

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
«ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΗΝΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΓΙΑ  
ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ»



Του φοιτητή **Ζαμάνης**  
**Αλέξανδρος**  
Αρ. Μητρώου: 515029

Επιβλέπων  
Ονοματεπώνυμο **Ιορδάνης**  
**Κιοσκερίδης**

Ημερομηνία: 15/1/2022

Τίτλος Δ.Ε. Σχεδίαση πηνίων και μετασχηματιστών για μετατροπείς ισχύος υψηλών συχνοτήτων

Κωδικός Δ.Ε. 20100

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Ζαμάνης Αλέξανδρος  
Όνοματεπώνυμο εισηγητή Ιορδάνης Κιοσκερίδης  
Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 24/11/2020  
Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 15/1/2022

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Ζαμάνη Αλέξανδρου που την εκπόνησε/αν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στην Παυλίνα»

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε με σκοπό να εμβαθύνω τις γνώσεις μου στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, και συγκεκριμένα στους μετατροπείς ισχύος. Με αμφιταλαντευόμενα συναισθήματα ενδιαφέροντος και απελπισίας καθ' όλη την διάρκεια της περάτωσης της εργασίας βρίσκομαι στην θέση να πω πως χαίρομαι για την επιλογή μου και τα οφέλη που έλαβα υπερέκλυψαν τις δυσκολίες που αντιμετώπισα. Οι γνώσεις που απέκτησα εν τέλει ήταν σε πολυάριθμους τομείς της επιστήμης πέρα των ηλεκτρονικών ισχύος. Εμβάθυνα τις γνώσεις μου σε μεγάλο βαθμό στην επιστήμη των υλικών και στον ηλεκτρομαγνητισμό. Επίσης με τα πειράματα που διεξήχθησαν έλαβα κατασκευαστικές γνώσεις όσον αφορά τα μαγνητικά υλικά όπως και πρακτικές γνώσεις για την διαχείριση και υλοποίηση αυτών. Τέλος, με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας κατανόησα το μέγεθος του τομέα ηλεκτρονικών ισχύος και κατάλαβα πως έχω μόνο δει την επιφάνεια του.

## Περίληψη

Η μετατροπή και η αποθήκευση ενέργειας είναι ένα φαινόμενο αναπόσπαστο από την καθημερινή ζωή όλων μας, αποτελεί βασική ανάγκη για την λειτουργία των περισσότερων ηλεκτρικών συσκευών οι οποίες τροφοδοτούνται από το δίκτυο (ΔΕΗ). Ο τομέας της ηλεκτρονικής που έχει αναλάβει το έργο αυτό είναι των ηλεκτρονικών ισχύος με την σχεδίαση και χρήση διατάξεων μετατροπών ισχύος οι οποίες χαρακτηρίζονται από ένα πολύ καλό βαθμό απόδοσης. Πέρα των πολύ βασικών, στην επιστήμη των ηλεκτρονικών ισχύος, ημιαγωγών διακοπών, κρίσιμα στοιχεία είναι και τα μαγνητικά. Με τον όρο μαγνητικά περιγράφουμε δύο ειδών στοιχεία, τα πηνία και τους μετασχηματιστές. Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να καλύψει την διαδικασία σχεδίασης των μαγνητικών αυτών υλικών δίνοντας ιδιαίτερη βάση στην κατανόηση της προέλευσης των απωλειών που παρουσιάζονται, κάποια σχεδιαστικά λάθη που μπορεί να προκύψουν κατά την σχεδίαση τους όπως και τις μεθόδους βελτιστοποίησης του τελικού προϊόντος. Ο στόχος που έχει τεθεί κατά την εκπόνηση της ΔΕ είναι η θεωρητική σχεδίαση δύο μετασχηματιστών και πηνίων για εφαρμογή σε μετατροπέα ισχύος με παραμέτρους οι οποίες είναι πιθανό να προκύψουν σε μια πραγματικές διατάξεις. Η ανάλυση έχει ως αφετηρία την εισαγωγή στα μαγνητικά στοιχεία, τις διαφορές μεταξύ τους, τα μέρη από τα οποία απαρτίζονται όπως και την χρήση τους σε μετατροπείς ισχύος. Ακολουθεί η επεξήγηση της εμφάνισης των απωλειών από τους πολυάριθμους παράγοντες που επηρεάζουν τα στοιχεία, όπως οι απώλειες του πυρήνα, οι απώλειες των αγωγών, το επιδερμικό φαινόμενο όπως και το φαινόμενο της γειννίας που έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας επομένως και την μείωση του βαθμού απόδοσης. Επιπλέον, θα γίνει ο θεωρητικός και πρακτικός σχεδιασμός πηνίων, όπως και ο έλεγχος καλής λειτουργίας τους. Τέλος, θα υπολογιστούν θεωρητικά δύο μετασχηματιστές για δύο διαφορετικές τοπολογίες, και θα γίνει η περιέλιξη του ενός για την περιγραφή της διαδικασίας.

# **Design of inductors and transformers for application in high frequency power converters**

**Alexandros Zamanis**

## **Abstract**

In this paper a study on magnetic components was done. The paper states the fundamentals of electromagnetism and emphasizes on magnetic components for high frequency converter applications. Then, the paper takes a turn to explain phenomena that contribute to the overall losses of this type of components. In particular, emphasis is given to the skin effect and the proximity effect that are the effects that contribute to most of the losses observed in high frequency applications. First, the study of inductors and the value they present in many converter topologies takes place . Then, an experiment is conducted to compare how different materials and geometries affect a buck converter application. Furthermore, the fundamentals of transformer design are analyzed and a theoretical model for two different types of converter are calculated. Finally, a transformer is wound based on the findings of the theoretical review.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την στήριξη που μου έδωσαν κατά την διάρκεια που διήρκησε η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μου.

# Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
Ευχαριστίες.....	7
Κεφάλαιο 1 Μαγνητικά Στοιχεία.....	12
1.1 Εισαγωγή στα μαγνητικά στοιχεία.....	12
1.2 Βασικές αρχές λειτουργίας των μαγνητικών στοιχείων.....	12
1.2.1 Μαγνητική αντίσταση.....	13
1.2.2 Καμπύλη μαγνήτισης.....	14
1.2.3 Βρόχος Υστέρησης.....	15
1.2.4 Περιοχές Weiss.....	16
1.2.5 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και νόμος του Lenz.....	17
1.3 Πηνία.....	18
1.3.1 Είδη πηνίων.....	18
1.4 Μετασχηματιστές.....	20
1.4.1 Είδη μετασχηματιστών.....	20
1.5 Κοινές μεταβλητές των επαγωγικών στοιχείων.....	21
1.5.1 Τύποι τυλιγμάτων.....	21
1.5.2 Διατομή αγωγού.....	22
1.5.3 Μέθοδος περιέλιξης.....	23
1.5.4 Υλικό πυρήνα.....	24
1.5.5 Γεωμετρία πυρήνα.....	26
Κεφάλαιο 2 Απώλειες ισχύος επαγωγικών στοιχείων.....	29
2.1 Εισαγωγή στους παράγοντες απωλειών των επαγωγικών στοιχείων.....	29
2.2 Απώλειες πυρήνα.....	29
2.2.1 Απώλειες υστέρησης στον πυρήνα.....	29
2.2.2 Απώλειες πυρήνα λόγω δινορευμάτων.....	31
2.3 Απώλειες τυλιγμάτων.....	32
2.3.1 Το επιδερμικό φαινόμενο.....	32
2.3.2 Φαινόμενο γειτνίασης.....	34
Κεφάλαιο 3 Σχεδίαση και υλοποίηση πηνίων υψηλών συχνοτήτων.....	37
3.1 Θεωρητική σχεδίαση του επαγωγικού στοιχείου.....	38
3.1.1 Πρώτο βήμα του αλγόριθμου.....	38
3.1.2 Δεύτερο βήμα του αλγορίθμου.....	39
3.1.3 Τρίτο βήμα του αλγορίθμου.....	40
3.2 Θεωρητική σχεδίαση πηνίων με την χρήση λογισμικού.....	40
3.2.1 Αρχή λειτουργίας μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (Buck).....	41
3.2.2 Παρουσίαση μετατροπέα υποβιβασμού (Buck) με το ολοκληρωμένο XL4016.....	44
3.3 Πειραματικό μέρος.....	45
3.3.1 Αναγνώριση χαρακτηριστικών αγνώστου πηνίου.....	45
3.3.2 Θεωρητικός υπολογισμός των πηνίων και περιέλιξη αυτών.....	46
3.3.3 Δοκιμή των πηνίων.....	48
Κεφάλαιο 4 Σχεδίαση και υλοποίηση μετασχηματιστών υψηλών συχνοτήτων.....	53
4.1 Αλγόριθμος σχεδίασης μετασχηματιστών.....	53
4.1.1 Αριθμός και κατάτμηση τυλιγμάτων.....	53
4.1.2 Υλικό, γεωμετρική μορφή και μέγεθος πυρήνα.....	54
4.1.2 Μήκος $l$ του διάκενου.....	54
4.1.3 Διατομή και μορφή αγωγού.....	55
4.2 Τοπολογία Fly-back.....	55
4.3 Θεωρητική σχεδίαση μετασχηματιστή Fly-back.....	58

4.3.1 Προδιαγραφές σχεδίασης μετατροπέα.....	58
4.3.2 Υπολογισμός απαραίτητων μεταβλητών.....	58
4.4 Θεωρητική σχεδίαση μετασχηματιστή για παλμοτροφοδοτικό πλήρους γέφυρας.....	64
4.3.1 Προδιαγραφές σχεδίασης μετατροπέα.....	64
4.3.2 Υπολογισμός απαραίτητων μεταβλητών.....	65
4.5 Πρακτική σχεδίαση μετασχηματιστή για παλμοτροφοδοτικό πλήρους γέφυρας.....	67
Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης.....	70
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>71</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

## Κεφάλαιο 1

Σχήμα 1.1 Καμπύλη μαγνήτισης σιδηρομαγνητικών υλικών.

Σχήμα 1.2 Βρόχος υστέρησης του πυρήνα.

Σχήμα 1.3 Περιοχές Weiss

Σχήμα 1.4: Αλλαγή προσανατολισμού σε σχέση με ένταση μαγνητικού πεδίου

Σχήμα 1.5 Διατομή σπειρών τυλιγμάτων μαγνητικού στοιχείου.

Σχήμα 1.6 Αγωγός Litz και πίνακας χαρακτηριστικών του.

Σχήμα 1.7 Τυλίγματα με τετραγωνικό αγωγό.

Σχήμα 1.8 Μέθοδοι περιέλιξης των σπειρών ενός τυλίγματος.

Σχήμα 1.9 Βρόχος υστέρησης κραμάτων σιδήρου και φερριτών.

Σχήμα 1.10 Γεωμετρική μορφή πυρήνων από φερίτη της εταιρείας TDK. Δακτυλιοειδής (α), EE (β), ETD (γ), pot (δ), RM (ε), PQ (στ).

## Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2.1 Βρόχος υστέρησης πυρήνα από φερίτη χωρίς διάκενο.

Σχήμα 2.2 Φύλλο απωλειών κατασκευαστή για πυρήνα από φερίτη.

Σχήμα 2.3 Δινορεύματα σε αγωγό λόγω εναλλασσομένου σήματος.

Σχήμα 2.4 Επιδερμικό φαινόμενο και δινορεύματα

Σχήμα 2.5 Απεικόνιση φαινομένου γειτνίασης μεταξύ ορθογώνιων αγωγών.

Σχήμα 2.6 Διατομή μαγνητικού στοιχείου με μια στρώση τυλιγμάτων

Σχήμα 2.7 Καμπύλες γειτνίασης προς συχνότητα λειτουργίας

## Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3.1. Λειτουργία προγράμματος της Magnetics inc.

Σχήμα 3.2 Κατάσταση ON του μετατροπέα Buck.

Σχήμα 3.3 Κατάσταση OFF του μετατροπέα Buck

Σχήμα 3.4 Σχηματικό του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Σχήμα 3.5 Μετρητής LCR και πηνίο εμπόριου.

Σχήμα 3.6 Πρόγραμμα υπολογισμού μαγνητικής διαπερατότητας (μ).

Σχήμα 3.7 Υπολογισμός πηνίου με το πρόγραμμα της σελίδας coil32.net.

Σχήμα 3.8 Περιέλιξη πηνίου

Σχήμα 3.9 Μέτρηση αυτεπαγωγής των πηνίων

Σχήμα 3.10 Η διάταξη εν λειτουργία με το φορτίο συνδεδεμένο.

Σχήμα 3.11 Μέτρηση πρωτότυπης διάταξης χωρίς φορτίο

Σχήμα 3.12 Μέτρηση πρωτότυπης διάταξης με φορτίο

Σχήμα 3.13 Αφαίρεση του πηνίου

Σχήμα 3.14 (α) Μέτρηση εξόδου χωρίς την χρήση πηνίου και χωρίς φορτίο, (β) Με φορτίο

Σχήμα 3.15 Μετρήσεις με το πηνίο από πυρήνα φερίτη χωρίς φορτίο.

Σχήμα 3.16 Μετρήσεις με το ογκώδες πηνίο χωρίς φορτίο.

Σχήμα 3.17 Μετρήσεις με ογκώδες πηνίο και φορτίο.

## Κεφάλαιο 4

Σχήμα 4.1 Τυλίγματα μετασχηματιστών.

Σχήμα 4.2 Μεταβολή βρόγχου υστέρησης με χρήση διάκενου

Σχήμα 4.3 Σχεδιάγραμμα τοπολογίας Fly-back

Σχήμα 4.4 Θεωρητικές κυματομορφές μετατροπέα Fly-back

Σχήμα 4.5 Σχήμα διαστάσεων πυρήνα

Σχήμα 4.6 Κατάλογος χαρακτηριστικών πυρήνων της εταιρείας Ferroxcube

Σχήμα 4.7 Πρώτη στρώση πρωτεύοντος τυλίγματος

Σχήμα 4.8 Μόνωση μεταξύ στρώσεων.

Σχήμα 4.9 Δευτερεύον τυλίγμα.

Σχήμα 4.10 Περιέλιξη δευτερεύοντος τυλίγματος.

Σχήμα 4.11 Τελικό προϊόν.

# Κατάλογος πινάκων

## Κεφάλαιο 1

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά πηνίων αέρα.

Πίνακας 1.2 Χαρακτηριστικά τοροειδών πηνίων.

Πίνακας 1.3 Χαρακτηριστικά πηνίων με πυρήνα από φερίτη.

Πίνακας 1.4 Πίνακας διαμέτρων αγωγών σύμφωνα με το AWG πρότυπο.

Πίνακας 1.5 Υλικά και τα μαγνητικά χαρακτηριστικά τους.

## Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2.1 Επιδερμικό βάθος διάφορων διαμέτρων αγωγών για διάφορες συχνότητες.

Πίνακας 2.2 Φαινόμενο γεινίασης στην συχνότητα των 100kHz

## Κεφάλαιο 3

Πίνακας 3.1 Υλικά κατασκευής πυρήνων iron powdered cores

Πίνακας 3.2 Παράμετροι σχεδίασης πηνίου

Πίνακας 3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης με το πρόγραμμα της Magnetics

Πίνακας 3.4 Χαρακτηριστικά του μετατροπέα.

## Κεφάλαιο 4

Πίνακας 4.1 Παράμετροι σχεδίασης μετατροπέα fly-back

Πίνακας 4.2 Προδιαγραφές μετασχηματιστή για μετατροπέα πλήρους γέφυρας.

# Κεφάλαιο 1 Μαγνητικά Στοιχεία

## 1.1 Εισαγωγή στα μαγνητικά στοιχεία

Στην κατηγορία των μαγνητικών στοιχείων εντάσσονται, όπως προαναφέρθηκε, οι μετασχηματιστές και τα πηνία. Τα δύο αυτά στοιχεία παρά τα πολλά κοινά σημεία που έχουν όσον αφορά την δομή τους και τις αρχές λειτουργίας πάνω στις οποίες βασίζονται, είναι τελείως διαφορετικά μεταξύ τους. Ο σκοπός λειτουργίας τους είναι τελείως αντίθετος μιας και ένα πηνίο έχει σαν στόχο την αποθήκευση ενέργειας με την μορφή μαγνητικού πεδίου ενώ ένας μετασχηματιστής δεν είναι σχεδιασμένος να αποθηκεύει καθόλου ενέργεια, πέρα της εξαίρεσης του μετασχηματιστή fly-back, αντιθέτως να την μετατρέπει.[1] Πέρα αυτής της βασικής διαφοράς μεταξύ των δύο υπάρχουν και άλλες οι οποίες πρέπει να αναφερθούν. Ένα πηνίο μπορεί να υλοποιηθεί με την χρήση ενός τουλάχιστον τυλίγματος ενώ ένας μετασχηματιστής πρέπει να έχει το ελάχιστο δυο τυλίγματα για να λειτουργήσει. Επιπλέον, για την κατασκευή ενός μετασχηματιστή πρέπει οπωσδήποτε να υπάρχει ένας πυρήνας μέσω του οποίου θα συνδεθούν γαλβανικά τα τυλίγματα που τον αποτελούν, ένα πηνίο όμως μπορεί να κατασκευαστεί και χωρίς την παρουσία υλικού πυρήνα. Τέτοια πηνία είναι τα πηνία πυρήνα αέρα, όπου το υλικό στο οποίο τυλίγονται είναι καθαρά για την υποστήριξη των τυλιγμάτων και είναι από πλαστικό. Τέλος στα πηνία έχουμε την παρουσία ισχυρού μαγνητικού πεδίου, κάτι που μπορεί να επηρεάσει το υπόλοιπο κύκλωμα ενώ στον μετασχηματιστή δεν έχουμε αυτό το φαινόμενο στον ίδιο βαθμό.[2]

## 1.2 Βασικές αρχές λειτουργίας των μαγνητικών στοιχείων

Το εξαιρετικά ευρύ φάσμα εφαρμογών των μαγνητικών στοιχείων τόσο σε βιομηχανικές μονάδες όσο και σε εμπορικές έχει δημιουργήσει την ανάγκη της ποικιλομορφίας τους. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά σχέδια πηνίων και μετασχηματιστών κάθε ένα σχεδιασμένο και μελετημένο για την αντίστοιχη εφαρμογή του, όμως όλα ανεξαιρέτως έχουν τις ίδιες αρχές της φυσικής πάνω στις οποίες στηρίζονται[3]. Μας είναι γνωστό πως όταν ένας αγωγός διαρρέετε από ηλεκτρικό ρεύμα, όταν δηλαδή υπάρχει κίνηση ηλεκτρικών φορτίων μέσα στην δομή του, αυτός δημιουργεί γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο ανάλογο με την τιμή του ρεύματος που τον διαρρέει[1]. Και στην περίπτωση ενός μόνιμου μαγνήτη το μαγνητικό πεδίο που υπάρχει είναι αποτέλεσμα της κίνησης των ηλεκτρονίων, η άλλη περίπτωση στην οποία έχουμε την δημιουργία μαγνητικού πεδίου πέρα της κίνησης ηλεκτρικών φορτίων είναι όταν μεταβάλλεται χρονικά η πυκνότητα ηλεκτρικής ροής του ηλεκτρικού πεδίου[4]. Βασική έννοια του ΜΠ είναι η ένταση του, που είναι ανάλογη με το ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό, η στην περίπτωση πηνίου, γινόμενο της έντασης του ρεύματος και των αριθμών σπειρών του ως προς το μέσο μήκος διαδρομής, σχέση 1.1.

$$H \cdot l = N \cdot i \quad (1.1)$$

Δεύτερη βασική έννοια είναι η μαγνητική επαγωγή (flux density)  $B$ . Το μέγεθος αυτό εκφράζει την ισχύς του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου, δηλαδή την πυκνότητα των μαγνητικών γραμμών που διαπερνούν κάθετα μια επιφάνεια είτε ενός τετραγωνικού μέτρου είτε ενός τετραγωνικού εκατοστού, μονάδα μέτρησης των δυο αυτών περιπτώσεων αντιστοίχως είναι τα  $T$  (tesla) ή τα Gauss. Ο συνολικός αριθμός μαγνητικών γραμμών που διαπερνούν μια επιφάνεια  $S$  ονομάζεται μαγνητική ροή  $\Phi$ , σχέση 1.3. Κοινή

μεταβλητή της έντασης του ΜΠ και της μαγνητικής επαγωγής, όπως και βασική έννοια, είναι η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  (permeability) του υλικού πάνω στο οποίο τυλίγονται τα τυλίγματα και ονομάζουμε πυρήνα, συνδέει τα δυο προαναφερθέντα μεγέθη με τον τρόπο που εκφράζει η σχέση 1.2. [1]

$$B = \mu \cdot H \quad (1.2)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού εκφράζει, σε συνδυασμό με αυτήν του κενού, τις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών και η τιμή της τα διαχωρίζει σε τρεις κατηγορίες, τα διαμαγνητικά, τα παραμαγνητικά και τα σιδηρομαγνητικά.[5]

### 1.2.1 Μαγνητική αντίσταση

Βασικός όρος προς ανάλυση είναι η μαγνητική αντίσταση  $R_m$  η οποία εκφράζεται από την σχέση 1.3. Οι μεταβλητές που την ορίζουν είναι οι διαστάσεις, το μέγεθος του πυρήνα και το υλικό κατασκευής του.[1]

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad (1.3)$$

Η μεταβλητή  $l$  του αριθμητή συμβολίζει το μήκος της διαδρομής της μαγνητικής ροής στον πυρήνα ενώ η μεταβλητή  $\mu$ , όπως γνωρίζουμε, είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και  $S$  είναι η συνολική επιφάνεια του πυρήνα. Ο λόγος που αυτή η σχέση έχει μεγάλη βαρύτητα είναι επειδή βοηθάει στον ορισμό ενός νόμου στα μαγνητικά κυκλώματα αντίστοιχο του νόμου του Ohm στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Από τον συνδυασμό των σχέσεων 1.1 και 1.3 υπάρχει η δυνατότητα ορισμού της μαγνητικής ροής να είναι ίση με το πηλίκο της μαγνητοεγερτικής δύναμης (MMF) και της μαγνητικής αντίστασης.[1]

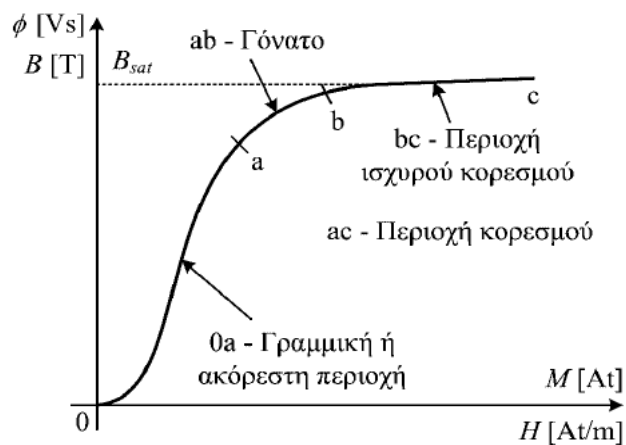
$$\varphi = \frac{N \cdot i}{\frac{l}{\mu \cdot S}} \quad (1.4)$$

Ο παρονομαστής της εξίσωσης 1.3 παρατηρούμε πως είναι ο όρος της μαγνητικής αντίστασης, ενώ ο αριθμητής είναι η ΜΕΔ. Από εδώ προκύπτει ο αντίστοιχος νόμος του Ohm των μαγνητικών κυκλωμάτων, με την μαγνητική ροή  $\varphi$  να έχει τον ρόλο του  $i$ , την ΜΕΔ τον ρόλο του  $V$  και την μαγνητική αντίσταση τον ρόλο της αντίστασης  $R$ , σχέση 1.5. Μια επίσης αντιστοιχία που μπορεί να γίνει μεταξύ των ηλεκτρικών και μαγνητικών κυκλωμάτων είναι ο ορισμός της αγωγιμότητας, όπου και στις δυο μορφές κυκλωμάτων είναι το αντίστροφο της αντίστασης και την μαγνητικής αντίστασης αντίστοιχα.[1]

$$\varphi = \frac{M}{R_m} \quad (1.5)$$

## 1.2.2 Καμπύλη μαγνήτισης

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες στις οποίες μπορούν να χωριστούν τα υλικά ανάλογα με την μαγνητική τους συμπεριφορά. Τα διαμαγνητικά υλικά είναι η πρώτη κατηγορία, η σχετική μαγνητική διαπερατότητα αυτών των υλικών είναι ελάχιστα μικρότερη της μονάδας [6]. Παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι το βισμούθιο (Bi), ο ψευδάργυρος (Zn) και ο χρυσός (Au). Δεύτερη κατηγορία μαγνητικών υλικών είναι τα παραμαγνητικά, που έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα ελάχιστα μεγαλύτερη της μονάδας. Παραμαγνητικά υλικά είναι παραδείγματος χάρη ο λευκόχρυσος (Pt), το χρώμιο (Cr) και το αργίλιο ή αλουμίνιο (Al). Τρίτη και τελευταία κατηγορία είναι τα σιδηρομαγνητικά υλικά τα οποία έχουν ως μαγνητικό χαρακτηριστικό την πολύ υψηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα, σε αυτήν την κατηγορία κατατάσσονται και οι φερίτες, το υλικό που χρησιμοποιείται αποκλειστικά στην κατασκευή των μαγνητικών στοιχείων ισχύος υψηλών συχνοτήτων. Να σημειωθεί πως η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είναι περίπου ίση με του κενού και έχει τιμή μονάδα ( $\mu_r=1$ ). Η υψηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι σημαντική σε έναν πυρήνα επειδή όπως είδαμε στην σχέση 1.3 βρίσκεται στον παρονομαστή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μικρή τιμή μαγνητικής αντίστασης στο υλικό του πυρήνα, δηλαδή μεγάλη μαγνητική αγωγιμότητα. Είναι κατά πολύ επιθυμητό η μαγνητική ροή να είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα και όχι στο κενό μεταξύ πυρήνα και τυλιγμάτων. Βέβαια δεν γίνεται να είναι συγκεντρωμένη η μαγνητική ροή αποκλειστικά στον πυρήνα, υπάρχουν κενά, είτε για λόγους άμεσους είτε και έμμεσους στα οποία παρατηρείται ροή. Αυτή η ροή ονομάζεται ροή σκέδασης  $\phi_1$  (leakage flux). Εν συνεχεία, πρέπει να αναφερθεί πως η μαγνητική διαπερατότητα δεν έχει σταθερή τιμή στην πραγματικότητα, ανάλογα με το μέγεθος της μαγνητικής ροής παρατηρείται μεγάλη μεταβολή της[1].



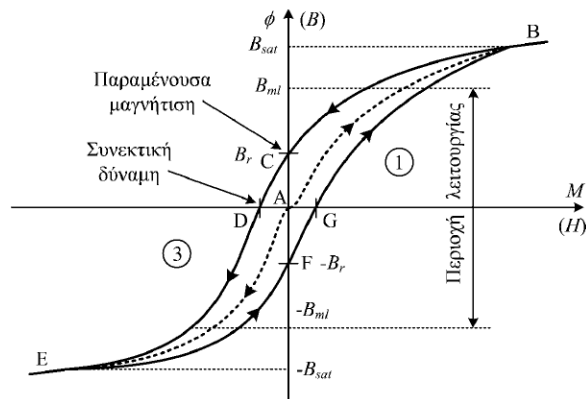
Σχήμα 1.1 Καμπύλη μαγνήτισης σιδηρομαγνητικών υλικών.

Η καμπύλη μαγνήτισης είναι ένα σχήμα το οποίο βοηθάει στην ορθή κατανόηση του συσχετισμού της μαγνητικής ροής και της μαγνητικής διαπερατότητας. Με την αύξηση της μαγνητικής ροής, παρατηρείται και η αναμενόμενη αύξηση της ΜΕΔ. Ωστόσο ενώ στην αρχή της μεταβολής έχουμε γραμμική αύξηση του ρεύματος με την μαγνητική ροή, στην συνέχεια γίνεται εκθετική και τέλος φτάνει σε μια σταθερή κατάσταση κορεσμού. Την μαγνητική διαπερατότητα εκφράζει η κλίση της καμπύλης του σχήματος 1.1, αφού το σχήμα εκφράζει υπό μια διαφορετική κλίμακα την μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής ως προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Σταθερή τιμή στην μαγνητική διαπερατότητα παρατηρείται μόνο σε ένα τμήμα της γραμμικής περιοχής, ενώ στην περιοχή κορεσμού αυτή φαίνεται να μηδενίζεται, χάνει δηλαδή το υλικό του πυρήνα τα μαγνητικά του χαρακτηριστικά. Αυτό είναι κάτι ανεπιθύμητο διότι όπως θα αναλυθεί

και στο επόμενο κεφάλαιο, οι απώλειες εξαρτώνται κατά μεγάλο βαθμό από την περιοχή λειτουργίας του πυρήνα, ο οποίος δεν πρέπει να δουλεύει σε οποιαδήποτε άλλη περιοχή πέρα της γραμμικής, για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων πάντα αφού οι μετασχηματιστές του δικτύου τροφοδοσίας της ΔΕΗ είναι σχεδιασμένοι να δουλεύουν στο “γόνατο” της καμπύλης. Γραμμική περιοχή ονομάζεται η περιοχή ανάμεσα από τα σημεία 0 και  $\alpha$ , “γόνατο” είναι η περιοχή  $ab$  και περιοχή κορεσμού είναι η περιοχή  $bc$ . [4]

### 1.2.3 Βρόχος Υστέρησης

Η τυπική καμπύλη μαγνήτισης σαν πρώτο βήμα για την κατανόηση της συμπεριφοράς του πυρήνα κατά την λειτουργία μαγνητικών στοιχείων είναι μια καλή αρχή όμως δεν είναι αρκετά επεξηγηματική. Ο βρόχος υστέρησης του υλικού του πυρήνα που εικονίζεται στο σχήμα 1.2, δείχνει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα στην συμπεριφορά του πυρήνα κατά την διάρκεια ενός πλήρους κύκλου κύκλου τροφοδοσίας. Οι δύο μεταβλητές στις οποίες βασίζεται η ύπαρξη του βρόγχου υστέρησης είναι η *συνεκτική δύναμη*  $D$  (*coercive force*) και η *παραμένουσα μαγνήτιση*  $B_r$  (*residual flux*). [4]



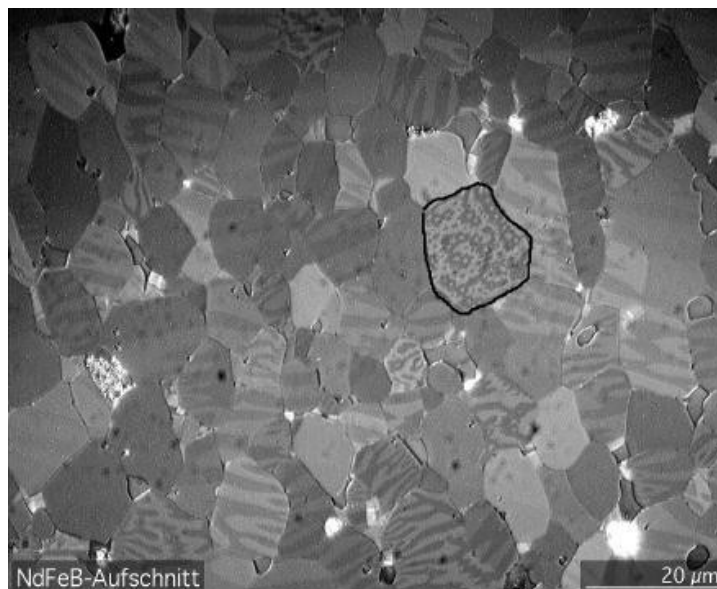
Σχήμα 1.2. Βρόχος υστέρησης του πυρήνα.

Θεωρώντας ένα πηνίο με πυρήνα από φερίτη ο οποίος αρχικά είναι απομαγνητισμένος και στην συνέχεια διεγείρεται με εναλλασσόμενο ρεύμα εξηγείται ο σχηματισμός του βρόγχου υστέρησης. Στο σημείο A θεωρούμε την αρχή του βρόγχου όπου είναι και το κέντρο των αξόνων, ο κάθετος  $x$  εκφράζεται από την τιμή της μαγνητικής ροής  $\phi$  και της μαγνητικής επαγωγής  $B$  και ο οριζόντιος  $y$  εκφράζεται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  και της μαγνητεγερτικής δύναμης  $M$ . Από το σημείο A έως και το σημείο B με την μεταβολή του ρεύματος παρατηρείται η τυπική καμπύλη μαγνήτισης του υλικού του πυρήνα με σημείο κορεσμού το B, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σχήμα 1.1. Με το δεύτερο τέταρτο της περιόδου τροφοδοσίας το οποίο εκφράζουν τα σημεία BC παρατηρείται πως η μεταβολή της επαγωγής διαφέρει από την καμπύλη μαγνήτισης, ο πυρήνας την χρονική στιγμή αυτή απομαγνητίζεται. Ενώ στο σημείο C το ρεύμα και η μαγνητεγερτική δύναμη μηδενίζονται, η επαγωγή διατηρείται σε μια τιμή η οποία στους φερίτες είναι της τάξεως των 0.06-0.13 T για τιμή θερμοκρασίας 100°C. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται μαγνητική υστέρηση, ενώ η τιμή της επαγωγής  $B_r$  ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση (*residual flux*). Εκτός από τον σχεδιασμό τεχνητών μόνιμων μαγνητών, το φαινόμενο της παραμένουσας μαγνήτισης είναι ανεπιθύμητο. Ο λόγος που το φαινόμενο της παραμένουσας μαγνήτισης είναι ανεπιθύμητο είναι επειδή κατά την αντιστροφή του ρεύματος κατά το δεύτερο μισό της περιόδου του κύκλου τροφοδοσίας πρέπει να ασκηθεί μαγνητεγερτική δύναμη τιμής  $D$  αποκλειστικά για την απομαγνήτιση του πυρήνα, η δύναμη αυτή είναι η μεταβλητή που αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου, *συνεκτική δύναμη*. Σύνθητες τιμή της συνεκτικής δύναμης για τους φερίτες είναι 8-15 A/m. Η δύναμη αυτή παράγει ένα ποσοστό θερμότητας το οποίο κατά επέκταση είναι

αίτιο της πτώσης του βαθμού απόδοσης του μαγνητικού στοιχείου, αναλυτικότερα οι απώλειες στο κεφάλαιο 2. Κατά την αντίθετη φορά του ρεύματος, μαγνητίζεται εξ αρχής ο πυρήνας έως το σημείο κορεσμού E. Παρατηρείται πως η καμπύλη μαγνήτισης στο διάστημα DE είναι συμμετρικό με την καμπύλη στο διάστημα BC. Συχνές τιμές μαγνητικής επαγωγής κορεσμού στους φερίτες είναι τα 0.36-0.53 T για τιμή θερμοκρασίας 25°C, ενώ για 100°C οι τιμές ελαττώνονται σε τιμές της τάξεως των 0.3-0.42T. Δεν είναι πολύ εύχρηστα τα υλικά με χαμηλή τιμή μαγνητικής επαγωγής κορεσμού επειδή είναι εύκολο να μπει σε κορεσμό ο πυρήνας κατά την λειτουργία του, κάτι που αυξάνει τις απώλειες όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια. Πίσω στην ανάλυση του σχήματος 2X2, στο διάστημα EF μηδενίζεται η μαγνητεγερτική δύναμη και επανεμφανίζεται η παραμένουσα μαγνήτιση με τιμή αρνητική αυτήν την φορά. Με την άσκηση της θετικής μαγνητεγερτικής δύναμης (συνεκτική) μηδενίζεται η τιμή της μαγνητικής επαγωγής και από το σημείο g αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου έως το σημείο B που φτάνει ο πυρήνας στον κορεσμό όπου και ολοκληρώνεται ο βρόχος υστέρησης [1].

#### 1.2.4 Περιοχές Weiss

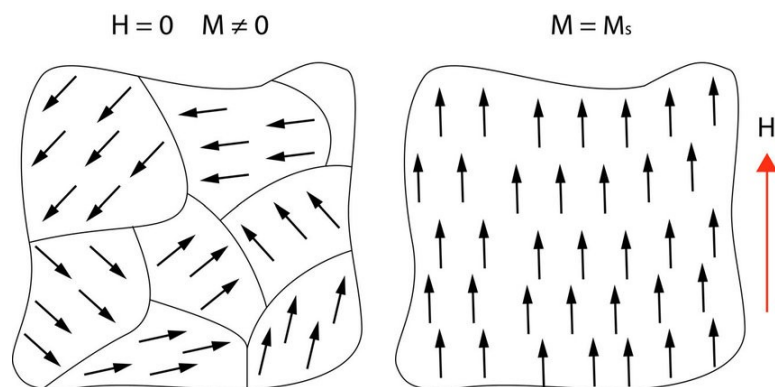
Οι ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι και αυτές που τους δίνουν την αξία τους στον σχεδιασμό μαγνητικών στοιχείων, ιδιότητες οι οποίες προέρχονται από την ύπαρξη των περιοχών Weiss στην κρυσταλλική δομή τους. Τα ηλεκτρόνια μπορούν να δημιουργήσουν μαγνητικό πεδίο με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι λόγω της δορυφορικής περιφοράς τους γύρο από τον πυρήνα, μαγνητικό πεδίο αμελητέο στα σιδηρομαγνητικά υλικά αφού εξουδετερώνεται αμοιβαία από όλα τα άτομα, και ο δεύτερος λόγω της περιστροφής γύρο από τον άξονα τους. Ο δεύτερος λόγος ύπαρξης ΜΠ είναι η αιτία δημιουργίας στοιχειωδών μαγνητών οι οποία εκ πρώτης όψεως φαίνονται τυχαία προσανατολισμένοι όμως στην πραγματικότητα ο προσανατολισμός τους είναι τέτοιος ώστε η συνολική δυναμική ενέργεια να είναι η ελάχιστη.



Σχήμα 1.3 Περιοχές Weiss

Ο προσανατολισμός αυτός όμως μπορεί να επηρεαστεί, είναι ελαστικός στην επίδραση εξωτερικού ΜΠ και στην παροχή μηχανικής ή θερμικής ενέργειας. Στην κρυσταλλική δομή ενός σιδηρομαγνητικού υλικού όπου υπάρχει μεγαλύτερο σύμπλεγμα κρυστάλλων υπάρχουν πολλοί τέτοιοι στοιχειώδης μαγνήτες

ομαδοποιημένοι σε περιοχές, κάθε περιοχή με διαφορετικό προσανατολισμό. Αυτές είναι οι περιοχές Weiss που αναφέρθηκαν στην αρχή της παραγράφου. Με πολύ μεγάλη κλίμακα μεγέθυνσης μπορούν να διακριθούν οι περιοχές αυτές αλλά και τα όρια τους που ονομάζονται τοιχώματα Bloch, όπως απεικονίζει η σχήμα 1.3. [4] Ο αναπροσανατολισμός των περιοχών Weiss είναι έργο το οποίο παράγεται από την ένταση και κατεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου  $H$ . Στα σιδηρομαγνητικά υλικά αυτή η ιδιότητα προκαλεί την μεγάλη μαγνητική τους διαπερατότητα.[5]. Όταν ένας πυρήνας φτάνει σε κατάσταση κορεσμού χάνει την παραπάνω ιδιότητα αφού όλες οι περιοχές Weiss του είναι πλέον προσανατολισμένες, οπότε η περαιτέρω αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου δεν θα έχει κάποιον σημαντικό αντίκτυπο στην μαγνητική ροή. Στο σχήμα 1.4 παρατηρείται πως οι περιοχές Weiss μεταβάλλονται ανάλογα με την ένταση και φορά του μαγνητικού πεδίου, όταν αυτό σταδιακά αυξάνετε. [4]



Σχήμα 1.4: Αλλαγή προσανατολισμού σε σχέση με ένταση μαγνητικού πεδίου

Με την απομάκρυνση του μαγνητικού πεδίου δεν επαναφέρονται όλες οι περιοχές στον αρχικό τους προσανατολισμό χωρίς την άσκηση κάποιας κατάλληλης μορφής ενέργειας, μένουν προσανατολισμένες, αυτή είναι και η εξήγηση του φαινομένου της παραμένουσας μαγνήτισης. Ο επαναπροσανατολισμός απαιτεί την επιρροή αντίθετης φοράς μαγνητικού πεδίου, συνεκτική δύναμη, έτσι ώστε να μηδενιστεί η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή. Ειδικά θα πρέπει να ασκηθεί μηχανική ενέργεια, παραδείγματος χάρι με την μορφή κρούσης ή θερμική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια ορίζει τις απώλειες υστέρησης.[4]

## 1.2.5 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και νόμος του Lenz

Τελευταίες αλλά εξίσου σημαντικές έννοιες του κεφαλαίου είναι η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και ο νόμος του Lenz. Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής παρατηρείτε χάρις τον Faraday ο οποίος για πρώτη φορά το ανακάλυψε. Με την μεταβολή της μαγνητικής ροής σε ένα πλαίσιο επάγεται στα άκρα του πλαισίου μια ηλεκτρεγερτική δύναμη ανάλογη με την ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής, σχέση 1.6.

$$e = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (1.6)$$

Με  $N$  συμβολίζεται ο αριθμός των σπειρών του μαγνητικού στοιχείου και  $\phi$  η μαγνητική ροή. Το γινόμενο του αριθμού των σπειρών με την μαγνητική ροή είναι η πεπλεγμένη μαγνητική ροή  $\lambda$ , όταν η

μαγνητική ροή είναι η ίδια σε όλες τις σπείρες του στοιχείου. Ο νόμος του Lenz είναι υπεύθυνος για το αρνητικό πρόσημο στην σχέση 1.6 Η πολικότητα της επαγομένης τάσης στο πλαίσιο είναι ανάλογη ώστε αν το πλαίσιο τροφοδοτεί κάποιο φορτίο, η ροή του ρεύματος αναπτύσσει μαγνητικό πεδίο αντίθετο αυτού του ρεύματος. Το ρεύμα του πλαισίου ονομάζεται επαγωγικό. Στο σχήμα 2χ5, μια διάταξη μετασχηματιστή, φαίνεται καθαρά η φορά του επαγωγικού ρεύματος. Στο πρωτεύον τύλιγμα διαρρέεται το ρεύμα  $i_1$  με αποτέλεσμα την δημιουργία της μαγνητικής ροής  $\phi_1$ . Η  $\phi_1$  διαπερνάει το τις σπείρες του δευτερεύοντος τυλίγματος αναπτύσσοντας έτσι την τάση επαγωγής  $e_2$ . Τροφοδοτώντας ένα φορτίο το δευτερεύον τύλιγμα, το επαγωγικό ρεύμα  $i_2$  έχει την αναγραφόμενη φορά. Με την σειρά του το  $i_2$  παράγει μαγνητική ροή  $\phi_2$  με φορά αντίθετη της  $\phi_1$ , επαληθεύοντας έτσι την θεωρία της διατήρησης της ενέργειας.[1] Εάν δεν είχαμε αντίθετη φορά στην μαγνητική ροή θα είχαμε ένα σύστημα με θετική ανάδραση όπου η μαγνητική ροή θα επαυξανόταν επ' άπειρων.

## 1.3 Πηνία

Τα πηνία στα ηλεκτρονικά είναι επιθυμητά για την ιδιότητά τους να αποθηκεύουν ενέργεια, μια ιδιότητα την οποία εκμεταλλευόμαστε είτε για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου είτε για την ανίχνευση αυτού. Κατά κόρο αποτελούνται από έναν πυρήνα και τουλάχιστον ένα τύλιγμα. Στην πράξη υπάρχουν πολλές μεταβλητές στην κατασκευή και σχεδίαση των πηνίων, προσαρμοσμένες στις ανάγκες της διάταξης στην οποία θα χρησιμοποιηθούν. Ως αποτέλεσμα έχει γίνει η κατηγοριοποίηση τους ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους. Οι κύριες κατηγορίες που θα αναλυθούν είναι τα πηνία με πυρήνα από φερίτη, τα πηνία αέρα και τα τοροειδή πηνία. Πάραυτα υπάρχουν και άλλα είδη όπως τα πηνία για ασύρματη φόρτιση, τα SMD πηνία, τα συζευγμένα πηνία, τα μεταβλητά πηνία, τα πηνία πολλαπλών στρώσεων και τα αξονικά πηνία με κώδικα χρωμάτων. Τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τα πηνία είναι η αυτεπαγωγή (L) σε Henry που εκφράζει το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής όπου ένα στοιχείο το οποίο προκαλεί επαγωγή ταυτόχρονα επιδράτε από αυτήν. Δεύτερο χαρακτηριστικό μέγεθος ενός πηνίου είναι η αγωγιμότητα που παρουσιάζει στο κύκλωμα, αυτή προκαλείται από το γεγονός πως το αγωγός που χρησιμοποιείται για να γίνει το τύλιγμα του πηνίου δεν είναι τέλειος αλλά παρουσιάζει μια αντίσταση στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό μέγεθος είναι η ονομαστική ισχύς του στοιχείου σε Watt που εκφράζει την ισχύς λειτουργίας στην οποία μπορεί το στοιχείο να ανταπεξέλθει.[1]

### 1.3.1 Είδη πηνίων

Πρώτη κατηγορία προς ανάλυση είναι τα πηνία αέρος, τα οποία όπως προϋποθέτει η ονομασία τους δεν έχουν φερομαγνητικό υλικό στον πυρήνα όμως έναν πυρήνα πλαστικό η και καθόλου[8]. Τα πηνία αυτά έχουν εφαρμογή σε διατάξεις εξοπλισμού ήχου.

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά πηνίων αέρα.

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Ανοχή	$\pm 2\%$
Αυτεπαγωγή	0.85mH
Δείκτης καλωδίου	18 AWG
Αντίσταση συνεχούς τάσης	0.44 $\Omega$
Ονομαστική Ισχύς	30 W RMS

Η καμπύλη μαγνήτισης τους είναι γραμμική επειδή δεν παρουσιάζουν φαινόμενα κορεσμού σε σχέση με άλλα πηνία όμως έχουν πολύ υψηλή ροή σκέδασης. Χρήση για το πηνίο αυτό υπάρχει και σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, συντονισμού, φίλτρων, κυκλώματα snubber λόγω τις απουσίας απωλειών πυρήνα, της ελάχιστης απώλειας σήματος και της μικρής μαγνητικής διαπερατότητας. Παράδειγμα χαρακτηριστικών ενός πηνίου αέρα παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1.

Επόμενη βασική κατηγορία πηνίων που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά ισχύος είναι τα τοροειδή πηνία. Από την ονομασία τους γίνεται αντιληπτό το γεωμετρικό τους σχήμα το οποία είναι κυκλικό. Το υλικό του πυρήνα στην περίπτωση αυτή είναι από φερίτη οπότε και η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας είναι μεγάλη. Κατ' επέκταση παράγει ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο και μεγάλη αυτεπαγωγή ενώ παράλληλα έχει μικρή αγωγιμότητα αφού τα τυλίγματα που χρειάζονται για την επίτευξη των υψηλών αυτών χαρακτηριστικών είναι λίγα. Στον πίνακα 1.2 αναγράφονται χαρακτηριστικά τέτοιου είδους πηνίων. Τα πηνία αυτά είναι χρήσιμα σε εφαρμογές φίλτρων εξόδου διατάξεων διακοπτικών τροφοδοτικών, σε ιατρικά μηχανήματα, σε διακοπτικούς ρυθμιστές και σε βιομηχανικούς ελεγκτές.[7]

Πίνακας 1.2 Χαρακτηριστικά τοροειδών πηνίων.

Χαρακτηριστικά	Συνθήκες
560 $\mu$ H $\pm$ 15%	10KHz / 5 mA
77 m $\Omega$ $\pm$ 10%	Ta = 25°C

Τελευταία και ίσως σημαντικότερη κατηγορία πηνίων για τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι τα πηνία με πυρήνα από φερίτη. Ο λόγος που τα καθιστά τόσο σημαντικά είναι η αποδοτική τους λειτουργία σε υψηλές συχνότητες, όπως και ο μικρότερος τους όγκος. Τα πηνία αυτά χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλη τιμή μαγνητικής διαπερατότητας, υψηλή αγωγιμότητα και μικρές απώλειες δινορευμάτων. Η χρήση αυτών των πηνίων γίνεται σε όλες τις διακοπτικές διατάξεις των ηλεκτρονικών ισχύος, όπως και σε φίλτρα Pi. Ο πίνακας 1.1 παρέχει ενδεικτικές τιμές που μπορεί ενδεχομένως να έχουν τα πηνία αυτά.[7]

Πίνακας 1.3 Χαρακτηριστικά πηνίων με πυρήνα από φερίτη.

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Αυτεπαγωγή	5 H έως 10 H
Συχνότητα λειτουργίας	$\geq$ 150 KHz
Θερμοκρασία λειτουργίας	-25°C έως +120°C

## 1.4 Μετασχηματιστές

Ένας μετασχηματιστής κατά κύριο λόγο αποτελείται από έναν πυρήνα και από δύο τουλάχιστον τυλίγματα. Το τύλιγμα που θεωρείται η είσοδος του μετασχηματιστή ονομάζεται πρωτεύων ενώ το τύλιγμα εξόδου δευτερεύων. Σε αντίθεση με το πηνίο, ο σκοπός του μετασχηματιστή είναι να μετασχηματίζει την ενέργεια που δέχεται στην είσοδο του και όχι να την αποθηκεύει, πέρα της διάταξης του μετατροπέα flyback. Μια επιπλέον ιδιότητα που έχει ο μετασχηματιστής είναι πως απομονώνει γαλβανικά το κύκλωμα που ακολουθεί μετά το δευτερεύων τύλιγμα του από το κύκλωμα που τροφοδοτεί το πρωτεύων τύλιγμα του. Όταν δεν υπάρχει γαλβανική απομόνωση δεν μπορούν, για λόγους ασφαλείας, οι διατάξεις μετατροπέων να χρησιμοποιηθούν σε διατάξεις τροφοδοσίας[1]. Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη των μετασχηματιστών είναι

ο λόγος μεταξύ των τυλιγμάτων, ή αλλιώς λόγος σπειρών. Αυτή η αναλογία εκφράζει τον λόγο των αριθμών τυλιγμάτων μεταξύ του πρωτεύοντος τυλίγματος και του δευτερεύοντος. Δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η ονομαστική αγωγιμότητα που παρουσιάζει  $R_m$  όπου συνήθως είναι μερικά Ohm. Τρίτο χαρακτηριστικό είναι οι τάσεις εισόδου  $V_{in}$  και εξόδου  $V_{out}$  για τις οποίες έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί ο μετασχηματιστής, όπως και η συχνότητα λειτουργίας του  $F_s$ , που μπορεί να είναι από 50 Hz μέχρι και εκατοντάδες KHz ανάλογα με την διάταξη στην οποία εφαρμόζεται. Τελευταίο χαρακτηριστικό των μετασχηματιστών είναι η ονομαστική ισχύς για την οποία έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν. Όπως στα πηνία έτσι και στους μετασχηματιστές υπάρχει μεγάλη ποικιλία στο είδος και την λειτουργία τους, αναλογικά με τον σχεδιασμό τους και τα υλικά από τα οποία αποτελούνται.

### 1.4.1 Είδη μετασχηματιστών

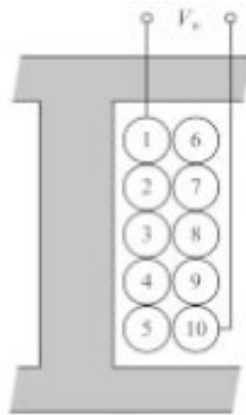
Ένας διαχωρισμός που έχει γίνει στους μετασχηματιστές είναι ανάλογος με τον λόγο των σπειρών του. Εάν ο λόγος των σπειρών του είναι  $\alpha:\beta$  και το  $\alpha$  είναι μεγαλύτερος αριθμός του  $\beta$ , τότε ο μετασχηματιστής είναι υποβιβασμού (step-down). Υποβιβάζοντας την τάση εισόδου αυξάνεται το ρεύμα εξόδου. Στην περίπτωση όπου το  $\alpha$  είναι μικρότερο του  $\beta$  τότε έχουμε έναν μετασχηματιστή αναβάθμισης της τάσης (step-up). Με την αναβάθμιση της τάσεως μειώνεται το ρεύμα εξόδου του μετασχηματιστή. Υπάρχουν και μετασχηματιστές όπου το  $\alpha$  είναι ίσο με το  $\beta$ , αυτοί λέγονται 1:1 και έχουν εφαρμογή σε διατάξεις όπου η απομόνωση του δικτύου του παρόχου από το ακόλουθο κύκλωμα είναι απαραίτητη για λόγους ασφαλείας. Ο πιο σύνηθες τύπος μετασχηματιστή είναι ο μετασχηματιστής διανομής των 50 Hz. Αυτός ο μετασχηματιστής εντάσσεται στην κατηγορία υποβαθμιστικών (step-down) και μετατρέπει τάσεις των 11 KV έως και τάσεις των 230V. Είναι μεγάλος σε μέγεθος λόγω της χαμηλής συχνότητας λειτουργίας του και μπορεί να περιέχει έλαιο ή πετρέλαιο για προστασία από υγρασία, μόνωση των τυλιγμάτων μεταξύ τους και για ψύξη. Μπορεί να είναι μονοφασικός ή τριφασικός. Επόμενη κατηγορίας μετασχηματιστών είναι οι μετασχηματιστές ισχύος. Αυτοί οι μετασχηματιστές έχουν χρήση σε κομβικά σημεία του δικτύου διανομής και είναι σχεδιασμένοι για τιμές τάσεων της τάξης των εκατοντάδων KV. Η ονομαστική τους ισχύς είναι συνήθως 200 MVA. Αυτοί οι μετασχηματιστές είναι τριφασικοί[8]. Επόμενη κατηγορία μετασχηματιστών είναι οι μετασχηματιστές οργάνων. Η χρήση αυτών είναι η απομόνωση του πρωτεύον τυλίγματος από τις διατάξεις που ακολουθούν μετά το δευτερεύον τύλιγμα και η μέτρηση μεγεθών των διατάξεων. Τέτοιου είδους μετασχηματιστές είναι του ρεύματος που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση πολύ μεγάλων ρευμάτων με επαγωγική μέτρηση στο πρωτεύον και υποβάθμιση ρεύματος στο δευτερεύον για την ευκολότερη μέτρηση του. Ο μετασχηματιστής που είναι προς μελέτη στην παρούσα εργασία είναι μετασχηματιστής ισχύος υψηλών συχνοτήτων. Αυτοί οι μετασχηματιστές έχουν την ιδιότητα να απομονώνουν το δίκτυο από το ακόλουθο κύκλωμα έχοντας μικρότερο όγκο πυρήνα και αποτελούν κρίσιμο στοιχείο στην υλοποίηση διακοπτικών τροφοδοτικών. Οι συχνότητα λειτουργίας του μπορεί να κυμανθεί από δεκάδες KHz έως και λίγα MHz. [1].

## 1.5 Κοινές μεταβλητές των επαγωγικών στοιχείων

Τα επαγωγικά στοιχεία όπως προαναφέρθηκε, έχουν πολλές μεταβλητές στην σχεδίαση τους και την επιλογή των υλικών. Το πάχος και ο τύπος αγωγού, με τον οποίο θα γίνει η περιέλιξη των σπειρών, το γεωμετρικό σχήμα του πυρήνα που αποτελεί βάση του μετασχηματιστή ή του πηνίου όπως και το μέγεθος του και το διάκενο που ενδεχομένως μπορεί να χρειάζεται. Όλα αυτά αποτελούν μεταβλητές τις οποίες πρέπει να λάβει υπόψιν ο μηχανικός που θα αναλάβει το έργο να σχεδιάσει έναν μετασχηματιστή.[1]

### 1.5.1 Τύποι τυλιγμάτων

Σημαντικό ρόλο στην σχεδίαση μετασχηματιστών και πηνίων έχει η επιλογή του τυλίγματος για την περιέλιξη των τυλιγμάτων. Το πιο σύνηθες είδος τυλίγματος είναι ένας απλός κυλινδρικός χάλκινος αγωγός ανάλογου πάχους, με βασικό μειονέκτημα τον μικρό παράγοντα πληρότητας (fill factor  $K$ ), σχήμα 1.5. Ο παράγοντας αυτός εκφράζει τον λόγο μεταξύ του όγκου του τυλίγματος και τον διαθέσιμο χώρο του παραθύρου προς περιέλιξη του πυρήνα. Όταν ο παράγοντας πληρότητας είναι μικρός τότε τα κενά μεταξύ των τυλιγμάτων είναι μεγαλύτερα και κατά επέκταση ο όγκος του στοιχείου αυξάνεται.



Σχήμα 1.5 Διατομή σπειρών τυλιγμάτων μαγνητικού στοιχείου.

Άλλο βασικό είδος αγωγού για περιέλιξη επαγωγικών στοιχείων είναι ο αγωγός Litz. Όταν υπάρχει έντονα το επιδερμικό φαινόμενο, βλ. κεφ 3, ο απλός χάλκινος αγωγός δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις της διάταξης. Στην περίπτωση αυτή γίνεται χρήση του αγωγού Litz που είναι ένας αγωγός που αποτελείται από πολλούς μικρότερης διαμέτρου αγωγούς παράλληλα συνδεδεμένους και απομονωμένους μεταξύ τους με σκοπό την μείωση του φαινομένου.

Current	3A	3A	5A	6A	18A	20A (polyimide film)	20A (No Silk)	40A (No Silk)	40A	70A
Strand Size (mm)	0.1	0.07	0.2	0.15	0.05	0.05	0.2	0.1	0.1	0.1
No. of Strands	75	160	25	60	1500	1740	100	1000	1000	2000

Σχήμα 1.6 Αγωγός Litz και πίνακας χαρακτηριστικών του.

Αναλογικά με την ονομαστική τιμή της έντασης του ρεύματος της διάταξης αλλάζει και ο αριθμός απομονωμένων αγωγών χωρίς να αλλάζει η διάμετρος τους, όπως φαίνεται στην σχήμα 1.6. Για τιμές ρεύματος μεγαλύτερες των αναγραφόμενων αυξάνεται η διάμετρος των μεμονωμένων αγωγών η οποία για παράδειγμα μπορεί να κυμανθεί από 0.02 mm έως και 0.5 mm και σε κάποιες διατάξεις ακόμη περισσότερο. Μειονέκτημα αυτού του αγωγού είναι το ακριβό του κόστος. Για καλύτερο παράγοντα πληρότητας  $K$  γίνεται χρήση τετράγωνου αγωγού, όπου στην περιέλιξη ελαχιστοποιούνται τα κενά κατά πολύ μεγάλο βαθμό.

Όπως φαίνεται στην σχήμα 1.7, μπορεί να τυλιχτεί και σε τοροειδή μορφή και σε τετράγωνη μορφή. Βασικό μειονέκτημα αυτού του αγωγού είναι η ανάγκη ειδικού εξοπλισμού για την περιέλιξη των τυλιγμάτων.



Σχήμα 1.7 Τυλίγματα με τετραγωνικό αγωγό.

Τέλος σαν επιλογή υπάρχει και το φύλλο χαλκού. Βασικό πλεονέκτημα του είναι το γεωμετρικό του σχήμα που επιτρέπει την πολύ απλή και εύκολη περιέλιξη καταφέροντας παράλληλα πολύ καλό παράγοντα πληρότητας. Το πρόβλημα που παρουσιάζει αυτό το είδος τυλιγματος είναι οι αυξημένες απώλειες από δυνορεύματα, βλ. κεφ 3. [9].

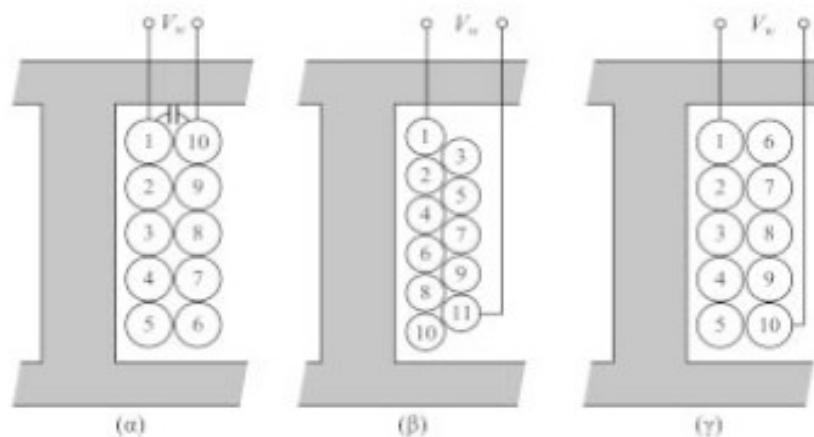
### 1.5.2 Διατομή αγωγού

Η επιλογή της διατομής του αγωγού του οποίου θα γίνει χρήση σε μια διάταξη υψηλών συχνοτήτων, όπου ο βαθμός απόδοσης απαιτείται να είναι όσο πιο ιδανικός γίνεται, πρέπει να είναι επίσης καλά μελετημένη. Δεν αρκεί η αντοχή του αγωγού να είναι μόνο από άποψη ονομαστικής έντασης του ρεύματος, αντιθέτως πρέπει να είναι λίγο πιο πολύπλευρα τα κριτήρια επιλογής του. Στον πίνακα 1.4 αναγράφεται η κατάταξη αγωγών ως προς την διάμετρο τους βασισμένη στο πρότυπο AWG (American Wire Gauge), δίνεται επίσης η συχνότητα στην οποία το επιδερμικό φαινόμενο είναι ελάχιστο. Το συμπέρασμα που βγαίνει από τον παρακάτω πίνακα είναι πως για την ελαχιστοποίηση του επιδερμικού φαινομένου θα πρέπει να γίνει χρήση αγωγών πολύ μικρής διαμέτρου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός άλλου προβλήματος που είναι η πολύ μικρή ένταση ρεύματος που είναι εφικτό να δεχτούν οι αγωγοί αυτοί. Επιπλέον πρόβλημα αποτελεί η μεγάλη αγωγιμότητα που παρουσιάζουν οι μικρότερης διαμέτρου αγωγοί, αφού η αγωγιμότητα ενός αγωγού είναι αντιστρόφως ανάλογη του εμβαδού της διατομής του  $A$ , σχέση 1.7. Και τα δυο αυτά προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με την χρήση πολλών αγωγών παράλληλα συνδεδεμένων και απομονωμένων μεταξύ τους ή με την χρήση αγωγού Litz.

$$R_{DC} = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{\rho \cdot l}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (1.7)$$

### 1.5.3 Μέθοδος περιέλιξης

Πέραν της επιλογής των υλικών για τα τυλίγματα, παράμετρος αποτελεί και η μέθοδος περιέλιξης. Μια επιπλοκή που παρουσιάζεται μεταξύ των σπειρών στα μαγνητικά στοιχεία είναι η παρασιτική χωρητικότητα. Οι αγωγοί των σπειρών ενώ είναι μονωμένοι μεταξύ τους, στις υψηλές τάσεις υπάρχει η περίπτωση δύο αγωγοί και η μόνωση να δημιουργήσουν έναν πυκνωτή. Η ενέργεια που ενδεχομένως αποθηκεύεται εκεί μπορεί να προκαλέσει αιχμές τάσης (spikes). Η ενέργεια που αποθηκεύεται ως παρασιτική χωρητικότητα είναι ίση με το τετράγωνο της τάσης μεταξύ των σπειρών στην οποία επάγεται. Επομένως, με την μεγαλύτερη τάση ανάμεσα στα τυλίγματα το φαινόμενο της παρασιτικής χωρητικότητας γίνεται πιο έντονο. Στο σχήμα 1.8 απεικονίζονται τρεις μέθοδοι περιέλιξης, η γραμμική μέθοδος, η προοδευτική και η μέθοδος Z. [1]



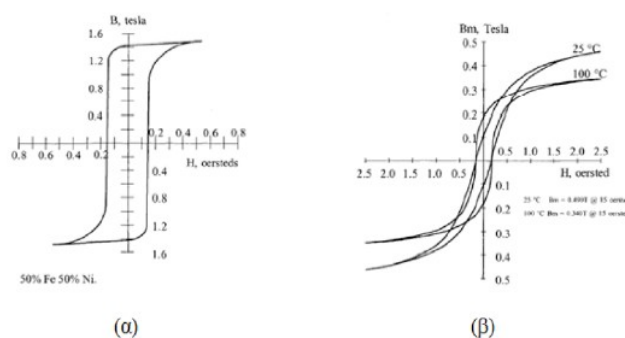
Σχήμα 1.8 Μέθοδοι περιέλιξης των σπειρών ενός τυλίγματος.

Το σχήμα 1.5α παρουσιάζει την γραμμική μέθοδο, όπου η πρώτη σπείρα την πρώτης στρώσης και η τελευταία της δεύτερης έχουν κοινό σημείο αφετηρίας, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μέγιστη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο αυτών σπειρών, επομένως και μεγάλη παρασιτική χωρητικότητα. Λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η περιέλιξη με την προοδευτική μέθοδο, σχήμα 1.5β. Στην περίπτωση αυτή τα δυο άκρα της διαφοράς δυναμικού δεν συμπίπτουν σε κοινό σημείο. Με αυτόν τον τρόπο η παρασιτική χωρητικότητα ελαχιστοποιείται, όμως δεν μηδενίζεται αφού η κάθε σπείρα έχει διαφορετική διαφορά δυναμικού με την επόμενη ή προηγούμενη της. Η άλλη μέθοδος του σχήματος 1.5γ είναι η Z η οποία συνδυάζει χαρακτηριστικά των δυο προηγούμενων. [1]

### 1.5.4 Υλικό πυρήνα

Θεμέλιο στην κατασκευή μαγνητικών στοιχείων αποτελεί το υλικό κατασκευής του πυρήνα. Ανάλογα με την εφαρμογή και τις παραμέτρους της μελέτης που γίνεται προ της κατασκευής, γίνεται η επιλογή του υλικού. Αρχικά, ως υλικό χρησιμοποιείται πάντα μαλακό μαγνητικό υλικό, επειδή είναι προαπαιτούμενο η μαγνήτιση και απομαγνήτιση του πυρήνα να γίνεται με ευκολία και με κάποια συχνότητα, χαρακτηριστικό που τα σκληρά μαγνητικά υλικά δεν έχουν. Δεύτερον, τα υλικά πυρήνα που απαιτούνται για την υλοποίηση μαγνητικών στοιχείων πρέπει να παρουσιάζουν το φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού, η μαγνητική τους διαπερατότητα πρέπει να είναι μεγάλη και να έχουν υψηλή τιμή μαγνήτισης κορεσμού. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως στους μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων είναι οι φερρίτες. Αυτοί

είναι μίγματα οξειδίων του σιδήρου με άλλα μαγνητικά υλικά όπως το μαγγάνιο, ο ψευδάργυρος και το νικέλιο. Οι φερρίτες με προσμίξεις μαγγανίου και ψευδάργυρου χρησιμοποιούνται για εφαρμογές όπου απαιτείται πολύ υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και για συχνότητες μικρότερες των 5 MHz. Στον αντίποδα, οι φερρίτες με προσμίξεις νικελίου και ψευδαργύρου παρουσιάζουν μικρότερο δείκτη μαγνητικής διαπερατότητας και μεγαλύτερη μαγνητική αντίσταση, χαρακτηριστικά που τους κάνουν ιδανικούς για εφαρμογές με συχνότητα διακόπτησης 2 MHz μέχρι μερικά εκατοντάδες MHz. Στον πίνακα 1.5 παρουσιάζονται κάποια υλικά με τα μαγνητικά χαρακτηριστικά τους [5]. Ενώ παρατηρείτε πως όσο πιο καθαρός είναι ο σίδηρος τόσο μεγαλύτερη διαπερατότητα παρουσιάζει, δεν γίνεται χρήση αυτού σαν πυρήνας. Προτιμάτε να χρησιμοποιείται πυρήνας αποτελούμενος από προσμίξεις οξειδίου του σιδήρου και άλλων μαγνητικών στοιχείων και αυτό επειδή η διαπερατότητα είναι περισσότερο ελεγχόμενη και τα υλικά πιο εύχρηστα, όπως φαίνεται από το σχήμα 1.9[10]. Το εμβαδό του βρόγχου υστέρησης στα υλικά με προσμίξεις είναι σαφώς μικρότερο κάτι που μεταφράζεται σε μειωμένες απώλειες πυρήνα.



Σχήμα 1.9 Βρόχος υστέρησης κραμάτων σιδήρου και φερριτών.

Οι εταιρείες που αναπτύσσουν τα υλικά με τα ποσοστά περιεκτικότητας προσμίξεων δίνουν συνήθως ένα κωδικό όνομα χωρίς να δίνουν τα ακριβή στοιχεία, δίνουν όμως όλα τα μαγνητικά χαρακτηριστικά τους όπως φαίνεται στο φύλλο κατασκευαστή της εταιρείας magnetics [11]. Κάποια υλικά πυρήνα που χρησιμοποιούν οι μηχανικοί για την σχεδίαση μετασχηματιστών είναι οι πυρήνες από άμορφο χάλυβα (amorphous steel), που αποτελείται από πολυάριθμα λεπτά μεταλλικά φύλλα για την μείωση των δινορευμάτων. Αυτοί έχουν χρήση σε εφαρμογές όπου υπάρχει ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών και μεσαίες συχνότητες. Ένα άλλο υλικό πυρήνα είναι ο συμπαγής πυρήνας σιδήρου ο οποίος αποφεύγεται σε εφαρμογές AC λόγω μεγάλης τιμής δινορευμάτων, προσφέρει όμως υψηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής και διατηρεί υψηλών τιμών μαγνητικά πεδία. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι φερρίτες αποτελούν επίσης ένα υλικό κατασκευής πυρήνων, το πιο σύνθετο σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων χάρις την μειωμένη τιμή δινορευμάτων εντός της δομής τους. Άλλο υλικό είναι οι πυρήνες φύλλων σιδήρου μονωμένα μεταξύ τους με μη αγώγιμο υλικό. Αυτή η κατηγορία πυρήνων συναντάτε σε εφαρμογές μετατροπής της ενέργειας του δικτύου σε συχνότητες των 50 Hz. Βασικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν είναι η σημαντική μείωση του φαινομένου των δινορευμάτων.[1]

Πίνακας 1.4 Πίνακας διαμέτρων αγωγών σύμφωνα με το AWG πρότυπο.

AWG	Διάμετρος (mm)	Εμβαδό (mm <sup>2</sup> )	Αγωγιμότητα (Ohm/km)	Μέγιστο ρεύμα (Amperes)	Μέγιστη συχνότητα @ 100% δ
1	7.348	42.4	0.406	119	325 Hz
2	6.543	33.6	0.512	94	410 Hz
3	5.826	26.7	0.646	75	500 Hz
4	5.189	21.2	0.815	60	650 Hz
5	4.620	16.8	1.027	47	810 Hz
6	4.114	13.3	1.295	37	1.1 kHz
7	3.665	10.5	1.634	30	1.3 kHz
8	3.263	8.37	2.060	24	1.65 kHz
9	2.905	6.63	2.598	19	2.05 kHz
10	2.588	5.26	3.276	15	2.6 kHz
11	2.307	4.17	4.132	12	3.2 kHz
12	2.052	3.31	5.208	9.3	4.15 kHz
13	1.828	2.62	6.569	7.4	5.3 kHz
14	1.628	2.08	8.282	5.9	6.7 kHz
15	1.450	1.65	10.44	4.7	8.25 kHz
16	1.290	1.31	13.17	3.7	11 kHz
17	1.150	1.04	16.61	2.9	13 kHz
18	1.023	0.82	20.94	2.3	17 kHz
19	0.911	0.65	26.40	1.8	21 kHz
20	0.812	0.51	33.29	1.5	27 kHz
21	0.723	0.41	41.98	1.2	33 kHz
22	0.645	0.32	52.94	0.92	42 kHz
23	0.574	0.25	66.78	0.729	53 kHz
24	0.510	0.16	84.19	0.577	68 kHz
25	0.454	0.12	106.1	0.457	85 kHz
26	0.403	0.10	133.8	0.361	107 kHz
27	0.360	0.081	168.8	0.288	130 kHz
28	0.320	0.064	212.8	0.226	170 kHz
29	0.287	0.051	268.4	0.182	210 kHz
30	0.254	0.04	338.5	0.142	270 kHz
31	0.226	0.03	426.7	0.113	340 kHz
32	0.203	0.025	538.2	0.091	430 kHz
33	0.180	0.021	678.6	0.072	540 kHz
34	0.160	0.016	855.7	0.056	690 kHz
35	0.142	0.012	1079	0.044	870 kHz
36	0.127	0.010	1360	0.035	1.1 MHz
37	0.114	0.008	1715	0.028	1.35 MHz
38	0.101	0.006	2163	0.022	1.75 MHz
39	0.089	0.006	2728	0.017	2.25 MHz

### 1.5.5 Γεωμετρία πυρήνα

Η επιλογή του υλικού κατασκευής είναι το πρώτο βήμα στην επιλογή του κατάλληλου πυρήνα για την εκάστοτε εφαρμογή. Η γεωμετρία αποτελεί την δεύτερη παράμετρο επιλογής του. Έχει γίνει κατηγοριοποίηση μορφών των πυρήνων σε αυτούς με δακτυλιοειδή μορφή και σε αυτούς με μπομπίνα. Οι διαστάσεις του πυρήνα επιλέγονται σύμφωνα με προγράμματα βελτιστοποίησης τα οποία έχουν αναπτυχθεί από μηχανικούς σε συνδυασμό με τους κατασκευαστές.

Πίνακας 1.5 Υλικά και τα μαγνητικά χαρακτηριστικά τους.

Υλικό	Μαγνητική διαπερατότητα ( $\mu$ )	Μαγνήτιση κορεσμού (Tesla)	Συνεκτική δύναμη πεδίου ( $A \cdot m^{-1}$ )
99.91% Καθαρός Σίδηρος	5.000	2,15	80
99.95% Καθαρός Σίδηρος	180.000	2,15	4
Σίδηρος – 3% Πυρίτιο	30.000	2	12
Σίδηρος – 4% Πυρίτιο	7.000	1,97	40

Τα δεδομένα που χρειάζεται ένα πρόγραμμα για την επιλογή βέλτιστων διαστάσεων είναι για αρχή η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή, τα διαστήματα, το κόστος, η διαθεσιμότητα, ο όγκος των τυλιγμάτων μέχρι και οι επιλογές ψύξης. Το σχήμα 1.7 παρουσιάζει την ποικιλομορφία που υπάρχει στην γεωμετρία των πυρήνων της εταιρείας TDK ενώ ο πίνακας 1.7 τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των γεωμετριών γενικά.[10] Γεωμετρικό στοιχείο αποτελεί επίσης και η ύπαρξη διάκενου ή όχι. Το διάκενο δημιουργείται με σκοπό να ρυθμιστεί η κλίση της καμπύλης μαγνήτισης. Παρατηρείτε πως οι δακτυλοειδής πυρήνες έχουν χαμηλότερο κόστος με βασικό μειονέκτημα την δυσκολία περιέλιξης και την ανάγκη για ειδικό μηχανισμό περιέλιξης.



Σχήμα 1.10 Γεωμετρική μορφή πυρήνων από φερίτη της εταιρείας TDK. Δακτυλοειδής (α), EE (β), ETD (γ), pot (δ), RM (ε), PQ (στ).

Με τα σημερινά δεδομένα, οι πυρήνες που προτιμούνται στην σχεδίαση μαγνητικών στοιχείων είναι οι ΕΕ και ΕΤD. Αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε διατάξεις με ονομαστική ισχύς από 5W έως και 10kW. Αξιοσημείωτο μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι πυρήνες τύπου ΕΕ (Σχ. 1.10β) και ΕΤD (Σχ. 1.10γ) είναι η ανάπτυξη ισχυρών μαγνητικών πεδίων στον περιβάλλοντα χώρο του στοιχείου, αφού ο πυρήνας δεν περιβάλλεται εξ ολοκλήρου από τα τυλίγματα. Η είσοδος και έξοδος των αγωγών γίνεται πολύ εύκολα στις μπομπίνες και η ροή του αέρα είναι επαρκής για την ψύξη του. Οι πυρήνες pot (σχήμα 1.7δ) σαν τοπολογία εξαλείφουν σε μεγάλο βαθμό το φαινόμενο του ακτινοβολούμενου μαγνητικού πεδίου (EMI) καθώς δέχεται τα τυλίγματα στο κεντρικό του σκέλος και καλύπτει μεγαλύτερο ποσοστό του πυρήνα. Μειονέκτημα αποτελεί η αδυναμία καλής ψύξης τους και ο διαθέσιμος χώρος για τα τυλίγματα ο οποίος μπορεί να είναι πολύ περιοριστικός σε περίπτωση χρήσης πολλών ή μεγάλης διατομής αγωγών. Αυτοί βρίσκουν χρήση σε εφαρμογές ονομαστικής ισχύς μέχρι 125W. Η μέση προσέγγιση των δυο παραπάνω περιπτώσεων πυρήνα οδήγησαν στην ανάπτυξη των RM πυρήνων, σχήμα 1.10. Το ακτινοβολούμενο μαγνητικό πεδίο είναι μικρότερο σε σχέση με τους ΕΕ πυρήνες και ο διαθέσιμος χώρος για τα τυλίγματα είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τους pot πυρήνες. έτσι εξασφαλίζεται και καλύτερη ψύξη όπως και η επιλογή χρήσης αγωγών με μεγαλύτερη διατομή. Αυτό το είδος πυρήνα μπορεί να κατασκευαστεί με κενό στο κεντρικό σκέλος για την χρήση ράβδου σιδηρομαγνητικού υλικού ούτως ώστε ανάλογα με το βάθος εισχώρησης της να μεταβάλλεται και το μήκος του διάκενου και κατά επέκταση η αυτεπαγωγή σε εφαρμογή πηνίων.[1]. Η τελευταία κατηγορία του σχήματος 1.10 στ είναι οι πυρήνες PQ. Το πλεονέκτημα αυτής της γεωμετρίας είναι ο καλός λόγος όγκου προς επιφάνεια ψύξης και προς επιφάνεια τυλίγματος. Σε εφαρμογές όπου η ελαχιστοποίηση της θερμοκρασίας και του όγκου είναι απαραίτητα είναι η ορθή επιλογή.

# Κεφάλαιο 2 Απώλειες ισχύος επαγωγικών στοιχείων

## 2.1 Εισαγωγή στους παράγοντες απωλειών των επαγωγικών στοιχείων

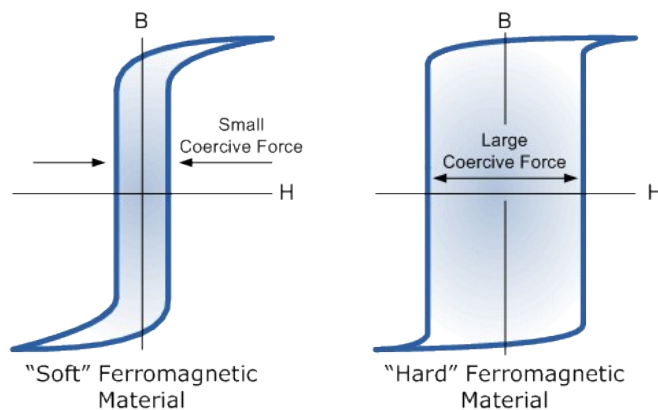
Απαραίτητη προϋπόθεση κάθε διάταξης ισχύος είναι ο καλός βαθμός απόδοσης της, επομένως μεγάλη βάση δίνεται στον υπολογισμό και την προέλευση των απωλειών που μπορεί να παρουσιάσει. Είναι λογικό πως η τιμή των συνολικών απωλειών μιας διάταξης είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόδοσή της. Για την ορθή σχεδίαση μαγνητικών στοιχείων είναι άκρως σημαντική η κατανόηση των αιτιών εμφάνισης των απωλειών τους. Στο ακόλουθο κεφάλαιο θα αναλυθούν σε δυο κατηγορίες οι ρίζες του προβλήματος των απωλειών. Η μια κατηγορία θα εστιάσει στις απώλειες που παρουσιάζονται στον πυρήνα του επαγωγικού στοιχείου ενώ η άλλη θα εστιάσει στις απώλειες που εμφανίζονται στα τυλίγματα του, ειδικότερα όταν σε αυτά εφαρμόζονται υψηλής συχνότητας τάσεις.

## 2.2 Απώλειες πυρήνα

Οι απώλειες πυρήνα αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών απωλειών των μαγνητικών στοιχείων και χωρίζονται σε δύο φαινόμενα. Οι απώλειες αυτές έχουν την μορφή θερμότητας και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να υπάρξει ανάγκη εγκατάστασης ψήκτρας για την προστασία της διάταξης. Η θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει ένα υλικό είναι μέχρι τους 130°C με κίνδυνο πάντα στις θερμοκρασίες αυτές την αλλοίωση της μόνωσης μεταξύ των τυλιγμάτων.

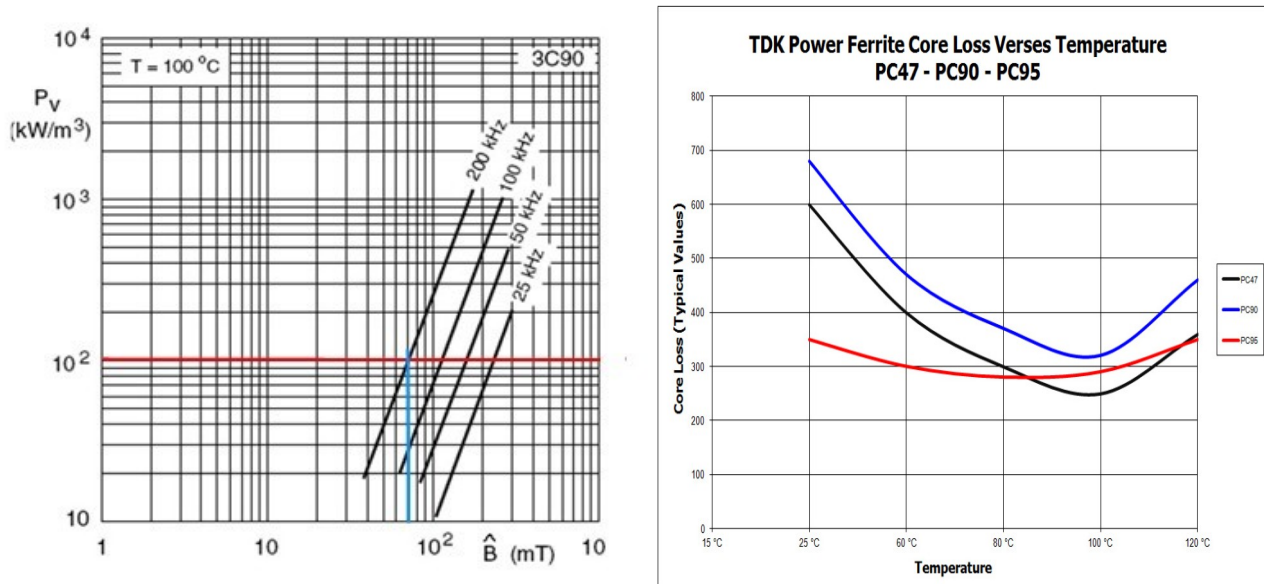
### 2.2.1 Απώλειες υστέρησης στον πυρήνα

Το πρώτο φαινόμενο που συμβάλει κατά μεγάλο βαθμό στις απώλειες πυρήνα είναι οι απώλειες υστέρησης. Παρατηρώντας τον τυπικό βρόγχο υστέρησης ενός πυρήνα, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι πως όσο μεγαλύτερο είναι το εμβαδό του διαγράμματος ενός βρόγχου υστέρησης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απώλεια του, σχήμα 2.1. Στην ουσία, το εμβαδό του βρόγχου υστέρησης είναι ανάλογο με την τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης στα υλικά.[5]



Σχήμα 2.1 Βρόγχος υστέρησης πυρήνα από φερίτη χωρίς διάκενο.

Η παραμένουσα μαγνήτιση αν και μικρής τιμής στα μαλακά μαγνητικά υλικά, κάνει την παρουσία της αισθητή στις υψηλές συχνότητες. Γίνεται προσανατολισμός των περιοχών Weiss και οι περιοχές παραμένουν προσανατολισμένες ως προς το τελευταίο εν ενεργεία μαγνητικό πεδίο που τις επηρέασε. Η απώλεια προέρχεται από την “τριβή” που προκαλείται στην κρυσταλλική δομή του μαγνητικού υλικού όταν γίνεται επαναπροσανατολισμός των περιοχών Weiss για την ολοκλήρωση του βρόγχου, και η μορφή της απώλειας είναι η θερμότητα.[4,5] Ο βρόχος υστέρησης αντιπροσωπεύει έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας, είναι κατανοητό οπότε πως όταν η συχνότητα διακόπτησης είναι της τάξεως των εκατοντάδων χιλιάδων κύκλων το δευτερόλεπτο η μικρής τιμής ενέργεια που χρειάζεται για τον επαναπροσανατολισμό των περιοχών Weiss φτάνει σε αισθητά επίπεδα και παράγεται θερμότητα. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που με την αύξηση της συχνότητας αυξάνονται και οι απώλειες. Στα σκληρά μαγνητικά υλικά το εμβαδό του βρόγχου υστέρησης τους τα καθιστά ακατάλληλα για χρήση σε υψηλές συχνότητες. Οι κατασκευαστές παρέχουν για το κάθε υλικό πυρήνα στην λίστα τους διαγράμματα απωλειών σε kW/m<sup>3</sup> ή σε mW/cm<sup>3</sup>. Τέτοια διαγράμματα αποτελούν αυτά που απεικονίζονται στο σχήμα 2.2. Παρατηρείται πως με την αύξηση της συχνότητας ή της μαγνητικής επαγωγής υπάρχει και αύξηση των απωλειών. Παρόλο που η αύξηση της συχνότητας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών, μέχρι ένα σημείο γίνεται συμβιβασμός διότι τα οφέλη μικρότερου όγκου πυρήνα υπερκαλύπτουν τα μειονεκτήματα της αύξησης των απωλειών.



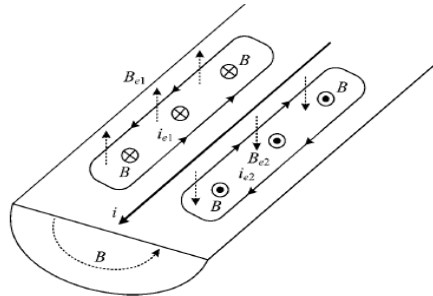
Σχήμα 2.2 Φύλλο απωλειών κατασκευαστή για πυρήνα από φερίτη.[TDK]

Μια ακόμη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι στο διάγραμμα απωλειών ως προς την θερμοκρασία, σχήμα 2.2, είναι πως οι απώλειες σε κάποια υλικά πυρήνα είναι πιο αισθητές σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Για παράδειγμα οι πυρήνες με υλικό κατασκευής PC47 και PC90 παρουσιάζουν αυξημένες απώλειες στην θερμοκρασία των 25°C σε σχέση με την θερμοκρασία των 100°C. Ενώ με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας οι πυρήνες παρουσιάζουν εκ νέου αύξηση των απωλειών. Αυτό αποτελεί ακόμη έναν παράγοντα προς ανάλυση στην σχεδίαση των μαγνητικών στοιχείων.

Ένας φάυλος κύκλος που δημιουργείται είναι πως οι απώλειες επιφέρουν στην αύξηση της θερμοκρασίας, αυτή με την σειρά της επιφέρει στην αύξηση των απωλειών και ως αποτέλεσμα έχουμε τον κίνδυνο καταστροφής του μαγνητικού στοιχείου σε περίπτωση κακού σχεδιασμού. Τα σχεδιαγράμματα αυτά βοηθάνε στην κατάλληλη επιλογή του πυρήνα ούτως ώστε η ενέργεια που θα μετατραπεί σε θερμότητα να είναι η καατάλληλη κάνοντας την διάταξη πιο αποδοτική.

## 2.2.2 Απώλειες πυρήνα λόγω δινορευμάτων

Παρόλο που οι απώλειες υστέρησης αποτελούν τον κύριο παράγοντα απωλειών του πυρήνα είναι σημαντικό να αναφερθούμε και στις απώλειες ισχύος από τα δινορευμάτα που εμφανίζονται στα σιδηρομαγνητικά υλικά όταν από αυτά διέρχονται εναλλασσόμενα σήματα.



Σχήμα 2.3 Δινορευμάτα σε αγωγό λόγω εναλλασσόμενου σήματος.

Κατά ορισμό, δινορευμάτα (eddy current) είναι το αποτέλεσμα της επαγωγής εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου σε ένα αγώγιμο υλικό και έχουν ονομαστεί έτσι λόγω της μορφής τους που ομοιάζουν με δίνη. Με την ένταξη εναλλασσόμενων σημάτων από τα τυλίγματα ενός μαγνητικού στοιχείου με πυρήνα παρατηρούνται επαγόμενες τάσεις οι οποίες προκαλούν την ροή ηλεκτρονίων στον πυρήνα. [1]. Στο σχήμα 2.3 απεικονίζεται ένας αγωγός με το  $i$  να εκφράζει την κατεύθυνση του ρεύματος στον αγωγό το  $B$  την μαγνητική ροή και τα δινορευμάτα  $i_{e2}$  και  $i_{e1}$  που δημιουργούνται. Η κλίμακα που έχουν οι απώλειες λόγω δινορευμάτων στους πυρήνες είναι ανάλογη με το μήκος της διαδρομής του. Ένα μαθηματικό μοντέλο που μπορεί να τις περιγράψει είναι η σχέση 2.1 όπου ο συντελεστής  $k_e$  είναι των απωλειών λόγω δινορευμάτων και είναι ανάλογος με το υλικό κατασκευής του πυρήνα και με το πάχος του,  $f$  είναι η συχνότητα διακόπησης και  $B_{ac}$  είναι η επαγωγή.

$$P_{cle} = k_e \cdot f^2 \cdot B_{ac}^2 \quad (2.1)$$

Το φαινόμενο των δινορευμάτων είναι πιο έντονο όταν το υλικό πυρήνα δεν είναι φερρίτης παραδείγματος χάρη κάποιο άλλο σιδηρομαγνητικό υλικό. Στους μετασχηματιστές του δικτύου παρά την σχετικά χαμηλή συχνότητα, το υλικό κατασκευής τους είναι περισσότερο επιρρεπές στα δινορευμάτα. Μια λύση για το πρόβλημα αυτό είναι η υποδιαίρεση του πυρήνα σε πολλές στρώσεις. Συμπερασματικά, κατά την υλοποίηση των μαγνητικών υλικών είναι καλό να λαμβάνονται υπόψιν και οι διαστάσεις του πυρήνα να είναι κοντά στις υπολογισμένες για την ελαχιστοποίηση των δινορευμάτων όπως και να γίνεται χρήση κατάλληλων πυρήνων.

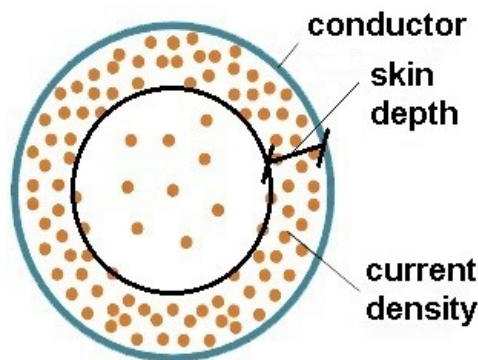
## 2.3 Απώλειες τυλιγμάτων

Παρότι οι απώλειες στα μαγνητικά στοιχεία είναι κατά κύριο λόγο στον πυρήνα, στον σχεδιασμό τους είναι απαραίτητο να συνυπολογίσουμε και τις απώλειες που εμφανίζονται και στα τυλίγματα. Τα

φαινόμενα που συμβάλουν στην εμφάνιση αυτών των απωλειών είναι δύο, το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) και το φαινόμενο της γειτνίασης (proximity effect).

### 2.3.1 Το επιδερμικό φαινόμενο

Όπως προαναφέρθηκε, όταν το ρεύμα σε έναν αγωγό μεταβάλλεται χρονικά δημιουργούνται δινορεύματα εντός του, η φορά αυτή που θυμίζει δίνη επηρεάζει την κατανομή της ροής των ηλεκτρονίων, σχήμα 2.3. Ενισχύεται η ροή προς την επιφάνεια του αγωγού ενώ μειώνεται εκθετικά η ροή προς το εσωτερικό του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την συγκέντρωση του ρεύματος κοντά στην επιφάνεια και καθιστά το κεντρικό μέρος του αγωγού αχρειαστο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Επιδερμικό φαινόμενο και δινορεύματα

Η διατομή του αγωγού αλλάζει οπότε και η αντίσταση του, σχέση 2.2. Με την αύξηση της συχνότητας το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο μέχρι και τα 2.5 MHz, έπειτα θεωρείται πως είναι αμελητέο[12].

$$R_{dc} = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (2.2)$$

Το επιδερμικό βάθος μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια για την εκάστοτε συχνότητα διακόπτισης χρησιμοποιώντας την σχέση 2.3. Ο υπολογισμός δίνει ως αποτέλεσμα το βάθος στο οποίο θα υπάρχει κίνηση ηλεκτρονίων στον αγωγό, με αυτήν την πληροφορία γίνεται και η επιλογή του κατάλληλου αγωγού βάσει εμπειρικού κανόνα όπου η διάμετρος του πρέπει να είναι  $2\delta$ . Για τον υπολογισμό του φαινομένου είναι απαραίτητη η πληροφορία της συχνότητας λειτουργίας  $f_s$ , της μαγνητικής διαπερατότητας του χαλκού  $\mu_{cu}$ , και της ειδικής αγωγιμότητας του  $\sigma_{cu}$ . [1]

$$\delta_{cu} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_{cu} \cdot \sigma_{cu}}} \quad (2.3)$$

Είναι φανερό πως με την αύξηση της συχνότητας η μεταβλητή  $\delta_{cu}$  μειώνεται. Ενδεικτικά στον πίνακα 2.1 αναγράφονται για διάφορες συχνότητες τα επιδερμικά βάθη όπως και ο λόγος  $R_{ac} / R_{dc}$ . Όπως

ήταν αναμενόμενο η διάμετρος του αγωγού δεν επηρεάζει κατά κανένα τρόπο το επιδερμικό βάθος, η συχνότητα όμως είναι φανερό πως είναι ο καθοριστικός παράγοντας. Με την βοήθεια αυτού του πίνακα και του πίνακα 1.4 του προηγούμενου κεφαλαίου μπορεί να γίνει η κατάλληλη επιλογή αγωγού για την οποιαδήποτε εφαρμογή με τις όποιες παραμέτρους εκείνη έχει.

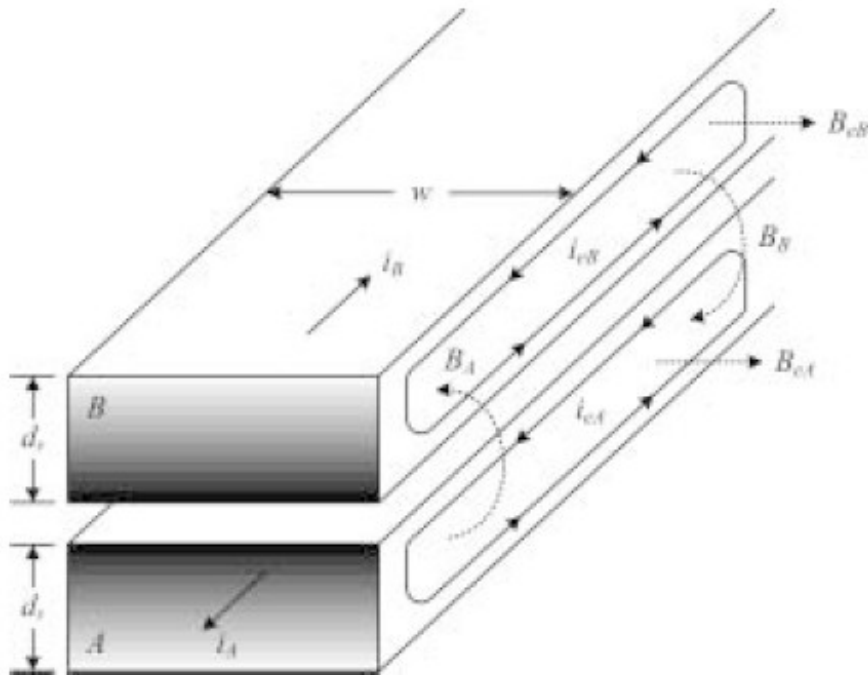
Πίνακας 2.1 Επιδερμικό βάθος διάφορων διαμέτρων αγωγών για διάφορες συχνότητες.

-		25kHz			50kHz			100kHz			200kHz		
Wire No.	Διάμετρος (mils)	Επιδερμικό Βάθος	$\delta/S$	$R_{ac}/R_{dc}$	Επιδερμικό Βάθος	$\delta/S$	$R_{ac}/R_{dc}$	Επιδερμικό Βάθος	$\delta/S$	$R_{ac}/R_{dc}$	Επιδερμικό Βάθος	$\delta/S$	$R_{ac}/R_{dc}$
12	81.6	13.2	6.18	1.85	9.66	8.45	2.40	6.83	11.95	3.30	4.83	16.89	4.50
14	64.7	13.2	4.9	1.50	9.66	6.70	1.90	6.83	9.47	2.65	4.83	13.40	3.70
16	51.3	13.2	3.89	1.25	9.66	5.31	1.59	6.83	7.51	2.12	4.83	10.62	2.90
18	40.7	13.2	3.08	1.13	9.66	4.21	1.35	6.83	5.96	1.75	4.83	8.43	2.36
20	32.3	13.2	2.45	1.05	9.66	3.34	1.17	6.83	4.73	1.45	4.83	6.69	1.90
22	25.6	13.2	1.94	1	9.66	2.65	1.07	6.83	3.75	1.25	4.83	5.30	1.56
24	20.3	13.2	1.54	1	9.66	2.10	1.01	6.83	2.97	1.12	4.83	4.20	1.35
26	16.1	13.2	1.22	1	9.66	1.67	1	6.83	2.36	1.04	4.83	3.33	1.17
28	12.7	13.2	0.96	1	9.66	1.31	1	6.83	1.86	1	4.83	2.63	1.07
30	10.1	13.2	0.77	1	9.66	1.05	1	6.83	1.48	1	4.83	2.09	1.01
32	8.1	13.2	0.61	1	9.66	0.84	1	6.83	1.19	1	4.83	1.68	1
34	6.4	13.2	0.48	1	9.66	0.66	1	6.83	0.94	1	4.83	1.33	1

### 2.3.2 Φαινόμενο γειτνίασης

Το επιδερμικό φαινόμενο που αναλύθηκε παραπάνω αν και αξιοσημείωτο δεν καλύπτει πλήρως την επεξήγηση των απωλειών στα τυλίγματα των μαγνητικών υλικών. Ο υπολογισμός του επιδερμικού βάθους με τον παραπάνω τύπο, σχέση 2.3, εκφράζει το επιδερμικό βάθος σε ιδανικές συνθήκες, για παράδειγμα όταν δεν υπάρχουν πολυάριθμα τυλίγματα ή στρώσεις, όμως ένας απλός αγωγός που βρίσκεται στο κενό. Αυτές οι παράμετροι δεν θα μπορούσαν να διαφέρουν περισσότερο από την πραγματικότητα όπου τα τυλίγματα δεν είναι απλώς περισσότερα όμως υπάρχουν και στρώσεις αυτών. Το φαινόμενο της γειτνίασης είναι σαφώς πιο αισθητό από αυτό του επιδερμικού φαινομένου και αποτελεί ένα πολυσύνθετο ζήτημα που απασχολεί τους μηχανικούς που σχεδιάζουν μαγνητικά στοιχεία. Περιγράφεται ως η τοποθέτηση ενός αγωγού γειτονικά σε μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από άλλους αγωγούς.[13] Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διαφορετική ταξινόμηση του ρεύματος εντός των αγωγών και ως εκ τούτου την αύξηση της αντίστασης που παρουσιάζει ο αγωγός στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Η απεικόνιση του φαινομένου γίνεται στο σχήμα 2.5, όπου φαίνονται δυο αγωγοί Α και Β, οι οποίοι διαρρέονται από τα ρεύματα  $i_A$  και  $i_B$  αντιστοίχως τα οποία ρεύματα είναι αντίρροπα μεταξύ τους. Ο τύπος του αγωγού είναι ορθογώνιος και η διατομή του κάθε αγωγού με πάχος  $d_f$  θεωρείται πως είναι ισότιμος με μια στρώση εφαιπτόμενα τοποθετημένων κυκλικών αγωγών με συνολική διάμετρο 1.128 φορές μεγαλύτερη από του ορθογώνιου και το ολικό πλάτος  $w$  ίσο με αυτό του ορθογώνιου αγωγού. Το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό

Α παράγει το μαγνητικό πεδίο  $B_A$ . Το μαγνητικό πεδίο με την σειρά του προκαλεί το δινορεύμα  $i_{eB}$  στην δομή του αγωγού B με την αναγραφόμενη, στο σχήμα 2.5, φορά. Το δινορεύμα εν συνεχεία προκαλεί ένα μαγνητικό πεδίο  $B_B$  που αντιτίθεται στο  $B_A$ . Αντίστοιχα το εναλλασσόμενο ρεύμα  $i_B$  που διαρρέει τον αγωγό B παράγει το δικό του μαγνητικό πεδίο  $B_B$  και αυτό το δινορεύμα  $i_{eA}$  με μαγνητικό πεδίο που αντιτίθεται στο  $B_B$ . Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα την συγκέντρωση της πυκνότητας του ρεύματος προς μια από τις δυο πλευρές του αγωγού, συγκεκριμένα στην πάνω επιφάνεια του αγωγού A και στην κάτω επιφάνεια του αγωγού B. [1]



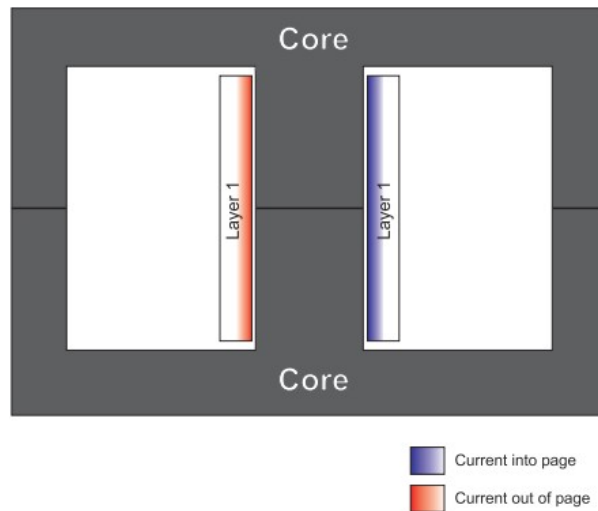
Σχήμα 2.5 Απεικόνιση φαινομένου γειτνίασης μεταξύ ορθογώνιων αγωγών.

Μεγαλύτερος αριθμός στρώσεων τυλιγμάτων μεταφράζεται σε εντονότερο φαινόμενο γειτνίασης. Ειδικά σε πηνία, η παράληψη αντιμετώπισης του φαινομένου μπορεί να προβεί καταστροφική, με τις θερμοκρασίες να υπερβαίνουν κατά πολύ την υπολογισμένη. Μια προσέγγιση για τον υπολογισμό των απωλειών είναι με την εξίσωση Dowell. Οι υπολογισμοί είναι πολυσύνθετοι και η κατανόηση της εξίσωσης Dowell είναι ακόμη δυσκολότερη και θα μπορούσε να αποτελεί αντικείμενο εργασίας από μόνο του. Για καλή τύχη των σχεδιαστών μαγνητικών στοιχείων έχει ήδη μελετηθεί και μοντελοποιηθεί, έτσι με την χρήση προγραμμάτων μπορεί να γίνει ταχύρυθμα ο υπολογισμός των απωλειών θερμότητας εφόσον είναι γνωστές οι κατάλληλες παράμετροι. Αν και ο υπολογισμός με αυτήν την μέθοδο δεν επιφέρει ακριβή αποτελέσματα, είναι μια καλή προσέγγιση και προσφέρει μια εικόνα για τις απώλειες στα τυλίγματα. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται ένα μαγνητικό στοιχείο με πυρήνα τύπου E και μια στρώση τυλιγμάτων. Με μπλε χρώμα παρουσιάζεται το ρεύμα που ρέει προς την σελίδα ενώ με κόκκινο χρώμα το ρεύμα που ρέει από την σελίδα προς τα έξω. Παρατηρείται πως η πυκνότητα του ρεύματος είναι μεγαλύτερη στους τομείς των τυλιγμάτων που βρίσκονται πιο κοντά στον πυρήνα του στοιχείου. [13]

Πίνακας 2.2 Φαινόμενο γειτνίασης στην συχνότητα των 100kHz[13]

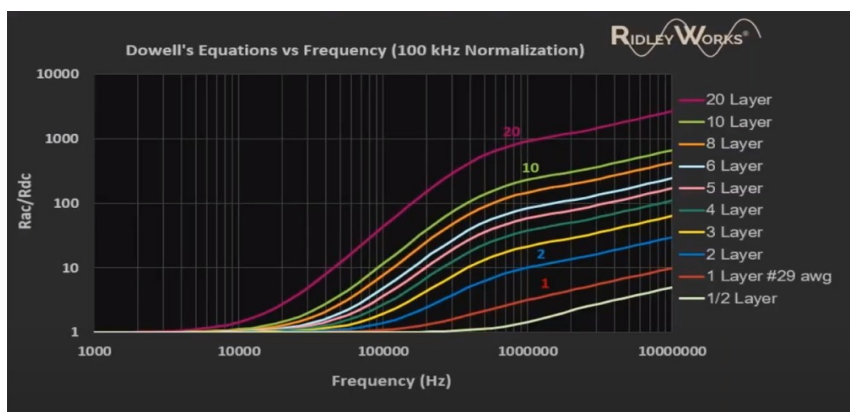
	1	2	3	4	5	Συνολικό $R_{ac}/R_{dc}$
0.3 mm $\Delta=1.46$	1.35	3.91	9.04	16.7	27	11.6
0.6 mm $\Delta=2.8$	2.81	14.87	39	75.2	123.45	51.1
0.9mm $\Delta=4.33$	4.33	22.25	58.1	11.8	183.5	76
1.1 mm $\Delta=5.38$	5.38	26.95	70.1	134.8	221.1	91.7
0.3 mm 2 layers	1.35	3.91	-	-	-	2.6

Με την γνώση των μεταβλητών της συχνότητας διακόπτησης, του ύψους των στρώσεων τυλιγμάτων και τον αριθμό των στρώσεων και την εφαρμογή τους στην εξίσωση του Dowell μπορεί κάποιος να υπολογίσει τον λόγο της αντίστασης  $R_{ac}$  ως προς την  $R_{dc}$ . Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν για ένα μαγνητικό στοιχείο με 5 στρώσεις τυλιγμάτων, συχνότητα λειτουργίας 100kHz και για διάφορους αγωγούς με διαφορετικές διατομές. [13]



Σχήμα 2.6 Διατομή μαγνητικού στοιχείου με μια στρώση τυλιγμάτων[13]

Από τον πίνακα 2.2 φαίνεται ξεκάθαρα το αποτέλεσμα που έχει το φαινόμενο της γειννιάσης στα τυλίγματα των μαγνητικών υλικών. Η μεταβλητή  $\Delta$  είναι ο λόγος μεταξύ του ύψους της στρώσης του τυλίγματος προς το επιδερμικό βάθος. Παρατηρώντας την πρώτη γραμμή του πίνακα με έναν αγωγό διαμέτρου 0.3 mm ο λόγος των αντιστάσεων



Σχήμα 2.7 Καμπύλες γειννιάσης προς συχνότητα λειτουργίας

Η επιδείνωση του φαινομένου δεν είναι γραμμική όμως εκθετική με την αύξηση των στρωμάτων. Σε περίπτωση όπου στην εφαρμογή αυτή δεν είχε υπολογιστεί το φαινόμενο γειννιάσης όμως γινόταν η υλοποίηση καθαρά με το επιδερμικό βάθος σαν δεδομένο θα είχε μεγάλη απόκλιση στην θερμοκρασία λειτουργίας που θα είχε υπολογιστεί. Η αντίσταση AC με 5 στρώσεις είναι 27 φορές μεγαλύτερη από την DC και θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας σε πιο ακραίες τιμές από τις υπολογισμένες. Ο πίνακας 2.2 δείχνει επίσης και τα αποτελέσματα σε περίπτωση που αυξανόταν η διάμετρος του αγωγού. Η απόκλιση των πραγματικών συνολικών απωλειών σε σχέση με αυτή των υπολογισμών θα ήταν κατά πολύ

αισθητή, αφού ο λόγος μεταξύ των αντιστάσεων θα ήταν 123, με τον διπλασιασμό της διαμέτρου του αγωγού και με την ύπαρξη 5 στρώσεων τυλιγμάτων. Το σχήμα 2.7 δείχνει μια προσέγγιση από διαφορετική οπτική γωνία των απωλειών λόγω του φαινομένου γειτνίασης συγκριτικά με την συχνότητα λειτουργίας και τον αριθμό στρώσεων των τυλιγμάτων. Ο λόγος μεταξύ των αντιστάσεων συνεχούς και εναλλασσομένου είναι επιθυμητό να είναι όσο γίνεται πιο κοντά στο 1, αυτό σύμφωνα με το σχήμα επιτυγχάνεται τόσο με την μείωση των στρώσεων περιέλιξης όσο και με την χρήση αγωγού μικρότερης διαμέτρου. [14]. Το φαινόμενο της γειτνίασης αν και πολυσύνθετο εμπόδιο, με την βοήθεια προγραμμάτων όπως το Ridley Works μπορεί να προσπεραστεί με μικρότερη δυσκολία για την σχεδίαση μαγνητικών υλικών. Το συμπέρασμα που μπορεί κάποιος να βγάλει με την ενασχόληση του στο θέμα αυτό είναι πως στην σχεδίαση μαγνητικών υλικών είναι προτιμότερο να χρησιμοποιεί όσο γίνεται αγωγούς με μικρότερες διαμέτρους εφόσον η τοπολογία του το επιτρέπει, και να μην αποτελεί τα τυλίγματα από πολλές στρώσεις. [13]

## Κεφάλαιο 3 Σχεδίαση και υλοποίηση πηνίων υψηλών συχνοτήτων

Λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τα διάφορα χαρακτηριστικά όσο και τους πολυάριθμους παράγοντες που επηρεάζουν τα επαγωγικά στοιχεία στις υψηλές συχνότητες, δίνεται και η δυνατότητα σχεδίασης τους. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η θεωρητική σχεδίαση του πηνίου, μεταβάλλοντας κατάλληλα τους παράγοντες που το αποτελούν και στην συνέχεια θα γίνει η υλοποίηση του. Τέλος θα μετρηθεί με την χρήση ενός μετρητή LCR για να εξακριβωθεί η αυτεπαγωγή του και θα χρησιμοποιηθεί σε μια διάταξη μετατροπέα ισχύος υποβιβασμού τάσης τύπου Buck DC-DC. Επιπλέον θα περιελιχτούν και άλλα πηνία με διαφορετικό υλικό κατασκευής πυρήνα και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα.

### 3.1 Θεωρητική σχεδίαση του επαγωγικού στοιχείου

Κατά την θεωρητική σχεδίαση των πηνίων για μετατροπείς ισχύος υπάρχει ένας γενικός αλγόριθμος που ακολουθείται, χωρίς αυτό να καθιστά την δουλειά αυτή εύκολη. Πολλά από τα μεγέθη που αποτελούν αυτό το μαγνητικό στοιχείο είναι αλληλοεξαρτώμενα κάτι που ανεβάζει τον βαθμό πολυπλοκότητας κατά πολύ. Περιληπτικά, οι μεταβλητές που μεταβάλλονται στο πηνίο είναι το υλικό του πυρήνα, η γεωμετρική του μορφή, το μέγεθος του πυρήνα, το μήκος του διακένου, η διατομή του τυλίγματος, η μαγνητική διαπερατότητα, η μορφή του αγωγού και τέλος ο αριθμός των σπειρών. Ενώ παράμετροι που ορίζουν τα παραπάνω μεγέθη είναι η ζητούμενη αυτεπαγωγή του πηνίου, η τιμή του ρεύματος κορυφής, η ενεργός τιμή του ρεύματος, η DC συνιστώσα του ρεύματος, η συχνότητα διακόπτησης όπως και η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να λειτουργήσει το πηνίο και η θερμοκρασία του περιβάλλοντα χώρου όπου θα λειτουργεί.[1] Όλα αυτά αποτελούν μεταβαλλόμενες και αλληλοεξαρτώμενες μεταβλητές που μεταβάλλονται ανάλογα με τον τύπο του μετατροπέα, με τις προϋποθέσεις που θέλουμε να πληρεί το πηνίο και με το περιβάλλον λειτουργίας του.

#### 3.1.1 Πρώτο βήμα του αλγόριθμου

Εφόσον είναι γνωστή η παράμετρος της συχνότητας λειτουργίας και η τοπολογία του μετατροπέα ισχύος, μπορεί να γίνει η επιλογή του κατάλληλου υλικού πυρήνα. Αυτό γίνεται ούτως ώστε να επιλεγεί ένα υλικό με την κατάλληλη τιμή μαγνητικής διαπερατότητας[1]. Ένας φερίτης έχει κατά πολύ, μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα από πυρήνες άλλου σιδηρομαγνητικού υλικού. Για την αποθήκευση της ζητούμενης ενέργειας στον πυρήνα είναι απαραίτητη η ύπαρξη διάκενου. Οι φερίτες σαν υλικό κατασκευής συνήθως έχουν σαν μόνη επιλογή το διακριτό διάκενο, δηλαδή ένα κενό στο μήκος της διαδρομής του πυρήνα κατά πολύ μικρότερο της διαδρομής  $l$  και σε αυτό γίνεται η αποθήκευση της ενέργειας. Ένα πρόβλημα που προκύπτει με αυτήν την προσέγγιση είναι ο απότομος κορεσμός του πυρήνα. Επιπλέον προβλήματα που προκύπτουν είναι η εμφάνιση δινορευμάτων, η εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και η μεγάλη ευαισθησία που παρουσιάζουν σε ακραίες θερμοκρασίες. Ο πλήρης κορεσμός του πυρήνα στους μετατροπείς υψηλών συχνοτήτων αποφεύγεται για την διατήρηση του καλού βαθμού απόδοσης τους, επομένως για υλικό πυρήνα, φερίτη, θα πρέπει να γίνει κατάλληλη σχεδίαση για την αποφυγή των φαινομένων αυτών. Τα παραπάνω προβλήματα ανάλογα με την εφαρμογή και την διάταξη μπορεί να είναι αμελητέα ή καταστροφικά. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει ικανοποιητική λύση, συνήθως με την οικονομική προσέγγιση, καταφεύγουμε σε πυρήνες σκόνης σιδήρου. Σε αυτό το υλικό πυρήνα το διάκενο μπορεί να είναι διασκορπισμένο σε όλη την δομή του, απαλείφοντας προβλήματα όπως η έντονη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή και η απότομη καμπύλη κορεσμού. Συνήθως σε εφαρμογές μέχρι κάποιες

εκατοντάδες χιλιόκυκλους χρησιμοποιούνται αυτού του υλικού οι πυρήνες για τους προαναφερθέντες λόγους. Με την αύξηση της συχνότητας στους μεγάκυκλους όμως οι φερίτες φαίνεται να είναι η καταλληλότερη επιλογή. Με την πολύ μικρή περίοδο T που παρουσιάζουν αυτές οι συχνότητες ο κίνδυνος κορεσμού του πυρήνα σταματάει να είναι έντονος και η μεγάλη τιμή μαγνητικής διαπερατότητας γίνεται πλέον απαραίτητη. Στον πίνακα 3.1 φαίνονται έξι υλικά από τα οποία κατασκευάζονται πυρήνες σκόνης σιδήρου όπως και τα χαρακτηριστικά του κάθε υλικού. Τα ζητούμενα χαρακτηριστικά του μετατροπέα όπως και το κόστος που πρέπει να έχει είναι τα κριτήρια επιλογής του υλικού του. [11]

Πίνακας 3.1 Υλικά κατασκευής πυρήνων iron powdered cores [11]

	MPP	High Flux	Kool Mμ	Xflux	75 Series	Kool Mμ max
<b>Μαγνητική διαπερατότητα</b>	14-300	14-160	14-125	26-60	26-60	26-60
<b>Κορεσμός (<math>B_{sat}</math>)</b>	0.7 T	1.5 T	1.0 T	1.6 T	1.5 T	1.0 T
<b>Μέγιστη Θερμοκρασία</b>	200	200	200	200	200	200
<b>Απώλειες AC</b>	Χαμηλότερες	Μεσαίες	Χαμηλές	Υψηλές	Χαμηλές	Πολύ χαμηλές
<b>Γεωμετρία Πυρήνα</b>	Δακτύλιος	Δακτύλιος	Δακτύλιος, E, U	Δακτύλιος, E	Δακτύλιος	Δακτύλιος
<b>DC Bias</b>	Καλό	Καλύτερο	Καλό	Καλύτερο	Καλό	Καλό
<b>Κράμα</b>	FeNiMo	FeNi	FeSiAl	FeSi	FeSiAl	FeSiAl

### 3.1.2 Δεύτερο βήμα του αλγορίθμου

Η επιλογή γεωμετρικής μορφής πυρήνα, όπως και το μέγεθος του, εξαρτώνται από κριτήρια όπως το κόστος, η διαθεσιμότητα, η δυνατότητα περιέλιξης, η επιρροή του ακτινοβολούμενου μαγνητικού πεδίου στο υπόλοιπο κύκλωμα, η ένταση του ρεύματος και η δυνατότητα ψύξης του πυρήνα.[1]. Σαφώς, με την χρήση ενός μεγάλου πυρήνα εξαλείφονται αρκετά προβλήματα, όμως αυτομάτως αυξάνεται τόσο ο όγκος όσο και το συνολικό κόστος παραγωγής και διανομής του υλικού. Όταν η παραγωγή είναι μερικές δεκάδες τεμάχια δεν αποτελεί πρόβλημα όμως όταν ο αριθμός τεμαχίων φτάνει τα χιλιάδες τότε η πιο παραγωγική προσέγγιση είναι απαιτούμενη. Η πιο σύνηθες γεωμετρική μορφή πυρήνα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή πηνίων είναι οι δακτύλιοι[11]. Ο λόγος που είναι οι πιο διαδεδομένοι είναι η ευκολία που παρουσιάζουν στην περιέλιξη τους όπως και στην κατασκευή τους. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή των πυρήνων αυτών ώστε οι σπείρες των τυλιγμάτων να χωρέσουν χωρίς να χρειαστεί δεύτερη στρώση. Γνωρίζοντας τις διαστάσεις που έχει ο πυρήνας και την διάμετρο που έχει ο αγωγός, μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός σπειρών που είναι δυνατόν να χωρέσουν στην περίμετρό του, σχέση 3.1. Στην σχέση βλέπουμε πως ο υπολογισμός είναι πολύ απλός και ο τρόπος που προκύπτει είναι έξυπνος. Γνωρίζοντας την ακτίνα του δακτυλιοειδή πυρήνα μπορούμε να υπολογίσουμε την περιφέρεια του κύκλου. Διαιρώντας την περιφέρεια με την διάμετρο του αγωγού βρίσκουμε τον θεωρητικό αριθμό των σπειρών που χωράνε σε αυτή, στην πράξη όμως η πραγματική περιφέρεια με την ένταξη του αγωγού γίνεται μικρότερη, αφού ο αγωγός δεν είναι επίπεδος όμως έχει ένα πάχος. Η αφαίρεση του αριθμού τρία στην σχέση 3.1, είναι στην ουσία η αφαίρεση του  $\pi$ . Με αυτό τον τρόπο γίνεται ο υπολογισμός του ακριβούς αριθμού σπειρών που χωράει ένας τοροϊδής πυρήνας.

$$N = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{D} - 3 \quad (3.1)$$

### 3.1.3 Τρίτο βήμα του αλγορίθμου

Η επιλογή του υλικού και του αγωγού είναι άμεσα εξαρτώμενη από την ένταση του ρεύματος που είναι γνωστό πως θα διαρρέει το μαγνητικό στοιχείο. Σημαντικό ρόλο παίζει και η συχνότητα λόγω των φαινομένων γειτνίασης και του επιδερμικού, που όπως προαναφέρθηκε, που μπορεί να προβούν καταστροφικά. Το κόστος επηρεάζεται και σε αυτό το βήμα της σχεδίασης, αφού υπάρχει επιλογή χρήσης διαφορετικών τύπων τυλιγμάτων. Για μια ποιοτικότερη σχεδίαση παραδείγματος χάρη θα γινόταν η επιλογή αγωγού Litz του οποίου το κόστος είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από ένα απλό χάλκινο αγωγό. Επίσης ο τύπος πυρήνα μπορεί να απαιτεί την χρήση αγωγού πεπλατυσμένου, ο οποίος για την περιέλιξη χρήζει ειδικό εξοπλισμό. Επιπλέον, και ο αριθμός των σπειρών είναι απαραίτητο να υπολογιστεί. Σε συνδυασμό με το μέγεθος του πυρήνα μπορούν υπολογιστούν οι σπείρες που χρειάζονται για να παρουσιάζει το στοιχείο την ζητούμενη αυτεπαγωγή. Όλα αυτά πρέπει να επιλεγούν έχοντας πάντα υπόψιν την τιμή και τα χαρακτηριστικά ρεύματος εξόδου της διάταξης, την πυκνότητα του ρεύματος στα τυλίγματα, την ύπαρξη ή όχι διακένου στον πυρήνα, τις αποδεκτές απώλειες όπως και η θερμοκρασία που θα παρουσιάζει το στοιχείο κατά την λειτουργία. Ευτυχώς για όλους τους παραπάνω αναλογισμούς υπάρχουν προγράμματα τα οποία δίνουν την λύση εντός δευτερολέπτων και γλυτώνουν πολύ χρόνο και πολλά πιθανά λάθη ανθρώπινης φύσεως.

### 3.2 Θεωρητική σχεδίαση πηνίων με την χρήση λογισμικού

Η χρήση λογισμικών για την σχεδίαση πηνίων είναι μια εύκολη διαδικασία συγκριτικά με την παραδοσιακή μέθοδο και εξαλείφει πολλά πιθανά λάθη απροσεξίας, όμως εντάσσει και πληροφορίες από βάσεις δεδομένων για ένα πιο ακριβές στην θεωρία αποτέλεσμα. Πάντα θα υπάρχουν αποκλίσεις από την πραγματικότητα και από ένα θεωρητικό μοντέλο, όσο εξειδικευμένο και αν είναι κάποιο πρόγραμμα, αλλά όσο καλύτερη είναι η προσέγγιση στην πραγματικότητα τόσο καλύτερη συνολική εικόνα του προϊόντος έχουμε πριν την υλοποίηση του. Το πρόγραμμα του οποίου γίνεται χρήση είναι της εταιρείας Magnetics inc, Σχήμα 3.1

The screenshot displays the Magnetics inc software interface, divided into three main sections: Design Input, Magnetics Part Numbers, and Design Output.

**Design Input:** This section contains various input fields for configuring the design. The 'Shape Selection' is set to 'Toroid Design' and 'Material Selection' is 'NIPP'. Other inputs include DC Current (2), Peak to Peak Ripple (0.2), Frequency (100), Peak Current Inductance (47), Specified Current (1), Temperature Rise (90), and Stack Cores (1). There are 'RESET' and 'FIND PART NUMBERS' buttons at the bottom.

**Magnetics Part Numbers:** This section shows a table of available parts with columns for Part No, Specification, Core OD (mm), and Size Code. The table lists 14 different part numbers with their respective specifications. Below the table, there is a field to 'Enter Selected Part Number' (55045) and a 'DESIGN OUTPUT' button. Further down, there are input fields for OD (13.5 mm), HT (5.5 mm), Perm (300 μ), ID (7.0 mm), and A<sub>s</sub> (134 rHT<sup>2</sup>), along with a 'PLOT DESIGN' button.

**Design Output:** This section displays the calculated results for the design. Key outputs include: Min Inductance @ Full Load (47.6 μH), Norm Inductance @ No Load (112.7 μH), Min Inductance @ Specified Current (86.8 μH), Core Loss (0.007 W), Copper Loss (0.106 W), Total Losses (0.112 W), Temperature Rise (12.1 °C), Number of Turns (29), Wire Size (21 AWG), Winding Factor (36.6%), DC Resistance (26.29 mΩ), Finished OD (17.0 mm), Finished HT (9.0 mm), and Total Wire Length (627.5 mm).

Σχήμα 3.1. Λειτουργία προγράμματος της Magnetics inc.[11]

Η χρήση του παραπάνω προγράμματος είναι πολύ απλή και οι παράμετροι που δίνεται η δυνατότητα να επιλεγούν το καθιστούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την έρευνα και ανάπτυξη των πηνίων. Στην αριστερή πλευρά όπως φαίνεται ρυθμίζονται οι παράμετροι εισόδου, συγκεκριμένα η γεωμετρική μορφή του πυρήνα και το υλικό του, το ρεύμα συνεχούς λειτουργίας που θα διαρρέει το πηνίο, την μέγιστη διακύμανση του ρεύματος που ζητείται, την συχνότητα διακόπτησης στην οποία θα λειτουργεί το στοιχείο, η τιμή της αυτεπαγωγής που είναι επιθυμητή και τέλος η μέγιστη θερμοκρασία που επιτρέπει η σχεδίαση να αναπτύξει το στοιχείο. Οι παραπάνω παράμετροι έχουν επιλεγεί τυχαία για τον σκοπό της επεξήγησης της λειτουργίας του προγράμματος. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν παραδείγματα από την σελίδα της Magnetics και παραδείγματα που προσομοιώθηκαν για την ανάπτυξη του κεφαλαίου αυτού όπως και για την εξέταση υλοποιημένων πηνίων σε συνθήκες λειτουργίας. Για την σχεδίαση ενός πηνίου του οποίου η διάταξη απαιτεί τις παραμέτρους του πίνακα 3.2 γίνεται η εξής διαδικασία. Το πρόγραμμα λαμβάνει ως στοιχεία εισόδου τις παραμέτρους και βγάζει αποτελέσματα για το κάθε υλικό που επιλέγει ο χρήστης. Παράλληλα το πρόγραμμα προτείνει με αύξουσα κλίμακα το μικρότερο δυνατό πακέτο του πηνίου έως το μεγαλύτερο.[11]

Πίνακας 3.2 Παράμετροι σχεδίασης πηνίου

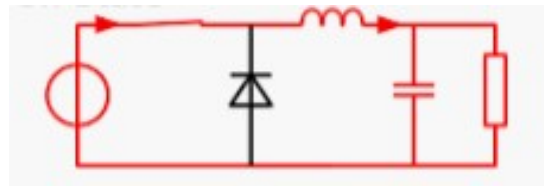
Συνεχές ρεύμα ( $I_{ac}$ )=	500 mA maximum
Απαιτούμενη αυτεπαγωγή ( $L_{min}$ )=	100 uH
Διακύμανση του ρεύματος ( $I_{ac}$ )=	50 mA peak-peak
Συχνότητα (f)=	100 kHz

Η σελίδα της εταιρείας παρέχει τον πίνακα 3.3 στον οποίο αναγράφονται τέσσερις επιλογές υλικού πυρήνα και όλα τα χαρακτηριστικά του πηνίου που προκύπτουν από τις παραμέτρους του πίνακα 3.2.1. Έτσι ο χρήστης μπορεί να συγκρίνει και να διαλέξει το πιο κατάλληλο πακέτο που του αρκεί για την υλοποίηση της διάταξης του. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που προσφέρει το πρόγραμμα είναι η εξοικονόμηση του χρόνου σε περίπτωση που πρέπει να γίνει κάποια αλλαγή στην σχεδίαση. Για παράδειγμα εάν ένας πελάτης αλλάξει γνώμη για κάποια παράμετρο ο υπολογισμός του νέου υλικού μπορεί να γίνει εντός ολίγων λεπτών. Ακόμη και εάν η αλλαγή είναι ριζική ή εάν πρέπει να υπολογιστεί ένα πηνίο εκ νέου. Καλό είναι ο σχεδιαστής να έχει κατά νου πως ο τελικός όγκος του στοιχείου εξαρτάται άμεσα από την ζητούμενη τιμή της αυτεπαγωγής και από την μέγιστη τιμή του ρεύματος που θα το διαρρέει. Το πρόγραμμα σαν έξοδο δίνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την υλοποίηση του στοιχείου όπως δίνει και τις εκτιμώμενες απώλειες που θα παρουσιάσει στην κατάσταση λειτουργίας. Μεταξύ των πληροφοριών αυτών είναι και τα χαρακτηριστικά του πυρήνα, οι απαιτούμενες σπείρες, η διάμετρος του αγωγού όπως και ο παράγοντας πλήρωσης  $\kappa$  και η θεωρητική θερμοκρασία που θα αναπτύξει το πηνίο. [11]

### 3.2.1 Αρχή λειτουργίας μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (Buck)

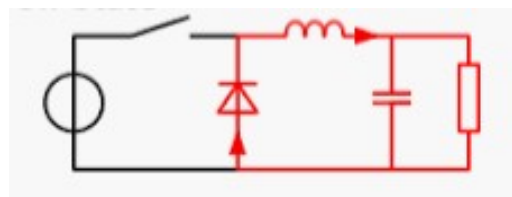
Ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης είναι ένας από τους πιο απλούς μετατροπείς στα ηλεκτρονικά ισχύος. Η αρχή λειτουργίας του είναι αρκετά απλή και είναι απαραίτητη η χρήση ενός πηνίου για την ιδιότητα του ως φίλτρο ρεύματος. Την περιγραφή της λειτουργίας του απεικονίζουν τα σχήματα 3.2 και 3.3, όπου το πρώτο σχήμα δείχνει το αντίστοιχο κύκλωμα για την κατάσταση ON του διακόπτη, ενώ το δεύτερο σχήμα το αντίστοιχο κύκλωμα όταν ο διακόπτης είναι σε κατάσταση OFF. Με τον διακόπτη στην κλειστή θέση επιτρέπεται η ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου στο πηνίο και η φόρτιση του πυκνωτή εξόδου. Για τον χρόνο που μένει κλειστός ο διακόπτης χάρις το πηνίο και τον πυκνωτή τα οποία δεν φορτίζουν ακαριαία όμως σταδιακά, η έξοδος του μετατροπέα δεν παίρνει την ίδια τιμή με την είσοδο και μπορεί να ρυθμίζεται

με τον κύκλο εργασίας(Duty Cycle). Με την αλλαγή της κατάστασης του διακόπτη ξεκινάει η ακολουθία όπου το πηνίο από στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας μετατρέπεται σε πηγή ενέργειας.[6]



Σχήμα 3.2 Κατάσταση ON του μετατροπέα Buck.[6]

Με αντίστροφη φορά και μέσω της διόδου αποφορτίζεται στον πυκνωτή διατηρώντας σταθερή την έξοδο. Αυτό επαναλαμβάνεται σε κάθε κύκλο λειτουργίας και μπορεί να λειτουργεί σε συχνότητες των εκατοντάδων χιλιάδων κύκλων το δευτερόλεπτο. [6]



Σχήμα 3.3 Κατάσταση OFF του μετατροπέα Buck[6]

Αυτή η τοπολογία προφανώς δεν προσφέρει γαλβανική απομόνωση της εισόδου από την έξοδο επομένως και δεν προτείνεται η χρήση της σε κάποιες εφαρμογές όπου απαιτείται μεγαλύτερη ασφάλεια και ισχύς. Επίσης στα παραπάνω σχηματικά δεν υπάρχει ανάδραση για την αυτορύθμιση του κύκλου εργασίας με σκοπό την σταθεροποίηση της εξόδου.[6]

Πίνακας 3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης με το πρόγραμμα της Magnetics[11]

	<b>MPP</b>	<b>High Flux</b>	<b>Kool Μμ Toroid</b>	<b>Kool Μμ E-core</b>
<b>Κωδικός προϊόντος</b>	55025-A2	58278-A2	77280-A7	κ1808E090
<b>Μαγνητική Διαπερατότητα</b>	300	160	125	90
<b>Διάμετρος πυρήνα (in)</b>	.335 x .150	.405 x .150	.405 x .150	.77 x .65 x .19
<b>A<sub>L</sub> (nH/σπειρά<sup>2</sup>)</b>	124	68	53	69
<b>Σπείρες</b>	32	41	48	39
<b>Παράγοντας Πλήρωσης αγωγού</b>	37%	31%	37%	14%
<b>Διάμετρος Αγωγού (in)</b>	.375x.209	.448x.209	.455x.209	.77x.65x.644
<b>Απώλειες Πυρήνα (mW)</b>	2.0	0.7	0.7	0.5
<b>Απώλειες τυλιγμάτων (mW)</b>	24.2	33.3	40.0	83.0
<b>Συνολικές Απώλειες (mW)</b>	26.2	34.0	40.7	83.5
<b>Αύξηση Θερμοκρασίας (°C)</b>	6.1	6.0	6.9	4.3

### 3.2.2 Παρουσίαση μετατροπέα υποβιβασμού (Buck) με το ολοκληρωμένο XL4016

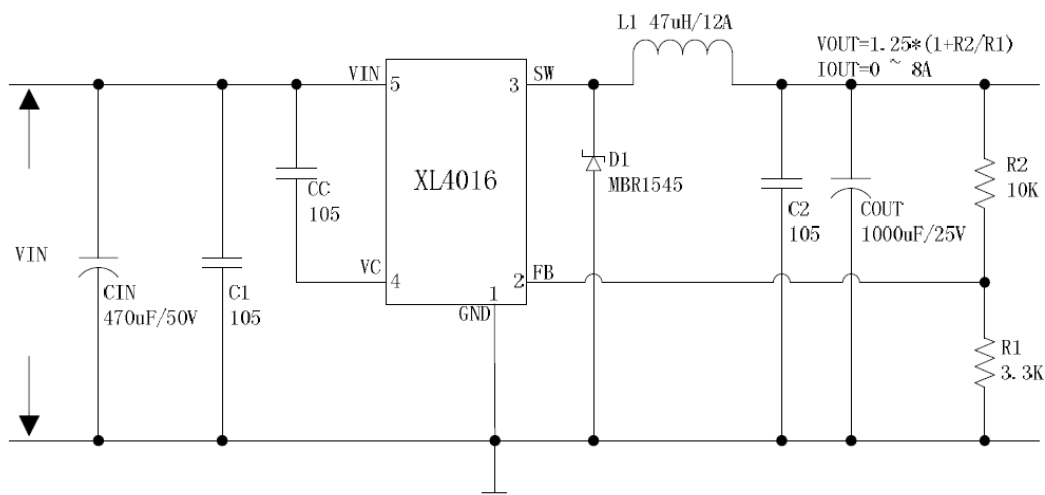
Η διάταξη πάνω στην οποία βασίζεται η δεύτερη φάση το πειραματικού μέρους είναι ένας μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Buck) με κύριο στοιχείο του το ολοκληρωμένο XL4016. Το φύλλο κατασκευαστή υπάρχει στα παραρτήματα. Ο μετατροπέας αυτός έχει τα χαρακτηριστικά που απεικονίζονται στον πίνακα 3.4. Η χρήση του ολοκληρωμένου XL4016 καθιστά απλή την υλοποίηση του μετατροπέα, όπως επίσης δίνεται και ένα σχηματικό για την προτεινόμενη υλοποίηση του, σχήμα 3.4.[6]

Πίνακας 3.4 Χαρακτηριστικά του μετατροπέα.

Εύρος τάσης εισόδου	4V ~ 40V
Μέγιστη ένταση ρεύματος εξόδου	8A
Εύρος τάσης εξόδου	1.25V ~ 36V
Συχνότητα διακόπτησης	180kHz
Μέγιστη ονομαστική ισχύς	200W
Ψύξη	Ναι, Παθητική
Βαθμός απόδοσης	94%
Διαστάσεις (mm)	61 x 40 x 21

Στο σχηματικό φαίνεται πως προτείνεται η χρήση ενός πηνίου αυτεπαγωγής 47μH και ονομαστικής έντασης του ρεύματος 12A. Παρά την μέγιστη ονομαστική ένταση του ρεύματος στα 8A, προτείνεται το πηνίο στα 12A ώστε σε περίπτωση σφάλματος να μην καταστραφεί. Η ολοκληρωμένη διάταξη που προκύπτει από το σχηματικό είναι αυτό του σχήματος 3.4. Να σημειωθεί πως αυτή η διάταξη προμηθεύτηκε έτοιμη από το εμπόριο και δεν σχεδιάστηκε για τον σκοπό της πτυχιακής εργασίας. [6]

#### Typical Application Circuit



Σχήμα 3.4 Σχηματικό του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (Buck)

### 3.3 Πειραματικό μέρος

Το πειραματικό μέρος του κεφαλαίου θα περιλαμβάνει δύο κύριες κατηγορίες. Στην πρώτη φάση σκοπός είναι η περιέλιξη δύο πηνίων το ένα με πυρήνα από φερριτή χωρίς διάκενο και το δεύτερο με πυρήνα από σκόνη σιδήρου. Θα γίνει αναφορά σε έναν τρόπο αναγνώρισης των χαρακτηριστικών αγνώστων υλικών πυρήνα και τέλος θα υπολογιστεί ο αριθμός των σπειρών που χρειάζονται για την επίτευξη της ζητούμενης αυτεπαγωγής για το κάθε πηνίο. Λόγω έλλειψης υλικών από το εμπόριο έγινε ανακύκλωση παλιών πυρήνων από παλμοτροφοδοτικά ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι διαστάσεις των πυρήνων οπότε δεν είναι επιλεγμένες αποκλειστικά για την εφαρμογή. Στην δεύτερη φάση θα γίνει ο έλεγχος λειτουργίας των πηνίων με την χρήση μιας διάταξης μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (Buck). Θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις που έγιναν και συγκριθούν μεταξύ τους με σκοπό την διαμόρφωση ενός συμπεράσματος.

#### 3.3.1 Αναγνώριση χαρακτηριστικών αγνώστου πηνίου.

Υπάρχει περίπτωση κατά την σχεδίαση για διάφορους λόγους να χρειαστεί να γίνει η αναγνώριση κάποιου πυρήνα. Πολλές φορές μπορεί να μην φαίνεται η να μην υπάρχει κωδικός προϊόντος καθιστώντας την αναγνώριση δύσκολη. Σε αυτήν την περίπτωση ένας μετρητής LCR είναι απαραίτητο εργαλείο, όπως και ένα πρόγραμμα υπολογισμού μαγνητικής διαπερατότητας. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται ένας τέτοιου είδους μετρητής που στην προκειμένη περίπτωση μετράει την αυτεπαγωγή του πηνίου που κάνει χρήση η διάταξη του εμπορίου.



Σχήμα 3.5 Μετρητής LCR και πηνίο εμπορίου.

Η διαδικασία αναγνώρισης αν και εύκολη χρειάζεται βασικές γνώσεις για την σωστή εφαρμογή της. Αρχικά πρέπει να μετρηθούν οι διαστάσεις του πυρήνα. Αυτές είναι η εξωτερική του διάμετρος, η εσωτερική του διάμετρος, το ύψος του σε χιλιοστά και σε κάποιες περιπτώσεις χρειάζεται και η διάσταση της κόψης του δακτυλίου (chamfer). Έπειτα από αυτήν την απλή διαδικασία θα πρέπει να τυλιχτεί το πηνίο με έναν αγωγό. Να σημειωθεί πως όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των σπειρών τόσο πιο ακριβής θα είναι και ο υπολογισμός της μαγνητικής διαπερατότητας. Τουλάχιστον δέκα σπείρες αργότερα, με τον μετρητή LCR γίνεται η μέτρηση της αυτεπαγωγής. Αφού λοιπόν έχουν συγκεντρωθεί τα παραπάνω στοιχεία για το πηνίο, γίνεται η μετάβαση στον ιστότοπο [coil32.net](http://coil32.net) από όπου θα γίνει ο υπολογισμός της μαγνητικής διαπερατότητας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6, εντάσσοντας τα στοιχεία που μετρήθηκαν, το πρόγραμμα εμφανίζει την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού του πυρήνα. Αυτή η μέθοδος μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για κάθε τοροϊδή πυρήνα ανεξαρτήτου υλικού κατασκευής. Ο πυρήνας του οποίου έγινε ο υπολογισμός στο παράδειγμα είναι εμφανώς κατασκευασμένος από φερρίτη, γεγονός που το προδίδει η πολύ μεγάλη τιμή μαγνητικής διαπερατότητας.

ENTER THE INPUT DATA:

Select units: mm/cm

N = 19 - Number of turns

L = 1850 μH - Measured inductance

OD = 17 mm - Outer diameter of ring

ID = 13 mm - Inner diameter of ring

h = 7 mm - Height of ring

C = 0 mm - Chamfer

Calculate

RESULT:

$\mu_r = 13646$  - Relative magnetic permeability

$A_L = 5124.65373$  - Inductance factor of the core [ $\mu\text{H}/\text{N}^2$ ]

Clear all

Σχήμα 3.6 Πρόγραμμα υπολογισμού μαγνητικής διαπερατότητας ( $\mu$ ).[15]

### 3.3.2 Θεωρητικός υπολογισμός των πηνίων και περιέλιξη αυτών

Με τους πυρήνες προς περιέλιξη να βρίσκονται ήδη στα χέρια του σχεδιαστή, επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των σπειρών για την επίτευξη της ζητούμενης αυτεπαγωγής. Στο σημείο αυτό απαραίτητη είναι η γνώση της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, οι διαστάσεις του πυρήνα και η διάμετρος του αγωγού που θα χρησιμοποιηθεί.

ENTER THE INPUT DATA:

Select units: mm/cm ~ AWG ~ 20

SWG = 44

L = 47 μH - Required inductance

OD = 25 mm - Outer diameter of ring

ID = 15 mm - Inner diameter of ring

h = 8 mm - Height of ring

C = 0 mm - Chamfer

$\mu_r = 77$  - Relative magnetic permeability

d = 0.81182388 mm - Diameter of wire (AWG-20)

Calculate

RESULT:

N = 27.328 - Number of turns

$A_L = 63$  - Inductance factor of the ring [ $\mu\text{H}/\text{N}^2$ ]

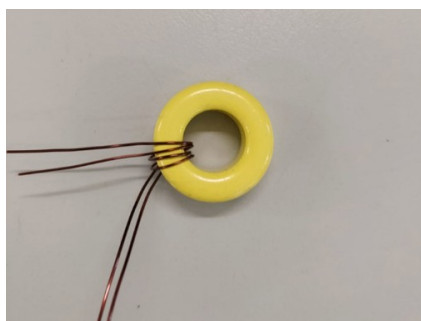
Lw = 0.711 m - Required length of wire\*

Clear all

Σχήμα 3.7 Υπολογισμός πηνίου με το πρόγραμμα της σελίδας coil32.net.[15]

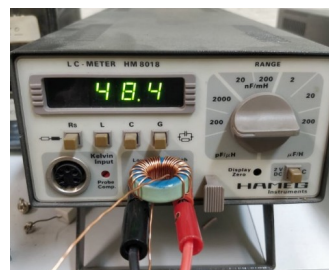
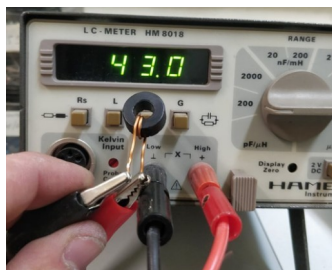
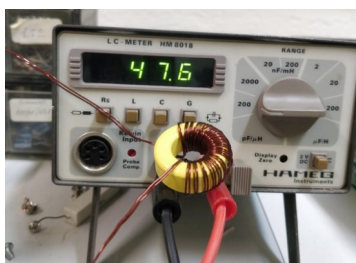
Σύμφωνα με το διάγραμμα AWG ο κατάλληλος αγωγός για την περιέλιξη θα ήταν ο #13. Αυτός έχει διάμετρο 1.8 mm και είναι κατάλληλος για εφαρμογές με συχνότητα διακόπτωσης 5,3kHz για την αποφυγή του επιδερμικού φαινομένου. Επομένως αναμένεται πως θα έχει κάποιες απώλειες με την επιλογή αυτού του αγωγού, θα είναι όμως ασφαλής εάν ο μετατροπέας χρησιμοποιηθεί στις ακραίες του τιμές.

Παρόλα αυτά, για το πείραμα που θα διεξαχθεί οι απαιτήσεις είναι μικρότερες, αυτό μας δίνει την δυνατότητα επιλογής αγωγού με μικρότερη διάμετρο, χαρακτηριστικό που θα βοηθήσει αρκετά την κατάσταση με το επιδερμικό φαινόμενο. Ο αγωγός #20 με διάμετρο 0.8mm επιλέγεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές όπου η ονομαστική τιμή του ρεύματος δεν ξεπερνάει τα 1.5A. Ο ίδιος αγωγός θα χρησιμοποιηθεί για όλα τα πηνία του πειράματος. Να σημειωθεί πως θα μπορούσε να γίνει χρήση αγωγού με ακόμη μικρότερη διάμετρο στο συγκεκριμένο πείραμα, όμως δεν υπήρχε αυτή η επιλογή λόγω έλλειψης υλικών. Αφού λοιπόν όλα τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν ο υπολογισμός των σπειρών γίνεται πάλι με την χρήση προγράμματος της ιστοσελίδας coil32.net. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7, η ιστοσελίδα δέχεται ως στοιχεία τα δεδομένα που έχουμε για το πηνίο και δίνει ως αποτέλεσμα τον αριθμό των σπειρών που απαιτείται για την ζητούμενη αυτεπαγωγή. Γνωρίζοντας πλέον τον απαιτούμενο αριθμό σπειρών μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία της περιέλιξης. Πολύ χρήσιμη πληροφορία αποτελεί ο υπολογισμός του συνολικού μήκους του αγωγού που θα χρειαστεί. Πάντα καλό είναι να δίνεται ένα περιθώριο λάθους και να κόβεται το μήκος του αγωγού λίγο μεγαλύτερο από το υπολογισμένο. Η διαδικασία της περιέλιξης είναι τόσο απλή όσο ακούγεται και απεικονίζεται στο σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8 Περιέλιξη πηνίου

Με αφετηρία ένα οποιοδήποτε σημείο του δακτυλίου, τα τυλίγματα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο σφιχτά στα τοιχώματα του πυρήνα και καλό είναι να κατανεμηθούν σε όλη την περίμετρο του. Αυτό γίνεται για την αποφυγή της δημιουργίας σημείων αυξημένης θερμοκρασίας (hot spot) στον πυρήνα. Στον πυρήνα του σχήματος 3.4 φαίνεται μια μέθοδος περιέλιξης που εφαρμόζεται όταν δεν είναι διαθέσιμος ο κατάλληλης διαμέτρου αγωγός όμως είναι διαθέσιμος ένας αγωγός της μισής απαιτούμενης διαμέτρου. Με την παραλληλία των δύο πλέον αγωγών η συνολική διάμετρος του τυλίγματος είναι όση η διάμετρος των δύο αγωγών μαζί, αυξάνοντας την ονομαστική τιμή της έντασης ρεύματος που μπορεί να υποστηρίξει. Αφού ολοκληρωθεί η περιέλιξη καλό είναι να γίνει και μια εξακρίβωση της αυτεπαγωγής που παρουσιάζει το πηνίο με την χρήση του μετρητή LCR, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9.



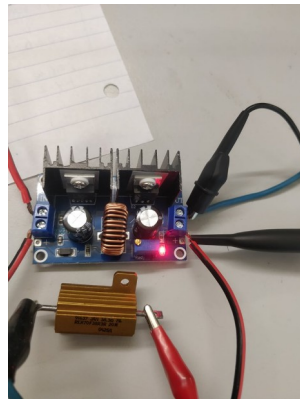
Σχήμα 3.9 Μέτρηση αυτεπαγωγής των πηνίων

Εντύπωση μπορεί να προκαλέσει η ιδιότητα του πυρήνα από φερριτή να παρουσιάζει την ίδια σχεδόν αυτεπαγωγή με τα πηνία από σκόνη σιδήρου, ενώ έχει μόλις δύο σπείρες. Με την ένταξη μιας τρίτης σπείρας η αυτεπαγωγή άγγιζε τα 60μH. Προτιμήθηκε η χρήση των δύο σπειρών ώστε η αυτεπαγωγή όλων

των πηνίων να είναι όσο το δυνατό πιο ισάξια γίνεται με σκοπό να παραχθούν πιο τα συγκρίσιμα αποτελέσματα. Έχοντας τα πηνία σε ετοιμότητα μπορεί να ξεκινήσει και η δεύτερη φάση του πειραματικού μέρους όπου θα γίνει η δοκιμή των πηνίων για μετατροπή της τάσης εισόδου.

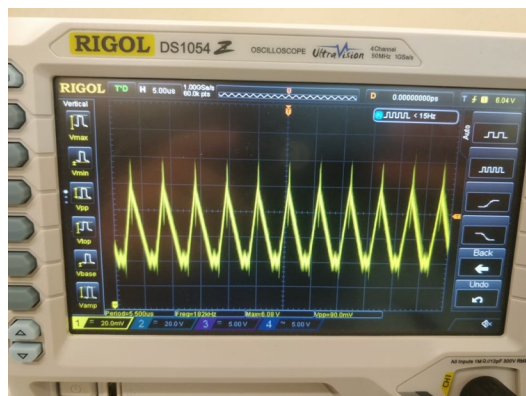
### 3.3.3 Δοκιμή των πηνίων

Η μέθοδος με την οποία θα γίνει το πειραματικό μέρος του κεφαλαίου έχει ως αφετηρία τον έλεγχο λειτουργίας του μετατροπέα του εμπορίου. Με την χρήση ενός γραμμικού τροφοδοτικού θα τεθεί η τάση εισόδου του μετατροπέα στα 20V και με την βοήθεια του επιτραπέζιου πολυμέτρου σε συνδυασμό με την περιστροφή της μεταβαλλόμενης αντίστασης της διάταξης, σχήμα 3.4, σταθεροποιείται η έξοδος στα 6V. Η σταθεροποίηση αυτή γίνεται μέσω της ρύθμισης του πλάτους των παλμών (PWM). Με την βοήθεια του ψηφιακού παλμογράφου Rigol DS1054 γίνεται η μέτρηση της τάσης εξόδου που βρίσκεται στο άλλο άκρο της πλακέτας. Για αρχή θα γίνει η μέτρηση της εξόδου χωρίς να υπάρχει κάποιο φορτίο συνδεδεμένο στην έξοδο του μετατροπέα. Εν συνεχεία, θα συνδεθεί στην έξοδο ένα ωμικό φορτίο των 38.8Ω/ 20W και θα ξανά γίνει η μέτρηση της εξόδου, σχήμα 3.10. Αυτά τα βήματα θα επαναληφθούν για όλες τις περιπτώσεις που θα ακολουθήσουν. Σκοπός του πειράματος είναι η εύρεση της επιρροής των διαφορετικών υλικών και μεγεθών των πηνίων σε μια διάταξη.



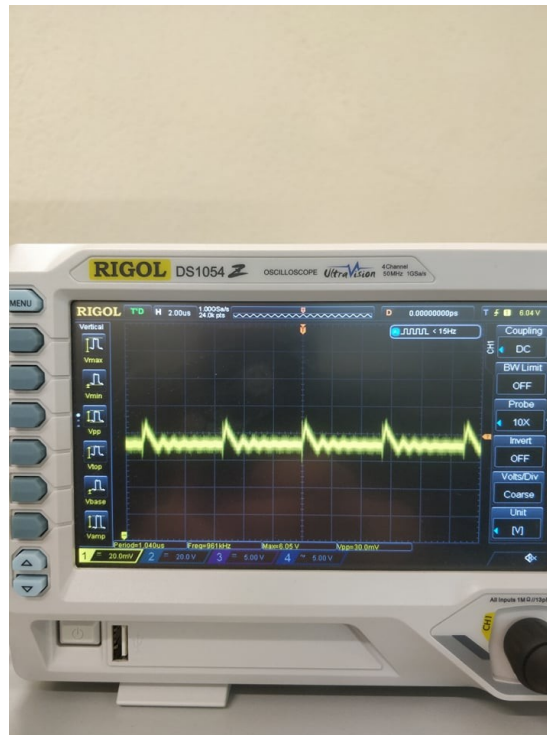
Σχήμα 3.10 Η διάταξη εν λειτουργία με το φορτίο συνδεδεμένο.

Για να υπάρχει μέτρο σύγκρισης των εκ νέου τυλιγμένων πηνίων θα γίνουν για αρχή οι μετρήσεις με το ατόφιο κύκλωμα του εμπορίου. Αφού έχουν τεθεί οι παράμετροι κατάλληλα ώστε τα 20V εισόδου να υποβιβάζονται στα 6V στην έξοδο χωρίς την ύπαρξη φορτίου, συνδεσμολογείτε ο ακροδέκτης του παλμογράφου εμφανίζοντας την μέτρηση του σχήματος 3.11.



Σχήμα 3.11 Μέτρηση πρωτότυπης διάταξης χωρίς φορτίο

Η ποιότητα των μετατροπέων αυτών φαίνεται από την κυμάτωση της εξόδου που παρουσιάζουν. Κατά προτίμηση η κυμάτωση (ripple) είναι θεμιτό να είναι μηδενική. Στην πραγματικότητα όμως αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί, μπορεί όμως να ελαχιστοποιηθεί έως έναν αποδεκτό βαθμό. Στην διάταξη που παρουσιάζεται η κυμάτωση της εξόδου είναι 90mV χωρίς την παρουσία φορτίου. Αυτό σημαίνει πως στην έξοδο του μετατροπέα υπάρχει μια κυμάτωση που αναλογεί στο 1.5% της εξόδου. Αυτό το ποσοστό είναι παραπάνω από αποδεκτό για τις περισσότερες εφαρμογές όπου τέτοιου είδους μετατροπείς χρειάζονται. Για την επόμενη μέτρηση θα συνδεθεί στην έξοδο και το ωμικό φορτίο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10.



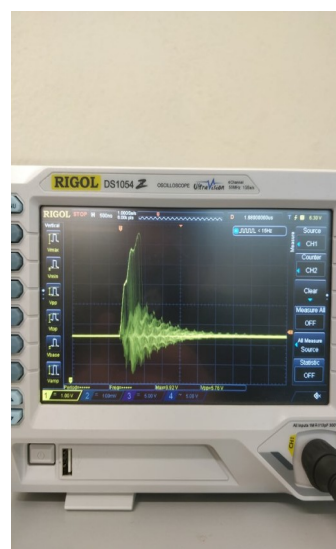
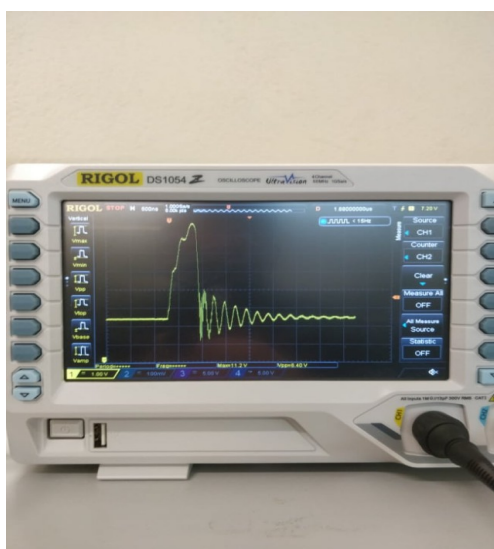
Σχήμα 3.12 Μέτρηση πρωτότυπης διάταξης με φορτίο

Η ανοχή του 1.5% αντιστοιχεί για την περίπτωση όπου δεν υπάρχει φορτίο στην έξοδο του μετατροπέα. Με την ένταξη του ωμικού φορτίου όμως παρατηρείται πως η κυμάτωση της εξόδου γίνεται σχεδόν αμελητέα. Αυτό είναι λογικό αφού η ένταξη καθαρού ωμικού φορτίου προκαλεί την σταθεροποίηση της εξόδου σε ένα μετατροπέα, εφόσον η τιμή του είναι τέτοια ώστε η ένταση του ρεύματος να είναι σε μικρά επίπεδα. Στην εικόνα 3.12 φαίνεται πως γίνεται αξιοσημείωτη εξομάλυνση της εξόδου και η κυμάτωση από 90mV υποβιβάζεται στα 30mV. Αυτό αντιστοιχεί σε ποσοστό 0.5% της εξόδου των 6V. Να σημειωθεί εδώ πως ανάλογα με το φορτίο μπορεί τα αποτελέσματα να είναι διαφορετικά. Στην περίπτωση όπου το φορτίο παρουσιάζει μικρή αντίσταση και απαιτεί μεγάλη ένταση του ρεύματος, τότε η κυμάτωση της εξόδου μπορεί να μην επηρεαστεί ή και να επιδεινωθεί.



Σχήμα 3.13 Αφαίρεση του πηνίου

Για την επόμενη μέτρηση αφαιρέθηκε εξ ολοκλήρου η αυτεπαγωγή από την διάταξη και αντικαταστάθηκε από ένα απλό αγωγό όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13. Οι παράμετροι παραμένουν ως είχαν από την προηγούμενη μέτρηση. Η επιλογή των τιμών για τάση εισόδου και εξόδου επιλέχθηκαν επίτηδες να είναι μακριά από τις ακραίες τιμές που αναφέρει το φύλλο κατασκευαστή για την δυνατότητα διεξαγωγής του πειράματος αυτού. Από την θεωρία γνωρίζουμε πως η απουσία του πηνίου θα προκαλέσει στιγμιαία και ραγδαία αύξηση της τάσης στην αρχή κάθε περιόδου. Η τάση αυτή μπορεί να είναι και διπλάσια αυτής που αναμένεται. Έτσι αποφεύχθηκε η καταστροφή των ημιαγωγών διακοπών της διάταξης. Όπως ήταν αναμενόμενο, κατά την λειτουργία του μετατροπέα χωρίς την χρήση πηνίου η κυμάτωση στην έξοδο τον καθιστά άχρηστο. Στο σχήμα 3.14(α) η μέτρηση του παλμογράφου σημειώνει μια μέγιστη τάση των 11.2V στην έξοδο, περίπου διπλάσια της ρυθμισμένης τιμής. Αυτή η κυματομορφή να σημειωθεί πως εμφανίζεται σε κάθε περίοδο λειτουργίας, δηλαδή 180.000 φορές κάθε δευτερόλεπτο και συμβάλει κατά πολύ στην κακή απόδοση του μετατροπέα, μετατρέποντας την ενέργεια αυτή σε θερμότητα στα άκρα των ημιαγωγών διακοπών. Κατά την διάρκεια του πειράματος όντως οι ημιαγωγοί διακόπτες παρά την ύπαρξη ψηκτρών, παρουσίασαν σημαντική άνοδο στην θερμοκρασία τους σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα όπου δεν παρατηρήθηκε καμία αλλαγή στην θερμοκρασία τόσο των διακοπών όσο και στο ίδιο το πηνίο.



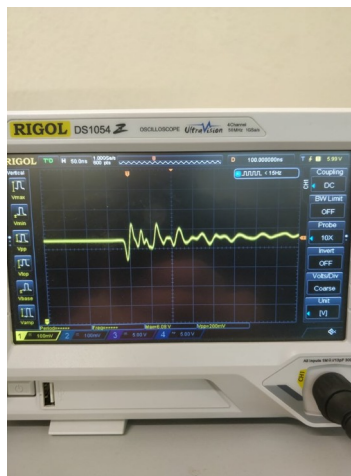
Σχήμα 3.14 (α)Μέτρηση εξόδου χωρίς την χρήση πηνίου και χωρίς φορτίο, (β) Με φορτίο

Ελαφριά βελτίωση φάνηκε να παρουσιάζει η έξοδος όταν επαναλήφθηκε το πείραμα με την ένταξη του φορτίου των 38Ω. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.14(β), η μέγιστη τιμή της εξόδου που παρουσιάζει κατά την λειτουργία ο μετατροπέας είναι 9.9V, μια τιμή που εξακολουθεί να καθιστά τον μετατροπέα μη χρήσιμο. Η θερμοκρασία των διακοπών και σε αυτήν την περίπτωση παρουσίασε ραγδαία αύξηση και το πείραμα διακόπηκε για την αποφυγή της τυχών καταστροφής της διάταξης.



Σχήμα 3.15 Μετρήσεις με το πηνίο από πυρήνα φερριτή χωρίς φορτίο.

Έκπληξη αποτέλεσαν τα αποτελέσματα του τρίτου πειράματος. Σε αυτήν την περίπτωση έγινε η χρήση ενός πηνίου από φερρίτη, του οποίου η μαγνητική διαπερατότητα ήταν τόσο υψηλή που για την απαιτούμενη αυτεπαγωγή χρειάστηκαν μόλις δύο σπείρες. Η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας είναι της τάξεως των 14.000, μια ένδειξη πως το διάγραμμα υστέρησης του πυρήνα αυτού θα έχει απότομη κλίση, δηλαδή μικρή ενεργό περιοχή λειτουργίας. Στο σχήμα 3.15 φαίνεται πως η υποψία για τον κίνδυνο κορεσμού του πυρήνα ήταν ορθή. Λόγω της πολύ ισχυρής μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού του πυρήνα, αυτός φτάνει σε κορεσμό και το μαγνητικό στοιχείο παύει πλέον να έχει τις ηλεκτρομαγνητικές του ιδιότητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πηνίο, έπειτα από την χρονική στιγμή που χρειάζεται για να κορεστεί, να συμπεριφέρεται σαν ένα απλό βραχυκύκλωμα όπως αυτό του προηγούμενου πειράματος. Στην προκειμένη περίπτωση η κατάσταση είναι λίγο καλύτερη από ένα απλό βραχυκύκλωμα επειδή προτού κορεστεί το πηνίο για ένα χρονικό διάστημα συμπεριφέρεται ως φίλτρο. Η μέγιστη τάση που εμφανίζει στην κορύφωση της ταλάντωσης είναι στα 10.7V, μια τιμή που καθιστά άχρηστο για ακόμη μια φορά τον μετατροπέα.



Σχήμα 3.16 Μετρήσεις με το ογκώδες πηνίο χωρίς φορτίο.

Με την σύνδεση του φορτίου δεν παρατηρήθηκε καμία αξιοσημείωτη αλλαγή στην έξοδο, το πρόβλημα του κορεσμού εξακολουθεί να υπάρχει και να προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας στους ημιαγωγούς διακόπτες. Η υψηλή μαγνητική διαπερατότητα καθιστά αυτόν τον φερρίτη ως υλικό ακατάλληλο για χρήση στην συγκεκριμένη εφαρμογή. Μπορεί με την δημιουργία ενός διάκενου, βάση θεωρίας, να υπήρχε βελτίωση στην τιμή της εξόδου, το μόνο σίγουρο είναι πως ακόμη και με διάκενο, η διαφορά των χαρακτηριστικών διαπερατότητας των δύο υλικών θα εξακολουθούσε να αποτελεί πρόβλημα αφού ο πυρήνας σκόνης σιδήρου έχει λιγότερο από  $\mu=100$ .



Σχήμα 3.17 Μετρήσεις με ογκώδες πηνίο και φορτίο.

Στο τέταρτο και τελευταίο πείραμα επιλέχθηκε ένας πυρήνας σκόνης σιδήρου, όπως ο πρωτότυπος της διάταξης, με βασική διαφορά τις διαστάσεις του. Με σχεδόν τον διπλάσιο όγκο, ο πυρήνας αυτός με μετρημένη αυτεπαγωγή τα 47,6μH, σχεδόν ιδανική σύμφωνα με τον κατασκευαστή, δοκιμάστηκε ώστε να βγει συμπέρασμα όσον αφορά την σχέση μεταξύ του όγκου του πυρήνα και της διακύμανσης της τάσης στην έξοδο. Οι μετρήσεις του σχήματος 3.16 δεν έχουν καμία ένδειξη πως ο όγκος προσφέρει μικρότερη διακύμανση. Στην περίπτωση όπου δεν υπήρχε συνδεδεμένο φορτίο στον μετατροπέα Buck, τα αποτελέσματα των μετρήσεων δείχνουν μια διακύμανση της τάσης εξόδου της κλίμακας των 200mV έναντι των 110mV με το μικρότερου όγκου πρωτότυπου πηνίου. Παρά την μεγαλύτερη διακύμανση, αυτή δεν παύει να είναι σε ποσοστό 3% της τάσης εξόδου, κάτι που καθιστά πλήρως λειτουργικό τον μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με αυτό το πηνίο ως κύριο στοιχείο του. Βελτίωση φαίνεται να επιφέρει η πρόσθεση του ωμικού φορτίου, με την διακύμανση της τάσης εξόδου να μειώνεται στα 100mV όπως φαίνεται στο σχήμα 3.17. Μετά από αυτά τα πειράματα το συμπέρασμα που μπορεί να βγάλει κάποιος είναι πως τα πηνία είναι απαραίτητα μέσα για το φιλτράρισμα της έντασης του ρεύματος και η αφαίρεση τους καθιστά έναν μετατροπέα άχρηστο. Ένα επίσης συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως κάθε διάταξη και κάθε περίπτωση χρειάζεται τον σχεδιασμό του εξειδικευμένου πηνίου και η επιλογή οποιουδήποτε με μόνο γνώμονα την αυτεπαγωγή δεν είναι σοφή επιλογή. Στο παραπάνω πείραμα φαίνεται πως οι πυρήνες από σκόνη σιδήρου είναι οι μόνοι πυρήνες που μπορεί να φανούν χρήσιμοι, όμως αυτό δεν σημαίνει πως οι φερρίτες δεν θα μπορούσαν να τους αντικαταστήσουν υπό διαφορετικές συνθήκες. Για παράδειγμα, εάν η συχνότητα διακόπτησης δεν ήταν τα 180 kHz όμως μερικά MHz τότε η μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα θα ήταν ένα καίριο χαρακτηριστικό για να ανταπεξέλθει το υλικό στις απαιτήσεις τις διάταξης. Επίσης μια παράμετρος που θα μπορούσε να διαφοροποιήσει τις μετρήσεις του παραπάνω πειράματος θα ήταν η ύπαρξη διάκενου στον πυρήνα από φερρίτη. Εν κατακλείδι, η σωστή επιλογή υλικού από τον σχεδιαστή είναι μια διαδικασία που απαιτεί εμπειρία και που μπορεί να προβεί μοιραία στον σχεδιασμό μιας διάταξης.

## Κεφάλαιο 4 Σχεδίαση και υλοποίηση μετασχηματιστών υψηλών συχνοτήτων

Στο κεφάλαιο αυτό ο στόχος είναι να παρουσιαστεί ο γενικός αλγόριθμος της σχεδίασης των μετασχηματιστών υψηλών συχνοτήτων και στην συνέχεια να γίνει η θεωρητική και πρακτική σχεδίαση δύο τέτοιων στοιχείων για δύο διαφορετικές τοπολογίες. Οι μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων κατά βάση δεν παύουν να είναι απλώς ένας αριθμός τυλιγμάτων μεγαλύτερος των δύο, γύρο από ένα πυρήνα φτιαγμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό. Στην πραγματικότητα όμως κάθε διαφορετική τοπολογία μετασχηματιστή από μόνη της μπορεί να περιέχει διαφορετικό σχεδιασμό και υλοποίηση. Θα γίνει εστίαση στην Fly-Back τοπολογία των μετατροπέων. Να σημειωθεί πως δεν θα υπάρξει κεφάλαιο πειραματικού ελέγχου λόγω της πολυπλοκότητας του ελέγχου αυτού του στοιχείου.

### 4.1 Αλγόριθμος σχεδίασης μετασχηματιστών

Για την απλούστευση της διαδικασίας της σχεδίασης υπάρχει ένας γενικός γνώμονας τον οποίο ακολουθεί ένας σχεδιαστής. Αυτός ο αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε μετασχηματιστή σε γενικά πλαίσια και μετέπειτα ανάλογα με την τοπολογία γίνονται οι κατάλληλες αλλαγές.

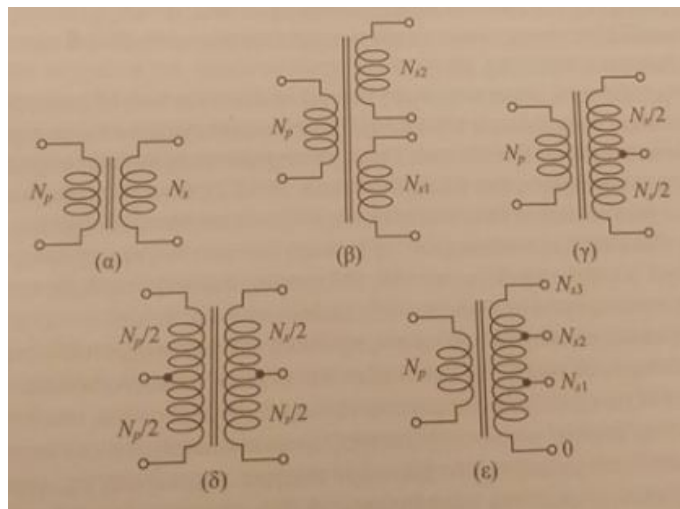
#### 4.1.1 Αριθμός και κατάτμηση τυλιγμάτων

Αρχικά πρέπει να αποφασιστεί από τον σχεδιαστή ο αριθμός των τυλιγμάτων που θα φέρει ο μετασχηματιστής. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, υπάρχουν πολλές διαφοροποιήσεις που μπορεί να παρουσιάζουν τα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Στο σχήμα 4.1α είναι η απλούστερη μορφή όπου υπάρχουν δύο μόνο τυλίγματα και αποτελεί την πιο εύκολη υλοποίηση σε μετασχηματιστή. Στην πράξη όμως οι μετασχηματιστές φέρουν περισσότερα τυλίγματα για την κάλυψη διάφορων αναγκών που έχει η συνολική διάταξη ενός μετατροπέα όσων αφορά την ανάγκη για μικρότερες ή μεγαλύτερες τάσεις εξόδου, σχήμα 4.1β. Στους μετατροπείς τοπολογίας μισής και πλήρους γέφυρας, σχήμα 4.1γ, το δευτερεύον τύλιγμα έχει μεσαία λήψη. Μετά στην τοπολογία μετατροπέων push-pull που το γενικό τους σχηματικό φαίνεται στο 4.1δ, τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα έχουν μεσαία λήψη. Τέλος, σε άλλες τοπολογίες η ανάγκη για πολλαπλές τάσεις εξόδου σε διαφορετικές τιμές απαιτούν την περιέλιξη πολλών δευτερευόντων τυλιγμάτων, σχήμα 4.1ε [1]. Είναι επόμενο πως όσα περισσότερα τυλίγματα απαιτούνται τόσο πιο δύσκολη είναι η σχεδίαση και υλοποίηση του μετασχηματιστή. Επιπλέον, στις υψηλές συχνότητες είναι απαραίτητη η κατάτμηση των τυλιγμάτων με συγκεκριμένη φορά για την μείωση των απωλειών λόγω επιδερμικού φαινομένου και επαγωγή σκέδασης. Επιπλέον, με την περιέλιξη κάθε στρώσης τυλιγματος απαιτείται η χρήση ειδικού μονωτικού υλικού για την αποφυγή δημιουργίας τόξων μεταξύ τους, με ρίσκο την αύξηση των παρασιτικών χωρητικότητων.

#### 4.1.2 Υλικό, γεωμετρική μορφή και μέγεθος πυρήνα

Το υλικό του πυρήνα, όπως και στα πηνία, επιλέγεται ανάλογα με την συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα. Στους μετασχηματιστές όμως η μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα δεν περιορίζει την χρήση

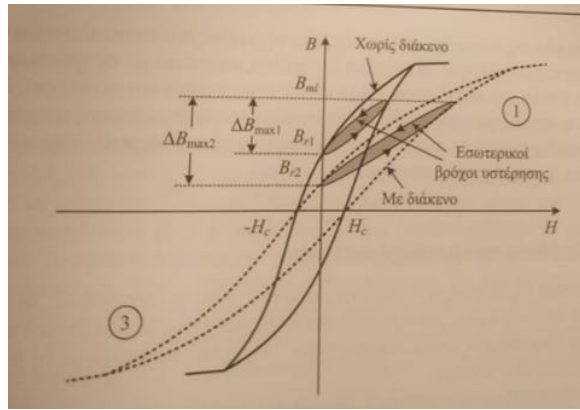
τους σε συχνότητες μικρότερες των MHz όπως στα πηνία. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή κατά κύριο λόγο δεν απαιτείται η αποθήκευση ενέργειας στον πυρήνα, αντιθέτως αποφεύγεται. Εξαιρέση αποτελεί ο μετασχηματιστής fly-back. Εφόσον δεν υπάρχει αποθήκευση αρκετής ενέργειας ώστε να κορεστεί ο πυρήνας, οι φερριτές αποτελούν το πιο σύνηθες υλικό κατασκευής. Όσον αφορά την γεωμετρική μορφή του πυρήνα, κατά κύριο λόγο γίνεται χρήση πυρήνων τύπου E με συνδυασμό την ύπαρξη μπομπίνας για την περιέλιξη των τυλιγμάτων. Υπάρχουν όμως και μετασχηματιστές με άλλο γεωμετρικό σχήμα, όπως παραδείγματος χάρι οι δακτύλιοι. Οι δακτύλιοι είναι διαδεδομένοι σε μετασχηματιστές 1:1 που έχουν χρήση σε μετατροπείς fly-back. Τέλος το μέγεθος του πυρήνα επιλέγεται βάση της φαινόμενης ισχύς που υπολογίστηκε όπως και από τον αριθμό των συνολικών σπειρών όλων των τυλιγμάτων, του τύπου των τυλιγμάτων και τον βαθμό πληρότητας τους. Μεγαλύτερη ισχύς μεταφράζεται σε μεγαλύτερο πυρήνα.[1] Ο πιο εύκολος τρόπος εύρεσης κατάλληλου μεγέθους και υλικού πυρήνα είναι μέσω φύλλων κατασκευαστών στα οποία ως δεδομένο χρειάζεται μόνο η φαινόμενη ισχύς και η συχνότητα. Στην συνέχεια από έναν πίνακα που ονομάζεται πίνακας τυπικής ισχύς πυρήνα μπορεί ο σχεδιαστής να επιλέξει προσεγγιστικά τον κατάλληλο πυρήνα για την εφαρμογή του.



Σχήμα 4.1 Τυλίγματα μετασχηματιστών.

#### 4.1.2 Μήκος $l$ του διάκενου

Το διάκενο σε ορισμένες τοπολογίες είναι απολύτως απαραίτητο για την λειτουργίας τους. Η χρησιμότητα του διάκενου είναι η ιδιότητα του να μεταβάλλει τον βρόγχο υστέρησης του πυρήνα. Αυτό το επιτυγχάνει με την μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας όπου σαν αποτέλεσμα έχει την αποθηκεύσει ενέργειας στο κενό αέρος που παρουσιάζει. Αυτό το είδος μετασχηματιστή χρειάζεται η τοπολογία fly-back για να λειτουργήσει και αποτελεί μια από τις εξαιρέσεις όπου η αποθήκευση ενέργειας είναι επιθυμητή. Το διάκενο μπορεί να είναι διακριτό ή να είναι κατανεμημένο στο υλικό του πυρήνα. Η μεταβολή που απαιτείται είναι αυτή του σχήματος 4.2, όπου η ένταξη του διάκενου επηρεάζει την μαγνητική αντίσταση του υλικού του πυρήνα, αυξάνοντας την. Ως αποτέλεσμα, η μαγνητική διαπερατότητα, οπότε και η κλίση των καμπυλών του βρόγχου, μειώνονται διατηρώντας την ίδια συνεκτική δύναμη. Έτσι, δημιουργείται ένας μεγαλύτερος εσωτερικός βρόγχο υστέρησης οπότε ένα μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας του πυρήνα πριν κορεστεί.[1]



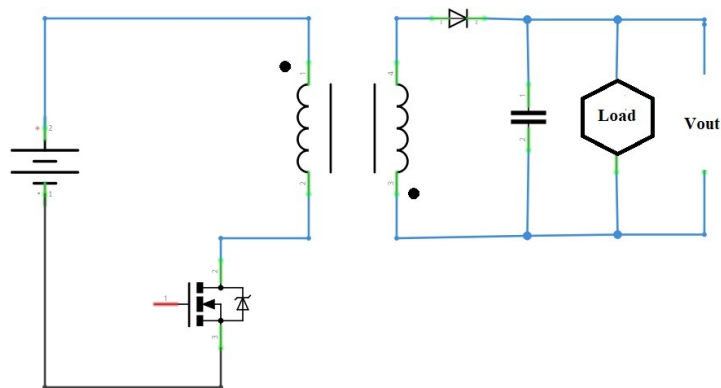
Σχήμα 4.2 Μεταβολή βρόγχου υστέρησης με χρήση διάκενου

### 4.1.3 Διατομή και μορφή αγωγού

Η επιλογή του αγωγού γίνεται με τα ίδια κριτήρια όπως και στην σχεδίαση των πηνίων. Η συχνότητα λειτουργίας, η απαιτούμενη ένταση ρεύματος, ο διαθέσιμος χώρος προς περιέλιξη και η διαθεσιμότητα μορφών αγωγού είναι οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψιν. Ανάλογα με την μορφή του πυρήνα επίσης μπορεί να γίνει υπολογισμός του διαθέσιμου χώρου προς περιέλιξη, γνωρίζοντας την διατομή του αγωγού και τα γεωμετρικά μεγέθη του πυρήνα. Στους πυρήνες  $E$  όπου θα βασιστεί η σχεδίαση, ο χώρος αυτός λέγεται χώρος παραθύρου. Η διάμετρος του κάθε τυλίγματος όπως και η μορφή του δεν είναι απαραίτητα ίδια ανάμεσα στα τυλίγματα, επίσης μπορεί να γίνει χρήση παράλληλων αγωγών για την αύξηση της συνολικής διαμέτρου αποφεύγοντας την επιδείνωση των φαινομένων γειτνίασης και του επιδερμικού.[1]

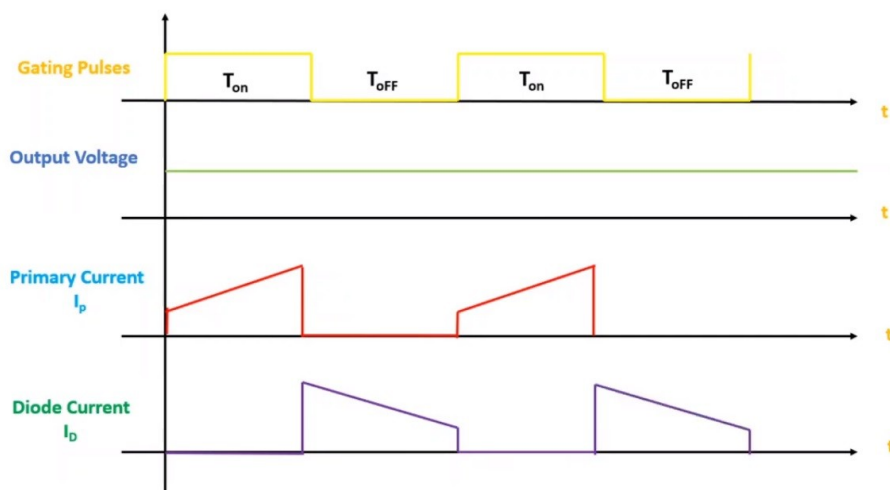
## 4.2 Τοπολογία Fly-back

Η τοπολογία fly-back είναι μια από τις πιο ευρέως διαδεδομένες τοπολογίες dc μετατροπέων, ανήκει στους μετατροπέες ισχύος με γαλβανική απομόνωση. Στην βάση της τοπολογίας αυτής είναι ο μετασχηματιστής fly-back ο οποίος πολλές φορές αναφέρεται και ως πηνίο. Αυτό συμβαίνει λόγω της ασύγχρονης λειτουργίας του και της ιδιότητας του μαγνητικού στοιχείου να αποθηκεύει ενέργεια. Αποτελεί την εξέλιξη της τοπολογίας Buck Converter με βασική διαφορά την γαλβανική απομόνωση.



Σχήμα 4.3 Σχεδιάγραμμα τοπολογίας Fly-back[16]

Μπορεί να σχεδιαστεί ο μετατροπέας αυτός είτε για CCM είτε για DCM λειτουργία και η τοπολογία αυτή έχει βασικά πλεονεκτήματα το φθινό κόστος υλοποίησης, την γαλβανική απομόνωση, τις πολλαπλές πιθανές εξόδους που μπορεί να παρουσιάσει, την δυνατότητα ZCS και εν μέρη ZVS όπως και την σχετικά εύκολη σταθεροποίηση εξόδου[17]. Αποτελείται κατά κόρο από έναν ενεργό διακόπτη MOSFET, από ένα μετασχηματιστή fly-back, μια δίοδο και έναν πυκνωτή. Τα λίγα αυτά απαραίτητα στοιχεία επιφέρουν το χαμηλό κόστος υλοποίησης του. Για την επεξήγηση της αρχής λειτουργίας του θα γίνει διαχωρισμός σε δύο καταστάσεις λειτουργίας όπου στην πρώτη ο ενεργός ημιαγωγός διακόπτης θα βρίσκεται σε κατάσταση ON και στην δεύτερη θα είναι σε κατάσταση OFF. Η διάταξη του μετατροπέα είναι αυτή του σχήματος 4.3, όπου φαίνεται η πηγή, το MOSFET, ο μετασχηματιστής, ο πυκνωτής, η δίοδος και το φορτίο. Στην πρώτη κατάσταση λειτουργίας όπου το MOSFET άγει, η συμπεριφορά του μετασχηματιστή είναι αυτή ενός πηνίου, κατά την διάρκεια της κατάστασης αυτής θα αποθηκεύσει ενέργεια στον πυρήνα μέσω του πρωτεύοντος τυλίγματος. Παρατηρώντας τις τελείες στο σχεδιάγραμμα φαίνεται πως για όλη την διάρκεια που άγει το MOSFET η δίοδος είναι πολωμένη αντίστροφα οπότε και δεν άγει. Με την αλλαγή κατάστασης του ενεργού διακόπτη η πολικότητα στο δευτερεύον τυλίγμα αντιστρέφεται με αποτέλεσμα η δίοδος να πολωθεί ορθά. Η αποθηκευμένη ενέργεια στον πυρήνα του μαγνητικού στοιχείου που είχε τη μορφή μαγνητικού πεδίου εκτονώνεται στο κύκλωμα του δευτερεύοντος τυλίγματος και μέσω του χωρητικού φίλτρου καταναλώνεται στο φορτίο. Τα τυλίγματα δεν άγουν σε καμία περίπτωση την ίδια στιγμή καθιστώντας την λειτουργία του μετατροπέα ασύγχρονη. Αυτός ο κύκλος επαναλαμβάνεται για κάθε περίοδο λειτουργίας της διάταξης.



Σχήμα 4.4 Θεωρητικές κυματομορφές μετατροπέα Fly-back[16]

Στο σχήμα 4.4 απεικονίζονται οι θεωρητικές κυματομορφές που θα παρουσιάζει ο μετατροπέας. Με την περίοδο λειτουργίας των δύο διακοπών μοιρασμένη εξίσου, φαίνεται πως όσο άγει το MOSFET το ρεύμα του πρωτεύοντος τυλίγματος αυξάνεται γραμμικά, όπως ακριβώς και σε ένα πηνίο. Με την αλλαγή κατάστασης των διακοπών φαίνεται η αποφόρτιση της ενέργειας μέσω του δευτερεύοντος τυλίγματος. Η έξοδος παραμένει σταθερή και ανεξαρτήτως από την κατάσταση των διακοπών, κάτι που είναι σαφώς επιθυμητό και επιτυγχάνεται με την χρήση του κατάλληλου πυκνωτή στην έξοδο για την ελαχιστοποίηση της κυμάτωσης της τάσης εξόδου. Με τον έλεγχο του κύκλου λειτουργίας γίνεται και ο έλεγχος της εξόδου του μετατροπέα.[16]

### 4.3 Θεωρητική σχεδίαση μετασχηματιστή Fly-back

Η θεωρητική σχεδίαση κάθε στοιχείου για έναν μετατροπέα έχει ως αφετηρία την ανάθεση των χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος. Στον πίνακα 4.1 αναγράφονται οι προδιαγραφές του μετατροπέα πάνω στις οποίες βασίζονται όλοι οι υπολογισμοί των στοιχείων του.[18]

#### 4.3.1 Προδιαγραφές σχεδίασης μετατροπέα

Η επιλογή των προδιαγραφών για το τελικό προϊόν είναι η αφετηρία κάθε σχεδίασης. Η τάση εισόδου και εξόδου όπως και το ρεύμα εξόδου είναι ίσως τα πιο βασικά στοιχεία που λαμβάνονται υπόψιν, μαζί με την συχνότητα διακόπτησης. Επίσης, καίρια είναι και η κατάσταση λειτουργίας, όπου στην περίπτωση αυτή είναι η κατάσταση ασυνεχούς ρεύματος (DCM) πράγμα που σημαίνει πως κατά την διάρκεια κάθε κύκλου θα υπάρχει μηδενισμός του ρεύματος στον μετασχηματιστή. Η κατάσταση λειτουργίας θέτει και ως μέγιστο όριο του ενεργού κύκλου το 50%. Η κυμάτωση που θα παρουσιάζεται στην έξοδο καθορίζεται από τον παράγοντα κυμάτωσης  $K_{FR}$  και καθορίζει την ιδιότητα της διάταξης να καταστέλλει την κυμάτωση μετά την ανόρθωση. Τέλος, ορίζεται ο βαθμός απόδοσης που σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να είναι κάτω του 80%. [18]

Πίνακας 4.1 Παράμετροι σχεδίασης μετατροπέα fly-back[18]

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	ΤΙΜΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
Τάση εισόδου ( $V_{in}$ )	32V ~ 78V
Τάση εξόδου ( $V_{out}$ )	12V
Ρεύμα εξόδου ( $I_{out}$ )	1A
Κατάσταση λειτουργίας	Ασυνεχής αγωγή ρεύματος (DCM)
Παράγοντας κυμάτωσης ( $K_{FR}$ )	1
Μέγιστη διάρκεια παλμού ( $D_{max}$ )	50%
Συχνότητα διακόπτησης ( $f_{sw}$ )	160kHz
Βαθμός απόδοσης ( $\eta$ )	80%

#### 4.3.2 Υπολογισμός απαραίτητων μεταβλητών

Πρώτος και απαραίτητος υπολογισμός για έναν μετατροπέα τοπολογίας fly-back είναι η ζητούμενη αυτεπαγωγή που πρέπει να παρουσιάζει το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή, δηλαδή η ποσότητα ενέργειας που θα πρέπει να μπορεί να αποθηκεύσει στην δομή του πυρήνα. Αυτός ο υπολογισμός γίνεται με την σχέση 4.1. [18]

$$L_P = \frac{(\eta \cdot (D_{max}^2) \cdot (V_{INmin}^2))}{(2 \cdot (f_{sw}) \cdot (K_{FR}) \cdot (P_o))} = \frac{(0.8 \cdot 0.5^2 \cdot 32^2)}{(2 \cdot 160 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 12)} = 53 \mu H \quad (4.1)$$

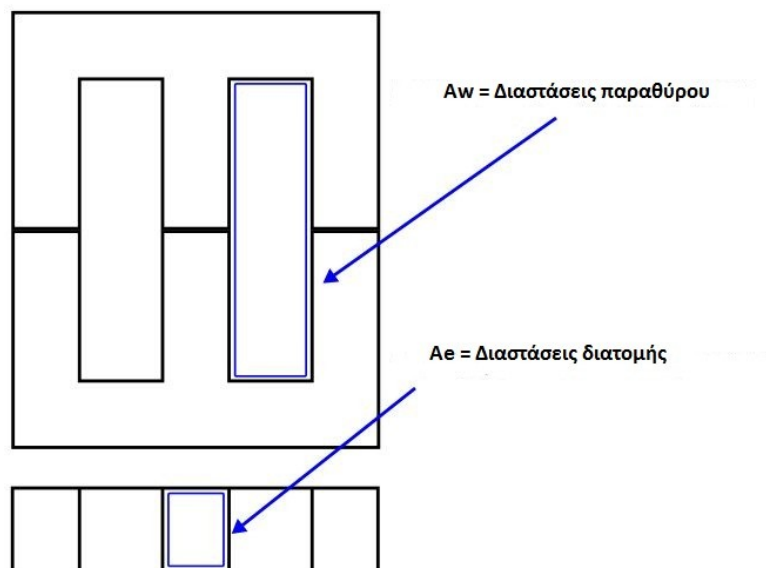
Εν συνεχεία θα πρέπει να υπολογιστεί η αναλογία των τυλιγμάτων έχοντας υπόψιν την χειρότερη πιθανή περίπτωση λειτουργίας, δηλαδή την μέγιστη τιμή ισχύς στην έξοδο με την ελάχιστη τιμή τάσεως στην είσοδο. Επίσης πρέπει να ληφθούν υπόψιν και η τάση αγωγής του παθητικού ημιαγωγού διακόπτη. Ο υπολογισμός γίνεται με την σχέση 4.2. [18]

$$n = \frac{V_{INmin} \cdot D_{max}}{((1 - D_{max}) \cdot (V_o \cdot V_D))} = \frac{32 \cdot 0.5}{((1 - 0.5) \cdot (12 + 0.7))} \approx 2.5 \quad (4.2)$$

Επόμενος υπολογισμός πρέπει να είναι η μέγιστη τιμή ρεύματος που θα πρέπει να είναι σε θέση να διαχειριστεί η διάταξη, συγκεκριμένα ο διακόπτης MOSFET. Με την βοήθεια αυτής της μέγιστης τιμής ρεύματος μπορεί να υπολογιστεί ο ελάχιστος απαιτούμενος όγκος του πυρήνα του μετασχηματιστή  $A_p$ . Αυτό υπολογίζεται με την βοήθεια της σχέσης 4.3[18]

$$I_{peakmax} = \frac{P_i}{(D_{max} \cdot V_{inmax})} + \frac{(D_{max} \cdot V_{inmax})}{(2 \cdot f_{sw} \cdot L_p)} = \frac{12 \cdot (\frac{1}{0.8})}{(0.5 \cdot 32)} + \frac{(0.5 \cdot 32)}{(2 \cdot 160 \cdot 10^3 \cdot 53 \cdot 10^{-6})} = 1.88 \text{ A} \quad (4.3)$$

Στην σχέση 4.3 η τιμή της ισχύς εισόδου υπολογίζεται με την βοήθεια του βαθμού απόδοσης. Εφόσον η ισχύς εξόδου γνωρίζουμε πως είναι 12W και γνωρίζουμε πως το κύκλωμα υστερεί κατά 20% στην μετατροπή ενέργειας το συνυπολογίζουμε ώστε να βρεθεί η ισχύς εισόδου. Με δεδομένο την μέγιστη τιμή του ρεύματος μπορούν να υπολογιστούν οι διαστάσεις του πυρήνα με την μέθοδο  $A_p$ . Στην ουσία υπολογίζεται ο όγκος του πυρήνα πολλαπλασιάζοντας τις διαστάσεις του χώρου παραθύρου  $A_w$  και της διατομής του κεντρικού άξονα του  $A_e$  σχήμα 4.5. [18]



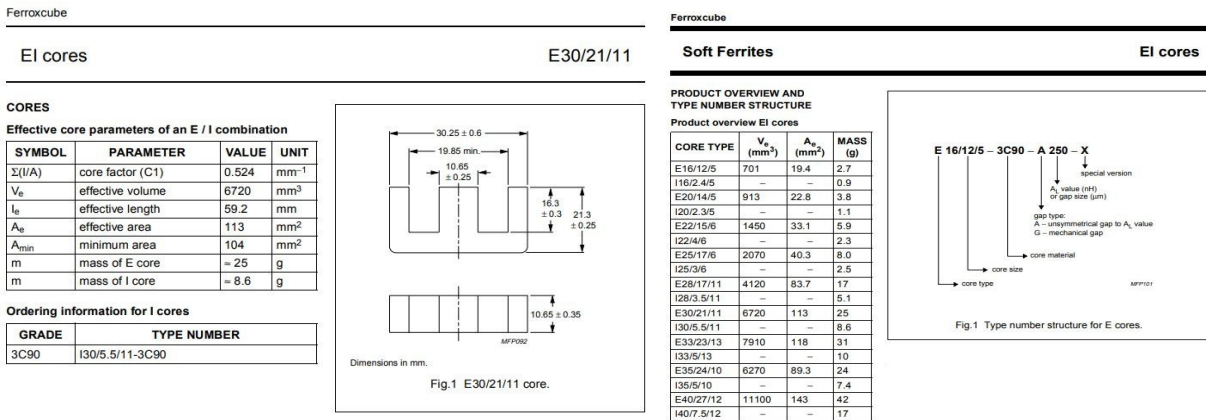
Σχήμα 4.5 Σχήμα διαστάσεων πυρήνα

Για τον υπολογισμό του ελάχιστου απαραίτητου όγκου πυρήνα γίνεται η χρήση της σχέσης 4.4 όπου ως επιπλέον δεδομένο ζητείται η τιμή της μέγιστης μαγνητικής επαγωγής του πυρήνα που κυμαίνεται μεταξύ

0.12T και 0.2T στους πυρήνες από φερρίτη. Η επιθυμητή τιμή επιλέγεται από τον σχεδιαστή με περιορισμό να είναι εντός των ορίων.

$$A_p = \left( \frac{L_p \cdot I_{peakmax} \cdot I_{outRMS}}{B_{max} \cdot 0.0085} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot 10000 = \left( \frac{53 \cdot 10^{-6} \cdot 1.88 \cdot 0.77}{0.2 \cdot 0.0085} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot 10000 \approx 163 \text{ mm}^4 \quad (4.4)$$

Πλέον υπάρχουν τα απαραίτητα δεδομένα για την επιλογή πυρήνα. Η επιλογή γίνεται με την χρήση καταλόγων από κατασκευαστές στους οποίους αναγράφονται όλα τα χαρακτηριστικά του πυρήνα. Στο σχήμα 4.6α, 4.6β απεικονίζεται ένα απόσπασμα από ένα τέτοιου είδους κατάλογο και με την βοήθεια του σχήματος διαστάσεων μπορεί να υπολογιστεί το  $A_p$ . Στο σημείο αυτό είναι καλό να σημειωθεί πως όταν γίνεται αναφορά στους πυρήνες EE τότε τα χαρακτηριστικά αφορούν μόνο την μια πλευρά του πυρήνα. Η συνολική τιμή των χαρακτηριστικών είναι διπλάσια εφόσον γίνεται χρήση δύο τέτοιων κομματιών EE.[18]



Σχήμα 4.6 Κατάλογος χαρακτηριστικών πυρήνων της εταιρείας Ferroxcube[19]

Για την παρούσα εφαρμογή γίνεται η επιλογή του πυρήνα EE19 του οποίου τα χαρακτηριστικά υπάρχουν στο σχετικό παράρτημα. Στους παρακάτω υπολογισμούς θα χρειαστεί η γνώση της μεταβλητής  $A_E$  του πυρήνα. Με την αναλογία των τυλιγμάτων γνωστή μένει ο υπολογισμός του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος, οι οποίοι πραγματοποιούνται με την σχέση 4.5 και 4.6 αντίστοιχα.[18]

$$N_p = \frac{L_p \cdot I_{peakmax} \cdot 10^6}{(B_{max} \cdot A_E)} = \frac{53 \cdot 10^{-6} \cdot 1.88 \cdot 10^6}{(0.2 \cdot 23.3)} \approx 22 \quad (4.5)$$

$$N_s = \frac{N_p}{n} = \frac{22}{2.5} \approx 9 \quad (4.6)$$

Τέλος, αφού ο σχεδιαστής έχει υπολογίσει όλα τα παραπάνω, επιλέγει την διάμετρο του αγωγού που θα χρησιμοποιήσει για την περιέλιξη του μετασχηματιστή. Αυτό γίνεται με την χρήση του πίνακα AWG και κύριο κριτήριο είναι η συχνότητα λειτουργίας. Βάση των παραπάνω στοιχείων γίνεται η επιλογή του αγωγού #28. Από τον πίνακα λαμβάνεται ως δεδομένο πως ο αγωγός αυτός έχει πλήρη χρήση της διατομής του στην συχνότητα των 170 KHz επομένως θεωρείται ο πιο κατάλληλος. Επίσης η ονομαστική τιμή έντασης ρεύματος που μπορεί να υποστηρίξει είναι 0.226A οπότε θα πρέπει να γίνει χρήση πολλαπλών αγωγών

παράλληλα συνδεδεμένων, συγκεκριμένα θα γίνει χρήση πέντε αγωγών. Έχοντας συλλέξει όλα τα παραπάνω στοιχεία μπορεί να υλοποιηθεί ο παραπάνω μετασχηματιστής.[18]

#### 4.4 Θεωρητική σχεδίαση μετασχηματιστή για παλμοτροφοδοτικού πλήρους γέφυρας

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει η σχεδίαση ενός μετασχηματιστή ο οποίος έχει εφαρμογή σε μια διάταξη παλμοτροφοδοτικού πλήρους γέφυρας και ως είσοδο έχει την τάση του δικτύου της ΔΕΗ. Πάνω στους παρακάτω υπολογισμούς θα βασιστεί και η τελευταία ενότητα όπου θα περιελιχτεί ένας μετασχηματιστής με έναν ήδη υπάρχοντα πυρήνα.

##### 4.3.1 Προδιαγραφές σχεδίασης μετατροπέα

Όπως και στην προηγούμενη ενότητα, οι προδιαγραφές του μετατροπέα είναι η βάση πάνω στην οποία ξεκινάει η σχεδίαση. Στην παρακάτω διάταξη ως είσοδο έχει τεθεί η τάση του δικτύου της ΔΕΗ οπότε και θα γίνει υπολογισμός των τιμών αφότου γίνει η ανόρθωση της. Ο πίνακας 4.2 αναγράφει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά που χρειάζονται για τον υπολογισμό του μετασχηματιστή.

Πίνακας 4.2 Προδιαγραφές μετασχηματιστή για μετατροπέα πλήρους γέφυρας.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	ΤΙΜΕΣ
Τάση εισόδου ( $V_{in}$ )	310 V
Τάση εξόδου ( $V_{out}$ )	8 V
Ρεύμα εξόδου ( $I_{out}$ )	3 A
Ρεύμα βοηθητικού τυλίγματος( $I_{aux}$ )	15 V
Τάση βοηθητικού τυλίγματος( $V_{aux}$ )	1 A
Συχνότητα διακόπτωσης ( $f_{sw}$ )	100 kHz
Ισχύς εξόδου ( $P_{out}$ )	24 W
Βαθμός απόδοσης ( $\eta$ )	90%

##### 4.3.2 Υπολογισμός απαραίτητων μεταβλητών

Οι υπολογισμοί για την τοπολογία αυτή γίνονται πιο απλοί επειδή γίνεται σχεδίαση βασισμένη πάνω σε έναν ήδη υπάρχον πυρήνα. Το βασικό χαρακτηριστικό του πυρήνα που χρειάζεται είναι η διατομή του  $A_e$ . Στην περίπτωση όπου δεν μας ήταν γνωστή η τιμή αυτή τότε θα έπρεπε να γίνει ο υπολογισμός της με την σχέση 4.7, όπου η μεταβλητή  $K$  είναι ανάλογη της τοπολογίας και είναι σταθερή και γνωστή.[11]

$$A_p = A_w \cdot A_e = \left( \frac{P_o}{K \cdot B_{max} \cdot f_{sw}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (4.7)$$

Οι υπολογισμοί ξεκινάνε με τον υπολογισμό των σπειρών του πρωτεύοντος τυλίγματος με την σχέση 4.8. [20]

$$N_{pri} = \frac{V_{pri} \cdot 10^8}{(4 \cdot f_{sw} \cdot B_{max} \cdot A_e)} = \frac{310 \cdot 10^8}{(4 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1800 \cdot 0.4225)} \approx 102 \quad (4.8)$$

Στην σχέση 4.8 η μεταβλητή 4 στον παρονομαστή είναι γνωστή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην τοπολογία πλήρους γέφυρας και στην τοπολογία push-pull. Η τιμή της μαγνητικής επαγωγής έχει επιλεγεί στα 0.18 T για την αποφυγή του κορεσμού του πυρήνα. Σημαντική σημείωση είναι πως ο αριθμός των σπειρών κατά την περιέλιξη δεν θα πρέπει να γίνει λάθος. Με την μείωση των σπειρών θα υπάρξει αύξηση της μαγνητικής επαγωγής, ως αποτέλεσμα υπάρχει κίνδυνος κορεσμού του πυρήνα οπότε και αύξηση των απωλειών και κατά επέκταση της θερμοκρασίας του στοιχείου. Αφού οι σπείρες στο πρωτεύον έχουν υπολογιστεί τότε μπορεί να γίνει και ο υπολογισμός του δευτερεύοντος τυλίγματος με την μέθοδο της τάσης ανά σπείρα. Στην σχέση 4.9 υπολογίζεται η τάση ανά σπείρα και στην συνέχεια με την σχέση 4.10 υπολογίζεται ο αριθμός των σπειρών για το δευτερεύον και το βοηθητικό τύλιγμα.[20]

$$V_{turn} = \frac{V_{pri}}{N_{pri}} = \frac{310}{102} = 3.039 \frac{V}{turn} \quad (4.9)$$

$$N_{sec} = \frac{V_{out}}{V_{turn}} = \frac{8}{3.039} = 2.632 \approx 3 \quad N_{AUX} = \frac{V_{AUX}}{V_{turn}} = \frac{15}{3.039} \approx 5 \quad (4.10)$$

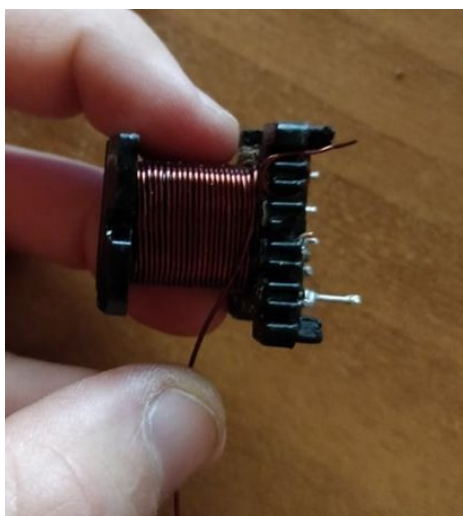
Οι θεωρητικοί υπολογισμοί μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα τιμές με δεκαδικά όμως στην πράξη ο αριθμός των σπειρών δεν μπορεί να μην είναι ακέραιος αριθμός. Επιλέγεται ο αριθμός των σπειρών που καλύπτει καλύτερα τις ανάγκες της διάταξης και έπειτα στην έξοδο γίνεται η κατάλληλη ρύθμιση. Στην περίπτωση του δευτερεύοντος τυλίγματος το αποτέλεσμα ήταν 2.6 σπείρες. Με την επιλογή των 2 σπειρών θα είχε ως έξοδο ο μετασχηματιστής 6V ενώ με την επιλογή των 3 σπειρών θα έχει 9V. Σαφώς και η επιλογή είναι οι 3 σπείρες. Στο βοηθητικό τύλιγμα με 5 σπείρες δίνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για όλα τα παραπάνω τυλίγματα θα γίνει η χρήση του ίδιου αγωγού από την πίνακα AWG, συγκεκριμένα ο αγωγός #26. Επιλέγεται ο αγωγός αυτός επειδή παρουσιάζει 100% χρήση της διατομής του στην συχνότητα των 107 kHz οπότε και είναι ο κατάλληλος για την εφαρμογή. Στο πρωτεύον τύλιγμα θα μπορούσε να γίνει χρήση και του #27 αγωγού σε περίπτωση που ο διαθέσιμος χώρος παραθύρου ήταν περισσότερο περιορισμένος, για την εξοικονόμηση χώρου. Στο πρωτεύον τύλιγμα θα πρέπει να υπολογιστεί η τιμή της έντασης του ρεύματος. Αυτός ο υπολογισμός θα γίνει με την σχέση 4.11. [20]

$$I_{pri} = \frac{P_{pri}}{V_{pri}} = \frac{(P_{out} \cdot 1.1)}{310} = \frac{26.4}{310} = 0.085 A \quad (4.11)$$

Οι απαιτήσεις έντασης ρεύματος στο πρωτεύον είναι χαμηλές σε σχέση με τα υπόλοιπα τυλίγματα. Ο αγωγός που επιλέχθηκε μπορεί να υποστηρίξει 0.36A. Γνωρίζοντας την διατομή του αγωγού και τον αριθμό των σπειρών όπως και το μήκος της μπομπίνας, μπορεί να υπολογιστεί και ο χώρος που θα χρειαστεί το πρωτεύον τύλιγμα. Με μια απλή διαίρεση του μήκους της μπομπίνας με την διάμετρο του αγωγού υπολογίζεται ο αριθμός σπειρών που χωράει η κάθε στρώση. Στην συνέχεια πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των απαιτούμενων στρώσεων με την διάμετρο του αγωγού μπορεί να υπολογιστεί το συνολικό πάχος του πρώτου τυλίγματος και αυτό θα είναι 1.65mm. Για το δευτερεύον τύλιγμα χρειάζονται μόλις 3 σπείρες. Αυτές οι 3 όμως σπείρες θα πρέπει να μπορούν να υποστηρίξουν εντάσεις ρεύματος της τάξεως των 3A. Όπως προαναφέρθηκε, ο αγωγός μπορεί να υποστηρίξει μόλις 0.36A, αυτό σημαίνει πως θα πρέπει να γίνει χρήση περισσότερων από ένα, με παράλληλη συνδεσμολογία. Ο αριθμός των απαραίτητων αγωγών υπολογίζεται με την διαίρεση της έντασης του ρεύματος στην έξοδο ως προς την ένταση του ρεύματος που μπορεί να λειτουργήσει ο αγωγός. Το αποτέλεσμα της διαίρεσης είναι 8.3, θα γίνει χρήση 9 αγωγών για την εξασφάλιση της επαρκούς ανοχής της έντασης του ρεύματος εξόδου. Ο υπολογισμός του πάχους του δευτερεύοντος γίνεται με τον πολλαπλασιασμό των παράλληλων αγωγών και με την διάμετρο τους, δίνοντας ως αποτέλεσμα 3.6mm. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για το βοηθητικό τύλιγμα, με την απαιτούμενη χρήση 3 παράλληλων αγωγών και συνολικού πάχους τυλίγματος 1.2 mm. Το συνολικό πάχος όλων των τυλιγμάτων φτάνει ιδανικά τα 6.45mm όμως πρακτικά ανάμεσα στα τυλίγματα και στις στρώσεις τοποθετείται μονωτικό υλικό για την αποφυγή τόξων τάσης. Στον πυρήνα που είναι διαθέσιμος ο χώρος παραθύρου είναι 10mm, οπότε τα τυλίγματα θα χωρέσουν κανονικά.[20].

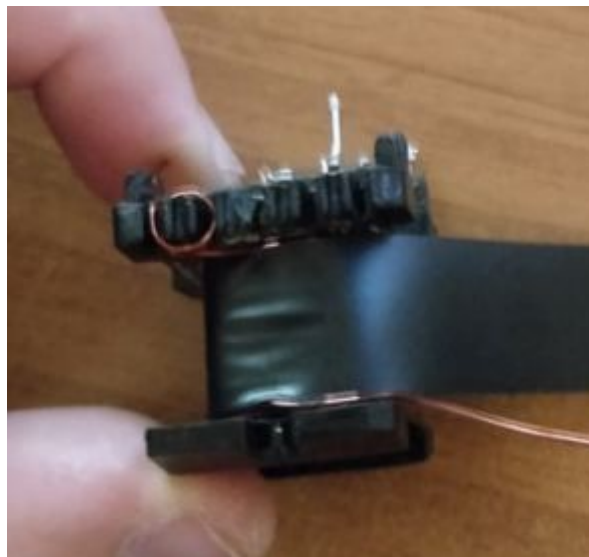
#### 4.5 Πρακτική σχεδίαση μετασχηματιστή για παλμοτροφοδοτικό πλήρους γέφυρας

Έχοντας πλέον αποκτήσει το θεωρητικό υπόβαθρο και με την μελέτη του προϊόντος έτοιμη, μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία περιέλιξης του μαγνητικού στοιχείου. Το πρωτεύον τύλιγμα θα τυλιχτεί πρώτο. Η διαδικασία του τυλίγματος με κοινού τύπου αγωγό είναι τόσο απλή όσο ακούγεται, πρέπει όμως να γίνει προσπάθεια σωστής κατάτμησης των σπειρών κατά μήκος της μπομπίνας.



Σχήμα 4.7 Πρώτη στρώση πρωτεύοντος τυλίγματος

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7, οι σπείρες δεν πρέπει να περιπλέκονται μεταξύ τους, επιτρέποντας το μικρότερο δυνατό κενό να τις χωρίζει. Να σημειωθεί πως ο αγωγός έχει μια στρώση από μονωτικό υλικό οπότε και δεν υπάρχει επαφή μεταξύ του χαλκού των σπειρών. Επίσης σημαντική σημείωση είναι πως κατά την περιέλιξη είναι σημαντικό να υπάρχει κάποιο σημάδι το οποίο να υποδηλώνει την αρχή και το τέλος του τυλίγματος, για να μην υπάρχει αμφιβολία για τον αριθμό σπειρών στο τέλος. Έπειτα από κάθε στρώση είναι απαραίτητη η χρήση μονωτικού υλικού, κατά προτίμηση ταινία πολυμιδίου, για την αντίσταση στην θερμοκρασία που παρουσιάζει. Το μονωτικό υλικό είναι απαραίτητο τόσο ανάμεσα στις στρώσεις των τυλιγμάτων όσο και μεταξύ των ίδιων των τυλιγμάτων. Στην προκειμένη περίπτωση έγινε χρήση ηλεκτροταινίας ανθεκτικής στην θερμοκρασία, σχήμα 4.8. Σε εφαρμογές όπου οι ενεργειακές ανάγκες είναι ανώτερες από τις συμβιβασμούς δεν είναι αποδεκτός για τον πιθανό κίνδυνο αυτοανάφλεξης της ταινίας. [21]



Σχήμα 4.8 Μόνωση μεταξύ στρώσεων.

Αφότου τυλιχτεί και μονωθεί το πρωτεύον τύλιγμα είναι η στιγμή να αναπτυχθεί το δευτερεύον. Λόγω της ανάγκης υποστήριξης μεγαλύτερης έντασης ρεύματος από το πρωτεύον, γίνεται η χρήση του ίδιου αγωγού όμως με την διαφορά πως θα έχει 9 τμήματα ίσα και παράλληλα μεταξύ τους. Έτσι θα γίνει ο διαμοιρασμός της έντασης του ρεύματος για να λειτουργήσει το στοιχείο. Τα 9 τμήματα θα περιελιχτούν μεταξύ τους όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9. Αυτό συμβαίνει για την μείωση του φαινομένου γειτνίασης, θυσιάζοντας όμως πολύτιμο χώρο από τον διαθέσιμο χώρο παραθύρου. Η περιέλιξη του δευτερεύοντος ξεκινάει από την απέναντι πλευρά της μπομπίνας όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10. Η φορά με την οποία θα περιελιχτεί είναι ανάλογη με τις βούλες που φαίνονται στο σχηματικό του μετασχηματιστή. Συμβολίζει την πολικότητα με την οποία θα μετατραπεί η μαγνητική ενέργεια στην έξοδο του.



Σχήμα 4.9 Δευτερεύον τύλιγμα.

Για τον υπολογισμό του μήκους των τμημάτων αγωγού χρειάζεται απλά η μέτρηση των διαστάσεων της μπομπίνας με το υπάρχον τύλιγμα και έπειτα ο πολλαπλασιασμός με τον αριθμό σπειρών. Με τον αγωγό έτοιμο η περιέλιξη είναι εξίσου απλή με το πρωτεύον.



Σχήμα 4.10 Περιέλιξη δευτερεύοντος τυλίγματος.

Με την ολοκλήρωση της περιέλιξης θα πρέπει να προστεθεί μια στρώση καλάι στις άκρες των τυλιγμάτων του αγωγού. Αυτό μπορεί να προβεί πιο δύσκολο από ότι ακούγεται λόγω του μονωτικού υλικού που περιβάλλει τον αγωγό. Με την χρήση γυαλόχαρτου και υπομονής γίνεται η αφαίρεση του και έπειτα μπορεί να προστεθεί το καλάι. Τέλος, ο πυρήνας θα εισαχθεί στην θέση του και θα στερεωθεί επίσης με ηλεκτροταινία για την ολοκλήρωση του στοιχείου, σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11 Τελικό προϊόν.

## Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

Τα συμπεράσματα μου μετά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας είναι πως η σχεδίαση μαγνητικών υλικών είναι μια πολύ επίπονη διαδικασία ειδικά χωρίς την χρήση προγραμμάτων σχεδίασης και τρέφω μεγάλο σεβασμό για τους πρωτοπόρους του τομέα. Τα υλικά τόσο των πυρήνων όσο και των τυλιγμάτων ποικίλουν πολύ και οι πολλές διαφορετικές παράμετροι που συμβάλουν παράλληλα στο τελικό αποτέλεσμα καθιστούν την σχεδίαση ένα πολύπλοκο πρόβλημα. Η κατάλληλη σχεδίαση αποτελεί κατά κόρο την ποιότητα του τελικού προϊόντος και βασικό κριτήριο είναι ο καλός βαθμός απόδοσης. Ένα άλλο συμπέρασμα είναι πως υπάρχουν πολλές διαφορετικές τοπολογίες και ο σχεδιασμός των μαγνητικών υλικών μπορεί να διαφέρει από διάταξη σε διάταξη. Οπότε οι γνώσεις που πρέπει να κατέχει ένας σχεδιαστής είναι πολύ περισσότερες από απλά τα βασικά του ηλεκτρομαγνητισμού και των ηλεκτρονικών ισχύος. Με το πείραμα που έγινε πάνω στην επιρροή των διαφορετικών υλικών και γεωμετριών των πηνίων στους μετατροπείς buck, κατάλαβα πως το πηνίο που φαίνεται απλό στην όψη και ακόμη πιο απλό στην περιέλιξη κρύβει από πίσω του πολύ πιο σύνθετη σκέψη και υλοποίηση. Τέλος, το πιο δυνατό συμπέρασμα που βγήκε από την παραπάνω εργασία είναι πως με όλο τον χρόνο που αφιέρωσα και τα άρθρα που διάβασα και μετέφρασα και ενέταξα στην παρούσα εργασία, έχω μόνο αναλύσει και παρουσιάσει ένα πολύ μικρό μέρος του τομέα. Στο μέλλον, μια βελτίωση που θα ήθελα να δω στην εργασία αυτή θα ήταν ο έλεγχος λειτουργίας του μετασχηματιστή του τελευταίου κεφαλαίου με την χρήση μιας ολοκληρωμένης διάταξης μετατροπέα πλήρους γέφυρας ίσως και η ανάπτυξη κάποιου προγράμματος μοντελοποίησης για έναν μετασχηματιστή κάποιας συγκεκριμένης διάταξης.

## Βιβλιογραφία

- [1] Κιοσκερίδης Ιορδάνης, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα: Εκδόσεις Τζιόλα, 2008
- [2] American Custom Magnetics Designer, Custom Coils and Transformers, 2021. [Online]. Available: <http://www.customcoils.com>.
- [3] American Lead Magnetic Components Manufacturer, MPS Industries, 2021. [Online] Available: <http://www.mpsind.com>.
- [4] Στυλιανός Φραγκόπουλος, Ευάγγελος Βαλαμόντες, *Βασική Ηλεκτροτεχνία II, ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ*, Ελλάδα, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, 2005.
- [5] Αργύρης Σ. Βατάλης, *Επιστήμη & Τεχνολογία Υλικών*, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2009.
- [6] Online Encyclopedia, Wikipedia, 2021. [Online]. Available: <http://www.wikipedia.com>.
- [7] Resource Dedicated Site, Components101, 2021 [Online]. Available: <http://www.componets101.com> .
- [8] Παντελής Β. Μαλατέστας, *Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα. Εκδόσεις Τζιόλα 2015.
- [9] Electronics Forum, Transformer Magazine, 2021 [Online]. Available: [transformers-magazine.com](http://transformers-magazine.com).
- [10] Δήμητρα Παναγοπούλου, Γεώργιος Δημητρακάκης, *Μελέτη Μαγνητικών Στοιχείων για Εφαρμογές Ηλεκτρονικών Ισχύος*, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Πάτρα 2016.
- [11] Magnetics, *Ferrite Cores 2013 Catalog*, datasheet 2013.
- [12] Arthur Williams, *Fyndamentals of Magnetics Design: Inductors and Transformers*, Telebyte inc. September 2011.
- [13] Dr. Ray Ridley, *Proximity Loss in Magnetics Windings*, Switching Power Magazine, 2005.
- [14] Dr. Ray Ridley, *Magnetics Proximity Loss Models*, Ridley Engineering, Webinar August 2020.
- [15] Inductor researching site, coil32, 2021 [Online]. Available: [www.coil32.net](http://www.coil32.net)
- [16] Electrical and electronic engineering site, 2021 [Online]. Available: [www.electronicclinic.com](http://www.electronicclinic.com)
- [17] Sam Ben-Yaakov, *Control Design of PWM Converters: The user friendly approach*, Power electronics technologies conference Long beach CA, October 2006.
- [18] Leading semiconductor company MPS site, 2021. Available: [www.monolithicpower.com](http://www.monolithicpower.com)
- [19] Leading ferrite manufacturer Ferroxcube, site 2021. Available: [www.ferroxcube.com](http://www.ferroxcube.com)
- [20] Electronics blog, site, 2021. Available: [www.elcircuit.com](http://www.elcircuit.com)
- [21] Manufacturer company 3M, site 2021. Available: [www.3mhellas.gr](http://www.3mhellas.gr)