιστά στις εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας να κατασκευάζουν δίκτυα που οι υπερτάσεις μεγάλης διάρκειας να μην υπερβαίνουν την τιμή $1,5xUN+750V$ για χρόνο $0,05 < t < 5s$, και την τιμή $1,5xUNV$ για χρόνο $5 < t < 10s$. Η επιλογή του κατάλληλου απαγωγού κρουστικών υπερτάσεων θα πρέπει να γίνεται με το κριτήριο να λειτουργεί σε τάσεις μεγαλύτερες της U TOV, όπως αυτή ορίζεται από το IEC 60364. Αν και αναφέρθηκε, δηλαδή, ότι όσο μικρότερη είναι η τάση προστασίας τόσο το καλύτερο, οι ελάχιστες τιμές της UP περιορίζονται από την UTOV.
- Χρόνος απόκρισης (Time Response, tR): είναι ο χρόνος που απαιτείται μέχρις ότου να ενεργοποιηθεί η λειτουργία του απαγωγού. Είναι πολύ βασική παράμετρος, καθώς πρέπει να λειτουργήσει πριν περάσει το κύμα και κάνει τη ζημιά και πρέπει να είναι μικρότερος των 25 ns (25×10^{-9}). Αυτός είναι και ο λόγος που οι σταθεροποιητές τάσης (UPS) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αντικεραυνική προστασία, καθώς ο χρόνος απόκρισής τους είναι συγκριτικά πολύ μεγαλύτερος (της τάξης των ms, 10-

3). Αντιθέτως, κινδυνεύουν και οι ίδιοι από τα κρουστικά κύματα και χρειάζονται προστασία.

Υπάρχουν και άλλες μεταβλητές που παίζουν ρόλο στην επιλογή του σωστού απαγωγού, όπως η ισχύς λειτουργίας, η θερμοκρασία λειτουργίας, το μέγιστο υψόμετρο λειτουργίας κλπ. που δεν χρήζουν ανάλυσης τη συγκεκριμένη στιγμή, καθώς ο ρόλος τους είναι σημαντικός μεν, πολύ λεπτομερειακός δε. Όμως αξίζει να αναφερθεί ότι έχει μελετηθεί και καθοριστεί ότι η ορθή λειτουργία τους ορίζονται από τις εξής κανονικές συνθήκες:

- συχνότητα συστήματος 48-62 Hz για AC παροχή
- υψόμετρο που να μην ξεπερνά τα 2000 μέτρα
- θερμοκρασία λειτουργίας στο διάστημα από 5°C μέχρι 40°C για κανονικό διάστημα ανοχής και από εκτεταμένο διάστημα
- υγρασία για εσωτερική εγκατάσταση 30-90%

Τα όρια αυτά ενδέχεται να μεταβάλλονται ανάλογα με τα όρια ανοχής που δίνουν συνήθως οι κατασκευαστές και φυσικά μακροπρόθεσμα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των SPD.

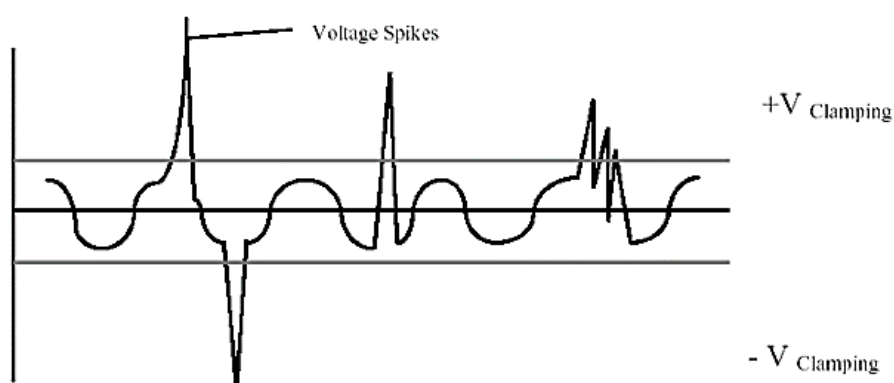
6.3.3 Ανασκόπηση τεχνολογιών SPD - Είδη απαγωγέων τάσης

Η τεχνολογία των ημιαγωγών χρησιμοποιείται ευρύτατα σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, SCADA, συστήματα ελέγχου στροφών ηλεκτροκινητήρων, συστήματα μετρήσεων είναι μερικές από τις εφαρμογές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ηλεκτρονικοί διακόπτες, PLC, μικροελεγκτές, μνήμες κλπ.) οι οποίες αντικατέστησαν τα παλαιότερα ηλεκτρομηχανικά συστήματα. Η χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας των ηλεκτρονικών, παρόλο που επέφερε αύξηση της παραγωγής και καλύτερο έλεγχο της λειτουργίας των βιομηχανικών μονάδων, αύξησε τη συχνότητα των βλαβών από υπερτάσεις λόγω της υψηλής ευαισθησίας των ηλεκτρονικών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους συντήρησης και την απώλεια εσόδων από την διακοπή της λειτουργίας των μονάδων παραγωγής.

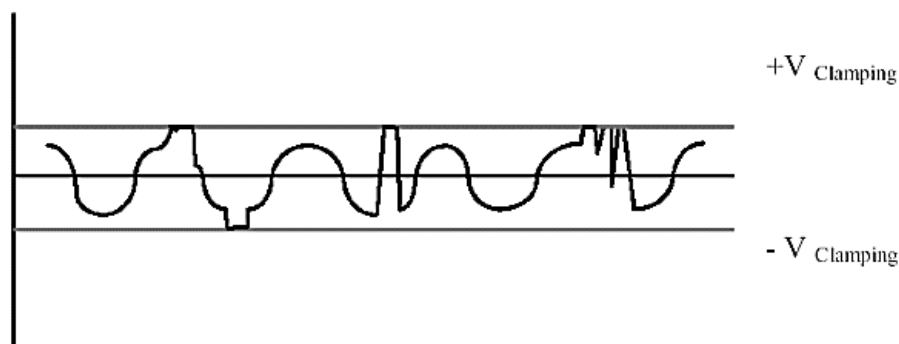
Η πλειοψηφία των κατασκευαστών SPD βασίζονται στην τεχνολογία του βαρίστορ (Metal Oxide Varistor, MOV). Το βαρίστορ αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του ψευδαργύρου. Όταν στο υλικό αυτό εφαρμόζεται χαμηλή τάση, το υλικό παρουσιάζει μεγάλη ωμική αντίσταση, επιτρέποντας τη διέλευση ρεύματος πολύ χαμηλής έντασης (μικροαμπέρ). Καθώς η τάση αυξάνεται, το βαρίστορ άγει περισσότερο μέχρι η τάση να υπερβεί το κατώφλι αγωγιμότητας (breakdown voltage) πάνω από το οποίο το ρεύμα αυξάνεται ραγδαία, λόγω της

ραγδαίας αύξησης της αγωγιμότητας του υλικού. Η αύξηση της αγωγιμότητας του βαρίστορ πάνω από ένα κατώφλι τάσης το οποίο καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά και το μέγεθος του βαρίστορ, οδηγεί σε περιορισμό της τάσης στα άκρα του. Με αυτό τον τρόπο, όταν το βαρίστορ συνδέεται μεταξύ των αγωγών τροφοδοσίας και του αγωγού γείωσης, η κρουστική υπέρταση ψαλιδίζεται σε επίπεδο που δεν προκαλεί φθορά στον εξοπλισμό που ακολουθεί. Στα σχήματα 6.1α και 6.1β δίνεται η κυματομορφή της τάσης χωρίς τη χρήση SPD και μετά τη χρήση του, αντίστοιχα.

Η παρούσα μελέτη περιγράφει τα αποτελέσματα των κρουστικών υπερτάσεων στα βιομηχανικά ηλεκτρονικά ισχύος. Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των διατάξεων SPD που χρησιμοποιούνται σήμερα, καθώς και στα προβλήματα και μειονεκτήματα που εμφανίζουν. Παρουσιάζονται επίσης τα διεθνή πρότυπα που ισχύουν για τα SPD. Παρατίθενται επίσης μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχίας διατάξεων προστασίας με επακόλουθη καταστροφή του βιομηχανικού εξοπλισμού. Τέλος, γίνεται αναφορά στη νέα τεχνολογία SPD και τα σημαντικά πλεονεκτήματά της για την προστασία του βιομηχανικού εξοπλισμού και γενικότερα των ηλεκτρονικών ισχύος.



Σχήμα 6.1α - Η κυματομορφή της τάσης χωρίς τη χρήση SPD.



Σχήμα 6.1β - Η κυματομορφή της τάσης μετά τη χρήση SPD.

Οι διατάξεις SPD χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τα στοιχεία προστασίας που χρησιμοποιούν: Discharge Tube (GDT), Silicone Avalanche Diode (SAD) και Metal Oxide Varistor (MOV). Τα στοιχεία αυτά διαφέρουν σημαντικά όσο αφορά τον τρόπο λειτουργίας τους, την απόδοσή τους και την ικανότητά τους να απορροφούν την θερμική ενέργεια που παράγεται κατά την διάρκεια των κρουστικών υπερτάσεων. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται περιληπτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε τύπου προστασίας με ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή τους στις διατάξεις SPD χαμηλής τάσης.

Τα στοιχεία GDT περιλαμβάνουν δυο μεταλλικά ηλεκτρόδια τοποθετημένα μέσα σε κεραμικό σωλήνα ο οποίος περιέχει αέριο ή μείγμα αερίων. Έχουν στιβαρή κατασκευή, χαμηλό κόστος και έχουν υψηλή αντοχή σε κεραυνικά ρεύματα μεγάλης έντασης. Παρουσιάζουν, όμως, τρία βασικά μειονεκτήματα τα οποία καθιστούν τα στοιχεία αυτά ακατάλληλα για την προστασία κρίσιμου και ευαίσθητου ηλεκτρονικού εξοπλισμού:

1. Αργή απόκριση στα κρουστικά ρεύματα. Η τάση ενεργοποίησής τους εξαρτάται από το ρυθμό ανόδου της υπέρτασης με αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις η τάση στα άκρα του, πριν την ενεργοποίηση του GDT, να υπερβαίνει την τάση αντοχής του εξοπλισμού που προστατεύουν προκαλώντας κατά συνέπεια την καταστροφή του.
2. Σε μερικές περιπτώσεις η κατάσταση αγωγιμότητας διατηρείται για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την έλευση του κρουστικού παλμού (follow current). Το φαινόμενο αυτό προκαλεί παροδική διακοπή της τροφοδοσίας του εξοπλισμού με αποτέλεσμα την δυσλειτουργία ή την διακοπή λειτουργίας του εξοπλισμού με όλα τα αρνητικά αποτελέσματα που μια τέτοια κατάσταση επιφέρει στις σύγχρονες βιομηχανικές μονάδες.
3. Η ηλεκτρική εκκένωση που δημιουργείται μεταξύ των ηλεκτροδίων στο εσωτερικό του GDT είναι ένα βίαιο φαινόμενο το οποίο παράγει ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στον παρακείμενο εξοπλισμό, προκαλώντας δυσλειτουργία του.

Τα στοιχεία SAD είναι ημιαγωγικές διατάξεις οι οποίες έχουν ιδιαίτερα γρήγορα απόκριση στα κρουστικά ρεύματα, εμφανίζουν σχετικά χαμηλή παραμένουσα τάση, όμως χαρακτηρίζονται από χαμηλή αντοχή σε ρεύματα μεγάλης έντασης. Η προσπάθεια λύσης του προβλήματος αυτού με την παραλληλία πολλών στοιχείων SAD για την αύξηση του μέγιστου ρεύματος που μπορούν να δεχθούν έχει αποδειχθεί στην πράξη αναποτελεσματική λόγω της αδυναμίας ισοκατανομής του ρεύματος στα παράλληλα στοιχεία SAD.

Τα στοιχεία βαρίστορ MOV εμφανίζουν εξαιρετική αντοχή σε ρεύματα μεγάλης έντασης, έχουν γρήγορη απόκριση και παρουσιάζουν χαμηλή τιμή παραμένουσας τάσης. Για τους λόγους αυτούς τα βαρίστορ έχουν κυριαρχήσει και θεωρούνται ως η πιο αποτελεσματική τεχνολογία για την προστασία του βιομηχανικού ηλεκτρονικού εξοπλισμού από τις υπερτάσεις.

Υπάρχουν δύο τύποι διατάξεων SPD που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία και βασίζονται στη χρήση MOV: οι διατάξεις που χρησιμοποιούν παράλληλα συνδεδεμένα βαρίστορ και οι διατάξεις που χρησιμοποιούν ένα μόνο βαρίστορ.

Τα SPD παράλληλων MOV χρησιμοποιούν κοινά στοιχεία βαρίστορ που διατίθενται στο εμπόριο κυρίως για την τοπική προστασία ηλεκτρονικών πλακετών (PCB) από υπερτάσεις, τα οποία δεν έχουν επαρκή αντοχή για την προστασία από κρουστικά ρεύματα μεγάλης έντασης. Τα στοιχεία αυτά έχουν μικρή διάμετρο, συνήθως μικρότερη από 20mm και περιβάλλονται από ρητίνη για την στεγανοποίηση από την υγρασία, η οποία ρητίνη περιορίζει την απόδοση του βαρίστορ και μειώνει τη διάρκεια ζωής του. Για να αυξήσουν την μέγιστη αντοχή σε κρουστικά ρεύματα, οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν παράλληλα συνδεδεμένα βαρίστορ. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται από την συντριπτική πλειοψηφία των κατασκευαστών SPD. Οι διαφορές των διατάξεων παραλλήλων MOV από διαφορετικούς κατασκευαστές είναι το μέγεθος και ο αριθμός των παράλληλων βαρίστορ. Η εφαρμογή των SPD παραλλήλων MOV στην βιομηχανία έχει αναδείξει τα σοβαρά προβλήματα των διατάξεων αυτών όσο αφορά τόσο το επίπεδο προστασίας που προσφέρουν, όσο και την ασφάλεια που παρέχουν στον εξοπλισμό.

Ο δεύτερος τύπος SPD τεχνολογίας βαρίστορ χρησιμοποιεί ένα μόνο MOV (single-MOV) μεγάλης διαμέτρου (μέχρι και 80mm) και κατασκευασμένο από υλικό υψηλών προδιαγραφών, ειδικό για να αντέχει μεγάλα και επαναλαμβανόμενα κρουστικά πλήγματα τα οποία συχνά εμφανίζονται στην τροφοδοσία των βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Η επικάλυψη με ρητίνη αντικαταστάθηκε με ένα στιβαρό περίβλημα αλουμινίου το οποίο λειτουργεί ταυτόχρονα ως ψήκτρα για το βαρίστορ.

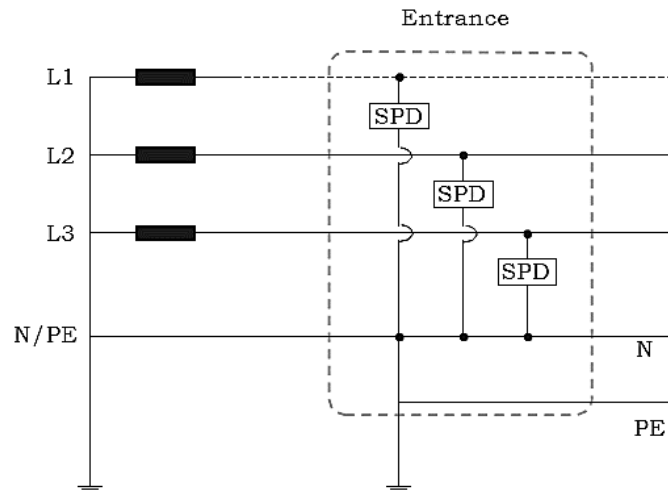
6.3.4 Τρόποι εγκατάστασης

Οι διατάξεις SPD συνδέονται μεταξύ των αγωγών φάσεων, του ουδετέρου και της γης σύμφωνα με τους παρακάτω τρόπους:

- ✓ Προστασία Φάσης-Ουδετέρου (Line to Neutral, L-N): Όταν ένα στοιχείο SPD τοποθετείται μεταξύ του αγωγού τροφοδοσίας και του ουδετέρου αγωγού, προστατεύει από υπερτάσεις που οφείλονται κυρίως σε σφάλματα του δικτύου ηλεκτρικής παροχής.
- ✓ Προστασία Φάσης –Γης (Line to Ground, L-G): Προστασία από κεραυνικά και κρουστικά ρεύματα μεταξύ των φάσεων και της γης.

- ✓ Προστασία Ουδετέρου-Γης (Neutral to Ground, N-G): Προστασία από κεραυνικά και κρουστικά ρεύματα μεταξύ του ουδετέρου και της γης.

Στη γενική περίπτωση μιας τριφασικής παροχής, απαιτούνται 7 στοιχεία προστασίας: 3 στοιχεία μεταξύ φάσεων και γης, 1 στοιχείο μεταξύ ουδετέρου και γης και 3 στοιχεία μεταξύ φάσεων και ουδετέρου. Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία των απαγωγέων υπερτάσεων πριν την μονάδα ισχύος ηλεκτρονικών ισχύος.



Σχήμα 6.2 - Συνδεσμολογία των SPD

6.4 Διεθνή πρότυπα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται περιληπτικά τα διεθνή πρότυπα που ορίζουν τη λειτουργία και την ασφάλεια των διατάξεων SPD. Οι κύριοι τομείς που καλύπτονται από τα πρότυπα είναι:

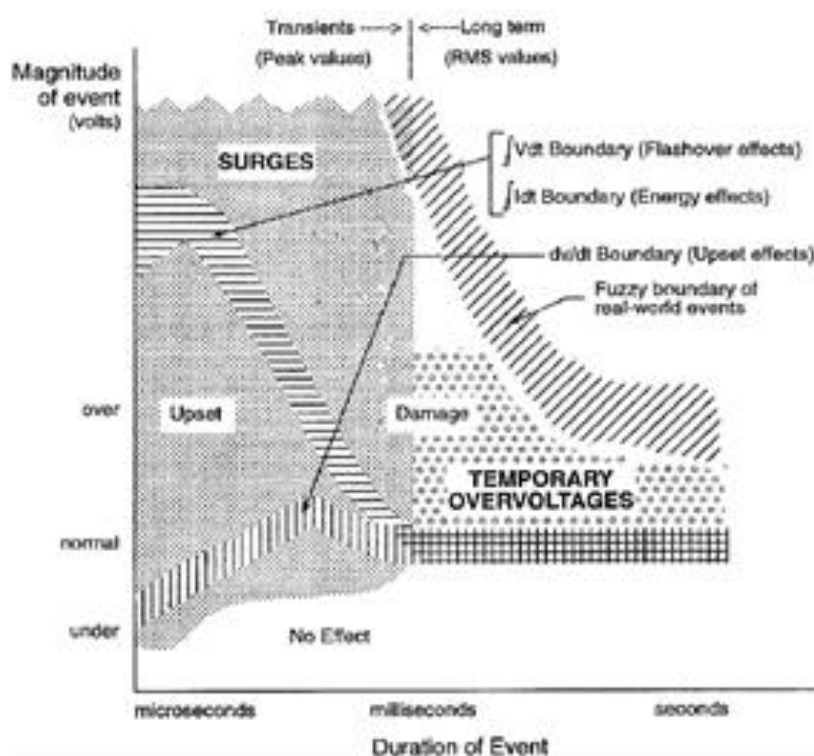
- Η τοποθεσία των SPD μέσα στην ηλεκτρική εγκατάσταση
- Ο καθορισμός των κυματομορφών τάσης και έντασης για τη δοκιμή των SPD
- Η περιγραφή των διατάξεων δοκιμών των SPD
- Ο έλεγχος ασφαλούς λειτουργίας

Κάθε διάταξη SPD πρέπει να είναι πιστοποιημένη σύμφωνα με τα πρότυπα που αναφέρονται στη συνέχεια:

- IEEE C62.41.1-2002. Το πρότυπο αυτό περιγράφει τα γενικά χαρακτηριστικά των υπερτάσεων που εμφανίζονται στα κυκλώματα χαμηλής τάσης. Σύμφωνα με το πρότυπο, οι υπερτάσεις αυτές δεν ξεπερνούν σε διάρκεια την ημιπερίοδο της τάσης του δικτύου

[150]. Μπορεί να εμφανίζονται περιοδικά ή τυχαία μεταξύ των αγωγών φάσεων και ουδετέρου μεταξύ τους, ή μεταξύ των αγωγών αυτών και της γείωσης. Η διάρκεια και το μέγιστο πλάτος μπορεί να είναι αρκετά για να καταστρέψουν τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, όπως περιγράφεται στο διάγραμμα του σχήματος 6.3.

- IEEE C62.41.2-2002. Στο πρότυπο αυτό ορίζονται οι κατηγορίες τοποθέτησης (location categories) των διατάξεων SPD. Στην κατηγορία A περιλαμβάνονται οι διατάξεις που προορίζονται για χρήση στο εσωτερικό μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης, μακριά από τον κύριο πίνακα ηλεκτρικής διανομής [151]. Στην κατηγορία C ανήκουν οι διατάξεις που τοποθετούνται έξω από την εγκατάσταση, μεταξύ δηλαδή του πίνακα διανομής και του μετασχηματιστή χαμηλής/μέσης τάσης της ΔΕΗ, ενώ στην κατηγορία B περιλαμβάνονται οι ενδιάμεσες θέσεις μεταξύ των κατηγοριών A και C.

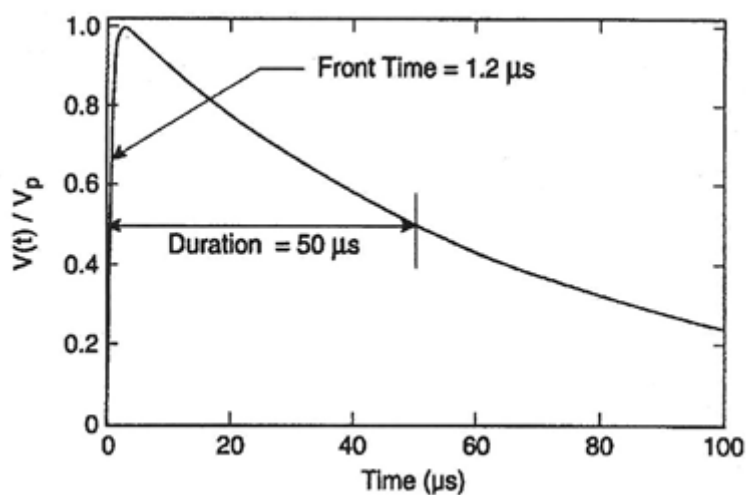


Σχήμα 6.3. Σχέση μεταξύ του πλάτος υπέρτασης, της χρονικής διάρκειάς της, και του αποτελέσματος στον εξοπλισμό.

Στο πρότυπο αυτό καθορίζονται επίσης οι κυματομορφές κρουστικής τάσης και ρεύματος οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της απόδοσης των SPD. Αυτές είναι:

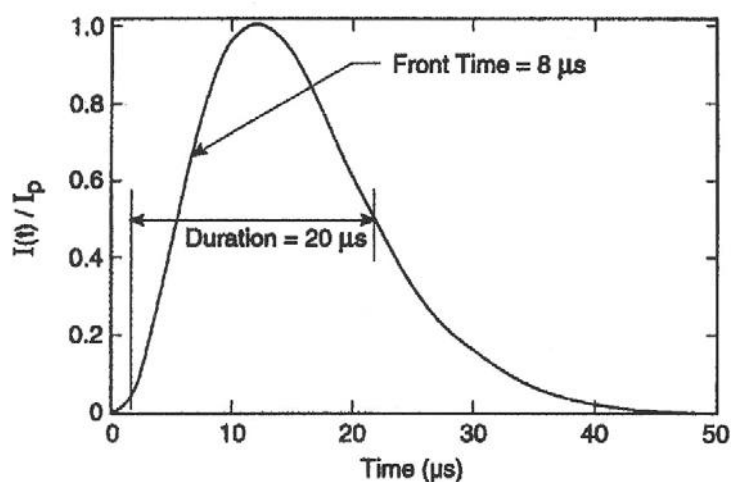
- ✓ Combination wave. Παράγεται από γεννήτρια κρουστικών υπερτάσεων η οποία παράγει παλμό τάσης ανοικτού κυκλώματος 1.2/50μs και ρεύμα βραχυκυκλώματος 8/20μs. Οι δύο αυτές κυματομορφές δίνονται στα σχήματα 6.4 και 6.5 αντίστοιχα.
 - ✓ 100kHz ring wave. Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση φαινομένων συντονισμού που οφείλονται σε κυρίως σε κεραυνικά πλήγματα.
 - ✓ 10/1000μs long wave. Ο μεγάλης διάρκειας παλμός αυτός, ο οποίος έχει χρόνο ανόδου 10μs και διάρκεια 1000μs χρησιμοποιείται για την εξάλειψη της αυτεπαγωγής των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- IEEE C62.45-2002. Στο πρότυπο αυτό περιγράφεται λεπτομερώς η διαδικασία δοκιμών των διατάξεων SPD καθώς και της διαδικασίας ρύθμισης και ελέγχου του εργαστηριακού εξοπλισμού με τον οποίο γίνονται οι δοκιμές. [152]
 - NEMA-LS1. Το διεθνές αυτό πρότυπο ορίζει τον τρόπο με τον οποίο μετράται η μέγιστη τιμή κρουστικού ρεύματος που μπορεί να δεχθεί χωρίς να καταστραφεί μια διάταξη SPD και αποτελεί εργαλείο σύγκρισης διαφορετικών διατάξεων SPD.[153]
 - IEC 61643-1. Το πρότυπο αυτό αναφέρεται σε διατάξεις SPD χαμηλής τάσης οι οποίες εκτίθενται σε άμεσα ή έμμεσα κεραυνικά πλήγματα καθώς και σε κάθε είδους κρουστικές υπερτάσεις. Περιγράφει τα χαρακτηριστικά των SPD και τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να δοκιμάζονται. Περιγράφει επίσης τα χαρακτηριστικά του εργαστηριακού εξοπλισμού που απαιτείται για τις δοκιμές των SPD. Στο πρότυπο αυτό ορίζονται οι 3 κλάσεις των SPD [154]:
 - ✓ Κλάση I: SPD τα οποία ανταπεξέρχονται σε άμεσα κεραυνικά πλήγματα. Η δοκιμή των διατάξεων αυτών γίνεται με παλμό 10/350μs.
 - ✓ Κλάση II και κλάση III: Διατάξεις SPD οι οποίες εκτίθενται σε έμμεσο κεραυνικό πλήγμα και δοκιμάζονται με κρουστικούς παλμούς 1.2/50 – 8/20 μs combination wave, όπως αυτός περιγράφεται στο πρότυπο IEEE C62.41.2-2002 που προαναφέρθηκε. Διατάξεις οι οποίες δοκιμάζονται επιτυχώς με παλμό τάσης μέχρι 20kV και έντασης μέχρι 10kA χαρακτηρίζονται ως κλάση III, ενώ όσες διατάξεις δοκιμάζονται σε μεγαλύτερη τάση και ένταση χαρακτηρίζονται ως κλάση II.

Όλα τα πρότυπα που προαναφέρθηκαν ισχύουν παγκοσμίως. Παρόλα αυτά, τα πρότυπα IEEE κυριαρχούν στην Βόρεια Αμερική, ενώ τα πρότυπα IEC στην Ευρώπη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις δύο αυτές γεωγραφικές περιοχές χρησιμοποιούνται διαφορετικές τεχνολογίες SPD. Στην Ευρώπη έχουν επικρατήσει οι συσκευές τύπου crowbar ή voltage switching, οι οποίες στηρίζονται στη χρήση σπινθηριστών (spark gap, gas tube). Στην Αμερική από την άλλη πλευρά χρησιμοποιούνται οι διατάξεις τύπου voltage limiting ή clamping type (βαρίστορ, δίοδοι, θυρίστορ) προκειμένου να προστατευτεί ο ευαίσθητος εξοπλισμός.



Σχήμα 6.4 - Combination wave – κυματομορφή τάση ανοικτού κυκλώματος.

Ο λόγος για τον οποίο έχει απαγορευθεί η χρήση των συσκευών τύπου σπινθηριστών στην Αμερική για την προστασία ηλεκτρονικών διατάξεων χαμηλής τάσης είναι οι βλάβες που έχει



Σχήμα 6.5 - Combination wave – κυματομορφή ρεύματος βραχυκυκλώματος.

αποδειχθεί ότι προκαλούν κυρίως λόγω ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στον ευαίσθητο ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Κατά τη διάρκεια μιας υπέρτασης, η διάταξη SPD διαρρέεται από κρουστικό ρεύμα μεγάλης έντασης, το οποίο συχνά υπερβαίνει δεκάδες ή εκατοντάδες kA, προκειμένου να καταλήξει στη γη. Παρά το γεγονός ότι στην αγωγή κατάστασή του το SPD παρουσιάζει αρκετά χαμηλή ωμική αντίσταση, εντούτοις λόγω του πολύ υψηλού ρεύματος εκλύεται μεγάλο ποσό θερμότητας στο εσωτερικό του SPD. Η θερμότητα αυτή είναι ικανή να καταστρέψει τη διάταξη SPD. Έχουν αναφερθεί πολλά παραδείγματα καταστροφικής αστοχίας των διατάξεων SPD, η οποία συνοδεύεται από καταστροφή παρακείμενου εξοπλισμού, αλλά και από τραυματισμούς προσωπικού. Μερικά παραδείγματα καταστροφικής αστοχίας των SPD θα δοθούν στη συνέχεια. Καταστροφική αστοχία των SPD μπορεί να προέλθει επίσης από σφάλματα του δικτύου ηλεκτρικής παροχής τα οποία οδηγούν σε παρατεταμένες υπερτάσεις. Για την εξακρίβωση της καταλληλότητας και της ασφάλειας που παρέχουν σε εξοπλισμό και προσωπικό οι διατάξεις SPD, ο οργανισμός ασφάλειας της Αμερικής Underwriters Laboratories, UL, έχει θεσπίσει ειδικό πρότυπο για τα SPD. Το πρότυπο αυτό είναι το UL 1449 2nd Edition [155]. Το πρότυπο αυτό περιγράφει τις μηχανικές και ηλεκτρικές δοκιμές που πρέπει να υποβληθεί με επιτυχία κάθε διάταξη SPD προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια. Μία από τις βασικές δοκιμές που υποβάλλεται κάθε SPD είναι ο έλεγχος αντοχής της σε παρατεταμένη υπέρταση περιορισμένου ρεύματος (limited current abnormal overvoltage test). Με την δοκιμή αυτή ελέγχεται ο τρόπος με τον οποίο αποτυγχάνει η διάταξη (failure mode). Σύμφωνα με τη δοκιμή αυτή, στο SPD εφαρμόζεται υπέρταση η οποία ρυθμίζεται έτσι ώστε το ρεύμα που διαρρέει τη διάταξη να παραμένει σταθερό. Η δοκιμή απαιτεί ότι η διάταξη SPD αντέχει τη θερμότητα που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της για χρονικό διάστημα 7 ωρών χωρίς να εμφανίσει σημάδια καταστροφής, όπως υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας, έκλυση καπνού, ανάφλεξη, ή παραμόρφωση του εξωτερικού περιβλήματος. Η πλειοψηφία των διατάξεων SPD που είναι διαθέσιμες σήμερα βασίζονται στη χρήση εσωτερικού μηχανισμού θερμικής διακοπής ο οποίος διακόπτει το SPD από την τροφοδοσία προτού η διάταξη καταστραφεί βίαια. Πρόσφατα, στο πρότυπο UL 1449 2nd Edition προστέθηκαν νέες, αυστηρότερες δοκιμές οι οποίες απαιτούν την αντοχή των διατάξεων προστασίας όταν αυτές διαρρέονται από ρεύμα μέχρι 1000A rms για 7 ώρες, χωρίς να καταστρέφονται. Οι νέες αυτές δοκιμές, οι οποίες θα τεθούν σε ισχύ από τον Φεβρουάριο του 2007, πιθανόν να καταστήσουν ακατάλληλες πολλές από τις συμβατικές διατάξεις προστασίας που προορίζονται για βιομηχανική χρήση.

7

Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό πρόκειται να γίνει μια συνοπτική παρουσίαση αυτής της διπλωματικής εργασίας και θα αναφερθούν ιδέες για μελλοντικές επεκτάσεις, που αφορούν τα θέματα των τεχνικών συσκευασίας ηλεκτρονικών ισχύος.

7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Οι μετατροπείς ισχύος είναι απαραίτητοι για την παροχή ενέργειας στη σημερινή κοινωνία σε ένα πιο αποτελεσματικό, βιώσιμο αλλά και ελεγχόμενο τρόπο. Κρίνεται απαραίτητο λοιπόν να επιτευχθεί όσον το δυνατόν μεγαλύτερη απόδοση σε ένα τέτοιο σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος. Όπως ήδη έχει αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, αυτό είναι ένα πρόβλημα, το οποίο για να επιλυθεί θα πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφορες παράμετροι, όπως π.χ. η πυκνότητα ισχύος και η αξιοπιστία. Η επίλυση ενός τόσο σύνθετου και πολύπλοκου προβλήματος είναι η ανάλυση, η σχεδίαση και η επιλογή χαρακτηριστικών του εν λόγω συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος, γνωρίζοντας ότι πολλές από τις επιλογές αυτές αντικρούονται μεταξύ τους καθιστώντας ακόμη πιο δύσκολη την βέλτιστη υλοποίηση. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι για παράδειγμα η μείωση της διακοπτικής συχνότητας, που φαινομενικά συντελεί στη μείωση των διακοπτικών απωλειών ισχύος, αλλά οδηγεί στην αύξηση ηλεκτρομαγνητικού θορύβου αλλά και στην μείωση της ποιότητας των μετατροπέων ισχύος λόγω των υψηλών τιμών κλίσεων ρεύματος (di/dt) και τάσης (dv/dt).

Συνεπώς, ένας ηλεκτρολόγος μηχανικός που πρόκειται να ασχοληθεί με τη σχεδίαση ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος οφείλει να εξετάσει την υλοποίηση αυτή από διαφορετικές προσεγγίσεις αρχικά ξεχωριστά και εν συνεχεία στο σύνολο τους. Οι προσεγγίσεις για τις τεχνικές συσκευασίας ενός συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος διακρίνονται με βάση τη θερμική

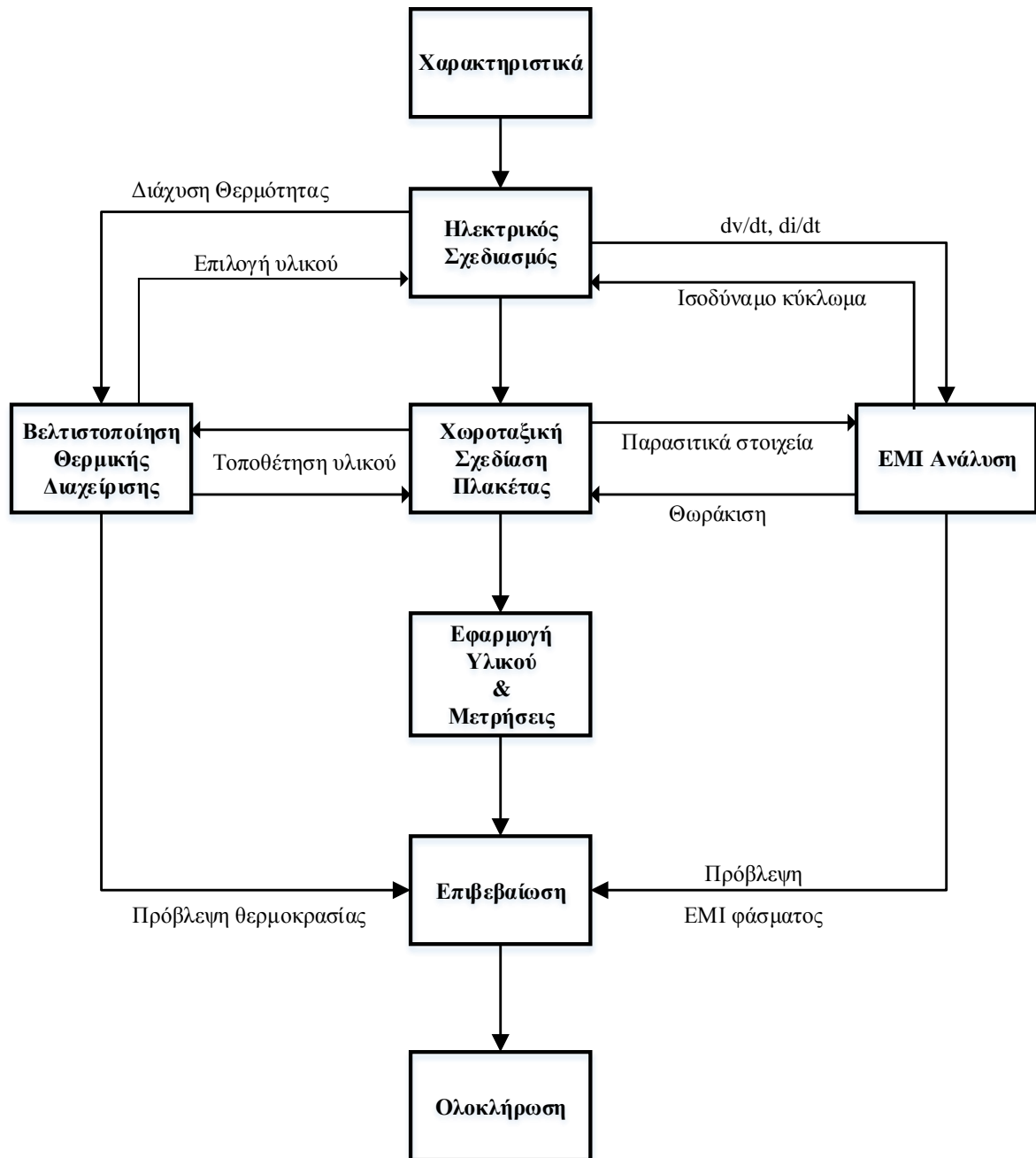
διαχείριση, την ηλεκτρομαγνητική διαχείριση, τη σχεδίαση του τυπωμένου κυκλώματος καθώς και τη προστασία όλων των διατάξεων ισχύος από υπερτάσεις.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Σε μετατροπείς ισχύος υψηλής πυκνότητας, όπως κατέστη κατανοητό η ηλεκτρική, η θερμική αλλά και η ηλεκτρομαγνητική απόδοση είναι πολύ σημαντικές και αναπόσπαστες πτυχές για τη βέλτιστη σχεδίασή τους. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητο ο σχεδιαστής να βελτιώσει την απόδοση ενός συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος, να βελτιστοποιήσει τη θερμική διαχείριση ώστε το σύστημα να λειτουργεί σε ικανοποιητικά επίπεδα θερμοκρασιών που δε επηρεάζουν ή βλάπτουν τη λειτουργία των στοιχείων που το απαρτίζουν, και να ελαχιστοποιήσει στο μέγιστο δυνατό τις αγωγίμες αλλά και ακτινοβολούμενες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Στο σχήμα 7.1 απεικονίζεται ένα δομικό διάγραμμα, που παρουσιάζει πως οι παραπάνω διαδικασίες, που τελικά θα οδηγήσουν στη βέλτιστη υλοποίηση, μπορούν να γίνουν παράλληλα και σε συνδυασμό μεταξύ τους. Η όλη διαδικασία αρχικά δέχεται ως είσοδο τα χαρακτηριστικά, που απαιτείται να φέρει ένα σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος εν γένει, και στη συγκεκριμένη περίπτωση ο μετατροπέας ισχύος. Στη συνέχεια ακολουθεί ο ηλεκτρικός σχεδιασμός, από τον οποίο προκύπτει η βελτιστοποίηση της θερμικής διαχείρισης η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση καθώς και η χωροταξική σχεδίαση του κυκλώματος (πλακέτας – pcb). Αυτά μεταξύ τους μπορούν να αλληλοεπιδρούν, καθώς έτσι η ανάλυση είναι πιο ρεαλιστική μιας και η βελτιστοποίηση ενός τμήματος/ block του διαγράμματος μπορεί να επηρεάζει την απόδοση ενός άλλου, με το οποίο συνδέεται. Τέλος, γίνεται η συναρμολόγηση καθώς και οι απαραίτητες μετρήσεις, ώστε να πιστοποιηθεί ότι το εν λόγω σύστημα διασφαλίζει όλα τα κριτήρια, που έχουν τεθεί αρχικώς.

Όλη η παραπάνω διαδικασία θα μπορούσε να υλοποιηθεί σε κάποιο λογισμικό, όπου θα μπορούσε να λάβει αποφάσεις, με βάση κάποια κριτήρια και να οδηγηθεί στο επιθυμητό αποτέλεσμα, που θα ήταν η βέλτιστη τεχνική συσκευασίας ενός μετατροπέα ισχύος σε όλα τα επίπεδα, όπως στο επίπεδο πλακέτας, στη θερμική διαχείριση, στην ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση κ.ά. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι υπάρχει όλο το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, χρησιμοποιώντας γνώσεις θεωρητικών μαθηματικών και ειδικά συνδυαστικής βελτιστοποίησης, Αναλυτικότερα, είναι εφικτό να ορισθεί για κάθε τμήμα/ μπλοκ μια αντικειμενική συνάρτηση, η οποία θα πρέπει να πληροί κάποιους περιορισμούς, και να απαιτείται η ελαχιστοποίηση ή η μεγιστοποίηση αυτής κατά το δοκούν, κι εν συνεχεία μια

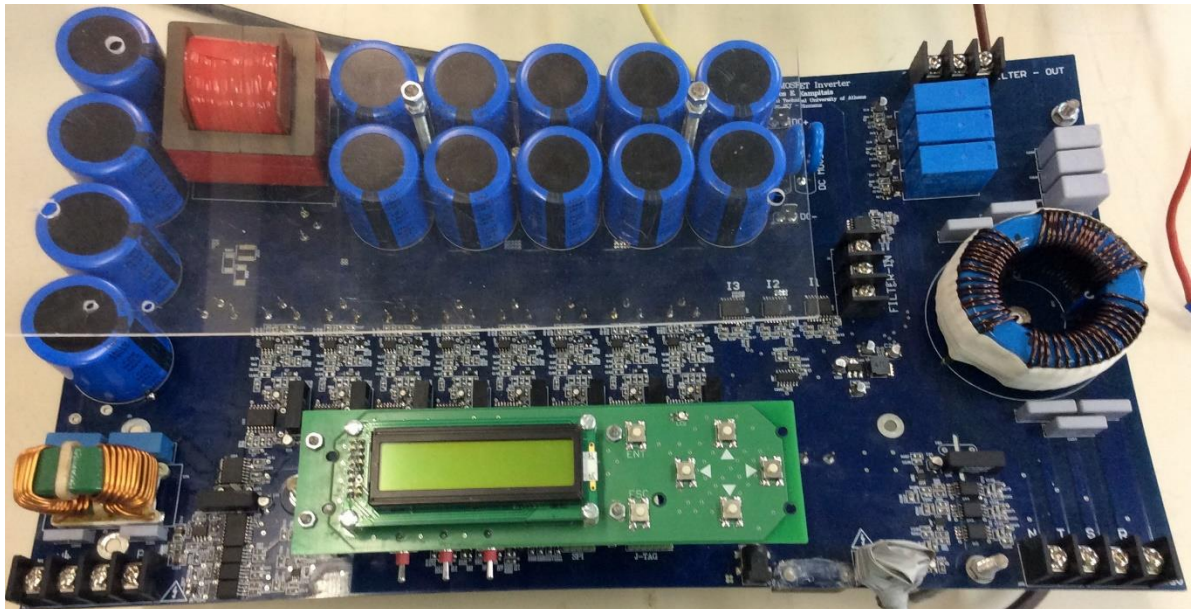


Σχήμα 7.1 – Παράλληλη προσέγγιση σχεδίασης ενός μετατροπέα υψηλής πυκνότητας ισχύος.

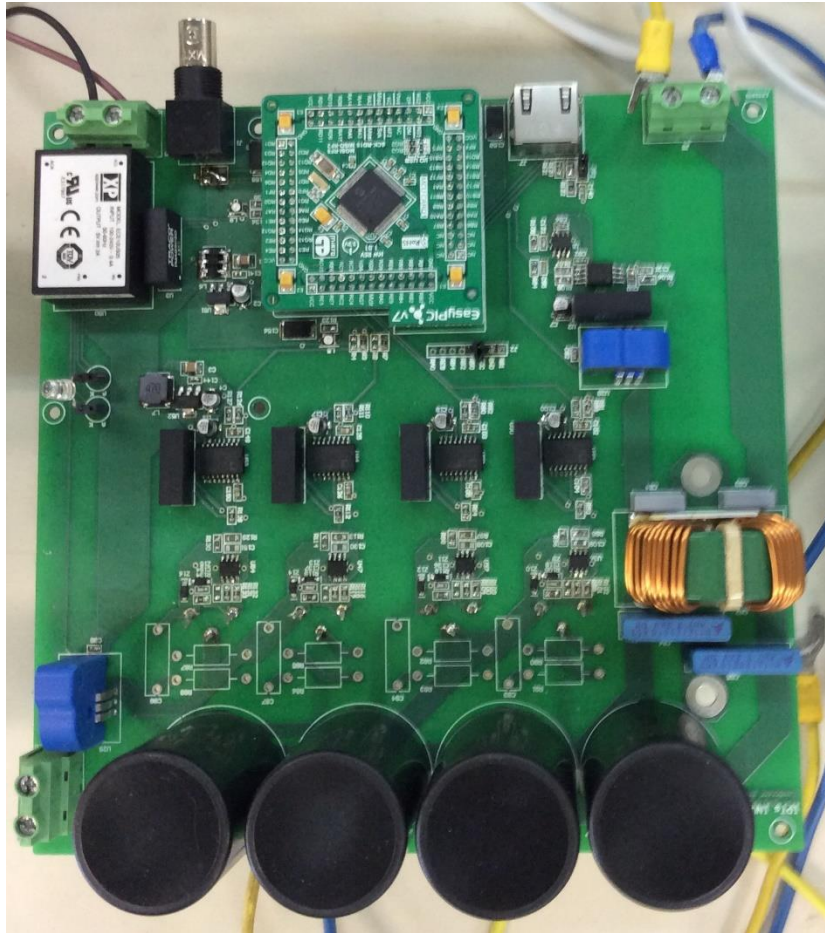
συνολική αντικειμενική συνάρτηση, που θα περιγράφει το σύστημα στο σύνολο του και θα λαμβάνει υπόψη της ως παραμέτρους εισόδου τα αποτελέσματα των αντικειμενικών συναρτήσεων των επιμέρους τμημάτων.

7.3 Παράδειγμα υλοποίησης μετατροπέα ισχύος

Στα παρακάτω σχήματα, απεικονίζονται διάφορες φωτογραφίες από την υλοποίηση ενός μετατροπέα ισχύος στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος. Εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε σε όλα τα στάδια της υλοποίησης αυτής, την τεχνική συσκευασίας που έχει ακολουθηθεί.



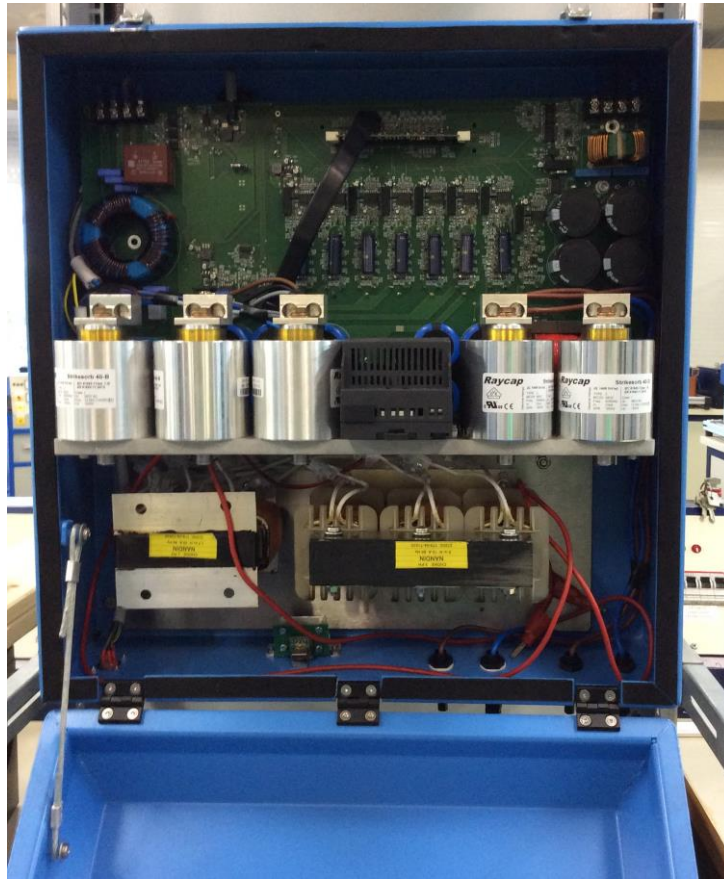
Σχήμα 7.2 – Κάτοψη πλακέτας #1 (PCB) μετατροπέα ισχύος



Σχήμα 7.3 – Κάτοψη πλακέτας #2 (PCB) μετατροπέα ισχύος



Σχήμα 7.4 – Πλάγια όψη πλακέτας #1 (PCB) μετατροπέα ισχύος με σύστημα ψύξης



Σχήμα 7.5α – Τελική συσκευασία μετατροπέα ισχύος



Σχήμα 7.5β – Τελική συσκευασία μετατροπέα ισχύος

8

Βιβλιογραφία

1. Bose, Bimal K. "Power electronics-a technology review." *Proceedings of the IEEE* 80.8 (1992): 1303-1334.
2. Centre for Power Electronic Systems (CPES), www.cpes.vt.edu
3. Alex, Lidow. "The Power Conversion Process as a Prosperity Machine." *International Rectifier*, <http://www.irf.com> (1999).
4. The European Motor Challenge Programme, available at: www.eva.ac.at/publ/pdf/motor_brochure.pdf
5. Baliga, B. Jayant. "Enhancement-and depletion-mode vertical-channel MOS gated thyristors." *Electronics Letters* 15.20 (1979): 645-647.
6. Schlapbach, U., et al. "1200V IGBTs operating at 200Å° C? An investigation on the potentials and the design constraints." *Power Semiconductor Devices and IC's, 2007. ISPSD'07. 19th International Symposium on. IEEE, 2007.*
7. Biela, Juergen, Uwe Badstuebner, and Johann W. Kolar. "Impact of power density maximization on efficiency of DC–DC converter systems." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 24.1 (2009): 288-300.
8. Majumdar, Gourab. "Recent technologies and trends of power devices." *Physics of Semiconductor Devices, 2007. IWPSD 2007. International Workshop on. IEEE, 2007.*
9. Franquelo, Leopoldo G., Jose I. Leon, and Eugenio Dominguez. "New trends and topologies for high power industrial applications: The multilevel converters solution." *Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2009. POWERENG'09. International Conference on. IEEE, 2009.*
10. Van Wyk, J. D. "Power electronics technology at the dawn of a new century-past achievements and future expectations." *Power Electronics and Motion Control Conference, 2000. Proceedings. IPEMC 2000. The Third International. Vol. 1. IEEE, 2000.*
11. Pavier, Mark, et al. "High frequency DC: DC power conversion: The influence of package parasitics." *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC'03. Eighteenth Annual IEEE. Vol. 2. IEEE, 2003.*
12. Evans, Peter D., and B. I. L. L. Heffernan. "Electromagnetic considerations in power electronic converters." *Proceedings of the IEEE* 89.6 (2001): 864-875.
13. International Rectifier, www.irf.com
14. Ferreira, J. A., and J. Popovic. "Packaging, integration, thermal management—from the state of the art to future trends." *Proceedings PCIM. 2003.*
15. J. Popović, J. A. Ferreira, F. van Horck, "Inventory and cost mapping of current technology for power supplies used within Philips Power Solutions" Internal report, Philips Power Solutions, 2002.
16. Cheasty, Philip, et al. "Benchmark of power packaging for DC/DC and AC/DC converters." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 17.1 (2002): 141-150.
17. Bergman, Theodore L., Frank P. Incropera, and Adrienne S. Lavine. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011.

18. Wang, W., et al. "Bridging the gap: package level and system level thermal modeling." Electronic Components & Technology Conference, 2000. 2000 Proceedings. 50th. IEEE, 2000.
19. Bar-Cohen, Avram, Tov Elperin, and Rami Eliasi. "θ_{jc} characterization of chip packages-justification, limitations, and future." Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on 12.4 (1989): 724-731.
20. Rosten, H. I., et al. "Final report to SEMITHERM XIII on the European-funded project DELPHI-the development of libraries and physical models for an integrated design environment." Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1997. SEMI-THERM XIII., Thirteenth Annual IEEE. IEEE, 1997.
21. Lasance, Clemens, et al. "A novel approach for the thermal characterization of electronic parts." Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1995. SEMI-THERM XI., Eleventh Annual IEEE. IEEE, 1995.
22. Andrews, James A. "Package thermal resistance model: dependency on equipment design." Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on 11.4 (1988): 528-537.
23. JEDEC JC15.1 is a committee of JEDEC standardisation organisation of the Electronic Industries Alliance (EIA), Published specifications are available at <http://www.jedec.org>.
24. Xu, Weiran, Sarang Shidore, and Paul Gauche. "Creation and validation of a two-resistor compact model of a Plastic Quad Flat Pack (PQFP) using CFD." SPIE proceedings series. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000.
25. Garcia, Enrico A., and Chia-Pin Chiu. "Two-resistor compact modeling for multiple die and multi-chip packages." Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2005 IEEE Twenty First Annual IEEE. IEEE, 2005.
26. Joiner, Bennett, and Vance Adams. "Measurement and simulation of junction to board thermal resistance and its application in thermal modeling." Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1999. Fifteenth Annual IEEE. IEEE, 1999.
27. Shidore, Sarang, Vance Adams, and T-YT Lee. "A study of compact thermal model topologies in CFD for a flip chip plastic ball grid array package." Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on 24.2 (2001): 191-198.
28. Krueger, William, and Avram Bar-Cohen. "Thermal characterization of a PLCC-expanded R_{jc} methodology." Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on 15.5 (1992): 691-698.
29. Bar-Cohen, Avram, and William B. Krueger. "Thermal characterization of chip packages-evolutionary development of compact models." Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1997. SEMI-THERM XIII., Thirteenth Annual IEEE. IEEE, 1997.
30. Le Jannou, Jean Pierre, and Yves Huon. "Representation of thermal behavior of electronic components for the creation of a databank." Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on 14.2 (1991): 366-373.
31. Lasance, Clemens JM, Dick Den Hertog, and Peter Stehouwer. "Creation and evaluation of compact models for thermal characterisation using dedicated optimisation software." Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1999. Fifteenth Annual IEEE. IEEE, 1999.
32. Assouad, Y., F. Gatfosse, and T. Gautier. "Thermal characterization and modelling of EFD transformers, applying DELPHI methodology." Eurotherm series (1998): 238-245.
33. He, Jun, Vivek Mehrotra, and Michael C. Shaw. "Thermal design and measurements of IGBT power modules: transient and steady state." Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE. Vol. 2. IEEE, 1999.

34. Christiaens, Filip, et al. "A generic methodology for deriving compact dynamic thermal models, applied to the PSGA package." *Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, IEEE Transactions on* 21.4 (1998): 565-576.
35. Székely, Vladimír. "THERMODEL: a tool for compact dynamic thermal model generation." *Microelectronics Journal* 29.4 (1998): 257-267.
36. Yun, Chan-Su, et al. "Static and dynamic thermal characteristics of IGBT power modules." *Power Semiconductor Devices and ICs, 1999. ISPSD'99. Proceedings. The 11th International Symposium on. IEEE, 1999.*
37. Igc, P. M., et al. "Thermal model of power semiconductor devices for electro-thermal circuit simulations." *Microelectronics, 2002. MIEL 2002. 23rd International Conference on. Vol. 1. IEEE, 2002.*
38. Rencz, M., et al. "Inclusion of RC compact models of packages into board level thermal simulation tools." *Semiconductor Thermal Measurement and Management, 2002. Eighteenth Annual IEEE Symposium. IEEE, 2002.*
39. Shammas, Noel YA, M. P. Rodriguez, and F. Masana. "A simple method for evaluating the transient thermal response of semiconductor devices." *Microelectronics Reliability* 42.1 (2002): 109-117.
40. Siegel, B. S. "Measuring thermal resistance is key to a cool semiconductor." *Electronics* 51.14 (1978): 121-126.
41. Drogenik, Uwe, et al. "Computationally efficient integration of complex thermal multi-chip power module models into circuit simulators." *Power Conversion Conference-Nagoya, 2007. PCC'07. IEEE, 2007.*
42. Gerstenmaier, York C., and Gerhard KM Wachutka. "Efficient calculation of transient temperature fields responding to fast changing heatsources over long duration in power electronic systems." *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on* 27.1 (2004): 104-111.
43. Bagnoli, PAULO EMILIO, et al. "Thermal resistance analysis by induced transient (TRAIT) method for power electronic devices thermal characterization. I. Fundamentals and theory." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 13.6 (1998): 1208-1219.
44. Székely, Vladimír. "A new evaluation method of thermal transient measurement results." *Microelectronics Journal* 28.3 (1997): 277-292.
45. Székely, Vladimír, and Tran Van Bien. "Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method." *Solid-State Electronics* 31.9 (1988): 1363-1368.
46. Murthy, K., and R. E. Bedford. "Transformation between Foster and Cauer equivalent networks." *Circuits and Systems, IEEE Transactions on* 25.4 (1978): 238-239.
47. Johns, Peter, and Graham Butler. "The consistency and accuracy of the TLM method for diffusion and its relationship to existing methods." *International journal for numerical methods in engineering* 19.10 (1983): 1549-1554.
48. Hocine, R., A. Boudghene Stambouli, and A. Saidane. "A three-dimensional TLM simulation method for thermal effect in high power insulated gate bipolar transistors." *Microelectronic engineering* 65.3 (2003): 293-306.
49. Hocine, R., et al. "TLM method for thermal investigation of IGBT modules in PWM mode." *Microelectronic Engineering* 86.10 (2009): 2053-2062.
50. Masana, F. N. "A new approach to the dynamic thermal modelling of semiconductor packages." *Microelectronics Reliability* 41.6 (2001): 901-912.
51. Greenberg, Michael D. *Foundations of applied mathematics.* Courier Corporation, 2013.
52. Koh, Jeongwook, G. Noebauer, and Chul An. "Generation of the electrothermal Cauer RC model using a recursive method." *Solid-State Device Research Conference, 2001. Proceeding of the 31st European. IEEE, 2001.*

53. Sofia, John W. "Analysis of thermal transient data with synthesized dynamic models for semiconductor devices." *Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, IEEE Transactions on* 18.1 (1995): 39-47.
54. Korvink, Jan G., and Evgenii B. Rudnyi. "Computer-aided engineering of electro-thermal MST devices: moving from device to system simulation." *Proc. EUROSIME. Vol. 3.* 2003.
55. Augustin, Adam, and Torsten Hauck. "Transient thermal compact models for circuit simulation." *Proceedings of the 24th CADFEM meeting, International Congress on FEM Technology with 2006 German ANSYS Conference, Stuttgart, Germany.* No. 2.5. 2006.
56. Tan, Sheldon, and Lei He. *Advanced model order reduction techniques in VLSI design.* Cambridge University Press, 2007.
57. Freund, Roland W. "Krylov-subspace methods for reduced-order modeling in circuit simulation." *Journal of Computational and Applied Mathematics* 123.1 (2000): 395-421.
58. Evans, Paul, and C. Mark Johnson. "Fast extraction of dynamic thermal impedance for multi-chip power modules." *Integrated Power Electronics Systems (CIPS), 2010 6th International Conference on.* IEEE, 2010.
59. Codecasa, Lorenzo, Dario D'Amore, and Paolo Maffezzoni. "An Arnoldi based thermal network reduction method for electro-thermal analysis." *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on* 26.1 (2003): 186-192.
60. Bai, Zhaojun, et al. "Error bound for reduced system model by Padé approximation via the Lanczos process." *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on* 18.2 (1999): 133-141.
61. Obinata, Goro, and Brian Anderson. *Model reduction for control system design.* Springer-Verlag New York, Inc., 2001.
62. R. Guyan, "Reduction of stiffness and mass matrices," *The American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Journal*, vol. 3, no. 2, p. 380, 1965.
63. Qu, Zu-Qing. *Model Order Reduction Techniques with Applications in Finite Element Analysis: With Applications in Finite Element Analysis.* Springer Science & Business Media, 2004.
64. ANSYS. <http://www.ansys.com/>: ANSYS Inc.
65. Rudnyi, Evgenii B., et al. "mor4ansys: Generating compact models directly from ANSYS models." *Technical Proceedings of the 2004 Nanotechnology Conference and Trade Show, Nanotech. Vol. 2.* 2004.
66. Bechtold, Tamara, Evgenii B. Rudnyi, and Jan G. Korvink. "Automatic generation of compact electro-thermal models for semiconductor devices." *IEICE Transactions on Electronics* 86.3 (2003): 459-465.
67. Sabry, Mohamed-Nabil, and Hossam Saleh Abdelmeguid. "Compact thermal models: A global approach." *Journal of Electronic Packaging* 130.4 (2008): 041107.
68. Strang, Gilbert, and George J. Fix. *An analysis of the finite element method.* Vol. 212. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1973.
69. Korvink, Jan, and Oliver Paul. *MEMS: A practical guide of design, analysis, and applications.* Springer Science & Business Media, 2010.
70. Barnes, John J., and Ronald J. Lomax. "Finite-element methods in semiconductor device simulation." *IEEE Transactions on Electron Devices* 24 (1977): 1082-1089.
71. Luo, Zhaohui. *A thermal model for IGBT modules and its implementation in a real time simulator.* Diss. University of Pittsburgh, 2002.
72. Luo, Zhaohui, Hyungkeun Ahn, and M. A. E. Nokali. "A thermal model for insulated gate bipolar transistor module." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 19.4 (2004): 902-907.
73. Ryu, Sehwan, et al. "Thermal analysis of PT IGBT by using ANSYS." *Power Electronics, 2007. ICPE'07. 7th International Conference on.* IEEE, 2007.

74. LeVeque, Randall J. Finite volume methods for hyperbolic problems. Vol. 31. Cambridge university press, 2002.
75. Mentor Graphics Corporation. Wilsonville, OR, USA: Online: www.mentor.com/products/mechanical/multimedia/otherm, 2008.
76. Zhou, Z., P. M. Holland, and P. Igit. "Compact thermal model of a three-phase IGBT inverter power module." *Microelectronics*, 2008. MIEL 2008. 26th International Conference on. IEEE, 2008.
77. Cho, Eric, Eric Tan, and Yur-Tsai Lin. "Thermal characterization of cavity-down TBGA package with Flotherm simulation." *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, 2000. Sixteenth Annual IEEE. IEEE, 2000.
78. Swan, Ian R., Angus T. Bryant, and Philip A. Mawby. "Fast thermal models for power device packaging." *Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008. IAS'08. IEEE. IEEE, 2008.
79. Courant, Richard, Kurt Friedrichs, and Hans Lewy. "Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik." *Mathematische Annalen* 100.1 (1928): 32-74.
80. Incropera, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons, 2011.
81. Korvink, Jan, and Oliver Paul. MEMS: A practical guide of design, analysis, and applications. Springer Science & Business Media, 2010.
82. Noye, John. "Finite difference techniques for partial differential equations." *North-Holland mathematics studies* 83 (1984): 95-354.
83. Fukahori, Kiyoshi, and Paul R. Gray. "Computer simulation of integrated circuits in the presence of electrothermal interaction." *Solid-State Circuits, IEEE Journal of* 11.6 (1976): 834-846.
84. Hefner, Allen R., and David L. Blackburn. "Simulating the dynamic electrothermal behavior of power electronic circuits and systems." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 8.4 (1993): 376-385.
85. Khatir, Zoubir, and Stéphane Lefebvre. "Thermal analysis of power cycling effects on high power IGBT modules by the boundary element method." *Semiconductor Thermal Measurement and Management*, 2001. Seventeenth Annual IEEE Symposium. IEEE, 2001.
86. Carubelli, S., and Zoubir Khatir. "Experimental validation of a thermal modelling method dedicated to multichip power modules in operating conditions." *Microelectronics journal* 34.12 (2003): 1143-1151.
87. Guven, Ibrahim, Cho Lik Chan, and Erdogan Madenci. "Transient two-dimensional thermal analysis of electronic packages by the boundary element method." *Advanced Packaging, IEEE Transactions on* 22.3 (1999): 476-486.
88. Rinaldi, Niccolò. "Generalized image method with application to the thermal modeling of power devices and circuits." *Electron Devices, IEEE Transactions on* 49.4 (2002): 679-686.
89. Haji-Sheikh, A., and J. V. Beck. "Temperature solution in multi-dimensional multi-layer bodies." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45.9 (2002): 1865-1877.
90. Cole, Kevin David, A. Haji-Sheikh, and B. Litkouhi. Heat conduction using Green's functions. Washington DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1992.
91. Janicki, Marcin, Gilbert De Mey, and Andrzej Napieralski. "Thermal analysis of layered electronic circuits with Green's functions." *Microelectronics journal* 38.2 (2007): 177-184.
92. Haji-Sheikh, A. "Peak temperature in high-power chips." *Electron Devices, IEEE Transactions on* 37.4 (1990): 902-907.
93. Gerstenmaier, York C., Alberto Castellazzi, and Gerhard KM Wachutka. "Electrothermal simulation of multichip-modules with novel transient thermal model and

- time-dependent boundary conditions." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 21.1 (2006): 45-55.
94. Du, B., et al. "Transient thermal analysis of power devices based on Fourier-series thermal model." *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE. IEEE, 2008.*
 95. Zare, Firuz. "EMI issues in modern power electronic systems." *The IEEE EMC Society Newsletters* 221 (2009): 53-58. Ott, Henry W. *Electromagnetic compatibility engineering.* John Wiley & Sons, 2011.
 96. Paul, Clayton R. *Introduction to electromagnetic compatibility.* Vol. 184. John Wiley & Sons, 2006.
 97. Langguth, Wolfgang. "Earthing & EMC Fundamentals of Electromagnetic Compatibility (EMC)." Saarbrücken: Copper Development Association (2006).
 98. Stratton, Julius Adams. *Electromagnetic theory.* John Wiley & Sons, 2007.
 99. Kodali, V. Prasad. *Engineering electromagnetic compatibility: principles, measurements, technologies, and computer models.* Wiley-IEEE Press, 2001.
 100. Μανιάς Στέφανος, Μοσχάκης Μάριος. *Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα σε συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος.* 2001.
 101. Morgan, David. *A handbook for EMC testing and measurement.* Vol. 8. Iet, 1994.
 102. Gerke, Daryl, William Kimmel, and Jeffrey P. Mills. "29.1 Grounding and Shielding." (2004).
 103. Bjorklof, Dag. "EMC standards and their application." *Computer Standards & Interfaces* 20.6 (1999): 479-480.
 104. Williams, Tim, and Keith Armstrong. *EMC for Systems and Installations.* Newnes, 1999.
 105. Armstrong, Keith. "Design Techniques for EMC." six parts), *UK EMC Journal*(1999).
 106. Armstrong, Keith. *EMC for Printed Circuit Boards.* Nutwood UK Ltd, 2007.
 107. Darnell, Paul S. "History, Present Status, and Future Developments of Electronic Components." *Component Parts, IRE Transactions on* 5.3 (1958): 124-129.
 108. Sargrove, J. A. "New methods of radio production." *Radio Engineers, Journal of the British Institution of* 7.1 (1947): 2.
 109. Stockmeier, T., and W. Tursky. "Present and future of power electronics modules." *Proceedings of Center for Power Electronics Systems (CPES) Seminar.* 2000.
 110. Van Wyk, Jacobus Daniel, et al. "A future approach to integration in power electronics systems." *Industrial Electronics Society, 2003. IECON'03. The 29th Annual Conference of the IEEE.* Vol. 1. IEEE, 2003.
 111. Popović, Jelena, and J. A. Ferreira. "An approach to deal with packaging in power electronics." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 20.3 (2005): 550-557.
 112. Boothroyd, Geoffrey. "Product design for manufacture and assembly." *Computer-Aided Design* 26.7 (1994): 505-520.
 113. Shina, Sammy G. *Concurrent engineering and design for manufacture of electronics products.* Springer Science & Business Media, 2012.
 114. Postle, A. "Problems in Manufacturing component Parts for Automation." *Production Techniques, IRE Transactions on* 3.1 (1958): 9-10.
 115. Ansley, Arthur C. "A Small Three-Dimensional Printed Wiring Module." *Production Techniques, IRE Transactions on* 3.1 (1958): 26-30.
 116. Liang, Zhenxian, et al. "Integrated packaging of a 1 kW switching module using a novel planar integration technology." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 19.1 (2004): 242-250.
 117. Ferreira, Jan Abraham, and J. Daan Van Wyk. "Electromagnetic energy propagation in power electronic converters: toward future electromagnetic integration." *Proceedings of the IEEE* 89.6 (2001): 876-889.

118. Evans, Peter D., and Bill Heffernan. "Electromagnetic considerations in power electronic converters." *Proceedings of the IEEE* 89.6 (2001): 864-875.
119. International Rectifier, www.irf.com.
120. Fairchild Semiconductors, www.fairchildsemi.com
121. Youghal, Ireland. "A review of planar magnetic techniques and technologies." (2001).
122. Taraseiskey, Haim. "Power hybrid circuit design and manufacture." *Microelectronics Reliability* 6.37 (1997): 976.
123. Koaeurope, www.koaeurope.de
124. Musunuri, Surya, et al. "Design issues for monolithic DC-DC converters." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 20.3 (2005): 639-649.
125. Katayama, Yasushi, et al. "High-power-density MHz-switching monolithic DC-DC converter with thin-film inductor." *Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual. Vol. 3. IEEE, 2000.*
126. Cheasty, Philip, et al. "Benchmark of power packaging for DC/DC and AC/DC converters." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 17.1 (2002): 141-150.
127. Scheuermann, U., and W. Tursky. "IPMs zwischen Modul und intelligenten leistungselektronischen Antriebssystemen." *Proc. Fachtagung Elektrische Energiewandlungssysteme* (2002): 105-110.
128. Semikron, www.semikron.de
129. Krein, Philip T. *Elements of power electronics*. Vol. 126. New York: Oxford University Press, 1998.
130. Van Wyk, J. D. "Power electronics technology at the dawn of a new century-past achievements and future expectations." *Power Electronics and Motion Control Conference, 2000. Proceedings. IPEMC 2000. The Third International. Vol. 1. IEEE, 2000.*
131. National Institute of Standards and Technology, <http://www.boulder.nist.gov>
132. Blackwell, Glenn R., ed. *The electronic packaging handbook*. CRC Press, 1999.
133. Gerber, Mark, et al. "Integral 3-D thermal, electrical and mechanical design of an automotive DC/DC converter." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 20.3 (2005): 566-575.
134. Bar-Cohen, Avram, and Allan D. Kraus. "Advances in thermal modeling of electronic components and systems." (1988).
135. Hefner, Allen R., and David L. Blackburn. "Simulating the dynamic electrothermal behavior of power electronic circuits and systems." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 8.4 (1993): 376-385.
136. Ferreira, Jan Abraham. *Electromagnetic modelling of power electronic converters*. Springer Science & Business Media, 2013.
137. Zhang, Michael Tao. *Electrical, thermal, and EMI designs of high-density, low-profile power supplies*. Diss. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
138. Gerber, Mariana, Jan Abraham Ferreira, and Ivan W. Hofsjajer. "A volumetric optimization of a low-pass filter." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 38.5 (2002): 1432-1440.
139. Chen, Jonah Zhou, et al. "Integrated electrical and thermal analysis of integrated power electronics modules using iSIGHT." *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE. Vol. 2. IEEE, 2001.*
140. Ferreira, J. A., and M. Gerber. "Three dimensional integration based on power module technology." *Proceedings of the 2nd International Conference on Integrated Power Systems (CIPS)*. Virginia Tech, 2002.
141. Rosten, Harvey, Clemens JM Lasance, and John D. Parry. "The world of thermal characterization according to DELPHI-Part I: Background to DELPHI." *Components,*

- Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, *IEEE Transactions on* 20.4 (1997): 384-391.
142. Harper, Charles A., and Martin Boniface Miller. *Electronic packaging, microelectronics, and interconnection dictionary*. McGraw-Hill Professional Publishing, 1993.
 143. Suh, Nam P. *The principles of design*. Vol. 990. New York: Oxford University Press, 1990.
 144. Hofsjager, Ivan W., Jan Ferreira, and J. Daan Van Wyk. "Design and analysis of planar integrated LCT components for converters." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 15.6 (2000): 1221-1227.
 145. Iwamoto, Hideo, et al. "New intelligent power modules for appliance motor control." *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE*. Vol. 2. IEEE, 2001.
 146. Baliga, Jayant B. "An overview of smart power technology." *Electron Devices, IEEE Transactions on* 38.7 (1991): 1568-1575.
 147. Infineon Technologies, www.infineon.com.
 148. Perret, C., Ch Schaeffer, and J. Boussey. "Integration of micro heat sink in silicon technology." *Integrated Power Packaging, 1998. IWIPP. Proceedings., IEEE International Workshop on*. IEEE, 1998.
 149. Standler, Ronald B. *Protection of electronic circuits from overvoltages*. Courier Corporation, 2012.
 150. IEEE C62.41.1-2002, "IEEE Guide on the Surge Environment in Low Voltage (1000 V or less) AC Power Circuits", New York, NY, IEEE.
 151. IEEE C62.41.2-2002, "IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage (1000 or less) AC Power Circuits", New York, NY, IEEE.
 152. IEEE C62.45-2002, "IEEE Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage (1000 or less) AC power Circuits", New York, NY, IEEE.
 153. NEMA LS-1-1992, "Low Voltage Surge Protection Devices", National Electrical Manufacturers Association, Rosslyn, VA.
 154. IEC 61643-1, "Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Distribution Systems", Geneva, Switzerland.
 155. UL 1449 2nd Edition, "Transient Voltage Surge Suppressors", Underwriters Laboratories, Northbrook, IL.
 156. Lindsted, Robert D., and Rohinton J. Surty. "Steady-state junction temperatures of semiconductor chips." *Electron Devices, IEEE Transactions on* 19.1 (1972): 41-44.
 157. Tounsi, P., et al. "3D thermal modeling for electronic devices based on the two-port network theory." *2nd THERMINIC Workshop, Budapest, Hungary*. 1996.
 158. Koval, Vladimir, et al. "MONSTR: A complete thermal simulator of electronic systems." *Design Automation, 1994. 31st Conference on*. IEEE, 1994.
 159. Székely, Vladimír, et al. "THERMAN: a thermal simulation tool for IC chips, microstructures and PW boards." *Microelectronics Reliability* 40.3 (2000): 517-524.
 160. Kokkas, Achilles G. "Thermal analysis of multiple-layer structures." *Electron Devices, IEEE Transactions on* 21.11 (1974): 674-681.
 161. Lu, B., et al. "Expanded thermal model for IGBT modules." *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*. Vol. 2. IEEE, 2006.

