



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Μελέτη για την Κατασκευή ενός Συστήματος Επαγωγικής Φόρτισης Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου Ισχύος 4kW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΣΤΑΜΑΤΑΚΗ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επιβλέπων : Στέφανος Μανιάς  
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2018





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

## Μελέτη για την Κατασκευή ενός Συστήματος Επαγωγικής Φόρτισης Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου Ισχύος 4kW

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

**ΣΤΑΜΑΤΑΚΗ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ**

**Επιβλέπων :** Στέφανος Μανιάς  
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2018.

(Υπογραφή)

.....

Σταύρος Παπαθανασίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Αντώνιος Αντωνόπουλος  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Ιωάννης Γκόνος  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2018

*(Υπογραφή.....*

**ΣΤΑΜΑΤΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

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

Copyright© ΣΤΑΜΑΤΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Η εργασία πραγματεύεται την επαγωγική φόρτιση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου και ο σκοπός της εργασίας είναι η ανάλυση ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης, από την μαθηματική ανάλυση μέχρι την σχεδίαση του συστήματος σε εξωτερικό χώρο. Κύριο θέμα αποτελεί η ανάλυση των προβλημάτων που την δυσχεραίνουν καθώς και των προβλημάτων που δημιουργεί η ίδια εξαιτίας της ιδιαίτερης ηλεκτρομαγνητικής της φύσης.

Πιο συγκεκριμένα η εργασία χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το πρώτο όντας το μαθηματικό τμήμα της εργασίας δείχνει πώς ένα επαγωγικό σύστημα που αποτελεί στην ουσία ένα μετασχηματιστή, μπορεί και λειτουργεί χωρίς πυρήνα και πώς αντιμετωπίζεται η μεταβολή των μεγεθών του μετασχηματιστή μέσω της μεταβολής της λειτουργίας του αντιστροφέα του συστήματος. Στην συνέχεια γίνεται ανασκόπηση στην διεθνή έρευνα και στις διατάξεις που έχουν δημιουργηθεί μέχρι τώρα αλλά και στις καινοτομίες σε λύσεις προβλημάτων που αντιμετωπίζουν τα επαγωγικά ασύρματα συστήματα φόρτισης. Τέλος πραγματοποιείται μία απλή προσομοίωση σε Simulink που δείχνει πώς μία DC τάση μπορεί τελικά και τροφοδοτεί μία μπαταρία ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας πραγματεύεται το φυσικό σύστημα, την εγκατάσταση ενός απλού συστήματος επαγωγικής φόρτισης καθώς και την λειτουργία ενός αντιστροφέα παρουσία αυτού και της ισχυρής ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής που δημιουργεί. Αρχικά καθώς το σύστημα προορίζεται κυρίως για εξωτερική χρήση, η εργασία παρουσιάζει τις IP (International Protection Marking) προδιαγραφές και πως το σύστημα μπορεί να εγκατασταθεί υπογείως έχοντας ανοσία στα στοιχεία της φύσης και ταυτόχρονα διατηρώντας ανοσία στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται από τον μετασχηματιστή και από εσωτερικά στοιχεία του αντιστροφέα. Αυτή η ενότητα αποτελεί οδηγό στην σχεδίαση του περιβλήματος ενός αντιστροφέα, στην ψύξη του και στην επιλογή της μεθόδου ψύξης καθώς και στην μαγνητική θωράκιση όλων των στοιχείων του συστήματος. Τέλος περιγράφεται η μεθοδολογία θωράκισης του μαγνητικού πεδίου που αυξάνει σημαντικά την απόδοση του επαγωγικού φορτιστή και επιτρέπει την ασφαλέστερη χρήση του μετασχηματιστή. Η σχεδίαση ενός περιβλήματος που αντέχει τις περιβαλλοντικές συνθήκες για τις οποίες προορίζεται είναι αλληλένδετη με την μαγνητική θωράκιση και για αυτόν τον λόγο πρέπει να γίνεται ταυτόχρονα για μία ενδεδειγμένη σχεδίαση.

**Λέξεις κλειδιά:** Επαγωγική φόρτιση, ασύρματη φόρτιση, αντιστάθμιση επαγωγικού συστήματος, μαγνητική θωράκιση, περίβλημα συσκευής, διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου



## **Abstract**

This thesis deals with the IPTS (Inductive Power Transfer System) and the purpose of this paper is the analysis of the inductive charging system via the mathematical system and the physical system in an outdoors environment. The main issue is the analysis of the problems that hinder it and the problems that it creates due to its particular electromagnetic nature.

More specifically, the thesis is divided into two parts. The first being the mathematical part of the paper shows how an inductive system that is essentially a transformer, can and does work without a core and how the transformers values change during its operation and the correction done by the systems inverter. The paper then reviews international research and the provisions that have been created so far, as well as the innovations in the solutions to problems faced by inductive wireless charging systems. Finally, a Simulink simulation is presented that shows how a DC voltage can eventually feed a battery of an electric car.

The second part of the thesis deals with the physical system, the installation of a simple inductive charging system as well as the operation of an inverter in the presence of said system and its strong electromagnetic interference. Initially, as the system is primarily intended for outdoor use, the work presents the IP (International Protection Marking) standard, thus giving solutions through it in order to preserve immunity to nature's elements and at the same time maintaining immunity to the electromagnetic radiation produced by the transformer and by internal elements of the inverter. This module is a guide to designing the housing of an inverter, cooling it and choosing the cooling method as well as magnetically shielding all the components of the system. Finally, the magnetic field modulus methodology significantly increases the efficiency of the inductive charger, allowing for easier shielding and safer usage of the transformer. The design of a casing that resists the environmental conditions for which it is intended is interconnected with the magnetic shielding, and for this reason it must be done simultaneously for an appropriate design.

Key words: Inductive charging, wireless charging, inductive system compensation, magnetic shielding, device housing, magnetic field shaping





## **Ευχαριστίες**

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Στέφανο Μανιά, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως επίσης και για την απαραίτητη καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνησή της.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ψυχολογική και υλική υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου, ιδιαίτερος δε, τον θείο μου Ιατρό Αναστάσιο Ταμπούρη για την αμέριστη ηθική υποστήριξή του.



## Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων .....	i
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....</b>	<b>1</b>
1.1 εισαγωγή .....	1
1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας .....	5
1.3 Ιστορική αναφορά.....	6
1.4 Περιεχόμενο κεφαλαίων .....	6
<b>Κεφάλαιο 2: Διεθνή έρευνα.....</b>	<b>8</b>
2.1 Εισαγωγή .....	8
2.2 Αποτελέσματα διεθνούς έρευνας .....	8
Ιαπωνία .....	8
KAIST: Έξοδος 27kW, μήκος διακένου 20cm, απόδοση 74% .....	9
Ισπανία.....	10
Auckland University.....	12
Καναδάς.....	12
EMΠ.....	13
Aiguo Patrick Hu και Stephan Hussmann.....	15
Σύστημα φόρτισης με αξιοποίηση της κατάστασης φόρτισης μπαταρίας FOC.....	16
Qi Foreign Object detection - Ανίχνευση ξένου αντικειμένου .....	16
WiTricity.....	17
Qualcomm.....	18
2.3 Τοπολογίες μετασχηματιστών που προέκυψαν από την διεθνή έρευνα.....	19
<b>Κεφάλαιο 3: Μαθηματικό μοντέλο συστήματος επαγωγικής φόρτισης και προσομοίωσή του.....</b>	<b>25</b>
3.1 Εισαγωγή .....	25
3.2 Από τις εξισώσεις του Maxwell στο Ισοδύναμο κύκλωμα .....	26
3.3 Ανακλώμενη σύνθετη αντίσταση.....	32

3.4 Διάταξη και αντιστάθμιση του συστήματος επαγωγικής φόρτισης .....	34
3.5 Απώλειες πηγίου κατά την μεταφορά ισχύος .....	39
3.6 Προσομοίωση συστήματος επαγωγικής φόρτισης.....	41
<b>Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση τεχνικών συσκευασίας για αντιστροφέα συστήματος επαγωγικής φόρτισης.....</b>	<b>45</b>
4.1 Εισαγωγή .....	45
4.2 Διακοπτικά στοιχεία ισχύος.....	48
4.2.1 MOSFET ισχύος.....	49
4.2.2 IGBT.....	50
4.2.3 Σύστημα θερμικών απωλειών των διακοπτικών στοιχείων.....	51
4.3 Παθητικά στοιχεία κυκλώματος .....	52
4.3.1 Πυκνωτές.....	53
4.3.2 Πηνία .....	54
4.4 Κατασκευή εκτυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Boards) .....	55
4.5 Τοποθέτηση στοιχείων πάνω στο υπόστρωμα του PCB .....	59
4.5.1 Τεχνολογία επιφανειακής στήριξης (Surface Mount Technology) .....	59
4.5.2 Τεχνολογία οπών (Through Hole Technology) .....	60
4.5.3 Συνδυασμός τεχνολογιών SMT και THT.....	61
4.5.4 Τεχνικές συγκόλλησης στοιχείων.....	61
4.5.5 Βασικότερες SMT συσκευασίες.....	63
4.5.6 Τοποθέτηση στοιχείων πάνω στο PCB υπόστρωμα και μέγεθος επαφής (Land Pattern Design).....	66
4.5.7 Διαδικασία σχεδίασης PCB μέσω KiCad .....	67
4.6 Ενεργές τεχνολογίες διασύνδεσης.....	68
4.6.1 Τεχνολογία αγωγίμης διασύνδεσης (Interconnection technology).....	69
4.6.2 Τεχνολογίες αγωγίμης διασύνδεσης χωρίς καλώδια (Wirebond-Less Interconnection)...	69
4.7 Μέθοδοι και τεχνολογίες ψύξης.....	72
4.7.1 Ανεμιστήρες.....	73
4.7.2 Θερμοηλεκτρικό ζεύγος (ThermoElectric Cooler).....	74
4.7.3 Υγρή ψύξη .....	75
4.7.4 Ψύκτρες .....	76

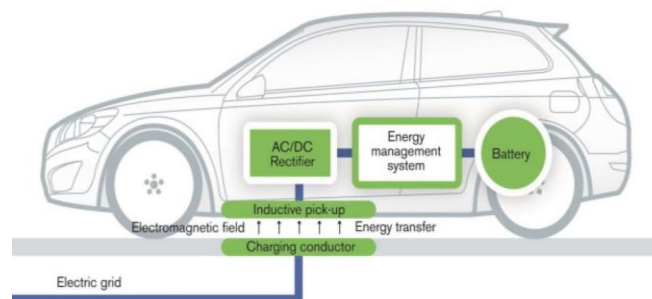
4.8 Ολοκλήρωση ψύξης ηλεκτρονικών ισχύος .....	78
4.9 Μέθοδος επιλογής βέλτιστης μεθόδου ψύξης .....	80
4.9.1 Επεξήγηση μεθόδου .....	80
4.9.2 Εφαρμογή μεθόδου.....	83
4.10 Περίβλημα συσκευής και προδιαγραφές .....	83
4.10.1 Υλικά κατασκευής ηλεκτρονικών συσκευών .....	84
4.10.2 IP (International Protection Marking) και NEMA προδιαγραφές για κατασκευή περιβλήματος αντιστροφέα.....	85
<b>Κεφάλαιο 5 : Ηλεκτρομαγνητική θωράκιση .....</b>	<b>89</b>
5.1 Εισαγωγή .....	89
5.2 Επίδραση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στους ιστούς οργανισμών και διεθνείς οδηγίες .....	90
5.3 Διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου .....	94
5.4 Ηλεκτροστατική θωράκιση .....	95
5.5 Ηλεκτρομαγνητική θωράκιση .....	97
5.5.1 Εξίσωση επίδρασης θωράκισης SE .....	98
5.5.2 Επιδερμικό φαινόμενο (Skin effect) .....	100
5.5.3 Θωράκιση καλωδίων .....	101
5.5.4 Κενά θωράκισης λόγω οπών .....	102
5.5.5 Τσιμούχες (Gaskets).....	103
5.6 Μέτρα προστασίας από την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή .....	105
5.7 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα.....	106
5.8 Ηλεκτρομαγνητική σύζευξη .....	107
5.9 Συμπεράσματα θωράκισης.....	109
<b>Κεφάλαιο 6 : Εγκατάσταση του συστήματος φόρτισης για εσωτερική και εξωτερική στάθμευση 112</b>	
6.1 Εισαγωγή .....	112
6.2 Εγκατάσταση αντιστροφέα υπογείως.....	112
6.3 Εγκατάσταση συστήματος Π-I.....	115
6.4 Σχεδίαση εξωτερικού χώρου στάθμευσης για πόλη.....	118
6.5 Προδιαγραφή για την τοποθέτηση του δευτερεύοντος.....	121

6.6 Σύστημα επαγωγικής φόρτισης για οικιακή χρήση.....	122
<b>Κεφάλαιο 7 : Συμπεράσματα .....</b>	<b>125</b>
7.1 : Ανασκόπηση της εργασίας .....	125
7.2 : Επιλογή Διάταξης .....	125
7.3 : Επιλογή τύπου αντιστάθμισης συστήματος επαγωγικής φόρτισης.....	127
7.4 : Μαγνητική θωράκιση.....	128
7.5 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις για την μαγνητική θωράκιση για μελλοντικές πειραματικές μετρήσεις .....	128
7.6 : Μελλοντικές μελέτες.....	129
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>131</b>

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

## 1.1 εισαγωγή

Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη καθώς και η μείωση των αποθεμάτων πετρελαίου καθιστούν αναπόφευκτη την εξάπλωση των ηλεκτρικών μέσων μεταφοράς παγκοσμίως. Εδώ και δεκαετίες μέσα σταθερής τροχιάς όπως τρένα έχουν είδη αντικατασταθεί από ηλεκτροκίνητα μοντέλα και για πολλές ευρωπαϊκές χώρες σειρά έχουν τα αυτοκίνητα, μικρά αεροσκάφη και σκάφη. Πολλές χώρες μεταξύ των οποίων η Ινδία, η Νορβηγία, η Γαλλία και η Βρετανία έχουν σκοπό να καταργήσουν όλα τα αυτοκίνητα εσωτερικής καύσης το αργότερο έως το 2050 και οι διεργασίες της ευρωπαϊκής ένωσης έχουν στόχο όχι μόνο το 2020 οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων να πέσουν κάτω από τα επίπεδα του 1992 αλλά και το 20% της παραγόμενης ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτή η αλλαγή νοοτροπίας είναι μία καλή αρχή στην απεξάρτηση των μεταφορών από τα ορυκτά καύσιμα αλλά προκύπτουν αρκετές ανησυχίες που αφορούν όλα τα είδη μεταφορών που δεν είναι απευθείας συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο.



σχήμα 1.1 : Σύστημα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Η διαφορά μεταξύ των ηλεκτρικών τρένων και των ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων είναι ο τρόπος λήψης και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλεκτρικά τρένα είναι συνδεδεμένα απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο και τροφοδοτούνται από αυτό ενώ μέσα μεταφοράς όπως τα ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα εξαρτώνται από μέσα αποθήκευσης όπως συσσωρευτές και πυκνωτές

τα οποία πρέπει να φορτίζονται τακτικά. Οι περισσότερες ανησυχίες αφορούν αυτά τα μέσα αποθήκευσης ειδικά το κόστος τους, η πυκνότητα ενέργειας και οι δυνατότητες ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή επιτροπή στην αναφορά τους “Electrification of the Transport System” αναφέρεται κατηγορηματικά στο γεγονός ότι οι συσσωρευτές δεν θα φτάσουν ποτέ την πυκνότητα ισχύος των ορυκτών καυσίμων. Συνεπώς είναι απαραίτητο για την επίτευξη των στόχων του προγράμματος της ευρωπαϊκής ένωσης να βρεθούν τρόποι ώστε η ηλεκτροποίηση όλων των επίγειων μέσων μεταφοράς να επιτευχθεί όσο πιο σύντομα και αποδοτικά γίνεται και αυτό θα πρέπει να αποσκοπεί στην βελτίωση της προσβασιμότητας, της αξιοπιστίας, της ασφάλειας και της απόδοσης των προτεινόμενων μέτρων.



σχήμα 1.2 : Φόρτιση υπό κακές καιρικές συνθήκες

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και τα ηλεκτρικά λεωφορεία πρέπει να διεισδύσουν στην αγορά και οι πολίτες πρέπει να τα εμπιστευτούν για να επιτευχθούν οι στόχοι για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Συνεπώς πρέπει να βρεθούν τρόποι ώστε τα ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα να γίνουν αρχικά πιο εύχρηστα, πιο οικονομικά και πιο προσβάσιμα. Τα ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα λόγω της φύσης των μπαταριών αναγκάζουν τους χρήστες τους να τα φορτίζουν καθημερινά, συνήθως για όλη την διάρκεια της νύκτας, ακόμα και σε εξωτερικούς χώρους κάτω από κακές καιρικές συνθήκες. Αυτό εγκυμονεί κινδύνους πτώσης και ηλεκτροπληξίας λόγω των καλωδίων, και των κακών καιρικών συνθηκών (σχήμα 1.2). Η χρήση καλωδίων κάτω από εναλλασσόμενες καιρικές συνθήκες μπορεί να δημιουργήσει φθορές στο καλώδιο που μπορεί να αυξήσει την πιθανότητα τραυματισμού (σχήμα 1.3). Πέρα από τους κινδύνους ο χρήστης είναι πολύ πιθανό να ξεχάσει να φορτίσει το αυτοκίνητο και το πρωί να μην υπάρχει αρκετός χρόνος για φόρτιση. Εκτός αυτού όταν ένα ηλεκτροκίνητο αυτοκίνητο εκφορτίζεται στο δρόμο, θα πρέπει να ρυμουλκηθεί μέχρι να φτάσει σε κάποιο σταθμό φόρτισης και από εκεί και πέρα θα πρέπει να περάσει ώρες φορτίζοντας, σε αντίθεση με ένα αυτοκίνητο εσωτερικής καύσης που φορτίζει σε δευτερόλεπτα. Επιπλέον η χαμηλή πυκνότητα ισχύος εξαναγκάζει το εκάστοτε όχημα να μεταφέρει πολύ μεγάλες και βαριές μπαταρίες για μεγάλες αποστάσεις καθιστώντας το ηλεκτροκίνητο αυτοκίνητο ικανό να εξυπηρετεί μόνο μικρές αποστάσεις.

Λύση για αυτά τα προβλήματα αποτελεί η ασύρματη φόρτιση. Η ασύρματη φόρτιση μπορεί να είναι επαγωγική με χρήση πηνίων όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1 ή χωρητική με χρήση πυκνωτών. Κατά την επαγωγική φόρτιση χρησιμοποιούνται δύο πηνία, ένα πακτωμένο στο έδαφος και ένα εφαρμοσμένο στο ηλεκτρικό όχημα. Το πρώτο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο εισέρχεται στο δεύτερο πηνίο και δημιουργείται ρεύμα το οποίο φορτίζει τους συσσωρευτές δημιουργώντας ένα μετασχηματιστή (σχήμα 1.4). Η μεταφορά ενέργειας γίνεται



μέσω του διακένου αέρα και δεν χρειάζεται καμία σύνδεση μέσω καλωδίου για να επιτευχθεί η φόρτιση. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης μπορούν να εξασφαλίσουν την βιωσιμότητα των ηλεκτροκίνητων μέσων καθώς βελτιώνουν την διεπαφή με τους χρήστες τους. Πλέον ο οδηγός δεν χρειάζεται να αγγίξει και να συνδέσει κανένα καλώδιο καθώς για να εκκινήσει η φόρτιση δεν έχει παρά να σταθμεύσει πάνω από το πρωτεύον του μετασχηματιστή και το σύστημα φόρτισης εκκινεί αυτόματα (σχήμα 1.1). Η αφαίρεση του καλωδίου φόρτισης δίνει την δυνατότητα δημιουργίας θέσεων στάθμευσης στις οποίες κάποιος εργαζόμενος μπορεί να σταθμεύσει με το ηλεκτρικό αυτοκίνητό του κατά την άφιξη στο χώρο εργασίας του και να φύγει με φορτισμένες μπαταρίες με το πέρας της βάρδιάς του. Με αυτό τον τρόπο αντιμετωπίζονται τα δύο πιο μεγάλα προβλήματα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, η χαμηλή χωρητικότητα των μπαταριών και η εν δυνάμει επικίνδυνη φόρτιση. Το επαγωγικό σύστημα φόρτισης έχει την δυνατότητα να αυξήσει σημαντικά την διείσδυση των ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων στην αγορά βελτιώνοντας την καθημερινότητα του οδηγού, μειώνοντας τις υποχρεώσεις που συνεπάγονται με την ιδιοκτησία ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Ο οδηγός δεν έχει πλέον την ανάγκη για ιδιωτικό παρκινγκ στην κατοικία του και κατά την κίνησή του στην πόλη έχει την δυνατότητα να φορτίσει το αυτοκίνητό του με άνεση και ευκολία, καθιστώντας το ηλεκτρικό αυτοκίνητο την ιδανική επιλογή για την κίνηση στην πόλη.



*σχήμα 1.3 : Αιτίες τραυματισμών*

Το σύστημα επαγωγικής φόρτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κίνηση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, σε αυτοκινητόδρομους. Σε γραμμές χαμηλής ταχύτητας μπορούν να εγκατασταθούν πηνία στον αυτοκινητόδρομο τα οποία θα μπορούν να τροφοδοτούν εν μέρει τον κινητήρα του αυτοκινήτου ενώ βρίσκεται σε κίνηση. Επίσης μπορούν να τοποθετηθούν παρόμοια πηνία μπροστά από φανάρια τα οποία κατά την αναμονή του αυτοκινήτου να φορτίζουν τις μπαταρίες τους. Η κύρια ιδέα είναι το ηλεκτρικό αυτοκίνητο κατά το ταξίδι του σε έναν έξυπνο αυτοκινητόδρομο να οδηγείται μόνο του και μέσω λογισμικού να περνάει πάνω από τα σημεία όπου βρίσκονται τα πηνία με την κατάλληλη ταχύτητα έτσι ώστε να καταναλωθεί όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια από την μπαταρία, τριπλασιάζοντας έτσι το εύρος κίνησης του αυτοκινήτου.

Το ηλεκτροκίνητο αυτοκίνητο μπορεί να αποτελέσει μοχλό στην καταπολέμηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Ο σκοπός παγκοσμίως είναι να μην επιτρέψουμε στην θερμοκρασία του πλανήτη να ανέβει παραπάνω από δύο βαθμούς από την προ-βιομηχανική εποχή και το ηλεκτρικό αυτοκίνητο παίρνοντας ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και ενέργεια από σταθμούς παραγωγής των οποίων ο βαθμός απόδοσης είναι σχεδόν

διπλάσιος από αυτόν των αυτοκινήτων εσωτερικής καύσης, είναι βέβαιο ότι θα δώσει ένα χτύπημα τόσο στο παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα όσο και σε όσους αμφισβητούν την ανθρώπινη παρέμβαση σε αυτό.



*σχήμα 1.4 : Μοντέλο πηνίων που δημιουργούν έναν φορτιστή*

Η χρήση της επαγωγικής φόρτισης δεν περιορίζεται μόνο στην φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων αλλά έχει εφαρμοστεί σε πολλούς τομείς με μεγάλη επιτυχία. Στον τομέα της υγείας έχει εφαρμοστεί για την φόρτιση βηματοδοτών (σχήμα 1.5) καθώς και στην φόρτιση τεχνητής καρδιάς. Πριν την εφαρμογή της επαγωγικής φόρτισης οι ασθενείς έπρεπε να υπομένουν τα καλώδια που ήταν συνδεδεμένα στην μπαταρία της συσκευής και εξέρχονταν από το σώμα μέσω του θώρακα και του δέρματος. Συνέπεια αυτής της πρακτικής ήταν η αναπόφευκτη επιβάρυνση της υγείας του ασθενούς λόγω των συχνών λοιμώξεων και υψηλού πυρετού που προκαλούσαν τα καλώδια καθώς και της συνεχής αιμορραγίας και των πυωδών εκκρίσεων. Με την επαγωγική φόρτιση αφαιρούνται τα καλώδια και ο ασθενής δεν έχει παρά να τοποθετήσει το πρωτεύον του μετασχηματιστή πάνω στο στήθος του και η συσκευή αρχίζει να φορτίζει. Το μαγνητικό πεδίο εισχωρεί μέσα στο σώμα προς την συσκευή διαπερνώντας ιστούς και κόκαλα χωρίς να προκαλεί βλάβες. Η τεχνική αυτή έχει σώσει πολλές ζωές και έχει βελτιώσει την ποιότητα ζωής πολλών περισσότερων. Η τεχνολογία της επαγωγικής φόρτισης έχει χρησιμοποιηθεί και σε βιομηχανικά περιβάλλοντα καθώς και σε οικιακά. Η ανεξάρτηση από την χρήση καλωδίων και βυσμάτων σε βιομηχανικά περιβάλλοντα μπορεί να αποτρέψει πολλά ατυχήματα και προβλήματα καθώς δεν θα υπάρχει πλέον ο κίνδυνος έκρηξης λόγω επικίνδυνων αερίων και υγρών καθώς και προβλημάτων λόγω σκόνης. Μέσα επικοινωνίας καθώς και συσκευές που χρειάζονται αυτονομία αξιοποιούν την επαγωγική φόρτιση και με την αύξηση του αυτοματισμού αναμένεται η χρήση αυτής της τεχνολογίας να αυξηθεί καθώς η αυτονομία επάγεται με την χρήση μπαταριών με συνέπεια την ανάγκη για πιο ευέλικτους τρόπους φόρτισης. Όσον αφορά την οικιακή χρήση του συστήματος επαγωγικής φόρτισης, αυτή έχει εφαρμοστεί για φόρτιση συσκευών υγιεινής όπως ηλεκτρικές οδοντόβουρτσες, κουρευτικές και ξυριστικές μηχανές. Μελλοντικά ο στόχος είναι κάθε συσκευή όπως κινητά τηλέφωνα, υπολογιστές και φωτιστικά να φορτίζονται και να τροφοδοτούνται από ένα σύστημα ασύρματης φόρτισης.

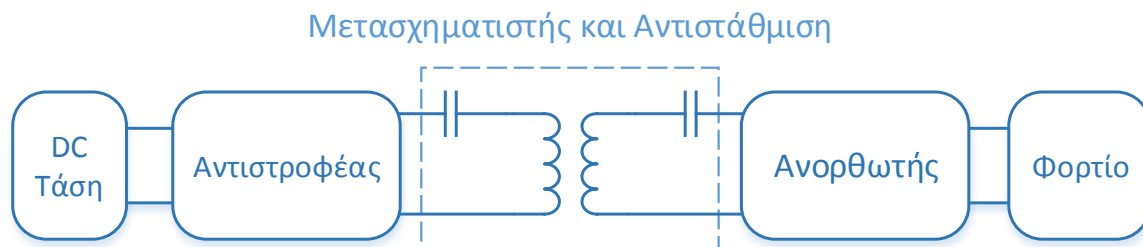


σχήμα 1.5 : Επαγωγική φόρτιση βηματοδότη

## 1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Ο σκοπός της εργασίας είναι η σχεδίαση και μελέτη ενός επαγωγικού φορτιστή για την επίτευξη μέσης φόρτισης ισχύος που κυμαίνεται μεταξύ των 3 και 4kW για ένα στάσιμο ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Η φόρτιση αυτής της τάξης διαρκεί πέντε με επτά ώρες και είναι ιδανική για φόρτιση σταθμευμένου αυτοκινήτου εντός της πόλης κατά την οποία μπορεί ο οδηγός να σταθμεύσει το αυτοκίνητό του και όταν επιστρέψει να έχει φορτιστεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Επίσης η φόρτιση αυτής της τάξης θα πρέπει να είναι ικανή να χρησιμοποιηθεί και σε οικιακά περιβάλλοντα με τριφασική τροφοδοσία. Σε αυτήν την εργασία θα διερευνηθούν τα στοιχεία του κυκλώματος και η συνδεσμολογία τους καθώς και οι κυματομορφές που παράγουν μέσω προσομοιώσεων. Πριν από αυτό όμως θα έχει πραγματοποιηθεί μαθηματική ανάλυση του συστήματος μεταφοράς ενέργειας και παρουσίαση των ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί την τελευταία δεκαετία από πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα. Τέλος θα περιγραφεί η εφαρμογή του φυσικού συστήματος στο αυτοκίνητο και στη θέσης στάθμευσης με μελέτη για την θερμοκρασία και την υγρασία. Εκτός αυτού θα είναι απαραίτητη και η μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής που προκαλεί η συσκευή και η επίδρασή της πάνω σε ζωντανούς ιστούς, άλλες συσκευές καθώς και τρόποι θωράκισής της. Μαζί με αυτή την ανάλυση θα γίνει και παρεμβολή της μελέτης με τα αντίστοιχες προδιαγραφές συσκευών καθώς και με τις προδιαγραφές που αναπτύσσονται για την ασύρματη τεχνολογία φόρτισης.

Το κύκλωμα που θα εξεταστεί μαθηματικά αλλά και σε προσομοίωση είναι αυτό του σχήματος 1.6. Το κύκλωμα αυτό για να πετύχει την μέγιστη ροή ισχύος μέσω ενός διακένου αέρα χωρίς πυρήνα χρησιμοποιεί κυκλώματα αντιστάθμισης με σκοπό τον συντονισμό των στοιχείων του.



σχήμα 1.6 : Σύστημα ασύρματης φόρτισης

### 1.3 Ιστορική αναφορά

Το 1831 ο Faraday περιέγραψε τον νόμο της επαγωγής σύμφωνα με τον οποίο λόγω μεταβολής ενός μαγνητικού πεδίου στα άκρα ενός αγωγού, παρατηρείται διαφορά δυναμικού στα άκρα αυτού του αγωγού. Αυτό ήταν λοιπόν ένα τεράστιο βήμα στην μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και στην ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Εξήντα χρόνια αργότερα, το 1891, ο Nicola Tesla σχεδίασε αυτό που είναι γνωστό σήμερα ως Tesla Coil όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7. Η διάταξη αυτή αποτελείται από ένα συντονισμένο μετασχηματιστή ο οποίος δημιουργεί ένα χαμηλής έντασης υψηλής συχνότητας ρεύμα. Τα δύο πηνία έχουν μεγάλο κενό αέρος μεταξύ τους και μοιράζονται το 10-20% του μαγνητικού πεδίου. Το δευτερεύον του μετασχηματιστή αποτελείται από ένα συντονισμένο κύκλωμα χωρίς όμως με πυκνωτή. Η χωρητικότητα του δευτερεύοντος παρουσιάζεται ανάμεσα από τα τυλίγματα του πηνίου και μέσω του τοροειδούς με την γη. Το συντονισμένο κύκλωμα επιτρέπει στον μετασχηματιστή να αποθηκεύει ενέργεια στο δευτερεύον για περισσότερη ώρα. Το 2007 μία ομάδα από το MIT κατάφερε να τροφοδοτήσει μία λάμπα 60W από 2 μέτρα απόσταση χρησιμοποιώντας δύο πηνία. Αυτή η παρουσίαση θα αποτελούσε και το έναυσμα για την μελέτη της τεχνολογίας και μέλη αυτής της ομάδας θα δημιουργήσουν την εταιρία Witricity, μία από τις μεγαλύτερες στον τομέα της επαγωγικής φόρτισης.



σχήμα 1.7 : Πηνίο του Τέσλα

### 1.4 Περιεχόμενο κεφαλαίων

Στο **κεφάλαιο 2** πραγματοποιείται μία έρευνα με κάποιες από τις πιο σημαντικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι τώρα διεθνώς οι οποίες καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο διατάξεων και λύσεων σε προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα συστήματα επαγωγικής φόρτισης. Μαζί σε αυτά συμπεριλαμβάνεται μία περιληπτική ανάλυση του συστήματος επαγωγικής φόρτισης του ΕΜΠ. Σε αυτό το σημείο ζυγίζονται τα θετικά και τα αρνητικά αυτού του συστήματος καθώς και του πιο διαδεδομένου συστήματος επίπεδων πηνίων.

Στο **κεφάλαιο 3** γίνεται ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου του φορτιστή. Αρχικά παραθέτονται οι νόμοι του Ampere και του Faraday από τους οποίους προκύπτουν τα ισοδύναμα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των ροών ισχύος και συντελεστών όπως ο

συντελεστής ποιότητας. Στην συνέχεια εξηγείται η ανάγκη για το κύκλωμα αντιστάθμισης το οποίο συντονίζει το κύκλωμα σε κάποια συχνότητα για την μεγιστοποίηση της ροής ισχύος.

Στο **κεφάλαιο 4** περιγράφονται οι μοντέρνες τεχνολογίες συσκευασίας ηλεκτρονικών ισχύος και οι διασυνδέσεις και τεχνολογίες που οδηγούν σε ολοκλήρωση ενός αντιστροφέα ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης όσο και για την οδήγηση του κινητήρα ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Στην συνέχεια περιγράφονται οι διαθέσιμοι μέθοδοι ψύξης και οι προδιαγραφές για την κατασκευή ενός αντιστροφέα που θα βρίσκεται υπόγεια.

Στο **κεφάλαιο 5** γίνεται περιγραφή της διαχείρισης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην οποία υπόκεινται οι επιβάτες ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου και παρουσιάζονται οι διεθνείς θεσπισμένες τιμές για τα επίπεδα επιτρεπτής ακτινοβολίας. Οι αντιστροφείς πλέον μπορούν και λειτουργούν σε συχνότητες μεγαλύτερες των 100kHz και την περίπτωση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων οι επιβάτες βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη του ενός μέτρου από αυτούς και τα στοιχεία που τροφοδοτούν. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητο να δοθούν λύσεις θωράκισης και σχεδιασμού ώστε οι επιβάτες να βρίσκονται υπό την επίδραση ασφαλών τιμών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Στο **κεφάλαιο 6** γίνεται περιγραφή του φυσικού συστήματος επαγωγικής φόρτισης της συνδεσμολογίας που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο ηλεκτρονικών ισχύος του ΕΜΠ καθώς και εφαρμογή όσων περιγράφηκαν στα κεφάλαια 4 και 5 για την δημιουργία ενός περιβλήματος που θα προστατεύει την συσκευή υπογείως.

Στο **κεφάλαιο 7** γίνεται μία αναδρομή στην μελέτη που πραγματοποιήθηκε και συγκεντρώνονται όλα τα συμπεράσματα από κάθε μέλος της εργασίας ώστε να παρθεί ένα συμπέρασμα που αφορά τον τρόπο φόρτισης και την πορεία που πρέπει να ακολουθήσει η έρευνα. Τέλος προτείνονται τρόποι περεταίρω ανάπτυξης της εργασίας και πιθανών μελλοντικών ερευνών που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν.

## Κεφάλαιο 2: Διεθνή έρευνα

### 2.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη συστημάτων επαγωγικής φόρτισης αποτελεί αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών την τελευταία δεκαετία και τα αποτελέσματά της έχουν αρχίσει να γίνονται εμπορικά. Οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες είναι επιφυλακτικές στην εφαρμογή της σε ευρεία κλίμακα καθώς οι λεπτομέρειες της τεχνολογίας μένουν να τεθούν υπό έλεγχο και να τυποποιηθούν. Για αυτό το λόγο θεωρείται πρόπον να γίνει μία αναδρομή στην έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί έως τώρα στο εξωτερικό και στην Ελλάδα σε ερευνητικό αλλά και σε εμπορικό περιβάλλον. Ακολουθούν λοιπόν αποσπάσματα από άρθρα ερευνητών από ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια καθώς και εφαρμογές της τεχνολογίας σε εμπορικά συστήματα.

### 2.2 Αποτελέσματα διεθνούς έρευνας

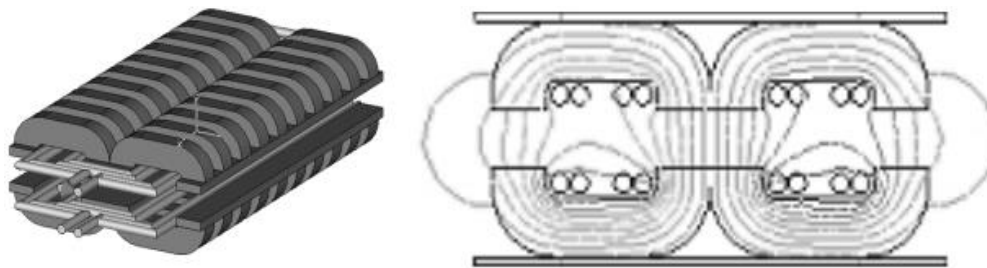
#### Ιαπωνία

Οι ερευνητές του **Waseda University** ανέπτυξαν ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης επίπεδων πηνίων με αντιστάθμιση σειρά-παράλληλα. Το διάκενο μεταξύ των πηνίων θεωρήθηκε πως θα έπρεπε να είναι 10 εκατοστά ενώ για την διαμόρφωση του μαγνητικού πεδίου, έμφαση δόθηκε στο βάρος του συστήματος μέσω της ελαχιστοποίησης των φύλλων φερρίτη. Η διάταξη αντιστάθμισης εδώ είναι **σειρά-παράλληλα** πράγμα που οδηγεί σε δημιουργία πηγής ρεύματος στην έξοδο του κυκλώματος. Ο υπολογισμός του πυκνωτή του δευτερεύοντος έγινε έτσι ώστε η ισοδύναμη σύνθετη αντίστασή του να ισούται με το πραγματικό μέλος της και καθώς ο μετασχηματιστής δεν έχει σταθερό λόγο τυλιγμάτων υπολογίστηκε έτσι ώστε το κύκλωμα να συντονίζεται, δηλαδή:  $C_p = 1/\sqrt{\omega_p L_p}$ . Η συχνότητα του αντιστροφέα είναι 22kHz, πολύ κοντά στην συχνότητα των υπολοίπων.



σχήμα 2.1 : Εγκατεστημένο σύστημα και δευτερεύον μετασχηματιστή [3]

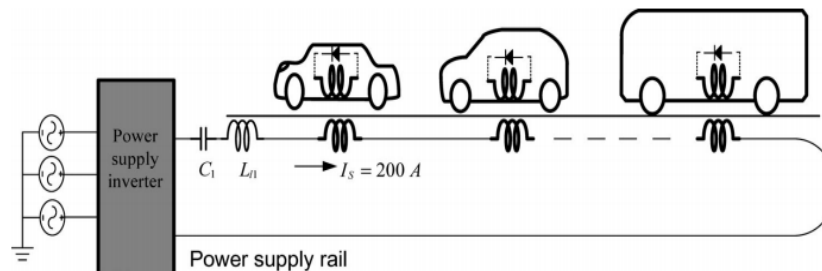
Η μαγνητική διάταξη αν και αφορά επίπεδα πηνία καταφέρνει να προσομοιάσει έναν μετασχηματιστή δικτύου όσο το δυνατό καλύτερα όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται ότι το σύστημα επαγωγικής φόρτισης αξιοποιήθηκε για την φόρτιση ενός μικρού λεωφορείου. Τόσο η Ιαπωνία όσο και η Κορέα έχουν αναπτύξει μέσα μαζικής μεταφοράς



σχήμα 2.2 : Field shaping στο ansys και αποτελέσματα [3]

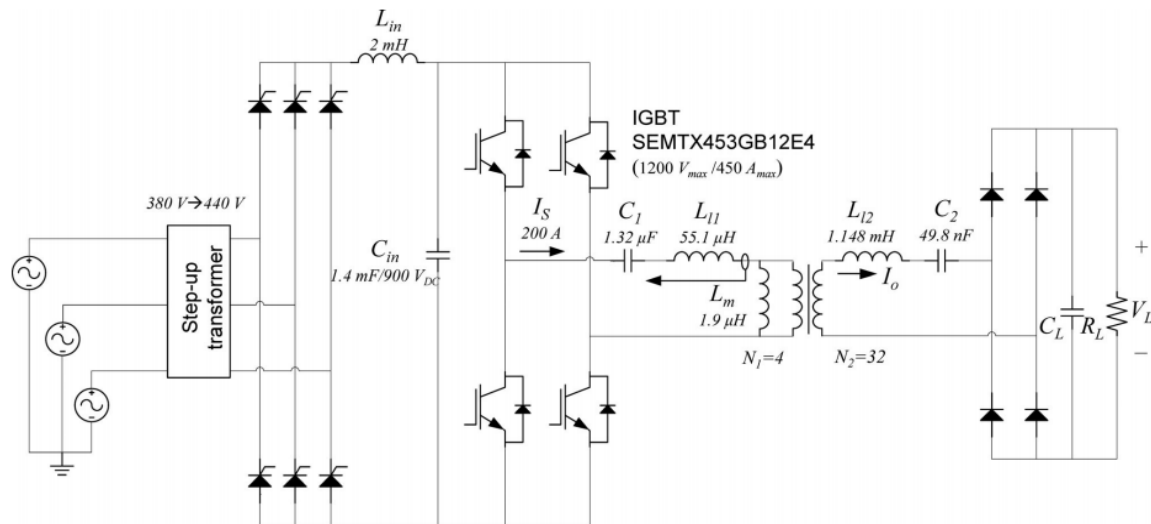
Η ισχύς εξόδου υπολογίζεται στα 30kW με εντυπωσιακή απόδοση 92%. Αυτή η μεγάλη απόδοση οφείλεται στο μικρό διάκενο των 10cm καθώς και στον πυρήνα του μετασχηματιστή που βελτιώνει την μαγνητική ροή.

### KAIST: Έξοδος 27kW, μήκος διακένου 20cm, απόδοση 74%



σχήμα 2.3 : Οπτικοποίηση συστήματος επαγωγικής φόρτισης [1]

Η σχεδίαση του ερευνητικού κέντρου KAIST της Νοτίου Κορέας αφορά την κίνηση ηλεκτρικών αυτοκινήτων πάνω σε ένα δίκτυο πρωτεύοντων πηνίων πάνω σε μία μαγνητική ράγα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 η οποία τροφοδοτεί την κίνηση ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων. Το δευτερεύον περιέχει δύο πηνία ενώ το πρωτεύον που βρίσκεται στον δρόμο περιέχει μία σειρά από πηνία με εναλλασσόμενη φορά μαγνητικού πεδίου. Η φορά αυτή έχει σκοπό να μηδενίσει την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή της διάταξης ώστε να μην επηρεάζει άλλες συσκευές και οργανισμούς. Για την ανάλυση του κυκλώματος οι ερευνητές χρησιμοποιούν το ισοδύναμο κύκλωμα σχήμα 2.4 καθώς και εφαρμόζουν την θεωρία των μαγνητικών αντιστάσεων από σχήμα. Η διάταξή τους φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 2.4 ενώ ο τρόπος αντιστάθμισης είναι **σειρά-σειρά** (S/S). Η έξοδος της διάταξης είναι 27kW με μήκος διακένου 20cm. Η απόδοση είναι 74% και είναι αρκετά ικανοποιητική δεδομένου του μεγέθους του διακένου.



σχήμα 2.4 : Κυκλωματική διάταξη συστήματος επαγωγικής φόρτισης [1]

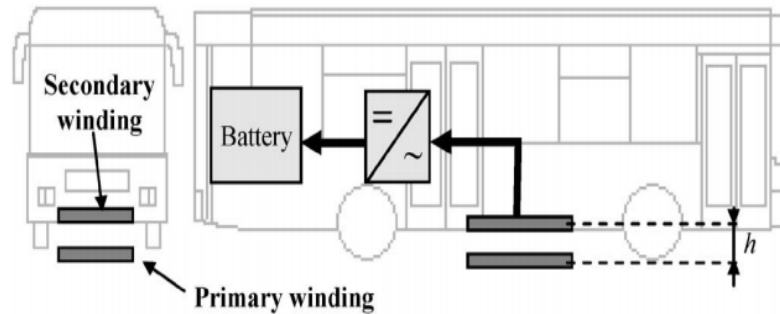
Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα της διάταξης ανηγμένο στη πλευρά του πρωτεύοντος (1:n). Οι μηχανικοί ήθελαν προφανώς να κατασκευάσουν μία συσκευή η οποία έχει σταθερό ρεύμα εισόδου που παρέχεται από έναν μετασχηματιστή, για αυτόν τον λόγο τοποθετήθηκε η  $L_{in}$  ώστε η πηγή τάσης να γίνει πηγή ρεύματος. Στην συνέχεια ακολουθεί ένα φίλτρο εισόδου και ο αντιστροφείας. Η επιλογή της συχνότητας του αντιστροφεία έγινε έτσι ώστε να μην υπάρχει ισχυρός θόρυβος και να μην γίνει υπερβολικά ογκώδης η διάταξη (πυκνωτές-ψύκτρες, transistor και άλλα). Ο υπολογισμός των επαγωγών του μετασχηματιστή έγινε μέσω ενός LCR meter και οι πυκνωτές υπολογίστηκαν έτσι ώστε το κύκλωμα να συντονίζεται και να έχει μέγιστη τάση εξόδου.

## Ισπανία

Οι ισπανοί ερευνητές Jesús Sallán, Juan L. Villa, Andrés Llombart και José Fco. Sanz ανέπτυξαν και αυτοί ένα αντίστοιχο σύστημα που αντί για κίνηση θα φροντίζει να φορτίζει τα σταθμευμένα

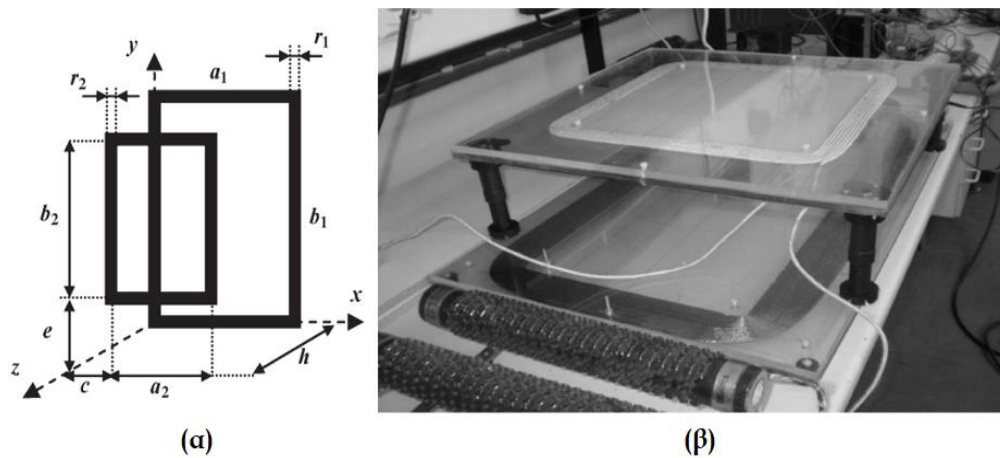


λεωφορεία κατά την επιβίβαση και αποβίβαση των επιβατών καθώς και κατά τον έλεγχο των εισιτηρίων τους, αξιοποιώντας έτσι τον κατά τ' άλλα νεκρό χρόνο σε πολύτιμα λεπτά φόρτισης των μπαταριών. Αν και η σχεδίαση και κατασκευή του κυκλώματος είναι παρόμοια με την προηγούμενη, οι ερευνητές αύξησαν την απόδοση του συστήματος κατά 8% μειώνοντας το διάκενο και εφαρμόζοντας καλύτερες τεχνικές διαμόρφωσης μαγνητικού πεδίου (magnetic field shaping). Η διάταξη της αντιστάθμισης είναι και εδώ **σειρά-σειρά**.



σχήμα 2.5 : Οπτικοποίηση συστήματος επαγωγικής φόρτισης [2]

Παρακάτω παρουσιάζεται η σχεδίαση των πηνίων και τα μεγέθη ανεκτικότητας που θα πρέπει να υπολογιστούν για να εξακριβωθεί η λειτουργία της διάταξης στις χειρότερες συνθήκες λειτουργίας και η πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6.

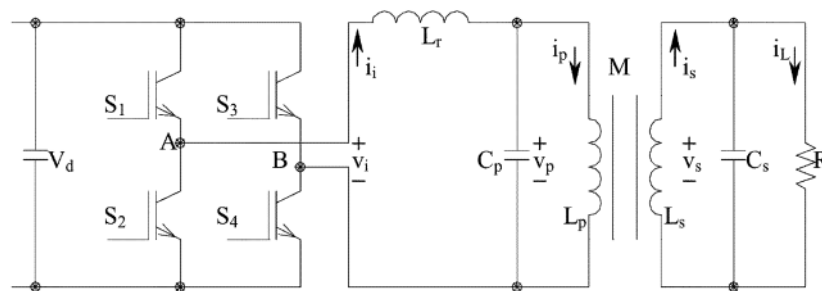


σχήμα 2.6 : (α) Διατάξεις πηνίων – (β) Πειραματική διάταξη [2]

Οι ίδιοι ερευνητές δημιούργησαν και ένα σύστημα με αντιστάθμιση **σειράς παράλληλα-σειράς**. Σύμφωνα με τους ίδιους αυτή η διάταξη παρουσιάζει μεγάλη ανεκτικότητα στην εσφαλμένη ευθυγράμμιση.

## Auckland University

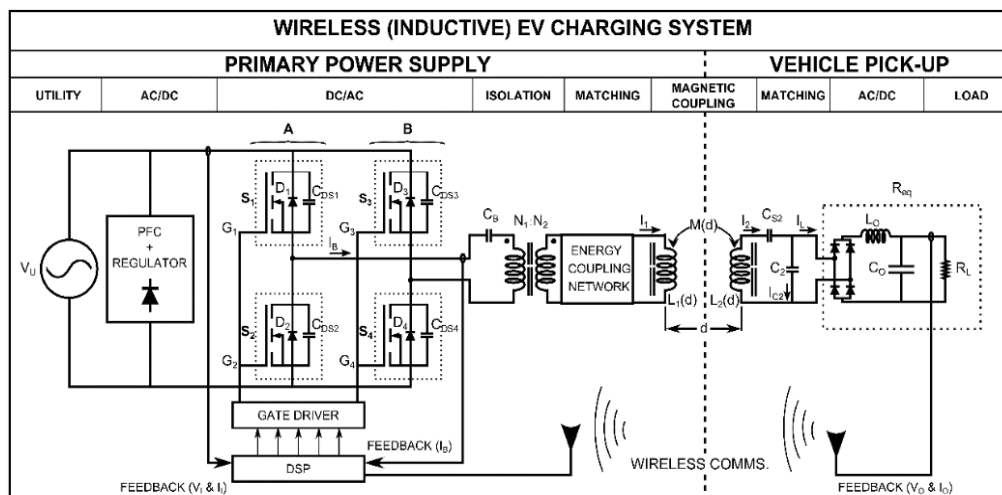
Το πανεπιστήμιο του Auckland σχεδίασε έναν φορτιστή με επίπεδα πηνία όπως παραπάνω με την διαφορά ότι η αντιστάθμιση είναι **παράλληλα-παράλληλα** όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7. Το άρθρο χαρακτηριστικά περιγράφει ότι η σειρά-σειρά αντιστάθμιση είναι η καλύτερη καθώς ο πυκνωτής του πρωτεύοντος είναι ανεξάρτητος του φορτίου στο δευτερεύον. Παρόλα αυτά σύμφωνα με τους ερευνητές μπορεί να υπάρχουν πλεονεκτήματα στην χρήση της παράλληλα-παράλληλα τοπολογίας. Το σύστημα που σχεδιάστηκε παρέχει 30kW ισχύ μέσω 4,5 εκατοστών διάκενο σε συχνότητα 20kHz. Η διάταξη παράλληλα-παράλληλα αξιοποιείται μέσω της παραγωγής πηγών ρεύματος στην είσοδο και στην έξοδο. Το πλεονέκτημα του σταθερού ρεύματος στην έξοδο είναι ότι το σταθερό ρεύμα βοηθάει την μπαταρία να φορτίσει καλύτερα σε ορισμένα στάδια της φόρτισης. Η πηγή ρεύματος διατηρεί σταθερό το ρεύμα στην είσοδο.



σχήμα 2.7 : Κυκλωματική διάταξη συστήματος επαγωγικής φόρτισης [4]

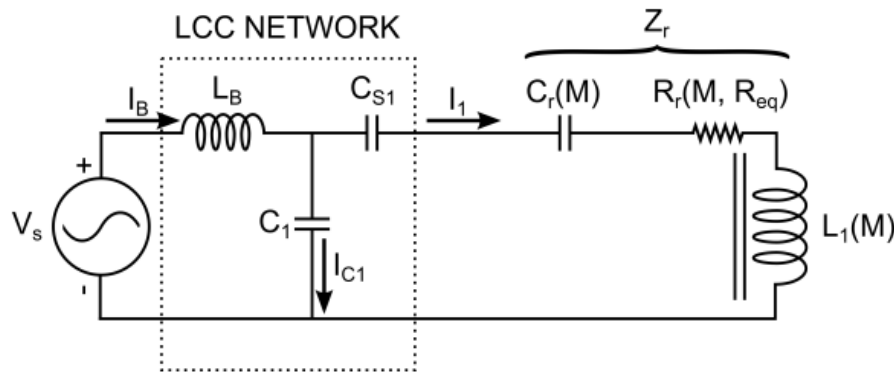
## Καναδάς

Καναδοί ερευνητές ανέπτυξαν το ίδιο σύστημα επιπέδων πηνίων εφαρμόζοντας ένα φίλτρο **LCC** στην πλευρά του πρωτεύοντος και μερική αντιστάθμιση σειράς στο δευτερεύον.



σχήμα 2.8 : Κυκλωματική διάταξη συστήματος επαγωγικής φόρτισης [5]

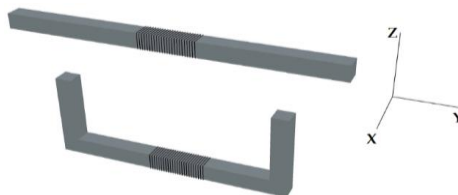
Η μερική αντιστάθμιση σειράς επιτυγχάνει την μείωση της αυτεπαγωγής του πηνίου και στην συνέχεια ενός πυκνωτή παράλληλα σε αυτή τη διάταξη ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμητή πηγή ρεύματος στην έξοδο. Στην είσοδο, δηλαδή στην πλευρά του πρωτεύοντος, τοποθετείται αντιστάθμιση μέσω ενός φίλτρου LCC. Αυτό επιτυγχάνει την δημιουργία πηγής ρεύματος στην είσοδο μέσω του πρώτου πηνίου, το φιλτράρισμα αρμονικών μέσω του εγκάρσιου πυκνωτή και τελικά την αντιστάθμιση μέσω του εν σειρά πυκνωτή. Η ισοδύναμη κυκλωματική διάταξη παρουσιάζεται στα σχήματα 2.8 και 2.9.



σχήμα 2.9 : Ισοδύναμη κυκλωματική διάταξη συστήματος επαγωγικής φόρτισης [5]

## EMΠ

Το εργαστήριο ηλεκτρονικών ισχύος του EMΠ κατασκεύασε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης με μία εντελώς διαφορετική φιλοσοφία. Τα πηνία αντί να είναι επίπεδα, προσομοιάζουν έναν μετασχηματιστή δικτύου του οποίου κάθε μονοπάτι της μαγνητικής ροής διακόπτεται από ένα διάκενο αέρος. Κατά την ανάπτυξη του συστήματος υπολογίστηκε ότι η διάταξη αυτή, παρά τα μειονεκτήματά της, καταναλώνει το λιγότερο υλικό από όλα τα υπόλοιπα συστήματα (KAIST έως Καναδά) τόσο σε καλώδιο όσο και σε φερρίτη. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι η ανοχή της διάταξης στην εσφαλμένη ευθυγράμμιση καθώς στην κίνηση του πρωτεύοντος στον άξονα  $y'y$  καθώς και στον  $z'z$  το σύστημα αν και μεταβάλλει τις τιμές των επαγωγών των πηνίων, διατηρεί τις αγωγίμες οδούς της μαγνητικής ροής. Σε συνδυασμό με το μικρό του μέγεθος, το σύστημα αποκτάει μεγάλη ευελιξία στις εφαρμογές που χρησιμοποιείται. Η διαφορά αυτής της διάταξης με όλες τις υπόλοιπες είναι το πάχος της καθώς και η ολοκληρωτική αδυναμία λειτουργίας κατά την μετακίνηση στον  $x'x$  άξονα (εικόνα 2.10).

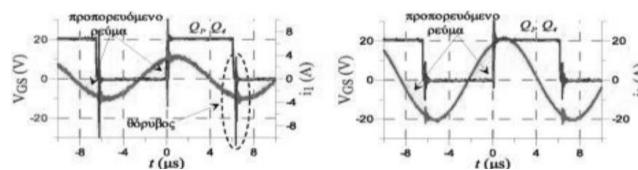


σχήμα 2.10 : Αναπαράσταση διάταξης συστήματος επαγωγικής φόρτισης εργαστηρίου ηλεκτρονικών ισχύος EMΠ

Η διάταξη αποτελείται από τα εξής στάδια:

- Πηγή τάσης 320V
- Μονοφασικός inverter
- Πρωτεύον δίκτυο αντιστάθμισης
- Μετασχηματιστής
- Δευτερεύον δίκτυο αντιστάθμισης
- Ανορθωτής
- Φορτίο
- PLL (τεχνική κλειδώματος φάσης)

Ο αντιστροφέας είναι μονοφασικός και ο σκοπός του είναι διπλός, να μετατρέψει την DC τάση της εισόδου σε AC έτσι ώστε να υπάρχει το κατάλληλο  $di/dt$  για την ροή μαγνητικού πεδίου και δεύτερον να δώσει την συχνότητα στο δίκτυο με την οποία τα στοιχεία θα συντονιστούν για την καλύτερη μεταφορά ενέργειας. Κατά την λειτουργία του αντιστροφέα δημιουργούνται υψηλά ρεύματα τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στα SiC transistors που επιλέχθηκαν. Για αυτόν τον λόγο τοποθετούνται ανά δύο παράλληλα ώστε το κάθε ένα να διαχειρίζεται λιγότερο ρεύμα. Πρέπει να τονιστεί ότι επιλέχθηκαν SiC transistor λόγω της φύσης του ολικού φορτίου. Το φορτίο που κοιτάζει ο αντιστροφέας καθώς είναι χωρητικό δημιουργεί απότομες μεταβολές στην έξοδο των διακοπτικών στοιχείων και η χρήση SiC transistor επιβάλλει soft switching στο ρεύμα. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και από τα διαγράμματα (σχήμα 2.11) της διδακτορικής διατριβής της Ελένης Γατή.



σχήμα 2.11 : Διαφορά μεταξύ IGBT και SiC transistor [6]

Για το δίκτυο ανάδρασης χρησιμοποιήθηκαν δύο διατάξεις, σειρά-σειρά και σειρά-παράλληλα. Διαπιστώθηκε ότι η διάταξη σειρά-σειρά είναι η βέλτιστη καθώς οι μεταβολές στο φορτίο δεν επηρεάζουν την τιμή του πυκνωτή στο πρωτεύον. Παρόλα αυτά διερευνάται εάν ένα σύστημα ανάδρασης μπορεί να επηρεάσει αυτή την διαπίστωση.

Ένα σύστημα ανάδρασης είναι απαραίτητο ιδίως σε ένα σύστημα με μεταβλητά μεγέθη. Τα μεγέθη αυτά είναι οι αυτεπαγωγές του πηνίου καθώς μια μικρή μεταβολή στο διάκενο μεταβάλλει τις τιμές του πηνίου με αποτέλεσμα το σύστημα να αποσυντονίζεται αφού πλέον δεν ισχύει το  $C_p = 1/\sqrt{\omega_p L_p}$ . Αυτή η σχέση μας αποδεικνύει ότι με μεταβολή του  $L_p$  η σχέση αυτή δεν ισχύει εκτός αν μεταβληθεί το  $C_p$  ή το  $\omega_p$ . Καθώς το  $C_p$  δεν γίνεται να μεταβάλλεται συνεχώς ή σε

μεγάλα επίπεδα, το  $\omega_p$  λαμβάνεται υπόψη. Το  $\omega_p$  καθορίζεται από την συχνότητα του φέροντος σήματος του αντιστροφέα που χρησιμοποιεί κάποιου είδους PWM. Συνεπώς είναι απαραίτητο ένα σύστημα το οποίο ελέγχει την βέλτιστη ροή ενέργειας στο φορτίο και μεταβάλλει την  $\omega_p$  μέσω του PWM ώστε να επιτευχθεί συντονισμός. Είναι προφανές ότι ένα δυναμικό σύστημα δεν πρόκειται να λειτουργήσει πάντα βέλτιστα.

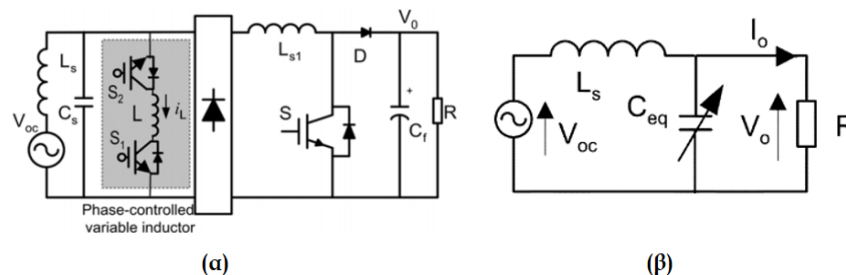
Η διάταξη που μπορεί να κλείσει τον βρόγχο και να ελέγξει το PWM είναι η PLL (τεχνική κλειδώματος φάσης). Το σήμα του ρεύματος του δευτερεύοντος εισάγεται στο PD του PLL όπου συγκρίνεται με την φάση του σήματος τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Το PLL μετατρέπει μέσω του PWM την συχνότητα της τάσης της εξόδου του αντιστροφέα έτσι ώστε να μηδενίζεται η διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων. Ο μηδενισμός αυτός συνεπάγεται με μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου του φορτιστή.

Η επίλυση του συστήματος για μηδενισμό της φάσης, επειδή αφορά πολλαπλά LC κυκλώματα, δεν δίνει πάντα μοναδική λύση. Μάλιστα η λύση μπορεί να ρίξει το σύστημα σε αστάθεια και αυτό είναι το φαινόμενο της αστάθειας ή Bifurcation. Για την αποφυγή του φαινομένου καθορίζονται οι περιοχές όπου το  $\omega_p$  προκαλεί αστάθεια και μέσω ενός αλγορίθμου εξασφαλίζουμε ότι το σύστημα δεν θα φτάσει σε αυτήν την περιοχή.

Τέλος η θερμική ανάλυση του συστήματος έδειξε πως λόγω του μικρού μεγέθους της διάταξης η πυκνότητα θερμότητας είναι αρκετά υψηλή αλλά όχι καταστροφική.

### Aiguo Patrick Hu και Stephan Hussmann

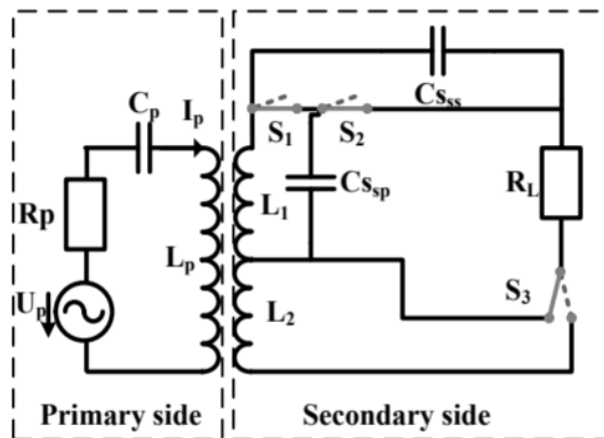
Οι δύο ερευνητές ανέλυσαν από το 2004 ένα σύστημα βελτιστοποίησης της ροής ισχύος σε ένα σύστημα κινούμενων επαφών με αισθητήρες. Η έρευνα αυτή εφαρμόζεται στα συστήματα επαγωγικής φόρτισης και βελτιστοποιεί την ροή εισάγοντας ένα soft switch πηνίο L με μεταβλητή αυτεπαγωγή εντός του παλλόμενου συστήματος. Το κύκλωμα μπορεί να απορρυθμιστεί (detuned) δυναμικά για να εξυπηρετήσει ένα μεγάλο εύρος φορτίων. Συνεπώς ένα σύστημα δυναμικής ρύθμισης του σχήματος 2.12 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην επαγωγική φόρτιση σε φορτία διαφορετικών κατασκευαστών.



σχήμα 2.12 : Από πηγή [7], (α) Κυκλωματική διάταξη – (β) Ισοδύναμο κύκλωμα

## Σύστημα φόρτισης με αξιοποίηση της κατάστασης φόρτισης μπαταρίας FOC

Η λειτουργία ενός ασύρματου συστήματος φόρτισης μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να εξαρτάται από την κατάσταση της μπαταρίας και το επίπεδο φόρτισής της. Εκτός αυτού η φόρτιση της μπαταρίας εξαρτάται και από την ίδια μπαταρία και το foc (field of charge) της. Για τον λόγο αυτό σύμφωνα με τους ερευνητές C. Auvigne, P. Germano, D. Ladas, Y. Perriard, ένας φορτιστής οφείλει να ακολουθεί την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Για αυτόν τον λόγο ανέπτυξαν ένα σύστημα φόρτισης που στην έξοδό του έχει δύο στάδια, ένα σταθερού ρεύματος μέχρι η μπαταρία να φτάσει ένα συγκεκριμένο επίπεδο τάσης και στην συνέχεια ένα στάδιο σταθερής τάσης μέχρι το ρεύμα να φτάσει ένα πολύ χαμηλό επίπεδο ή να μηδενιστεί.



σχήμα 2.13 : Κυκλωματική διάταξη και ισοδύναμο κύκλωμα με ευθεία γραμμή, ο διακόπτης σε κανονική κατάσταση (S1 S2 S3) [13]

πίνακας 2.1 : Λειτουργία διακοπών σχήματος 2.13	
ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ
S1'S2'S3'	Ιδανική πηγή υψηλής τάσης
S1'S2'S3	Ιδανική πηγή χαμηλής τάσης
S1 S2 S3	Ιδανική πηγή ρεύματος

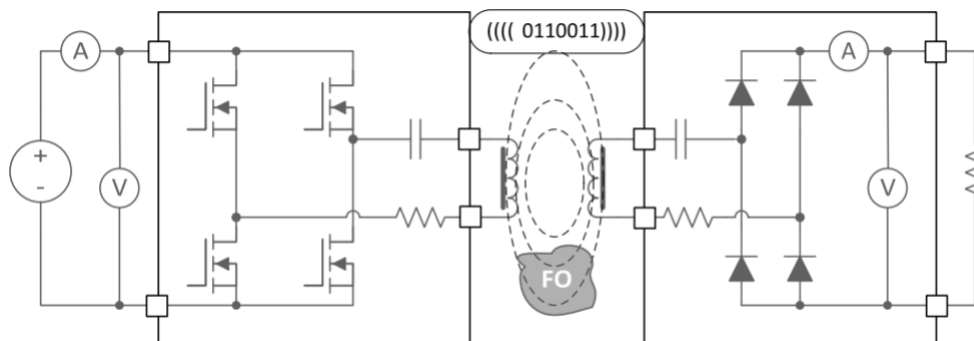
Στην διάταξη του σχήματος 2.13 με την χρήση διακοπών μεταβαίνει το δευτερεύον σε συνδεσμολογία αντιστάθμισης σειράς-παράλληλα για λειτουργία σταθερού ρεύματος και σε σειράς-σειράς για σταθερή τάση. Όλες οι καταστάσεις του κυκλώματος φαίνονται στον πίνακα 2.1.

### Qi Foreign Object detection - Ανίχνευση ξένου αντικειμένου

Κατά την φόρτιση του ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου μέσω μιας τοπολογίας επίπεδων πηνίων είναι θεωρητικά πολύ πιθανόν κάποιο ξένο αντικείμενο να εισέρθει ανάμεσα στα δύο τυλίγματα

του μετασχηματιστή (σχήμα 2.14). Αυτό μπορεί να είναι οτιδήποτε μπορεί να βρίσκεται στον δρόμο, από φύλλα, χαρτιά, πλαστικά έως και μεταλλικά αντικείμενα όπως νομίσματα, κουτάκια αναψυκτικών και κλειδιά. Ενώ τα πρώτα δε επηρεάζουν την μαγνητική ροή, τα μεταλλικά αντικείμενα αποθηκεύουν μέρος της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου εμποδίζοντας την εύρυθμη λειτουργία του φορτιστή. Συνεπώς πρέπει να υπάρχει κάποιο σύστημα ανάδρασης που να ελέγχει κατά πόσο η πτώση της ισχύος οφείλεται σε κακή τοποθέτηση των πηνίων είτε σε κάποιο αντικείμενο στο έδαφος. Η ανάγκη για ακριβή εξακρίβωση εξαρτάται όχι μόνο για λόγους οικονομίας αλλά και για λόγους ασφαλείας καθώς τα αντικείμενα αυτά μπορεί να υπερθερμαθούν και να προκαλέσουν πυρκαγιές ή τραυματισμούς.

Οι κύριες μέθοδοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το πότε πραγματοποιείται ο έλεγχος, πριν την εκκίνηση της φόρτισης και κατά την διάρκεια της φόρτισης. Ένας συνδυασμός των δύο μεθόδων είναι πάντα προτιμότερος. Κατά τον έλεγχο είναι απαραίτητο να αλληλεπικοινωνούν μεταξύ τους τα δύο πηνία και συστημάτων ώστε να ελέγχεται η ύπαρξη ξένου αντικειμένου και από τις δύο πλευρές. Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η ύπαρξη ξένου αντικειμένου είναι μέσω του συντελεστή ποιότητας  $Q$ . Με την ύπαρξη του αντικειμένου ο συντελεστής χειροτερεύει μειώνοντας την ροή ισχύος. Αυτό μπορεί να γίνει πριν εκκινήσει η φόρτιση. Κατά την διάρκεια της φόρτισης η διαδικασία είναι διαφορετική και περιλαμβάνει την σύγκριση των τιμών μεταφοράς ενέργειας που λαμβάνει κατά την φόρτιση με παλαιότερες τιμές του ήδη βαθμονομημένου (calibrated) συστήματος. Η διαφορά στις τιμές αν είναι υπερβαίνει μία προσημασμένη τιμή τότε υπάρχει αντικείμενο στο διάκενο.

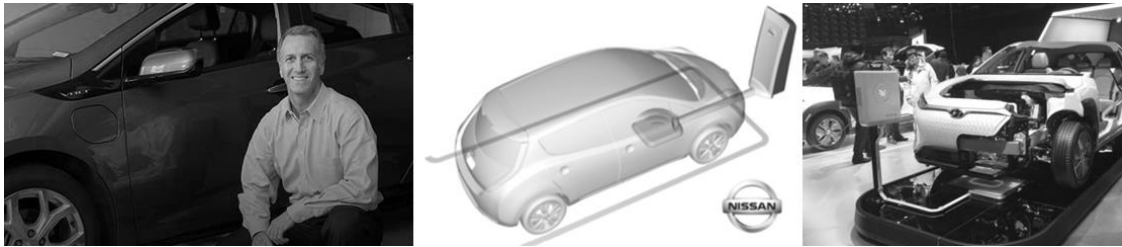


σχήμα 2.14 : Ύπαρξη ξένου αντικειμένου εντός του διακένου

### WiTricity

Η WiTricity αποτελεί μία από τις πρωτοπόρες εταιρίες στον τομέα της επαγωγικής φόρτισης με τα αρχικά της βήματα στον τομέα ηλεκτρικών συσκευών. Πρόσφατα όμως η εταιρία ανακοίνωσε την επέκτασή της στον τομέα φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Μάλιστα η εταιρία εν έτη 2018 ανακοίνωσε την δημοσίευση standards για την βιομηχανία έτσι ώστε να εξυπηρετεί μεγάλο εύρος αυτοκινήτων. Εταιρίες που συνεργάζονται με την WiTricity είναι η Honda, η Nissan, η General Motors και η Hyundai. Όλες αυτές οι εταιρίες εντός του 2017 και

2018 ανακοίνωσαν τα σχέδιά τους μέσω συνεργασίας με την WiTricity για επέκτασή τους στην χρήση ασύρματης φόρτισης.



σχήμα 2.15 : Συστήματα ασύρματης φόρτισης με την σειρά: General Motors, Nissan, Toyota

Όπως φαίνεται από τις εικόνες και επιβεβαιώνεται από τις πατέντες που διατηρούν αυτές οι εταιρίες, η διάταξη πρόκειται για δύο επίπεδα πηνία το ένα από τα οποία εφαρμόζεται στο αυτοκίνητο και ένα στο δάπεδο. Η WiTricity υποστηρίζει ότι η μορφή αυτή έχει το πλεονέκτημα της φόρτισης παρά κάποια τυχόν κακή ευθυγράμμιση. Στο σχήμα 2.15 παρουσιάζονται προτάσεις από εκθέσεις διεθνών αυτοκινητιστικών εταιριών.

## Qualcomm

Η Qualcomm αποτελεί την μεγαλύτερη εταιρία στον τομέα της και μέσω της συνεργασίας της με την BMW σκοπεύει να περάσει πρώτη στην αγορά ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα που φορτίζονται επαγωγικά. Η εταιρία έχει ανακοινώσει από το 2017 την δημοσίευση των δικών της standards και ισχυρίζεται πως η φόρτιση θα γίνεται μέσω ενός διακένου αέρα 30 cm. Τα ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα που σκοπεύουν οι Qualcomm και BMW να προωθήσουν και διαθέτουν σύστημα επαγωγικής φόρτισης θα είναι υβριδικά spor αυτοκίνητα, πράγμα που σημαίνει ότι είναι αυτοκίνητα πολυτελείας και παράλληλα θα έχουν υψηλές επιδόσεις. Η διαφοροποίηση της Qualcomm από την WiTricity είναι πως η Qualcomm δεν σκοπεύει να πουλήσει την τεχνολογία στο ευρύ κοινό καθώς πιθανότατα θεωρεί ότι τα ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα δεν πρόκειται να διαδοθούν και να γίνουν το καθιερωμένο μέσο μετακίνησης της πλειονότητας του αγοραστικού κοινού για τουλάχιστον τρεις δεκαετίες ακόμα. Συνεπώς το μήνυμα της Qualcomm είναι, τουλάχιστον για τον συγγραφέα αυτής της εργασίας, ότι το σύστημα επαγωγικής φόρτισης δεν είναι κάτι που τελικά θα καθιερωθεί ή ότι θα είναι επικερδές. Παρόλα αυτά η WiTricity φαίνεται να στηρίζει την επιτυχία της στην διάδοση της επαγωγικής φόρτισης με αποτέλεσμα η Qualcomm να θεωρεί ότι εάν μία τέτοια τεχνολογία καθιερωθεί, θα πρέπει να έχει ένα τμήμα της αγοράς. Στο σχήμα 2.16 φαίνεται η διάταξη πολλαπλών επιπέδων πηνίων της Qualcom.





σχήμα 2.16 : Συστήματα ασύρματης φόρτισης μέσω συνεργασίας BMW και Qualcomm

Οι δύο όμιλοι υποστηρίζουν ότι έχουν φτάσει μία απόδοση της τάξης του 90% σε διάκενα της τάξης των 30cm, την στιγμή που πολλά ερευνητικά κέντρα πασχίζουν να ξεπεράσουν το 86%. Ο χρόνος μόνο θα δείξει αν αυτές οι εταιρίες έχουν σοβαρά θέσει ως στόχο την διάδοση του ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου με επαγωγική ή χωρητική φόρτιση ή αν πρόκειται απλά για στρατηγική αύξησης του μετοχικού κεφαλαίου μέσω της «go green» φιλοσοφίας αλλά είναι σίγουρο ότι για την επιτυχία του προγράμματος απαιτείται η θέληση μεγάλων εταιρικών κολλοσών που με την σειρά τους θα βοηθήσουν άλλες εταιρίες να αναπτυχθούν και να διαδώσουν αυτήν την τεχνολογία.

### 2.3 Τοπολογίες μετασχηματιστών που προέκυψαν από την διεθνή έρευνα

Τα συστήματα που έχουν αναπτυχθεί έως τώρα αποτελούνται από δύο επίπεδα πηνία τα οποία όταν το ένα διαρρέεται από ρεύμα με υψηλό  $di/dt$ , δημιουργείται μαγνητικό πεδίο που όταν εισέρχεται το δεύτερο τότε δημιουργείται σε αυτό ρεύμα. Οι διατάξεις που έχουν κατασκευαστεί μπορεί να είναι ελαφρά συζευγμένα πηνία ή ισχυρά πηνία. Αυτό εξαρτάται από την ύπαρξη πυρήνα στο εσωτερικό των πηνίων όποτε λέμε ότι είναι ισχυρά συζευγμένο, αλλιώς με διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης μαγνητικού πεδίου μπορεί να δημιουργηθεί ένα ελαφρά συζευγμένο που να έχει μαγνητικές ροές με απώλειες. Το ΕΜΠ δημιούργησε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης διαφορετικό από όλα όσα έχουν προαναφερθεί. Η διάταξη Π-Ι αφενός προσπαθεί να μειώσει την απόσταση-διάκενο μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος μέσω προτεταμένων τμημάτων φερρίτη και αφετέρου δημιουργώντας ισχυρή σύζευξη, βελτιώνει την μαγνητική ροή. Παρόλα αυτά παρατηρούμε ότι η διάταξη δεν έχει υιοθετηθεί πέρα μερικών εξαιρέσεων και αυτό γιατί τα πλεονεκτήματα της διάταξης των επίπεδων πηνίων που παρουσιάζονται παρακάτω υπερτερούν σημαντικά καθώς και λόγω των σημαντικών μειονεκτημάτων της διάταξης του ΕΜΠ.

Τα σημαντικά πλεονεκτήματα των επίπεδων πηνίων:

- Η επίπεδη διάταξη επιτρέπει μεγάλη ευελιξία στην ευθυγράμμιση των πηνίων καθώς αρκεί η μαγνητική ροή από το ένα πηνίο να εισέλθει στο δεύτερο, πράγμα που μπορεί να γίνει ακόμα και αν δεν είναι τέλεια ευθυγραμμισμένα.

- Η επίπεδη διάταξη είναι ευκολότερο να εγκατασταθεί στο πάτωμα ή κάτω από κάποιο όχημα λόγω του μικρού της ύψους καθώς και να εγκατασταθεί σε μικρότερες συσκευές λόγω του ευέλικτου σχήματός της.
- Λόγω του εκτεταμένου όγκου της επίπεδης διάταξης, γίνεται ευκολότερη η διάχυση της παραγόμενης θερμότητας σε αντίθεση με την διάταξη Π-I στην οποία λόγω του μικρού της μεγέθους έχει αυξημένη πυκνότητα θερμότητας που μπορεί να απαιτεί τεχνητή ψύξη.
- Η διάταξη Π-I είναι σχεδιασμένη ώστε να μεταφέρεται βέλτιστα ενέργεια από το πρωτεύον στο δευτερεύον, αλλά εξαιτίας της μορφής του δευτερεύοντος η μεταφορά ενέργειας από το δευτερεύον στο πρωτεύον γίνεται αδύνατη. Με αυτόν τον τρόπο δεν μπορεί το ηλεκτροκίνητο αυτοκίνητο να συνδεθεί με το δίκτυο, κάνοντας έτσι έγχυση ενέργειας σε αυτό. Η έγχυση ενέργειας από μερικά χιλιάδες ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα μπορεί να αυξήσει την τάση σε ένα δίκτυο διανομής όταν αυτό την χρειάζεται. Αυτοκινητοβιομηχανίες όπως η Nissan έχει είδη εγκαταστήσει στα ηλεκτρικά αυτοκίνητά της τεχνολογία που επιτρέπει στα αυτοκίνητα να έχουν αυτήν την δυνατότητα.
- Τέλος το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των επίπεδων πηνίων είναι η δυνατότητα διαχείρισης του μαγνητικού πεδίου (magnetic field shaping) που μπορεί να επιτευχθεί με αυτήν.



σχήμα 2.17 : Συστήματα ασύρματης φόρτισης τοποθετημένο σε τοίχο

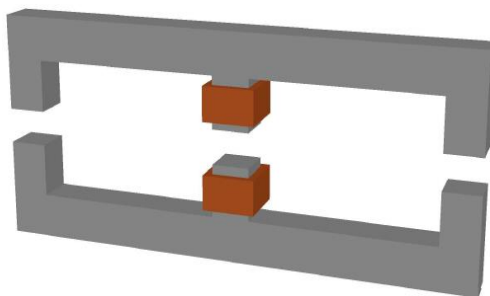
Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της διάταξης του πολυτεχνείου είναι ο τόπος εγκατάστασης της διάταξης. Η συνδεσμολογία Π-I σχεδιάστηκε με το σκεπτικό ότι το πρωτεύον θα είναι πακτωμένο σε κάποιον τοίχο και το αυτοκίνητο πλησιάζοντάς το θα επιτύχει την σύζευξη (σχήμα 2.17). Η διάταξη αυτή αν και απλή και φαινομενικά αξιόπιστη αντιμετωπίζει τα εξής προβλήματα:

- Η υπέργεια κατασκευή κινδυνεύει περισσότερο από κλοπή
- Το μοναδικό μέρος που μπορεί να τοποθετηθεί το δευτερεύον είναι το μπροστινό μέρος του αυτοκινήτου το οποίο είναι δεσμευμένο από άλλα απαραίτητα συστήματα όπως το

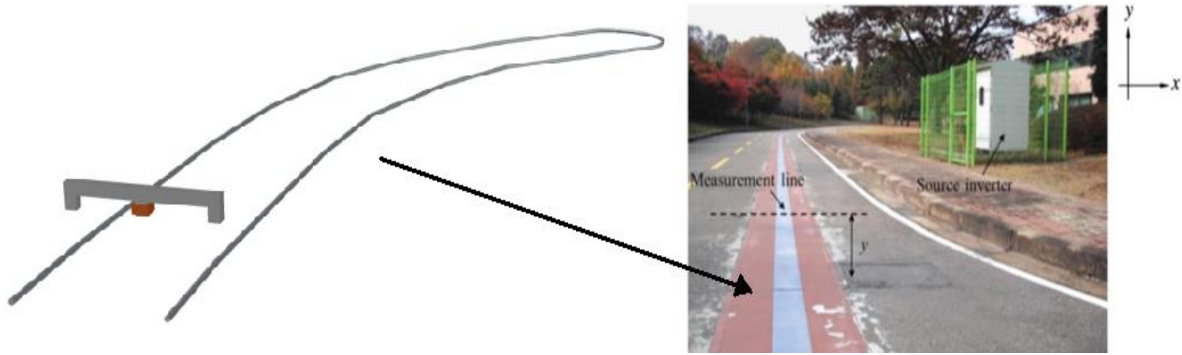
σύστημα ψύξης του κινητήρα. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες και ειδικά ο τριφασικός επαγωγής που χρησιμοποιείται στα περισσότερα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αν και έχει περιοριστεί το μέγεθός τους σε σημαντικό βαθμό, παράγουν ισχύ πολλών kW. Παρόλα αυτά η θερμότητα που παράγεται στον άξονα είναι αρκετή να καταστρέψει τον κινητήρα σε ελάχιστο χρόνο λειτουργίας. Για αυτό είναι βιοτικής σημασίας το σύστημα ψύξης (ψυγείο) στο μπροστινό σημείο του αυτοκινήτου να λαμβάνει όλο τον διαθέσιμο χώρο που είναι σχεδιαστικά δυνατόν. Συνεπώς μεταξύ του ψυγείου και του προφυλακτήρα δεν υπάρχει διαθέσιμος ή κατάλληλος χώρος για την τοποθέτηση του μετασχηματιστή.

- Το εσωτερικό του προφυλακτήρα δεν αποτελεί κατάλληλο σημείο τοποθέτησης του δευτερεύοντος καθώς κάθε αυτοκίνητο έχει διαφορετική σχεδίαση με αποτέλεσμα να καταλήξουμε με υπερβολικά μεγάλη διακύμανση σε ύψος, καμπυλότητα και υλικό. Εκτός αυτού ο προφυλακτήρας του αυτοκινήτου υπόκειται σε μεγάλο μηχανικό στρες που μπορεί να καταστρέψει τον μετασχηματιστή.

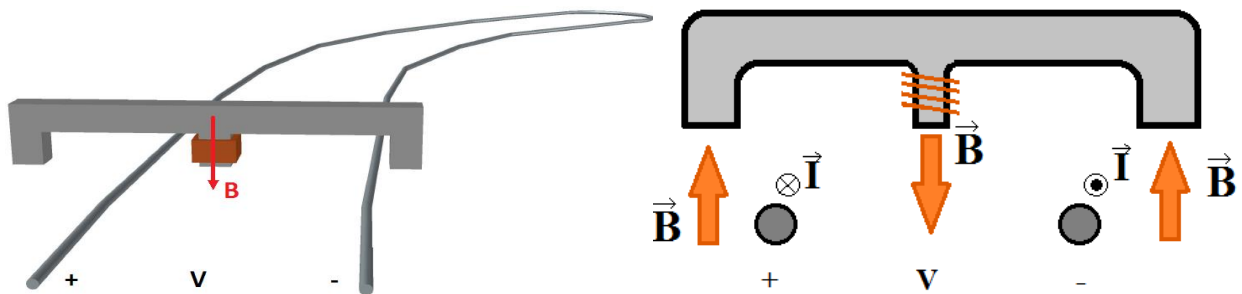
Η συνδεσμολογία Π-Ι μπορεί με μια απλή μεταβολή της θέσης του πηνίου να μετατραπεί στην συνδεσμολογία Ε-Ε που περιγράφεται στην δημοσίευση του ΚΑΙΣΤ που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο και δίνει την δυνατότητα εν κινήσει φόρτισης. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται ευκρινώς μία ράγα πάνω στην οποία μπορούν πολλαπλά αυτοκίνητα να απορροφούν ισχύ ενώ κινούνται. Η διάταξη αυτή μοιράζεται πολλά χαρακτηριστικά με την Π-Ι με την διαφορά ότι μπορεί να τοποθετεί μόνο κάτω από το αυτοκίνητο. Ο μετασχηματιστής, όταν το αυτοκίνητο είναι σταθμευμένο, έχει την μορφή του σχήματος 2.18. Όταν το αυτοκίνητο βρίσκεται εν κινήσει το πρωτεύον του μετασχηματιστή είναι μία ράγα δύο καλωδίων με ρεύμα υψηλής συχνότητας (σχήμα 2.19-2.20). Το αμάξι λοιπόν, όταν ταξιδεύει, απορροφά ισχύ από την ράγα, το μαγνητικό πεδίο της οποίας εισέρχεται στον πυρήνα του πηνίου του αυτοκινήτου (σχήμα 2.20).



σχήμα 2.18 : Τοπολογία κατά την διάρκεια φόρτισης Ε-Ε διάταξης




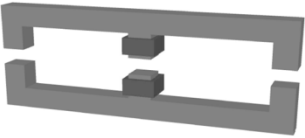
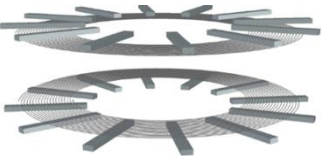
σχήμα 2.19 : Τοπολογία φόρτισης κατά την διάρκεια οδήγησης

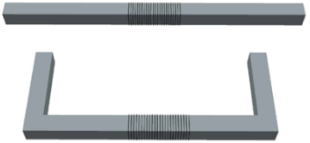
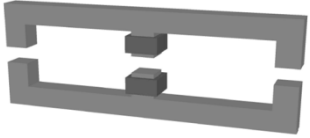
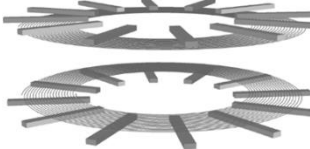


σχήμα 2.20 : Τοπολογία φόρτισης κατά την διάρκεια οδήγησης (φορά μαγνητικού πεδίου)

Στον πίνακα 2.2 παραθέτονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τριών διατάξεων που αντιπροσωπεύουν την πλειονότητα των εφαρμογών της επαγωγικής φόρτισης και στον σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η κύρια εφαρμογή για κάθε μία από τις διατάξεις.

πίνακας 2.2 : Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε διάταξης μετασχηματιστών που προέκυψαν από την διεθνή έρευνα

ΔΙΑΤΑΞΗ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
 <p>(Διάταξη Π-I)</p>	<p>Ισχυρότερο μαγνητικό κύκλωμα σε αντίθεση με τις συνδεσμολογίες επίπεδων πηνίων</p> <p>Μικρότερο διάκενο αέρα κατά την σταθμευμένη φόρτιση</p> <p>Μικρότερη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή λόγω μεγαλύτερου k</p> <p>Μικρότερη ποσότητα υλικών</p> <p>Δυνατότητα τοποθέτησης σε διάφορα σημεία πέραν του εδάφους – αυτοκινήτου</p> <p>Εύκολη εγκατάσταση ως προσθήκη σε ένα αυτοκίνητο που σχεδιάστηκε χωρίς την προσθήκη επαγωγικού φορτιστή</p>	<p>Δύσκολη ευθυγράμμιση, απαιτείται κάποιο είδος αυτόματης στάθμευσης</p> <p>Δεν είναι ικανή η μεταφορά ενέργειας και από τις δύο πλευρές</p> <p>Αυξημένη πυκνότητα θερμότητας</p>
 <p>(Διάταξη E-E)</p>	<p>Όλα τα θετικά της πρώτης διάταξης (Π I)</p> <p>Ικανότητα τροφοδότησης του δικτύου</p> <p>Δυνατότητα φόρτισης κατά την κίνηση στον αυτοκινητόδρομο</p>	<p>Μεγαλύτερη δυσκολία ευθυγράμμισης από τις άλλες διατάξεις</p> <p>Αυξημένη πυκνότητα θερμότητας</p>
 <p>(Διάταξη Επίπεδων Πηνίων)</p>	<p>Ευκολότερη ευθυγράμμιση πρωτεύοντος - δευτερεύοντος</p> <p>Ευκολότερη τοποθέτηση λόγω της επίπεδης μορφής του Μ/Σ</p> <p>Μικρότερη πυκνότητα θερμότητας, μικρότερη ανάγκη για ψύξη</p> <p>Ικανότητα τροφοδότησης του δικτύου</p> <p>Ικανότητα χρήσης πολλαπλών πηνίων στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον</p>	<p>Μεγάλες απώλειες μαγνητικής ροής</p> <p>Χρήση σημαντικά μεγαλύτερης ποσότητας υλικού για την μαγνητική θωράκιση</p> <p>Κίνδυνος εισχώρησης ξένου αντικειμένου στο διάκενο</p>

πίνακας 2.3 : Χρήση της κάθε διάταξης μετασχηματιστών που προέκυψαν από την διεθνή έρευνα	
ΔΙΑΤΑΞΗ	ΧΡΗΣΗ
 <p>(Διάταξη Π I)</p>	Φόρτιση ηλεκτρικού αυτοκινήτου με το πρωτεύον συνδεδεμένο κυρίως σε τοίχο, όχι δάπεδο
 <p>(Διάταξη E E)</p>	Φόρτιση σταθμευμένου ηλεκτρικού αυτοκινήτου καθώς και-> Δυνατότητα φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου <b>εν κινήσει</b>
 <p>(Διάταξη Επίπεδων Πηνίων)</p>	<p>Δυνατότητα ενσωμάτωσης σε μικρές συσκευές όπως κινητά και φορητούς υπολογιστές</p> <p>Φόρτιση ηλεκτρικού αυτοκινήτου</p> <p>Φόρτιση υποβρύχιων συσκευών</p> <p>Φόρτιση συσκευών σε βιομηχανικό περιβάλλον</p>

## Κεφάλαιο 3: Μαθηματικό μοντέλο συστήματος επαγωγικής φόρτισης και προσομοίωσή του

### 3.1 Εισαγωγή

Ένας από τους πιο καινοτόμους τρόπους φόρτισης των ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων αποτελεί η επαγωγική φόρτιση (IPTS: Inductive Power Transfer System). Η βασική ιδέα είναι πως για την φόρτιση των μπαταριών από το δίκτυο, δεν θα χρησιμοποιείται καλώδιο αλλά ένας μετασχηματιστής, του οποίου το πρωτεύον τύλιγμα βρίσκεται στον σταθμό φόρτισης και το δευτερεύον εντός του αυτοκινήτου. Ο οδηγός όταν θα θέλει λοιπόν να φορτίσει το αυτοκίνητό του θα σταθμεύει σε ειδικές θέσεις στις οποίες υπάρχει η κατάλληλη διάταξη και το πρωτεύον το οποίο θα βρίσκεται είτε στο δάπεδο-δρόμο είτε στον τοίχο θα εκπέμπει ένα μαγνητικό πεδίο, που με τη σειρά του θα επάγει ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα του αυτοκινήτου. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται εδώ και δεκαετίες με πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα ηλεκτρικές οδοντόβουρτσες και βηματοδότες. Η τεχνολογία αυτή σκοπεύει να βελτιώσει σε μεγάλο βαθμό την καθημερινή χρήση του αυτοκινήτου καθώς η φόρτιση αποτελεί τροχοπέδη στην διάδοσή του και στην εξαπλωμένη χρήση του. Τα επίπεδα φόρτισης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1 και απευθύνονται για την ενσύρματη φόρτιση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Παρατηρούμε ότι το επίπεδο αργής φόρτισης είναι αρκετό για φόρτιση σε οικιακό επίπεδο ενώ το επίπεδο της γρήγορης δημιουργεί μαγνητικά πεδία απαγορευτικά για λόγους ασφαλείας και υγείας. Συνεπώς, το κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθεί στην παρουσίαση ενός φορτιστή σε επίπεδο αργής φόρτισης.

πίνακας 3.1 : Επίπεδα φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων

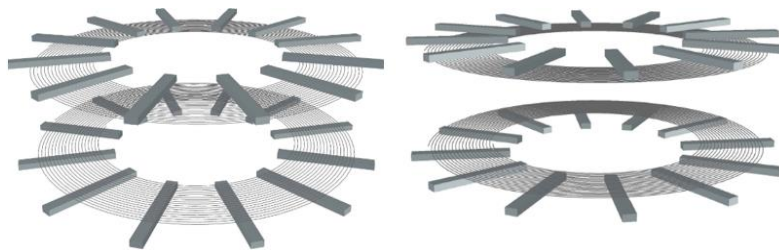
Επίπεδο φόρτισης	Ισχύς	Διάρκεια
Αργή	1 - 7,4kW	7 - 8 ώρες
Μεσαία	10 - 20kW	2 - 3 ώρες
Γρήγορη	40kW	45 λεπτά

### 3.2 Από τις εξισώσεις του Maxwell στο Ισοδύναμο κύκλωμα

Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, το πρόβλημα είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως, οπότε η ανάλυση μπορεί να ξεκινήσει από τις εξισώσεις του Maxwell που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2 με τις ολοκληρωτικές και τις σημειακές σχέσεις τους [14].

πίνακας 3.2 : Εξισώσεις Maxwell		
Νόμοι Ηλεκτρομαγνητισμού	Ολοκληρωτική σχέση	Σημειακή σχέση
Διατήρηση φορτίου	$\oint dl = -\frac{\theta}{\theta t} \int dQ$	$\nabla \cdot J = -\frac{\theta}{\theta t} \rho$
Gauss για ηλεκτρικό πεδίο <b>D</b>	$\oint D \cdot dS = \int dQ$	$\nabla \cdot D = \rho$
Gauss για μαγνητικό πεδίο <b>B</b>	$\oint B \cdot dS = 0$	$\nabla \cdot B = 0$
Faraday	$\oint E \cdot dr = -\frac{\theta}{\theta t} \int BdS$	$\nabla \times E = -\frac{\theta}{\theta t} B$
Ampere	$\oint H \cdot dr = \int dQ$	$\nabla \times E = J$

Οι κύριες διατάξεις και πιο υποσχόμενες είναι δύο και η κάθε μία έχει διαφορετική φιλοσοφία. Η πρώτη και πιο προφανής περιέχει δύο πηνία, το κάθε ένα σε μορφή σπείρας έτσι ώστε το ύψος του πηνίου να μην ξεπερνά το πάχος του σύρματος. Τα δύο αυτά επίπεδα πηνία τοποθετούνται το ένα πάνω από το άλλο σε απόσταση ίση του εδάφους με το σασί του αυτοκινήτου, έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο που εκπέμπεται από το πρωτεύον (έδαφος) να εισέρχεται στο δευτερεύον (αυτοκίνητο). Με σκοπό να βοηθηθεί η μαγνητική ροή από το ένα πηνίο στο άλλο τοποθετούνται πλάκες φερρίτη κάτω από το πρωτεύον και πάνω από το δευτερεύον στην ακινικά στην φορά του μαγνητικού πεδίου (σχήμα 3.1). Αυτό διερχόμενο από τις πλάκες φερρίτη δεν αλλοιώνεται από τα υπόλοιπα υλικά της κατασκευής, διατηρεί την ενέργειά του και προστατεύεται ο υπόλοιπος εξοπλισμός από EMI.

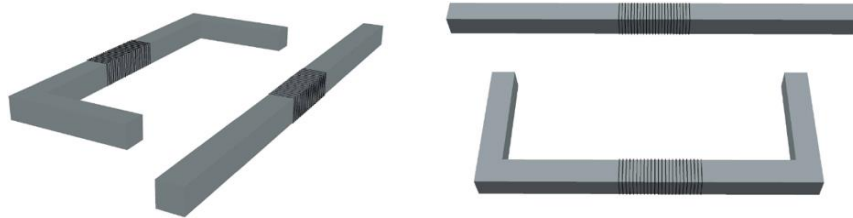


σχήμα 3.1 : Απεικόνιση των επίπεδων πηνίων που ορίζουν έναν μετασχηματιστή

Η δεύτερη μέθοδος μιμείται τον κλασικό μετασχηματιστή ο οποίος σχεδιάζεται ώστε να διατηρεί ένα κλειστό μαγνητικό κύκλωμα. Σε αυτή την περίπτωση δεν χρησιμοποιείται φερρίτης αλλά πλάκες σιδήρου ενωμένες μεταξύ τους με τρόπο που λειτουργεί ένας μετασχηματιστής του ηλεκτρικού δικτύου με την διαφορά ότι παρεμβάλλεται ένα διάκενο αέρα που αυξάνει την μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος. Η ύπαρξη σταθερού πυρήνα δημιουργεί ένα μονοπάτι

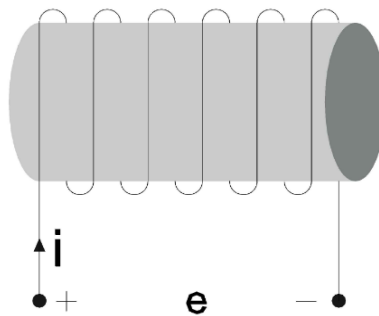


από το οποίο μπορεί να περάσει η μαγνητική ροή  $\Phi$ , χωρίς να χάνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας με αποτέλεσμα τα ισοδύναμα κυκλώματα που θα σχεδιαστούν στην συνέχεια να είναι πιο ακριβή και να μοιάζουν περισσότερο στο μοντέλο του ιδανικού μετασχηματιστή. Αυτό το μοντέλο αποκαλείται μοντέλο Π-Ι (σχήμα 3.2).



σχήμα 3.2 : Μοντέλο Π-Ι μετασχηματιστή ισχυρά συζευγμένου

Μέχρι στιγμής, η βιβλιογραφία προτείνει την μέθοδο Π-Ι ως βέλτιστη από πλευράς απόδοσης και από οικονομίας υλικών, συνεπώς η εφαρμογή των κανόνων του Maxwell θα εφαρμοστούν σε μια απλούστερη διάταξη κυλινδρικών πηνίων που μοιάζει πολύ με το μοντέλο Π-Ι.



σχήμα 3.3 : Απεικόνιση πηνίου με πυρήνα που το διαρρέει ρεύμα  $i$

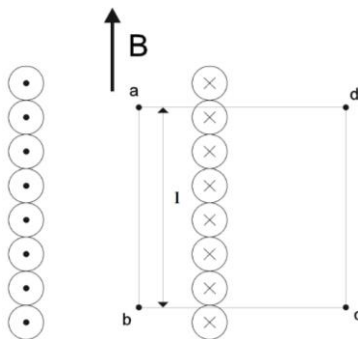
$$\text{Από τον νόμο του Faraday: } \oint E \cdot dr = -(U_a - U_b) = -e \quad (3.1)$$

Όπου  $U_a - U_b$  η διαφορά δυναμικού στα άκρα του πηνίου (σχήμα 3.3).

$$\text{Από τον νόμο του Ampere στο σχήμα 2.4 : } \oint H \cdot dr = \int dQ = I_{\text{enclosed}} \Rightarrow I_{\text{enclosed}} = n \cdot I \cdot l \Rightarrow$$

$$\oint H \cdot dr = \int_a^b H dl + \int_b^c H dl + \int_c^d H dl + \int_d^a H dl = \int_a^b H dl = B \cdot l \cdot \frac{1}{\mu} = n \cdot I \cdot l \Rightarrow$$

$$H = n \cdot I \text{ (Α-ε) αμπεροελίγματα} \quad (3.2)$$



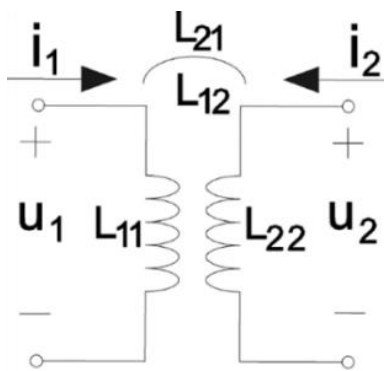
σχήμα 3.4 : Παραγωγή μαγνητικού πεδίου από πηνίο

Όπου  $H$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου,  $l$  το μήκος του βρόγχου που περικλείει ρεύμα  $I$ ,  $n$  ο αριθμός των τυλιγμάτων του πηνίου (σχήμα 3.4)

Η μαγνητική ροή  $\phi$  είναι ως γνωστό  $\phi = \int B \cdot dS$  συνεπώς με αντικατάσταση στον νόμο Faraday

$$\oint E \cdot dr = -\frac{\theta}{\theta t} \int B dS \Rightarrow -e = -\frac{\theta \phi}{\theta t} \Rightarrow e = \frac{\theta \phi}{\theta t} \tag{3.3}$$

Από αυτή τη σχέση προκύπτουν οι σχέσεις των αυτεπαγωγών του μετασχηματιστή [15], (σχέσεις 3.5-3.6):



σχήμα 3.5 : Απλοποιημένο μοντέλο μετασχηματιστή

$$V_1 = \frac{d\phi_1}{dt} = \frac{df_1}{di_1} \frac{di_1}{dt} + \frac{df_1}{di_2} \frac{di_2}{dt} \tag{3.4}$$

$$V_2 = \frac{d\phi_2}{dt} = \frac{df_2}{di_1} \frac{di_1}{dt} + \frac{df_2}{di_2} \frac{di_2}{dt} \tag{3.5}$$

=>

$$V_1 = \frac{d\varphi_1}{dt} = L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (3.6)$$

$$V_2 = \frac{d\varphi_2}{dt} = L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \quad (3.7)$$

Με ολοκλήρωση προκύπτει  $\Rightarrow$

$$\varphi_1 = L_{11}i_1 + L_{12}i_2 \quad (3.8)$$

$$\varphi_2 = L_{21}i_1 + L_{22}i_2 \quad (3.9)$$

όπου  $L_{11}$  και  $L_{22}$  οι αυτεπαγωγές των πηνίων, ενώ  $L_{12}$  και  $L_{21}$  οι αμοιβαίες επαγωγές του μετασχηματιστή. Για ιδανικό μετασχηματιστή παίρνουμε ως δεδομένο ότι  $L_{12} = L_{21} = M$  ή αλλιώς ότι  $M \leq \sqrt{L_{12}L_{21}}$ . Τα  $L$  είναι πάντα θετικές ποσότητες ενώ το  $M$  μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό ανάλογα με την φορά του ρεύματος των πηνίων. Ορίζουμε πολύ σημαντικό μέγεθος τον συντελεστή σύζευξης του πηνίου:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} \quad (3.10)$$

Ο συντελεστής σύζευξης μπορεί να παίρνει τιμές από 0 έως 1. Για  $k=1$  όλη η μαγνητική ροή που εκπέμπεται από το ένα πηνίο εισέρχεται στο δεύτερο, και προφανώς για  $k<1$  υπάρχουν απώλειες μαγνητικής ροής. Συνεπώς για μία τέλεια σύζευξη θα έχουμε:

$$L_{11}L_{22} = M^2 \Rightarrow$$

$$\frac{L_{22}}{M} = \frac{M}{L_{11}} = \frac{\sqrt{L_{11}L_{22}}}{L_{11}} = \sqrt{\frac{L_{22}}{L_{11}}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{V_2}{V_1} \quad (3.11)$$

που αποτελεί τον ορισμό του ιδανικού μετασχηματιστή ( $n_1$  και  $n_2$  το αριθμός τυλιγμάτων των πηνίων και  $V_1$  και  $V_2$  η τάση στα άκρα των πηνίων). Για έναν μη ιδανικό μετασχηματιστή έχουμε ότι  $L_{11}L_{22} > M^2$  καθώς μέρος της μαγνητικής ροής ρέει εκτός του πυρήνα. Η ροή που δεν παίρνει μέρος στην μαγνητική σύζευξη αποκαλείται μαγνητική διαρροή. Οι νέες τιμές των αυτεπαγωγών του μετασχηματιστή είναι οι εξής (Μοντέλο T, σχήμα 2.8):

$$(L_{11} - L_\alpha)(L_{22} - L_\beta) = M^2 \quad (3.12)$$

$$\frac{L_{22}-L_\beta}{M} = \frac{M}{L_{11}-L_\alpha} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.13)$$

$$L_\alpha = L_{11} - \frac{n_1}{n_2}M \quad (3.14)$$

$$\text{και } L_\beta = L_{22} - \frac{n_2}{n_1}M \quad (3.15)$$

Για την επίλυση της υπό μελέτης διάταξης απαιτούνται βοηθητικά ισοδύναμα κυκλώματα καθώς η χρήση του μοντέλου ιδανικού μετασχηματιστή θα δώσει πολύ λάθος αποτελέσματα. Για την

δημιουργία του κατάλληλου ισοδύναμου κυκλώματος δεν έχουμε παρά να χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις που ήταν αποτέλεσμα του νόμου του Faraday μετασχηματισμένες στο πεδίο των συχνοτήτων [15]:

$$V_1 = \frac{d\phi_1}{dt} = L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (3.16)$$

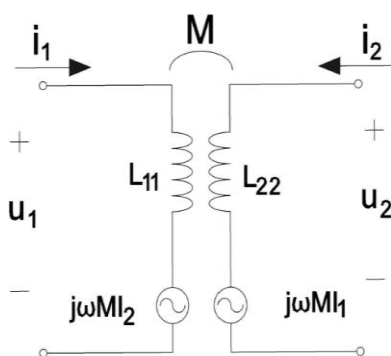
$$V_2 = \frac{d\phi_2}{dt} = L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \quad (3.17)$$

=>

$$V_1(j\omega) = L_{11}j\omega i_1 + Mj\omega i_2 \quad (3.18)$$

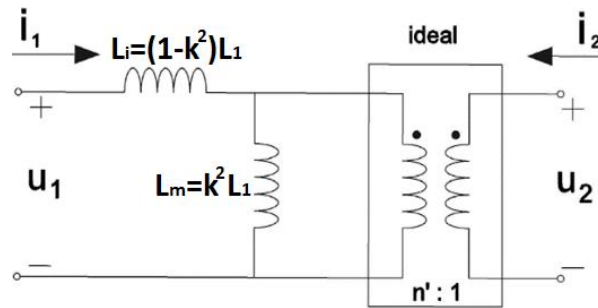
$$V_2(j\omega) = Mj\omega i_1 + L_{22}j\omega i_2 \quad (3.19)$$

Οι όροι  $Mj\omega i_2$  και  $Mj\omega i_1$  είναι προφανώς εξαρτημένες πηγές τάσης καθώς εξαρτώνται από ρεύμα που διαρέει διαφορετικό πηνίο και οι όροι  $L_{11}j\omega i_1$  και  $L_{22}j\omega i_2$  είναι οι τάσεις των επαγωγικών φορτίων  $L_{11}$  και  $L_{22}$ . Το τελικό κύκλωμα είναι αυτό που ακολουθεί στο σχήμα 3.6. Το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα μπορεί να φανεί ιδιαίτερος χρήσιμο σε αναλύσεις ροής ισχύος όπως θα γίνει στην παράγραφο 3.5.



σχήμα 3.6 : Ισοδύναμο κύκλωμα συζευγμένων πηνίων

Το κύκλωμα αυτό μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω στις δύο παρακάτω μορφές που επιτρέπουν την χρήση της ανακλώμενης σύνθετης αντίστασης που θα εξηγηθεί παρακάτω. Επίσης τα παρακάτω μοντέλα είναι απαραίτητα σε προγράμματα όπως το matlab ώστε να πραγματοποιηθούν με ακρίβεια οι προσομοιώσεις:



σχήμα 3.7 : Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή (model 2)[57]

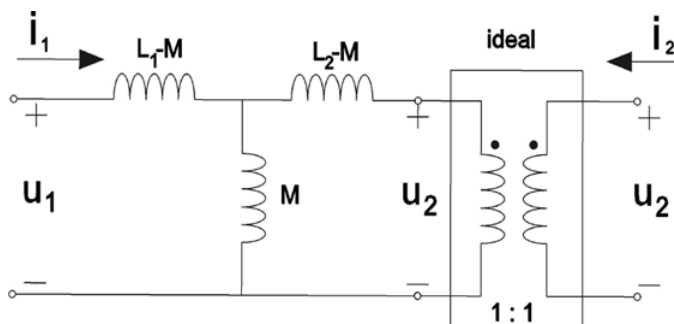
Για το μοντέλο 2, σχήμα 2.7 ισχύει ότι:

$$n' = k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (3.20)$$

$$(1 - k^2)L_1 = L_i \text{ επαγωγική απώλεια} \quad (3.21)$$

$$k^2 L_1 = L_m \text{ μαγνητική επαγωγή} \quad (3.22)$$

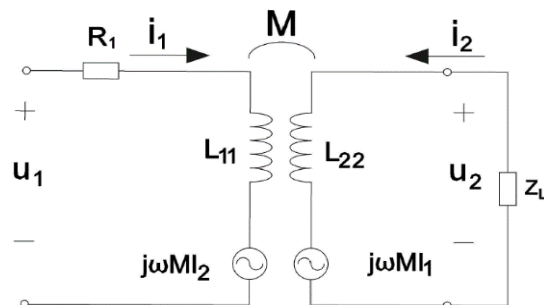
Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.7 καθώς και αυτό του σχήματος 3.8 μας δίνουν πολύ σημαντικές πληροφορίες για την διάταξη που θέλουμε να κατασκευάσουμε. Στο σχήμα 3.7 παρατηρείται η ύπαρξη δύο πηνίων και ενός ιδανικού μετασχηματιστή. Ο ιδανικός μετασχηματιστής του σχήματος αν και δεν υπάρχει στην πραγματικότητα, υπάρχει για να αναπαραστήσει την γαλβανική σύνδεση του κυκλώματος. Το ίδιο ισχύει και για το σχήμα 3.8 στο οποίο η αναλογία τυλιγμάτων είναι ένα προς ένα σε αντίθεση με τον μετασχηματιστή του σχήματος 3.7. Ο ιδανικός μετασχηματιστής μεταφέρει την τάση του πηνίου  $L_m$  στην έξοδο του κυκλώματος μέσω του ιδανικού μετασχηματιστή. Συνεπώς η πτώση τάσης του συγκεκριμένου πηνίου είναι ίση με την τάση εξόδου (σχήμα 3.7). Η τάση εξόδου του κυκλώματος εξαρτάται τελικά από τον συντελεστή σύζευξης (σχέση 3.10). Για ισχυρά συζευγμένο μετασχηματιστή έχουμε μεγάλο  $k$  ενώ για ασθενώς συζευγμένο, όπως στην περίπτωση της επαγωγικής φόρτισης, είναι της τάξης του 0,2 με αποτέλεσμα το  $L_m$  να είναι πολύ μικρό και το  $L_i$  να είναι πολύ μεγάλο. Συνεπάγεται έτσι ότι όλη η πτώση τάσης συμβαίνει μεταξύ του πηνίου  $L_i$ , που αναπαριστά τις απώλειες του πρωτεύοντος, και όχι στο  $L_m$  όπου θέλουμε την μεγαλύτερη πτώση τάσης. Ο βασικότερος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι ο μηδενισμός του πηνίου  $L_i$  τοποθετώντας σε σειρά έναν πυκνωτή που το αντισταθμίζει για κάποια συγκεκριμένη συχνότητα. Με τον ίδιο τρόπο αντιμετωπίζουμε και το κύκλωμα του σχήματος 3.6, τοποθετώντας έναν πυκνωτή σε σειρά με το πηνίο  $L_1$ -M και έναν πυκνωτή εν σειρά ή αλυσωτά με το  $L_2$ -M.



σχήμα 3.8 : Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή (model 1 ή μοντέλο T)[16]

### 3.3 Ανακλώμενη σύνθετη αντίσταση

Όταν παρατηρείται η αντίσταση στο δευτερεύον δύο συζευγμένων πηνίων από τους ακροδέκτες του πρωτεύοντος, αυτή παρατηρείται μετασχηματισμένη και αποκαλείται ανακλώμενη σύνθετη αντίσταση.



σχήμα 3.9 : Ισοδύναμο κύκλωμα συζευγμένων πηνίων με σκοπό την εύρεση της ισοδύναμης αντίστασης φορτίου

Εφαρμόζοντας τον νόμο τάσεων του Κίρχοφ παίρνουμε τις εξής εξισώσεις:

$$(R_1 + j\omega L_{11})I_1 - j\omega MI_2 = V_2 \quad (3.23)$$

$$-j\omega MI_1 + [j\omega L_{22} + Z_L j\omega]I_2 = 0 \quad (3.24)$$

=>

$$I_1 = \frac{j\omega L_{22} + Z_L}{(R_1 + j\omega L_{11})(Z_L + j\omega L_{22}) + \omega^2 M^2} V_2 \quad (3.25)$$

=>

$$Z_{eq}(j\omega) = \frac{V_1}{I_1} = R_1 + j\omega L_{11} + \frac{\omega^2 M^2}{Z_L + j\omega L_{22}} \quad (3.26)$$

Το σκέλος  $R_1 + j\omega L_{11}$  είναι η αντίσταση εισόδου του Μ/Σ και το σκέλος  $\frac{\omega^2 M^2}{Z_L + j\omega L_{22}}$  είναι η ανακλώμενη σύνθετη αντίσταση όπου  $Z_L + j\omega L_{22} = Z_S$ .

$$Z_{ref}(j\omega) = \frac{\omega^2 M^2}{Z_S} \quad (3.27)$$

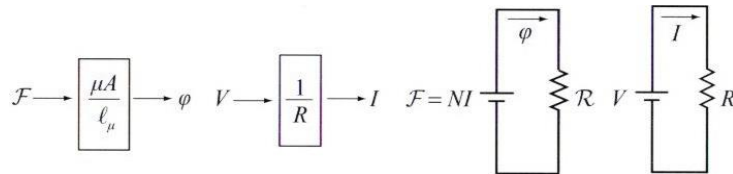
Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται ώστε να υπολογιστεί η επιθυμητή ροή ισχύος του Μ/Σ. Όταν δεν υπάρχει μαγνητική σύζευξη τότε αποδεικνύεται εύκολα ότι η συχνότητα συντονισμού είναι  $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Τα κυκλώματα συντονισμού με μαγνητική σύζευξη μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να έχουν καλύτερη απόκριση συχνότητας.

Επίσης ορίζουμε ως συντελεστή ποιότητας:  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$  (3.28)

Ο συντελεστής ποιότητας ορίζεται ως το λόγο αποθηκευμένης ενέργειας προς την ενέργεια που καταναλώνεται ανά κύκλο λειτουργίας του Μ/Σ και μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμος στον έλεγχο της συσκευής όπως μπορεί να φανεί και στο κεφάλαιο 2.

### Μαγνητικά κυκλώματα:

Η χρήση πυρήνα σιδήρου ή φερρίτη για την μαγνητική ροή, όταν αυτή κλείνει έναν βρόγχο μπορεί να προσομοιωθεί με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα με μία DC πηγή τάσης και μία αντίσταση.



σχήμα 3.10 : Αναλογία ηλεκτρικού και μαγνητικού κυκλώματος [21]

$F$  ορίζεται η μαγνητεργετική δύναμη (ΜΕΔ) και μετριέται σε (Α-ε) Αμπεροερίγματα. Η μαγνητική ροή  $\phi$  είναι περίπου ίση με το μαγνητικό πεδίο  $B$  επί το εμβαδό της επιφάνειας από την οποία διέρχεται. Αποδεικνύεται με την βοήθεια της παραπάνω υπόθεσης για το μαγνητικό κύκλωμα ότι τελικά  $\phi = F \frac{\mu A}{l_\mu}$ . Το μαγνητικό κύκλωμα χρησιμοποιεί ως αντιστάσεις αυτές των εξισώσεων 3.29 και 3.30.

$$\text{Μαγνητική αντίσταση διακένου: } R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A} \quad (3.29)$$

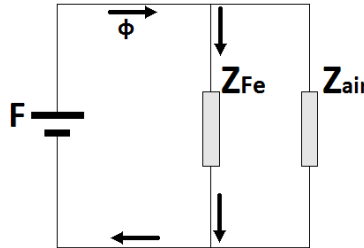
$$\text{Μαγνητική αντίσταση πυρήνα: } R_c = \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A} \quad (3.30)$$

Η μαγνητική αλληλεπαγωγή μπορεί απλά να βρεθεί από τις εξισώσεις 3.31 και 3.32 διευκολύνοντας πολύ τους υπολογισμούς.

$$L_{12} = \frac{L_1}{i_2 i_1=0} \quad (3.31)$$

$$L_{12} = \frac{N_1 N_2}{R_{\text{μαγνητικό}}} = L_{21} \quad (3.32)$$

Για την διάταξη ενός μετασχηματιστή έχουμε το παρακάτω απλοποιημένο ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα κατασκευασμένο σύμφωνα με τους κανόνες του σχήματος 3.10.



σχήμα 3.11 : Απλοποιημένο ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα μετασχηματιστή

Σε έναν μετασχηματιστή με σιδερένιο πυρήνα η μαγνητική ροή ρέει μέσω της μαγνητικής αντίστασης του σιδήρου καθώς ισχύει η σχέση 3.33:

$$Z_{\text{Fe}} \ll Z_{\text{air}} \quad (3.33)$$

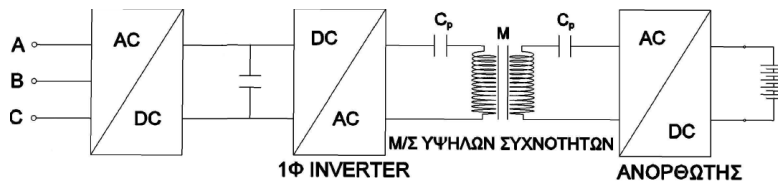
Σε περίπτωση που αφαιρεθεί ο μαγνητικός πυρήνας η μαγνητική ροή πρέπει να περάσει από την αντίσταση του αέρα με αποτέλεσμα να μειωθεί ο συντελεστής σύζευξης του κυκλώματος σύμφωνα με την σχέση 3.11.

### 3.4 Διάταξη και αντιστάθμιση του συστήματος επαγωγικής φόρτισης

Η σχεδίαση των IPTS (Inductive Power Transfer Systems) έχει την εξής ιδιαιτερότητα που δεν μοιράζεται με τους μετασχηματιστές του δικτύου ή άλλων μικροκυκλωμάτων και αυτό για δύο πολύ σημαντικούς λόγους. Καταρχάς σε πολλές διατάξεις δεν υπάρχει πυρήνας και αφετέρου τα χαρακτηριστικά αλληλεπαγωγής των πηνίων του μπορεί να μεταβάλλονται κατά την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Η έλλειψη πυρήνα, όπως έχει περιγραφεί στην παράγραφο 3.2, οδηγεί την πτώση τάσης να παίρνει μέρος στη επαγωγική διαρροή (leakage inductance) του μετασχηματιστή με αποτέλεσμα να μην ρέει καθόλου ισχύς στο φορτίο. Η μεταβολή των χαρακτηριστικών αλληλεπαγωγής οφείλεται στη κακή ευθυγράμμιση του πρωτεύοντος με το δευτερεύον του μετασχηματιστή. Για τον πρώτο λόγο χρησιμοποιούμε πυκνωτές συνήθως σε σειρά με την επαγωγική διαρροή ώστε αυτή να μηδενιστεί. Όμως τα πηνία και οι πυκνωτές αντιστάθμισης δεν είναι τα μοναδικά στοιχεία του συστήματος. Ο μετασχηματιστής για να λειτουργήσει αξιόπιστα και αποδοτικά πρέπει να λαμβάνει είσοδο από έναν αντιστροφέα (σχήμα

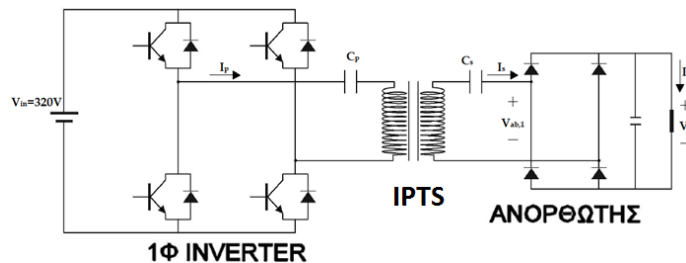


3.13) ο οποίος θα παρέχει ρεύμα υψηλής συχνότητας που με την σειρά του θα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο ικανό να διεισδύσει στο δευτερεύον του μετασχηματιστή και ταυτόχρονα έχει την δυνατότητα να μεταβάλλει την συχνότητα λειτουργίας του σε περίπτωση που έχουν μεταβληθεί τα στοιχεία αλληλεπαγωγής του συστήματος που οδηγούν το  $M$  σε μεταβολή της τιμής του. Όπως έχει περιγραφεί ένα LC κύκλωμα για να συντονιστεί, πρέπει να έχει την κατάλληλη συχνότητα ώστε να ισχύει  $f=1/(2\pi\sqrt{LC})$ . Στη περίπτωση που η ευθυγράμμιση των πηνίων δεν είναι καλή μεταβάλλεται το  $L$  του συστήματος καθώς μεταβάλλεται ο συντελεστής  $M$  του συστήματος όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9. Συνεπώς καθότι δεν γίνεται να αντικαταστήσουμε τον πυκνωτή κατά την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, μεταβάλλοντας την συχνότητα λειτουργίας επιτυγχάνουμε την ισότητα  $f=1/(2\pi\sqrt{LC})$ . Δύο πιθανοί τρόποι ελέγχου περιγράφονται στην παράγραφο 3.5.

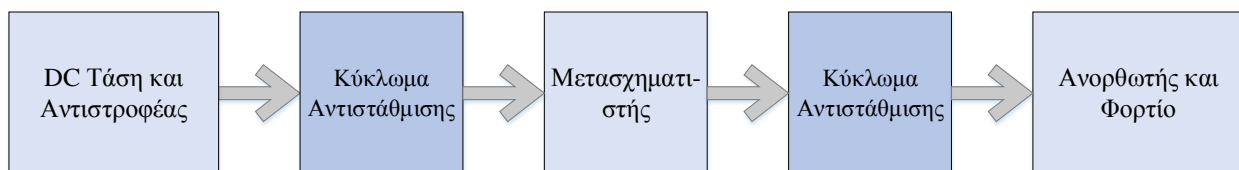


σχήμα 3.12 : Ισοδύναμο κύκλωμα ασύρματου φορτιστή με τριφασική παροχή

Η τελική διάταξη έχει την μορφή του σχήματος 3.12 ενώ μπορεί στην είσοδό του να τροφοδοτείται από τριφασική παροχή (σχήμα 3.13) ή μονοφασικό ανορθωτή, ανάλογα με την διαθέσιμη παροχή από το δίκτυο. Καθώς στην παρούσα εργασία δεν μελετάται φορτιστής ταχείας φόρτισης, η ροή ισχύος από μία φάση είναι επιτρεπτή.



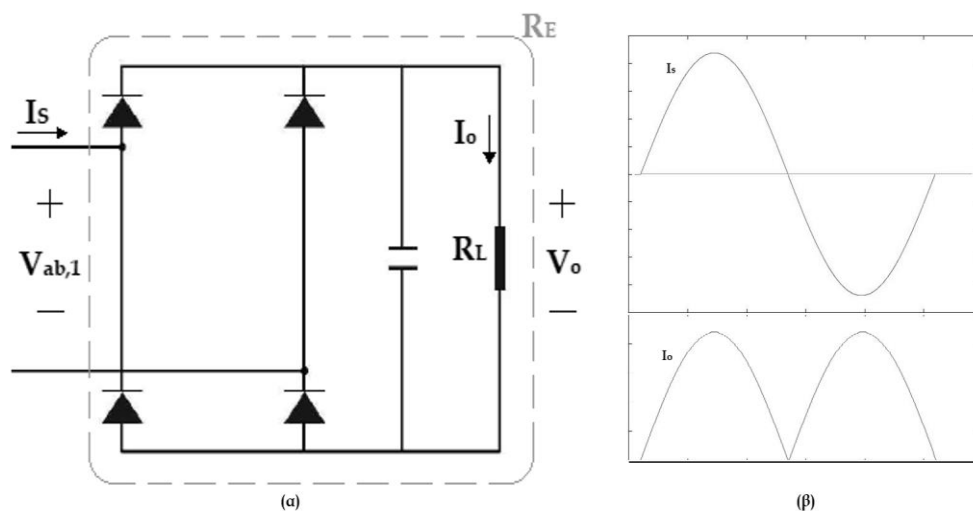
σχήμα 3.13 : Λεπτομερές ισοδύναμο κύκλωμα ασύρματου φορτιστή με DC παροχή



σχήμα 3.14 : Ισοδύναμο κύκλωμα ασύρματου φορτιστή

Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζεται η κυκλωματική διάταξη του φορτιστή. Το πρώτο είναι ο αντιστροφέας ο οποίος μετατρέπει την DC τάση της εισόδου σε μία υψηλής συχνότητας. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί το σήμα να δημιουργηθεί με την χρήση ενός μοντέλου SPWM κατά το

οποίο με χρήση τριών σημάτων, δύο σημάτων φέροντος και ένα αναφοράς δημιουργούνται τετραγωνικοί παλμοί των οποίων η θεμελιώδη συνιστώσα μπορεί να μεταφερθεί όταν έχει την κατάλληλη συχνότητα μέσω του μετασχηματιστή προς την μπαταρία ή πιο απλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας τετραγωνικός παλμός υψηλής συχνότητας που παράγεται μέσω ενός απλού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας. Και στις δύο περιπτώσεις το σήμα αυτό φιλτράρεται μέσω των επόμενων τριών σταδίων της διάταξης με αποτέλεσμα να προκύψει ημιτονοειδές σήμα εξόδου στο φορτίο. Αμέσως μετά τον αντιστροφέα ακολουθεί το πρώτο κύκλωμα αντιστάθμισης. Αυτό όπως θα δούμε και στην συνέχεια μπορεί να έχει πολλές μορφές (σχήμα 3.16), αλλά συνηθίζεται να είναι ένας πυκνωτής σε σειρά με το πηνίο που μοντελοποιεί τις απώλειες μαγνήτισης. Αμέσως μετά ακολουθούν τα δύο πηνία που σχηματίζουν τον μετασχηματιστή και το δεύτερο κύκλωμα αντιστάθμισης. Πριν την μπαταρία υπάρχει ένας ανορθωτής ο οποίος μετατρέπει την αρνητική τάση σε θετική (σχήμα 3.15(β)). Αυτό το στάδιο είναι πάντα απαραίτητο για την φόρτιση μιας μπαταρίας καθώς η είσοδος αρνητικής τάσης (ανάστροφης) σε μια μπαταρία μπορεί να την καταστρέψει. Στο σχήμα 3.13 φαίνονται τα στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συνήθη διάταξη ενός επαγωγικού φορτιστή. Στο σχήμα αυτό φαίνονται οι δύο πυκνωτές που ονομάζονται πυκνωτές αντιστάθμισης και συνηθίζουν να αποτελούν το κύκλωμα αντιστάθμισης.



σχήμα 3.15 : (α) Ισοδύναμη αντίσταση φορτίου μαζί με τον ανορθωτή - (β) Λειτουργία ανορθωτή φορτίου[58]

Καθώς η τάση που περνάει στο δευτερεύον του μετασχηματιστή είναι η θεμελιώδης της εξόδου του αντιστροφέα, υπολογίζοντάς την βρίσκουμε ίση με την σχέση 3.34:

$$V_{\alpha\beta,1} = \sum_n \frac{4V_o}{n\pi} \Rightarrow n = 1 \Rightarrow V_{\alpha\beta,1} = \frac{4V_o}{\pi} \quad (3.34)$$

Ο ανορθωτής που συνδέεται μετατρέπει το ρεύμα εξόδου στην μορφή του σχήματος 3.16 (β) με αποτέλεσμα όταν βρίσκουμε την μέση τιμή του να ισούται με:

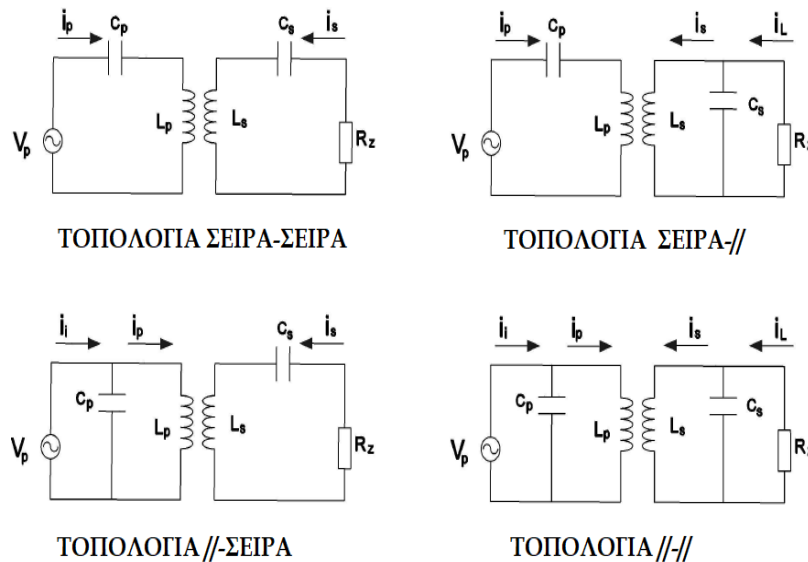
$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T I_s \sin(\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_s \sin(\omega t) d\omega t = \frac{I_s}{\pi} (-\cos(\pi) + \cos(0)) = \frac{2}{\pi} I_s$$

$$I_s = \frac{\pi}{2} I_0 \quad (3.35)$$

Εξισώνοντας τις δύο εξισώσεις προκύπτει η αντίσταση που βλέπει το δευτερεύον του μετασχηματιστή:

$$R_Z = \frac{V_{\alpha\beta,1}}{I_s} = \frac{\frac{4V_0}{\pi}}{\frac{\pi}{2} I_0} \Rightarrow R_L = \frac{V_0}{I_0} \Rightarrow R_Z = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (3.36)$$

Το επαγωγικό σύστημα φόρτισης αποτελείται κατ'ουσίαν από δύο επαγωγικά συζευγμένα συστήματα τα οποία οδηγούνται από ένα διακοπτικό σύστημα υψηλής συχνότητας που τα τροφοδοτεί. Το πρωτεύον τύλιγμα συνηθίζεται να αντισταθμίζεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται τα VA της παροχής ενώ το δεύτερο αντισταθμίζεται με σκοπό την ενίσχυση της ροής ισχύος προς το φορτίο [19].



σχήμα 3.16 : Τοπολογίες κυκλωμάτων αντισταθμισμού

$$Z_s = \begin{cases} j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R & \text{αντισταθμισμένο σε σειρά δευτερεύον} \\ j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{R}} & \text{αντισταθμισμένο παράλληλα δευτερεύον} \end{cases} \quad (3.37), (3.38)$$

Έχουμε είδη αποδείξει με χρήση των κανόνων του Κίρχοφ ότι η ανακλώμενη αντίσταση ισούται με την παρακάτω σχέση:

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \quad (3.39)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων 3.37 και 3.38 στην 3.39, δεδομένης της επιθυμητής διάταξης αντιστάθμισης, προκύπτουν οι σχέσεις 3.40 και 3.41 για το  $Z_r$  το οποίο αντικαθίσταται στο σχήμα 3.18 με αποτέλεσμα να προκύψει η ισοδύναμη αντίσταση  $Z_L$  (σχέσεις 3.44, 3.45).

$$Z_r = \begin{cases} \frac{\omega^4 M^2 C_s^2 R}{(1 - \omega^2 L_s C_s)^2 + (\omega R C_s)^2} + j \frac{\omega^3 M^2 C_s - \omega^5 M C_s^2 L_s}{(1 - \omega^2 L_s C_s)^2 + (\omega R C_s)^2} & \text{σειρά δευτερεύον} \\ \frac{\omega^2 M^2 R}{(R - \omega^2 R C_s L_s)^2 + (\omega L_s)^2} + j \frac{-\omega^2 M^2 (L_s + R^2 C_s (\omega^2 C_s L_s - 1))}{(R - \omega^2 R C_s L_s)^2 + (\omega L_s)^2} & \text{παράλληλα δευτερεύον} \end{cases} \quad (3.40), (3.41)$$

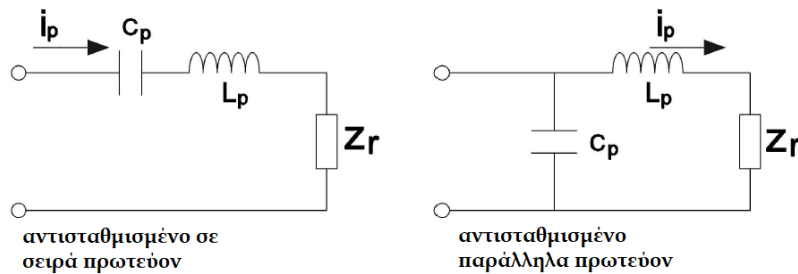
Η ισχύς του συστήματος, είτε χρησιμοποιείται η παράλληλη αντιστάθμιση είτε η εν σειρά, ισούται με την ανακλώμενη αντίσταση επί το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον:

$$P = \operatorname{Re}\{Z_r\} I_p^2 \quad (3.42)$$

Θεωρητικά δεν υπάρχουν όρια στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος όταν το σύστημα ταλαντώνεται με συχνότητα ίση με την συχνότητα συντονισμού του δευτερεύοντος:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_s L_s}} \quad (3.43)$$

Η ανακλώμενη αντίσταση σε αυτή την συχνότητα μπορεί να υπολογιστεί αντικαθιστώντας στο  $\operatorname{Re}\{Z_r(\omega=\omega_0)\}$ .



σχήμα 3.17 : Ισοδύναμη αντίσταση ανηγμένη στο πρωτεύον

Για να βρούμε το συνολικό φορτίο που βλέπει η πηγή ρεύματος ή τάσης αναλύουμε το παραπάνω κύκλωμα όπου  $Z_r$  η σύνθετη αντίσταση που υπολογίσαμε προηγουμένως:

$$Z_L = \begin{cases} \frac{1}{j\omega C_p} + j\omega L_p + Z_r & \text{αντισταθμισμένο σε σειρά πρωτεύον} \\ \frac{1}{j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p + Z_r}} & \text{αντισταθμισμένο παράλληλα πρωτεύον} \end{cases} \quad (3.44), (3.45)$$

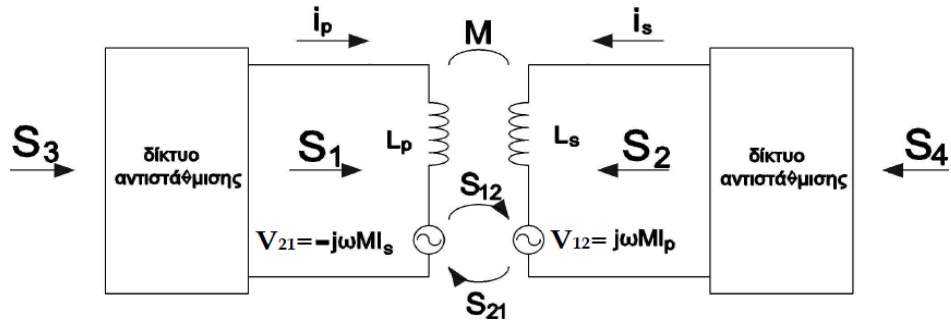
Αντικαθιστώντας τους συνδυασμούς του  $Z_r$  στο κύκλωμα του σχήματος 3.17, επιλέγοντας αν η αντιστάθμιση στο πρωτεύον θα είναι σε σειρά ή παράλληλα, προκύπτουν οι τέσσερις συνδυασμοί των τοπολογιών αντιστάθμισης (πίνακας 3.2). Τελικά για κάθε μία από αυτές τις τοπολογίες προκύπτει ότι  $Z_L = \operatorname{Re}\{Z_L\} + j \operatorname{Im}\{Z_L\}$ . Το πραγματικό μέρος αντιπροσωπεύει την

πραγματική αντίσταση του φορτίου ενώ το φανταστικό μέρος μπορεί να είναι επαγωγικό στην εν σειρά αντιστάθμιση και χωρητικό στην παράλληλη αντιστάθμιση δευτερεύοντος. Συνεπώς, καθώς ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της ροής ισχύος  $P$ , μηδενίζοντας το φανταστικό μέλος του  $Z_L$  προκύπτουν οι κατάλληλες τιμές του πυκνωτή του πρωτεύοντος ώστε να επιτευχθεί  $\mathbf{Im}\{Z_L(\omega=\omega_0)\}=\mathbf{0}$ . Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από την πηγή [18] και από εκεί μπορούμε να αποφανθούμε για τα πλεονεκτήματα της κάθε τοπολογίας, πιο συγκεκριμένα για τις τοπολογίες σειρά-// και σειρά-σειρά, ο πυκνωτής  $C_p$  δεν εξαρτάται από την αντίσταση  $R$  του φορτίου. Ακολουθεί ο πίνακας 3.3 με τα αποτελέσματα του πυκνωτή πρωτεύοντος:

πίνακας 3.3 : Τιμές πυκνωτών πρωτεύοντος σε σχέση με την διάταξη αντιστάθμισης		
Σειρά-σειρά	$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 L_p}$	$C_p = \frac{C_s L_s}{L_p}$
Σειρά-//	$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 \left( L_p - \frac{M^2}{L_s} \right)}$	$C_p = \frac{C_s L_s}{L_p} \cdot \frac{1}{1 - k^2}$
//-//	$C_p = \frac{L_p - \frac{M^2}{L_s}}{\left( \frac{M^2 R}{L_s^2} \right)^2 + \omega_0^2 \left( L_p - \frac{M^2}{L_s} \right)^2}$	$C_p = \frac{C_s L_s}{L_p} \cdot \frac{1}{\left( \frac{R}{\omega_0^2 L_2} \right)^2 k^4 + 1}$
//-σειρά	$C_p = \frac{L_p}{\left( \frac{M^2 \omega_0^2}{R} \right)^2 + \omega_0^2 L_p^2}$	$C_p = \frac{C_s L_s}{L_p} \cdot \frac{1 - k^2}{\left( \frac{\omega_0^2 L_2}{R} \right)^2 k^4 + (1 - k^2)^2}$

### 3.5 Απώλειες πηνίου κατά την μεταφορά ισχύος

Η μεταφορά ενέργειας από το δίκτυο στο φορτία επιτυγχάνεται μέσω του μετασχηματιστή, οι τιμές του οποίου για διάφορους λόγους δεν μένουν πάντα σταθερές. Ένας από αυτούς είναι η απόσταση μεταξύ των πηνίων που μπορεί να μην είναι σταθερή από φόρτιση σε φόρτιση ή και κατά την διάρκεια της φόρτισης. Συνεπώς ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης μπορεί να σχεδιαστεί ώστε η λειτουργία του να παραμένει πάντα σταθερή, δηλαδή ο αντιστροφείας να έχει μία μοναδική συχνότητα λειτουργίας ή να σχεδιαστεί ώστε να ανταποκρίνεται στις μεταβολές των τιμών των πηνίων. Δύο τρόποι ελέγχου περιγράφονται παρακάτω. Ο πρώτος περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση των απωλειών του μετασχηματιστή σε συνδυασμό με την μεγιστοποίηση του μαγνητικού πεδίου που εξέρχεται από το πρωτεύον και εισέρχεται στο δευτερεύον και επιλύεται εξισώνοντας τις ροές ισχύος του σχήματος 3.18. Ο δεύτερος αναπτύχθηκε από το εργαστήριο ισχύος του ΕΜΠ.



σχήμα 3.18 : Ροή ισχύος και απώλειες μετασχηματιστή, όπου  $S_3$  η ισχύς που εισέρχεται από τον αντιστροφέα και  $S_4$  η ισχύς που εισέρχεται από την ανόρθωση [18]

$$S_{12} = -V_{12}I_2^* = -j\omega MI_1 I_2^* = \omega MI_1 I_2 \sin\varphi_{12} - j\omega MI_1 I_2 \cos\varphi_{12} \quad (3.46)$$

$$S_{21} = -V_{21}I_1^* = -j\omega MI_2 I_1^* = -\omega MI_1 I_2 \sin\varphi_{12} - j\omega MI_1 I_2 \cos\varphi_{12} \quad (3.47)$$

Όπου  $\varphi_{12}$  είναι η φάση μεταξύ του  $I_1$  και του  $I_2$ . Από αυτές τις δύο εξισώσεις προκύπτει ότι η ισχύς που μεταφέρεται από το πρωτεύον στο δευτερεύον είναι ίση με:

$$P_{12} = \omega MI_1 I_2 \sin\varphi_{12} \quad (3.48)$$

Η ισχύς αυτή μεγιστοποιείται για  $\sin(\varphi_{12})=1$ , δηλαδή το  $I_1$  προηγείται κατά  $90^\circ$  του  $I_2$ .

$$S = S_1 + S_2 = V_1 I_1^* + V_2 I_2^* \Rightarrow$$

$$S = j(\omega L_1 I_1 + \omega M I_2) I_1^* + j(\omega L_2 I_2 + \omega M I_1) I_2^* \Rightarrow$$

$$I_1^* = I_1 \cos\varphi_{12} + j I_1 \sin\varphi_{12} \quad \text{και} \quad I_2^* = I_2 \cos\varphi_{12} + j I_2 \sin\varphi_{12}$$

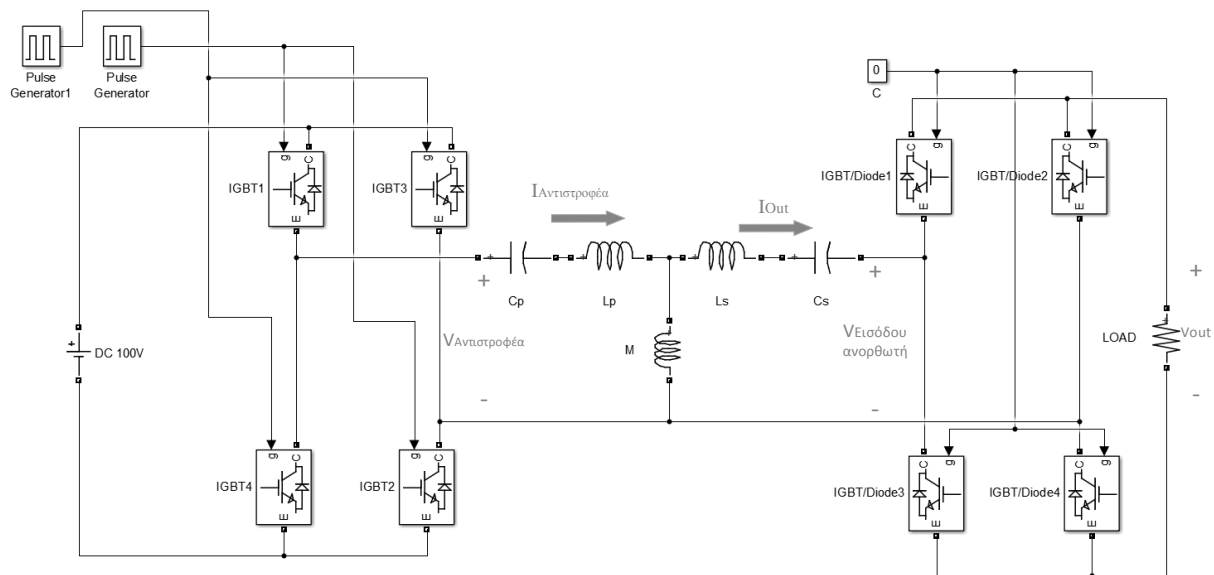
$$\Rightarrow Q = j\omega(L_1 I_1^2 + L_2 I_2^2 + 2M I_1 I_2) \cos\varphi_{12} \quad (3.49)$$

Η σχέση 3.49 αφορά την ροή άεργου ισχύος μεταξύ των πηνίων και όσο μεγαλύτερη η άεργη ισχύς, τόσο ισχυρότερη η μαγνητική ροή [18], και όσο μεγαλύτερη η μαγνητική ροή, τόσο μεγαλύτερες οι απώλειες του μετασχηματιστή. Συνεπώς ορίζουμε την αναλογία  $f(\varphi_{12}) = |P_{12}|/|Q|$ , η οποία όταν μεγιστοποιείται βρίσκουμε την βέλτιστη γωνία μεταξύ του ρεύματος εισόδου και του ρεύματος εξόδου. Αυτή η τεχνική έλεγχου μεταξύ της γωνίας των ρευμάτων εισόδου και εξόδου μπορεί να αποτελέσει μία συνθήκη έλεγχου του συστήματος. Σύμφωνα όμως με την διδακτορική της εργασία η Ελένη Γατή χρησιμοποίησε ένα PLL (Phase Locked Loop) το οποίο χρησιμοποιήθηκε ώστε η φάση μεταξύ της τάσης εξόδου του αντιστροφέα να είναι ίδια με την φάση του ρεύματος εξόδου του φορτίου. Μέσω αυτού του ελέγχου προέκυψαν τρεις λύσεις μία από τις οποίες οδηγούσε το κύκλωμα σε συντονισμό  $\omega = 1/\sqrt{L_s C_s}$  ενώ οι άλλες δύο έστειλαν το

κύκλωμα σε αστάθεια.

### 3.6 Προσομοίωση συστήματος επαγωγικής φόρτισης

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος κρίνεται απαραίτητη η κατασκευή του ίδιου του συστήματος μέσω μίας προσομοίωσης που παρουσιάζεται παρακάτω. Μέσω της προσομοίωσης επιδιώκεται η κατασκευή ενός δυναμικού συστήματος επαγωγικής φόρτισης χαμηλής τάξης όπως παρουσιάζονται. Η αργή φόρτιση είναι καταλληλότερη για οικιακή χρήση, καθώς και για στάθμευση στην πόλη κατά την οποία μπορεί να φορτιστεί αρκετά γρήγορα ώστε να δώσει στον οδηγό αρκετό χρόνο για ένα μεγαλύτερο εύρος δραστηριοτήτων προτού χρειαστεί να ξαναχρησιμοποιήσει το αυτοκίνητό του, να τελειώσει την εργασία του και άλλα. Η γρήγορη δεν ενδείκνυται κατά την άποψη του συγγραφέα καθώς το κόστος της μαγνητικής θωράκισης είναι αρκετά μεγάλο και ενδεχομένως τόσο ισχυρή ροή ισχύος μπορεί να προβεί επικίνδυνη για περαστικούς και για τον οδηγό αν παραμείνει στο αυτοκίνητο.

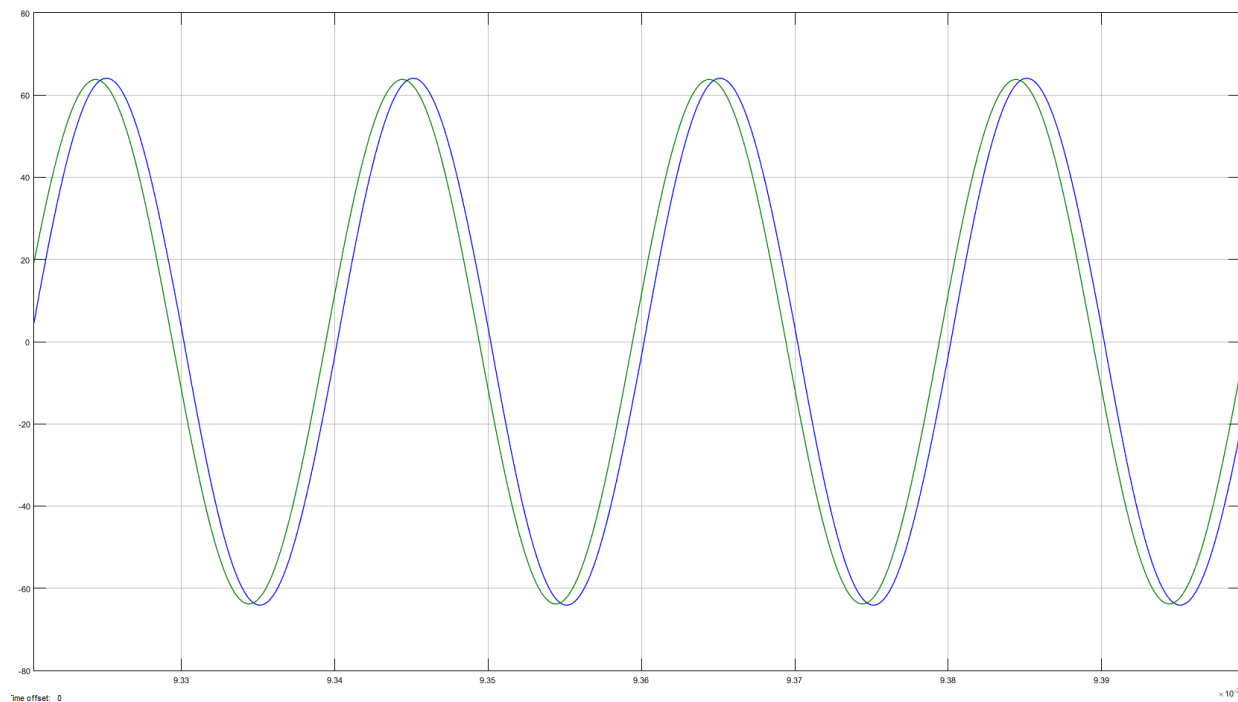


σχήμα 3.19 : Διάταξη προσομοίωσης συστήματος ταλάντωσης

Κατά την προσομοίωση αυτής της διάταξης του σχήματος 3.19 εφαρμόστηκαν 100V DC τάση σε έναν αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με συχνότητα 50kHz. Ο μετασχηματιστής για την καλύτερη προσομοίωσή του αναλύθηκε στο ισοδύναμο T μοντέλο. Οι τιμές του μετασχηματιστή πάρθηκαν από την διδακτορική διατριβή της Ελένης Γατή «Μελέτη, κατασκευή και έλεγχος συστημάτων επαγωγικής μεταφοράς ισχύος» και είναι ίσες με  $L_1=L_2=199 \cdot 10^{-6}H$ , καθώς και η τιμή του  $k=0,14$ . Για την εφαρμογή του κυκλώματος αντιστάθμισης πρέπει να βρεθούν οι χωρητικότητες των πυκνωτών αντιστάθμισης μέσω του τύπου:  $\omega = 1/\sqrt{L_p C_s}$ . Άρα εφαρμόζοντας στον

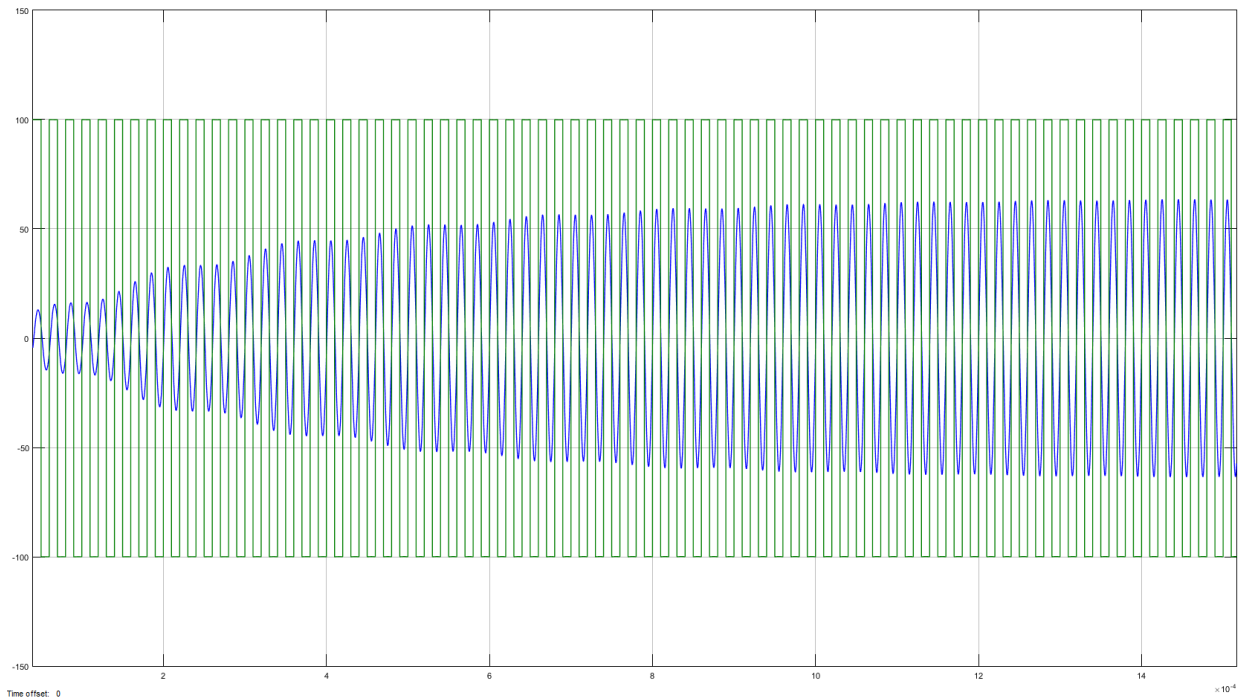
τύπο  $M = k\sqrt{L_1 L_2}$  με  $L_1 = L_2$  και  $k = 0,14$  βρίσκουμε  $M = 27,86 \cdot 10^{-6}H$ . Σύμφωνα με το μοντέλο T υπολογίζουμε το  $L_1 - M$  που ισούται με  $L_s=171,14 \cdot 10^{-6}H$ . Τελικά έχουμε ότι  $L_p = L_s$  καθώς και  $C_p = C_s = 59nF$ . Εφαρμόζοντας αυτές τις τιμές πάνω σε ένα φορτίο 2Ω παίρνουμε τις παρακάτω κυματομορφές. Στο σχήμα 3.20 παρουσιάζεται το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα με

το ρεύμα εισόδου του ανορθωτή και παρατηρείται ότι είναι σχεδόν συμφασικά επειδή το σύστημα έχει συντονιστεί. Στο σχήμα 3.21 με πράσινο φαίνεται η τετραγωνική κυματομορφή της εξόδου του αντιστροφέα και το ρεύμα εξόδου του. Στην αρχή, για μία σημαντική περίοδο, το σύστημα βρίσκεται στην μεταβατική του κατάσταση μέχρις ότου να συντονιστεί και το πλάτος να σταθεροποιηθεί. Συνεπώς παρατηρείται μία κυμάτωση που συνεχώς αυξάνεται και είναι χαρακτηριστική σε κυκλώματα συντονισμού.

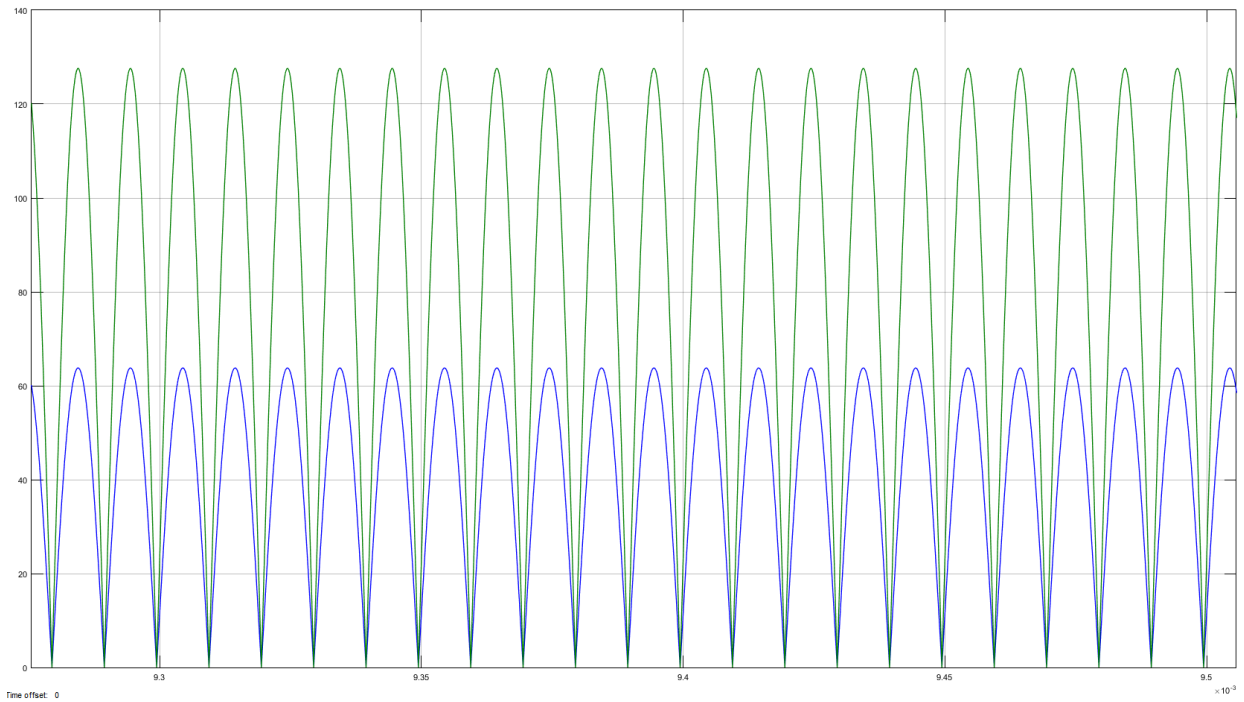


*σχήμα 3.20 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για ρεύμα πρωτεύοντος (μπλε) και ρεύμα δευτερεύοντος*



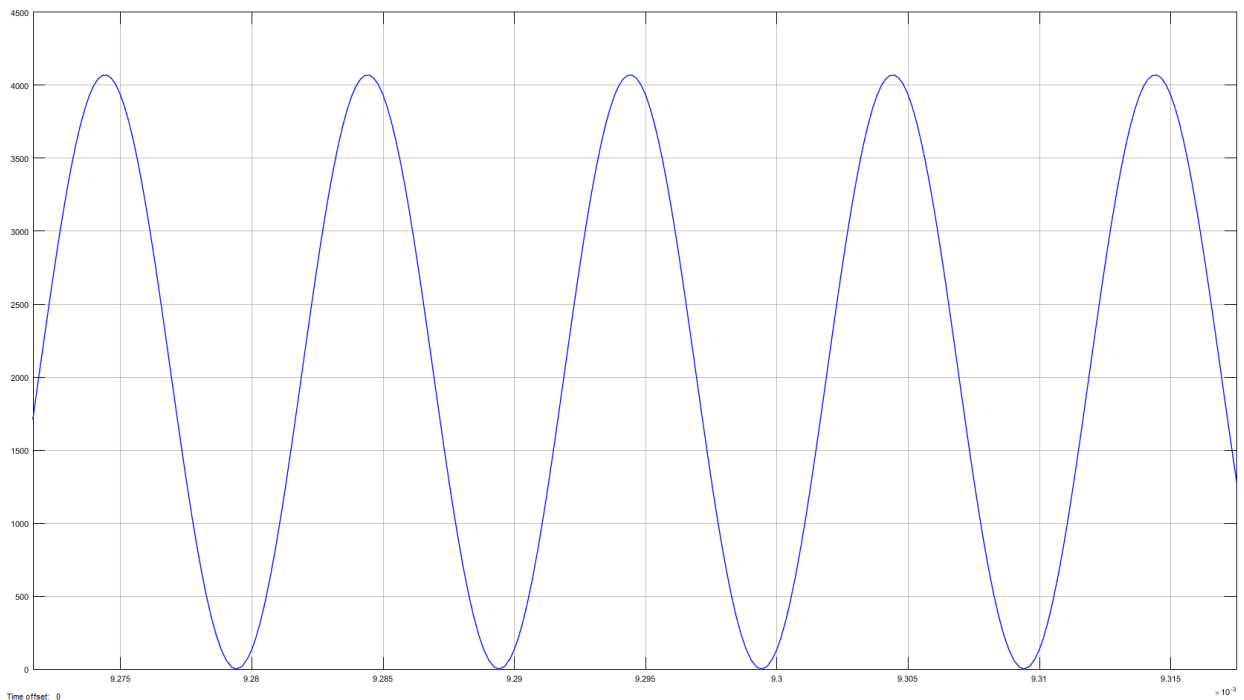


σχήμα 3.21 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για την τάση εξόδου αντιστροφέα  $V_{in}$  και το ρεύμα πρωτεύοντος



σχήμα 3.22 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για τάση εξόδου (πράσινο) και ρεύμα δευτερεύοντος

Αν συγκριθεί με την τάση εξόδου του σχήματος 3.22 θα δούμε ότι αν και τετραγωνική εξαρχής, αυτή έχει μετατραπεί σε ημιτονοειδή καθώς ο ίδιος ο μετασχηματιστής λειτουργεί ως φίλτρο, με αποτέλεσμα να έχουν περάσει στο δευτερεύον μόνο οι ανώτερες αρμονικές του σήματος. Το δεύτερο και πολύ σημαντικό είναι ότι η τάση εξόδου του αντιστροφέα και το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα, δηλαδή το ρεύμα του πρωτεύοντος είναι σχεδόν συμφασικά. Από εκεί βλέπουμε την επίδραση της αντιστάθμισης που τελικά έχει μετατρέψει το κύκλωμα σε μία ωμική αντίσταση. Στο σχήμα 3.22 τέλος βλέπουμε το επίπεδο της τάσης που έχει προκύψει, που είναι κατά πολύ υψηλότερο από την DC είσοδο. Το κύκλωμα αποτελεί την έξοδο ανορθωτή και για αυτόν τον λόγο όλες οι αρνητικές τιμές έχουν μετατραπεί σε θετικές. Στο σχήμα 3.23 φαίνεται η ισχύς του φορτίου κοντά στα 4kW που απαιτούνται για το ασθενές επίπεδο φόρτισης του αυτοκινήτου.



σχήμα 3.23 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για την ισχύ του φορτίου

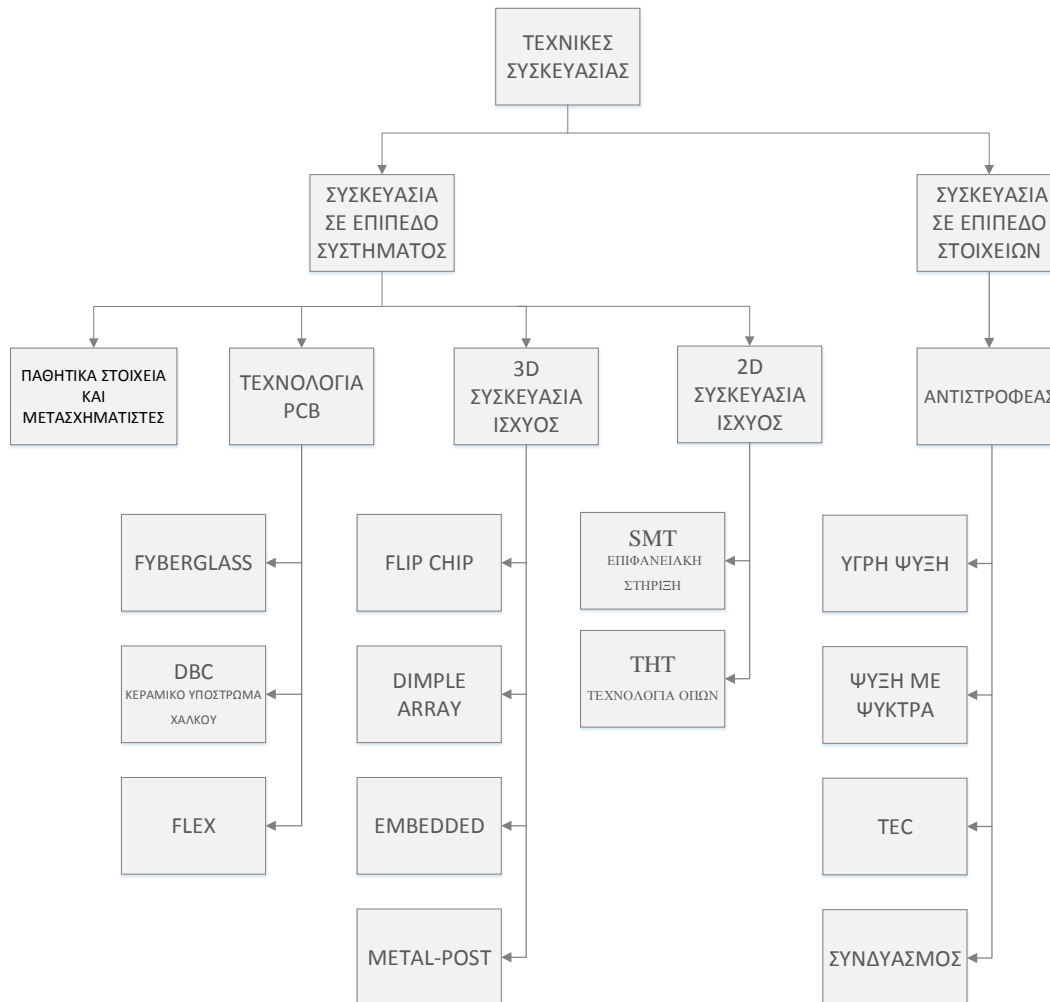
Καθώς το σύστημα που σχεδιάστηκε αποτελεί δυναμικό σύστημα χωρίς ανάδραση, είναι εύκολο να υποθέσει κανείς ότι το σύστημα δεν θα έχει την ίδια συμπεριφορά σε περίπτωση που προστεθεί κάποιο φίλτρο στην είσοδο του αντιστροφέα ή αν ο μετασχηματιστής μετακινηθεί και αλλάξει η τιμή του συντελεστή σύζευξης. Για αυτόν το λόγο συνηθίζεται να τοποθετείται ανάδραση που περιγράφηκε στη παράγραφο 3.5 έτσι ώστε να μεταβάλλεται η γωνιακή συχνότητα του αντιστροφέα έτσι ώστε ο συντελεστής ποιότητας να μεγιστοποιείται παρά την μεταβολή των στοιχείων του. Αυτό δεν σημαίνει ότι θα έχουμε την ίδια ροή ισχύος με την βέλτιστη κατάσταση αλλά θα υπάρχει συντονισμός και θα μειώνονται οι απώλειες του μετασχηματιστή.

## Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση τεχνικών συσκευασίας για αντιστροφέα συστήματος επαγωγικής φόρτισης

### 4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκαν τα σημαντικότερα ηλεκτρικά τμήματα που παίρνουν μέρος στην κατασκευή ενός επαγωγικού συστήματος φόρτισης. Αυτά περιλαμβάνουν μία DC τάση εισόδου, έναν αντιστροφέα, τα κυκλώματα συντονισμού, ο μετασχηματιστής και τέλος έναν ανορθωτή που τροφοδοτεί το φορτίο, δηλαδή τους συσσωρευτές. Ο αντιστροφέας εξακολουθεί να είναι η καρδιά του συστήματος καθώς είναι υπεύθυνος για την δημιουργία της εναλλασσόμενης τάσης που κάνει δυνατή την μεταφορά της ενέργειας από το μεγάλο διάκενο αέρα. Στην παρούσα εργασία μέσω της προσομοίωσης καταλήξαμε πως η συχνότητα του αντιστροφέα μπορεί να είναι στην ελάχιστη περίπτωση 50kHz με χρήση IGBT ενώ στην πραγματικότητα η αύξηση της συχνότητας περαιτέρω, λόγω του φαινομένου σώματος, βελτιστοποιεί την μεταφορά ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση SiC transistor [7] το οποίο όχι μόνο εξαλείφει υπερτάσεις στην μεταβολή κατάστασης από ανενεργή σε ενεργή αλλά επιτρέπει διακοπτική συχνότητα μεγαλύτερη των 100kHz. Το κεφάλαιο αυτό περιέχει μια παρουσίαση όλων των στοιχείων που αποτελούν έναν αντιστροφέα από τα διακοπτικά στοιχεία ισχύος, τα παθητικά στοιχεία, και τις νεότερες τεχνικές ολοκλήρωσης για την δημιουργία ενός αξιόπιστου και αποδοτικού συστήματος. Με τον όρο τεχνικές ολοκλήρωσης συσκευασίας ενός μετατροπέα ισχύος εννοούμε την διαδικασία κατά την οποία όλα τα στοιχεία ενός συστήματος συνδέονται, όχι μόνο τα ηλεκτρονικά, αλλά και τα στοιχεία ψύξης, τα στοιχεία διασύνδεσης και όλα τα υπόλοιπα στοιχεία που απαρτίζουν έναν μετατροπέα ισχύος όπως είναι ο αντιστροφέας. Τα στάδια συσκευασίας ακολουθούν την ηλεκτρική σχεδίαση και κατά επέκταση εξαρτώνται άμεσα από αυτήν. Για αυτόν την λόγο κρίθηκε απαραίτητο, να προηγηθεί μία μαθηματική ανάλυση και αρκετά απλοποιημένη σχεδίαση ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης ώστε συνεχίζοντας να έχουμε για καλή ιδέα για τις ανάγκες του συστήματος. Μία ακριβής ανάλυση της συσκευασίας μίας συσκευής μπορεί να έχει πολλά πλεονεκτήματα, πέραν του βασικότερου, ότι καθιστά την συσκευή λειτουργική. Αυτά μπορεί να είναι η αύξηση του χρόνου ζωής της συσκευής, καλύτερη ποιότητα λειτουργίας, ελαχιστοποίηση μεγέθους συσκευής και μείωση κόστους παραγωγής. Στο

σχήμα 4.1 παρουσιάζεται τμήμα της διαδικασίας ολοκλήρωσης συσκευασίας ενός αντιστροφέα που θα αναλυθούν σε αυτό το κεφάλαιο. Αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στην συσκευασία σε επίπεδο συστήματος και στην συσκευασία σε επίπεδο στοιχείων.



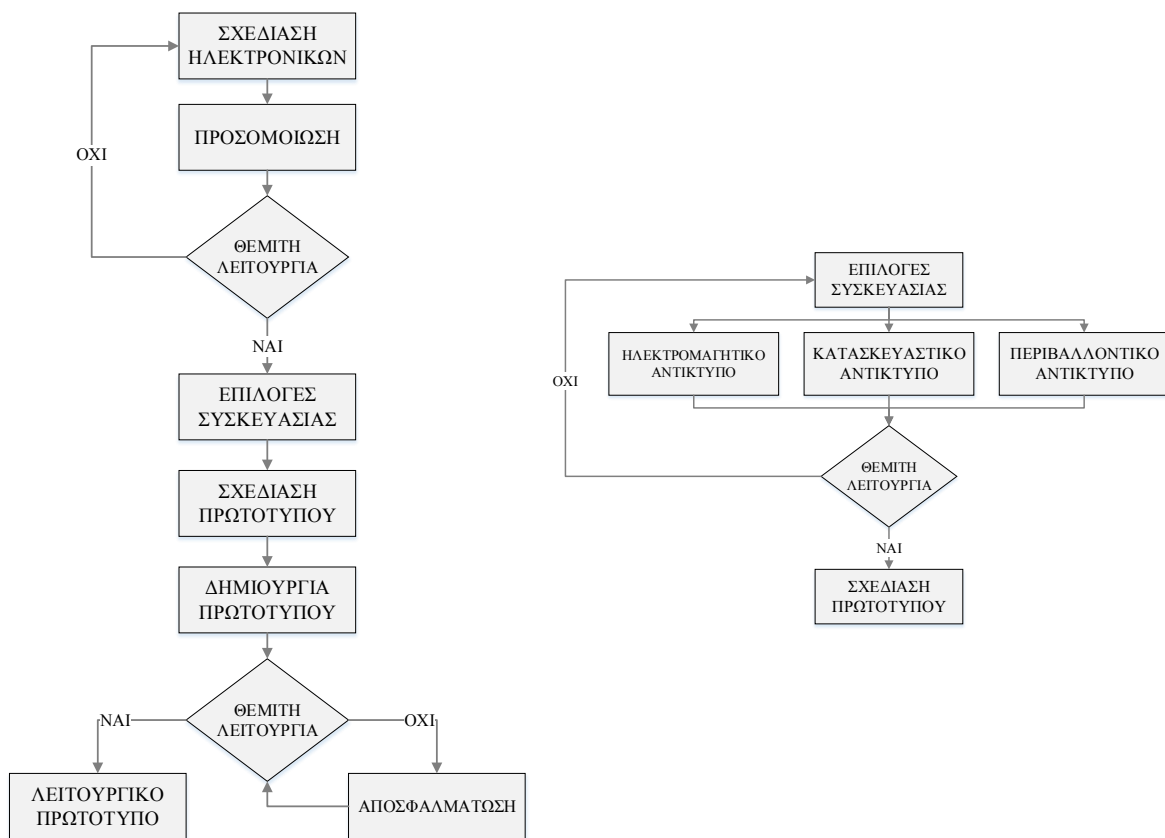
σχήμα 4.1 : Επιλογές ολοκλήρωσης συσκευασίας ενός αντιστροφέα [51]

Με τον όρο συσκευασία σε επίπεδο στοιχείων εννοούμε την επιλογή των στοιχείων ή συστημάτων που θα περιλαμβάνονται στο ολοκληρωμένο σύστημά μας. Σε αυτήν την περίπτωση ασχολούμαστε με τον αντιστροφέα που τροφοδοτεί το πρωτεύον του μετασχηματιστή και βρίσκεται υπόγεια. Στην περίπτωση που το σύστημά μας βρίσκεται σε κάποιο μαζικό χώρο στάθμευσης τότε υπάρχει κάποια κύρια πηγή τάσης μέσω ενός κεντρικού ανορθωτή. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα περιλαμβάνει αποκλειστικά τον αντιστροφέα. Σε ένα οικιακό χώρο στάθμευσης, στην πλακέτα θα έπρεπε να συμπεριληφθεί και ο ανορθωτής του συστήματος. Άλλα στοιχεία που περιλαμβάνονται πέρα όλων των μετατροπέων ισχύος και ψηφιακών κυκλωμάτων είναι μη ενσωματωμένοι μετασχηματιστές, αισθητήρες θερμοκρασίας, συστήματα προστασίας από υπερτάσεις, snubbers, ασφάλειες και άλλα. Σε αυτό το επίπεδο δίνεται και η επιλογή του τρόπου ψύξης, ανάλογα πάντα με τις απαιτήσεις του κάθε στοιχείου ή συστήματος και έτσι προκύπτει συνδυαστικά μία που θα εξυπηρετεί όλες.

Με τον όρο συσκευασία σε επίπεδο συστήματος εννοούμε τις επιλογές που θα κάνουμε γύρω από την τεχνολογία που θα διαλέξουμε να χρησιμοποιήσουμε και που τελικά θα λειτουργήσει ως θεμέλιο για το σύστημά μας αυτό σε συνδυασμό με τον τρόπο ψύξης. Οι επιλογές αυτές αφορούν τις τεχνολογίες του υποστρώματος, της ηλεκτρικής αλλά και θερμικής διασύνδεσης κυρίως των διακοπτικών στοιχείων και την επιλογή ολοκληρωμένων στοιχείων επαγωγής και χωρητικότητας (πηνία και πυκνωτές). Όλες οι νεότερες τεχνολογίες που αφορούν την συσκευασία επιπέδου συστήματος προσπαθούν να προσομοιάσουν την τεχνολογία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων δημιουργώντας ένα τρισδιάστατο μοντέλο (3D Module) το οποίο κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μειωθούν οι παρασιτικές αυτεπαγωγές και χωρητικότητες που παρουσιάζονται μεταξύ των στοιχείων και πολλές φορές δημιουργούν έντονο θόρυβο και υπερτάσεις (overshoots) στην έξοδο.

Πακετάρισμα ή συσκευασία (packaging) ημιαγωγίμων ηλεκτρονικών ισχύος αναφέρεται στην συνδεσμολογία από μεμονωμένα chip σε ένα κύριο μοντέλο-συσκευή, η οποία συνδέεται με εξωτερικά, δευτερεύοντα κυκλώματα, περιέχει θερμικά μονοπάτια (thermal paths) για την αποβολή θερμότητας, περιέχει μηχανική υποστήριξη καθώς και προστασία από εξωτερικές πηγές και περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Η διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος ισχύος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2. Σύμφωνα με αυτό η διαδικασία κατασκευής εκκινεί με την σχεδίαση των ηλεκτρονικών και μετέπειτα με την προσομοίωσή του.



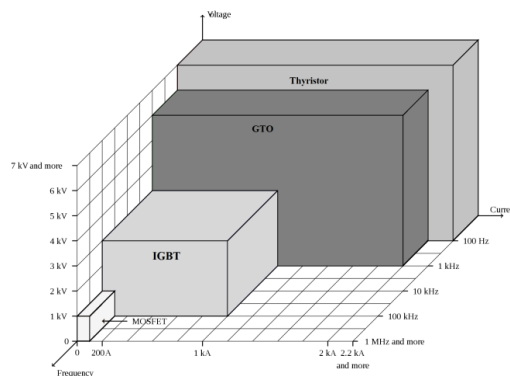
σχήμα 4.2 : Διαδικασία κατασκευή πρωτότυπου αντιστροφέα

Μάλιστα, κάθε σχεδόν στάδιο της σχεδίασης περιλαμβάνει κάποιο στάδιο προσομοίωσης. Πλέον το εργαλείο της προσομοίωσης εξυπηρετεί αφάνταστα τον μηχανικό καθώς όχι μόνο μειώνει το εργατικό κόστος αλλά κάνει οικονομία στο υλικό, αφού δημιουργούνται λιγότερες πρωτότυπες συσκευές. Μετά την προσομοίωση των ηλεκτρονικών ακολουθεί η διαδικασία επιλογής της συσκευασίας. Αυτή επιλέγεται σε συνδυασμό με την εικόνα 4.1 στην οποία για κυκλώματα χαμηλής ισχύος μπορούμε να διαλέξουμε κάποια από τις 2D τεχνικές, συννηθέστερα την SMT (Surface Mount Technology) που εξηγείται παρακάτω, ενώ για επίπεδα ισχύος της τάξης των μερικών kW μπορεί να δημιουργηθεί κάποιος συνδυασμός της SMT και της THT (Through Hole Technology). Σε επίπεδα υψηλής ισχύος μπορεί ο μηχανικός να γίνει πιο δημιουργικός και να ασχοληθεί με κάποια 3D τεχνική. Μετά την σχεδίαση του πρωτότυπου κυκλώματος που μπορεί και να μην είναι απαραίτητος το τελικό κύκλωμα αλλά να είναι ακόμα συνδεδεμένο σε Breadboards, ακολουθεί η διαδικασία των δοκιμών στην οποία ανακαλύπτονται τα σφάλματα και τα Bugs του κυκλώματος.

## 4.2 Διακοπτικά στοιχεία ισχύος

Αρχικά κρίνεται απαραίτητο να παρουσιαστούν τα διακοπτικά στοιχεία που αποτελούν την καρδιά της συσκευής που κατασκευάζουμε καθώς και το μηχανισμό θερμικών απωλειών τους κατά την μεταβατική τους κατάσταση. Στην παρούσα εργασία επιλέχτηκε το IGBT λόγω της ικανότητάς του να διαχειρίζεται ρεύματα υψηλής έντασης αλλά θα μπορούσε να επιλεγεί και κάποιο MOSFET.

Οι ημιαγωγοί ισχύος που επιτρέπουν την υψηλή διακοπτική συχνότητα μεταξύ 50 και 100kHz και χρησιμοποιούνται κατά κόρον είναι τα MOSFET ισχύος και τα IGBT. Άλλα διακοπτικά στοιχεία είναι τα BJT ισχύος, τα SiC τρανζίστορ και τα Thyristors τα οποία όμως δεν είναι ικανά να διαχειριστούν τις υψηλές συχνότητες λειτουργίας. Η κατάλληλη συχνότητα λειτουργίας, τάσης και ρεύματος για καθένα από αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 4.3.



σχήμα 4.3 : Αγώγιμοι διακοπτικοί ημιαγωγοί για τα διάφορα επίπεδα τάσης, συχνοτήτων και έντασης ρεύματος

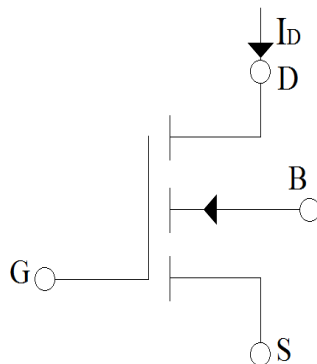
Στον αντιστροφέα συνεπώς, όπου οι συχνότητες λειτουργίας είναι μεταξύ των 50 και 100kHz παρατηρούμε ότι τα διαθέσιμα σε εμάς στοιχεία είναι τα IGBT και τα MOSFET. Στην ασθενή φόρτιση όπου η ισχύς του συστήματος φτάνει έως τα 8kW και δεν δημιουργούνται ρεύματα μεγαλύτερα των 100A μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τόσο στοιχεία FET όσο και IGBT, με

προτίμηση στα MOSFET. Όσο η ισχύς αυξάνει όμως και ανεβαίνουμε επίπεδα φόρτισης, τα IGBT είναι η κυριότερη λύση, σε συνδυασμό με τα SiC transistor. Τα SiC (Silicon Carbide) transistor αποτελούν την τελευταία προσθήκη στην κατηγορία των διακοπτικών στοιχείων ισχύος. Τα τρανζίστορ καρβιδίου του πυριτίου, λόγω της προσθήκης άνθρακα στο υπόστρωμα αποκτούν ιδιότητες που δεν έχουν τα συνηθισμένα IGBT και τα MOSFET. Τα πλεονεκτήματά τους εξαιτίας της ύπαρξης άνθρακα στο υπόστρωμα που οδηγεί σε σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα άλλα ημιαγώγιμα στοιχεία. Αυτά συμπεριλαμβάνουν:

- Αντοχή σε θερμοκρασίες της τάξης των 200°C κάνοντας πιο απλή των μελέτη ροής θερμότητας του PCB και του περιβλήματος αυξάνοντας της αξιοπιστία του συστήματος
- Μειωμένες διακοπτικές απώλειες
- Απλή οδήγηση

#### 4.2.1 MOSFET ισχύος

Τα MOSFET ισχύος λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με τα MOSFET των VLSI, δηλαδή με το σκεπτικό ότι όταν εφαρμόζεται τάση μεταξύ της πύλης (G) και της πηγής (S)  $V_{GS}$ , μεγαλύτερη από την  $V_T$  (threshold), η πύλη του οξειδίου λειτουργεί ως πυκνωτής, έλκοντας φορείς μειονότητας, ηλεκτρόνια όταν πρόκειται για p-υπόστρωμα, στην πύλη δημιουργώντας ένα κανάλι που συνδέει το Source με το Drain. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το ρεύμα  $I_D$ , που φαίνεται στο σχήμα 4.4.



σχήμα 4.4 : MOSFET ισχύος

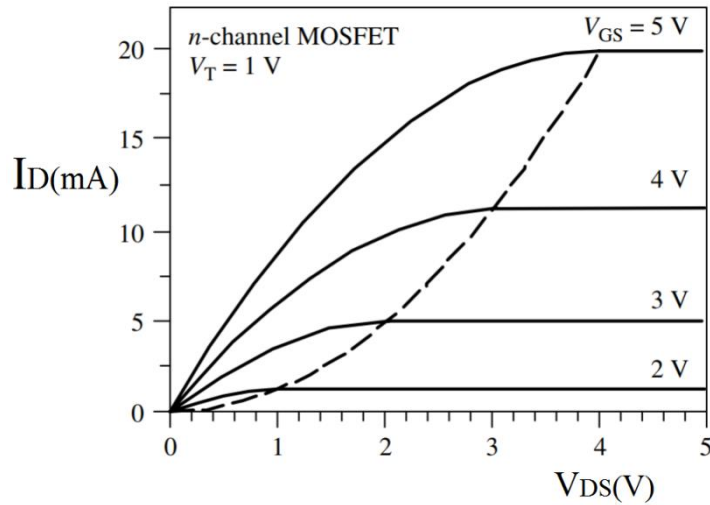
Οι περιοχές λειτουργίας του MOSFET σύμφωνα με το σχήμα 4.4 είναι οι εξής:

- Περιοχή αποκοπής για  $V_{GS} < V_T$
- Περιοχή τριόδου ή γραμμικής λειτουργίας για  $V_{GS} > V_T$  και  $V_{DS} < V_{GS} - V_T$
- Περιοχή κόρου για  $V_{GS} > V_T$  και  $V_{DS} > V_{GS} - V_T$

Στα ηλεκτρονικά ισχύος, το MOSFET χρησιμοποιείται κυρίως ως διακόπτης και αυτό επιτυγχάνεται ως εξής:

**Turn OFF:** Το τρανζίστορ βρίσκεται στην περιοχή αποκοπής κατά την οποία έχει εφαρμοστεί πολύ μικρή  $V_{GS}$ .

**Turn ON:** Το τρανζίστορ βρίσκεται στην περιοχή κόρου όταν εφαρμόζεται κατάλληλη  $V_{GS}$ .

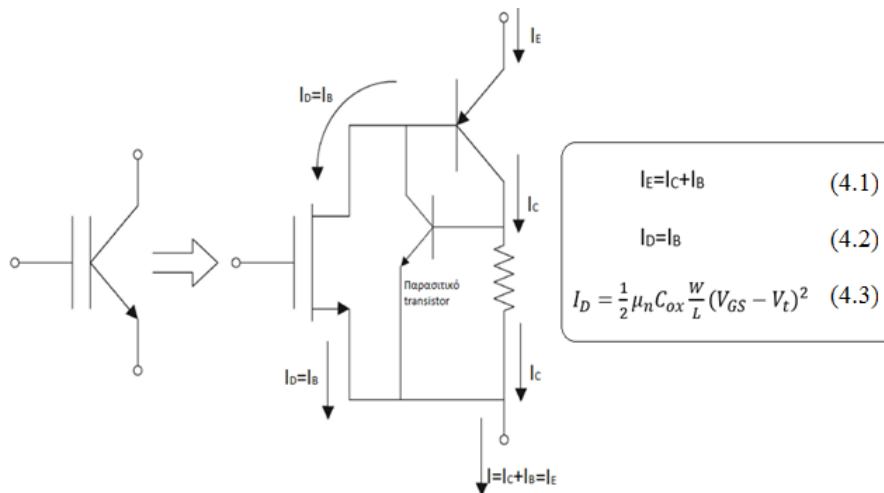


σχήμα 4.5 : Χαρακτηριστική  $I_D - V_{DS}$  για n-MOSFET [49]

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζονται πολύ κατανοητά οι περιοχές λειτουργίας του MOSFET. Στην διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται η αρχή έναρξης της περιοχής κόρου. Πριν την διακεκομμένη γραμμή βρισκόμαστε στην περιοχή τριόδου.

#### 4.2.2 IGBT

Η λειτουργία του IGBT γίνεται κατανοητή όταν κανείς μελετήσει αυτό το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα 4.6):



σχήμα 4.6 : Ισοδύναμο κύκλωμα του IGBT με τις εξισώσεις των ρευμάτων

Συνεπώς, όταν εφαρμόζεται τάση  $V_{GS}$  στο MOSFET, το ρεύμα στον εκπομπό περνάει στον συλλέκτη ακριβώς όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Αυτή η τοπολογία μοιάζει πολύ με μία συνδεσμολογία Darlington στην οποία δύο BJT συνδέονται σε συνδεσμολογία CB-CB (κοινής βάσης) ώστε να λειτουργούν ως ένα πιο αξιόπιστο buffer (σχήμα 4.6). Έτσι και σε αυτή την περίπτωση μπορεί να περιγραφεί το κύκλωμα ως buffer που ελέγχεται από ένα



transistor που έχει όμως υψηλή χωρητικότητα εισόδου που επιτρέπει την λειτουργία σε αρκετά υψηλές συχνότητες. Αυτή η χωρητικότητα εισόδου σε συνδυασμό με τα υψηλά ρεύματα του μπορούν να περάσουν από το BJT κάνουν αυτήν την συνδεσμολογία ιδανική για χρήση στα ηλεκτρονικά ισχύος. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι έχει χαμηλές απώλειες στην ενεργή (turn on state) κατάσταση. Αυτό το πλεονέκτημα του IGBT σε συνδυασμό με το MOSFET ισχύος το έχουν καταστήσει το καταλληλότερο διακοπτικό στοιχείο. Η χωρητικότητα εισόδου του όμως, αποτελεί την achίλλειο πέτρα των IGBT καθώς το ημιαγωγικό στοιχείο μεταβαίνει σε μεταβατική κατάσταση ON και OFF, φορτίζεται και εκφορτίζεται καταναλώνοντας ενέργεια και παράγοντας θερμότητα. Αυτή παράγεται σε κάθε κύκλο που αλλάζει το στοιχείο την κατάστασή του, κάνοντας την απώλεια ισχύος ανάλογη της συχνότητας λειτουργίας του.

Άλλα χρήσιμα τρανζίστορ είναι το BJT, το GTO και το Thyristor. Από αυτά το BJT χρησιμοποιείται λιγότερο σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος και χρησιμοποιείται ως ενισχυτής. Το GTO και το Thyristor χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που αφορούν περισσότερο το ηλεκτρικό δίκτυο αφού λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες και υψηλή ισχύ.

Κατά την διαδικασία ολοκλήρωσης του αντιστροφέα έχουμε δει τα κύρια διακοπτικά στοιχεία ενός αντιστροφέα έτσι ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα το κυριότερο πρόβλημα που θέλουμε να αντιμετωπίσουμε συσκευάζοντας ένα σύστημα, τις θερμικές απώλειες των στοιχείων. Τα στοιχεία ενός μετατροπέα, στις διακοπτικές συχνότητες στις οποίες λειτουργούν παράγουν θερμική ισχύ που αν αφεθεί ανεξέλεγκτη με βεβαιότητα θα καταστρέψει τα στοιχεία που την παράγουν. Στην επόμενη παράγραφο συνεπώς ακολουθεί περιγραφή του συστήματος θερμικών απωλειών διότι χωρίς κατανόηση αυτού δεν γίνεται να συνεχιστεί η διαδικασία της ολοκλήρωσης της συσκευασίας.

#### **4.2.3 Σύστημα θερμικών απωλειών των διακοπτικών στοιχείων**

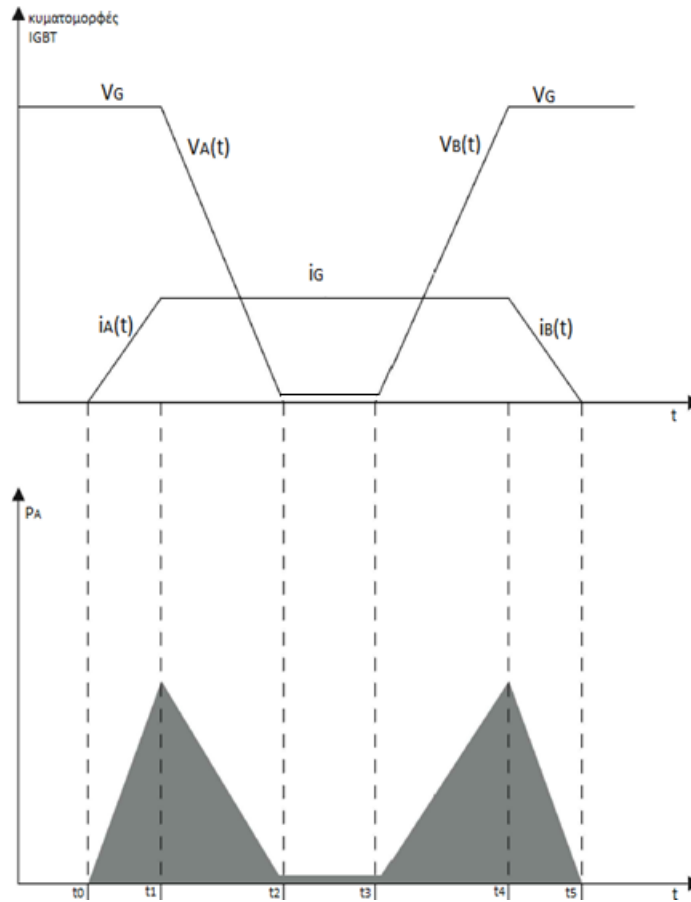
Στη παράγραφο αυτή μελετάται η σχέση μεταξύ της διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας των διακοπτικών στοιχείων και της απώλειας ενέργειας – απόδοσης που τείνει να διακρίνει ένα σύστημα που λειτουργεί με διακοπτικά στοιχεία. Καθώς η λειτουργία κινητήρων και δικτύων εξαρτάται από την ποιότητα του ρεύματος που τα τροφοδοτεί έχουν θεσπιστεί όρια που αναγκάζουν τα διακοπτικά στοιχεία κυκλωμάτων όπως αντιστροφείς να λειτουργούν σε συχνότητες που αυξάνουν τις απώλειες τους σε σημαντικό σημείο, τέτοιο ώστε να χρειάζεται θερμική ανάλυση για τον τρόπο διάχυσης της θερμότητας. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η παράληψη μέτρων διάχυσης της θερμότητας μπορεί εκτός από υπολειτουργία του συστήματος να οδηγήσει και σε καταστροφή του. Συνεπώς η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας είτε αφορά τη μείωση του THD (total harmonic distortion) είτε οποιοδήποτε άλλο λόγο, συνεπάγεται με αύξηση των θερμικών απωλειών. Βέλτιστος έλεγχος των θερμικών απωλειών συνεπάγεται με αύξηση της απόδοσης της συσκευής. Σε όλα τα διακοπτικά στοιχεία η διαδικασία παραγωγής θερμικής ισχύος είναι κοινή. Η απώλεια ισχύος υπολογίζεται από την στιγμιαία ισχύ που προκύπτει από την κυματομορφή του τρανζίστορ και η μέση τιμή της δίνει την ολική απώλεια και προκύπτει από τις εξισώσεις (4.4) - (4.6) [24]:

$$P_{loss} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} P_A(t) dt = (W_{on} + W_{off})f \quad (4.4)$$

Όπου  $t_1$  και  $t_2$  εννοούνται τα άκρα ολοκλήρωσης για την διάρκεια της μετάδοσης, και  $P_A$  η στιγμιαία ισχύς. Παρακάτω ακολουθεί παράδειγμα υπολογισμού της απώλειας ισχύος για ένα κύκλο λειτουργίας (σχήμα 4.7):

$$P_{loss} = P_{μετάβασης\ σε\ αγωγή} + P_{αγωγής} + P_{μετάβασης\ σε\ αποκοπή} \quad (4.5)$$

$$P_{loss} = \frac{1}{T} \left( \int_{t_0}^{t_1} V_G i_A(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} V_A(t) i_G dt + \int_{t_2}^{t_3} V_B(t) i_G dt + \int_{t_3}^{t_4} V_G i_B(t) dt \right) \quad (4.6)$$



σχήμα 4.7 : Παραγωγή θερμικής ισχύος από IGBT μέσω διακοπτικής συχνότητας

### 4.3 Παθητικά στοιχεία κυκλώματος

Τα παθητικά στοιχεία ενός αντιστροφέα αποτελούν οι πυκνωτές, τα πηνία και οι αντιστάσεις. Οι πυκνωτές και τα πηνία που παρατηρούνται σε ένα κύκλωμα αφορούν κυρίως LC φίλτρα εισόδου, DC Link πυκνωτές και άλλα που συνδέουν τον αντιστροφέα με την προηγούμενη διάταξη ενός συστήματος αλλά οι εφαρμογές των στοιχείων αυτών δεν περιορίζονται μόνο σε αυτά. Σε αυτή την παράγραφο περιγράφονται οι τύποι των πυκνωτών και των πηνίων ενός αντιστροφέα και η ικανότητα ολοκλήρωσή τους εντός ενός PCB

### 4.3.1 Πυκνωτές

Οι πυκνωτές αποτελούν κάποια από τα πιο χρήσιμα τμήματα ενός ηλεκτρονικού συστήματος ισχύος. Ο σκοπός τους είναι η αποθήκευση ενέργειας μέσω δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων που περιέχουν στο εσωτερικό τους κάποιο διηλεκτρικό, πράγμα που αξιοποιούμε σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Υπάρχουν τρία κύρια είδη πυκνωτών που εξηγούνται παρακάτω.

#### Πυκνωτές μεταλλικού φιλμ

Οι πυκνωτές μεταλλικού φιλμ στηρίζουν την λειτουργία τους πάνω σε ένα φιλμ διηλεκτρικού που τοποθετείται με ένα λεπτό στρώμα μετάλλου σε κενό. Είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο ή ψευδάργυρο και το διηλεκτρικό είναι από πολυεστέρα ή πυρίτιο. Οι πυκνωτές αυτοί χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα τηλεπικοινωνιών καθώς έχουν χαμηλή αντίσταση βοηθώντας το συντονισμό. Η συνηθισμένη συσκευασία ενός πυκνωτή μεταλλικού φιλμ παρουσιάζεται στο σχήμα 4.8 (α).

#### Κεραμικοί πυκνωτές

Οι κεραμικοί πυκνωτές παίρνουν το όνομά τους από τα κεραμικά υλικά που χρησιμοποιούν σαν διηλεκτρικό, ενώ για τα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται επίσης κεραμικά υλικά όπως οξειδία του τιτανίου τα οποία είναι επιστρωμένα με κάποιο μέταλλο. Οι κεραμικοί πυκνωτές χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά κυκλώματα όπως ταλαντωτές που έχουν υψηλή συχνότητα λειτουργίας καθώς και σε φίλτρα. Οι χωρητικότητες τους κυμαίνονται από 0,1pF έως 12nF. Η συνηθισμένη συσκευασία ενός κεραμικού πυκνωτή παρουσιάζεται στο σχήμα 4.8 (β).

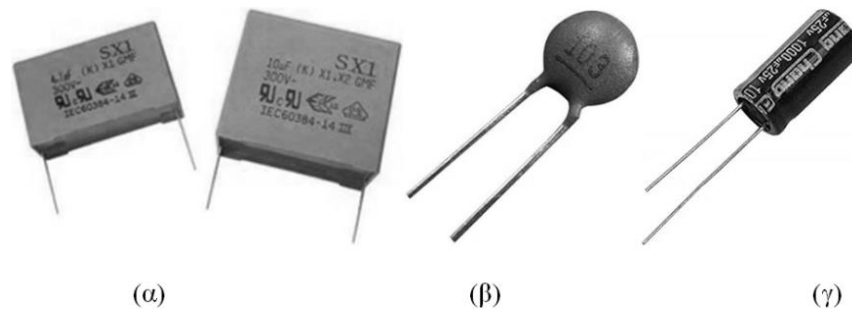
#### Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές

Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές τανταλίου είναι οι πιο διαδεδομένοι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές καθώς παρουσιάζουν την μεγαλύτερη χωρητικότητα σε μονάδα όγκου. Το ταντάλιο τοποθετείται σαν σφαιρίδιο και λειτουργεί ως άνοδος, τυλίγεται από κάποιο οξύ που αποτελεί το διηλεκτρικό και καλύπτεται από ένα υγρό ή στερεό ηλεκτρολύτη που αποτελεί την κάθοδο. Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές είναι κατασκευασμένοι από ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου που είναι συνήθως η άνοδος και μία από χαλκό που αποτελεί την κάθοδο. Ανάμεσα από αυτά μπορεί να τοποθετείται κάποιο πορώδες χαρτί που είναι το διηλεκτρικό, ενώ λιγότερο συχνά, το λεπτό φύλλο αλουμινίου οξειδώνεται από την μία πλευρά του ώστε να δημιουργηθεί το διηλεκτρικό. Αφού αυτά έχουν τοποθετηθεί το ένα πάνω στο άλλο, τυλίγονται και τοποθετούνται σε έναν ηλεκτρολύτη. Τα μεταλλικά φύλλα συνήθως χαράσσονται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η χωρητικότητα του πυκνωτή. Η συνηθισμένη συσκευασία ενός ηλεκτρολυτικού πυκνωτή παρουσιάζεται στο σχήμα 4.8 (γ).

#### Ολοκλήρωση πυκνωτών

Σε ένα πολυεπίπεδο PCB πάντα υπάρχει η δυνατότητα να ενσωματωθεί ο πυκνωτής εντός των επιπέδων της ολοκληρωμένης συσκευασίας με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που περιγράφηκε για

τις κατηγορίες των προηγούμενων πυκνωτών, να δημιουργηθούν δηλαδή τα ηλεκτρόδια και τα διηλεκτρικά εντός του PCB.



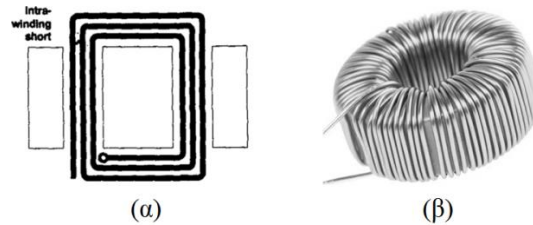
σχήμα 4.8 : Πυκνωτές : (α) Μεταλλικού φιλμ, (β) Κεραμικοί πυκνωτές, (γ) Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές

### 4.3.2 Πηνία

Τα πηνία είναι εξίσου σημαντικά στα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος σε μία πλειάδα εφαρμογών. Σε απλά συστήματα PCB είναι αρκετά εύκολο να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας κάποιο καλώδιο χαλκού ή κάποιο μαγνητικό καλώδιο. Η διαδικασία κατασκευής ενός πηνίου μπορεί να περιλαμβάνει την χρήση ενός πυρήνα από σίδηρο, από κάποιον φερρίτη ή μπορούμε να μην χρησιμοποιήσουμε κανένα πυρήνα. Ο πυρήνας μπορεί να είναι ευθύγραμμος, ενώ συνηθέστερα συνηθίζεται να είναι κάποιο τοροειδές που περιορίζει το εξερχόμενο μαγνητικό πεδίο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9 (β).

### Ολοκλήρωση πηνίων

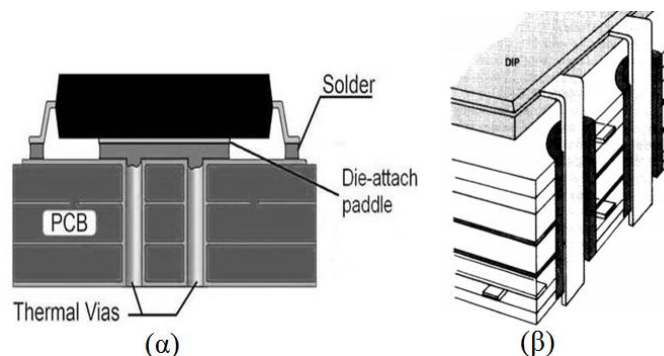
Η ολοκλήρωση των επίπεδων μαγνητικών στοιχείων έχει εφαρμογές εδώ και αρκετό καιρό και οι περιελίξεις των επίπεδων μαγνητικών αναπτύχθηκε με την χρήση κοινών τεχνολογιών διασύνδεσης όπως PCB, thick film και flex [41]. Σε αυτήν την ολοκλήρωση, η κατασκευή των μαγνητικών στοιχείων, πηνίων και μετασχηματιστών επιτυγχάνεται δημιουργώντας επίπεδα πηνία που μπορεί να περιλαμβάνεται στα επίπεδα της πλακέτας. Στο σχήμα 4.9 (α) παρουσιάζονται παραδείγματα πηνίων που τοποθετούνται πάνω σε πλακέτες που προαναφέρθηκαν.



σχήμα 4.9 : Επαγωγικά στοιχεία : (α) Ολοκληρωμένο μαγνητικό στοιχείο κατασκευασμένο στο στρώμα χαλκού του PCB – (β) Τοροειδές πηνίο

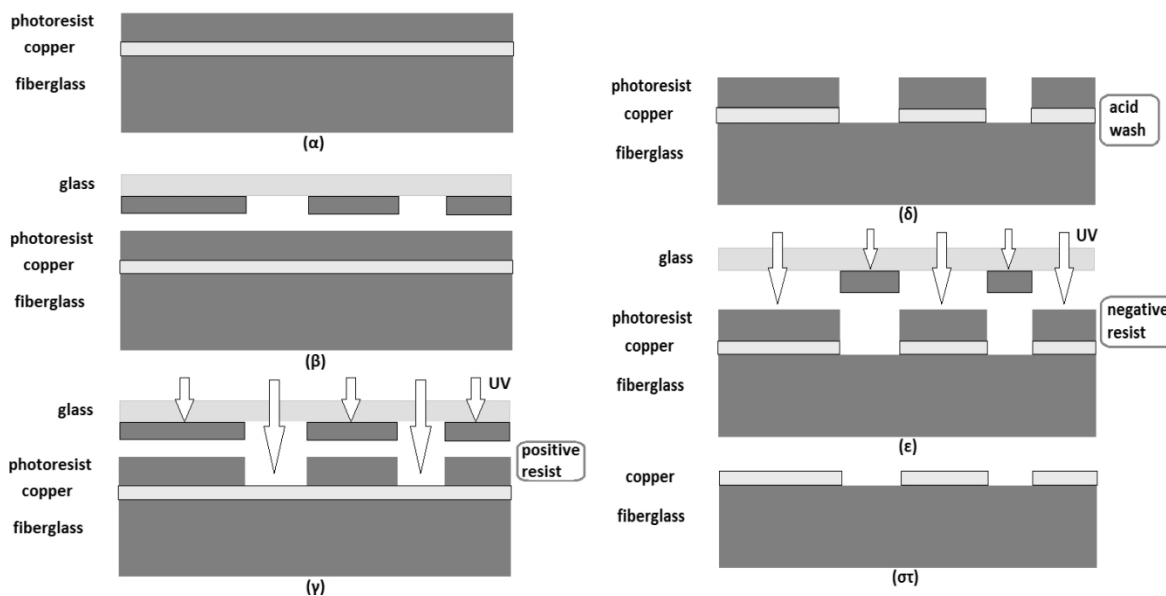
#### 4.4 Κατασκευή εκτυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Boards)

Μία από τις πιο σημαντικές αποφάσεις συσκευασίας σε επίπεδο συστήματος που πρέπει να ληφθεί σύμφωνα με το σχήμα 4.1 είναι αυτό της πλακέτας ή PCB (Printed Circuit Board). Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει και κατουσίαν εφαρμόζει όσα σχεδιάστηκαν στο επίπεδο σχεδίασης του κυκλώματος. Σε αυτό τοποθετούνται όλα τα στοιχεία που επιλέχθηκαν, πάνω σε ειδικές πλάκες που διαθέτουν υψηλή μηχανική αντοχή και ειδικές αγωγικές οδούς από λεπτά φύλλα συνήθως χαλκού που συνδέουν τα στοιχεία. Η πλάκα η ίδια είναι μονωτής και δεν επιτρέπει την επαγωγή ρεύματος μεταξύ γειτονικών στοιχείων. Οι αντιστάσεις, οι πυκνωτές, τα πηνία, οι ψύκτρες και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα τοποθετούνται μέσα σε οπές που κατασκευάζονται πάνω στο PCB και πακτώνονται με λιωμένο μέταλλο. Τα πλεονεκτήματα είναι εξαιρετικά και δικαιολογούν απολύτως την χρήση τους καθώς με τα PCB καταργούμε τα ελεύθερα καλώδια και μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε με διάφορους αλγορίθμους τον όγκο που καταλαμβάνουν τα στοιχεία τοποθετώντας τα με βέλτιστο τρόπο. Συνηθίζεται σε βιομηχανικά περιβάλλοντα να επικαλύπτεται ολόκληρη η πλακέτα με epoxy covers (εποξειδικά καλύμματα), τα οποία είναι διάφανες ρητίνες οι οποίες δεν επιτρέπουν στην υγρασία ή τη σκόνη να διεισδύσουν στα ηλεκτρονικά, προστατεύοντάς τα. Εκτός αυτού διευκολύνουν την συντήρηση της συσκευής καθώς δίνουν την δυνατότητα πλύσης και αφαίρεσης ρύπων και σκόνης που μπορεί να αλλοιώνουν την συμπεριφορά της πλακέτας αλλά μπορεί να αυξάνουν το θερμικό φορτίο και για αυτό απαιτείται επιπλέον προσοχή στην θερμική ανάλυση.



σχήμα 4.10 : (α) Σχεδίαση οπών με επικάλυψη χαλκού για την ροή θερμότητας [33] - (β) Σχεδίαση οπών με επικάλυψη χαλκού για την τοποθέτηση στοιχείων [35]

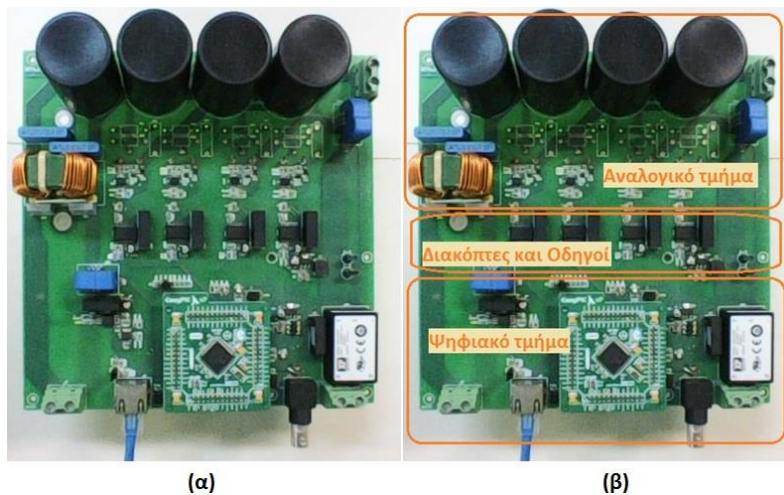
Ένα PCB κατασκευάζεται συνήθως από πλάκες fiberglass οι οποίες είναι επικαλυμμένες από ένα φύλλο χαλκού. Η τελική πλακέτα μπορεί να αποτελείται από αρκετές τέτοιες πλάκες έτσι ώστε να δημιουργούνται περισσότερα αγώγιμα μονοπάτια. Στην τελική συναρμολόγηση οι πλακέτες κολλιούνται μεταξύ τους με εποξειδικό διάλυμα ή σκληρύνονται μέσα σε θερμαινόμενη πρέσα [36]. Οι αγωγοί χαλκού οι οποίοι συνδέουν τα στοιχεία μεταξύ τους αρχικά σχεδιάζονται σε κάποιο CAD (Computer Aided Design) πρόγραμμα. Στην συνέχεια επιλέγεται μία από τις δύο μεθόδους, την όξινη χαρακτική (wet acid etching) και την μηχανική επεξεργασία (mechanical milling). Η όξινη χαρακτική χρησιμοποιείται για την δημιουργία των αγωγών χαλκού και να αφαιρεθεί ο περιττός χαλκός. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τα εξής στάδια. Αρχικά ξεκινάει η διαδικασία έχοντας την πλάκα από fiberglass και το στρώμα από το photoresist με το φύλλο χαλκού ενδιάμεσά τους (σχήμα 4.11(α)). Δημιουργούνται τα κατάλληλα μοτίβα πάνω στη φωτοαντίσταση (photoresist) τοποθετώντας πάνω από αυτή την κατάλληλη μάσκα. Στην συνέχεια ακτινοβολείται η φωτοαντίσταση από υπέρυθρη ακτινοβολία αφήνοντας εκτεθειμένα τα τμήματα χαλκού που θέλουμε να αφαιρεθούν τα οποία μετά από την πλύση με οξύ, αφαιρούνται (σχήμα 4.11(δ)). Τέλος εφαρμόζεται η δεύτερη μάσκα (negative resist) και ακτινοβολουύμε με υπεριώδη με σκοπό να αφαιρεθεί όλη η φωτοαντίσταση από την πλάκα. Τελικά παραμένει η διάταξη του σχήματος 4.11(ζ). Το επόμενο στάδιο αυτής της διαδικασίας είναι η διάτρηση οπών σε όλα τα απαραίτητα επίπεδα και αφού συγκολληθούν οι πλάκες, τότε επικαλύπτονται οι οπές με χαλκό ώστε να χρησιμοποιηθούν για την αγωγή της θερμότητας όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10 (α) είτε για την εισαγωγή στοιχείων για το σχήμα 4.10 (β).



σχήμα 4.11 : (α) Αρχική πλάκα – (β) Τοποθέτηση του positive photoresist – (γ) Ακτινοβολήση με υπεριώδη ακτινοβολία (δ) Εφαρμογή όξινου διαλύματος – (ε) Τοποθέτηση του negative photoresist και ακτινοβολήση με υπεριώδη ακτινοβολία – (στ) Πλακέτα με ολοκληρωμένους αγωγούς

Η άλλη διαδικασία είναι η μηχανική επεξεργασία κατά την οποία ο χαλκός σχηματίζεται μέσω ειδικών τρυπανιών πάνω στο fiberglass. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή πρωτοτύπων ενώ η φωτολιθογραφική τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως για μαζική παραγωγή. Η φωτολιθογραφική τεχνική έχει το μειονέκτημα ότι τα τοξικά απόβλητα πρέπει να ανακυκλώνονται ενώ η μηχανική επεξεργασία δεν αποδίδει το βέλτιστο προϊόν.

Παραδείγματα 2D PCB: Στο σχήμα 4.12(α) και στα σχήματα 4.12 και 4.13 βλέπουμε δύο μετατροπείς ισχύος κατασκευασμένοι πάνω σε PCB βάσεις. Χωρίς αυτές τα καλώδια θα δέσμευαν τόσο πολύ χώρο που θα έκαναν αδύνατη την επισκευή και την συντήρηση του κυκλώματος, καθώς και την ρύθμιση της θερμοκρασίας. Χωρίς το PCB ο όγκος της συσκευής θα ήταν διπλάσιος και η άτακτη τοποθέτηση των στοιχείων θα αύξανε την Η/Μ παρεμβολή. Στο σχήμα 4.12(β) βλέπουμε πως η διάταξη της πλακέτας μειώνει την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή από τα πηνία του συστήματος βάζοντας όλα τα αναλογικά στοιχεία στην μία πλευρά της πλακέτας και τα ευαίσθητα ψηφιακά στην απομονωμένα στην άλλη. Με αυτήν την πρακτική μειώνεται η παρεμβολή και ο θόρυβος.



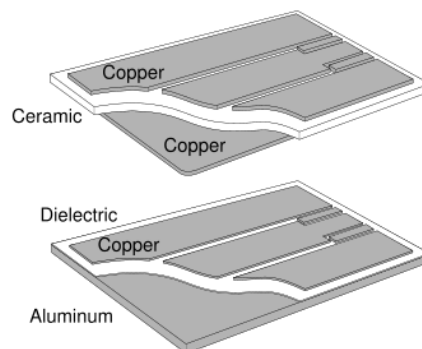
σχήμα 4.12 : (α) Αντιστροφέας ισχύος συστήματος επαγωγικής φόρτισης 2kW – (β) Σωστή τοποθέτηση των στοιχείων πάνω στην πλακέτα



σχήμα 4.13 : Αντιστροφέας ισχύος εργαστηρίου ηλεκτρονικών ισχύος

Μία ιδιαίτερη κατηγορία PCB αποτελεί το DBC (Direct Bonding Copper) το οποίο σε αντίθεση με το απλό PCB που περιγράφηκε προηγουμένως, έχει πλεονεκτήματα που το καθιστούν ιδανικό σε εφαρμογές ισχύος όπου η ισχύ μπορεί να φτάσει τα αρκετά kW. Σε αντίθεση με το PCB το οποίο χρησιμοποιεί fiberglass για την κατασκευή του υποστρώματος πάνω στο οποίο τοποθετείται ο χαλκός, το DBC χρησιμοποιεί κεραμικά πλακάκια κυρίως από αλουμίνα  $Al_2O_3$  τα οποία αν και όχι οι καλύτεροι αγωγοί της θερμότητας, αντέχουν θερμοκρασίες της τάξης των 150 με 200°C. Άλλα υλικά αποτελούν το Νιτρίδιο του αργιλίου (AlN) που έχει ακόμα μεγαλύτερη θερμική αντοχή και το Οξειδίο του βηρυλλίου (BeO). Η χρήση του DBC είναι απολύτως απαραίτητη όταν οι χωρικές απαιτήσεις της συσκευής είναι αυξημένες. Αυτό σημαίνει ότι όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα χρήσης μεμονωμένων ψυκτρών για κάθε διακοπτικό στοιχείο ή όταν δεν ενδείκνυται η δημιουργία οπών στο υπόστρωμα μίας PCB πλακέτας αλλά απαιτείται για την εφαρμογή η ολοκλήρωση του κυκλώματος ηλεκτρονικών ισχύος, τότε χρησιμοποιούμε μία ή περισσότερες DBC πλακέτες. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε μία DBC πλακέτα όταν απαιτούμε την ολοκλήρωση των στοιχείων με μεθόδους που περιγράφονται σε επόμενη παράγραφο. Στη DBC πλακέτα (ή υπόστρωμα) γίνεται δηλαδή ικανή η χρήση μίας μοναδικής πηγής ψύξης κάνοντας τελικά ευκολότερη την συσκευασία του στοιχείου.

Στο σχήμα 4.14 παρουσιάζεται η δομή μίας DBC πλακέτας. Η DBC πλακέτα αν και έχει πολύ μεγάλη διηλεκτρική ικανότητα χωρίς την χρήση κάποιου διηλεκτρικού φύλλου, συνηθίζεται να τοποθετείται σε εφαρμογές μεγάλων επιπέδων τάσης, κάποιο υπόστρωμα για την ενίσχυση της ηλεκτρικής μόνωσης. Τέλος το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους που μοιράζονται με την σιλίκονη είναι η ικανότητά τους να διατηρούν σταθερό το μέγεθός τους κατά τον κύκλο ψύξης θέρμανσης (δεν παρατηρείται διαστολή του μεγέθους τους).



σχήμα 4.14 : DBC πλακέτα (ή υπόστρωμα) [50]

Άλλη κατηγορία υποστρώματος που αξίζει να αναφερθεί αποτελεί το φλεξ (Flexible substrates) που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μικρής ισχύος.

### Τοποθέτηση μάσκας για προστασία στρώματος χαλκού

Στην προηγούμενη παράγραφο είδαμε την διαδικασία κατασκευής μιας PCB πλακέτας στην οποία έχουν κατασκευαστεί όλοι οι αγωγοί χαλκού που δημιουργούν την διασύνδεση μεταξύ των



στοιχείων. Στην συνέχεια ακολουθεί το στάδιο τοποθέτησης της μάσκας προστασίας που δίνει το χαρακτηριστικό πράσινο χρώμα σε πολλά PCB. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την τοποθέτηση ενός προστατευτικού στρώματος πολυμερούς το οποίο καλύπτει όλα τα στρώματα χαλκού εκτός από τα μέρη στα οποία πρόκειται να τοποθετηθεί κάποιο στοιχείο. Για να επιτευχθεί αυτό επανερχόμαστε στην διαδικασία της φωτολιθογραφίας κατά την οποία δημιουργείται μία μάσκα την οποία μπορεί να διαπεράσει υπεριώδης ακτινοβολία με τοποθετημένα πάνω της τμήματα φωτοαντίστασης (photoresist). Αυτά σηματοδοτούν το σημείο στο οποίο θα παραμείνει εκτεθειμένος ο χαλκός για την τοποθέτηση κάποιου στοιχείου. Αφού δημιουργηθεί η μάσκα με τα κατάλληλα στίγματα και καθαριστεί το υπόστρωμα για την αφαίρεση σκόνης και ακαθαρσιών ακολουθεί το στάδιο κατά το οποίο τοποθετείται το στρώμα πολυμερούς το οποίο είναι ακόμα σε υγρή κατάσταση αν πρόκειται για υγρού τύπου (Liquid Photoimageable Solder Mask) ή στερεό αν χρησιμοποιούνται φύλλα πολυμερούς (Dry Film Photoimageable) πάνω στο PCB υπόστρωμα. Στην συνέχεια ακτινοβολείται το υπόστρωμα από υπεριώδη ακτινοβολία ώστε το πολυμερές να σταθεροποιηθεί με εξαίρεση τα σημεία που βρίσκονταν κάτω από τη φωτοαντίσταση. Το υπόστρωμα εν συνεχεία ξεπλένεται για την απομάκρυνση του πολυμερούς που δεν έχει σταθεροποιηθεί ώστε να επανεμφανιστεί ο χαλκός στον οποίο θα γίνει η σύνδεση των στοιχείων.

Η διαδικασία τοποθέτησης μάσκας είναι απαραίτητη σε επαγγελματικού επιπέδου PCB καθώς προσφέρει τα τρία πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Την προστασία του στρώματος χαλκού από οξείδωση και διάβρωση
- Την προστασία από βραχυκυκλώματα κατά την διαδικασία τοποθέτησης των στοιχείων
- Την δυνατότητα τοποθέτησης επιπέδου silk-screening το οποίο βοηθάει στην ταυτοποίηση των στοιχείων καθώς και στην επιτάχυνση της διαδικασίας παραγωγής και ελέγχου

## **4.5 Τοποθέτηση στοιχείων πάνω στο υπόστρωμα του PCB**

Η κατασκευή του υποστρώματος PCB στοχεύει στην δημιουργία κατάλληλων αγωγών χαλκού και σημείων επαφών για την τοποθέτηση των στοιχείων. Η τοποθέτηση των στοιχείων και κατά επέκταση η αρχιτεκτονική κατασκευής του υποστρώματος εξαρτάται από την τεχνολογία τοποθέτησης που έχει αποφασίσει ο μηχανικός να ακολουθήσει. Οι κυριότερες είναι η SMT ή τεχνολογία επιφανειακής στήριξης (Surface Mount Technology) και η THT ή τεχνολογία οπών (Through Hole Technology).

### **4.5.1 Τεχνολογία επιφανειακής στήριξης (Surface Mount Technology)**

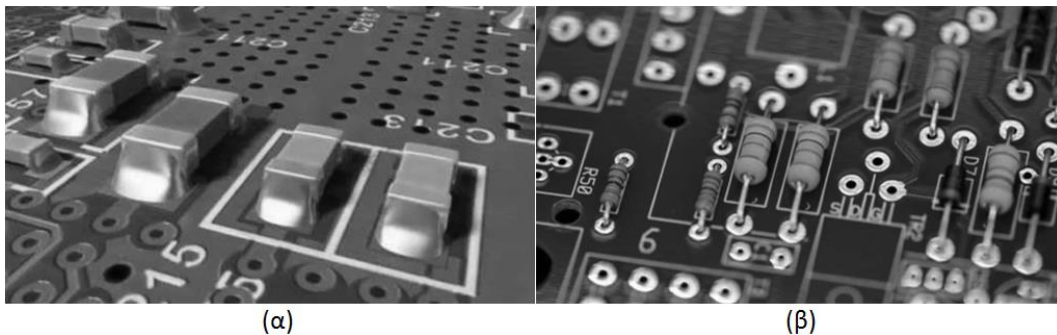
Την δεκαετία του 80 καθιερώθηκε η τεχνολογία SMT (Surface Mount Technology) κατά την οποία η διασύνδεση των στοιχείων γίνεται απευθείας πάνω στο υπόστρωμα χωρίς την ανάγκη για δημιουργία οπών για τοποθέτηση κάποιου στοιχείου στο υπόστρωμα. Η τεχνολογία αυτή καθιστά δυνατή την σμίκρυνση σε πολύ μεγάλο βαθμό των ηλεκτρονικών μίας συσκευής μειώ-

νοντας το βάρος, το κόστος παραγωγής και τον όγκο της. Η χωροταξική διάταξη μιας SMD (Surface Mount Device) είναι τουλάχιστον 50% μικρότερη από αυτή μιας Through Hole (θα περιγραφεί παρακάτω) καθώς η κάτω πλευρά του υποστρώματος αξιοποιείται με τοποθέτηση στοιχείων και όχι με την δημιουργία οπών για την τοποθέτηση των ακροδεκτών των στοιχείων. Εκτός αυτού τα στοιχεία, κυρίως τα παθητικά όπως αντιστάσεις και πυκνωτές έχουν έως και δέκα φορές μικρότερο μέγεθος από τα συμβατικά. Άλλα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αποτελεί ο μικρός χρόνος παραγωγής λόγω της ταχείας τοποθέτησης των στοιχείων και της μειωμένης παράσιτης επαγωγής λόγω των κολλήσεων. Η SMT τεχνολογία, λόγω της σμίκρυνσης των μεγεθών της ενισχύει την λειτουργία ψηφιακών κυκλωμάτων που κατά αποκλειστικότητα έχουν υιοθετήσει την τεχνολογία.

Μειονεκτήματα της διάταξης αποτελούν το χαμηλό επίπεδο ισχύος της συσκευής, την εξάρτηση από την θερμική διαστολή στον χρόνο ζωής των συνδέσεων, χαμηλή ανοχή σε κραδασμούς.

**Ορολογία:** για το υπόλοιπο του κεφαλαίου με τους παρακάτω όρους θα εννοούμε:

- SMT: Surface Mount Technology (Τεχνολογία επιφανειακής στήριξης)
- SMC: Surface Mount Component (Στοιχείο επιφανειακής στήριξης)
- SMD: Surface Mount Device (Συσκευή επιφανειακής στήριξης)



σχήμα 4.15 : (α) Τεχνολογία επιφανειακής στήριξης – (β) Τεχνολογία οπών

#### 4.5.2 Τεχνολογία οπών (Through Hole Technology)

Η παλαιότερη τεχνολογία διασύνδεσης στοιχείων είναι η τεχνολογία διασύνδεσης μέσω οπών (Through Hole Technology). Η τεχνολογία αυτή αν και παλαιά, καθώς και περισσότερο επιρρεπής σε χωρικά προβλήματα, παραμένει μία πολύ χρήσιμη τεχνική κατασκευής ηλεκτρονικών. Σε αυτή την τεχνική τα στοιχεία τοποθετούνται σε οπές όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15 (β) και συγκολλούνται μέσω των ακροδεκτών τους στον χαλκό του υποστρώματος. Η τεχνολογία αυτή έχει πρακτικά καταργηθεί σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος και οι κύριοι λόγοι είναι το κόστος κατασκευής οπών για την τοποθέτηση των ακροδεκτών, το κόστος μαζικής κατασκευής που προϋποθέτει την τοποθέτηση των στοιχείων με το χέρι και τέλος το μεγάλο μέγεθος της συσκευής που προκύπτει.

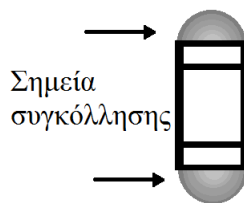
### 4.5.3 Συνδυασμός τεχνολογιών SMT και THT

Στα ηλεκτρονικά ισχύος είναι πολύ συχνό οι δύο τεχνολογίες να συνδυάζονται. Σε πλακέτες έως μερικά kW, η SMT τεχνολογία μπορεί να ικανοποιήσει την αρχιτεκτονική του υπό κατασκευή συστήματος όμως είναι πολύ συχνό στοιχεία που διαρρέονται από υψηλό ρεύμα να χρησιμοποιούνται πιο ογκώδη στοιχεία τα οποία είναι απαραίτητα να τοποθετηθούν μέσω οπών εντός του υποστρώματος. Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζονται οπτικά ο τρόπος σύνδεσης των δύο τεχνολογιών.

### 4.5.4 Τεχνικές συγκόλλησης στοιχείων

Η συγκόλληση των στοιχείων πραγματοποιείται στις μεταλλικές επαφές των στοιχείων. Στο σχήμα 4.16 αναπαρίσταται ένα τυπικό SMC στο οποίο βρίσκεται ένα κεραμικό υπόστρωμα ανάμεσα σε δύο μεταλλικές επαφές. Οι μεταλλικές επαφές τοποθετούνται πάνω στις επαφές χαλκού του υποστρώματος του PCB και συγκολλούνται με τις παρακάτω τεχνικές.

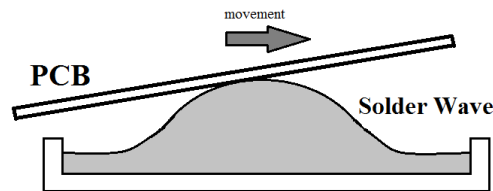
Υπάρχουν τρεις τρόποι για την συγκόλληση των στοιχείων πάνω στην PCB. Οι πρώτοι δύο αφορούν την μαζική παραγωγή πλακετών ενώ ο τρίτος μπορεί να παίρνει μέρος στην μαζική παραγωγή όταν τα στοιχεία είναι πολύ μεγάλα ή ακατάλληλα για εισαγωγή σε φούρνο. Η πρώτη αποτελεί την διαδικασία **reflow** (επαναφοράς) κατά την οποία η πλακέτα μετά την διαδικασία της τοποθέτησης της μάσκας προστασίας καλύπτεται από πάστα συγκόλλησης (solder paste) μέσω ενός stencil ούτως ώστε η πάστα να τοποθετηθεί μόνο πάνω από τα σημεία χαλκού που θα συνδεθούν με το SMC. Αυτή αποτελεί μία πάστα με μεγάλο ιξώδες που περιέχει έναν συνδυασμό από flux (πάστα που αποτρέπει τον σχηματισμό οξειδίων κατά την συγκόλληση) και από μεταλλικά σφαιρίδια. Όταν έχει τοποθετηθεί η πάστα και έχει αφαιρεθεί το stencil τοποθετούνται τα στοιχεία πάνω στην πάστα χωρίς να μετακινούνται εξαιτίας του ιξώδους και τοποθετείται το PCB σε έναν φούρνο. Εκεί περνάει αρκετά στάδια θέρμανσης και εν συνεχεία ψύξης που εν ολίγοις περιλαμβάνουν την εξάτμιση του flux, το λιώσιμο του μεταλλικού υλικού συγκόλλησης (solder) και την επανασύνδεσή του με το SMC και τον χαλκό του υποστρώματος (reflow), διαδικασία που δίνει το όνομά της σε ολόκληρη την διαδικασία. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για μαζική παραγωγή αλλά μπορεί να προσομοιωθεί αρκετά εύκολα και σε επίπεδο πρωτοτύπου.



σχήμα 4.16 : Σημεία συγκόλλησης SMC

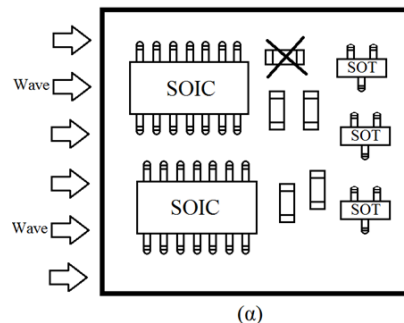
Η δεύτερη αποτελεί την διαδικασία **wave soldering** (συγκολλητικό κύμα) κατά την οποία τα στοιχεία κολλούνται πάνω στην πλάκα με κάποια κολλητική ουσία (adhesive) και στην συνέ-

χαια το τμήμα της πλακέτας που πρόκειται να συγκολληθεί στρέφεται ανάποδα (υπό κλίση) και περνάει πάνω από ένα κύμα συγκολλητικής ουσίας (solder wave) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.17. Η συγκολλητική ουσία έλκεται από τα μεταλλικά τμήματα της πλακέτας και σταθεροποιείται πάνω σε αυτά. Στην συνέχεια η πλακέτα γυρίζει ανάποδα έχοντας κολλημένα τα υπόλοιπα στοιχεία και επανατοποθετείται πάνω από το κύμα συγκολλητικής ουσίας. Στην συνέχεια η πλακέτα ψύχεται και καθαρίζεται. Όποιο στοιχείο δεν μπορεί να περάσει από το «κύμα» συγκολλείται μετέπειτα με το χέρι. Το σημείο συγκόλλησης έχει προστατευθεί από το κύμα με κάποια εποξειδική ρητίνη που αφαιρείται μετά την διαδικασία. Για την διαδικασία υπάρχουν προδιαγραφές στην σχεδίαση του κυκλώματος που καλό είναι ο μηχανικός να τις γνωρίζει πριν την σχεδίαση και αυτές περιγράφονται παρακάτω.

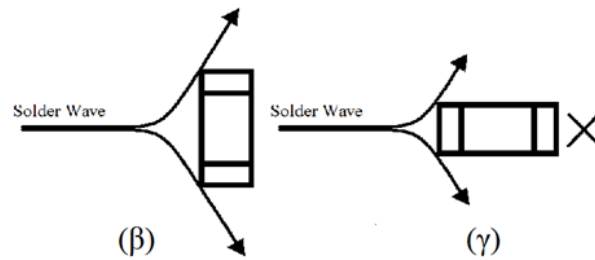


σχήμα 4.17 : Τεχνική Wave soldering [59]

Ο μηχανικός που κατασκευάζει ένα πρωτότυπο PCB κύκλωμα, γνωρίζοντας την εταιρία από την οποία θα πραγματοποιήσει την μαζική παραγγελία (με τον όρο μαζική μπορεί να εννοούμε έναν αριθμό μεγαλύτερο από αυτόν που μπορεί να κατασκευαστεί τοπικά) και την μέθοδο η εταιρία ακολουθεί στην διαδικασία συγκόλλησης, οφείλει να γνωρίζει βασικές τεχνικές τοποθέτησης των στοιχείων πριν την αποστολή του PCB Layout για την τελική παραγωγή. Στο σχήμα 4.18 (α) παρουσιάζεται η σωστή τοποθέτηση των στοιχείων όταν η τεχνική συγκόλλησης είναι το Wave soldering. Αρχικά κάθε στοιχείο του ίδιου είδους τοποθετείται σε σειρά το ένα κάτω από το άλλο. Τα στοιχεία όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18 (β) και (γ), δεν πρέπει να τοποθετούνται με τρόπο ώστε να σκιάζεται κάποια επαφή από το κύμα κολλητικής ουσίας. Τέλος και πιο σημαντικό είναι ότι σε μία πλακέτα διπλής όψης, τα πιο βαριά στοιχεία να τοποθετούνται σε μία πλευρά και αυτή να συγκολλείται δεύτερη έτσι ώστε να ασκηθεί λιγότερη πίεση στην επιμετάλλωση (solder) κατά το πέρασμα της άλλης πλευράς και την θέρμανσή της.



σχήμα 4.18 : Τοποθέτηση στοιχείων : (α) Σχετική τοποθέτηση στοιχείων μεταξύ στοιχείων και με το κύμα συγκολλητικού (συνεχίζεται)



σχήμα 4.18 : Τοποθέτηση στοιχείων : (α) Σχετική τοποθέτηση στοιχείων μεταξύ στοιχείων και με το κύμα συγκολλητικού – (β) Σωστή τοποθέτηση στοιχείου για την αποφυγή σκίασης – (γ) Πρόβλημα σκίασης δεύτερης επαφής [59]

Η τρίτη τεχνολογία διασύνδεσης είναι και η πιο απλή και χρησιμοποιείται κατά κόρον για την δημιουργία πρωτοτύπων. Σε αυτό το επίπεδο τα στοιχεία τοποθετούνται πάνω στο PCB και συγκολλούνται με το χέρι. Κατά την συγκόλληση χρησιμοποιείται συγκολλητική μεταλλική ουσία (καλάι) με ενσωματωμένο πυρήνα flux στο εσωτερικό της ώστε να αποτραπεί οξείδωση της συγκόλλησης.

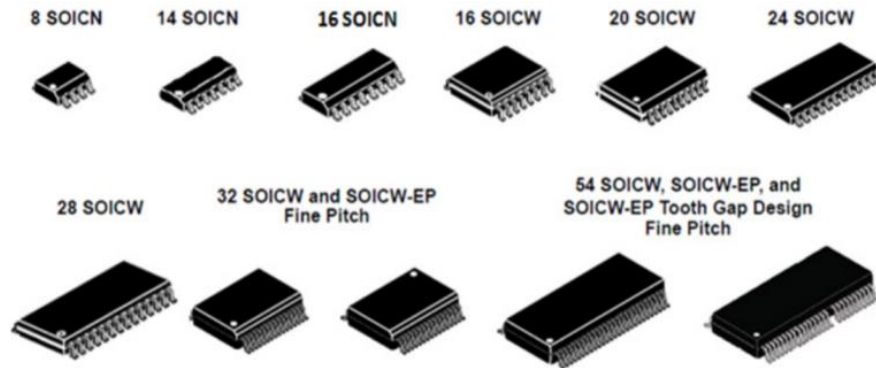
Άλλες τεχνολογίες αποτελούν την συγκόλληση με laser και με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας, και θερμό αέρα.

#### 4.5.5 Βασικότερες SMT συσκευασίες

Οι κατηγορίες στοιχείων διαχωρίζονται στις εξής δύο κατηγορίες, στα ολοκληρωμένα, ψηφιακά κυκλώματα και στην κατηγορία των παθητικών και διακοπτικών στοιχείων. Για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που τοποθετούνται πάνω σε ένα PCB ξεχωρίζουν δύο κύριες οικογένειες στοιχείων, διπλής σειράς και τετραπλής σειράς. Αυτός ο διαχωρισμός είναι απαραίτητος καθώς επηρεάζει την χωρική διάταξη της πλακέτας. Πέρα από τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, τα στοιχεία που μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα SMD είναι αντιστάσεις, πηνία και πυκνωτές, δίοδοι, τρανζίστορ και άλλα διακοπτικά στοιχεία.

##### Διπλής σειράς:

**SOIC** (Small Outline Integrated Circuit): Το SOIC αποτελεί ένα SMC (surface Mounted Component) του ισοδύναμου κλασικού DIP (Dual In line Package) (σχήμα 4.19 (β)) και έχει κατά πολύ μικρότερο μέγεθος. Το κύριο χαρακτηριστικό των SOIC είναι η διπλή σειρά των ακροδεκτών τους που δεν περιέχουν μόλυβδο (Pb) αλλά είναι κατασκευασμένα από ματ κασσίτερο.



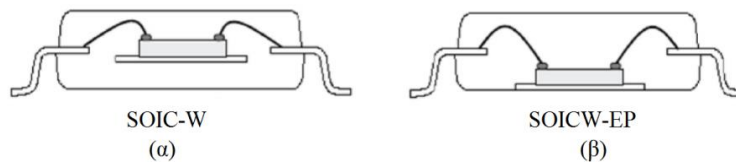
(α)



(β)

σχήμα 4.19 : Συσκευασία στοιχείων: (α) SOIC – (β) DIP

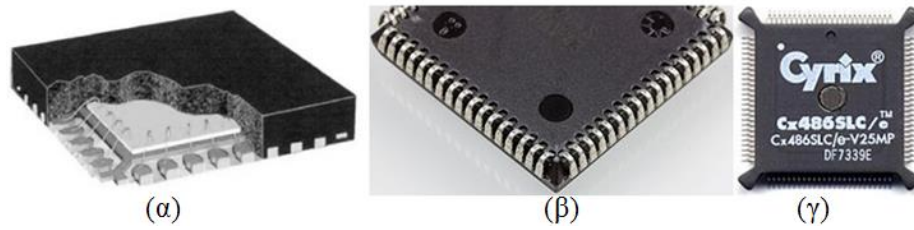
Ο αριθμός των ακροδεκτών κυμαίνεται από 8 έως 54 (σχήμα 4.19) και ανάλογα με το δεύτερο συνθετικό περιέχουν περαιτέρω χαρακτηριστικά που αφορούν την τοποθέτηση της θερμικής πλάκας (Pad) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.20.



σχήμα 4.20 : (α) Μη εκτεθειμένη κολλητική ουσία (Wide Body Non-exposed Pad) – (β) Εκτεθειμένη κολλητική ουσία (Wide Body Exposed Pad) [55]

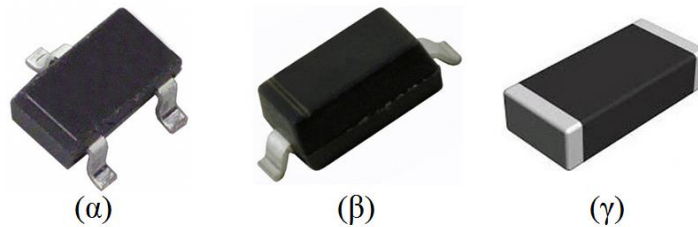
### Τετραπλής σειράς:

Τα SMC τετραπλής σειράς αν και πιο σπάνια στα ηλεκτρονικά ισχύος, βρίσκουν συχνά εφαρμογή. Τη κύρια κατηγορία αποτελούν τα LCC ή μεταφορέας τσιπ χωρίς μόλυβδο (Leadless Chip Carrier) και το PLCC ή πλαστικό μεταφορέας τσιπ χωρίς μόλυβδο (Plastic Leaded Chip Carrier) αποτελεί την εξέλιξη του LCC και αξιοποιεί την επαφή τύπου j. Τέλος υπάρχει και η συσκευασία QFP (Quad Flat Pack) η οποία μπορεί αποκλειστικά να χρησιμοποιηθεί σε SMD. Τα στοιχεία παρουσιάζονται στο σχήμα 4.21.

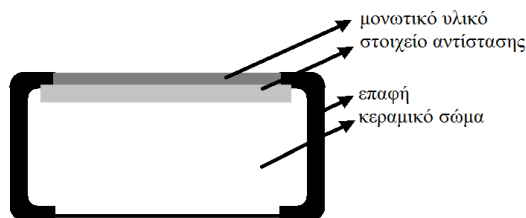


σχήμα 4.21 : (α) LCC – (β) PLCC – (γ) QFP

Ακολουθούν τα στοιχεία που αφορούν παθητικά στοιχεία, τρανζίστορ και διόδους. Το SOT (Small Outline Transistor) συνηθίζεται να έχει τρεις ακροδέκτες (σχήμα 4.22 (α)), αλλά ανάλογα με την τεχνολογία του τρανζίστορ μπορεί να περιέχει. Τα SOD (Small Outline Diode) έχουν δύο ακροδέκτες, για κάθε άκρο της διόδου (σχήμα 4.22 (β)) ενώ τα παθητικά στοιχεία όπως οι αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία δεν έχουν ακροδέκτες όπως φαίνεται στο σχήμα 4.21 (γ). Μία αντίσταση αποτελείται από τέσσερα στοιχεία που λίγο πολύ είναι κοινά στα πηνία και τους πυκνωτές. Το παθητικό στοιχείο είναι παραλληλόγραμμο διαστάσεων που κυμαίνονται από 0,6 x 0,3 mm έως 6,3 x 3,1 mm. Τα κοινά στοιχεία μεταξύ αντιστάσεων, πυκνωτών και πηνίων είναι αρχικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.23, οι μεταλλικές επαφές βρίσκονται σε κάθε άκρη της συσκευασίας και είναι τοποθετημένες κάθετα στην επαφή του PCB πράγμα που φαίνεται παράξενο μέχρι κανείς δει πως γίνεται η συγκόλληση με αυτό. Τα στοιχεία περιέχουν ένα κεραμικό υπόστρωμα που λέγεται και σώμα και τέλος συνήθως υπάρχει κάποιο μονωτικό επίπεδο για την αποφυγή διαρροών. Στις αντιστάσεις υπάρχει μεταξύ των επαφών κάποιο στοιχείο αντίστασης συνήθως κάποιο μεταλλικό οξειδίο ενώ οι πυκνωτές είναι συνήθως κεραμικοί ή τανταλίου ενώ τα επαγωγικά στοιχεία περιέχουν ενσωματωμένα πηνία στο εσωτερικό τους. Μία SMD αντίσταση παρουσιάζεται στο σχήμα 4.22 (γ) ενώ στο σχήμα 4.23 η αρχιτεκτονική του. Ο πυκνωτής συνηθίζεται να είναι πιο παχύς από μία αντίσταση, πράγμα που επηρεάζει το μέγεθος των επαφών του χαλκού.



σχήμα 4.22 : (α) SOT – (β) SOD – (γ) Αντίσταση, πηνίο ή πυκνωτής

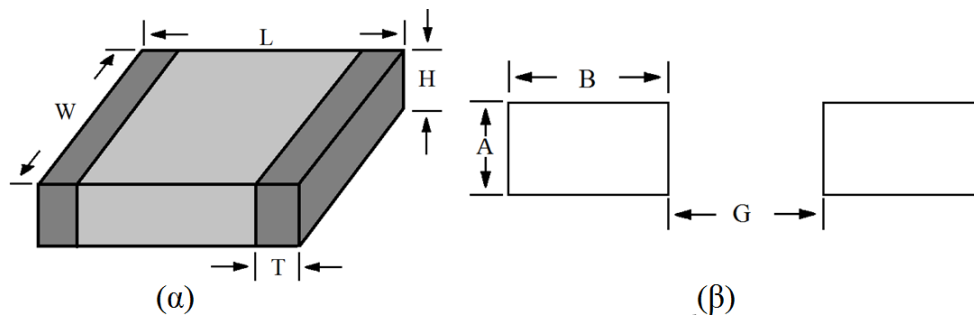


σχήμα 4.23 : Αρχιτεκτονική SMD αντίστασης [56]

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που πρέπει να προσέχει κανείς όταν διαλέγει στοιχεία, όχι μόνο SMC αλλά και THT είναι η αξιολόγηση ισχύος τους δηλαδή πόση ισχύ μπορούν να διαχειριστούν. Αυτό το χαρακτηριστικό συνδέεται με το μεγαλύτερο μειονέκτημα της SMT που είναι το χαμηλό επίπεδο ισχύος στο οποίο λειτουργούν.

#### 4.5.6 Τοποθέτηση στοιχείων πάνω στο PCB υπόστρωμα και μέγεθος επαφής (Land Pattern Design)

Τα στοιχεία που περιγράφηκαν προηγουμένως τοποθετούνται μέσω των επαφών τους πάνω στο εκτεθειμένο υπόστρωμα χαλκού του PCB. Το μέγεθος που πρέπει να έχει, δηλαδή το εμβαδόν του, πρέπει να υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε στοιχείο ανάλογα της συσκευασίας του, ανάλογα του ρεύματος ή ισχύος που θα το διαρρέει και ανάλογα της θερμοκρασίας του. Ο κατασκευαστής κάθε στοιχείου είναι υπεύθυνος για την περιγραφή της επαφής του στοιχείου που παράγει και ενώ για χρόνια οι μηχανικοί ήταν υπεύθυνοι να σχεδιάζουν σε κάποιο CAD πρόγραμμα τις επαφές, πλέον με προγράμματα προσομοίωσης τα οποία περιέχουν τα στοιχεία και τα χαρακτηριστικά τους μπορεί ο μηχανικός πολύ γρήγορα να σχεδιάσει το ολοκληρωμένο PCB με SMT ή THT. Παρόλα αυτά καλό είναι να γνωρίζει κανείς τον τρόπο υπολογισμού του μεγέθους της επαφής για ένα ορθογώνιο παθητικό στοιχείο όπως του σχήματος 4.24 (α). Το εμβαδό των επαφών όπως φαίνονται στο σχήμα 4.24 (β) βρίσκονται από τις εξισώσεις 4.7 έως 4.9.



σχήμα 4.24 : (α) Αντίσταση SMD – (β) Σημεία επαφής (Pads) με το PCB [59]

$$A = W_{\max} - K \quad (4.7)$$

$$B = H_{\max} + T_{\max} + K \quad (4.8)$$

$$G = L_{\max} - 2T_{\max} - K \quad (4.9)$$

Όπου:

A το πλάτος της επαφής του PCB

$W_{\max}$  το πλάτος του SMC

B το μήκος της επαφής του PCB

$H_{\max}$  το ύψος του SMC

G το μήκος μεταξύ των επαφών του PCB

$T_{\max}$  το μήκος της επαφής του SMC

$L_{\max}$  το μήκος του SMC

K σταθερά συνήθως 0,01 inch

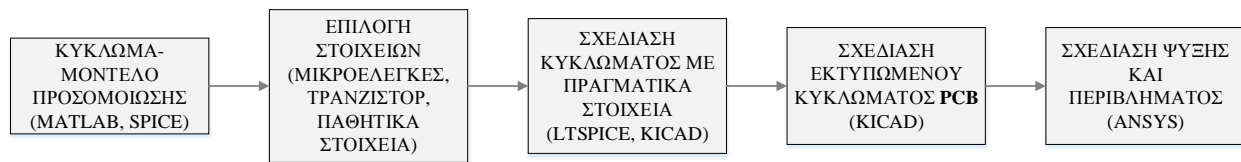


#### 4.5.7 Διαδικασία σχεδίασης PCB μέσω KiCad

Η κατασκευή ενός αντιστροφέα ολοκληρώνεται με την κατασκευή του PCB. Στην διαδικασία κατασκευής το πρώτο στάδιο αποτελεί την προσομοίωση του κυκλώματος σε κάποιο πρόγραμμα όπως το Matlab ή το Spice. Αυτά όμως δεν λειτουργούν πάντα σε επίπεδο στοιχείων, δηλαδή δεν γίνεται πάντα αναπαράσταση πραγματικών μοντέλων, και αν γίνεται μπορεί να μην ανταποκρίνεται με τα Datasheet των κατασκευαστών. Εκτός αυτού δεν μπορεί να γίνει αναπαράσταση των μικροελεγκτών. Συνεπώς με την περάτωση των προσομοιώσεων και πριν την κατασκευή του PCB επιλέγονται τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν, προγραμματίζεται ο μικροελεγκτής και δημιουργείται ένα πρωτότυπο κύκλωμα με χρήση Breadboards και Breakout Boards. Στο σχήμα 4.25 παρουσιάζεται το KiCad στην διαδικασία κατασκευής ενός PCB.

Αφού το κύκλωμα κριθεί λειτουργικό τότε χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα όπως το KiCad για την σχεδίαση του PCB. Σε αυτό αρχικά δημιουργείται ένα schematic στο οποίο τοποθετούνται πάνω τα φυσικά στοιχεία (τρανζίστορ, ελεγκτές, αντιστάσεις) ακριβώς με τον τρόπο που φαντάζεται ο μηχανικός ότι θα βρίσκονται πάνω στην τελική πλακέτα. Σύμφωνα με τους τρόπους συγκόλλησης που περιγράφηκαν και διάφορους κανόνες EMI (να μην τοποθετούνται τα ψηφιακά συστήματα κοντά στα αναλογικά, να υπάρχουν διαφορετικές γειώσεις για αυτά, να αποφεύγονται τα μακριά καλώδια και οι βρόγχοι κ.α.), τοποθετούνται πάνω τα στοιχεία στο schematic. Στην συνέχεια συνδέονται οι ακροδέκτες των στοιχείων προσέχοντας όταν γίνεται στο χέρι να έχουν όσο δυνατόν μικρότερο μήκος και να μην υπάρχουν απότομες γωνίες. Εναλλακτικά, σε κάθε ακροδέκτη μπορεί να κωδικοποιηθεί ο ακροδέκτης προορισμού και το ίδιο το πρόγραμμα να κατασκευάσει τις συνδέσεις μόνο του, με βέλτιστο τρόπο. Σε αυτήν την περίπτωση είναι απαραίτητο να γίνει κάποιος έλεγχος μετά αυτήν την διαδικασία για καλώδια με μικρότερο του επιθυμητού πάχος. Στην σχεδίαση ενός αντιστροφέα υπάρχουν πολλών ειδών κυκλώματα με διαφορετικά επίπεδα τροφοδοσίας καθώς και με ρεύματα διαφορετικών εντάσεων και συχνοτήτων. Συνεπώς στην σχεδίαση ενός PCB ενός αντιστροφέα πρέπει τα καλώδια με διαφορετικά επίπεδα να έχουν διαφορετικό πλάτος. Το KiCad περιέχει υποπρόγραμμα υπολογισμού του πλάτους του εκάστοτε αγωγού μέσω της ισχύος και της rms τιμής του ρεύματος που πρέπει να περάσει από αυτόν και κάνει την σχεδίαση πιο αποτελεσματική. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κάποιο στοιχείο διαθέσιμο, τότε είναι εύκολο μέσω text editor να σχεδιαστεί ένα νέο. Το τελικό κύκλωμα παρουσιάζεται σε ένα Gerber αρχείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από πολλαπλά προγράμματα και παρουσιάζει όλα τα επίπεδα (Layers) του PCB. Αυτό το αρχείο μπορεί τελικά να εκτυπωθεί για την δημιουργία των μασκών (stencil) όλων των σταδίων κατασκευής του πρωτοτύπου καθώς και να σταλεί για μαζική παραγγελία από κάποια εταιρία ειδική στην δημιουργία PCB υποστρωμάτων. Αυτές συνήθως θα πρέπει να σταλούν σε άλλη εταιρία για την συγκόλληση των στοιχείων.

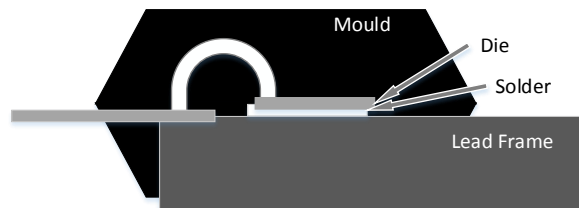
Το KiCad αποτελεί ανοικτό λογισμικό αναπτυγμένο με την βοήθεια του Cern και υποστηρίζεται από εταιρίες κολλοσούς στον χώρο των ηλεκτρονικών.



σχήμα 4.25 : Διαδικασίες προσομοιώσεων και λίστες προγραμμάτων σχεδίασης που υπεισέρχονται στην διαδικασία κατασκευής ενός αντιστροφέα

#### 4.6 Ενεργές τεχνολογίες διασύνδεσης

Οι ημιαγωγοί ισχύος συνήθως αποτελούνται από ένα μεταλλικό πλαίσιο το οποίο βρίσκεται στην πίσω επιφάνεια του κυκλώματος που συνδέεται πάνω στο PCB. Το μολύβδινο πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από κράμα χαλκού και πάνω του τοποθετείται το ολοκληρωμένο κύκλωμα μέσω μίας ελαφριάς κόλλας. Το μολύβδινο πλαίσιο περιέχει την επαφή στην οποία πραγματοποιείται η θερμική σύνδεση μεταξύ του ακροδέκτη και της επαφής. Οι ηλεκτρικές συνδέσεις γίνονται μέσω συρμάτινων συνδέσεων (wire bonding). Το υπόλοιπο κύκλωμα για την προστασία του είναι καλυμμένο με εποξειδική ρητίνη. Στο σχήμα 4.26 βλέπει κανείς την τομή ενός ημιαγωγού ισχύος.

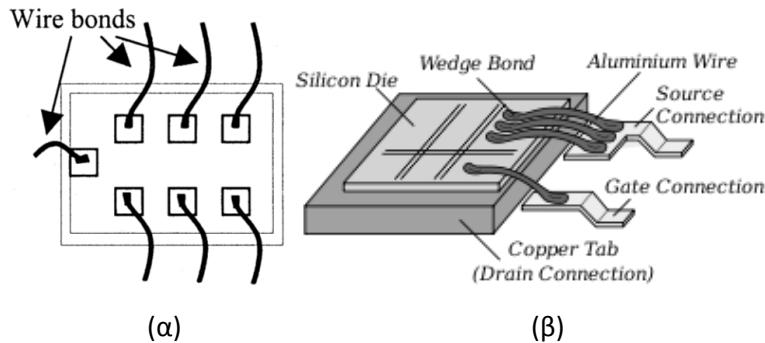


σχήμα 4.26 : Διατομή συσκευασίας ολοκληρωμένου στοιχείου

Ένα από τα κυριότερα θέματα στον τομέα της ολοκλήρωσης και συσκευασίας στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος αποτελεί η τεχνολογία συσκευασίας. Η τεχνολογία συσκευασίας των ηλεκτρονικών ισχύος δεν διαφέρει και πολύ από αυτή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθώς και οι δύο στοχεύουν στην παροχή μηχανικής υποστήριξης σε κάποιο ευαίσθητο τσιπ, ηλεκτρικές διασυνδέσεις, μονοπάτια αποβολής θερμότητας και προστασία από το περιβάλλον. Οι ενεργές τεχνολογίες συσκευασίας αφορούν την ηλεκτρική διασύνδεση μεταξύ ολοκληρωμένων (Die to Die) ή ολοκληρωμένων με άλλα κυκλώματα μέσω διαφόρων τεχνικών και κάνοντας χρήση κάποιου DBC υποστρώματος. Η παλαιότερη μορφή διασύνδεσης που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά ισχύος είναι η συγκόλληση καλωδίου στην οποία εντός του ολοκληρωμένου (εντός της εποξειδικής ρητίνης) ενώνει την επαφή του τσιπ (Die) με την εξωτερική σύνδεση του ολοκληρωμένου (σχήμα 4.27 (β)) ή με το στρώμα χαλκού του εκτυπωμένου κυκλώματος (σχήμα 4.27 (α)).

#### 4.6.1 Τεχνολογία αγωγίμης διασύνδεσης (Interconnection technology)

Η πιο συνηθισμένη τεχνική διασύνδεσης ολοκληρωμένων, όπως προαναφέρθηκε είναι η συγκόλληση καλωδίου (Wire bonding) που φαίνεται στα σχήματα 4.27 (α), (β). Η τεχνική αυτή μπορεί να προκαλέσει αρκετά προβλήματα στα ηλεκτρονικά ισχύος, κυρίως τη δημιουργία παρασιτικών αυτεπαγωγών και τη μειωμένη θερμική ροή. Για αυτούς τους λόγους έχουν προταθεί οι παρακάτω εξελιγμένοι τρόποι διασύνδεσης.



σχήμα 4.27 : Συνδέσεις καλωδίων σε διακοπτικό στοιχείο που θέλουμε να καταργήσουμε από διάφορες οπτικές: (α) Wire bond – (β) Aluminium wire [42]

#### 4.6.2 Τεχνολογίες αγωγίμης διασύνδεσης χωρίς καλώδια (Wirebond-Less Interconnection)

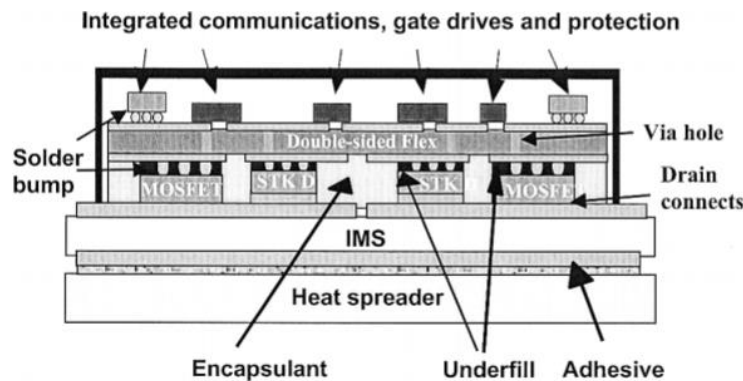
Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα ηλεκτρονικά ισχύος πέρα από τις θερμικές απώλειες λόγω υψηλών διακοπτικών συχνοτήτων είναι οι παρασιτικές επαγωγές που δημιουργούν οι συνδέσεις των διακοπτικών στοιχείων με τα καλώδια και τα καλώδια ε την σειρά τους με το χαλκό του υποστρώματος. Με διάφορες τεχνικές που έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται από τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουμε καταφέρει να καταργήσουμε τις συγκολλήσεις καταφέροντας να επιτύχουμε τα εξής:

- Αύξηση του χρόνου ζωής των διασυνδέσεων
- Μείωση των παρασιτικών επαγωγών
- Δημιουργία καλύτερων ροών θερμότητας
- Μείωση του κόστους παραγωγής!

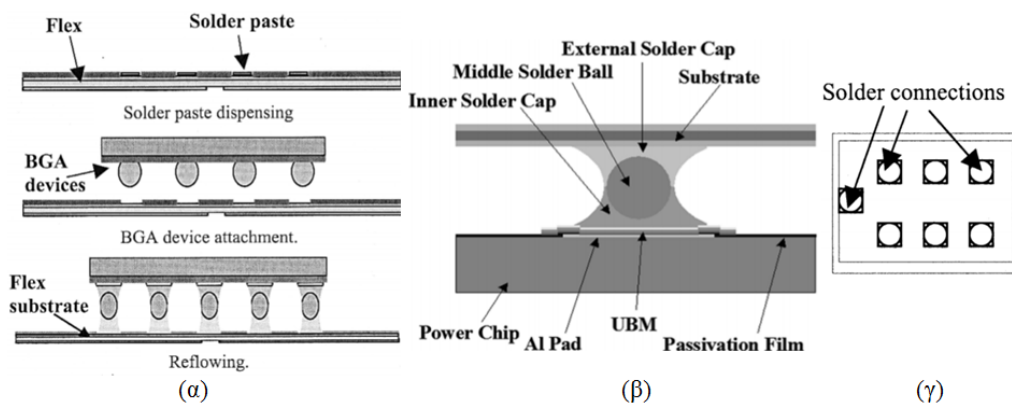
#### Τεχνολογία Flip-Chip (Flip-Chip Technology)

Η τεχνολογία Flip-Chip έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται πολύ πρόσφατα στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος. Σε αυτήν την τεχνολογία δεν χρησιμοποιούνται συνδέσεις καλωδίων (wire bonds) που μπορούν να δημιουργήσουν μία πλειάδα προβλημάτων στις μεταβατικές καταστάσεις [43]. Με την flip chip τεχνολογία, καταργώντας τις συνδέσεις καλωδίων, αξιοποιείται η τεχνολογία των συνδέσεων συγκόλλησης (solder joints) που επιτρέπει την μεγαλύτερη ροή ρεύματος καθώς και την μείωση της παρασιτικής αυτεπαγωγής και χωρητικότητας εξαιτίας του καλω-

δίου. Στο διακοπτικό στοιχείο αντί για συνδέσεις καλωδίων υπάρχουν κυκλικές επαφές (σχήμα 4.29 (γ)) οι οποίες με διάφορες τεχνικές λιώνει η μεταλλική σφαίρα από Pb95Sn5 που τοποθετείται ανάμεσα στην επαφή και την πλακέτα, σε βαθμό 268°C με αποτέλεσμα να δημιουργείται η σύνδεση που φαίνεται στο σχήμα 4.29 (β). Στο σχήμα 4.29 (α) φαίνονται τα τρία στάδια κατασκευής των Flip-Chip συνδέσεων. Στο σχήμα 4.28 φαίνεται το ολοκληρωμένο σύστημα Flip-Chip ενσωματωμένο με σύστημα ψύξης. Παρατηρείται η κατασκευή του σχήματος 4.28 στην οποία έχει δημιουργηθεί μία 3D πλακέτα η οποία αρχικά έχει το μικρότερο δυνατό εμβαδόν λόγω της κάθετης δόμησης και κατά επέκταση καθίσταται πιο εύκολη η τοποθέτησή της. Εκτός αυτού η τοποθέτηση με αυτόν τον τρόπο δίνει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή καθώς και καλύτερες θερμικές οδούς.



σχήμα 4.28 : Σύνδεση στοιχείων σε πλακέτα με χρήση τεχνολογίας Flip-Chip

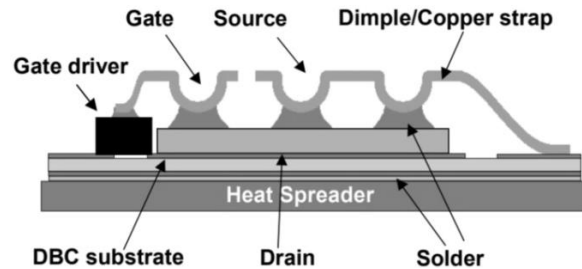


σχήμα 4.29 : Flip-Chip τεχνολογία : (α) Στάδια δημιουργίας συνδέσεων - (β) Τελική διασύνδεση - (γ) Συνδέσεις εξόδου διακοπτικού στοιχείου με τεχνολογία Flip-Chip

### Τεχνολογία διασύνδεσης Dimple Array

Μία πλέον αρκετά συνηθισμένη τεχνική ολοκλήρωσης αποτελεί η Dimple Array τεχνολογία διασύνδεσης κατά την οποία το διακοπτικό στοιχείο είναι τοποθετημένο πάνω σε ένα dimple/copper strap (πλατύ μέταλλο από χαλκό) που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.30. Δημιουργώ-

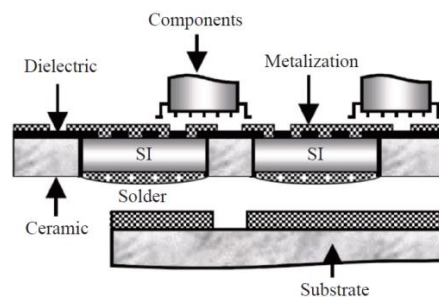
ντας την διασύνδεση του στοιχείου με τα κυκλώματα οδήγησης και τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος [45] απευθείας πάνω στην επαφή (Die) του στοιχείου μειώνουμε τον αριθμό συγκολλήσεων, μειώνοντας έτσι την παρασιτική επαγωγή. Η διασύνδεση αυτή επιτρέπει την αντικατάσταση από την σύνδεση καλωδίων (wire bonds) δημιουργώντας μία καλής ποιότητας τρισδιάστατη ενσωμάτωση. Στο σχήμα 4.30 παρουσιάζεται η διασύνδεση με dimple array για ένα MOSFET ισχύος. Σήμερα, τα περισσότερα διακοπτικά στοιχεία περιέχουν εντός της εποξειδικής ρητίνης ένα dimple/copper strap το οποίο τελικά συγκολλείται με το υπόστρωμα (DBC).



σχήμα 4.30 : Διασύνδεση MOSFET με τεχνολογία dimple array

### Ενσωματωμένη τεχνολογία συσκευασίας (Embedded Packaging Technology)

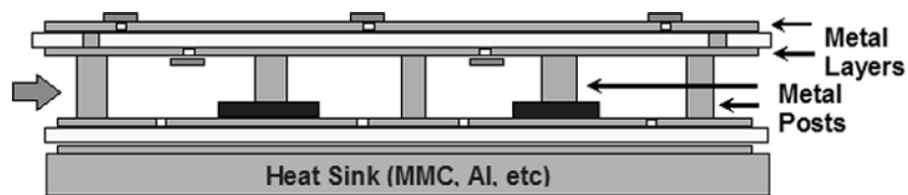
Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει στον μηχανικό να είναι πιο δημιουργικός με την χωρική σχεδίαση με σκοπό την βελτιστοποίηση της αποβολής θερμότητας [46]. Σε αυτήν την τεχνολογία χαράσσονται οπές εντός του κεραμικού πλαισίου όπου και πακτώνονται μέσω ενός συγκολλητικού πολυμερούς τα διακοπτικά στοιχεία του συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος. Στην συνέχεια τοποθετείται ένα διηλεκτρικό επίπεδο πάνω από τα στοιχεία και το κεραμικό υπόστρωμα και τελικά δημιουργούνται οπές στο διηλεκτρικό, πάνω από τις επαφές των στοιχείων (die) οι οποίες επιμεταλλώνονται. Οι επιμεταλλωμένες οπές συνδέονται μεταξύ τους, όπου χρειάζεται να υπάρχει κάποιο αγωγίμο μονοπάτι και τελικά ολοκληρώνονται όλες οι διεπαφές πάνω από το διηλεκτρικό υλικό. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερος χρήσιμη καθώς μπορεί να δημιουργηθούν καλύτερα μονοπάτια θερμότητας, καθώς ελαχιστοποιούνται οι παρασιτικές επαγωγές και το μηχανικό στρες. Στο σχήμα 4.31 παρουσιάζεται η διαδικασία διασύνδεσης της τεχνικής. Η τεχνική αυτή θεωρείται μία από τις καλύτερες για την απαγωγή θερμότητας καθώς ένα μεγαλύτερο τμήμα του διακοπτικού στοιχείου βρίσκεται σε επαφή με το εξαιρετικά θερμικά αγωγίμο κεραμικό υπόστρωμα.



σχήμα 4.31 : Διασύνδεση στοιχείων με τεχνική ενσωματωμένης τεχνολογίας συσκευασίας

### Τεχνολογία διασύνδεσης μεταλλικών κολώνων (Metal-Post Interconnection Technology)

Αυτή η τεχνολογία ηλεκτρικής διασύνδεσης βασίζεται πάνω στην τεχνολογία των Flip-Chip (ένωσης συγκόλλησης), προσπαθώντας όμως να μειώσει το κόστος κατασκευής χρησιμοποιώντας μικρές μεταλλικές κολώνες [47], [48]. Οι μεταλλικές κολώνες συγκολλούνται με ειδικά υλικά όπως ειδικά κατεργασμένο ασήμι πάνω στην επαφή (Die) του διακοπτικού στοιχείου με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μία ένωση με πολύ μειωμένη παρασιτική αυτεπαγωγή. Η χρήση μεταλλικών κολώνων επιτρέπει επίσης την διττή μεταφορά θερμότητας, από το BCD υπόστρωμα καθώς και από την αντίθετη επιφάνεια. Στο σχήμα 4.32 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα διάταξης διασύνδεσης μέσω μεταλλικών κολώνων.



σχήμα 4.32 : Διασύνδεση στοιχείων με τεχνική διασύνδεσης μεταλλικών κολώνων [47]

### 4.7 Μέθοδοι και τεχνολογίες ψύξης

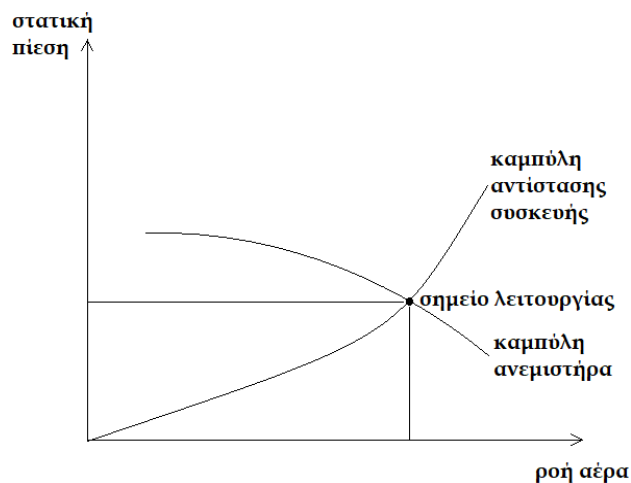
Σε αυτό το τμήμα θα παρουσιαστούν οι βασικοί τρόποι ψύξης ηλεκτρονικών ισχύος. Το μεγαλύτερο τμήμα της μελέτης της συσκευασίας των ηλεκτρονικών ισχύος αποτελεί η απαγωγή θερμότητας από τα στοιχεία προς το περιβάλλον. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση κεραμικών υποστρωμάτων και μέσω της τοποθέτησης των στοιχείων ώστε να έχουν λιγότερη επαφή με τον αέρα και περισσότερη με περισσότερο θερμικά αγωγίμα υλικά από αυτόν. Την σκυτάλη παίρνουν μετά από αυτό το βήμα οι μέθοδοι ψύξης, που είναι υπεύθυνοι για την μεταφορά της ενέργειας από το υπόστρωμα στο περιβάλλον. Η μελέτη της ψύξης μίας συσκευής παίζει πρωταρχικό ρόλο στον χρόνο ζωής μιας συσκευής καθώς και στην απόδοσή της και πρέπει να γίνεται εξ αρχής σε συνδυασμό με την μελέτη ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών καθώς και με την σχεδίαση του κυκλώματος προφανώς σε αφαιρετικό επίπεδο. Σε αυτήν την εργασία συμπεραίνουμε ότι η επαγωγή της θερμότητας γίνεται μέσω απαγωγέων θερμότητας που μπορεί να είναι κάποιο στερεό μέταλλο ή πολυμερές, καθώς και υγρό μέσο (ψυκτικό υγρό) και ο αέρας. Αυτά σε συνδυασμό με μέσα που διευκολύνουν την μεταφορά της θερμότητας στο περιβάλλον, δημιουργούν τις αγωγίμες οδούς που απαιτούνται για την αποβολή της θερμότητας. Επιλέγοντας το είδος του μέσου διάδοσης δηλαδή υγρό, μέταλλο, αέρας ή θερμοηλεκτρικό ζεύγος και τελικά κάνοντας κατάλληλες εναλλαγές από στερεό σε στερεό ή από στερεό σε υγρό μέσο και αντίστροφα, μπορούμε να δημιουργήσουμε όσους συνδυασμούς θέλουμε μέχρι να καταλήξουμε σε αυτόν με τον κατάλληλο όγκο, ισχύ, απόδοση, κόστος, αξιοπιστία και ανοχή στις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες δουλεύουμε.

Οι κατηγορίες των βασικότερων μεθόδων ψύξης είναι:

- Ψύκτρες
- Ανεμιστήρες
- Ψυκτικό υγρό (υγρή ψύξη, μονής ή διπλής φάσης)
- Θερμοηλεκτρικό ζεύγος

#### 4.7.1 Ανεμιστήρες

Η χρήση των ανεμιστήρων στην ψύξη και στον αερισμό, παρόλο που προσθέτει πιθανότητα μηχανικής απώλειας στο σύστημα είναι ευρεία και έχει καθιερωθεί εδώ και δεκαετίες με εξαίρεση μερικών ιατρικών, στρατιωτικών και οικιακών συσκευών. Η επιλογή ενός ανεμιστήρα γίνεται βάση των προδιαγραφών του που περιλαμβάνουν την μέγιστη ροή αέρα, την στατική πίεση, τα επίπεδα θορύβου, την τάση του κινητήρα, το ρεύμα και την ισχύ. Ο σκοπός του ανεμιστήρα είναι να δημιουργήσει ροή αέρα ανάμεσα από τα εξαρτήματα που χρειάζονται ψύξη. Για την εγκατάσταση ενός ανεμιστήρα πρέπει να χαραχθούν δύο διαγράμματα, ένα που αφορά τον ανεμιστήρα και ένα που αφορά το περίβλημα της συσκευής.



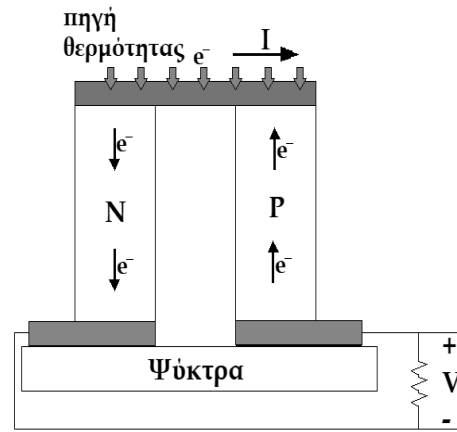
σχήμα 4.33 : Σημείο λειτουργίας ανεμιστήρων συσκευής

Η καμπύλη αντίστασης συσκευής που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.33 καθορίζει πόσο πολύς αέρας μπορεί να περάσει μέσα από μία συσκευή ενώ η καμπύλη του ανεμιστήρα δείχνει πως όταν ο αέρας αντιμετωπίσει εμπόδια εντός της συσκευής γίνεται μείωση της πίεσης με αποτέλεσμα ο ανεμιστήρας για να αντισταθμίσει πρέπει να αυξήσει την στατική πίεση [27]. Στο σημείο όπου η καμπύλη αντίστασης συσκευής συναντά την καμπύλη του ανεμιστήρα, αυτό θα είναι και το σημείο λειτουργίας του ανεμιστήρα (σχήμα 4.33). Το καθένα από τα δύο διαγράμματα υπολογίζεται με την χρήση ενός venturi meter, το οποίο πρόκειται για ένα τούνελ από το οποίο περνάει αέρας και χωρίζεται σε δύο μέρη με διαφορετική πίεση. Η συσκευή ή ο ανεμιστήρας τοποθετούνται σε μία οπή που χωρίζει αυτά τα δύο μέρη και με την βοήθεια μανόμετρων λαμβάνονται οι κατάλληλες μετρήσεις.

Σε μία συσκευή είναι πολύ συνηθισμένο να μην υπάρχει κάποιο άνοιγμα ώστε να δημιουργηθεί ροή αέρα από το ψυχρό εξωτερικό αέρα. Παρόλα αυτά ενδείκνυται η τοποθέτηση ανεμιστήρων στο εσωτερικό μιας συσκευής ώστε να αποτρέπονται θερμά σημεία σε τμήματα της και για την μετάβαση του θερμικού φορτίου στο περίβλημα της συσκευής.

#### 4.7.2 Θερμοηλεκτρικό ζεύγος (ThermoElectricCooler)

Η θερμοηλεκτρική ψύξη βασίζεται στο φαινόμενο Peltier το οποίο δημιουργείται όταν περνάει ρεύμα από την παρακάτω διάταξη:



σχήμα 4.34 : Θερμοηλεκτρική ψύξη βασισμένη στο φαινόμενο Peltier

Η διάταξη αποτελείται από δύο ημιαγωγικά στοιχεία, ένα P και ένα N συνδεδεμένα σε σειρά. Το ρεύμα περνάει από το N στο P, που σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια περνάνε από το P στο N (σχήμα 4.34). Κατά την μεταπήδηση των ηλεκτρονίων από το P στο N, τα ηλεκτρόνια μεταπηδούν σε μεγαλύτερη ενεργειακή στάθμη απορροφώντας θερμική ενέργεια από την συνδεδεμένη σε αυτή πηγή θερμότητας, ψύχοντας έτσι την περιοχή. Εάν εφαρμοστεί αντίστοιχα αντίστροφο ρεύμα τότε η περιοχή θερμαίνεται αντί να ψύχεται. Ένα Peltier αποτελείται από χιλιάδες τέτοιες μονάδες. Η λειτουργία τους εξαρτάται από τις παρακάτω σχέσεις [25]:

$$T_h = T_{amb} + R_{thermal}Q_h \quad (4.7)$$

Όπου  $T_h$  η θερμοκρασία της θερμής πλευράς,  $T_{amb}$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $R_{thermal}$  η θερμική αντίσταση της ψύκτρας και  $Q_h$  παρακάτω:

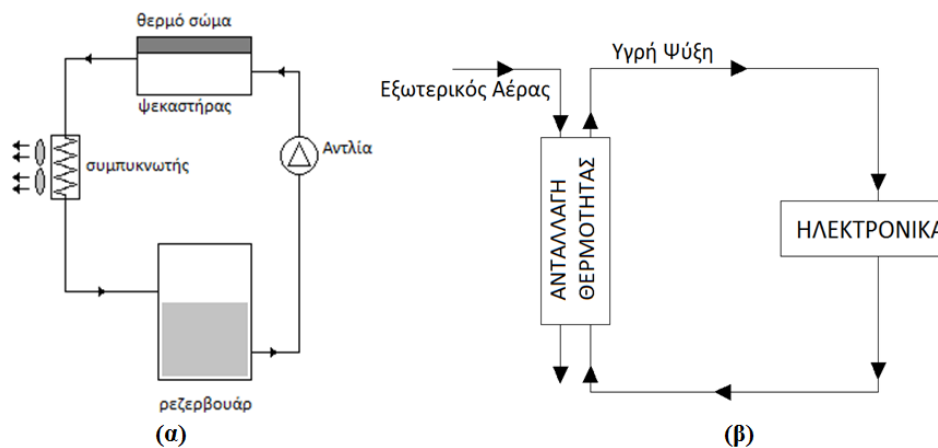
$$Q_h = Q_c + P_{in} \quad (4.8)$$

Όπου  $Q_c$  η θερμική ενέργεια που εισέρχεται στην κρύα πλευρά και  $P_{in}$  η ηλεκτρική ισχύς που εισέρχεται στο ζεύγος Peltier.



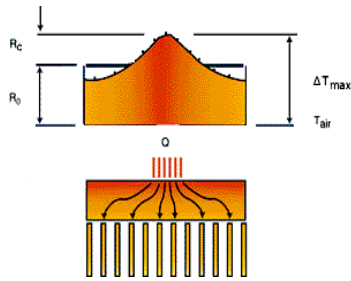
### 4.7.3 Υγρή ψύξη

Η υγρή ψύξη αποτελεί εναλλακτική λύση της χρήσης αέρα καθώς και τα δύο για ροή θερμότητας  $150\text{W}/\text{cm}^2$  και τα δύο προσφέρουν την επιθυμητή ψύξη, όμως για μεγαλύτερες ροές η υγρή ψύξη προσφέρει καλύτερη διάχυση θερμότητας. Η υγρή ψύξη κατηγοριοποιείται σε πολλές μορφές όπως μίας φάσης, διπλής φάσης, ψεκασμού (σχήμα 4.35 (α)) και άλλες. Ο σκοπός είναι σε αντίθεση με τον αέρα και τις απλές ψύκτρες, να επιτευχθεί γρηγορότερη και πιο αποδοτική μεταφορά ενέργειας προς το περιβάλλον με την ροή κάποιου ψυκτικού υγρού. Η γενική ιδέα γύρω από την υγρή ψύξη παρουσιάζεται στο σχήμα 4.35 (β). Οι ψύκτρες που μεταφέρουν την θερμότητα που λαμβάνουν προς το περιβάλλον με χρήση ανεμιστήρα ή χωρίς έχουν πολύ σημαντικά προβλήματα που λύνονται με την υγρή ψύξη.



σχήμα 4.35 : Ροή θερμότητας μέσω υγρού μέσου: (α) Χρήση ψεκαστήρα – (β) Γενική μέθοδος

Το πρώτο σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι ο στάσιμος αέρας που παγιδεύεται στα περύγια της ψύκτρας. Αυτός ο στάσιμος αέρας όχι μόνο δεν βοηθάει στην ψύξη αλλά λειτουργεί ως μονωτικό και δυσχεραίνει την αποβολή θερμότητας. Το δεύτερο και κυριότερο πρόβλημα που αποτρέπεται είναι η συστολή ή διαστολή της θερμικής αντίστασης (spreading resistance) που παρουσιάζουν οι ψύκτρες. Αυτό είναι πολύ σημαντικό πρόβλημα που βγάζει εκτός υπολογισμών πολλά θερμικά μοντέλα. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζεται σε διαφορετικές περιοχές από τις οποίες διέρχεται η θερμική ροή ειδικά όταν η πηγή θερμότητας έχει μικρότερη διατομή από την βάση στην οποία εισέρχεται η θερμότητα. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχουν περιοχές με διαφορετικές θερμοκρασίες στην ψύκτρα πράγμα που οδηγεί σε περιπτώσεις υψηλής θερμικής ροής, την διαστολή της θερμικής αντίστασης να αποτελεί το 60% με 70% της ολικής θερμικής αντίστασης (σχήμα 4.36). Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την χρήση μικροκαναλιών από τα οποία περνάει ψυκτικό υγρό, με χρήση ψεκαστήρων και με αγωγούς θερμότητας.



σχήμα 4.36 : Πρόβλημα θερμικής αντίστασης (spreading resistance) σε ψύκτρα [28]

Η υγρή ψύξη είναι ουσιαστικά η εξέλιξη των αγωγών θερμότητας (heat pipes). Οι αγωγοί θερμότητας είναι φυσικά μεταλλικοί σωλήνες οι οποίοι εφαρμόζονται σε μία πηγή θερμότητας και μεταφέρουν την θερμότητα κατά μήκος τους. Η υγρή ψύξη επιτυγχάνει το ίδιο σκοπό με διαφορά ότι το μέσο μεταφοράς είναι ένα υγρό μέσο το οποίο επιτρέπει την μεταφορά θερμότητας ταχύτερα λόγω της κίνησης του υγρού και της ενθαλπίας του μέσω της πίεσής του. Φυσικά αυτή η θερμότητα πρέπει να αποβάλλεται κάπου και συνήθως σε κάποια ψύκτρα. Η ψύκτρα αυτή μπορεί με την σειρά της να αποβάλλει την θερμότητα φυσικά με επαγωγή, μέσω ενός ανεμιστήρα, ή να συνδέεται με άλλο σύστημα ψύξης (cascaded systems).

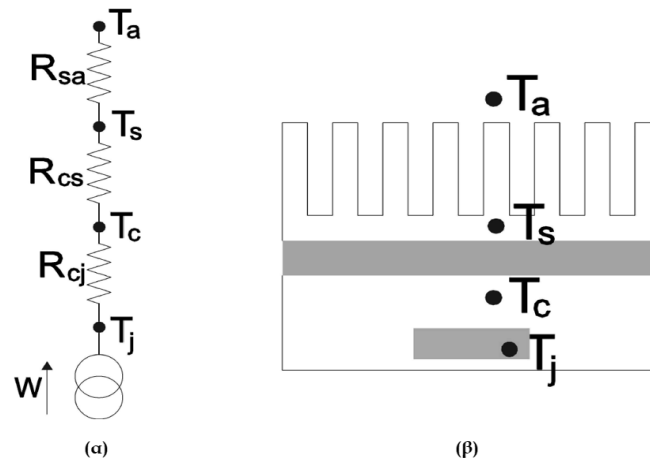
Η υγρή ψύξη κατηγοριοποιείται στις εξής δύο κατηγορίες: αντλημένο υγρό (pumped liquid) και κύκλος ατμών (vapor cycle). Κατά τον κύκλο ατμών το ψυκτικό υγρό αεριοποιείται και λόγω της μεγαλύτερης κινητικότητάς του μεταφέρεται σε περιοχές στις οποίες απορρίπτει το θερμικό του φορτίο και υγροποιείται ξανά. Το αντλημένο υγρό παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία καθώς μέσω αντλιών που ρυθμίζουν την ροή του υγρού, μπορούν να συνδυαστούν καλύτερα με τα συστήματα που περιγράφηκαν προηγουμένως.

#### 4.7.4 Ψύκτρες

Το θερμικό μοντέλο ταυτίζεται μαθηματικά σε πολύ μεγάλο βαθμό με τον νόμο του Ωμ όπου η ροή ισχύος  $W$  ή  $Q$  του θερμικού μοντέλου είναι ανάλογη με το ρεύμα, η θερμική αντίσταση είναι η ωμική και το  $\Delta V$  είναι ανάλογο με το  $\Delta T$ . Ως  $T_a$  (ambient) ορίζουμε την θερμοκρασία του περιβάλλοντος από την οποία συνήθως ξεκινάμε την ανάλυση. Το  $R_{jc}$  αναπαριστά την θερμική αντίσταση του ολοκληρωμένου κυκλώματος που είναι σταθερή και δίνεται από τον κατασκευαστή,  $T_j$  (junction) η θερμοκρασία του ολοκληρωμένου και  $T_c$  η θερμοκρασία του μονωτικού καλύμματος [28]. Η αντίσταση υπολογίζεται από την σχέση 4.9 και εφαρμόζεται για κάθε άλλο στοιχείο στην ροή θερμότητας όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.37(α).

$$R_{jc} = \frac{T_j - T_c}{Q} \quad (4.9)$$

Όπου  $Q$  η θερμότητα που διαρρέει το σύστημα ( $W$  στο σχήμα 4.37)



σχήμα 4.37 : (α) Μοντέλο θερμικών αντιστάσεων – (β) Τομή ολοκληρωμένου και ψύκτρας

Με γνωστή λοιπόν την  $T_{ambient}$  καθώς και τα  $W$ ,  $R_{jc}$ , μένει να εξακριβωθούν τα  $R_{cs}$ ,  $R_{sa}$ . Αυτά υπολογίζονται έτσι ώστε με δεδομένη την  $T_{ambient}$  να προκύπτει θερμοκρασία στο ολοκληρωμένο που να είναι λειτουργική, δηλαδή να επιλεγούν τα  $R_{cs}$ ,  $R_{sa}$  των ψυκτρών ώστε να ρέει η θερμότητα βέλτιστα σε σχέση βέβαια και με τον διαθέσιμο χώρο. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι δεν γίνεται να χαρακτηριστεί μία ψύκτρα με μία μόνο τιμή θερμικής αντίστασης καθώς αυτή μπορεί να μεταβληθεί με τον τρόπο ψύξης και τις συνθήκες γύρω από την ψύκτρα. Για παράδειγμα διαφορετικές τιμές θα παρατηρηθούν με φυσική μεταφορά τηw θερμότητας, για συμπιεσμένο αέρα ή για άμεσο υγρό. Εκτός αυτού οι συνθήκες γύρω από την ψύκτρα, η ροή αέρα, ο όγκος και η θερμοκρασία μπορούν να μεταβάλουν την τιμή της αντίστασης.

Η απόδοση της ψύκτρας έχει διαπιστωθεί ότι είναι ίση με:

$$n = \frac{Q}{\dot{m}c\Delta T_{sa}} \quad (4.10)$$

Όπου  $Q$  η θερμότητα που διαρρέει το σύστημα,  $\dot{m}$  η μάζα του αερίου ή υγρού που διαρρέει την ψύκτρα,  $C$  η θερμοχωρητικότητά του και τέλος  $\Delta T_{sa}$  η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ψύκτρας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Το πιο σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας είναι όμως η εύρεση του  $W$ , της θερμότητας που παράγεται από τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Αυτό μπορεί να γίνει πρακτικά χρησιμοποιώντας μία ψύκτρα με γνωστά χαρακτηριστικά και θερμοκάμερα, υπολογίζοντας έτσι την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ψύκτρας και του περιβάλλοντος. Αλλιώς μπορεί να μετρηθεί με ηλεκτρικά θερμομέτρα παραλείποντας την κάμερα. Θεωρητικά μπορεί να υπολογιστεί με χρήση των datasheets των ολοκληρωμένων και της παρακάτω διαδικασίας που παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο. Το μοντέλο των θερμικών αντιστάσεων που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί πολύ ικανοποιητικά να εξασφαλίσει την μελέτη ροής θερμότητας όταν κανείς επιδιώκει την μονοδιάστατη μεταφορά ενέργειας. Σε πιο πολύπλοκα συστήματα όμως πέρα από κάποιο πρόγραμμα προσομοίωσης οφείλει κανείς να χρησιμοποιήσει κάποιο από τα παρακάτω μοντέλα:

Μοντέλα μόνιμης κατάστασης:

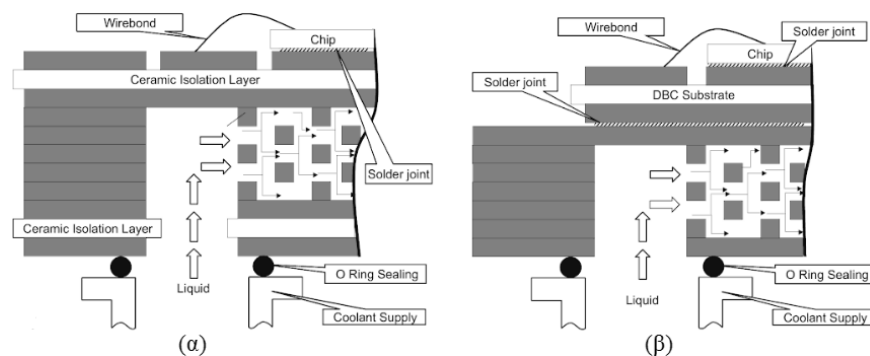
- Μοντέλο δύο αντιστάσεων
- Δίκτυο αντιστάσεων σε σχήμα αστέρα
- Μοντέλο Delphi

Μοντέλα μεταβατικής κατάστασης:

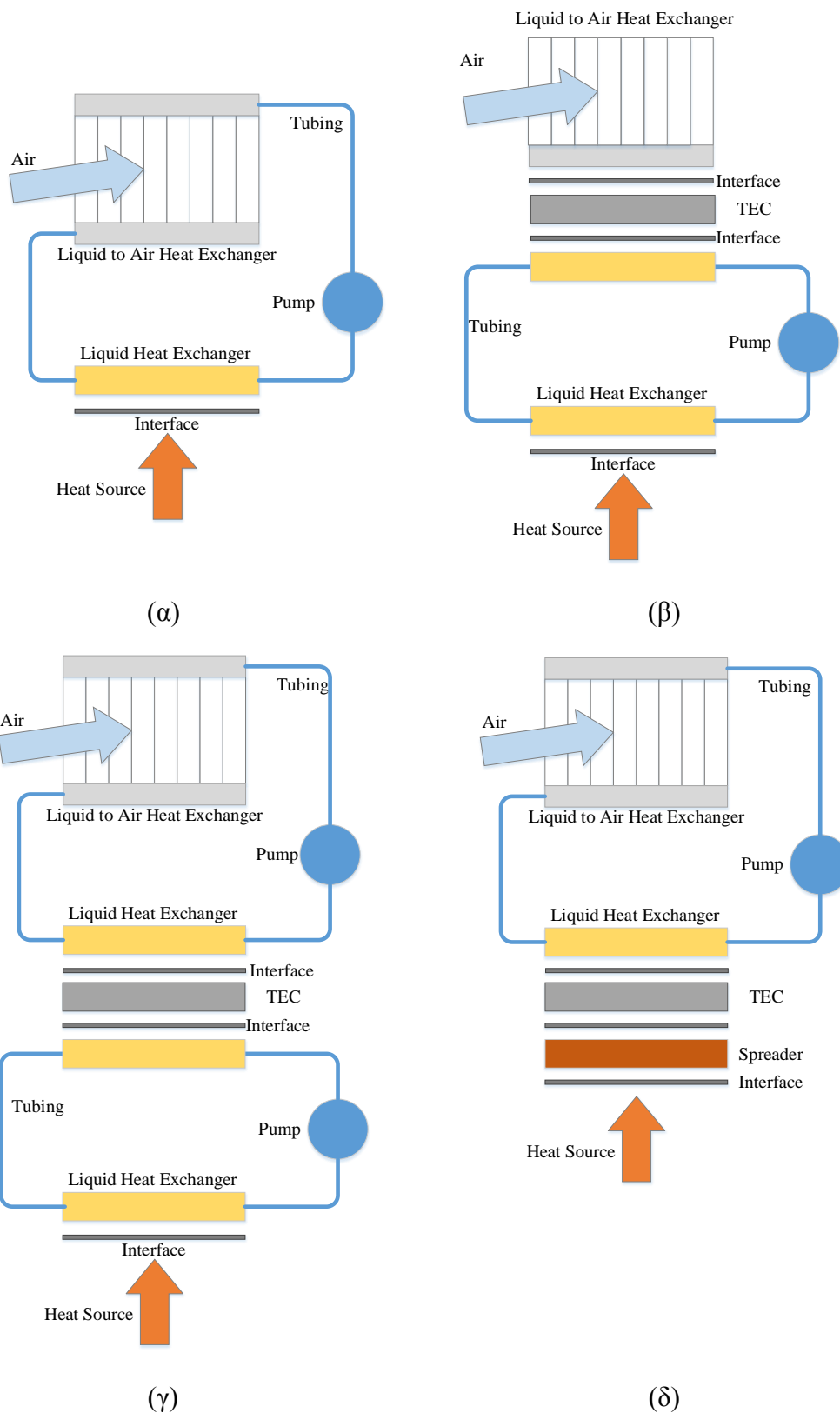
- Μοντέλο Foster
- Μοντέλο Cauet (πολύ δημοφιλής)

#### 4.8 Ολοκλήρωση ψύξης ηλεκτρονικών ισχύος

Η ολοκλήρωση ενός κυκλώματος ηλεκτρονικών ισχύος, πέρα από την διασύνδεση των στοιχείων τους, μπορεί να περιλαμβάνει και ολοκλήρωση της ψύξης του. Εδώ δεν υπάρχουν σταθερές τεχνικές και οι δυνατότητες του μηχανικού είναι πρακτικά ανεξάντλητες. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.38, οι ερευνητές έχουν εκμεταλλευτεί την θερμική αγωγιμότητα του DBC (κεραμικό υπόστρωμα) και μέσω αυτού έχουν δημιουργήσει μικροκανάλια ροής ψυκτικού υγρού για την ψύξη των ηλεκτρονικών χωρίς την χρήση διανομέων θερμότητας (heat spreader) ή ψύκτρας. Αν και αυτός ο τρόπος ψύξης εγείρει ερωτηματικά γύρω από την αντοχή της κολλητικής ουσίας (adhesive) που συγκολλά τις πλάκες, βλέπουμε πόσο δημιουργική μπορεί να γίνει η ολοκλήρωση της ψύξης και πόσο πολύ μπορεί να μειώσει το μέγεθος της συσκευής και να κάνει οικονομία σε υλικά.



Σχήμα 4.38 : Υγρή ψύξη : (α) Ολοκλήρωση με τεχνολογία ενσωματωμένης συσκευασίας, (β) Ολοκλήρωση με χρήση DBC υποστρώματος [41]



σχήμα 4.39 : Παραδείγματα συνδυασμού όλων των τρόπων επαγωγής για βέλτιστη αποβολή της θερμότητας [22]

Στο σχήμα 4.39 παρουσιάζονται τέσσερα παραδείγματα στα οποία συνδυάζονται όλες οι προαναφερθέντες μέθοδοι ψύξης. Στο βέλος αναπαρίσταται η πηγή θερμότητας που είναι το ολοκληρωμένο σύστημα ισχύος. Μετά το βέλος αναγράφεται το interface το οποίο μπορεί να είναι κάποια θερμικά αγωγήμη κολλητική ουσία (adhesive) που κολλάει το shoulder του διακοπτικού στοιχείου ή το υπόστρωμα με το επόμενο επίπεδο της μεταφοράς θερμικής ισχύος. Σε περιπτώσεις που η πυκνότητα ισχύος είναι πολύ υψηλή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας διαστολέας θερμότητας (heat spreader) όπως στο σχήμα 4.39 (δ). Σε όλα τα υπόλοιπα επίπεδα ακολουθεί μετάβαση από στερεό μέσο σε υγρό ή από στερεό μέσο σε υγρό μέσω ενός TEC. Παρατηρούμε ότι το TEC είναι παρόν σε κάθε διαδικασία και είναι πολύ ισχυρό εργαλείο καθώς λειτουργεί ως αντλία θερμότητας. Παρατηρούμε όμως ότι δεν τοποθετείται απευθείας πάνω στην πηγή θερμότητας αλλά ενδιάμεσα καθώς δεν μπορεί να ολοκληρωθεί με το PCB διότι χρειάζεται δικιά του ηλεκτρική τροφοδοσία. Τέλος, πάντα υπάρχει κάποιου είδους ψύκτρα καθώς η τελική εναλλαγή θερμότητας είναι με το αέρα στον οποίο βρίσκεται η συσκευή και η ψύκτρα εξασφαλίζει το μέγιστο εμβαδό επαφής με τον αέρα του περιβάλλοντος.

## 4.9 Μέθοδος επιλογής βέλτιστης μεθόδου ψύξης

Η κατασκευή μιας μονάδας ψύξης για τα ηλεκτρονικά μέρη μιας ηλεκτρονικής συσκευής μπορεί να αποτελέσει μία πολύ πολύπλοκη μαθηματική διαδικασία. Για αυτόν τον λόγο προτιμάται η χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης (Finite element method) για την ακριβή εξακρίβωση των λύσεων του προβλήματος. Πέρα από τα προγράμματα προσομοιώσεων όπως ANSYS MAXWELL, Comsol και FEMM υπάρχουν και εμπειρικές μέθοδοι οι οποίες μπορούν να είναι πολύ αποτελεσματικές, όπως η τεχνική που θα περιγραφεί παρακάτω. Μέσω της παρακάτω τεχνικής καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι λόγω και της χαμηλής ισχύος της συσκευής, μία ψύκτρα με ενσωματωμένο έναν διαστολέα θερμότητας (heat spreader) είναι ένας ικανός τρόπος ψύξης του αντιστροφέα.

### 4.9.1 Επεξήγηση μεθόδου

Αρχικά στην μεθοδολογία υπολογίζεται η μονάδα διασποράς  $Q$ , την οποία υπολογίζουμε διαιρώντας την παραγόμενη θερμότητα που παράγεται από τα ηλεκτρονικά (είτε μέσω της μεθόδου που περιγράφεται στην πηγή [26] για διακόπτες ισχύος, είτε μέσω της μεθόδου που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο), με το εμβαδό των επιφανειών της συσκευής από τις οποίες διέρχεται θερμότητα.

$$\text{μονάδα διασποράς } Q = \frac{\text{Παραγωγή θερμότητας από στοιχεία}}{\text{ολική επιφάνειας διασποράς θερμότητας}} \quad (4.11)$$

Η τιμή αυτή καθορίζει τον τρόπο ψύξης των ηλεκτρονικών και παρουσιάζεται στον πίνακα 4.1 [26].

πίνακας 4.1 : Μέθοδος ψύξης σε σχέση με την διασπορά

Τρόπος Ψύξης	Μέγιστες ικανότητες (Q)
Φυσική ψύξη (natural cooling)	0,5
Συμπιεσμένος αέρας (forced air)	2
Άμεσο υγρό (direct liquid)	4

Η διασπορά θερμότητας μετριέται σε  $\text{watt}/(\text{in})^2$ .

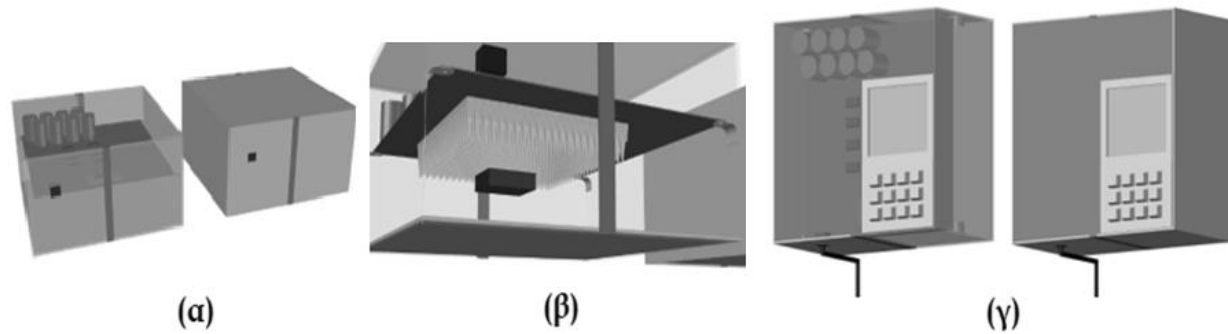
Στην συνέχεια ελέγχουμε αν ο όγκος της συσκευής είναι ικανός για ψύξη, βρίσκοντας την πυκνότητα θερμότητας  $\phi$ :

$$\text{πυκνότητα θερμότητας } \phi = \frac{\text{μονάδα διασποράς } Q}{\text{εσωτερικός όγκος συσκευής}} \quad (4.12)$$

πίνακας 4.2 : Μέθοδος ψύξης σε σχέση με την πυκνότητα

Τρόπος Ψύξης	Ασφαλής λειτουργία μικρότερη από ( $\phi$ )
Φυσική ψύξη (natural cooling)	0,15
Plastic embedded components	0,25
Μεταλλική αγωγή	5
Συμπιεσμένος αέρας (forced air)	7
Άμεσο υγρό (direct liquid)	10

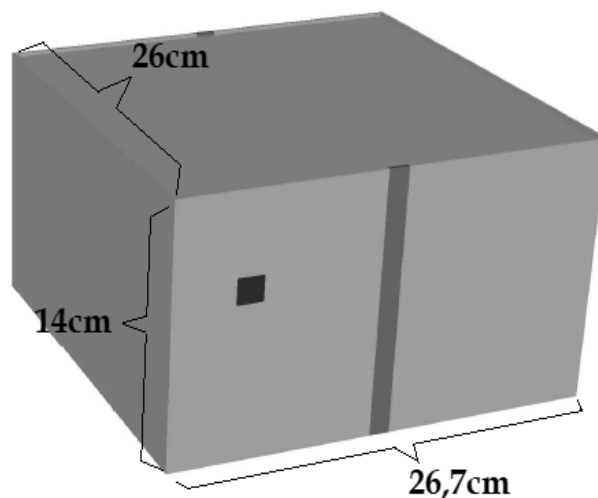
Αντικαθιστώντας με τις διαστάσεις της συσκευής, προκύπτει από την εξίσωση 4.12 το κατά πόσο η επιλογή της ψύξης είναι ασφαλής δεδομένου ότι το  $\phi$  είναι μικρότερο από την τιμή που δίνεται στον πίνακα 4.2. Αν για παράδειγμα μία συσκευή λειτουργεί με φυσική ψύξη και το  $\phi$  είναι ίσο με 0,4 τότε θα ήταν προτιμότερο να τοποθετηθεί μία μεταλλική αγωγή από τα ηλεκτρονικά προς το εξωτερικό της συσκευής ή προς την ροή αέρα που παρέχεται μέσα στην συσκευή. Είναι προφανές ότι αυτή η μέθοδος δεν είναι απόλυτα ακριβής και αφού τα μεγέθη έχουν υπολογιστεί, καθώς και ποια θα είναι η μέθοδος ψύξης, καλό θα ήταν να ακολουθήσει ανάλυση σε κάποιο πρόγραμμα προσομοίωσης. Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή είναι αρκετά καλή για την εκκίνηση του σχεδιασμού της κατασκευής. Για τον αντιστροφέα του διδακτορικού της Ελένης Γατή σε συνάρτηση με την σχεδίαση του περιβλήματος σχεδιάζεται το παρακάτω παράδειγμα κάνοντας χρήση περιβλήματος που σχεδιάστηκε στο σχήμα 4.41. Η σχεδίαση του περιβλήματος είναι αρκετά απλή, είναι ουσιαστικά ένα ορθογώνιο περίβλημα με κατάλληλες επαφές στις οποίες μπορεί να βιδωθεί το PCB. Η σχεδίαση είναι διττή, για οικιακή χρήση με την τοποθέτηση πληκτρολογίου που επιτρέπει την αλληλεπικοινωνία της συσκευής όπως φαίνεται στο σχήμα 4.40 (γ) και για εξωτερική όπως φαίνεται στο σχήμα 4.40 (α).



σχήμα 4.40 : (α) Περιβλήμα αντιστροφέα – (β) Ψύκτρα fiberglass συστήματος – (γ) Χρήση οθόνης για επικοινωνία με τον χρήστη

Το εξωτερικό σκέλος της συσκευής, τόσο το οικιακό, όσο και το εξωτερικό είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο πάχους 3mm με ανοξείδωτες εξωτερικές επιφάνειες για την αποφυγή σκουριάς. Συμπληρωματική προστασία παρέχεται με την χρήση primer και ενός στρώματος μπογιάς που θα έχουν τον ίδιο σκοπό. Η διαεπικοινωνία με τον χρήστη πραγματοποιείται μέσω ενός πληκτρολογίου και μιας οθόνης στο εξωτερικό της συσκευής, ενώ ασύρματα και με τρόπο που θα περιγραφεί παρακάτω για την εξωτερική χρήση. Συνεπώς δεν χρειάζεται η εγκατάσταση πληκτρολογίου στον αντιστροφέα που θα τοποθετηθεί υπόγεια.

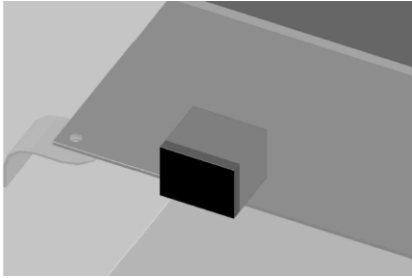
Οι εσωτερικές διαστάσεις της συσκευής από τις οποίες υπολογίζεται ο εσωτερικός όγκος της συσκευής παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα 4.41:



σχήμα 4.41 : Παράδειγμα διαστάσεων περιβλήματος αντιστροφέα

Ο αντιστροφέας τοποθετείται στα 8,5cm από τον πάτο της συσκευής τοποθετημένος πάνω σε μεταλλικά ελάσματα συγκολλημένα στα τοιχώματα και βιδωμένος πάνω τους (σχήμα 4.42).





σχήμα 4.42 : Θύρα εξόδου συσκευής θωρακισμένης με μπάρα φερρίτη και απεικόνιση του σημείου σύνδεσης PCB με το περίβλημα

#### 4.9.2 Εφαρμογή μεθόδου

Συνεπώς για την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου θεωρώ ως το εμβαδό από το οποίο μπορεί να διαφύγει η ενέργεια ως:

$$\text{Εμβαδό} = 14\text{cm} \cdot 26\text{cm} \cdot 2 + 14\text{cm} \cdot 26.7\text{cm} \cdot 2 + 26\text{cm} \cdot 26.7\text{cm} =>$$

$$\text{Εμβαδό} = 2169,8\text{cm}^2 \quad (4.13)$$

Από την διδακτορική διατριβή της Ελένης Γατή παίρνουμε τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν και από αυτά υπολογίζεται η παραγόμενη θερμότητα:

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα SiC transistor (C2M0080120D) σε συχνότητα 102,7kHz.

Χρησιμοποιώντας τον τύπο 4.11 καθώς και το data sheet του transistor υπολογίζουμε το Q:

$$W = 75\text{W} \text{ ανά SiC tr.} \quad (4.14)$$

$$Q = \frac{300\text{W}}{347,168\text{in}^2} = 0,86 \quad (4.15)$$

Από τον πίνακα 4.3 συμπεραίνουμε ότι χρειάζεται συμπιεσμένο αέρα, δηλαδή την εγκατάσταση ψύκτρας με ανεμιστήρα, καθώς και να σχεδιαστούν οπές για την διαφυγή της θερμότητας.

$$\varphi = \frac{0,86}{622\text{in}^3} = 0,00135 \quad (4.16)$$

Πράγμα που σημαίνει ότι η πυκνότητα θερμότητας είναι σε επιθυμητά επίπεδα.

#### 4.10 Περίβλημα συσκευής και προδιαγραφές

Το περίβλημα μιας ηλεκτρικής συσκευής (enclosure ή housing) αποτελεί το τελικό στάδιο μελέτης και σχεδίασης των ηλεκτρονικών στοιχείων του εσωτερικού της. Το περίβλημα μίας συσκευής διεκπεραιώνει διπλό σκοπό, την προστασία των ηλεκτρονικών και την διεπαφή με τον χρήστη. Το καθένα από αυτά παίζει ζωτικό ρόλο τόσο στην διάρκεια ζωής όσο στην εμπορική

επιτυχία του προϊόντος, καθώς το όμορφο design μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις πωλήσεις και την χρήση του. Ένας από τους σκοπούς της εργασίας είναι η επίτευξη της διάδοσης του ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου δημιουργώντας έναν φορτιστή ο οποίος εσωτερικά λειτουργεί αποδοτικά και εξωτερικά πληροί τις προϋποθέσεις ασφαλείας και ευχρηστίας, διατηρώντας παράλληλα ένα βαθμό αισθητικότητας. Συνεπώς η προστασία του προϊόντος συνδέεται άμεσα με την λειτουργικότητα και η δουλειά του μηχανικού είναι να επιτύχει αυτή τη λεπτή ισορροπία. Το περίβλημα δεν αφορά μόνο την προστασία των εσωτερικών ηλεκτρονικών από στερεά υλικά του εξωτερικού περιβάλλοντος όπως σκόνη και διάφορα αντικείμενα αλλά αφορά επίσης τα επίπεδα υγρασίας, την ενδεδειγμένη χρήση του και πάνω από όλα την εσωτερική θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει πως ανάλογα με το που θέλουμε να εγκαταστήσουμε τον φορτιστή, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη το περιβάλλον και την πιθανή επίδραση των στοιχείων της στην συσκευή.

Το τέταρτο επίπεδο είναι η σχεδίαση του περιβλήματος κατά την οποία κατασκευάζεται το τμήμα της συσκευής με την οποία έχει άμεση επαφή ο χρήσης. Το τμήμα αυτό εξασφαλίζει τις παρακάτω ιδιότητες για την εύρυθμη λειτουργία της συσκευής:

- ρύθμιση θερμοκρασίας
- προστασία από σκόνη
- προστασία από υγρασία
- προστασία από κραδασμούς και δονήσεις
- προστασία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές RFI/EMI
- προστασία των χρηστών από στατικές εκφορτώσεις

#### 4.10.1 Υλικά κατασκευής ηλεκτρονικών συσκευών

Οι βορειοαμερικανικές προδιαγραφές NEMA (National Electrical Manufacturers Association) βοηθούν στην κατηγοριοποίηση των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή περιβλημάτων ηλεκτρικών συσκευών. Στην κατηγοριοποίηση NEMA 1 και 2 αφορούν συσκευές εσωτερικού χώρου. Το πιο σύνηθες υλικό για εσωτερικούς χώρους είναι το ABS plastic το οποίο έχει χαρακτηριστικά που το κάνουν ιδανικό για χρήση σε οικιακά περιβάλλοντα. Κατά την διεργασία του υλικού, μπορεί αυτό να παρασκευαστεί με ένα μεγάλο εύρος ιδιοτήτων που περιλαμβάνει ανοχή σε θερμοκρασίες της τάξεως των 100°C καθώς και ανοχή στις κρούσεις κάνοντάς το ιδανικό σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος για οικιακή χρήση. Υπάρχουν βέβαια και άλλα πλαστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συσκευές εσωτερικής χρήσης όπως το πολυανθρακικό (Polycarbonate ή PC) ή το fiberglass το οποία αντέχουν την μεγάλη καταπόνηση και τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες αντίστοιχα. Αυτά τα τρία υλικά αποτελούν χαρακτηριστικά υλικά της κατηγορίας τους και είναι κατάλληλα για χαμηλή ισχύ και χαμηλές θερμοκρασίες. Καθώς ανεβαίνουμε κατηγορίες στην NEMA παρατηρούμε ότι πλέον κυριαρχούν τα μέταλλα. Πιο συγκεκριμένα το αλουμίνιο, τον ανθρακούχο χάλυβα (carbon steel) και το ανοξείδωτο ατσάλι (stainless steel). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτών των υλικών είναι η αντοχή τους

στις υψηλές θερμοκρασίες και η δυνατότητα θωράκισης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ραδιοσημάτων που μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές από άλλες συσκευές στην συσκευή μας και vice versa. Το αλουμίνιο αποτελεί καλή επιλογή όταν στόχος είναι το χαμηλό κόστος λόγω της χαμηλής τιμής του. Εκτός αυτού είναι ελαφρές και έχει αντοχή στην διάβρωση κάνοντάς το ιδανικό για εφαρμογές εσωτερικού και εξωτερικού χώρου ειδικά του συστήματος επαγωγικής φόρτισης το οποίο επεξεργαζόμαστε. Το αλουμίνιο μάλιστα κρατάει τα ηνία στη χρήση συσκευών καθώς είναι καλός αγωγός της θερμότητας, επιτρέποντας την γρήγορη ροή της και λόγω της χαμηλής τιμής του. Σε εφαρμογές στον τομέα της υγείας χρησιμοποιούνται κατά κόρον μεταλλικές περιφράξεις λόγω της κρυσταλλικής δομής τους που δεν είναι πορώδεις.

Οι περισσότερες συσκευές βασίζουν την ψύξη τους στην διάχυση της θερμότητας στο περιβάλλον με αποτέλεσμα να στηρίζονται στο γεγονός ότι σε μία συσκευή η θερμότητα ρέει ευκολότερα μέσω ενός μεταλλικού περιβλήματος ειδικά σε προδιαγραφές IP68 που δε επιτρέπουν την εισχώρηση κανενός αντικειμένου στο εσωτερικό τους.

#### **4.10.2 IP (International Protection Marking) και NEMA προδιαγραφές για κατασκευή περιβλήματος αντιστροφέα**

Οι NEMA προδιαγραφές αφορούν όπως έχει είδη περιγραφεί το κατά πόσο μία συσκευή είναι κατάλληλη για χρήση σε συγκεκριμένες συνθήκες βάση του υλικού κατασκευής της. Οι προδιαγραφές IP ακολουθούν αυτές της NEMA και εξακριβώνονται βάση συγκεκριμένων τεστ. Τα αποτελέσματα των IP προδιαγραφών εξακριβώνουν την σχέση της συσκευής με στερεά στοιχεία καθώς και με το υγρό νερό σε πληθώρα πιέσεων και συνθηκών υγρασίας. Ο συντελεστής IP ακολουθείται από δύο νούμερα (IP XY). Το πρώτο, ο X δηλαδή, ορίζει την συμπεριφορά της συσκευής, παρουσία στερεών σωμάτων που μπορούν να εισέλθουν στο εσωτερικό της συσκευής (πίνακας 4.3). Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται ανθρώπινα μέλη όπως δάκτυλα, ρούχα πέτρες, χώμα και το πιο βασικό σκόνη. Ο δεύτερος αριθμός, το Y, υποδεικνύει την ανεκτικότητα της συσκευής στο νερό (πίνακας 4.4). Μέσω διαφόρων τεστ εξακριβώνεται αν η συσκευή είναι κατάλληλη σε εξωτερικό περιβάλλον, σε υδάτινο περιβάλλον ή σε οικιακό περιβάλλον. Οι προδιαγραφές IP καθορίζουν την καταλληλότητα της συσκευής σε διάφορα περιβάλλοντα καθώς και το είδος της ψύξης που μπορεί να εγκατασταθεί σε αυτές. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.43 που αποτελεί τμήμα καταλόγου ευρωπαϊκής εταιρίας κατασκευής συστημάτων ψύξης και περιβλημάτων-περιφράξεων συσκευών και που παρουσιάζονται οπτικά στο σχήμα 4.44, κάθε βαθμός IP έχει και διαφορετική κατάλληλη μέθοδο ψύξης. Για την κατασκευή του αντιστροφέα του συστήματος επαγωγικής φόρτισης απαιτούμε πολύ αυστηρές προδιαγραφές καθώς η συσκευή θα πρέπει να βρίσκεται υπόγεια, κοντά στον μετασχηματιστή που μπορεί να είναι πηγή υψηλής μαγνητικής ακτινοβολίας. Κατά την σχεδίαση του περιβλήματος του αντιστροφέα πρέπει λοιπόν να μην μπορεί να εισχωρήσει σκόνη ή χώμα καθώς και καθόλου νερό αφού είναι πολύ πιθανό στην διάρκεια ζωής της συσκευής αυτή να καλυφθεί από νερό. Συνεπώς θα πρέπει να σχεδιαστεί με βαθμό IP 68. Εκτός αυτού είναι πιθανό να στάξουν λάδια μηχανής καθώς βρίσκεται σε δρόμο και την συσκευή χρησιμοποιούν και

υβριδικά αυτοκίνητα. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει το περίβλημα της συσκευής να είναι μεταλλικό (μη πορώδες) και στις θύρες να υπάρχουν κατάλληλες τσιμούχες που παραθέτονται σε επόμενες παραγράφους.

Πίνακας 4.3 : Πρώτος χαρακτηριστικός αριθμός στην IP βαθμονόμηση (αφορά στερεά υλικά)

IP X_	Επεξήγηση
0	Μη προφυλασσόμενη συσκευή
1	Η συσκευή προφυλάσσεται για στερεά μεγαλύτερα από 50mm
2	Η συσκευή προφυλάσσεται για στερεά μεγαλύτερα από 12mm
3	Η συσκευή προφυλάσσεται για στερεά μεγαλύτερα από 2,5mm
4	Η συσκευή προφυλάσσεται για στερεά μεγαλύτερα από 1mm
5	Η συσκευή προφυλάσσεται μερικώς από την σκόνη
6	Η συσκευή προφυλάσσεται από την σκόνη

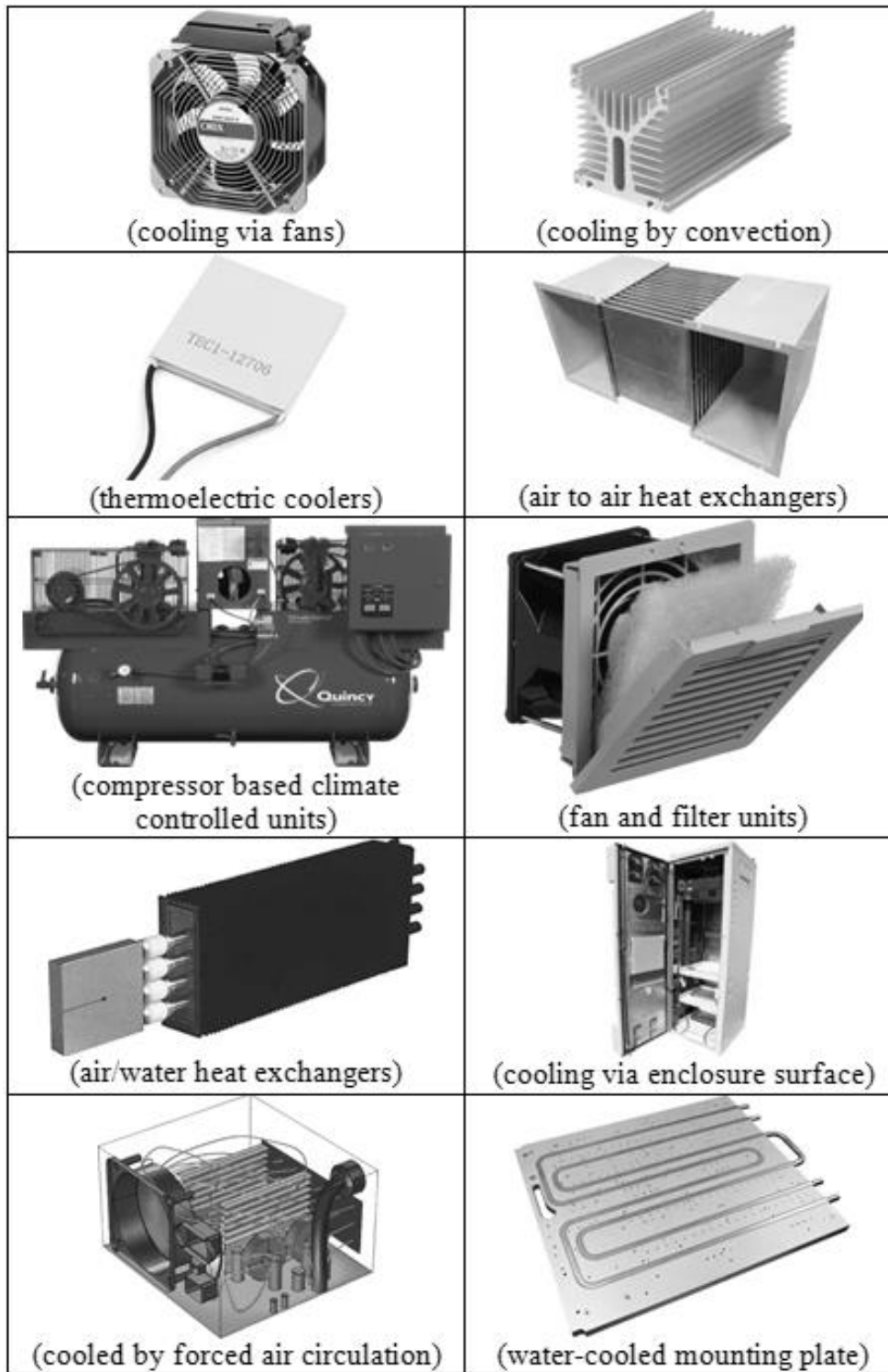
Πίνακας 4.4 Δεύτερος χαρακτηριστικός αριθμός στην IP βαθμονόμηση (αφορά υγρά)

IP _Y	Επεξήγηση
0	Μη προφυλασσόμενη συσκευή
1	Η συσκευή προφυλάσσεται από νερό που στάζει
2	Η συσκευή προφυλάσσεται από νερό που στάζει ανυψωμένη κατά 15°
3	Η συσκευή προφυλάσσεται από ψεκαζόμενο νερό σε γωνίες από 0 έως 60°
4	Η συσκευή προφυλάσσεται από τρεχούμενο νερό από όλες τις διευθύνσεις
5	Η συσκευή προφυλάσσεται από καταιονιζόμενο νερό από κάθε διεύθυνση
6	Η συσκευή προφυλάσσεται από υψηλής συχνότητας καταιονισμένο νερό
7	Η συσκευή προφυλάσσεται καταποντισμένη
8	Η συσκευή προφυλάσσεται καταποντισμένη για συνεχές διάστημα

Συνδέοντας λοιπόν το περίβλημα της συσκευής με την ψύξη της συσκευής, μπορούμε να δούμε από τον κατάλογο γνωστής εταιρίας κατασκευής και σχεδίασης συσκευών στα σχήματα 4.43 και 4.44 ότι κάθε κωδικός IP έχει περιορισμούς στην επιλογή μεθόδου ψύξης καθώς και στην διαχείριση του μέγιστου θερμικού φορτίου που μπορεί να διαχειριστεί δεδομένης της σχεδίασης,

Method	Protection category	Cooling output
Cooling via fans	IP 20	8000 W
Cooling by convection	IP 21	500 W
Thermoelectric cooler	IP 54	1000 W
Air/air heat exchangers	IP 54	1000 W
Compressor-based climate control units	IP 54	10000 W
Fan-and-filter units	Up to IP 54/IP 55	2000 W
Air/water heat exchangers	IP 55	10000 W
Cooling via enclosure surface	Up to IP 68	250 W
Cooling by forced air circulation	Up to IP 68	350 W
Water-cooled mounting plate	Up to IP 68	3000 W

*σχήμα 4.43 : Είδη ψύξης από κατάλογο εταιρίας [37]*



σχήμα 4.44 : Μέθοδοι ψύξης ηλεκτρικών εξαρτημάτων και συσκευών σύμφωνα με το σχήμα 4.43

## Κεφάλαιο 5 : Ηλεκτρομαγνητική θωράκιση

### 5.1 Εισαγωγή

Το επαγωγικό σύστημα φόρτισης έχει ως αρχή λειτουργίας την δημιουργία ενός ισχυρού μαγνητικού πεδίου το οποίο διαπερνώντας το πηνίο του αυτοκινήτου δημιουργεί ρεύμα που φορτίζει την μπαταρία του. Τα πηνία αυτά αποτελούν αυτό που κατουσίαν λειτουργεί ως μετασχηματιστής σε ασθενή σύζευξη. Ένας μετασχηματιστής ισχυρά συζευγμένος έχει το μαγνητικό του πεδίο να διεισδύει στο δευτερεύον του μέσω ενός πυρήνα, είτε στην περίπτωση των επίπεδων πηνίων μέσω ενός πολύ λεπτού διακένου να έχει την πλειονότητα του μαγνητικού πεδίου να εισέρχεται στο δευτερεύον μέσω του αέρα. Σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης τα δύο πηνία μπορεί να έχουν μια σημαντική απόσταση μεταξύ τους με αποτέλεσμα ένα μεγάλο μέρος της μαγνητικής ακτινοβολίας να διαφεύγει στο περιβάλλον. Με χρήση φερριτών μπορεί η διαρροή να περιοριστεί αλλά όχι εντελώς. Αυτό το μαγνητικό πεδίο διαφεύγοντας μπορεί να αποδειχθεί προβληματικό.

Μία πηγή μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να προκαλέσει προβλήματα τόσο σε συσκευές κοντά στην πηγή καθώς και σε ζωντανούς οργανισμούς ανάλογα με την συχνότητα και ισχύ που εκπέμπει. Το μαγνητικό πεδίο που εκπέμπεται από τον μετασχηματιστή εάν δεν περιοριστεί σε κατάλληλο βαθμό μπορεί αρχικά να προκαλέσει δυσλειτουργίες στις γειτονικές συσκευές όπως στον αντιστροφέα και στα ηλεκτρονικά συστήματα του αυτοκινήτου, σε ηλεκτρονικές συσκευές εντός του αυτοκινήτου όπως κινητά τηλέφωνα και φορητοί υπολογιστές και σε συσκευές πλησίον του αυτοκινήτου που μεταφέρουν πεζοί. Από την συχνότητα του μαγνητικού πεδίου και από την ισχύ του εξαρτάται η επίδραση του μαγνητικού πεδίου στους ιστούς οργανισμών και για αυτόν τον λόγο καθώς και για την εύρυθμη συμπεριφορά με άλλες συσκευές είναι απαραίτητο η συσκευή να πληροί κάποιες προδιαγραφές ώστε να προλαμβάνονται όλα τα προαναφερθέντα προβλήματα. Όμως σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης δεν είναι ο μετασχηματιστής η μόνη πηγή παρεμβολών. Αν θυμηθούμε από το δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης αποτελείται από στοιχεία που βρίσκονται υπόγεια, στο επίπεδο του εδάφους και στοιχεία εντός του αυτοκινήτου. Τα στοιχεία όπως το δευτερεύον του μετασχηματιστή, ο ανορθωτής, οι μπαταρίες και τα καλώδια που τα συνδέουν

καθώς και φίλτρα εισόδου και εξόδου, αποτελώντας τμήμα του αυτοκινήτου μίας νέας τεχνολογίας οφείλουν να ακολουθούν ορισμένες προδιαγραφές ακτινοβολίας του ηλεκτρομαγνητικού τους πεδίου.

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των προδιαγραφών που αφορούν την εκπομπή και την ατρωσία στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή καθώς και των νέων που προωθούνται και που προς το παρόν αφορούν φορτιστές χαμηλής ισχύος ασύρματης τεχνολογίας, επαγωγικής φόρτισης και άλλων. Στον πίνακα 5.1 αναφέρονται οι προδιαγραφές της CENELEC (ευρωπαϊκής επιτροπής για την ηλεκτροτεχνική τυποποίηση) για την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που αφορούν μία ευρεία κατηγορία επιπέδων ισχύος και συχνότητων.

πίνακας 5.1 : Βιομηχανικές προδιαγραφές για ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή		
	Οικιακά-χαμηλά βιομηχανικά	Βαριά βιομηχανικά
Εκπομπή:	EN 61000-6-3	EN 61000-6-4
Ατρωσία:	EN 61000-6-1	EN 61000-6-2

Όσο αφορά την επαγωγική φόρτιση, σε συνδυασμό με τις παραπάνω τυποποιήσεις δύο standards έχουν προκύψει, το Qi που διευθύνεται από το WPT (Wireless Power consortium), standard συχνότητας λειτουργίας από 100 με 200kHz και το δεύτερο είναι της Airfuel Inductive με συχνότητα λειτουργίας μεταξύ 100 και 350kHz.

## 5.2 Επίδραση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στους ιστούς οργανισμών και διεθνείς οδηγίες

Κατά καιρούς, η διάδοση του ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου έχει δεχθεί πλήγματα μέσω της πολεμικής όσων υποστηρίζουν ότι η παραγωγή των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που παράγονται στο εσωτερικό των ηλεκτρικών αυτοκινήτων μπορεί τόσο βραχυπρόθεσμα, όσο και μακροπρόθεσμα να προκαλέσει προβλήματα υγείας κυρίως του οδηγού που κατά μέσο όρο περνάει δύο ώρες την ημέρα εντός του αυτοκινήτου. Για την προστασία του οδηγού και των επιβατών ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου οφείλει το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που παράγεται στο εσωτερικό ενός αυτοκινήτου να συνάδει με τις προδιαγραφές φορέων όπως της IEEE και της ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) καθώς και με τις προκαθορισμένες τιμές της κάθε χώρας για τις επιτρεπτές τιμές ακτινοβολίας. Ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο, ακόμα και χωρίς τον ασύρματο φορτιστή που αποτελεί ισχυρή πηγή μαγνητικής παρεμβολής, παράγει από τα στοιχεία του ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που μπορεί ενδεχομένως να προκαλέσει προβλήματα υγείας σε ιστούς. Το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής γίνεται περισσότερο κατανοητό όταν κανείς μελετήσει την αρχιτεκτονική ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου.



Ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο αποτελείται από έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες που συνηθίζεται να είναι τριφασικοί επαγωγής. Ο κινητήρας τροφοδοτείται από μία συστοιχία μπαταριών που με την βοήθεια μετατροπέων ισχύος μετατρέπει την DC στάθμη των μπαταριών σε τριφασική. Ο σημαντικότερος μετατροπέας είναι ο τριφασικός αντιστροφέας που με χρήση διακοπτικών στοιχείων παράγει την τριφασική εναλλασσόμενη τάση, ενώ μπορεί να υπάρχει και κάποιος DC/DC μετατροπέας που μεταβάλλει την τάση που παράγει η μπαταρία στο κατάλληλο επίπεδο. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία παράγει μαγνητικό πεδίο που αλληλεπιδρά με τους επιβάτες ενός οχήματος και με άλλες συσκευές. Στις πηγές [39], [40] έγιναν μετρήσεις σε ένα μεγάλο εύρος ηλεκτρικών αυτοκινήτων και μετρήθηκαν τα εύρη της έντασης των μαγνητικών πεδίων σε διάφορες συχνότητες. Σε συχνότητες γύρω στο 1Hz μετρήθηκαν εκατοντάδες  $\mu\text{T}$  που οφείλονταν σε ρεύματα μπαταριών. Στην συχνότητα μερικών Hz μέχρι 1kHz πεδία έντασης  $2\mu\text{T}$  ενώ για συχνότητες μεγαλύτερες των 1kHz μετρήθηκαν περίπου 100nT που λόγω της υψηλής συχνότητας ενοχοποιήθηκε ο αντιστροφέας καθώς είναι ο μοναδικός που λειτουργεί σε αυτές τις συχνότητες. Συνεπώς ο οδηγός και οι επιβάτες εντός του αυτοκινήτου υπόκεινται σε διάφορα μαγνητικά πεδία των οποίων η επίδραση πρέπει να μελετηθεί. Ειδικά με την προσθήκη πλέον ενός επίπεδου μετασχηματιστή, τοποθετημένο κάτω από το αυτοκίνητο και κατά επέκταση κάτω από τις θέσεις των επιβατών.

Σε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο όμως δεν επιδρούν μόνο μαγνητικά πεδία αλλά και ηλεκτρικά. Τα πρώτα προκαλούνται από υψηλά ρεύματα ενώ τα δεύτερα από υψηλές τάσεις που σε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο συνηθίζεται να είναι γύρω στα 600V. Αυτή η τάση όντας αρκετά χαμηλή περιορίζει την παραγωγή ηλεκτρικών πεδίων αλλά δημιουργεί αρκετά υψηλά ρεύματα που δημιουργούν πιο ισχυρά μαγνητικά πεδία. Κάποιες από τις επιπτώσεις των αρνητικών πεδίων σε ιστούς οργανισμών παρουσιάζονται παρακάτω:

- αποσπασματική ή επώδυνη διέγερση αισθητήριων ή κινητικών νευρώνων
- μυϊκή διέγερση που μπορεί να οδηγήσει σε τραυματισμό κατά την εκτέλεση δυνητικά επικίνδυνων δραστηριοτήτων
- διέγερση νευρώνων ή άμεση αλλοίωση της συναπτικής δραστηριότητας εντός του εγκεφάλου
- καρδιακή διέγερση
- ανεπιθύμητες ενέργειες που σχετίζονται με επαγόμενα δυναμικά ή δυνάμεις σε ταχέως κινούμενα φορτία εντός του σώματος, όπως στη ροή του αίματος

Διαβάζοντας κανείς αυτές τις παρενέργειες που σχετίζονται με την σύντομη παρουσία σε κάποιο μαγνητικό πεδίο οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι πρέπει να ληφθούν μέτρα θωράκισης όχι μόνο του φορτιστή αλλά και των υπολοίπων συσκευών εντός του αυτοκινήτου για την προστασία των επιβατών. Μάλιστα ο οδηγός ακόμα και αν παραμένει εντός του αυτοκινήτου κατά την διάρκεια της φόρτισης δεν πρέπει να καταβάλλεται καθόλου καθώς η οδήγηση πρόκειται για χρήση βαρέως εξοπλισμού και πρέπει να γίνεται με απόλυτη συγκέντρωση.

Παρόλο που δεν έχει παρατηρηθεί μακροπρόθεσμη παρενέργεια των μαγνητικών πεδίων, γνωρίζουμε πως η βραχυπρόθεσμη παρουσία μπορεί να προκαλέσει βλάβες ιδιαίτερα σε υψηλές συ-

χνότητες και ανάλογα πάντα με την έντασή του. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ICNIRP, η επιτρεπτή ακτινοβολία για συχνότητα 10Hz είναι περίπου  $10^3 \mu\text{T}$ , για συχνότητα 100Hz είναι περίπου  $110 \mu\text{T}$ , για 1000Hz είναι  $70 \mu\text{T}$ , ενώ τέλος για 10kHz η μέγιστη επιτρεπτή είναι  $10 \mu\text{T}$ .

Για τα ελληνικά δεδομένα στις συχνότητες στις οποίες δουλεύουμε, γύρω στα 100kHz, δανειζόμαστε τις προτεινόμενες τιμές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τον τοπικό ρυθμό ειδικής απορρόφησης (SAR) (σχέση 5.1) καθώς και για την πυκνότητα ισχύος. Ο τοπικός ρυθμός ειδικής απορρόφησης εκφράζει τον ρυθμό απορρόφησης της ακτινοβολίας ραδιοσημάτων από τους ιστούς του ανθρώπινου σώματος. Αυτός για την ΕΕ είναι ίσος με  $4 \text{ mA/m}$  ενώ λιγότερο αυστηρό για την ελληνική νομοθεσία  $2,8 \text{ mA/m}$ . Η πυκνότητα ισχύος για την Ελλάδα είναι  $10 \text{ W/m}^2$ . Στον πίνακα 5.2 αναφέρονται τα όρια των επιτρεπτών τιμών για τον επιτρεπτό τοπικό ρυθμό ειδικής απορρόφησης και τον συντελεστή νευρικής διέγερσης NS (Nerve Stimulation) σύμφωνα με τις οδηγίες της κυβέρνησης του Καναδά.

πίνακας 5.2 : Επιτρεπτές τιμές για την διείσδυση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στον οργανισμό από κανονισμό της κυβέρνησης του Καναδά για χαμηλές συχνότητες.

Επίπεδο αναφοράς $E_{RL}$ (V/m, RMS)*				
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ				
Συχνότητα MHz	Επίπεδα αναφοράς	Μη ελεγχόμενο περιβάλλον	Ελεγχόμενο περιβάλλον	Περίοδος αναφοράς
0,003-10	NS	83	170	στιγμιαία**
1,0-10	SAR	$87/f^{0,5}$	$193/f^{0,5}$	6 λεπτά***
Επίπεδο αναφοράς $H_{RL}$ (A/m, RMS)*				
ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ				
Συχνότητα MHz	Επίπεδα αναφοράς	Μη ελεγχόμενο περιβάλλον	Ελεγχόμενο περιβάλλον	Περίοδος αναφοράς
0,003-10	NS	90	180	στιγμιαία**
1,0-10	SAR	$0,73/f$	$1,6/f$	6 λεπτά***

\*όπου f σε MHz

\*\*Σε καμία περίπτωση δεν επιτρέπεται οι στιγμιαίες τιμές του ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου να ξεπεράσει τις τιμές που αναγράφονται

\*\*\*Οι τιμές μπορούν να ξεπεράσουν τις τιμές δεδομένου ότι το τετράγωνο της μέσης τιμής δεν ξεπερνάει το  $E_{RL}^2$  ή το  $H_{RL}^2$

Ο τοπικός ρυθμός ειδικής απορρόφησης βρίσκεται από την εξίσωση 5.1

$$SAR = \frac{\sigma \cdot E^2}{m_g} \quad (5.1)$$

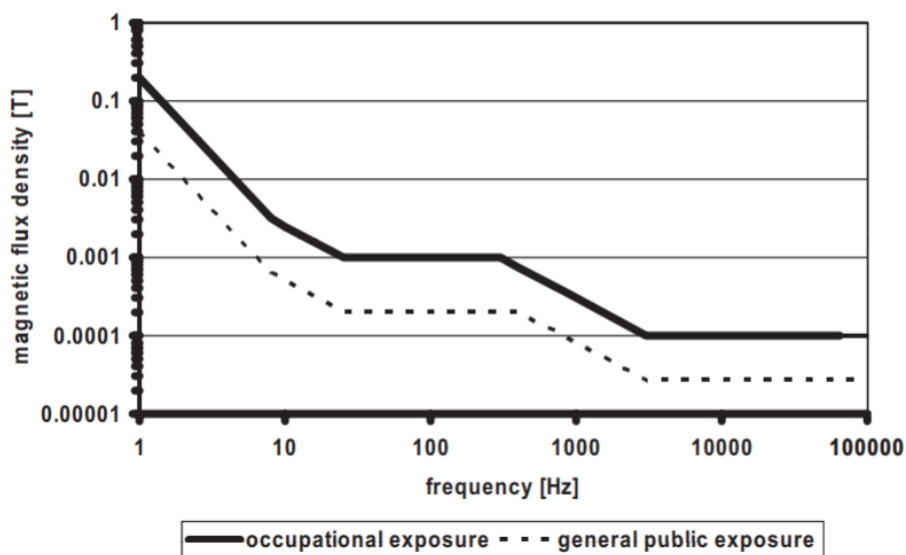
Όπου [53] :

$\sigma$ : η αγωγιμότητα του υλικού (S/m)

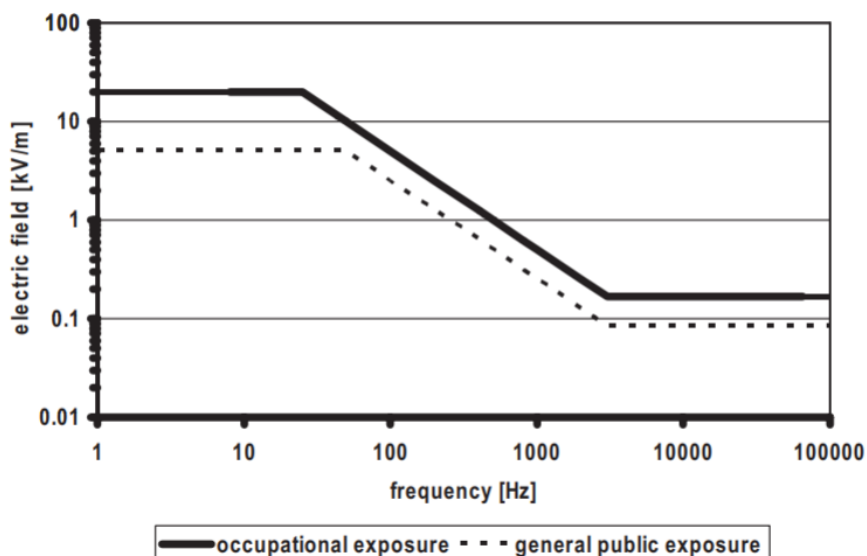
E: η RMS ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (V/m)

$m_g$ : πυκνότητα μάζας (Kg/m<sup>3</sup>)

Οι παρακάτω προδιαγραφές αποτελούν οδηγίες από το ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) για την έκθεση σε μεταβλητά μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία [54]. Η έρευνα που διεξήχθη αφορά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία στο εύρος των 1Hz με 100kHz. Η έρευνα χωρίστηκε σε δύο τμήματα, ένα για τις συνθήκες εργασιακού περιβάλλοντος εργαζομένων και ένα για το γενικό κοινό. Οι οδηγίες για το γενικό κοινό είναι πιο αυστηρές καθώς σε αυτόν τον πληθυσμό συμπεριλαμβάνονται παιδιά και έγκυοι. Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζονται τα στοιχεία για το χρονομεταβλητό μαγνητικό πεδίο ενώ στο σχήμα 5.2 για το ηλεκτρικό.



σχήμα 5.1 : Επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε χρονομεταβλητά μαγνητικά πεδία



σχήμα 5.2 : Επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε χρονομεταβλητά ηλεκτρικά πεδία

Είναι πολύ σημαντικό σε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο, σε περιπτώσεις ταυτόχρονης έκθεσης σε πολλαπλά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, αυτά να μην δρουν προσθετικά. Συνεπώς εντός του αυτοκινήτου, το συνολικό (αθροιστικό) ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο για συχνότητες από 1Hz έως 10MHz βρίσκεται από τις εξισώσεις (5.2) και (5.3) αντίστοιχα.

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{H_{\max,j}} \leq 1 \quad (5.2)$$

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_j}{E_{\max,j}} \leq 1 \quad (5.3)$$

Όπου  $E_j$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην συχνότητα  $j$

$E_{\max,j}$  η μέγιστη επιτρεπτή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σύμφωνα με το σχήμα 5.2 για κάθε συχνότητα  $j$

$B_j$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου στην συχνότητα  $j$

$B_{\max,j}$  η μέγιστη επιτρεπτή ένταση του μαγνητικού πεδίου σύμφωνα με το σχήμα 5.1 για κάθε συχνότητα  $j$

### 5.3 Διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου

Στην περίπτωση της επαγωγικής φόρτισης με σχετικά μεγάλο διάκενο μπορούν να χρησιμοποιηθούν φερρομαγνητικά υλικά που έχουν υψηλή διαπερατότητα ( $\mu_r > 1000$ ) και χαμηλή

αγωγιμότητα ( $\sigma \ll 10^2$  S/m) που χρησιμοποιούνται για να περιορίσουν και να οδηγήσουν την μαγνητική ροή. Με αυτόν τον τρόπο οδηγείται η μαγνητική ροή από το θεμιτό δρόμο (μικρότερη αντίσταση) με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η αλληλεπαγωγή και αυτεπαγωγή των μαγνητικά συζευγμένων πηνίων [23] και τελικά να μειώνεται η διαρροή μαγνητικής ενέργειας γύρω από τις πηγές μαγνητικής ακτινοβολίας. Η μείωση της διαρροής μπορεί να μειώσει τα δινορεύματα που παράγονται σε μεταλλικές επιφάνειες και που μπορούν να αποτελέσουν αιτία τραυματισμού. Κάθε τέτοιο φερρομαγνητικό υλικό μπορεί να έχει απώλειες από δινορεύματα και από τον βρόγχο μαγνητικής υστέρησης οι οποίες αυξάνονται καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Για αυτό το λόγο η εγκατάστασή τους οφείλει να γίνεται προσεκτικά παίρνοντας πάντα υπόψη τη θωράκιση ως πηγή θερμότητας στο σύστημα. Για την ηλεκτρική θωράκιση, συνήθως πρακτική είναι η χρήση μετάλλων. Η μεταλλική διάταξη που ενσωματώνει κάποιο ηλεκτρονικό στοιχείο είναι ευρύτερα γνωστή ως κλωβός Faraday. Τα μειονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ότι τα μεταλλικά στοιχεία που μπορεί να αποτελούν το περίβλημα μιας συσκευής διαρρέονται από ρεύμα πράγμα που μπορεί να αποβεί επικίνδυνο αν και πιο συχνά ενοχλητικό για τους χρήστες. Εκτός αυτού η παρουσία μεταλλικών αντικειμένων στην περιοχή κοντά σε πηνία έχει την επίπτωση της μειωμένης αλληλεπαγωγής και αυτεπαγωγής των μαγνητικά συζευγμένων πηνίων καθώς και αύξηση της σύνθετης αντίστασης που οδηγεί σε μείωση της απόδοσης. Συνεπώς ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης οφείλει λόγω της υψηλής μαγνητικής ροής που παράγει να έχει διασφαλίσει κάθε δυνατό τρόπο θωράκισης ώστε να επιτευχθεί ταυτόχρονα η απαραίτητη μαγνητική θωράκιση που θα προστατεύει την υγεία των χρηστών και όσων είναι σε κοντινή απόσταση καθώς και η βέλτιστη απόδοση της συσκευής. Άρα για την επίτευξη αυτού του στόχου ενδείκνυται η χρήση και των δύο μεθόδων, δηλαδή με χρήση πλακών φερρίτη καθώς και μεταλλικών φύλλων που θα τα εγκολώνουν. Για ισχυρά μαγνητικά πεδία η επίδραση του κλωβού Faraday εξαφανίζεται αφήνοντας ως μόνο μέσο προστασίας κάποια επένδυση φερρομαγνητικού υλικού.

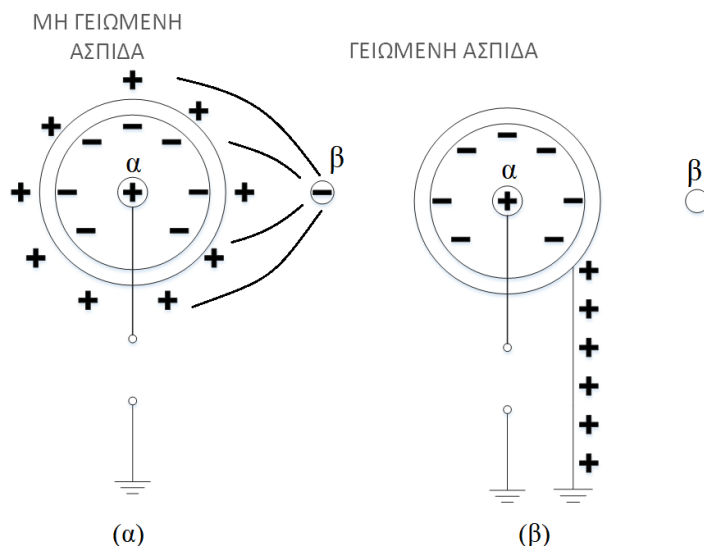
#### 5.4 Ηλεκτροστατική θωράκιση

Έστω ότι θεωρούμε έναν ομοιογενή αγωγό  $a$ , απείρου μήκους στο οποίο υπάρχει κατανομημένο ηλεκτρικό φορτίο  $q$ . Η ένταση του ηλεκτρικού φορτίου σε απόσταση  $r$  από τον αγωγό είναι:

$$E_r = \frac{q}{2\pi\epsilon} \tilde{r} \quad (5.4)$$

Έστω ότι ένας αγωγός  $\beta$  τοποθετηθεί παράλληλα στον αγωγό  $a$  και εκτεθεί στο ηλεκτρικό πεδίο του, τότε θα επαχθεί ένα ηλεκτρικό φορτίο στα άκρα του  $-q$ . Το φορτίο αυτό δημιουργείται από τη έλξη των αρνητικών φορτίων του αγωγού  $\beta$  προς το θετικό φορτίο του  $a$  σύμφωνα με την συνοριακή συνθήκη μεταξύ αγωγού και διηλεκτρικού, που είναι το μέσο ανάμεσα στους αγωγούς,  $D_n = \rho$ . Για να προστατέψουμε τον αγωγό  $\beta$  από τον αγωγό  $a$  μπορούμε να τοποθετήσουμε ένα αγωγίμο μεταλλικό πλαίσιο γύρω από τον αγωγό  $a$ . τότε όμως σύμφωνα με το σχήμα 5.3 (α) παρατηρείται το ίδιο ακριβώς φαινόμενο μεταξύ του αγωγού  $a$  και της ασπίδας και τελικά με τον αγωγό  $\beta$ . Άρα η τοποθέτηση της ασπίδας σε ένα ηλεκτροστατικό περιβάλλον

δεν έχει επίδραση. Για να λύσουμε το πρόβλημα πρέπει λοιπόν στο εσωτερικό της ασπίδας να υπάρχει μόνο το ομοιόμορφα κατανομημένο ηλεκτρικό πεδίο και το πεδίο του αγωγού  $\alpha$ , δημιουργώντας μηδενικό ηλεκτρικό πεδίο. Συνεπώς γειώνοντας την ασπίδα επιτυχαίνουμε να τροφοδοτήσουμε την ασπίδα με το αρνητικό φορτίο που χρειάζεται ώστε να εξουδετερώσει το πεδίο του  $\alpha$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3 (β).



σχήμα 5.3 : Ηλεκτροστατική θωράκιση καλωδίων: (α) Χωρίς γείωση, (β) Με γειωμένη θωράκιση

Η ηλεκτρική θωράκιση συνεπώς δεν είναι ολοκληρωμένη χωρίς κάποιον αγωγό γείωσης, πράγμα που συνεπάγεται ότι την ροή φορτίου προς την γείωση, που στην περίπτωση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι το chassis του. Σύμφωνα με τον πίνακα 5.3 τα μέγιστα επαγόμενα ρεύματα τόσο για ηλεκτρική θωράκιση όσο και για την επίδραση του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή ή οποιουδήποτε άλλου στοιχείου δεν πρέπει να ξεπερνά τα ρεύματα του διαγράφονται στο ΦΕΚ. Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα επιτρεπτά επίπεδα ρευμάτων επαφής που μπορεί να παραχθούν εξαιτίας της ηλεκτροστατικής γείωσης και λόγω των επαγόμενων δινορευμάτων εξαιτίας του μετασχηματιστή.

πίνακας 5.3 : Επίπεδα αναφοράς για ρεύματα επαφής από αγωγήματα σώματα [52]	
Ζώνη συχνοτήτων	Μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα επαφής (mA)
0-2,5kHz	0,5
2,5kHz-100kHz	0,2f*

\*f σε Hz

## 5.5 Ηλεκτρομαγνητική θωράκιση

Η μαγνητική θωράκιση είναι η εφαρμογή μίας ασπίδας η οποία καλύπτει ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα σε περίπτωση που αυτό είναι εκπομπός ή δέκτης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα μπορεί να παράγει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία άλλων γειτονικών κυκλωμάτων αλλά και ταυτόχρονα να επηρεαστεί από την ακτινοβολία άλλων κυκλωμάτων και συσκευών που στην περίπτωση της επαγωγικής φόρτισης είναι κυρίως ο μετασχηματιστής καθώς είναι ισχυρός εκπομπός. Βέβαια υπάρχουν και άλλα στοιχεία σε ένα σύστημα φόρτισης που πρέπει να θωρακιστούν καθώς παράγουν ακτινοβολία, όπως οι μετασχηματιστές ισχύος της διάταξης και άλλα στοιχεία που μπορεί να υπάρχουν στο κύκλωμα συντονισμού και στο φίλτρο εισόδου καθώς και οι μπαταρίες του αυτοκινήτου και ο αντιστροφέας. Η μαγνητική θωράκιση λοιπόν περιορίζει το ποσό της παρενόχλησης που εισέρχεται στο κύκλωμα και εξέρχεται από αυτό. Η ασπίδα αυτή περιέχει ανοίγματα για την εξαγωγή καλωδίων, για εξαερισμό καθώς και θύρες που ανοιγοκλείνουν. Όλα αυτά καθώς και τα υλικά κατασκευής μπορούν να μεταβάλουν τον δείκτη προστασίας της θωράκισης και για αυτόν τον λόγο πρέπει να ακολουθηθούν συγκεκριμένοι κανόνες για την σχεδιάσή της και για την επιλογή των υλικών κατασκευής. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως εκτός από το προστατευτικό περίβλημα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι μέτρα μπορούν να ληφθούν και στο στάδιο σχεδίασης του κυκλώματος ώστε να μειωθεί σε βασικότερο επίπεδο η ατρωσία του κυκλώματος και η ακτινοβολία που παράγει.

Η μαγνητική θωράκιση αφορά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία έχουν διαφορετική συμπεριφορά με αποτέλεσμα για ορισμένες συχνότητες η θωράκιση να είναι αρκετή για το ένα αλλά όχι και για τα δύο. Ο λόγος για αυτό είναι ο δεύτερος νόμος του Maxwell  $\text{grad}B=0$  που σημαίνει ότι η απόκλιση του μαγνητικού πεδίου είναι μηδενική, δηλαδή ότι πάντα οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου επιστέφουν στο σημείο εκκίνησης και άρα τα μαγνητικά πεδία υφίστανται μόνο ως δίπολα. Σε αντίθεση με το μαγνητικό, στο ηλεκτρικό παρατηρείται το φαινόμενο του κλωβού του Faraday κατά το οποίο το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό της αγωγίσιμης θωράκισης δημιουργεί ένα αντίθετο ηλεκτρικό πεδίο που τείνει να ακυρώσει την ύπαρξη του γενεσιουργού πεδίου στο εσωτερικό του κλωβού. Ανακεφαλαιώνοντας, για την προστασία από το ηλεκτρικό πεδίο απαιτείται κάποιο υλικό με υψηλή αγωγιμότητα, δηλαδή χαμηλή αντίσταση ενώ για την προστασία του μαγνητικού πεδίου κάποιο υλικό με χαμηλή διαπερατότητα όταν αφορά αγωγίμο υλικό και χρήση φερριτών με υψηλή διαπερατότητα για την δημιουργία αγωγίμων δρόμων ροής του μαγνητικού πεδίου. Στην περίπτωση μη αγωγίμου υλικού απαιτείται κάποιο υλικό με αρκετό πάχος και υψηλή διαπερατότητα. Στον πίνακα 5.4 δίνονται τα δημοφιλέστερα υλικά περιφραξης συσκευών με τα στοιχεία της αγωγιμότητας καθώς και της διαπερατότητάς τους.

πίνακας 5.4 : Λίστα στοιχείων για κατασκευή περίφραξης με ηλεκτρομαγνητική θωράκιση

Υλικά	Συστατικά (%)	Αγωγιμότητα (S/m)	Διαπερατότητα
Ανοπημένος χαλκός	100 Cu	100	1
Χαλκοβηρύλλιο	98 Cu, 2 Be	22	1
CuNiSn	9 Ni, 6 Sn, 85 Cu	12	1
Φωσφορούχο χαλκό	8 Sn, 0.2 P, 91.8 Cu	13	1
Ορείχαλκος	63 Cu, 37 Zn	26	1
Νικέλιο ασήμι	18 Ni, 27 Zn, 55Cu	6	1
Αλουμίνιο	100 Al	61	1
Al 6061	1.2 Mg, 0.8 Si, 98 Al	46	1
Εμπορικός σίδηρος	99.8 Fe	16	250
Καθαρός σίδηρος	99.95 Fe	18	10000
Χάλυβας ψυχρής έλασης	0.5 Mn, 0.006 C	12	200
Ανοξειδωτο ατσάλι	17 Cr, 7 Ni	2,4	1,02
Ασημένια επένδυση	100 Ag	105	1
Χρυσή επένδυση	100 Au	70	1
Επένδυση ψευδάργυρου	100 Zn	29	1
Επίστρωση νικελίου	88-95 Ni, 5-12 P	15-25	1
Ηλεκτρολυτική επίστρωση νικελίου	100 Ni	20-25	100
Επιμέταλλωση κασσίτερου	100 Sn	15	1
Πλαστικό σύνθετο υλικό	Νήματα ατσαλιού	8,62E-04	1
Πλαστικό σύνθετο υλικό	Ανοξειδωτα νήματα ατσαλιού	2,10E-04	1
Πλαστικό σύνθετο υλικό	Ίνες γυαλιού	9,58E-02	1
Πλαστικό σύνθετο υλικό	40% ίνες άνθρακα	1,72E-06	1
Πολυανθρακικό σύνθετο υλικό	5% γραφίτης με επικάλυψη Ni	5,07E-09	1
Πολυανθρακικό σύνθετο υλικό	10% γραφίτης με επικάλυψη Ni	3,32E-06	1
Πολυανθρακικό σύνθετο υλικό	20% γραφίτης με επικάλυψη Ni	1,57E-03	1
78 permalloy	78,5 Ni, 25,5 Fe	10,8	8000
MoPermalloy	79 Ni, 4 Mo, 17 Fe	3,13	20000
Supermalloy	79 Ni, 5 Mo, 15 Fe	2,87	100000
48% Ni-Fe	48 Ni, 52 Fe	3,82	5000
Monimax	48 Ni, 3 Mo, 49 Fe	2,15	2000
Sinimax	43 Ni, 3 Si, 54 Fe	2,02	3000
Mumetal	77 Ni, 5 Cu, 2 Mo, 15 Fe	2,87	20000

### 5.5.1 Εξίσωση επίδρασης θωράκισης SE

Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η γεωμετρία της διάταξης, η ύπαρξη οπών, το πάχος της θωράκισης, η απόσταση από την πηγή της παρεμβολής και άλλα. Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης όμως εκφράζεται από τον συντελεστή SE (Shield Effectiveness) και μετριέται σε decibels (dB). Ο συντελεστής για ηλεκτρικό (E), μαγνητικό (M) και πεδίο επίπεδου κύματος (F) πεδίο αντίστοιχα είναι:



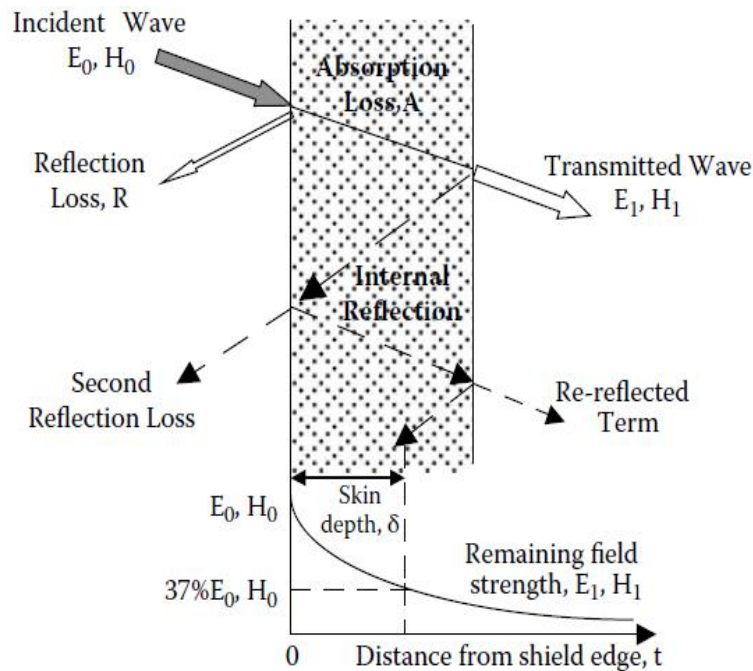
$$SE = 20 \log \frac{E_0}{E_1} \quad (5.5)$$

$$SE = 20 \log \frac{M_0}{M_1} \quad (5.6)$$

$$SE = 20 \log \frac{F_0}{F_1} \quad (5.7)$$

Υπάρχουν τρεις μηχανισμοί που υπεισέρχονται στον συντελεστή επίδρασης θωράκισης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, ο συντελεστής ανάκλασης  $R$ , ο συντελεστής απορρόφησης  $A$  και ο συντελεστής πολλαπλών ανακλάσεων  $B$  (σχήμα 5.4).

$$SE = A + B + R \quad (5.8)$$



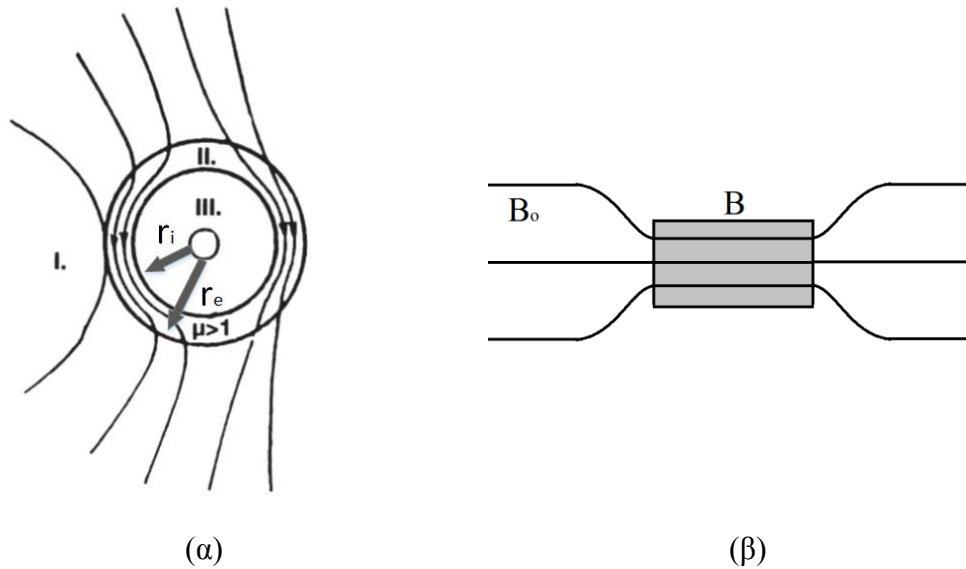
σχήμα 5.4 : Γραφική αναπαράσταση ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης [30]

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η επίδραση του μαγνητικού πεδίου με παρουσία θωράκισης μαγνητικού πεδίου από φερρίτη, σχέση 5.9 (μη λογαριθμική μορφή της επίδρασης θωράκισης):

$$S = \frac{H^I}{H^0} = \frac{4\mu_r r_e^2}{r_e^2(1+\mu_s)^2 - r_i^2(1-\mu_s)^2} = \frac{4}{\mu_s} \frac{1}{1 - \frac{r_i^2}{r_e^2}} \quad (5.9)$$

Παρατηρούμε ότι στην επίδραση για το μαγνητικό πεδίο δεν εισέρχεται η συχνότητα του μαγνητικού πεδίου αλλά μόνο η διαπερατότητα του υλικού, η ακτίνα του πεδίου και το πάχος του υλικού. Στο σχήμα 5.5 (α) παρουσιάζεται η επίδραση του φερρίτη υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Στο σχήμα αναπαριστώνται οι ακτίνες  $r_e$  και  $r_i$  που αποτελούν την εξωτερική και εσωτερική ακτίνα του υλικού θωράκισης. Η αναλυτική σχέση της εξίσωσης 5.9 μας δίνει μία

πολύ σημαντική πληροφορία, ότι για  $\mu_s=1$  τότε η επίδραση θωράκισης  $S$  ισούται με  $\mu_r$  (διαπερατότητα κενού) που σημαίνει ότι δεν υπάρχει καμία θωράκιση.



σχήμα 5.5 : (α) Δακτύλιος φερρίτη υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου – (β) Λειτουργία φερρίτη

Τελικά, έτσι ώστε να γίνει εύκολα αντιληπτό, ως μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  ορίζουμε τον λόγο  $B/B_0$  όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5 (β).

Ένας μηχανικός όταν εγκαθιστά υλικά που έχουν υψηλή διαπερατότητα  $\mu \gg 1$ , πρέπει να προσέχει τα εξής τρία στοιχεία που κάνουν την χρήση των φερριτών δύσκολη:

- Υλικά με υψηλή διαπερατότητα είναι μη γραμμικά με αποτέλεσμα μερικές φορές να αντιδρούν διαφορετικά σε διαφορετικές συχνότητες κάνοντας την θωράκιση καλύτερη όταν στοχευόμενα διαλέγονται συγκεκριμένες συχνότητες. Εκτός αυτού υπάρχουν προβλήματα όπως η υστέρηση και απώλειες πυρήνα που προσθέτουν πολυπλοκότητα στο σύστημα και στις μετρήσεις.
- Οι ιδιότητες των υλικών αυτών ποικίλουν όσο αφορούν ιδιότητες όπως η ευκαμπτότητα, συνθήκες χειρισμού, θερμοκρασία και πλαστικότητα. Πάντως όσο μεγαλύτερη διαπερατότητα, τόσο πιο αποτελεσματική η θωράκιση που μπορεί να φτάσει τα εκατοντάδες dB.
- Η εξίσωση του φαινομένου σώματος  $\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$ , το βάθος διείσδυσης  $\delta$  είναι αντίστροφως ανάλογο της συχνότητας που σημαίνει ότι σε πολύ χαμηλές συχνότητες το βάθος διείσδυσης γίνεται σημαντικό.

### 5.5.2 Επιδερμικό φαινόμενο (Skin effect)

Το επιδερμικό φαινόμενο είναι σημαντικό για την μαγνητική θωράκιση και για την επαγωγική φόρτιση. Όταν σε έναν αγωγό ρέει σταθερό DC ρεύμα τότε το ρεύμα κατανέμεται ομοιόμορφα

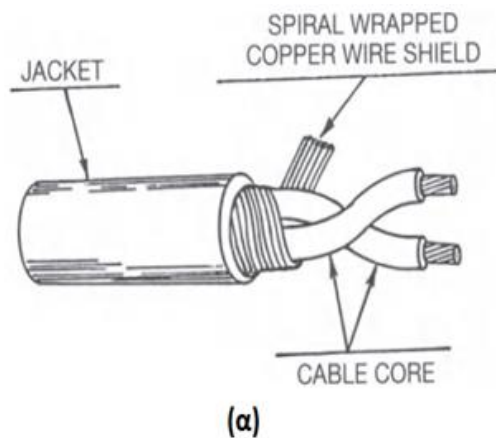
σε όλη την τομή ενός αγωγού. Όταν όμως το ρεύμα γίνεται εναλλασσόμενο, αρχίζει να ρέει μόνο από την εξωτερική επιφάνεια του αγωγού. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργείται μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του αγωγού με αποτέλεσμα την δημιουργία δινορευμάτων. Τελικά εξαιτίας αυτού του φαινομένου αυξάνεται η αντίσταση του αγωγού. Το ίδιο συμβαίνει και με την θωράκιση όταν αυτή είναι μεταλλική και επάγονται σε αυτήν ρεύματα λόγω ύπαρξης μαγνητικού πεδίου. Το φαινόμενο σώματος εξαρτάται από το είδος του υλικού του αγωγού, από την συχνότητα του μαγνητικού πεδίου, το πάχος του αγωγού και από την διαπερατότητα του υλικού. Το φαινόμενο αυτό εκφράζεται από το μέγεθος  $\delta$  που ονομάζεται βάθος διείσδυσης και παρουσιάζεται στο σχήμα 5.4 και αναπαριστάται στην εξίσωση 5.10.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (5.10)$$

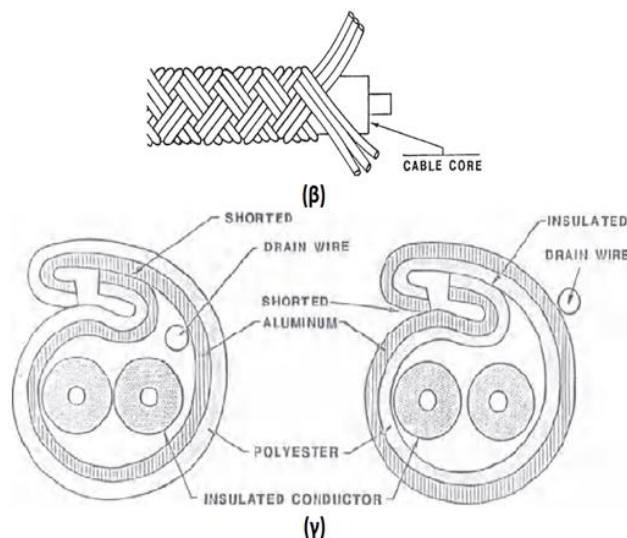
Όπου  $f$  η συχνότητα σε MHz,  $\mu$  η σχετική διαπερατότητα σε σχέση με τον χαλκό, και  $\sigma$  η αγωγιμότητα σε σχέση με σχέση με τον χαλκό. Η απώλεια από την απορρόφηση σε ένα βάθος επιφάνειας είναι 9dB.

### 5.5.3 Θωράκιση καλωδίων

Το σκεπτικό πίσω από την θωράκιση καλωδίων είναι παρόμοιο με την θωράκιση συσκευών που είναι η κατασκευή κλωβών Faraday για προστασία από ηλεκτρικά πεδία και τύλιγμα από μπάρες φερρίτη για προστασία από μαγνητικά πεδία. Ένα θωρακισμένο καλώδιο αποτελείται από αγωγούς που αποτελούν τον πυρήνα και από μία σειρά από υλικά που το θωρακίζουν.



σχήμα 5.6 : (α) Τυλιγμένη σπирάλ ασπίδα – (β) Πλεγμένη ασπίδα – (γ) Τομή θωρακισμένου καλωδίου με μεταλλικό φύλλο [31] (συνεχίζεται)



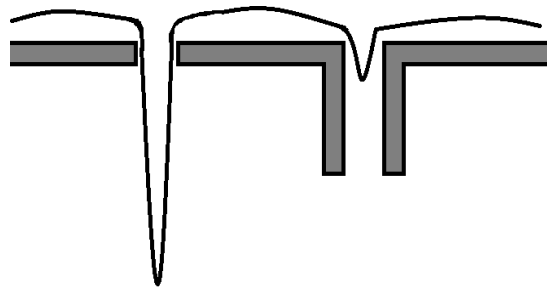
σχήμα 5.6 : (α) Τυλιγμένη σπирάλ ασπίδα – (β) Πλεγμένη ασπίδα – (γ) Τομή θωρακισμένου καλωδίου με μεταλλικό φύλλο [31]

Η θωράκιση των αγωγών αποτελείται από ένα μεταλλικό στρώμα σε διάφορες γεωμετρίες και ορισμένες φορές από ένα διηλεκτρικό μονωτή τα οποία είναι συνήθως τυλιγμένα κάτω από κάποιο προστατευτικό πολυμερές. Το μεταλλικό στρώμα μπορεί να είναι κάποιο μεταλλικό φύλλο όπως του σχήματος 5.6(γ). Αυτή η διάταξη προσφέρει την μεγαλύτερη προστασία με το μειονέκτημα της χαμηλής κινητικότητας. Άλλες διατάξεις είναι οι πλεγμένοι κλώνοι ή σπирάλ χαλκού ή αλουμινίου (σχήμα 5.6(α), (β)), ή ένα στρώμα από αγωγίμο πολυμερές.

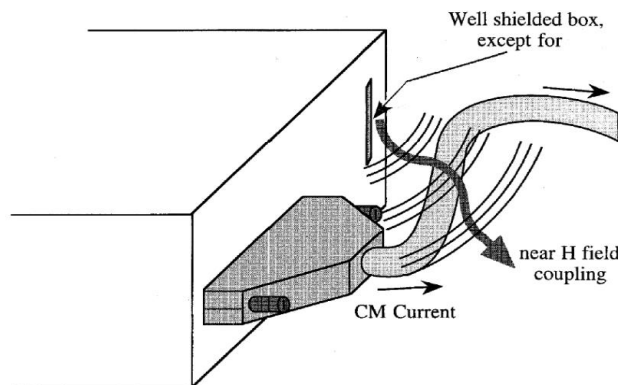
#### 5.5.4 Κενά θωράκισης λόγω οπών

Το πάχος των μεταλλικών περιφράξεων είναι σημαντικό για θωράκιση σημάτων χαμηλών συχνοτήτων αλλά όχι για τις υψηλές καθώς μόνο ένα λεπτό φύλλο μετάλλου είναι αρκετό. Όμως προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία της θωράκισης για όλες τις παρεμβολές είναι η δημιουργία ενός κλωβού Faraday. Συνεπώς είναι απαραίτητο να μην υπάρχουν μεγάλες οπές στις επιφάνειες της θωράκισης και τα κινητά μέρη πρέπει να καλύπτονται με αγωγίμες ελαστικές τσιμούχες. Σε περίπτωση που υπάρχουν ασυνέχειες στην περίφραξη το αποτέλεσμα είναι να μειώνεται σημαντικά η αποτελεσματικότητα θωράκισης SE καθώς η τελική ισούται με τον παράλληλο συνδυασμό των SE (σχέση 5.11). Στις οπές πιο συγκεκριμένα είναι πιο ωφέλιμο να δημιουργούνται τοιχώματα-οδηγοί που αποτρέπουν την διείσδυση πεδίων (σχήμα 5.7) που μπορούν να δημιουργήσουν παρεμβολές σε άλλες συσκευές (σχήμα 5.8).

$$\frac{1}{SE} = \frac{1}{SE_1} + \frac{1}{SE_2} + \dots \quad (5.11)$$



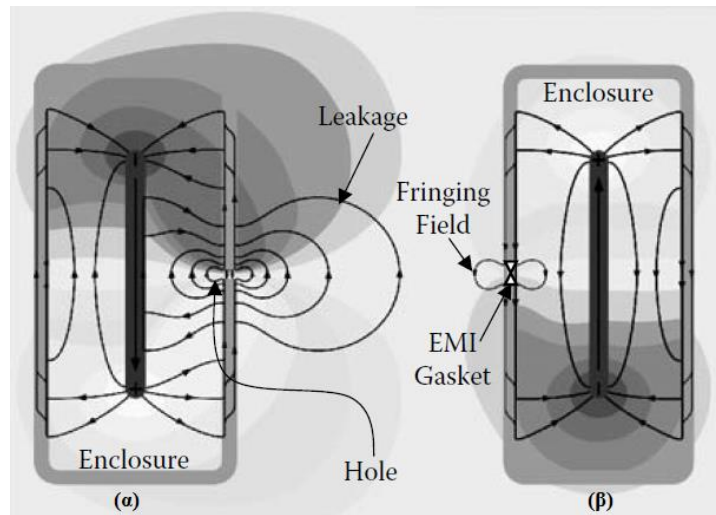
σχήμα 5.7 : Παράδειγμα εισροής ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής από οπή χωρίς τοιχώματα και με οπή με τοιχώματα



σχήμα 5.8 : Παράδειγμα πηγής ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής από οπή

### 5.5.5 Τσιμούχες (Gaskets)

Σε αυτήν την παράγραφο περιγράφεται ένα από τα πιο σημαντικά και απαραίτητα στοιχεία στην κατασκευή μίας συσκευής ή μίας κατασκευής γενικότερα, η τσιμούχα (gaskets). Η τσιμούχα ή φλάντζα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία μίας συσκευής, μηχανής, κινητήρα και πολλών άλλων εφαρμογών καθώς εξασφαλίζει την στεγανότητα και το σφράγισμα τμημάτων τους. Πιο σημαντική εφαρμογή που πολλές φορές παραβλέπεται είναι η ικανότητά τους να ολοκληρώσουν την ηλεκτρομαγνητική θωράκιση μιας συσκευής. Όπως περιγράφηκε στη παράγραφο 5.5.4 οι οπές επιτρέπουν την εισροή ή την διαρροή ακτινοβολίας και μία συσκευή πολύ συχνά χρειάζεται να δημιουργήσει συνδέσεις με άλλες συσκευές και στοιχεία (access feedthroughs) ή χρειάζεται θύρες για πρόσβαση του χρήστη. Οι τσιμούχες μπορούν δηλαδή ταυτόχρονα να εξασφαλίζουν το IP της συσκευής καθώς και την ολοκλήρωση του κλωβού Faraday όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9(β).



σχήμα 5.9 : (α) Συσκευή χωρίς αγώγιμη τσιμούχα – (β) Συσκευή με αγώγιμη τσιμούχα [30]

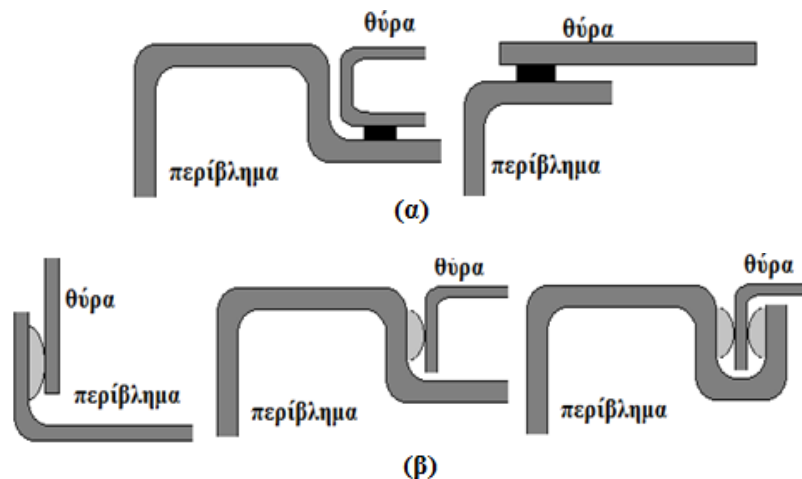
Η σωστή επιλογή της τσιμούχας βασίζεται στους παρακάτω παράγοντες:

- Συμβατότητα του υλικού της τσιμούχας με το υγρό που έρχεται σε επαφή.
- Ικανότητα αντοχής στις πιέσεις του περιβάλλοντος
- Χρόνος ζωής του υλικού

Γενικότερα, μία τσιμούχα οφείλει να μπορεί να διατηρεί τις παρακάτω ιδιότητες στις συνθήκες λειτουργίας της συσκευής για το απαραίτητο διάστημα λειτουργίας της συσκευής στην οποία είναι τοποθετημένη [38]:

- Αδιαπερατότητα: Η τσιμούχα οφείλει να μην είναι πορώδης στο υλικό που σφραγίζει.
- Συμπιεστό: Η τσιμούχα θα πρέπει να μπορεί να συμπιέζεται κατάλληλα.
- Χαλάρωση (Stress relaxation): Η τσιμούχα να μην χαλαρώνει κατά τον προκαθορισμένο χρόνο ζωής της, καταστρέφοντας έτσι με τον χρόνο τις βίδες.
- Ελαστικότητα: Οι φλάντζες πολύ συχνά κινούνται στο σημείο που είναι τοποθετημένες και πρέπει να έχουν την κατάλληλη ελαστικότητα ώστε να επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα.
- Χημική ανοχή: Πριν την τοποθέτηση της τσιμούχας είναι απαραίτητο να γνωρίζει ο μηχανικός όλα τα υγρά με τα οποία θα έρθει σε επαφή και απαιτείται κανένα από τα υγρά να αλληλεπιδρά χημικά με το υλικό της τσιμούχας.
- Αντοχή στην θερμοκρασία: Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, δηλαδή της συσκευής δεν πρέπει να φθείρει την τσιμούχα.
- Να μην κολλάει: Κατά την εξαγωγή της, πρέπει να αφαιρείται εύκολα.
- Αντιδιαβρωτική προστασία: Να μην προκαλεί η τσιμούχα διάβρωση στα γύρω εξαρτήματα.

Οι βασικότερες συνδεσμολογίες που χρησιμοποιούνται για την περίφραξη μίας συσκευής που ενισχύουν την θωράκιση σε ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή είναι αυτές του σχήματος 5.10.



σχήμα 5.10 : Τομή περιβλήματος: (α) Συμπίεσμένη τσιμούχα – (β) Οριζόντια πίεση [9]

Το σχήμα 5.10 μας δίνει τυπικά σχήματα περιβλήματος-θύρας που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρονικές συσκευές. Παρατηρούμε ότι η τοποθέτηση της τσιμούχας μπορεί να γίνει κάθετα (σχήμα 5.10(α)) ή οριζόντια (σχήμα 5.10(β)). Η μορφή αυτή επιτρέπει την δημιουργία μίας ομαλής ηλεκτρομαγνητικής ροής χωρίς γωνίες στις οποίες το μαγνητικό πεδίο λόγω της ακμής μεγιστοποιείται. Οι τσιμούχες σε κινητά μέρη που ανοιγοκλείνουν όπως θύρες πρέπει να εξετάζονται για πόσους κύκλους ανοιγοκλεισίματος αντέχουν καθώς και πόση πίεση. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι για μη μεταλλικά υλικά, αγωγίμη σιλικόνη και αγωγίμα ελαστομερή, ενώ μπορεί να περιέχουν και μεταλλικά πλεκτά στοιχεία όπως ελατήρια και πλεκτό φάτνωμα.

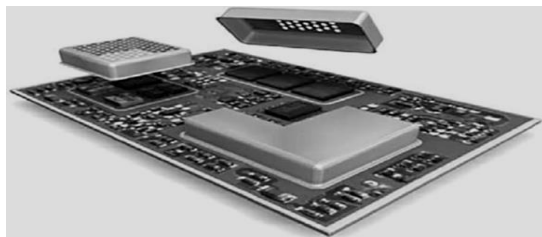
## 5.6 Μέτρα προστασίας από την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή

Για την τελική σχεδίαση μιας συσκευής πρέπει εξαρχής να έχουν ληφθεί μέτρα για την απομόνωση πηγών ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής καθώς και κυκλωμάτων επιρρεπή σε ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή μέσω θωράκισης, γείωσης και φιλτραρίσματος. Επίσης πρέπει να χρησιμοποιηθούν μέσα για την αύξηση της ατρωσίας των κυκλωμάτων και να περιοριστούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι παρεμβολές από πηγές του συστήματος.

Ακολουθώντας τις παραπάνω οδηγίες οδηγούμαστε στα εξής συμπεράσματα:

- 1) Κάθε στοιχείο που είναι επιρρεπές στην ακτινοβολία ή είναι πηγή παρεμβολών οφείλει να θωρακίζεται είτε αυτό είναι ένα μικρό ολοκληρωμένο κύκλωμα (σχήμα 5.11) είτε ένας μεγάλος μετατροπέας ισχύος.
- 2) Κατά την επιλογή στοιχείων είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται ο μικρότερος δυνατός αριθμός ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.
- 3) Απαραίτητη είναι η χρήση όσο δυνατόν λιγότερων PCB κυκλωμάτων. Με την χρήση μόνο μίας PCB πλακέτας αποφεύγεται η προέκταση καλωδίων που μπορεί να

δημιουργήσουν υψηλή παρεμβολή σε άλλα στοιχεία και παράλληλα μειώνεται το μήκος του καλωδίου που το κάνει λιγότερο επιρρεπές σε παρεμβολές.



σχήμα 5.11 : Παράδειγμα περιβλημάτων θωράκισης για ολοκληρωμένα κυκλώματα

Τα παραπάνω συμπεράσματα αφορούν κυρίως την εφαρμογή μεθόδων ηλεκτρικής θωράκισης την στιγμή που μπορεί να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα στην ρίζα του κατά την σχεδίαση των κυκλωμάτων. Μερικά παραδείγματα είναι τα εξής:

- 1) Περιορισμός του Bandwidth του κυκλώματος μπορεί να μειώσει την ακτινοβολία που παράγεται καθώς και να αυξηθεί η ατρωσία του κυκλώματος.
- 2) Ένας άλλος τρόπος είναι αν σε κάποιο αγωγό ρέει ρεύμα υψηλής συχνότητας και μεγάλης έντασης, να σχεδιαστεί το κύκλωμα έτσι ώστε από εκεί να ρέουν πιο αργά και πιο μικρά ρεύματα.
- 3) Τέλος είναι σημαντικό να επιλεγεί το κατάλληλο ολοκληρωμένο κύκλωμα που να πληροί τις προδιαγραφές ατρωσίας.

## 5.7 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα

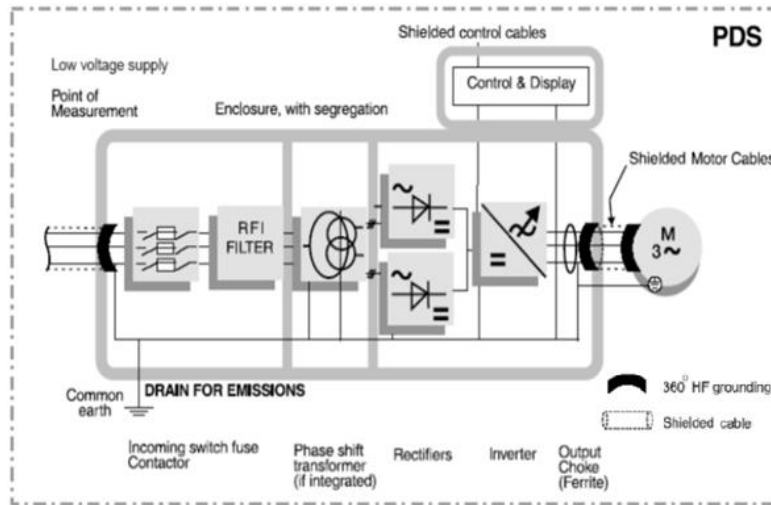
Ο ηλεκτρικός θόρυβος, εκτός από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μπορεί να φτάσει σε ένα κύκλωμα από πολλά μονοπάτια μεταξύ των οποίων οι γραμμές τροφοδοσίας, οι αγωγοί της γείωσης, τα καλώδια με το σήμα εισόδου και εξόδου, κεραίες και μεταλλικά υλικά της συσκευής. Η ατρωσία και η ευαισθησία της συσκευής εξαρτώνται από την είσοδο από την οποία εισέρχεται η παρεμβολή καθώς και από το είδος της. Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα συνεπώς αφορά την λειτουργία της συσκευής σε παρουσία τέτοιων διαταραχών και την ικανότητά της να συνεχίσει την λειτουργία της παρά την ύπαρξη αυτών των παρεμβολών.

Τα είδη των παρεμβολών που εισέρχονται σε ένα σύστημα είναι τα εξής:

- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται από πηγές γύρω από την συσκευή και κυρίως συσκευές που δημιουργούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία όπως κινητήρες (σχήμα 5.12) και που μέσω ακτινοβολίας παρενοχλούν το προστατευόμενο κύκλωμα
- Επαγόμενα ρεύματα και τάσεις που παράγονται στο σύστημα και μεταφέρονται από τις γραμμές μεταφοράς σε άλλα συστήματα



Συνεπώς η αξιοπιστία κάθε συσκευής πρέπει να αξιολογείται από την συμπεριφορά της στην παρουσία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και από την συμπεριφορά της όταν η είσοδος περιέχει τα επαγόμενα ρεύματα και τάσεις. Συχνό φαινόμενο αποτελεί και η μαγνητική σύζευξη κατά την οποία επαγόμενα ρεύματα και τάσεις από κάποιο σύστημα συνδυάζονται με αυτές που δημιουργήθηκαν σε κάποιο επόμενο και τελικά καταλήγουν σε ένα τρίτο σύστημα. Ο κίνδυνος σε αυτήν την περίπτωση είναι πως παρόλο που μπορεί να έχει προβλεφτεί η παραγωγή της παρεμβολής σε κάθε σύστημα ξεχωριστά, να μην έχει προβλεφτεί η συμβατότητα του τελικού συστήματος με την νέα παρεμβολή. Αποτέλεσμα πολύ συχνά είναι η διακοπή λειτουργίας του συστήματος και ακόμα και η καταστροφή του.



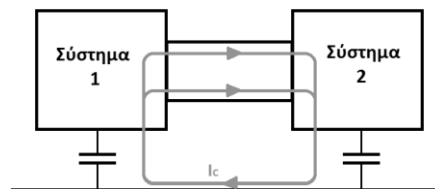
σχήμα 5.12 : Παράδειγμα θωράκισης μετατροπέα ισχύος που οδηγεί τριφασικό κινητήρα [32]

## 5.8 Ηλεκτρομαγνητική σύζευξη

Οι τρόποι αγωγίμης σύζευξης, δηλαδή μέσω αγωγών, μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά το κύκλωμα και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κατηγορίες:

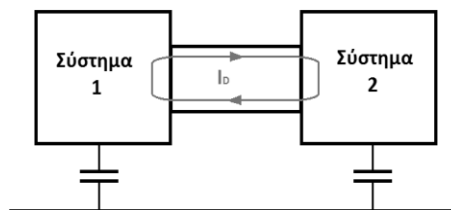
- Κοινός τρόπος σύζευξης μέσω αγωγού
- Διαφορικός τρόπος σύζευξης μέσω αγωγού

Στον κοινό τρόπο σύζευξης η παρεμβολή εισέρχεται στο σύστημα ή εξέρχεται από αυτό μέσω με την ίδια φορά με αναφορά την γη (σχήμα 5.13).



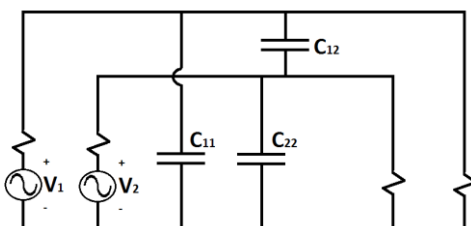
σχήμα 5.13 : Κοινός τρόπος σύζευξης

Στον διαφορικό τρόπο σύζευξης η παρεμβολή εισέρχεται από τον έναν αγωγό και εξέρχεται από τον άλλο όπως φαίνεται από το σχήμα 5.14.



σχήμα 5.14 : Διαφορικός τρόπος σύζευξης

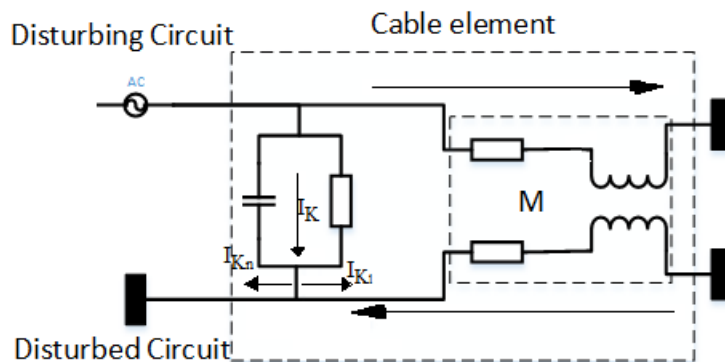
Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουν πολλές συσκευές είναι οι παρασιτικές χωρητικότητες μεταξύ των καλωδίων, εξαρτημάτων και κυκλωμάτων μεταξύ τους γενικότερα. Απότομες μεταβολές τάσης σε κάποιο καλώδιο μπορούν να δημιουργήσουν σε κοντινές αποστάσεις ηλεκτρικό πεδίο που με την σειρά του αλληλεπιδρά με το άλλο καλώδιο και δημιουργείται έτσι τάση. Στο σχήμα 5.15 φαίνεται η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου με την δημιουργία παράσιτων χωρητικοτήτων τόσο μεταξύ των καλωδίων και μεταξύ των καλωδίων και της γης.



σχήμα 5.15 : Ηλεκτρική σύζευξη μεταξύ καλωδίων

Εκτός από την ηλεκτρική σύζευξη, παρατηρείται και η μαγνητική σύζευξη κατά την οποία απότομες μεταβολές στο ρεύμα δημιουργούν μαγνητικά πεδία τα οποία όταν εισέρχονται σε βρόχο καλωδίου επάγονται ρεύματα τα οποία αν και μικρά λόγω έλλειψης κυκλώματος συντονισμού, μπορούν να δημιουργήσουν ισχυρές παρεμβολές και θόρυβο. Λύση τόσο στην ηλεκτρική σύζευξη όσο και στην μαγνητική αποτελεί η χρήση θωρακισμένων καλωδίων που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.5.3. Για καλύτερη κατανόηση του τρόπου θωράκισης από ηλεκτρικά πεδία βλέπε παράγραφο 5.4.

Η μαγνητική σύζευξη κυκλωμάτων συμβαίνει κυρίως μεταξύ καλωδίων όταν αυτά έχουν δημιουργήσει αλληλεπαγωγή  $M$  μεταξύ τους. Στο κεφάλαιο 3 είδαμε πως θέλουμε να αυξήσουμε τον συντελεστή  $M$  για την καλύτερη μεταφορά ενέργειας στο σύστημα επαγωγικής φόρτισης. Εδώ θέλουμε να επιτύχουμε το αντίθετο, να μειώσουμε δηλαδή το  $M$  προσέχοντας την τοποθέτηση των κυκλωμάτων και των καλωδίων ώστε να μην δημιουργούν βρόγχους και επίσης προσέχουμε μαγνητικά στοιχεία όπως πηνία να μην στρέφουν το μαγνητικό τους πεδίο προς τα κυκλώματα θύματα (σχήμα 5.16). Κατά την παρουσίαση μαγνητικής σύζευξης επάγονται ρεύματα των οποίων η πηγή είναι δύσκολο να εντοπιστεί.



σχήμα 5.16 : Μαγνητική σύζευξη μεταξύ δύο γραμμών

Για την αγωγή σύζευξη οι τρόποι αντιμετώπισης είναι οι εξής:

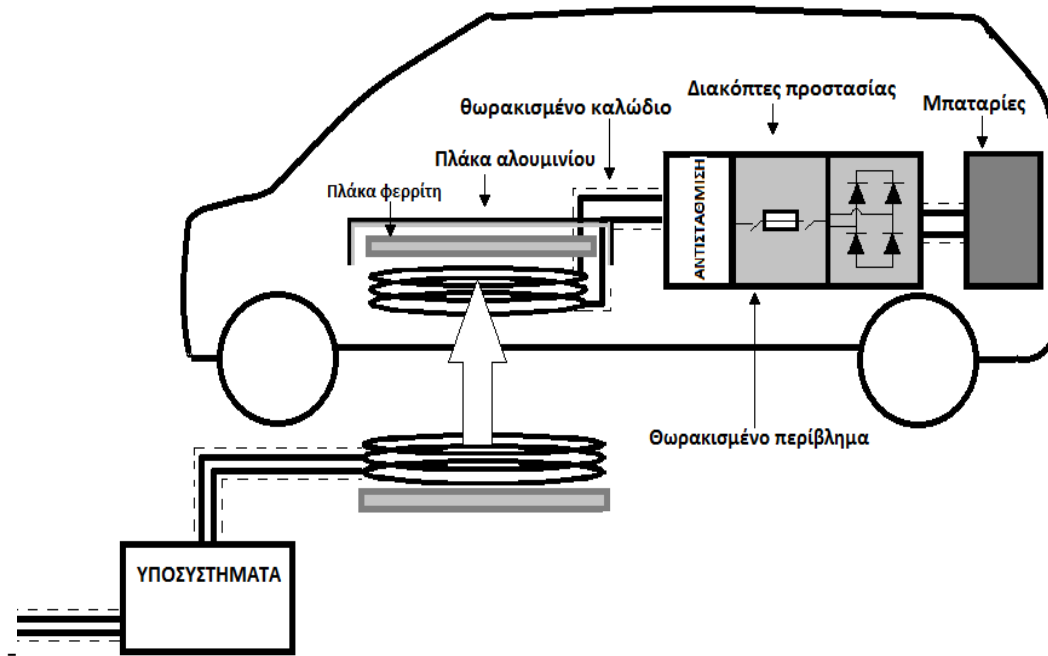
- Χρήση φίλτρων εισόδου στο Bandwidth των παρεμβολών ώστε να αποκόπτονται μόνο οι παρεμβολές
- Καλύτερη τοποθέτηση γείωσης (ενός σημείου αντί για πολλαπλή που συνηθίζεται σε πολλές συσκευές)

Πολύ σημαντικό στην αγωγή σύζευξη είναι να προσέχουμε την περαιτέρω σύζευξη παρεμβολών μέσω κλιμακωτών συστημάτων (cascaded systems) που μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερων παρεμβολών και χειρότερης ποιότητας σύστημα.

## 5.9 Συμπεράσματα θωράκισης

Το τελικό σύστημα επαγωγικής φόρτισης βρίσκεται στην παρουσία πολύ ισχυρών πηγών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Αυτοί είναι ο φορτιστής και οι μετατροπείς ισχύος. Συνεπώς η θωράκιση όλων των ευαίσθητων συστημάτων είναι απαραίτητη. Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζονται όλα τα μέτρα προφύλαξης που μπορούν να ληφθούν ώστε να προστατευτούν όλα τα ευαίσθητα κυκλώματα όπως επεξεργαστές. Αρχικά για τον μετασχηματιστή χρησιμοποιούνται πλάκες φερρίτη καλυμμένες με πλάκες αλουμινίου. Μέσω του φερρίτη περιορίζουμε την μαγνητική ροή και τέλος οι πλάκες αλουμινίου αποτρέπουν την ροή από το να εισέλθει στο εσωτερικό του αυτοκινήτου και άλλων συσκευών. Κάθε καλώδιο πρέπει να είναι θωρακισμένο καθώς οι συσκευές του συστήματος λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες και οι μεταβολές του ρεύματος είναι πολύ απότομες. Αυτό σημαίνει ότι τόσο τα καλώδια εκπέμπουν ισχυρή ακτινοβολία όσο και οι συσκευές μετατροπής ισχύος που λόγω της μεγάλης διακοπτικής συχνότητας που παρουσιάζουν εισάγουν θόρυβο εντός των γραμμών. Συνεπώς τα καλώδια οφείλουν να είναι θωρακισμένα. Το σύστημα δεν χρειάζεται ιδιαίτερα LC φίλτρα για την απομάκρυνση του θορύβου εντός των γραμμών εξαιτίας της παρεμβολής που δημιουργεί ο αντιστροφέας καθώς τα συστήματα αντιστάθμισης του συστήματος μεταφοράς παίζουν αυτόν τον ρόλο. Οι μπαταρίες του συστήματος πρέπει να είναι απολύτως προστατευμένες από κάθε

είδους παρεμβολή καθώς αυτή μπορεί να αυξήσει σημαντικά την θερμοκρασία της μπαταρίας και να μειώσει την διάρκεια ζωής της. Τέλος κάθε συσκευή πρέπει να είναι καλυμμένη με κάποιο περίβλημα αλουμινίου που θα δημιουργεί κλωβό Faraday και που θα προστατεύει το εσωτερικό της. Όλες οι μέθοδοι και τα στοιχεία σχεδίασης που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους πρέπει να ληφθούν σοβαρά για την προστασία του συστήματος και των χρηστών του από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Πιο συγκεκριμένα:



σχήμα 5.17 : Θωρακισμένο σύστημα επαγωγικής φόρτισης

- Κατά την σχεδίαση των ηλεκτρονικών ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου τόσο τα ηλεκτρονικά ισχύος του αυτοκινήτου, όσο και το δευτερεύον του μετασχηματιστή, πρέπει να έχουν την μεγαλύτερη δυνατή απόσταση από τους επιβάτες. Το ίδιο ισχύει και για τα καλώδια.
- Κατά την σχεδίαση των ηλεκτρονικών επιλέγεται είτε υψηλή τάση, είτε υψηλά ρεύματα. Ανάλογα με την επιλογή τοποθετείται θωράκιση με κλωβό Faraday για τα ηλεκτρικά πεδία και θωράκιση με φύλλα φερρίτη για τα μαγνητικά, κυρίως κάτω από τις θέσεις των επιβατών. Σε περίπτωση που ο αντιστροφέας του αυτοκινήτου χρησιμοποιεί SiC τρανζίστορ που λειτουργούν με υψηλές τάσεις και ρεύματα συχνότητας μεγαλύτερης των 100kHz χρειάζονται και τα δυο είδη θωράκισης.
- Κατά την τοποθέτηση των εξαρτημάτων πρέπει να δίνεται βάρος και στην διεύθυνση που κοιτάνε τα εξαρτήματα, δηλαδή τα σημεία διασύνδεσης καλωδίων και οι οπές των συσκευών πρέπει να είναι όσο πιο δυνατόν μακριά από τους επιβάτες.
- Τα καλώδια όπως έχει προαναφερθεί, πρέπει να είναι όσο πιο κοντά γίνεται εκτός αν αυτό τα φέρνει πιο κοντά στους επιβάτες.

- Γενικότερα δεν πρέπει να εγκαθίστανται συσκευές που παράγουν μαγνητικά πεδία κάτω από τις θέσεις των επιβατών. Ειδικά ο μετασχηματιστής καθώς είναι πολύ πιθανό ο οδηγός να βρίσκεται εντός του αυτοκινήτου κατά την διάρκεια της φόρτισης.
- Είναι πολύ σημαντικό τα επαγόμενα ρεύματα στο chassis του αυτοκινήτου να είναι εντός των επιτρεπόμενων τιμών (πίνακας 5.3) καθώς

Για τα καλώδια πιο συγκεκριμένα:

- 1) Στα καλώδια που περνάει DC ρεύμα, πρέπει να τοποθετούνται μεταξύ τους τυλιγμένα σε μορφή διπλής έλικας σε αντίθετες κατευθύνσεις έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο του ενός να ακυρώνει το άλλο.
- 2) Τα τριφασικά καλώδια πρέπει να τοποθετούνται τυλιγμένα μεταξύ τους ώστε να ελαχιστοποιείται το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο.
- 3) Όπως περιγράφηκε στην παράγραφο με την θωράκιση καλωδίων, η τοποθέτηση ενός λεπτού φύλλου φερρίτη γύρω από τα καλώδια αποτελεί μία αποτελεσματική και οικονομική μορφή θωράκισης από την EMI.
- 4) Τα καλώδια δεν θα πρέπει να τοποθετούνται έτσι ώστε να δημιουργούν βρόγχους.

## **Κεφάλαιο 6 : Εγκατάσταση του συστήματος φόρτισης για εσωτερική και εξωτερική στάθμευση**

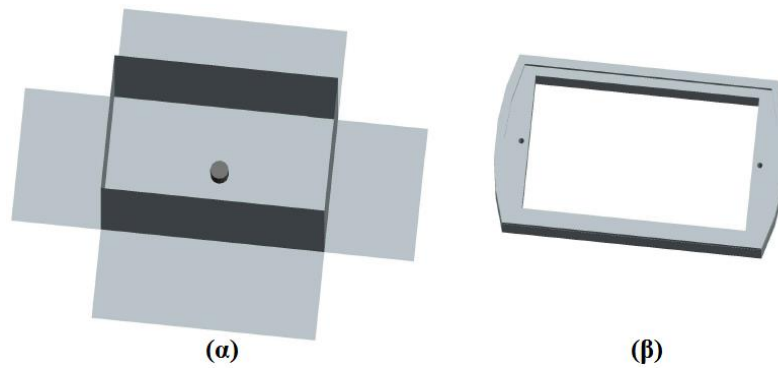
### **6.1 Εισαγωγή**

Μέχρι τώρα έχουμε δει το σύστημα φόρτισης από την πλευρά της διεθνούς έρευνας, της σχεδίασης των ηλεκτρονικών τμημάτων του και την ολοκλήρωση του αντιστροφέα του. Εκτός αυτού είδαμε τις διεθνείς προδιαγραφές που πρέπει να πληρούνται ώστε το σύστημα με όλα του τα στοιχεία να είναι ασφαλή στην χρήση για όλους τους χρήστες. Πλέον μένει να εφαρμόσουμε όσα μάθαμε για τον αντιστροφέα και για τον μετασχηματιστή και να προτείνουμε ένα περίβλημα που θα στεγάζει τον αντιστροφέα που θα βρίσκεται υπόγεια καθώς και να προτείνουμε έναν τρόπο εγκατάστασης του συστήματος επαγωγικής φόρτισης που ανέπτυξε το εργαστήριο ηλεκτρονικών ισχύος του ΕΜΠ.

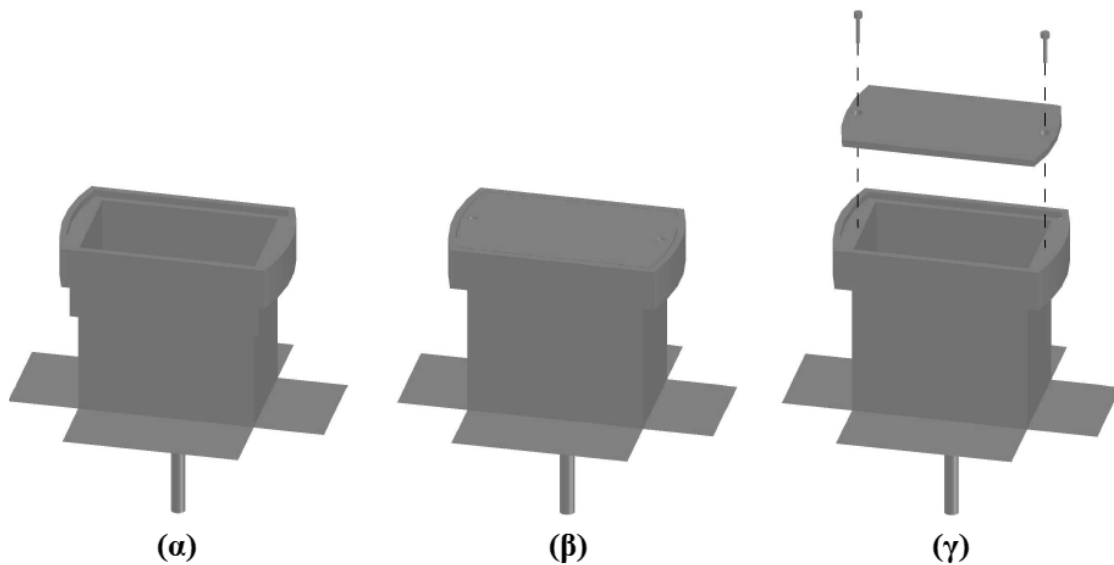
### **6.2 Εγκατάσταση αντιστροφέα υπογείως**

Ο αντιστροφέας που ελέγχει το πρωτεύον του μετασχηματιστή εγκαθίσταται σε ένα μεταλλικό κουτί σαν αυτό του σχήματος 6.1 (α). Το κουτί αυτό είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο αλουμίνιο και έχει την πάνω του πλευρά ανοικτή. Από εκεί θα γίνει δυνατή η τοποθέτηση του αντιστροφέα εντός του κουτιού. Το επόμενο πράγμα που παρατηρούμε είναι η ύπαρξη τεσσάρων μεταλλικών πλακών συγκολλημένα στον πάτο του μεταλλικού κουτιού. Ο σκοπός αυτών των κουτιών είναι αρχικά η ευστάθεια του κουτιού εντός της τρύπας στο έδαφος. Ο δεύτερος λόγος είναι η καλύτερη τοποθέτηση του τσιμέντου εντός της τρύπας. Τέλος παρατηρούμε ότι το κουτί έχει και μία μεταλλική τρύπα στο πάτο του, έτσι ώστε από εκεί να περνάνε τα καλώδια που το τροφοδοτούν και το ελέγχουν. Στο σχήμα 6.1 (β) βλέπουμε το δεύτερο τμήμα που αποτελεί την ολοκλήρωση του μεταλλικού περιβλήματος στο οποίο βρίσκεται η θύρα. Αυτό είναι πιο συμπαγές και συγκολλείται πάνω στο κουτί του σχήματος 6.1 (α) έτσι ώστε να δημιουργηθεί η διάταξη του 6.2 (β). Το δεύτερο τμήμα πρέπει να είναι πιο συμπαγές ώστε να προστατεύει την θύρα και για να έχει καλύτερη επαφή με το τσιμέντο. Η θύρα κλείνει με ισχυρές κοχλίες (σχήμα

6.2 (γ). Στην θύρα θα μπορούσε να υπάρχει και κάποια κλειδαριά για την καλύτερη φύλαξη της συσκευής.



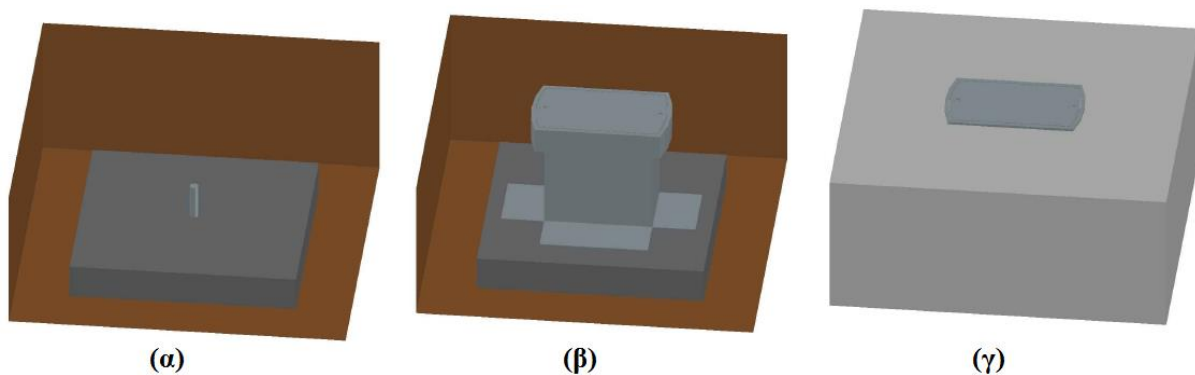
σχήμα 6.1 : (α) Μεταλλικό κουτί για τοποθέτηση του αντιστροφέα – (β) Μεταλλικό πλαίσιο που συγκρατεί τη θύρα



σχήμα 6.2 : (α) Ολοκληρωμένο μεταλλική περίφραξη για τοποθέτηση υπογείως – (β) Μεταλλική περίφραξη με τοποθετημένη θύρα – (γ) Μεταλλική περίφραξη με τοποθέτηση κοχλιών

Εντός της οπής που βρίσκεται στον πάτο της περίφραξης περνάει από μέσα ο σωλήνας που περιέχει τα καλώδια. Αυτός πρέπει να σφραγιστεί έτσι ώστε να μην εισχωρήσει νερό από τον πάτο προς την συσκευή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με χρήση κάποιας τσιμούχας που βοηθάει το βίδωμα και περεταίρω τη στεγανότητα του πλαισίου. Η διαδικασία τοποθέτησης ξεκινάει με το σκάψιμο της κατάλληλης τρύπας στο χώμα εκθέτοντας έτσι το σωλήνα με τα καλώδια που έχουν μόλις τοποθετηθεί. Στην συνέχεια όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3 (α) τοποθετείται χαλίκι γύρω από τον σωλήνα (το γκρι πλαίσιο της εικόνας) όπου και θα πατήσει η περίφραξη. Στην συνέχεια τοποθετείται η περίφραξη όπως φαίνεται στην εικόνα 6.3 (β) όπου και

σφραγίζεται η οπή των καλωδίων. Στο σχήμα 6.3 (γ) φαίνεται η τοποθέτηση του τσιμέντου έως ότου φτάσει μέχρι την θύρα. Το πλαίσιο του συγκρατεί την θύρα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μην επιτρέπει να εισχωρήσει τσιμέντο στα ανοίγματα της θύρας. Αφού αυτό στεγνώσει, τοποθετείται και συνδέεται ο αντιστροφέας και σφραγίζεται η θύρα. Η θύρα δεν κλείνει απλώς αλλά σφραγίζεται, δηλαδή μπορεί με κάποια σιλικόνη να κλείσουν ερμητικά όποια ανοίγματα. Επιπρόσθετο μέτρο προστασίας είναι μία αγώγιμη τσιμούχα μεταξύ θύρας και πλαισίου που εξασφαλίζει την στεγανότητα της συσκευής καθώς και την ολοκλήρωση του κλωβού Faraday γύρω από αυτήν. Τελικό στάδιο στην τοποθέτηση του αντιστροφέα αποτελεί η τοποθέτηση κάπου στρώματος ίσως fiberglass και κόλληση του πάνω από το μπετό όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3 (δ). Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται μηδενική πρόσβαση στην θύρα και εκτός αυτού κάτω από το πολυμερές μπορεί να τοποθετηθεί και το πρωτεύον του μετασχηματιστή αν αυτό αφορά επίπεδα πηνία. Το πρωτεύον του μετασχηματιστή μπορεί κάλλιστα να είναι καλυμμένο μέσα σε κάποιο πολυμερές που θα ήταν τμήμα του καλύμματος που περνάει πάνω από τον αντιστροφέα. Με αυτόν τον τρόπο τοποθετείται το δευτερεύον κοντά στο κύκλωμα τροφοδοσίας του και επιτυγχάνει την IP68 αξιολόγηση. Πάνω από αυτό το κάλυμμα θα μπορούν τα αυτοκίνητα να διαβαίνουν ανενόχλητα, δηλαδή το σύστημα θα είναι τοποθετημένο δίπλα από κάποιο πεζοδρόμιο. Ο έλεγχος της φόρτισης θα μπορεί να γίνει ασύρματα έχοντας κάποια κεραία τοποθετημένη σε κάποιον στύλο διακριτικά κάπου στο πεζοδρόμιο και που θα συνδέεται απευθείας με το αυτοκίνητο μέσω Bluetooth ή Wifi. Το σύστημα θα μπορεί να είναι συνδεδεμένο ώστε να πραγματοποιεί τραπεζικές συναλλαγές ή να φορτίζει μέσω κάποιας συνδρομής για περισσότερη ασφάλεια.



σχήμα 6.3 : Βήματα τοποθέτησης αντιστροφέα : (α) Τοποθέτηση χαλκιού (γκρι πλαίσιο) – (β) Τοποθέτηση περιβλήματος – (γ) Τοποθέτηση τσιμέντου – (δ) Επικόλληση καλύμματος πολυμερούς για προστασία (συνεχίζεται)





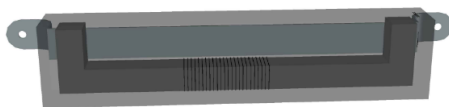
(δ)

σχήμα 6.3 : Βήματα τοποθέτησης αντιστροφέα : (α) Τοποθέτηση χαλκιού (γκρι πλαίσιο) – (β) Τοποθέτηση περιβλήματος – (γ) Τοποθέτηση τσιμέντου – (δ) Επικόλληση καλύμματος πολυμερούς για προστασία

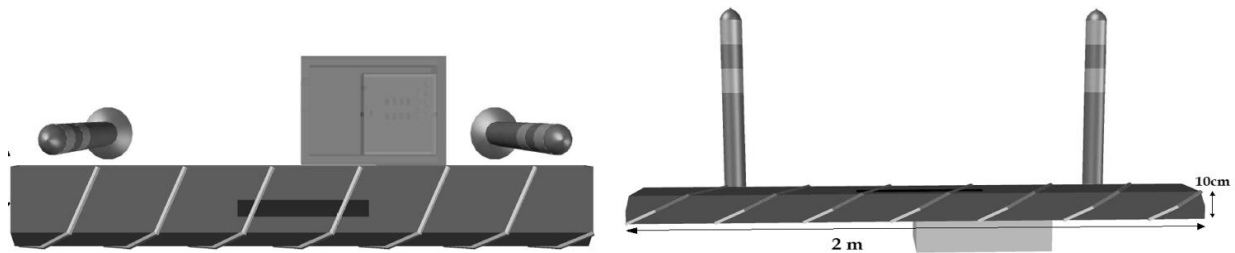
### 6.3 Εγκατάσταση συστήματος Π-I

Αφού είδαμε πως μπορεί να τοποθετηθεί μία διάταξη επίπεδων πηνίων, μπορούμε να προχωρήσουμε στην διάταξη Π-I, καθώς το γεγονός ότι μπορεί να εγκατασταθεί στα υπάρχοντα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που δεν σχεδιάστηκαν για επαγωγική φόρτιση αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα της διάταξης.

Αρχικά ο μετασχηματιστής τοποθετείται μέσα σε κάποιο κάλυμμα πολυμερούς (oxy cover) με τέτοιο τρόπο ώστε τα δύο άκρα του πυρήνα να είναι οριακά καλυμμένα από το εποξύ ενώ το υπόλοιπο σώμα είναι τοποθετημένο εντός του καλύμματος (σχήμα 6.4). Αυτή η μέθοδος τοποθέτησης του πρωτεύοντος δίνει την δυνατότητα μόνωσης όλων των στοιχείων από το περιβάλλον τους μειώνοντας την επαφή με άλλα στοιχεία που ενδεχομένως θα δημιουργήσουν αγωγή μονοπάτια και θα διαταράξουν την ηλεκτρομαγνητική ροή. Εκτός αυτού, ο μετασχηματιστής αποκτά απόλυτη ανεκτικότητα στην υγρασία και στο νερό κάνοντάς το ιδανικό για εξωτερικές εφαρμογές, αλλά και για εφαρμογές που αφορούν φορτίσεις σε υδάτινο περιβάλλον. Για την οικιακή εφαρμογή δεν υπάρχει η ανάγκη για την επικάλυψη.



σχήμα 6.4 : Πρωτεύον μετασχηματιστή καλυμμένο σε εποxy για εξωτερική χρήση



σχήμα 6.5 : Σταθμός φόρτισης στάθμευσης για εξωτερική χρήση με τις προτεινόμενες διαστάσεις

Για την τοποθέτηση του πρωτεύοντος μετασχηματιστή προτείνεται η τοποθέτησή του εντός μίας μπάρας από μπετόν, παρόμοιο με σαμαράκια που βρίσκονται σε παρκινγκ για την βέλτιστη τοποθέτηση των αυτοκινήτων. Σε αυτήν την περίπτωση το σαμαράκι εξυπηρετεί διπλό σκοπό, ευθύνεται για την σωστή τοποθέτηση του αυτοκινήτου και προστατεύει τον μετασχηματιστή. Δύο πλαστικοί κρουνοί βρίσκονται ώστε να ευθυγραμμίσουν τον οδηγό για την σωστή τοποθέτηση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή με το πρωτεύον. Η διάταξη περιέχει ένα κενό στο κέντρο που περιέχει τον μετασχηματιστή και είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να παρέχει μηχανική υποστήριξη και προστασία στον μετασχηματιστή. Το μπετό βρίσκεται γύρω από το πηνίο και όχι από πάνω του καθώς δεν θέλουμε να θωρακίζει το μαγνητικό πεδίο. Τέλος όλο το σαμαράκι καλύπτεται με μία στρώση από πολυμερές το οποίο δίνει την εντύπωση ομοιογένειας.

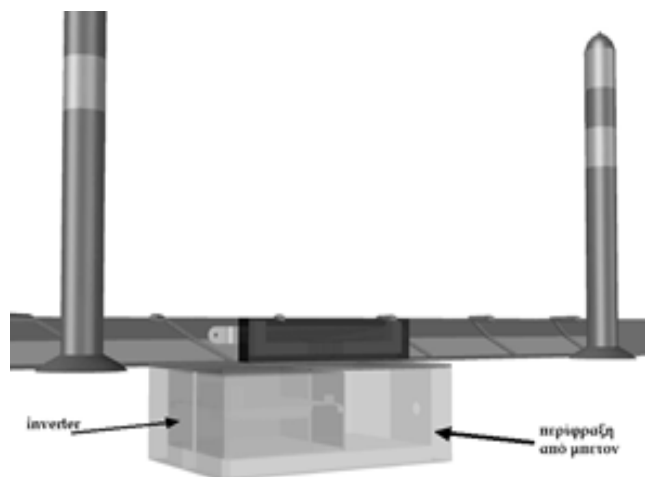
Η ομοιογένεια αυτή εκτός από λόγους αισθητικούς, τοποθετείται και για λόγους ασφαλείας, καθώς κάποιος επιτήδειος δεν θα αντιληφθεί την ύπαρξη ηλεκτρονικών εντός της μπάρας και είναι έτσι λιγότερο πιθανή κάποια κακοπροαίρετη ενέργεια. Το σαμαράκι πρέπει να είναι από μπετό καθώς οποιοδήποτε άλλο υλικό θα έχει χαμηλότερο χρόνο ζωής εξαιτίας του βάρους των αυτοκινήτων. Το μπετό ενισχύει την προστασία του μετασχηματιστή καθώς για την αφαίρεσή του θα χρειαστούν βαριά εργαλεία που θα δημιουργήσουν πολύ ήχο και θα δημιουργήσουν δονήσεις που θα ενεργοποιήσουν συστήματα συναγερμού ενδεχομένως τοποθετημένα στην συσκευή. Οι διαστάσεις της διάταξης του σχήματος 6.5 είναι 2 μέτρα πλάτος και 10 εκατοστά ύψος ώστε να είναι πιο πλατιά από οποιοδήποτε όχημα που σκοπεύει να εξυπηρετήσει και να χωράει από κάτω τους.

Τα θετικά χαρακτηριστικά αυτής της διάταξης είναι τα εξής:

- Προστατεύει το πρωτεύον του μετασχηματιστή
- Τοποθετεί το πρωτεύον πάνω από το έδαφος κοντά στο αμάξι
- Μειώνει την πιθανότητα κλοπής

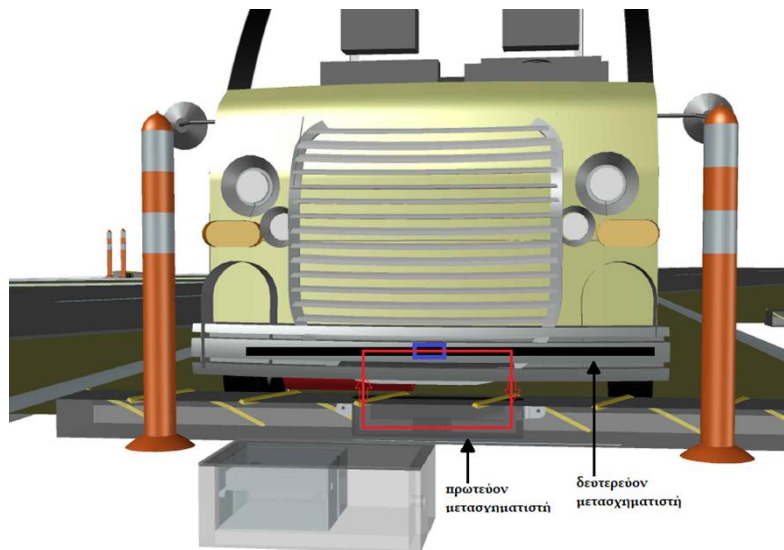
Το δεύτερο «κουτί» που φαίνεται στην εικόνα 4.29 πρόκειται για μία υπόγεια περίφραξη από μπετόν η οποία στεγάζει τον αντιστροφέα. Η περίφραξη περιέχει οπές για την είσοδο καλωδίων και κλείνει με μια μεταλλική θύρα που περιέχει κλειδαριά. Τόσο η οπή όσο και η θύρα περιέχουν τσιμούχες (gasket) ώστε να είναι κλεισμένες αεροστεγώς. Εντός της περίφραξης βρίσκεται ένα κουτί από αλουμίνιο το οποίο περιέχει τον αντιστροφέα και παράδειγμα

διαστάσεων δίνεται στο κεφάλαιο 4. Το γεγονός ότι ο αντιστροφέας βρίσκεται υπόγεια όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6 δημιουργεί κάποια προβλήματα στην θερμοδυναμική ανάλυσή του καθώς λόγω του εδάφους υπάρχει μόνο ένας τρόπος διαφυγής της θερμότητας που είναι μέσω της θύρας. Η θύρα όντας μεταλλική έχει χαμηλή θερμική αντίσταση με αποτέλεσμα την ικανότητα αποβολής της θερμότητας. Όμως η συσκευή αντιμετωπίζει το πρόβλημα ότι το  $T_{\text{ambient}}$  (θερμοκρασία χώρου) είναι αρκετά μεγάλο με αποτέλεσμα να χρειάζεται αποτελεσματικότερο τρόπο ψύξης. Για αυτήν την περίπτωση προτείνεται η χρήση κάποιας συσκευής που αξιοποιεί το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο στην μορφή του Peltier effect μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα σε διαφορά θερμοκρασίας και είναι ικανό με την κατάλληλη ψύκτρα, να ψύξει τα ηλεκτρονικά της τάξεως ισχύος που χρησιμοποιούμε. Κάτι που μας ενδιαφέρει αρκετά επειδή τυχαίνει η συσκευή να βρίσκεται υπόγεια είναι το IP rating της συσκευής δηλαδή ο δείκτης εισροής ξένων αντικειμένων εντός της συσκευής και ειδικά της υγρασίας. Ο δείκτης περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Για την αποτροπή της υγρασίας έχουν τοποθετηθεί τσιμούχες σε όλα τα σημεία εισόδου εξόδου και σαν δεύτερη γραμμή άμυνας έχει διατηρηθεί το αλουμινένιο περίβλημα της αρχικής συσκευής. Σκοπός είναι η δημιουργία μιας βαθμονόμησης IP68 ώστε να μην επηρεάζεται ούτε από το νερό, ούτε και από σκόνη και χώμα. Όπως είναι γνωστό όμως κάθε χώρος περιέχει στον αέρα ένα ποσό υγρασίας, και δεν γίνεται παρά να ερωτηθούμε τι μπορεί να συμβεί με αυτή την υγρασία όταν είναι χειμώνας και δύναται να υγροποιηθεί. Η απάντηση μπορεί να δοθεί από το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο καθώς το Peltier μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως υποσύστημα αφύγρανσης εντός της συσκευής. Έτσι μέσα σε ένα ειδικό δοχείο μπορεί να εισέρχεται το νερό, να υγροποιείται και να αποθηκεύεται. Τέλος σε αυτό το σύστημα θα μπορούσε να τοποθετηθεί ένας αισθητήρας ο οποίος όταν ανιχνεύσει αρκετή ποσότητα νερού λανθασμένα για την εποχή, παύει την λειτουργία της συσκευής και δίνει σήμα σε κάποιον τεχνικό για διαρροή στο περίβλημα.



σχήμα 6.6 : Τοποθέτηση του αντιστροφέα πλησίον του αυτοκινήτου

Αναφέρθηκε ότι το σαμαράκι-πρωτεύον χρησιμεύει για την ευθυγράμμιση του πρωτεύοντος με το δευτερεύον. Επεξηγώντας το λίγο παραπάνω, η διάταξη για να λειτουργήσει προϋποθέτει στο πρωτεύον της διάταξης να τοποθετηθεί το δευτερεύον έτσι ώστε να αρχίσει η ροή ισχύος. Το σχήμα 6.7 επεξηγεί πλήρως την λειτουργία της διάταξης.

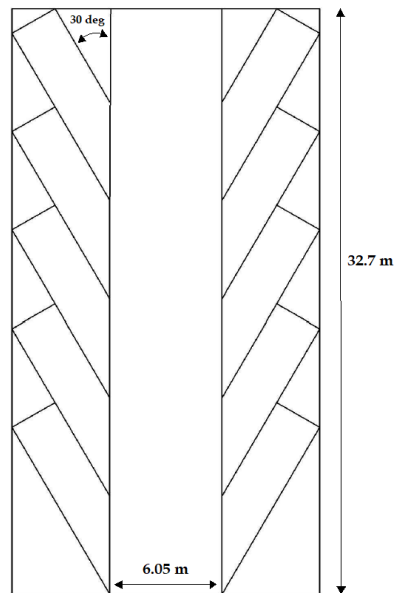


σχήμα 6.7 : Διάταξη μαγνητικής ροής

Η μαγνητική ροή που δημιουργείται από το πηνίο του πρωτεύοντος ρέει μέσω μπαρών φερρίτη και εισέρχεται στο πηνίο του δευτερεύοντος δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα που φορτίζει την μπαταρία. Η ύπαρξη της μπάρας-σαμαριού είναι ικανή να σταματήσει το αυτοκίνητο ώστε το δευτερεύον να ευθυγραμμιστεί με το πρωτεύον. Στην συνέχεια επεξηγείται που ακριβώς στο αυτοκίνητο πρέπει να τοποθετηθεί το δευτερεύον του μετασχηματιστή.

#### 6.4 Σχεδίαση εξωτερικού χώρου στάθμευσης για πόλη

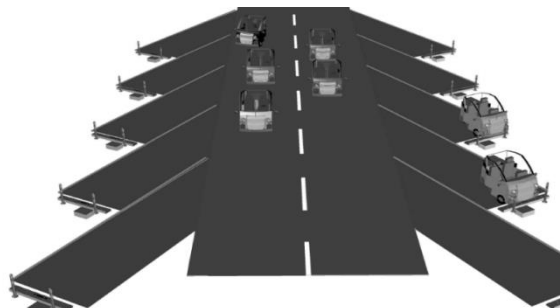
Η τοποθέτηση των θέσεων στάθμευσης θεωρείται προτιμότερο να γίνει υπό κλίση και οι λόγοι που το δικαιολογούν είναι πολλοί. Η διάταξη των εικόνων 6.8 και 6.9 απεικονίζει την κάτοψη του χώρου στάθμευσης των ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων υπό κλίση 30 μοιρών για ένα δρόμο 2 λωρίδων ίδιας κυκλοφορίας μήκους 33m [29]. Συνηθίζεται στους ελληνικούς δρόμους τα αυτοκίνητα να σταθμεύουν παράλληλα στην δρόμο μειώνοντας έτσι αρκετά την χωρητικότητα του δρόμου. Συνεπώς αυξάνουμε σημαντικά τον αριθμό των θέσεων στάθμευσης σε έναν δρόμο αυξάνοντας λίγο το πλάτος του δρόμου.



σχήμα 6.8 : Παράδειγμα κάτοψης χώρου στάθμευσης για δρόμο με 2 λωρίδες

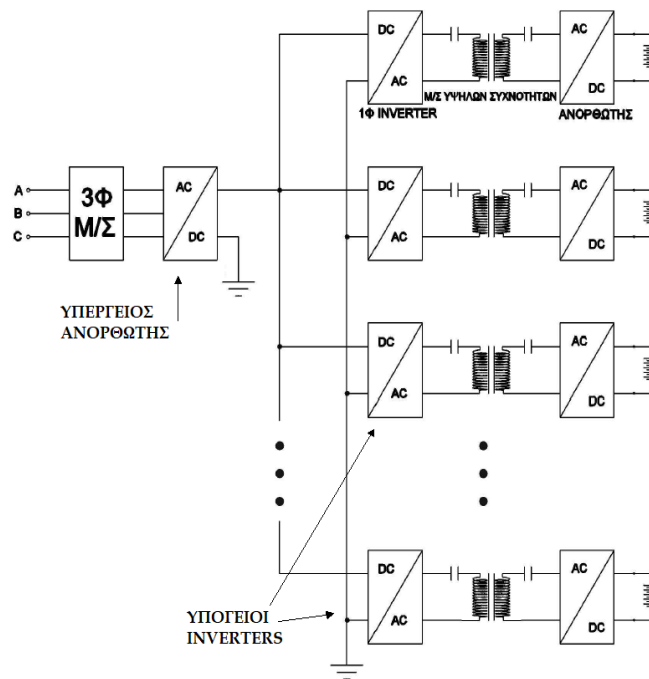
Η στάθμευση περισσότερων αυτοκινήτων πιο κοντά μεταξύ τους αποτελεί μεγάλο κέρδος καθώς:

- Φυλάσσονται ευκολότερα τα ηλεκτρονικά και τα αυτοκίνητα
- Το παρκάρισμα υπό κλίση 30 μοιρών είναι ευκολότερο και πετυχαίνεται η ευθυγράμμιση του μετασχηματιστή ευκολότερα-ευκολότερη είσοδος
- Περισσότερες θέσεις σημαίνει μεγαλύτερο κέρδος
- Μικρότερο μήκος καλωδίων και υλικού, οι αντιστροφείς συνδέονται και επικοινωνούν μεταξύ τους
- στην στάθμευση υπό 30 μοίρες κλίση απομακρύνεται ο κίνδυνος διπλοπαρκαρίσματος και κάποιο αυτοκίνητο με τον πίσω προφυλακτήρα, να αποτρέψει την στάθμευση στην εν λόγω θέση



σχήμα 6.9 : Πρόσωση χώρου στάθμευσης για δρόμο με 2 λωρίδες, ρεαλιστική αναπαράσταση

Η εύρυθμη λειτουργία του φορτιστή επιτυγχάνεται με την σύνδεση όλων των μεμονωμένων στοιχείων σε ένα κεντρικό σύστημα επεξεργασίας το οποίο κατά το μάλλον ή ήττον ελέγχει ολόκληρο το σύστημα. Προτείνεται λοιπόν, για την ενεργοποίηση της φόρτισης, σύνδεση με Bluetooth του κεντρικού συστήματος με το Bluetooth του αμαξιού ή με το κατάλληλο app του smartphone του χρήστη. Μέσω αυτού ο χρήστης θα μπορεί να πληρώσει για την στάθμευση χωρίς μετρητά με το πάτημα ενός κουμπιού. Προϋποτίθεται η ύπαρξη μιας συσκευής η οποία θα περιέχει εκτός της κεραίας, τον κεντρικό ανορθωτή που θα συνδέεται στο δίκτυο καθώς και μόντεμ για σύνδεση σε έναν κεντρικό σύστημα και επεξεργαστή που θα ελέγχει τοπικά τους φορτιστές για μεγαλύτερη ταχύτητα. Κάθε αμάξι πρέπει να είναι εξοπλισμένο με κάποιο σύστημα επικοινωνίας, είτε Wifi ή Bluetooth που θα είναι ενεργά κατά την διάρκεια της φόρτισης ώστε να επιτυγχάνεται ένα κλειστό σύστημα με ανάδραση που θα ελέγχει την εξέλιξη της φόρτισης. Για παράδειγμα αν είναι η φόρτιση σε εξέλιξη και η μπαταρία δεν απορροφά ενέργεια τότε το σύστημα θα ελέγχει αν έχει ενεργοποιήσει λάθος φορτιστή και αν δεν βρει σφάλμα να διακόψει την φόρτιση καθώς ένα από τα παρακάτω ενδεχόμενα είναι αληθή: το δευτερεύον δεν έχει ευθυγραμμιστεί σωστά, το σύστημα δεν έχει συγχρονιστεί ή τα στοιχεία του δευτερεύοντος δεν ακολουθούν τις σωστές προδιαγραφές.



σχήμα 6.10 : Σχεδιάγραμμα ολικού συστήματος φορτιστών

Η ανάγκη για ένα κεντρικό Bluetooth υπάρχει διότι λόγω της παρεμβολής που δημιουργεί ο μετασχηματιστής υπάρχει κίνδυνος αδυναμίας σύνδεσης αν υπάρχει μόνο μία τοπική ασύρματη επικοινωνία μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Εκτός αυτού όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στην περιφέρεια του πρωτεύοντος, είναι θωρακισμένα από EMI και RFI καθώς και σφραγισμένα για προστασία από το νερό. Έτσι οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η κεραία δεν μπορεί να είναι στο κουτί του σχήματος 6.7. Συνεπώς κάθε αντιστροφείας είναι συνδεδεμένος ενσύρματα

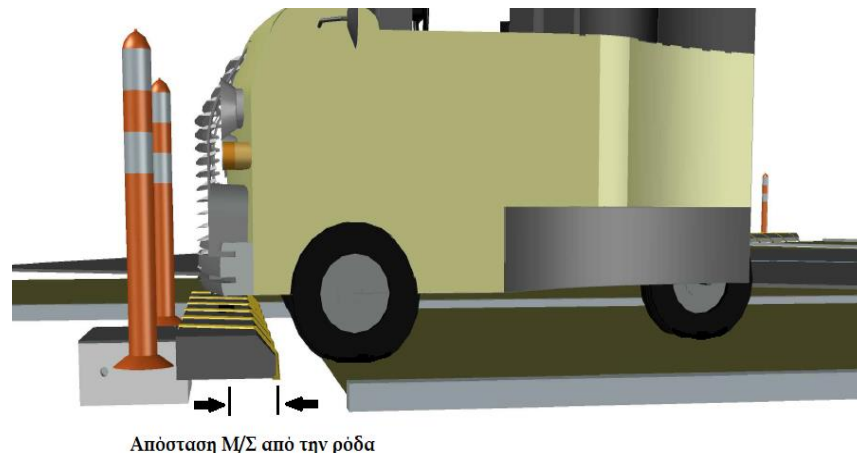
με τον κεντρικό επεξεργαστή ο οποίος διαθέτει την κεραία μέσω της οποίας συνδέεται τελικά με το κάθε αυτοκίνητο ξεχωριστά.

Η τελική διάταξη με όλα τα στοιχεία που περιγράφηκαν προηγουμένως θα πρέπει να τοποθετηθούν σε μία περίφραξη εξωτερικού χώρου που θα τα προστατεύει. Η περίφραξη αυτή είναι η μόνη που δεν είναι υπόγεια καθώς περιέχει τον παρακάτω κεντρικό ανορθωτή, που σε πλήρη λειτουργία ενδέχεται να χειρίζεται αρκετά kW ενέργειας (σχήμα 6.10).

### **6.5 Προδιαγραφή για την τοποθέτηση του δευτερεύοντος**

Η σχεδίαση της μπάρας-σαμαρακιού έχει σκοπό να σταματήσει το αυτοκίνητο στην θέση στην οποία χρειάζεται με σκοπό την ευθυγράμμιση του πρωτεύοντος με το δευτερεύον. Το πρόβλημα έγκειται στην τοποθέτηση του δευτερεύοντος στο αυτοκίνητο καθώς αν τοποθετηθεί στο λάθος σημείο, όταν το αυτοκίνητο τοποθετηθεί από την μπάρα-σαμαράκι δεν θα ευθυγραμμίζεται το αμάξι και τελικά δεν θα φορτιστεί. Το να εγκατασταθεί το δευτερεύον στο λάθος σημείο είναι πολύ εύκολο αν δεν έχουν δοθεί οι κατάλληλες οδηγίες στα συνεργεία και τις αντιπροσωπείες αφού κάθε αμάξι έχει διαφορετικό μέγεθος και σχεδιασμό. Για να αποτραπεί το πρόβλημα προτείνεται μία προδιαγεγραμμένη απόσταση από το μπροστινό μέρος της ρόδας μέχρι το δευτερεύον ίση με την απόσταση του άκρου της μπάρας με τον μετασχηματιστή σχήμα 6.11. Αυτή η διάταξη έχει πάρα πολλά θετικά και είναι καλύτερη από οποιαδήποτε άλλη έχει προταθεί καθώς:

- το δευτερεύον δεν χρειάζεται να τοποθετηθεί σε κάποιο συγκεκριμένο ύψος εντός του chassis με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται να περνά το μαγνητικό πεδίο από μέσα του, καθώς είναι από αλουμίνιο και θωρακίζει το μαγνητικό πεδίο.
- δεν χρειάζεται αυτόματο πρόγραμμα ρύθμισης θέσης καθώς το αμάξι όταν σταματήσει, ο μετασχηματιστής είναι ευθυγραμμισμένος. Επίσης ο οδηγός γνωρίζει ότι είναι σε κατάλληλη θέση κοιτώντας την κατάλληλη σηματοδότηση.
- Η διάταξη αυτή επιτρέπει την εύκολη εγκατάσταση συστήματος φόρτισης που είναι πολύ εύχρηστη σε γκαράζ πολυκατοικιών και παρουσιάζεται παρακάτω.

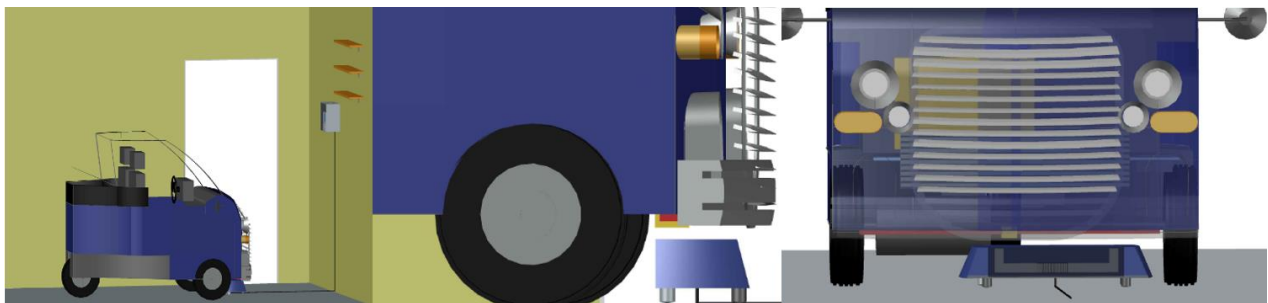


Απόσταση Μ/Σ από την ρόδα

σχήμα 6.11 : Προδιαγραφή απόστασης δευτερεύοντος από την ρόδα

Η ενδεδειγμένη χρήση της μπάρας φόρτισης εξαρτάται πάντα και από τον οδηγό, να προσέχει να μην παρκάρει εις γνώσιν του στραβά. Η τοποθέτηση του δευτερεύοντος κάτω από το αμάξι είναι πολύ ευκολότερη καθώς μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κάποιο συνεργείο ακόμα και στην Ελλάδα σε συνεννόηση πάντα με την αντιπροσωπεία και την αυτοκινητοβιομηχανία.

## 6.6 Σύστημα επαγωγικής φόρτισης για οικιακή χρήση

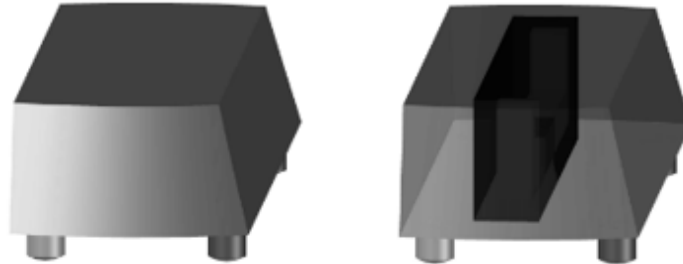


σχήμα 6.12 : Σύστημα επαγωγικής φόρτισης σε οικιακό χώρο στάθμευσης

Σκοπός της οικιακής συσκευής είναι να φορτίσει το ηλεκτροκίνητο αυτοκίνητο κυρίως εντός του γκαράζ της πολυκατοικίας ή μίας μονοκατοικίας όπως φαίνεται στο σχήμα 6.12. Στα υπόγεια γκαράζ πολλών πολυκατοικιών ο χώρος είναι περιορισμένος με αποτέλεσμα η ύπαρξη πολλών καλωδίων στον χώρο να είναι ενοχλητική και επικίνδυνη. Η εγκατάσταση μιας συσκευής στο πάτωμα παρόμοια με αυτή του σχήματος 6.13 αφαιρεί την διαδικασία σύνδεσης και αποσύνδεσης της συσκευής η οποία είναι επικίνδυνη λόγω κινδύνου ηλεκτροπληξίας καθώς και λόγω κινδύνου ατυχήματος πάνω στο αιωρούμενο ή παρατημένο καλώδιο. Με την ύπαρξη πολλών αυτοκινήτων στην περιοχή ο κίνδυνος για τους χρήστες πολλαπλασιάζεται. Η οικιακή συσκευή τοποθετείται με τον ίδιο τρόπο στο έδαφος, πάνω από την οποία οδηγείται το ηλεκτρικό αυτοκίνητο και ξεκινάει η φόρτιση. Καθώς σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει το



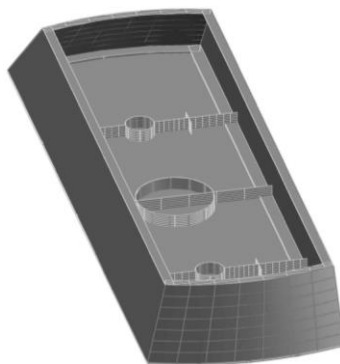
σαμαράκι ώστε να βοηθήσει τον οδηγό, ο χρήστης σε περίπτωση κακής ευθυγράμμισης θα μπει σε πειρασμό να μετακινήσει την συσκευή. Για τον λόγο αυτό, θα ήταν καλό να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα αυτόματου παρκαρίσματος που θα οδηγήσει το δευτερεύον πάνω στο πρωτεύον και να αποτρέψει την ανθρώπινη παρέμβαση. Για την αποτροπή οποιουδήποτε ατυχήματος προτείνεται η εγκατάσταση αισθητήρα φόρτισης που θα διακόψει κάθε λειτουργία του μετασχηματιστή αν το σύστημα δεν φορτίζει σωστά.



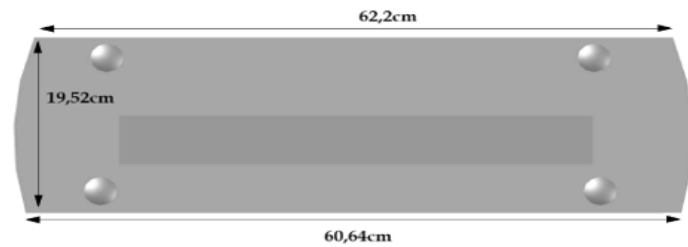
*σχήμα 6.13 : Περίβλημα πρωτεύοντος οικιακής χρήσης συσκευής με τοποθετημένο το πρωτεύον του μετασχηματιστή*

Η συσκευή πρέπει να σχεδιαστεί με στόχο την διευκόλυνση του οδηγού. Για να πραγματοποιηθεί αυτό θα πρέπει θεωρητικά την στιγμή που ο οδηγός μπαίνει στο γκαράζ και βγει από το αυτοκίνητό του να ολοκληρώνεται η απαίτηση από τον ίδιο να ασχοληθεί περεταίρω με την φόρτιση. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό απόλυτα είναι αν κατά την είσοδο του αυτοκινήτου στο γκαράζ ένα σύστημα αυτόματης στάθμευσης αναλάβανε την στάθμευση του αυτοκινήτου και κατά επέκταση την ευθυγράμμιση των πηνίων.

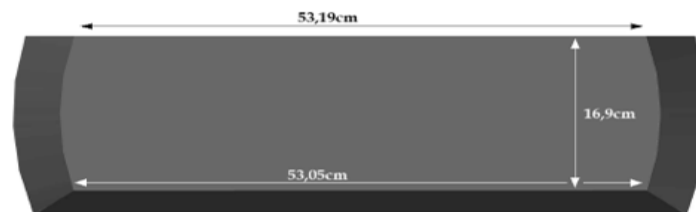
Η συσκευή είναι κατασκευασμένη από ABS plastic και οι διαστάσεις της μπορεί να είναι αυτές του σχήματος 6.15 με εσωτερικό στο οποίο μπορεί να τοποθετηθεί ο μετασχηματιστής όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.14.



*σχήμα 6.14 : Εσωτερικό συσκευής με τα στηρίγματα για την τοποθέτηση του μετασχηματιστή*



(α)



(β)



(γ)

σχήμα 6.15 : Παράδειγμα διαστάσεων περιβλήματος συσκευής φόρτισης για οικιακή χρήση : (α)

Διαστάσεις βάσης – (β) Διαστάσεις άνω τμήματος – (γ) Διαστάσεις ύψους

Το υλικό του περιβλήματος είναι όπως αναφέρθηκε από πλαστικό, το οποίο δεν εμποδίζει το μαγνητικό πεδίο να το διαπεράσει. Εκτός αυτού μπορεί να εγκατασταθεί κεραία ώστε να επιτευχθεί το αυτόματο παρκάρισμα του αυτοκινήτου. Το ύψος της συσκευής είναι 13,3 εκατοστά και χωράει κάτω από σχεδόν όλα ηλεκτρικά αυτοκίνητα επιτυγχάνοντας μάλιστα να είναι όσο πιο κοντά στο δευτερεύον γίνεται για μεγαλύτερη απόδοση. Η συσκευή αποτελείται από τρία κομμάτια, πακτωμένα μεταξύ τους με κοχλίες:

- Τον πάτο ο οποίος συγκρατεί τον μετασχηματιστή
- Τα τοιχώματα τα οποία είναι ενιαία και περιτριγυρίζουν τον μετασχηματιστή
- Την οροφή η οποία είναι πιο λεπτή από τα υπόλοιπα και χωρίς κάποιου είδους μεταλλικού ρινίσματος για Η/Μ θωράκιση

## **Κεφάλαιο 7 : Συμπεράσματα**

### **7.1 : Ανασκόπηση της εργασίας**

Η εργασία αυτή περιέγραψε τα βήματα για την σχεδίαση ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης από το μαθηματικό μοντέλο που προκύπτει από τον νόμο του Ampere και Faraday μέχρι την σχεδίαση του περιβλήματος της συσκευής. Για την σχεδίαση της συσκευής έγινε μία σειρά από προσομοιώσεις που αποδεικνύουν την μεγιστοποίηση της ροής ισχύος σε ένα συντονισμένο κύκλωμα. Πρότερα είχε γίνει μια ανασκόπηση στην διεθνή βιβλιογραφία και στα βήματα που έχουν γίνει, ειδικά στα τελευταία πέντε χρόνια, στην βελτίωση της τεχνολογίας. Στην συνέχεια ασχοληθήκαμε με την συσκευασία (packaging) του αντιστροφέα που θα τροφοδοτεί ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης και θα βρίσκεται θαμμένο υπόγεια. Με διάφορες τεχνικές συσκευασίας μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα ολοκληρωμένο σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος το οποίο θα έχει μεγαλύτερο χρόνο ζωής και μεγαλύτερη αντοχή στην υγρασία και την σκόνη. Εν συνεχεία ασχοληθήκαμε με τα τμήματα της επαγωγικής φόρτισης που βρίσκονται εντός του αυτοκινήτου και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγουν. Εκεί περιγράφηκαν και σχολιάστηκαν οι διεθνής επιτρεπτές τιμές ηλεκτρικής και μαγνητικής ακτινοβολίας και δόθηκαν λύσεις για την επίτευξη θωράκισης μέσω ασπίδων προστασίας, βέλτιστης τοποθέτησης των στοιχείων καθώς και σχεδίασης σε επίπεδο κυκλώματος. Τέλος έγινε μια μελέτη για την εγκατάσταση του συστήματος φόρτισης για θέση στάθμευσης σε πόλη και πιο συγκεκριμένα στην Αθήνα όπου οι δρόμοι είναι στενοί και δεν υπάρχουν πολλές εσωτερικές θέσεις στάθμευσης. Έτσι προτάθηκε ένα σύστημα στάθμευσης υπό 30° κλίση.


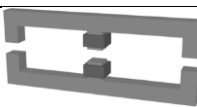
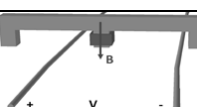
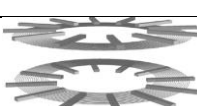
### **7.2 : Επιλογή Διάταξης**

Για την σχεδίαση ενός συστήματος επαγωγικής ασύρματης φόρτισης θεωρούμε τρεις διατάξεις κάθε μία από τις οποίες έχει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα του την διαφοροποιεί από τις υπόλοιπες. Παρακάτω ακολουθούν οι κύριες διατάξεις επίπεδων πηνίων

- Διάταξη (Π-I)
- Διάταξη (E-E) (στάσιμου και εν κινήσει)
- Διάταξη επίπεδων πηνίων

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας θεωρείται καταλληλότερη διάταξη αυτή των επίπεδων πηνίων, διατηρώντας πάντα επιφυλάξεις για την συμπεριφορά της όταν αυτή αφορά την παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή. Σε ένα τέτοιο σύστημα φόρτισης, ειδικά όταν αυξάνουμε τα επίπεδα φόρτισης, είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψη μας ότι η ενέργεια που διαφεύγει του συστήματος μπορεί να επηρεάζει αρνητικά βιολογικούς ιστούς των χρηστών. Συνεπώς η χρήση πλακών φερριτών γίνεται απαραίτητη παρόλο που λόγω της διάταξης, η χρήση τους μπορεί να μην είναι η οικονομικότερη.

πίνακας 7.1 : Σύγκριση διατάξεων πηνίων για συστήματα επαγωγικής φόρτισης

ΔΙΑΤΑΞΗ	Ευκολία ευθυγράμμισης	Οικονομία υλικών	Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή	Διευκόλυνση χρήστη
	++	+++	+	++
	+	++	+	+
	+	+	+++	+++
	+++	+	+++	+++

Η επιλογή για την καταλληλότερη διάταξη εξαρτάται από τον τελικό σκοπό που επιδιώκουμε, δηλαδή την ευκολία χρήσης, την αύξηση της απόδοσης ή την αύξηση της αυτονομίας που επιτυγχάνονται αντιστοίχως με κάθε μία συνδεσμολογία. Συνεπώς για φόρτιση στάσιμου αυτοκινήτου έχοντας την ευκολία χρήσης ως το σημαντικότερο χαρακτηριστικό θα επιλέξουμε τα επίπεδα πηνία. Με στόχο όμως την δημιουργία αυτοκινητοδρόμων είναι πολύ πιθανό να χρησιμοποιήσουμε την διάταξη E-E. Η πρώτη διάταξη, η Π-I δηλαδή, δεν είναι αμελητέα καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα πρώτο στάδιο στην ανάπτυξη της τρίτης διάταξης ή της τεχνολογίας γενικότερα λόγω της ευκολίας εγκατάστασης και της οικονομίας των υλικών της. Αυτήν την στιγμή ένα μεγάλο τμήμα της διεθνούς έρευνας έχει επικεντρωθεί στην τεχνολογία επίπεδων πηνίων καθώς αυτή επιτρέπει την μεγαλύτερη ανοχή στην ευθυγράμμιση των πηνίων εξαιτίας της μεγάλης ακτίνας των πηνίων τους. Εκτός αυτού το μικρό τους πάχος τα έχει καταστήσει ιδανικά για εφαρμογές μικρών συσκευών όπως κινητών τηλεφώνων και φορητών

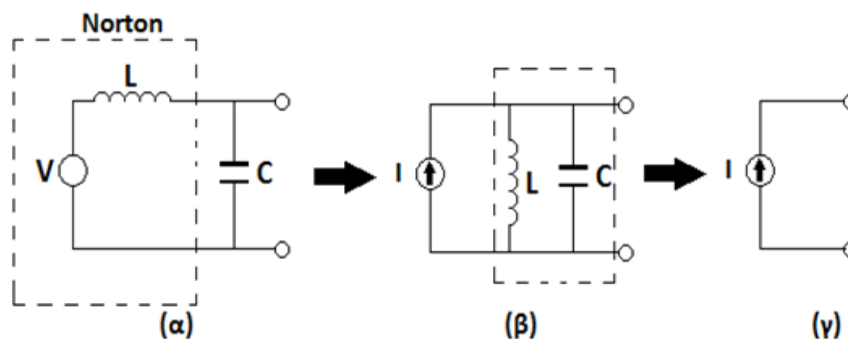
υπολογιστών. Πολλές διατάξεις επίπεδων πηνίων χρησιμοποιούν πολλαπλά πηνία τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον και δεν είναι υπερβολή να πούμε ότι ένα σύστημα θα μπορούσε να περιέχει δύο από τις παραπάνω διατάξεις, ένα ή περισσότερα επίπεδα πηνία για στάσιμη φόρτιση καθώς και την διάταξη E-E για φόρτιση εν κινήσει σε κάποιον έξυπνο αυτοκινητόδρομο. Στον πίνακα 7.1 γίνεται σύγκριση των διαφόρων μεθόδων.

Στην εργασία παρουσιάστηκαν τα στοιχεία για την κατασκευή ενός δυναμικού συστήματος με σκοπό την κατασκευή ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης ισχύος 4kW. Με την χρήση δύο πηνίων  $L=199 \cdot 10^{-6} \text{H}$  σε απόσταση μικρότερη των δέκα εκατοστών επετεύχθη ο συντονισμός του συστήματος με αρκετά μικρές απώλειες.

### 7.3 : Επιλογή τύπου αντιστάθμισης συστήματος επαγωγικής φόρτισης

Εάν το σύστημα μπορεί αφεθεί να λειτουργεί ως έχει, δηλαδή χωρίς τους πυκνωτές που έχουν περιγραφεί στο κεφάλαιο 2 τότε το σύστημα δεν λειτουργεί σε συντονισμό με αποτέλεσμα να υπάρχουν υψηλές απώλειες και να μην μεταφέρεται η ενέργεια βέλτιστα. Ο συντονισμός του συστήματος επιτρέπει την μεταφορά της μέγιστης πραγματικής ισχύος προς το σύστημα και τον μηδενισμό της αέργου. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητη η χρήση συστήματος αντιστάθμισης.

Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2, υπάρχουν τέσσερις δυνατές επιλογές για την δημιουργία ενός συντονισμένου συστήματος. Στο ίδιο κεφάλαιο αποδείχθηκε πως η συνδεσμολογία σειρά-σειρά έχει το πλεονέκτημα ότι οι τιμές των πυκνωτών δεν εξαρτώνται από το φορτίο του δευτερεύοντος. Παρόλα αυτά οι υπόλοιπες συνδεσμολογίες που περιλαμβάνουν παράλληλο πυκνωτή εξυπηρετούν καθώς δημιουργείται πηγή ρεύματος (σχήμα 7.1) που μπορεί χρησιμοποιηθεί για την βέλτιστη φόρτιση της μπαταρίας.



σχήμα 7.1 : (α) Συνδεσμολογία παράλληλα - (β) Ισοδύναμο Norton - (γ) Συντονισμός συστήματος

Συνεπώς η επιλογή της συνδεσμολογίας αντιστάθμισης πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες της μπαταρίας και του  $f_{oc}$  (Field of Charge) της. Χρησιμοποιώντας διαφορετικές συνδεσμολογίες, μπορεί να δημιουργείται ένα πιο πολύπλοκο σύστημα αλλά είναι ικανό να καλύπτει σε μεγαλύτερο βαθμό τις ανάγκες του συστήματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα

αποτελεί η κατασκευή ενός χώρου στάθμευσης στον οποίο φορτίζονται πολλαπλά αυτοκίνητα. Σε αυτήν την διάταξη μπορεί να υπάρχει ένας κεντρικός αντιστροφέας ο οποίος τροφοδοτεί πολλαπλά πηνία. Με συνδεσμολογία παράλληλα στο δευτερεύον μπορούμε να κατασκευάσουμε μία ιδανική πηγή ρεύματος που τροφοδοτεί όλα τα χρησιμοποιούμενα πηνία με σταθερό ρεύμα κάνοντας ευκολότερο τον έλεγχο της φόρτισης.

#### **7.4 : Μαγνητική θωράκιση**

Η μαγνητική θωράκιση δεν έχει την δράση που θα περίμενε κάποιος που έχει μελετήσει μόνο τον ηλεκτρισμό. Τα μαγνητικά πεδία δεν θωρακίζονται όπως τα ηλεκτρικά καθώς υπάρχουν στην φύση μόνο ως δίπολα, πράγμα που σημαίνει ότι οι μαγνητικές γραμμές που εξέρχονται από τον έναν πόλο διέρχονται από τον άλλο. Ο τρόπος με τον οποίο προστατεύουμε τα ηλεκτρονικά είναι δημιουργώντας μονοπάτια για τις δυναμικές γραμμές οι οποίες θα συγκεντρώνονται και θα εξέρχονται μέσω του φερρίτη, μειώνοντας τον όγκο της περιοχής από την οποία τελικά περνάει η μαγνητική ροή. Κάποια από αυτά τα υλικά είναι ο φερρίτης και ο σίδηρος. Ο τρόπος με τον οποίο προστατεύουμε τις συσκευές από ηλεκτρικές παρεμβολές είναι δημιουργώντας κλωβούς Faraday, το οποίο είναι ένα μεταλλικό κέλυφος που περιτριγυρίζει τον εξοπλισμό. Πέρα από την θωράκιση, για την μείωση των ακτινοβολούντων πεδίων υπάρχουν και άλλοι τρόποι για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια των χρηστών και η ατρωσία των υπολοίπων συσκευών όπως για παράδειγμα η σωστή τοποθέτηση των καλωδίων. Βέβαια καλό είναι το σύστημα να πληροί όλες τις οδηγίες περί εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που έχουν θεσπιστεί από οργανισμούς όπως τον IEEE καθώς και τον ICNIRP.

Η ηλεκτρομαγνητική θωράκιση πρέπει να σχεδιαστεί με πολύ προσοχή, όχι μόνο για τον φορτιστή αλλά και για κάθε άλλο εξάρτημα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Κατά μέσο όρο, κάθε οδηγός περνάει δύο ώρες της ημέρας εντός του αυτοκινήτου, και λαμβάνοντας υπόψη ότι ενδεχομένως κάποιος μπορεί να βρίσκεται εντός του αυτοκινήτου κατά την διάρκεια της φόρτισης, οφείλει ο κατασκευαστής να ακολουθήσει τις προδιαγραφές επιτρεπτής παραμονής σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο κατά γράμμα.

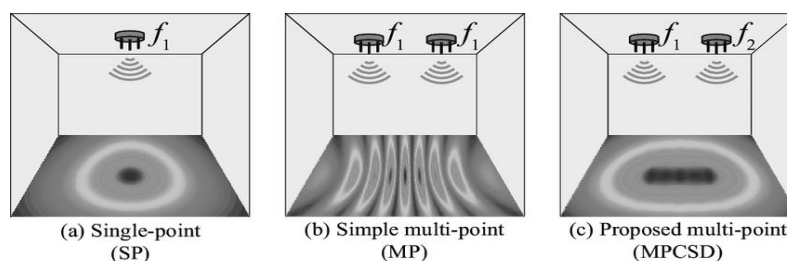
#### **7.5 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις για την μαγνητική θωράκιση για μελλοντικές πειραματικές μετρήσεις**

Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5 η θωράκιση των πηνίων είναι απαραίτητη καθώς στην περιοχή κοντά σε αυτή υπάρχει ευαίσθητος ηλεκτρονικός εξοπλισμός υψηλών συχνοτήτων που μπορεί να επηρεαστεί από το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο. Συνεπώς σε ένα τέτοιο σύστημα πρέπει να υπάρχει η κατάλληλη θωράκιση που περιλαμβάνει πλάκες φερρίτη και μεταλλική πλάκα συνήθως αλουμινίου, για την ανάκλαση των παρεμβολών, τοποθετημένη πάνω από τον φερρίτη. Αυτή η πλάκα αλουμινίου σε συνδυασμό με το σασί του αυτοκινήτου, όταν πρόκειται για φορτιστή αυτοκινήτου, πρέπει απαραιτήτως να συμπεριλαμβάνονται στις πειραματικές

μετρήσεις ειδικά όταν μετρώνται οι επαγωγές των πηνίων και ο συντελεστής σύζευξης του μετασχηματιστή. Στο στάδιο μέτρησης αυτών των μεγεθών όλα αυτά τα μεταλλικά στοιχεία μπορούν να προκαλέσουν μεταβολή στις τιμές των στοιχείων του μετασχηματιστή, ειδικά η μεταλλική πλάκα πάνω από τα πηνία.

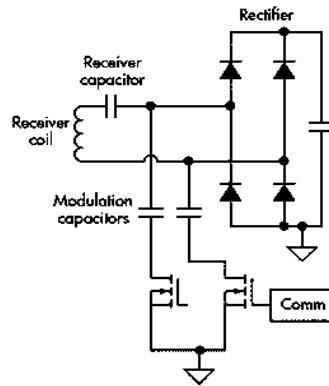
## 7.6 : Μελλοντικές μελέτες

Η μελέτη της επαγωγικής φόρτισης είναι ένα θέμα που δεν περιορίζεται μόνο στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αλλά σε κάθε συσκευή που χρειάζεται αυτονομία. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να ενσωματωθεί σε βιομηχανικά και σε οικιακά περιβάλλοντα. Σε οικιακά περιβάλλοντα η επαγωγική φόρτιση μπορεί και προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί σε κινητά τηλέφωνα, φορητούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές καθώς και σε συστήματα φωτισμού. Γενικότερα ο σκοπός είναι η δημιουργία ενός δικτύου συσκευών που θα ελέγχονται από ένα σύστημα έλεγχου (σχήμα 7.2) με ασύρματο έλεγχο και ασύρματη τροφοδοσία. Συνεπώς καθώς ο αριθμός των συσκευών είναι μεγάλος, οφείλει η έρευνα να επικεντρωθεί στην αύξηση της απόδοσης σε επίπεδα μεγαλύτερα του 93%.



σχήμα 7.2 : Σύστημα επαγωγικής φόρτισης πολλαπλών συσκευών μέσω συντονισμού

Ένα σημαντικό τμήμα έρευνας της επαγωγικής φόρτισης πρέπει να είναι η εν κινήσει φόρτιση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Σε ένα τέτοιο σύστημα οι απώλειες θα είναι σημαντικές και η απόδοση της φόρτισης με τις καλύτερες προβλέψεις θα είναι της τάξης του 60% ειδικά όταν ο οδηγός είναι άνθρωπος. Συνεπώς η έρευνα για την επαγωγική κίνηση πρέπει να συμβαδίζει με αυτήν της αυτόματης οδήγησης. Ένα σύστημα αυτόματης οδήγησης θα δίνει την δυνατότητα στο αυτοκίνητο να μένει πάνω στην ράγα φόρτισης στην κατάλληλη ταχύτητα με σκοπό την αύξηση της απόδοσης και την ταχύτερη μεταβολή των στοιχείων του δευτερεύοντος μέσω ενός μεταβλητού συστήματος συντονισμού (σχήμα 7.3).



σχήμα 7.3 : Σύστημα επαγωγικής φόρτισης, δευτερεύον με μεταβλητούς πυκνωτές

Ο έλεγχος της συχνότητας στο δευτερεύον είναι υποχρεωτικός σε αυτό το σύστημα ελέγχου καθώς η ράγα στην οποία κινείται πάνω το αυτοκίνητο είναι κοινή για πολλαπλά αυτοκίνητα με μία κοινή συχνότητα λειτουργίας. Συνεπώς είναι απαραίτητο ο αυτόματος έλεγχος να γίνεται μέσω του δευτερεύοντος σε κάθε αυτοκίνητο ξεχωριστά. Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι αυτή η τεχνική θα ενισχύει την αναγεννητική πέδηση του αυτοκινήτου με σκοπό την αύξηση του πεδίου κίνησης για μερικές δεκάδες χιλιόμετρα και δεν αποσκοπεί στην ολοκληρωτική τροφοδότηση του αυτοκινήτου.

Για την ολοκλήρωση των μελετών είναι πολύ σημαντικό να γίνουν πολύ λεπτομερείς μελέτες που αναλύουν την συμπεριφορά της συσκευής υπό κακές καιρικές συνθήκες, σε συνθήκες υψηλής υγρασίας και σε περιβάλλοντα που μπορεί να περιέχουν σκόνη, άμμο και χώμα και κατά επέκταση μπορεί να περιέχουν μέταλλα και κεραμικά υλικά που μπορεί να επηρεάσουν την συσκευή.

Η επαγωγική φόρτιση μπορεί να αποτελέσει το κατώφλι για την διάδοση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, για την επανάσταση στην φόρτιση των ασύρματων συσκευών και για ένα σπίτι χωρίς καλώδια. Πλέον η φόρτιση του αυτοκινήτου δεν θα είναι επικίνδυνη και οι καταναλωτές δεν θα χρειάζεται να αγοράζουν δεκάδες φορτιστές για τα κινητά τηλέφωνα ή τους φορητούς υπολογιστές. Συνεπώς είτε για λόγους οικολογικούς, είτε για λόγους καλαισθησίας η επαγωγική φόρτιση αξίζει να μελετηθεί και να εισχωρήσει στην καθημερινότητά μας.



## Βιβλιογραφία

- 1) J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, C. T. «Rim Narrow-Width Inductive Power Transfer System for Online Electrical Vehicles»
- 2) Jesus Sallan, Juan L. Villa, Andres Llombart, Jose Fco. Sanz “Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge”
- 3) Kimiyoshi Kobayashi, Naoki Yoshida, Yushi Kamiya, Yasuhiro Daisho, Shunsuke Takahashi “Development of a non-contact rapid charging inductive power supply system for electric-driven vehicles”
- 4) Chwei-Sen Wang, O.H. Stielau, G.A. Covic “Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger”
- 5) Bryan Esteban, Maher Sid-Ahmed, Narayan C. Kar “A Comparative Study of Power Supply Architectures in Wireless EV Charging Systems”
- 6) A.P. Hu, S. Hussmann “Improved power flow control for contactless moving sensor applications”
- 7) Ε. Γαπή, “Μελέτη, κατασκευή και έλεγχος συστημάτων επαγωγικής μεταφοράς ισχύος”
- 8) <https://www.evo.co.uk/bmw/i8/16557/game-changing-qualcomm-wireless-charging-could-feature-on-bmws-by-2017>
- 9) <https://www.sytner.co.uk/news/wireless-charging/>
- 10) <https://www.qualcomm.com/solutions/automotive/wevc>
- 11) <http://witricity.com/products/automotive/>
- 12) <http://witricity.com/innovation/ev-test-partners/>
- 13) C. Auvigne, P. Germano, D. Ladas, Y. Perriard, “A Dual-topology ICPT Applied to an Electric Vehicle Battery Charger”
- 14) “Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Μέρος Α”, Ι. Λ. ΒΟΜΒΟΡΙΔΗΣ
- 15) “ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ”, Νίκος Ι. Μάργαρης
- 16) “Analog Integrated Circuits”, Lecture Notes, Paul P. Sotiriadis, Department of Electrical and computer Engineering, Johns Hopkins University
- 17) “Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems”, Wei Zhang, Chunting Chris Mi, IEEE Transactions on Vehicular Technology (Volume: 65, Issue: 6, June 2016)

- 18) “Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications”, Siqi Li, Chunting Chris Mi, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics (Volume: 3, Issue: 1, March 2015)
- 19) “Design considerations of LLC resonant converter for contactless laptop charger”, Cong Zheng, Baifeng Chen, Lanhua Zhang, Rui Chen, Jih-Sheng Lai, 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)
- 20) “Wireless power transfer for electric vehicles and mobile devices (2017)”, Mi, Chris Rim, Chun
- 21) “ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ” ΒΟΥΡΝΑΣ Κ., ΚΟΝΤΑΞΗΣ Γ.
- 22) “Electronics Cooling Using a Self-Contained, Sub-Cooled Pumped Liquid System” W. John Bilski, Gregg Baldassarre, Matt Connors, Jerry Toth1 and Kevin L. Wert
- 23) “Shielded Coil Structure Suppressing Leakage Magnetic Field from 100W-Class Wireless Power Transfer System with Higher Efficiency”
- 24) “ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ”, ΣΤΕΦΑΝΟΣ Ν. ΜΑΝΙΑΣ
- 25) <https://www.electronics-cooling.com/1996/09/an-introduction-to-thermoelectric-coolers/#>
- 26) “Handbook Of Electronics Packaging Design and Engineering”, BERNARD S. MATISOFF, P.E., CMfgE
- 27) <https://www.qats.com/cms/2010/05/19/how-to-understand-fan-curves-and-optimum-operating-points/>
- 28) <https://www.electronics-cooling.com/1995/06/how-to-select-a-heat-sink/>
- 29) [http://www.webpages.uidaho.edu/niatt\\_labmanual/chapters/parkinglotdesign/theoryandconcepts/parkingstalllayoutconsiderations.htm](http://www.webpages.uidaho.edu/niatt_labmanual/chapters/parkinglotdesign/theoryandconcepts/parkingstalllayoutconsiderations.htm)
- 30) “Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding”, Xingcun Colin Tong, CRC Press
- 31) “Cable Shielding for Electromagnetic Compatibility-Springer US (1995)”, Anatoly Tsaliovich
- 32) [http://www.montefiore.ulg.ac.be/~geuzaine/ELEC0017/2\\_EM\\_Coupling\\_Disturbances\\_PQ.pdf](http://www.montefiore.ulg.ac.be/~geuzaine/ELEC0017/2_EM_Coupling_Disturbances_PQ.pdf)
- 33) <https://www.edn.com/electronics-blogs/the-workbench/4421218/PCB-layout-tips-for-thermal-vias>
- 34) <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/top-10-pcb-routing-tips-beginners/>
- 35) “Software Tools speed circuit board design”, S. Pardee, T. P. Pennino, (1988)
- 36) “Complete PCB Design Using OrCAD Capture and Layout”, Kraig Mitzner
- 37) <https://www.ecnmag.com/blog/2016/05/future-cooling-technology-industrial-enclosures>
- 38) <https://hardhatengineer.com/what-is-a-gasket-types-of-gaskets/>
- 39) “Magnetic Field Exposure Assessment in Electric Vehicles”, A. Vassilev, A. Ferber, C. Wehrmann, O.Pinaud, M.Schilling, A. R. Ruddle, IEEE Transactions on Eletromagnetic Compatibility, Vol 57, pp230-43, 2015

- 40) “Characterization of Extremely Low Frequency Magnetic Fields from Diesel, Gasoline and Hybrid Cars under Controlled Conditions” , R.Hareuveny, M. Shudan, M. Halmage, Y. Yaffe, Y. Tzabari, D.Namir and L. Kheifets, International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol 12, Issue 2, pp 1651-1666, 2015
- 41) Qpedia Thermal eMagazine, Volumes 2, Issues 1-12
- 42) Wang, K. (2017). Review of State-of-the-Art Integration Technologies in Power Electronic Systems. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2(4), 292–305
- 43) Bai, J. G., Guo-Quan Lu, & Xingsheng Liu. (2003). Flip-chip on flex integrated power electronics modules for high-density power integration. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 26(1), 54–59
- 44) Quinn, C., Rinne, K., O’Donnell, T., Duffy, M., & Mathuna, C. O. (n.d.). A review of planar magnetic techniques and technologies. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.01CH37181).
- 45) Wen, S. S., Huff, D., & Guo-Quan Lu. (n.d.). Dimple-array interconnect technique for packaging power semiconductor devices and modules. Proceedings of the 13th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. IPSD ’01 (IEEE Cat. No.01CH37216)
- 46) Jian Yin, van Wyk, J. D., Odendaal, W. G., & Zhenxian Liang. (n.d.). Design and optimization of embedded power chip modules for double-sided cooling. Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.
- 47) Calata, J. N., Bai, J. G., Xingsheng Liu, Sihua Wen, & Guo-Quan Lu. (2005). Three-dimensional packaging for power semiconductor devices and modules. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 28(3), 404–412.
- 48) Haque, S., Kun Xing, Ray-Lee Lin, Suchicital, C. T. A., Guo-Quan Lu, Nelson, D. J., ... Lee, F. C. (1999). An innovative technique for packaging power electronic building blocks using metal posts interconnected parallel plate structures. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 22(2), 136–144
- 49) [http://homepages.rpi.edu/~sawyes/Models\\_review.pdf](http://homepages.rpi.edu/~sawyes/Models_review.pdf)
- 50) [https://en.wikipedia.org/wiki/Power\\_electronic\\_substrate](https://en.wikipedia.org/wiki/Power_electronic_substrate)
- 51) Saijun Mao, Tingting Song, Chengmin Li, Wuhua Li, Popovic, J., & Ferreira, J. A. (2017). Power packaging design considerations for high frequency high voltage generator. 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia).
- 52) Κοινή Υπουργική Απόφαση, αριθμός 3060 (ΦΟΠ) 238, ΦΕΚ 512/Β/25.04.02, “Μέτρα προφύλαξης του κοινού από τη λειτουργία διατάξεων εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων”
- 53) [https://www.cenam.mx/dme/pdf/PRE\\_E-Mie-3.pdf](https://www.cenam.mx/dme/pdf/PRE_E-Mie-3.pdf)
- 54) “ICNIRP GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1HZ – 100 KHZ)”, HEALTH PHYSICS 99(6):818-836; 2010

- 55) “AN2409, Small Outline Integrated Circuit (SOIC) Package - Application Note”, AXN.inc
- 56) [https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/resistors/surface-mount-smt-smd-resistor.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/resistors/surface-mount-smt-smd-resistor.php)
- 57) Ε. Γατή, “Επαγωγικός Φορτιστής Ηλεκτρικού Οχήματος”
- 58) S. N. Manias, “Power Electronics and Motor Drive Systems”, ELSEVIER, 2016
- 59) Ray P. Prasad, “Surface Mount Technology Principles and Practice”, Springer US, (1997)

