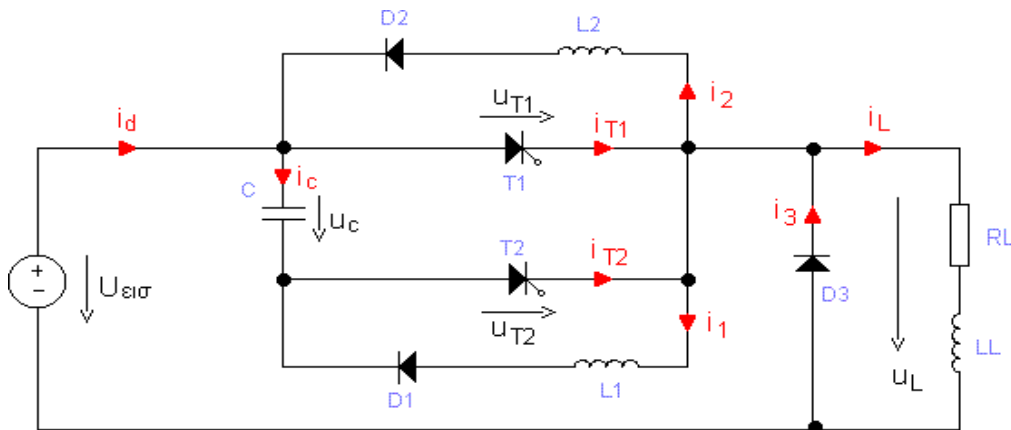


ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

1508

Μελέτη των μαγνητικών στοιχείων για εφαρμογές
ηλεκτρονικών ισχύος



ΔΗΜΗΤΡΑ ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΥ (5589)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΑΚΑΚΗΣ

Πρόλογος / Περίληψη

Στην πλειονότητά τους οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος περιέχουν παθητικά στοιχεία (πηνία – μετασχηματιστές – πυκνωτές) τα οποία κατά περίπτωση εξυπηρετούν διάφορους σκοπούς, όπως το φιλτράρισμα των αρμονικών τάσης / ρεύματος ή τη μεταβολή του επιπέδου μιας τάσης και τη μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος μέσω ηλεκτρικής απομόνωσης. Ο πρώτος σκοπός εξυπηρετείται μέσω της ικανότητας των πυκνωτών και των πηνίων για αποθήκευση ενέργειας (υπό μορφή ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα), ενώ ο δεύτερος χάρη σε δύο βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού, της δημιουργίας δηλαδή μαγνητικού πεδίου από ένα ηλεκτρικό ρεύμα και της δημιουργίας ηλεκτρικού πεδίου από ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Σε μια άλλη εφαρμογή των παθητικών στοιχείων, αυτά χρησιμοποιούνται για να προστατέψουν τα διακοπτικά στοιχεία από αιχμές τάσης ή ρεύματος και για την αποφυγή υπερθέρμανσης – καταστροφής τους.

Τα παθητικά στοιχεία καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό παραμέτρους των μετατροπέων, όπως είναι το βάρος, ο όγκος και το κόστος. Όσον αφορά τους πυκνωτές ενδιαφέρουν χαρακτηριστικά τους, όπως είναι το μέγεθος, η χωρητικότητα και η αντοχή τους σε τάσεις, αλλά εξίσου σημαντικά στοιχεία αποτελούν οι παρασιτικές επαγωγές και αντιστάσεις τους. Τα παρασιτικά αυτά στοιχεία συνήθως έχουν μικρές τιμές, ενώ ειδικότερα οι απώλειες λόγω ωμικής αντίστασης στη ροή του ρεύματος είναι τόσο μικρές σε έναν πυκνωτή ώστε συνήθως να θεωρούνται αμελητέες. Βέβαια, παρά τις μικρές τιμές τους, σε κάποιες περιπτώσεις τα παρασιτικά στοιχεία των πυκνωτών έχουν σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά λειτουργίας των μετατροπέων, όπως για παράδειγμα στο πλάτος της κυμάτωσης της τάσης εξόδου των παλμοτροφοδοτικών.

Δεν ισχύουν τα ίδια όμως και για τα μαγνητικά στοιχεία τα οποία, μαζί και με τα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία, αποτελούν τους βασικότερους παράγοντες απωλειών ισχύος σε ένα μετατροπέα. Η ανάπτυξη θερμότητας στα μαγνητικά στοιχεία, οφείλεται τόσο στις ωμικές απώλειες που εμφανίζονται στα τυλίγματα (απώλειες χαλκού) όσο και στις απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων που εμφανίζονται στους μαγνητικούς πυρήνες τους (απώλειες πυρήνα).

Περιεχόμενα

Πρόλογος / Περίληψη.....	iii
Περιεχόμενα.....	v
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή – Στόχοι.....	1
Κεφάλαιο 2. Πηνία.....	3
2.1. Εισαγωγή.....	3
2.2. Χρήση των πηνίων στους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος.....	3
2.2.1 Φίλτρα εξομάλυνσης – στραγγαλιστικά πηνία.....	3
2.2.2. Προστασία διακοπτικών στοιχείων από απότομες μεταβολές του ρεύματος.....	7
2.2.3. Κυκλώματα σβέσης θυρίστορ.....	9
2.2.4. Μετατροπείς συντονισμού και ημισυντονισμού.....	10
2.2.5. Ισοκαταμερισμός ρευμάτων.....	13
2.3. Μετασχηματιστές στα ηλεκτρονικά ισχύος.....	13
Κεφάλαιο 3. Απώλειες ισχύος στα μαγνητικά υλικά.....	15
3.1. Εισαγωγή.....	15
3.2. Το επιδερμικό φαινόμενο σε απομονωμένο ρευματοφόρο αγωγό.....	15
3.3. Το φαινόμενο γεινίασης.....	17
3.4. Μοντέλα περιγραφής των απωλειών χαλκού.....	19
3.5. Γενικά για τις απώλειες πυρήνα.....	22
3.6. Μαγνητική υστέρηση.....	22
3.7. Η μαγνητική υστέρηση σε υψηλές συχνότητες.....	26
3.8. Μαγνητικά υλικά – φερρίτες.....	28
3.9. Μοντέλα για τις απώλειες υστέρησης υψηλών συχνοτήτων.....	30
3.10. Απώλειες δινορρευμάτων – εκφράσεις για τις συνολικές απώλειες του πυρήνα.....	33
Κεφάλαιο 4. Σχεδίαση - κατασκευή μαγνητικών στοιχείων.....	37
4.1. Γενικά για τη σχεδίαση μαγνητικών στοιχείων.....	37
4.2. Επίπεδα μαγνητικά στοιχεία με τυλίγματα τυπωμένου κυκλώματος.....	38
4.3. Βέλτιστος σχεδιασμός μαγνητικών στοιχείων.....	41
4.4. Ροή σκέδασης σε ένα μετασχηματιστή, διαγράμματα ΜΕΔ.....	46
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα.....	51
Βιβλιογραφία.....	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή - Στόχοι

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως για παράδειγμα η τροφοδοσία με ισχύ των ηλεκτρονικών διατάξεων, μονάδων ηλεκτροσυγκόλλησης και ηλεκτρόλυσης, ο ρυθμιζόμενος φωτισμός, η θέρμανση, η ψύξη, ο κλιματισμός, η ρύθμιση στροφών κινητηρίων συστημάτων κ.α. Κατά την ανάπτυξη αυτών των μετατροπέων δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε θέματα, όπως η αύξηση της απόδοσης, της αξιοπιστίας και της διάρκειας ζωής, η μείωση του κόστους, του όγκου και του βάρους, η βελτίωση του συντελεστή ισχύος, η ελαχιστοποίηση του αρμονικού θορύβου που διοχετεύεται προς το δίκτυο τροφοδοσίας, ο περιορισμός των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών προς το περιβάλλον, η ευκολία στη δημιουργία γραμμής παραγωγής κ.α.

Στην πλειονότητά τους οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος περιέχουν παθητικά στοιχεία (πηνία – μετασχηματιστές – πυκνωτές) τα οποία κατά περίπτωση εξυπηρετούν διάφορους σκοπούς, όπως το φιλτράρισμα των αρμονικών τάσης ή ρεύματος (τόσο προς την έξοδο του μετατροπέα, όσο και προς το δίκτυο τροφοδοσίας) ή τη μεταβολή του επιπέδου μιας τάσης και τη μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος μέσω ηλεκτρικής απομόνωσης. Ο πρώτος σκοπός εξυπηρετείται μέσω της ικανότητας των πυκνωτών και των πηνίων για αποθήκευση ενέργειας (υπό μορφή ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα), ενώ ο δεύτερος χάρη σε δύο βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού, της δημιουργίας δηλαδή μαγνητικού πεδίου από ένα ηλεκτρικό ρεύμα και της δημιουργίας ηλεκτρικού πεδίου από ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Σε μια άλλη εφαρμογή των παθητικών στοιχείων, αυτά χρησιμοποιούνται για να προστατέψουν τα διακοπτικά στοιχεία από αιχμές ή απότομες μεταβολές της τάσης ή του ρεύματος και για την αποφυγή υπερθέρμανσής τους.

Τα παθητικά στοιχεία καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό παραμέτρους των μετατροπέων, όπως είναι το βάρος, ο όγκος και το κόστος. Ειδικά για τα δύο πρώτα, ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι το σύστημα ψύξης του μετατροπέα.

Όσον αφορά τους πυκνωτές, ενδιαφέρουν χαρακτηριστικά τους, όπως είναι το μέγεθος, η χωρητικότητα και η αντοχή τους σε τάσεις, αλλά εξίσου σημαντικά στοιχεία αποτελούν οι παρασιτικές επαγωγές (ESL – Equivalent Series Inductance) και αντιστάσεις τους (ESR – Equivalent Series Resistance). Τα παρασιτικά αυτά στοιχεία συνήθως έχουν μικρές τιμές, ενώ ειδικότερα οι απώλειες λόγω ωμικής αντίστασης στη ροή του ρεύματος είναι τόσο μικρές σε έναν πυκνωτή, ώστε συνήθως να θεωρούνται αμελητέες. Βέβαια, παρά τις μικρές τιμές τους, σε κάποιες περιπτώσεις τα παρασιτικά στοιχεία των πυκνωτών έχουν σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά λειτουργίας των μετατροπέων, όπως για παράδειγμα στο πλάτος της κυμάτωσης της τάσης εξόδου των παλμοτροφοδοτικών και στην εμφάνιση ανεπιθύμητων ταλαντώσεων στην τάση ή στο ρεύμα.

Δεν ισχύουν τα ίδια όμως και για τα μαγνητικά στοιχεία (πηνία – μετασχηματιστές) τα οποία, μαζί και με τα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία, αποτελούν τους βασικότερους παράγοντες απωλειών ισχύος σε ένα μετατροπέα. Η ανάπτυξη θερμότητας στα μαγνητικά στοιχεία, οφείλεται τόσο στις ωμικές απώλειες που εμφανίζονται στα τυλίγματα (λέγονται αλλιώς και απώλειες χαλκού) όσο και στις απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων που εμφανίζονται στους μαγνητικούς πυρήνες τους (απώλειες πυρήνα).

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η συνοπτική περιγραφή – διερεύνηση των θεμάτων που αφορούν τη χρήση μαγνητικών στοιχείων στα κυκλώματα ισχύος των μετατροπέων

ηλεκτρονικών ισχύος (όχι στα ηλεκτρονικά κυκλώματα παλμοδότησης), με τη φιλοδοξία να αποτελέσει έναν ευανάγνωστο οδηγό για τους νεοφώτιστους τεχνολόγους ηλεκτρολόγους.

- Στο Κεφ. 2 της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται οι βασικές εφαρμογές πηνίων και μετασχηματιστών στα ηλεκτρονικά ισχύος.
- Στο Κεφ. 3 περιγράφονται οι μηχανισμοί εμφάνισης απωλειών στα μαγνητικά στοιχεία και παρατίθενται κάποιοι τρόποι ώστε αυτές να υπολογίζονται, ώστε να μπορούν να ληφθούν υπόψη κατά τη φάση σχεδιασμού.
- Στο Κεφ. 4 παρουσιάζονται οι βασικές αρχές βέλτιστου σχεδιασμού των μαγνητικών στοιχείων.
- Τέλος, στο Κεφ. 5 παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και γίνεται αναφορά σε πιθανά αντικείμενα εργασιών με παραπλήσια θεματολογία.

Σωστό είναι να τονιστεί σε αυτό το σημείο πως η παρούσα εργασία δεν αποτελεί προϊόν πρωτότυπης ερευνητικής δράσης, παρά μόνο μελέτης της ελληνικής και διεθνούς βιβλιογραφίας και σε καμία περίπτωση δεν έχει ως στόχο να υποκαταστήσει πρωτότυπες επιστημονικές δημοσιεύσει πάνω στα σχετικά θέματα. Τελικός σκοπός της βιβλιογραφικής μελέτης, της συμπύκνωσης και της ταξινόμησης του υλικού που προέκυψε είναι η διευκόλυνση του τεχνολόγου ηλεκτρολόγου στο να αντλήσει πληροφορίες, των οποίων η αναζήτηση θα απαιτούσε μεγάλο χρόνο, καθώς και η ερμηνεία – απλούστευση κάποιων εννοιών για την ευκολότερη κατανόησή τους, με την ελπίδα πως δεν έχει γίνει κάποιο επιστημονικό λάθος σε αυτή τη διαδικασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Πηνία

2.1. Εισαγωγή

Η ροή ηλεκτρικού ρεύματος έντασης i σε έναν αγωγό δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Για τη δημιουργία του πεδίου αυτού έχει καταναλωθεί έργο από την πηγή τάσης ή το οποιοδήποτε άλλο αίτιο προκαλεί τη ροή ρεύματος, με αποτέλεσμα η ύπαρξη μαγνητικού πεδίου στο χώρο να συνεπάγεται την ύπαρξη αποθηκευμένης ενέργειας σε αυτό. Η αποθηκευμένη στο πεδίο ενέργεια E είναι ανάλογη του τετραγώνου της έντασης του ρεύματος. Ο συντελεστής αναλογίας L ονομάζεται αυτεπαγωγή του αγωγού (μονάδα μέτρησης: H) και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού (μήκος, διατομή, ανάπτυγμα στο χώρο) και τις μαγνητικές ιδιότητες (μαγνητική διαπερατότητα) του αγωγού και του περιβάλλοντα χώρου (όπου δηλαδή αναπτύσσεται το πεδίο). Ο όρος «αυτεπαγωγή» ή «συντελεστής αυτεπαγωγής» χρησιμοποιείται για να γίνεται διάκριση με τον συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής στην περίπτωση που αναλύονται μαγνητικά συζευγμένα πηνία, αν όμως δεν υπάρχει περίπτωση τέτοιας σύγχυσης χρησιμοποιείται και ο απλούστερος όρος «επαγωγή».

Με βάση τη διατύπωση που έγινε στο Κεφ. 1, ότι δηλαδή βασικό χαρακτηριστικό ενός πηνίου είναι η αποθήκευση ενέργειας όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα, ο κάθε αγωγός μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πηνίο. Πρακτικά όμως, πηνία ονομάζουμε τις διατάξεις εκείνες στις οποίες έχουμε εφαρμόσει κάποια τεχνική προκειμένου να αυξήσουμε το L του αγωγού σε επιθυμητές τιμές, χωρίς οι διαστάσεις να γίνουν εξωπραγματικές. Οι δυο βασικοί τρόποι να το πετύχουμε αυτό είναι να δημιουργήσουμε τύλιγμα πολλών σπειρών ή/και να κάνουμε χρήση μαγνητικού υλικού για τον περιβάλλοντα χώρο.

Αγνοώντας σε πρώτη φάση την ωμική αντίσταση του τυλίγματος ενός πηνίου, οι βασικές σχέσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του είναι οι εξής:

$$E = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2.1)$$

$$V_L = -L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

$$L \sim \frac{\partial B}{\partial H} \quad (2.3)$$

όπου V_L είναι η τάση στα άκρα του πηνίου, H η ένταση του μαγνητικού πεδίου (είναι ανάλογη της έντασης i του ηλεκτρικού ρεύματος) και B η μαγνητική επαγωγή.

Για την πρώτη σχέση μιλήσαμε ήδη πιο πάνω. Η δεύτερη σχέση μας λέει ότι στα άκρα ενός πηνίου αναπτύσσεται τάση ανάλογη της χρονικής παραγωγού του ρεύματος και μάλιστα με τέτοια πολικότητα που να αντιτίθεται στην μεταβολή του ρεύματος (νόμος του Lenz). Με άλλα λόγια, λαμβάνοντας υπόψη τις δυο αυτές σχέσεις, το πηνίο εμποδίζει τη ροή του

ρεύματος όταν αυτό αυξάνεται, αποθηκεύοντας παράλληλα ενέργεια μαγνητικού πεδίου, ενώ βοηθάει τη ροή του ρεύματος όταν αυτό μειώνεται, αποδίδοντας πίσω στο κύκλωμα μέρος τις προηγουμένως αποθηκευθείσας ενέργειας. Συνεπεία αυτής τους της ιδιότητας, τα πηνία συνδέονται σε σειρά με κυκλώματα στα οποία επιθυμούμε να εξομαλύνουμε την κυματομορφή του ρεύματος, δηλαδή επιθυμούμε να απαλείψουμε τις απότομες μεταβολές στη ροή του ρεύματος.

Από τη σχέση (2.2) μπορούν επίσης να εξαχθούν δύο ακόμα σημαντικά συμπεράσματα. Το ένα είναι πως αν επιχειρήσουμε μια εξαιρετικά απότομη διακοπή του ρεύματος θα αναπτυχθεί μια εξαιρετικά μεγάλη τάση στα άκρα του πηνίου, ενώ το άλλο είναι πως αν έχουμε π.χ. ημιτονοειδές ρεύμα θα έχουμε και ημιτονοειδή τάση στο πηνίο και μάλιστα με 90° προήγηση της κυματομορφής της τάσης σε σχέση με εκείνη του ρεύματος.

Αν λάβουμε υπόψη την ωμική αντίσταση R_L του τυλίγματος του πηνίου, στο β' μέλος της (2.2) πρέπει να προστεθεί ο όρος $-iR_L$.

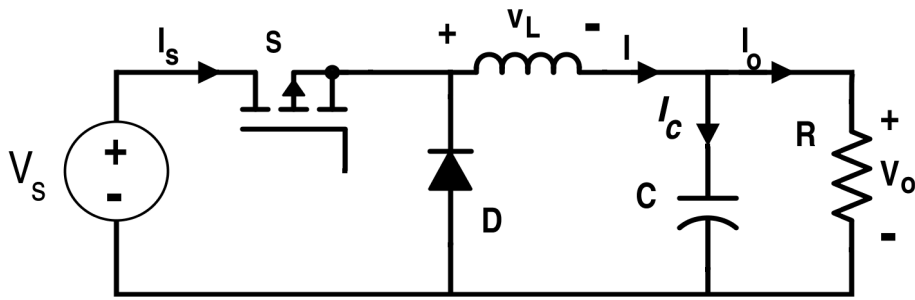
Τέλος, η σχέση (2.3) δηλώνει πως η επαγωγή ενός πηνίου δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το επίπεδο μαγνήτισης του μαγνητικού υλικού που χρησιμοποιείται για την αύξηση του L (π.χ. σίδηρος ή κάποιος τύπος φερρίτη). Ως γνωστόν, η σχέση $H-B$ σε ένα μαγνητικό υλικό είναι μη γραμμική (θα γίνει σχετική αναφορά στα επόμενα), οπότε και η ποσότητα $\partial B/\partial H$ μεταβάλλεται (βλ. και Παρ. 3.6, εξ. 3.11).

2.2. Χρήση των πηνίων στους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος

2.2.1. Φίλτρα εξομάλυνσης – στραγγαλιστικά πηνία

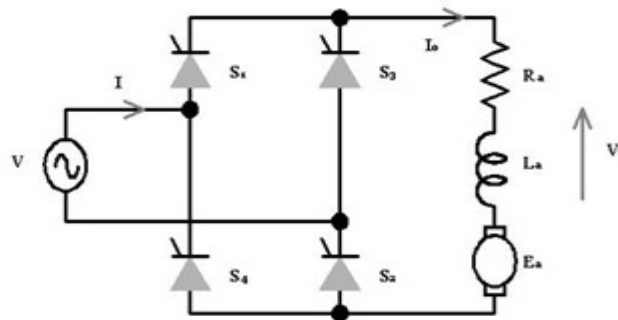
Αναμφίβολα η σπουδαιότερη εφαρμογή των πηνίων στα ηλεκτρονικά ισχύος είναι στις περιπτώσεις που είτε στην είσοδο, είτε στην έξοδο ενός μετατροπέα απαιτείται η κατά το δυνατόν συνεχής και ομαλή/σταθερή ροή ρεύματος. Η διακοπτική λειτουργία των ημιαγωγικών στοιχείων σε ένα μετατροπέα έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία παλμικών ρευμάτων τα οποία με τη σειρά τους δίνουν παλμικό χαρακτήρα στα ρεύματα που παρατηρούνται σε αμφότερες τις πλευρές του μετατροπέα, αλλά και στην τάση εξόδου, καθώς και στην τάση τροφοδοσίας αν ληφθεί υπόψη η εσωτερική εμπέδηση της πηγής. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με πηνία αν ενδιαφέρει η εξομάλυνση του ρεύματος και με πυκνωτές αν ενδιαφέρει η εξομάλυνση της τάσης, ενώ θα τα δούμε και τα δυο μαζί σε ένα L-C φίλτρο αν τόσο το ρεύμα όσο και η τάση είναι μεγέθη που ενδιαφερόμαστε να διατηρήσουμε σταθερά ή ημιτονοειδή, απαλλαγμένα από αρμονικές. Η εξομάλυνση της κυματομορφής του ρεύματος με τη βοήθεια ενός πηνίου ποτέ δεν είναι απόλυτη, είναι όμως τόσο καλύτερη όσο μεγαλύτερο είναι το L και φροντίζουμε αυτό να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε η εναπομείνασα διακύμανση (κυμάτωση) του ρεύματος να θεωρείται αποδεκτή για την εκάστοτε εφαρμογή.

Στα ακόλουθες εικόνες βρίσκονται τα σχηματικά διαγράμματα κάποιων μετατροπέων που εμπεριέχουν πηνία.



Σχήμα 2.1: Μετατροπέας τύπου Buck

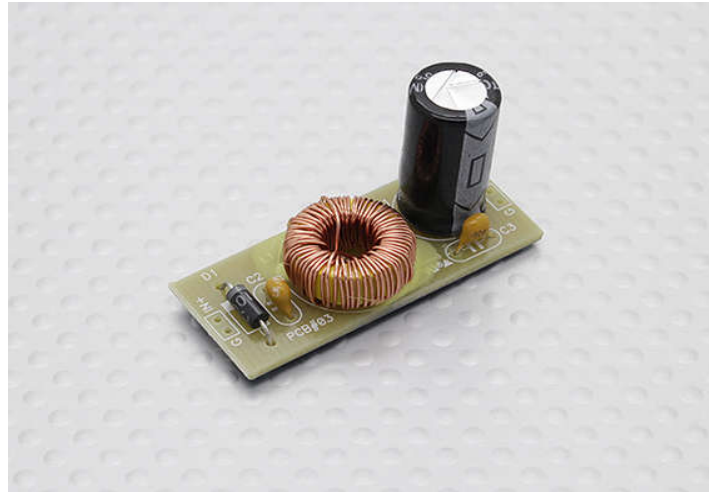
Στο Σχ. 2.1 φαίνεται ένας μετατροπέας DC-DC υποβιβασμού της τάσης τύπου Buck, με φίλτρο L-C για εξομάλυνση της κυματομορφής εξόδου.



Σχήμα 2.2: Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα για τον έλεγχο στροφών ενός DC κινητήρα. Με L_a και R_a συμβολίζονται η συνολική επαγωγή και αντίσταση στο κύκλωμα τυμπάνου (τυλιγμάτων και εξωτερικού πηνίου, αν υπάρχει).

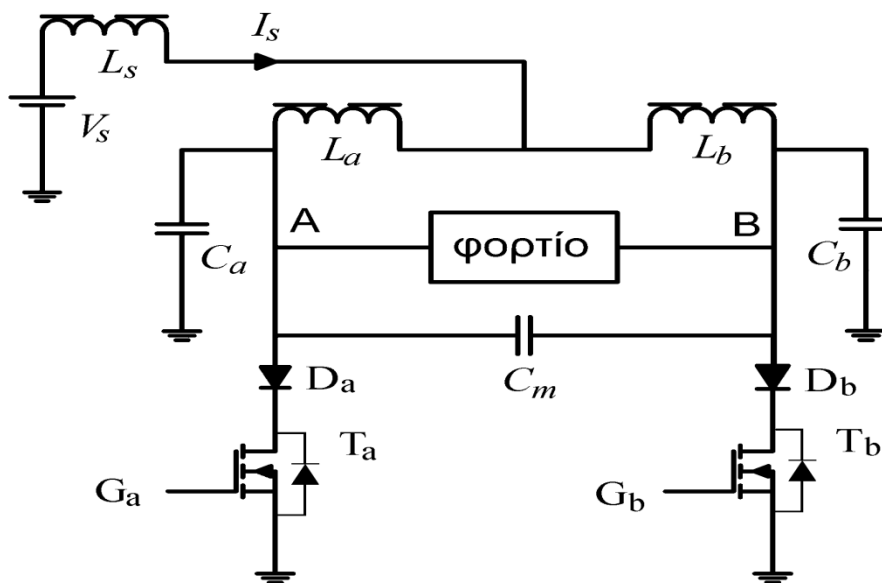
Στο Σχ. 2.2 απεικονίζεται ένας ανορθωτής τεσσάρων θυρίστορ με πηνίο στην έξοδο για τη διατήρηση σταθερού ρεύματος προς τον DC κινητήρα που αποτελεί το φορτίο.

Μερικές φορές, η επαγωγή του φορτίου, όπως είναι το τύλιγμα τυμπάνου του κινητήρα στην περίπτωση του Σχ. 2.2, είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μην απαιτείται η επιπλέον σύνδεση πηνίου. Επίσης, αν η επαγωγή είναι αρκετά μικρή, η μεγάλη κυμάτωση στο ρεύμα εξόδου σε κάποιους μετατροπείς μπορεί να σημαίνει διαστήματα μηδενισμού του ρεύματος στο πηνίο. Η λειτουργία σε ασυνεχή αγωγή όπως λέγεται (DCM – Discontinuous Conduction Mode), γενικά δεν είναι επιθυμητή, σε κάποιες περιπτώσεις όμως παρουσιάζει πλεονεκτήματα συγκριτικά με την συνεχή αγωγή (CCM – Continuous Conduction Mode).



Σχήμα 2.3: Φίλτρο L-C.

Σε αντιστοιχία με τα όσα ισχύουν για την έξοδο ενός μετατροπέα, μπορεί να θέλουμε να επέμβουμε βελτιωτικά και στην είσοδό του. Αν για παράδειγμα η τροφοδοσία του μετατροπέα γίνεται από το δίκτυο χαμηλής τάσης, στην είσοδό του θα τοποθετήσουμε πιθανότατα ένα L-C φίλτρο για να έχουμε ημιτονοειδές (ή κατά προσέγγιση ημιτονοειδές) ρεύμα εισόδου και όχι παλμικό, προστατεύοντας έτσι το δίκτυο από αρμονικό θόρυβο (Σχ. 2.3). Σε άλλη περίπτωση ενδέχεται να απαιτείται η τροφοδοσία του μετατροπέα με σταθερό ρεύμα ή, όπως θα το λέγαμε κι αλλιώς, από μια πηγή ρεύματος. Ο απλούστερος τρόπος να δημιουργήσουμε μια πηγή ρεύματος είναι να συνδέσουμε σε σειρά με μια πηγή τάσης μια πολύ μεγάλη επαγωγή. Στο Σχ. 2.4 για παράδειγμα, φαίνεται το σχηματικό ενός μετατροπέα συντονισμού τύπου push-pull, με σταθερό ρεύμα τροφοδοσίας στην είσοδο [9].



Σχήμα 2.4: Σε αυτό το μετατροπέα συντονισμού [9] η πηγή τάσης V_s και η μεγάλη επαγωγή L_s αποτελούν μια πηγή ρεύματος.

Να σημειωθεί πως το «αρκετά μικρή επαγωγή», που αναφέρθηκε παραπάνω, δεν προσδιορίζεται αυτόνομα, αλλά είναι συνάρτηση και της διακοπτικής συχνότητας f του μετατροπέα. Όσο αυξάνεται η f τόσο μικρότερη είναι η τιμή του L που απαιτείται για να επιτευχθούν τα ίδια αποτελέσματα (όσον αφορά π.χ. την κυμάτωση ενός συνεχούς ρεύματος ή την απαλλαγή από αρμονική παραμόρφωση ενός ημιτονοειδούς ρεύματος). Ας μην ξεχνάμε πως το μέτρο της εμπέδησης ενός πηνίου (αρμονική ανάλυση) δίνεται από τη σχέση

$$Z_L = \omega L \quad (2.4)$$

και άρα η εμπέδηση θα παραμείνει η ίδια αν με αύξηση της f κατά έναν οποιοδήποτε παράγοντα μειωθεί το L κατά τον ίδιο παράγοντα. Καθώς τα αντίστοιχα ισχύουν και για τους πυκνωτές, αλλά και για τους μετασχηματιστές, τελικά καταλήγουμε στη διαπίστωση πως όσο μεγαλύτερη η διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα τόσο μικρότερα μπορούν να είναι τα παθητικά στοιχεία και αφού αυτά είναι τα πιο ογκώδη αντικείμενα στο μετατροπέα, με αύξηση της συχνότητας μειώνεται το μέγεθος του μετατροπέα. Ο κανόνας αυτός παύει να ισχύει όταν η συχνότητα αυξάνεται σε τέτοιο βαθμό που οι διακοπτικές απώλειες των ημιαγωγικών στοιχείων γίνονται επικίνδυνα υψηλές ή που το μέγεθος των ψυκτικών συστημάτων γίνεται απαράδεκτα μεγάλο.

2.2.2. Προστασία διακοπτικών στοιχείων από απότομες μεταβολές του ρεύματος

Κάποια ημιαγωγικά στοιχεία είναι ευαίσθητα σε απότομες μεταβολές του ρεύματος ή/και της τάσης. Για τα θυρίστορ ειδικότερα, δίνονται πάντα στο εγχειρίδιο του προϊόντος (data sheet) οι μέγιστες τιμές που μπορούν να λάβουν οι χρονικές παράγωγοι τάσης και ρεύματος χωρίς να κινδυνεύει το στοιχείο με καταστροφή, η οποία συνήθως συνεπάγεται την βραχυκύκλωση και σπανιότερα την ανοιχτοκύκλωσή του. Στο Σχ. 2.5 φαίνεται απόσπασμα από το data sheet του στοιχείου CS-45 της IXYS, στο οποίο αναφέρονται οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές για τα di/dt και dv/dt . Απότομες μεταβολές του ρεύματος του στοιχείου μπορούν να προκύψουν με την έναυσή του αν στην πλευρά της εξόδου υπάρχουν χωρητικότητες, ή αν, εν ώρα αγωγής του στοιχείου, συνδεθεί μια χωρητικότητα.

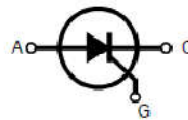
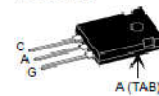
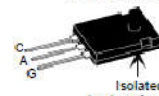
Phase Control Thyristor

$$V_{RRM} = 800-1600 \text{ V}$$

$$I_{T(RMS)} = 75 \text{ A}$$

$$I_{T(AV)M} = 48 \text{ A}$$

V_{RSM}	V_{RRM}	Type
V_{DSM}	V_{DRM}	
V	V	
900	800	CS 45-08io1
1300	1200	CS 45-12io1
1700	1600	CS 45-16io1 CS 45-16io1R


 TO-247 AD
Version io1

 ISOPLUS 247™
Version io1R


* Patent pending
C = Cathode, A = Anode, G = Gate

Symbol	Conditions	Maximum Ratings	
$I_{T(RMS)}$	$T_{VJ} = T_{VJM}$	75	A
$I_{T(AV)M}$	$T_C = 75^\circ\text{C}; 180^\circ \text{ sine}$	48	A
I_{TSM}	$T_{VJ} = 45^\circ\text{C}$	$t = 10 \text{ ms (50 Hz), sine}$	520 A
	$V_R = 0 \text{ V}$	$t = 8.3 \text{ ms (60 Hz), sine}$	560 A
	$T_{VJ} = T_{VJM}$	$t = 10 \text{ ms (50 Hz), sine}$	460 A
	$V_R = 0 \text{ V}$	$t = 8.3 \text{ ms (60 Hz), sine}$	500 A
I^2t	$T_{VJ} = 45^\circ\text{C}$	$t = 10 \text{ ms (50 Hz), sine}$	1350 A ² s
	$V_R = 0 \text{ V}$	$t = 8.3 \text{ ms (60 Hz), sine}$	1300 A ² s
	$T_{VJ} = T_{VJM}$	$t = 10 \text{ ms (50 Hz), sine}$	1050 A ² s
	$V_R = 0 \text{ V}$	$t = 8.3 \text{ ms (60 Hz), sine}$	1030 A ² s
$(di/dt)_{cr}$	$T_{VJ} = T_{VJM}$	repetitive, $I_T = 40 \text{ A}$	150 A/ μs
	$f = 50 \text{ Hz}, t_p = 200 \mu\text{s}$		
	$V_D = 2/3 V_{DRM}$	non repetitive, $I_T = I_{T(AV)M}$	500 A/ μs
	$I_G = 0.3 \text{ A}$		
	$di_G/dt = 0.3 \text{ A}/\mu\text{s}$		
$(dv/dt)_{cr}$	$T_{VJ} = T_{VJM};$	$V_{DR} = 2/3 V_{DRM}$	1000 V/ μs
	$R_{\theta CK} = \infty;$ method 1 (linear voltage rise)		
P_{GM}	$T_{VJ} = T_{VJM}$	$t_p = 30 \mu\text{s}$	10 W
	$I_T = I_{T(AV)M}$	$t_p = 300 \mu\text{s}$	5 W
$P_{G(AV)}$			0.5 W
V_{RGM}			10 V
T_{VJ}		-40...+140	°C
T_{VJM}		140	°C
T_{stg}		-40...+125	°C
M_d	Version io1: mounting torque M3	0.8...1.2	Nm
F_c	Version io1R: mounting force with clip	20...120	N
V_{ISOL}^*	50/60 Hz, RMS, $t = 1 \text{ minute, leads-to-tab}$	2500	V~
Weight		6	g

* Version io1R only

Features

- Thyristor for line frequency
- International standard package JEDEC TO-247
- Planar passivated chip
- Long-term stability of blocking currents and voltages
- Version AR isolated and UL registered E153432
- Epoxy meets UL 94V-0

Applications

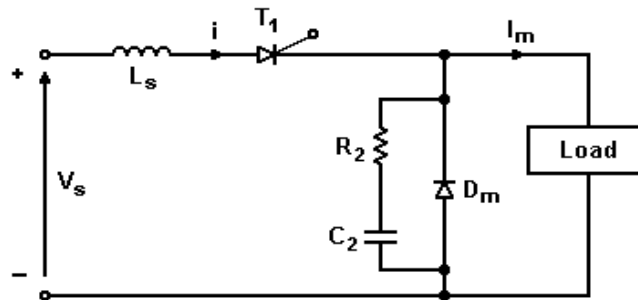
- Motor control
- Power converter
- AC power controller
- Switch-mode and resonant mode power supplies
- Light and temperature control

Advantages

- Easy to mount with 1 screw (isolated mounting screw hole)
- Space and weight savings
- Simple mounting
- Improved temperature and power cycling

Σχήμα 2.5: Στο θυρίστορ CS-45 της IXYS η μέγιστη επιτρεπτή τιμή για το di/dt μπορεί να είναι 500A/ μs ή μόλις 150A/ μs για επαναλαμβανόμενες τέτοιες μεταβολές.

Αν λοιπόν κρίνεται απαραίτητη η προστασία ενός στοιχείου έναντι των υψηλών τιμών di/dt συνδέεται σε σειρά μια επαγωγή μικρής τιμής, αρκετά μικρής ώστε να μην επηρεάζει την κανονική λειτουργία του μετατροπέα, αλλά και αρκετά μεγάλης ώστε να επαρκεί ως προστασία. Στο Σχ. 2.6 φαίνεται το σχηματικό ενός απλού μετατροπέα chopper με προστασία του θυρίστορ έναντι υψηλών τιμών di/dt με πηνίο σε σειρά.



Σχήμα 2.6: Θυρίστορ με προστασία έναντι απότομων μεταβολών του ρεύματος (επαγωγή L_s).



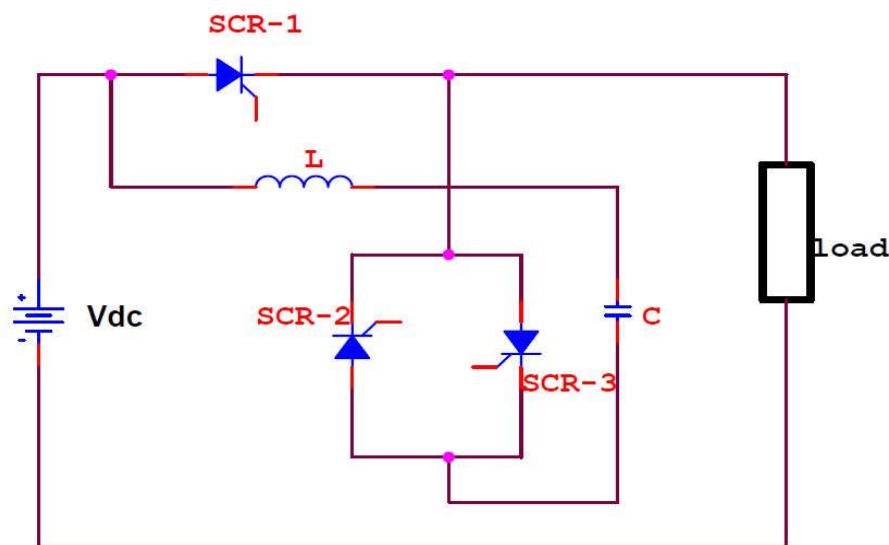
Σχήμα 2.7: Σχεδιαστικές προτάσεις για τη γρήγορη κατασκευή ενός "απλού" πηνίου.

Στο Σχ. 2.7 (πάνω και πρώτο από αριστερά) βλέπουμε δύο πιθανές σχεδιαστικές λύσεις για ένα τέτοιο πηνίο. Όπως και στην εικόνα, συνήθως είναι πηνία σε τοροειδή ή ανοιχτό πυρήνα με λίγες σπείρες αγωγού διατομής αρκετά μεγάλης ώστε να αντέχει το ρεύμα ισχύος του μετατροπέα.

2.2.3. Κυκλώματα σβέσης θυρίστορ

Ένα θυρίστορ, ως γνωστόν, μετά την έναυσή του αποτελεί στην πράξη ένα βραχυκύκλωμα και συνεχίζει να άγει μέχρι το ρεύμα που το διαρρέει να μηδενιστεί από κάποιο άλλο αίτιο στη λειτουργία του κυκλώματος (για την ακρίβεια, μέχρι το ρεύμα να μειωθεί ως την τιμή του ρεύματος συγκράτησης I_H). Με άλλα λόγια δεν υπάρχει έλεγχος στη σβέση του θυρίστορ (όπως υπάρχει για άλλα στοιχεία π.χ. MOSFET, IGBT κλπ), πράγμα το

οποίο (μεταξύ άλλων μειονεκτημάτων) το καθιστά ακατάλληλο για υψίσυχνους μετατροπείς, στους οποίους απαιτείται εξαναγκασμένη σβέση. Σε μια προσπάθεια να γίνει υπέρβαση αυτού του μειονεκτήματος μπορεί παράλληλα με το θυρίστορ να συνδεθεί ένα κύκλωμα σβέσης. Το κύκλωμα αυτό δεν είναι τίποτα άλλο από ένα L-C κύκλωμα ταλάντωσης (συν κάποια επιπρόσθετα βοηθητικά στοιχεία), που με τον κατάλληλο χρονισμό στη λειτουργία του υποχρεώνει το ρεύμα του θυρίστορ σε μείωση κάτω από την τιμή I_H , οπότε το θυρίστορ σβήνει. Στο Σχ. 2.8 βλέπουμε το σχηματικό ενός κυκλώματος σβέσης του θυρίστορ σε μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού τύπου Buck (λέγεται και Chopper όταν χρησιμοποιείται θυρίστορ). Διακρίνεται το πηνίο για την ταλάντωση του ρεύματος μέσα από το θυρίστορ. Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένα ακόμα πηνίο που χρησιμεύει στη γρηγορότερη σβέση του στοιχείου.



Σχήμα 2.8: Σχηματικό διάγραμμα ενός chopper με το κύκλωμα σβέσης του θυρίστορ (SCR1).

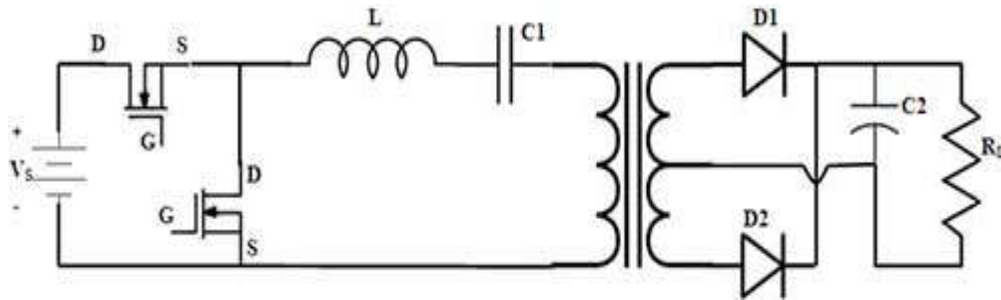
2.2.4. Μετατροπείς συντονισμού και ημισυντονισμού

Όπως αναφέρθηκε και στην Παρ. 2.2.1. τίθεται ένας φραγμός στην επιθυμητή αύξηση της συχνότητας λειτουργίας των μετατροπέων (χονδρικά γύρω στα 200 – 250 kHz) λόγω της υπέρμετρης αύξησης των διακοπτικών απωλειών πάνω στα ημιαγωγικά στοιχεία. Οι διακοπτικές απώλειες οφείλονται στο ότι η έναυση και η σβέση δε συμβαίνουν ακαριαία, αλλά διαρκούν κάποιο χρόνο, που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του ημιαγωγού, αλλά και από τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος και κυμαίνεται κατά περίπτωση από λίγα ns ως μερικά μs. Κατά τη διάρκεια λοιπόν της έναυσης και της σβέσης, σε αντίθεση με όσα ισχύουν κατά την αγωγή ή την αποκοπή, τόσο η τάση πάνω στο στοιχείο όσο και το ρεύμα μέσα από αυτό έχουν μη αμελητέες τιμές και το γινόμενο των δύο δίνει ένα σημαντικό ποσό ισχύος που μετατρέπεται σε θερμότητα.

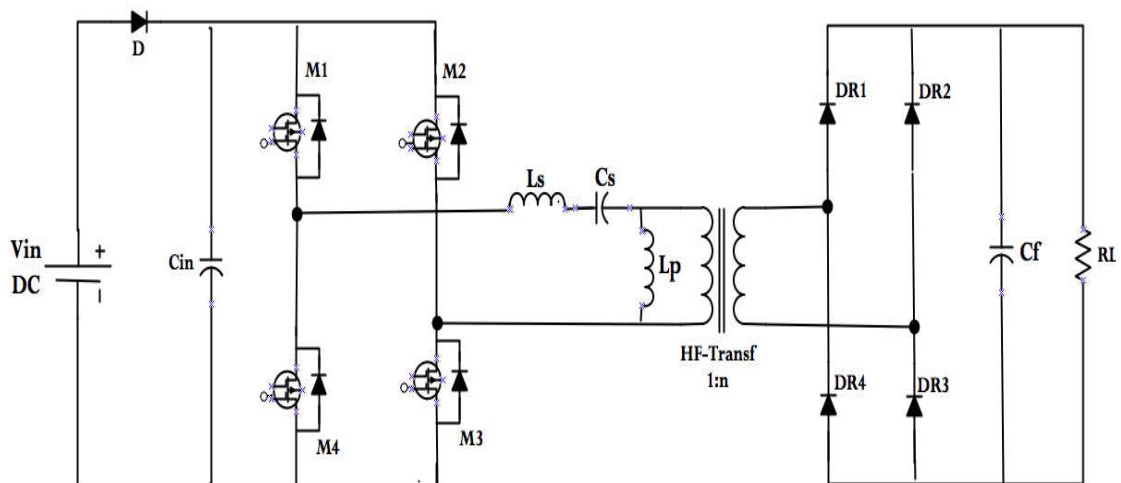
Σε κάποιους τύπους μετατροπέων το πρόβλημα αυτό μπορεί να παρακαμφθεί αν με κάποιο L-C κύκλωμα εξαναγκάσουμε την τάση ή το ρεύμα σε ταλάντωση, ώστε αυτό (η τάση ή το ρεύμα) να είναι μηδέν κατά τη έναυση ή/και κατά τη σβέση. Αν το ταλαντούμενο

μέγεθος εμφανίζει μόνο την ταλάντωση έχουμε μετατροπέα συντονισμού, αν δε παρουσιάζει και τμήματα γραμμικής μεταβολής έχουμε μετατροπέα ημισυντονισμού. Ιδιαίτερα δημοφιλείς είναι οι μετατροπείς DC-DC σε τοπολογίες συντονισμού, όπως για παράδειγμα αυτές που φαίνεται στο Σχ. 2.9.

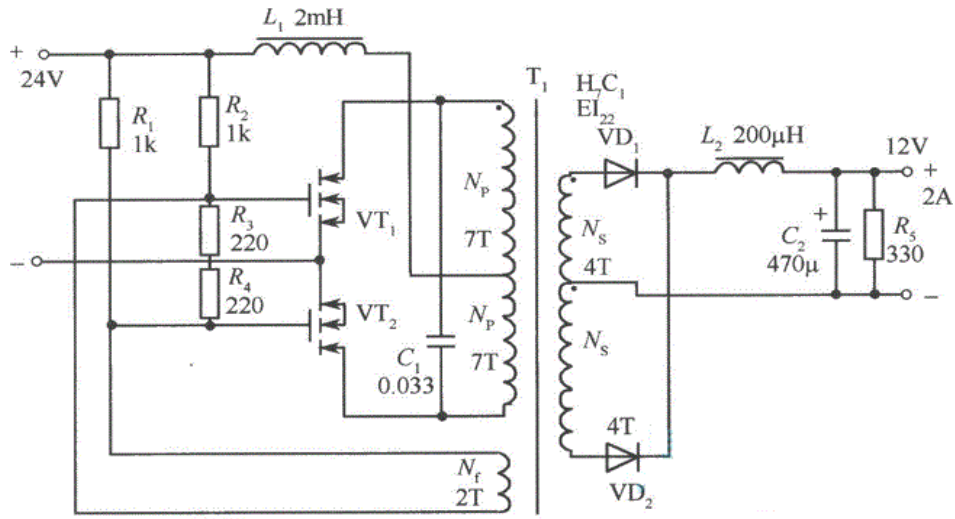
Στο Σχ. 2.9(α) τα στοιχεία συντονισμού είναι τα L και C_1 , στο Σχ. 2.9(β) τα L_s , L_p και C_s και στο Σχ. 2.9(γ) τα L_1 και C_1 .



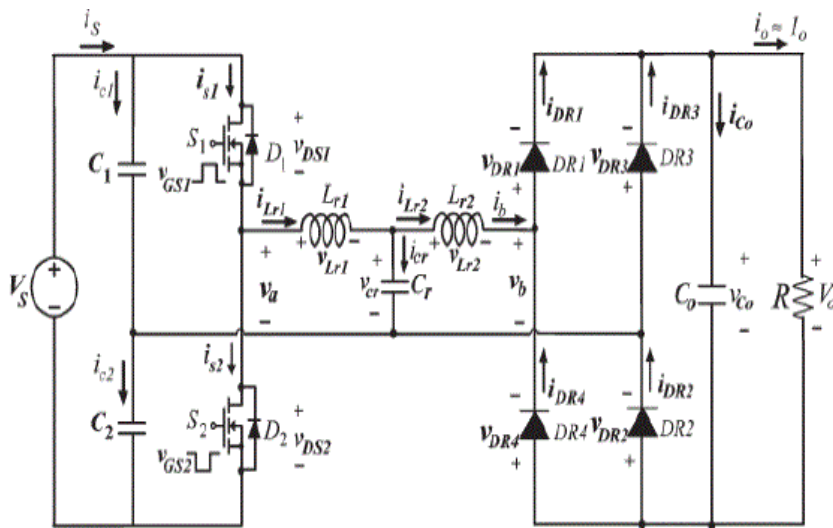
Σχήμα 2.9 (α)



Σχήμα 2.9 (β)



Σχήμα 2.9 (γ)



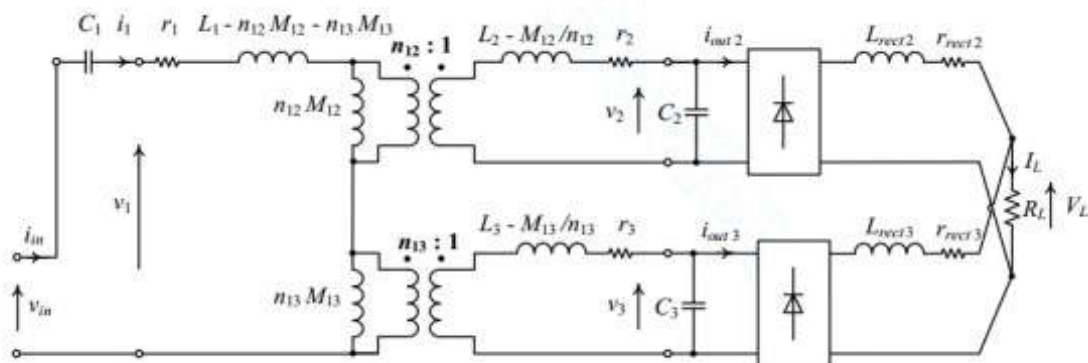
Σχήμα 2.9 (δ)

Σχήμα 2.9: Διάφορες τοπολογίες συντονισμού.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, στη συνολική επαγωγή συντονισμού, εκτός από τις παραπάνω «πρόσθετες» επαγωγές που συνδέουμε, πρέπει να συνυπολογίζεται και η επαγωγή σκέδασης του μετασχηματιστή. Αντιθέτως, στην τοπολογία του Σχ. 2.9(δ), δεν υπάρχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ των δύο σταδίων (δεν υπάρχει μετασχηματιστής). Εκεί, τα στοιχεία συντονισμού είναι τα L_{r1} , L_{r2} και C_r .

2.2.5. Ισοκαταμερισμός ρευμάτων

Σε μια ακόμα εφαρμογή των πηνίων, μπορούν αυτά να χρησιμοποιηθούν ώστε η ροή ρεύματος από δύο (ή περισσότερους) μετατροπείς που λειτουργούν παράλληλα να είναι η ίδια. Στο σχηματικό του Σχ. 2.10 βλέπουμε τα πηνία L_{rect2} και L_{rect3} που χρησιμοποιούνται ώστε οι δυο μετατροπείς, που εμφανίζονται με τις εξόδους τους παράλληλα συνδεδεμένες, να τροφοδοτούν με ίσα ρεύματα το φορτίο R_L .



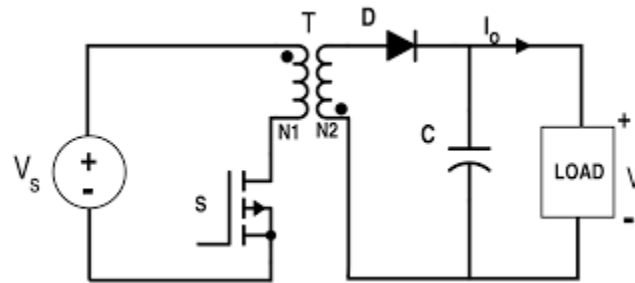
Σχήμα 2.10: Δύο μετατροπείς AC-DC συνδεδεμένοι παράλληλα.

2.3. Μετασχηματιστές στα ηλεκτρονικά ισχύος

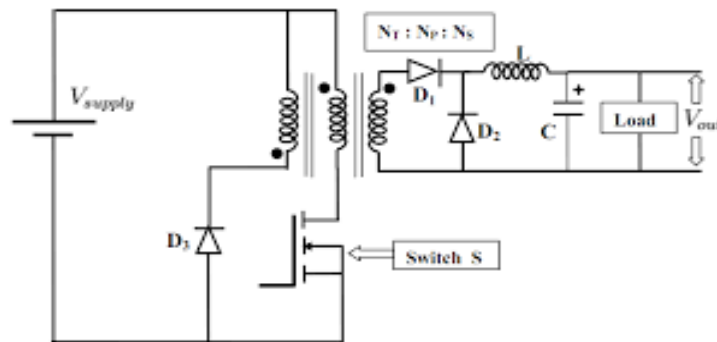
Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν να καταταγούν σε κατηγορίες με βάση διάφορα κριτήρια, όπως π.χ. το σκοπό που επιτελούν, τον τρόπο που λειτουργούν, τον τρόπο που γίνεται η παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων, τη συχνότητα λειτουργίας κλπ. Ένας τέτοιος διαχωρισμός μπορεί να διατρέξει τους μετατροπείς σε εκείνους που διαθέτουν μετασχηματιστή (Μ/Σ) στην τοπολογία τους και σε εκείνους που δεν διαθέτουν. Επίσης είναι σημαντική η πληροφορία του αν η διακοπτική λειτουργία γίνεται στη συχνότητα του δικτύου (50Hz) ή αν γίνεται στο φάσμα των kHz (δεκάδων, εκατοντάδων ή και παραπάνω), οπότε και η σχεδίαση του Μ/Σ είναι αρκετά διαφορετική.

Προκειμένου για μετατροπείς οδηγούμενους από το δίκτυο (λειτουργία στα 50Hz) ο μετασχηματιστής μπορεί να αλλάζει το επίπεδο της τάσης (ανύψωση / υποβίβαση), να προσφέρει γαλβανική απομόνωση ή να δίνει τη δυνατότητα πολλαπλών λήψεων στο δευτερεύον. Στους μετατροπείς υψηλών συχνοτήτων, εκτός από όλες τις παραπάνω δυνατότητες, ο Μ/Σ σε πολλές τοπολογίες δρα και ως στοιχείο για την προσωρινή αποθήκευση ενέργειας (ό,τι κάνει δηλαδή ένα πηνίο), η οποία σε τμήμα της περιόδου αποθηκεύεται στο πρωτεύον και σε επόμενο τμήμα της περιόδου απελευθερώνεται στο δευτερεύον ή στα δευτερεύοντα. Στο Σχ. 2.11(α) βλέπουμε έναν μετατροπέα Flyback όπου η λειτουργία του Μ/Σ γίνεται όπως μόλις περιγράφηκε. Σε μια άλλη περίπτωση μετατροπέα, στον μετατροπέα Forward (Σχ. 2.11(β)), αν το διακοπτικό στοιχείο (το MOSFET εδώ)

σβήσει και στο δευτερεύον δεν υπάρχει ροή ρεύματος, η εκτόνωση της μαγνητικής ενέργειας του πρωτεύοντος μπορεί να γίνει μέσω ενός τριτεύοντος τυλίγματος (πηνίο), που βρίσκεται στον ίδιο πυρήνα με τα άλλα δύο τυλίγματα του Μ/Σ και να επιστρέψει στην πηγή τάσης.



Σχήμα 2.11(α): Μετατροπέας Flyback.



Σχήμα 2.11(β): Μετατροπέας Forward.

Η σχεδίαση των Μ/Σ ακολουθεί τους ίδιους γενικούς κανόνες με αυτή των πηνίων, όσον αφορά π.χ. το βέλτιστο βαθμό απόδοσης ή τη μείωση του όγκου, με μια μόνο ιδιαιτερότητα που λαμβάνεται υπόψη: στους Μ/Σ, όταν διαρρέονται αμφότερα τα τυλίγματα (πρωτεύον – δευτερεύον) από ρεύμα, η μαγνητική ροή στον πυρήνα είναι πολύ μικρή και άρα ο πυρήνας μπορεί να είναι μικρότερος συγκριτικά με τον πυρήνα ενός πηνίου της ίδιας ισχύος διέλευσης. Βέβαια, ό,τι κερδίζουμε σε όγκο πυρήνα το χάνουμε σε όγκο τυλίγματος κι έτσι τελικά, πηνία και Μ/Σ τις ίδιας ισχύος έχουν παρόμοια μεγέθη (αν οι υπόλοιπες παράμετροι είναι ίδιες ή σχεδόν ίδιες).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Απώλειες ισχύος στα μαγνητικά στοιχεία

3.1. Εισαγωγή

Πριν από οτιδήποτε άλλο σε αυτή την παράγραφο πρέπει να αναφερθεί πως τόσο στα πηνία όσο και στους μετασχηματιστές (θα αναφερόμαστε σε αμφότερα με τον όρο «μαγνητικά στοιχεία» - ΜΣ) οι μηχανισμοί δημιουργίας απωλειών ισχύος είναι οι ίδιοι και διέπονται από τους ίδιους νόμους. Οι διαφορές τους, όσον αφορά τη ροή σκέδασης, θα σκιαγραφηθούν στο Κεφ. 4, που αναφέρεται στη σχεδίαση ΜΣ.

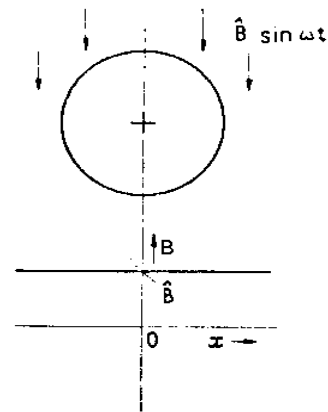
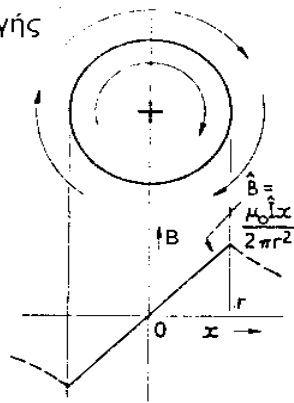
Οι απώλειες ισχύος σε ένα ΜΣ είναι δύο ειδών: Οι ωμικές απώλειες στο τύλιγμα ή στα τυλίγματα (απώλειες χαλκού) και οι απώλειες μαγνήτισης του υλικού του πυρήνα (απώλειες πυρήνα).

Οι ωμικές απώλειες οφείλονται στη ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο αγώγιμο υλικό των περιελίξεών τους, που συνήθως είναι ο χαλκός. Τμήμα της ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα από τη διαδικασία κρούσης των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας με τα πλεγματικά σημεία της κρυσταλλικής δομής του μετάλλου. Για δεδομένες διαστάσεις των ρευματοφόρων αγωγών η απώλεια ισχύος αυξάνεται υπέρμετρα με αύξηση της συχνότητας, αφού η εμφάνιση του επιδερμικού φαινομένου και του φαινομένου γειτνίασης οδηγούν σε συγκέντρωση του ρεύματος σε ένα μικρό μόνο επιφανειακό τμήμα της διατομής τους και αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση της ενεργού διατομής τους και αύξηση της ωμικής τους αντίστασης [9], [1], [2]. Τα δυο αυτά φαινόμενα θα περιγράψουμε συνοπτικά στην επόμενη υποπαράγραφο.

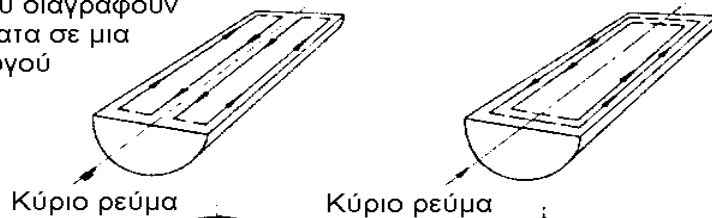
3.2. Το επιδερμικό φαινόμενο σε απομονωμένο ρευματοφόρο αγωγό.

Σε υψηλές συχνότητες, το ρεύμα που φέρει ένας αγωγός, δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη του τη διατομή, όπως γίνεται όταν έχουμε συνεχές ρεύμα, αλλά τείνει να κατανέμεται σε ένα λεπτό εξωτερικό περίβλημα. Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής εντός του αγωγού της οφειλόμενης στο ίδιο ρεύμα του αγωγού, η οποία περικλείει μόνο τμήμα αυτού. Από την επίλυση των εξισώσεων Maxwell προκύπτει ότι τα δινορρέυματα αναπτύσσονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ενισχύουν το ρεύμα κοντά στην επιφάνεια και να το εξασθενούν προς το κέντρο της διατομής του αγωγού. Ένας ισοδύναμος τρόπος θεώρησης αυτού του φαινομένου προκύπτει από την παρατήρηση ότι οι περιοχές εκείνες της διατομής του αγωγού που περικλείονται από μεγαλύτερο αριθμό δυναμικών γραμμών παρουσιάζουν μεγαλύτερη επαγωγική αντίδραση επί του αιτίου δημιουργίας του εναλλασσόμενου πεδίου, που είναι το ηλεκτρικό ρεύμα. Έτσι, προκαλείται μια ανακατανομή της πυκνότητας ρεύματος επί της διατομής του αγωγού, ώστε οι περιοχές με μικρότερη επαγωγική αντίδραση (κοντά στην επιφάνεια) να επιφορτίζονται με μεγαλύτερο ρεύμα. Το γεγονός αυτό, σε έναν αγωγό κυκλικής διατομής, οδηγεί σε μέγιστη πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια και ελάχιστη στο κέντρο (βλ. Σχ. 3.1 λίγο παρακάτω) Για τετραγωνική διατομή του αγωγού έχουμε μέγιστη πυκνότητα στις γωνίες, μικρότερη προς τις πλευρές και ελάχιστη στο κέντρο [9] ενώ για άλλες γεωμετρίες έχουμε αντίστοιχες κατανομές [2].

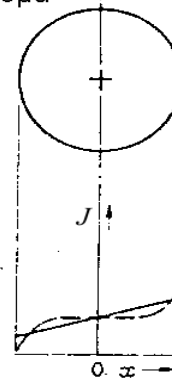
Κατανομή της
μαγνητικής επαγωγής
για χαμηλές
συχνότητες



Οι βρόχοι που διαγράφουν
τα δινορρεύματα σε μια
τομή του αγωγού



Κατανομή της
πυκνότητας
ρεύματος J για
υψηλές συχνότητες



(α) Επιδερμικό φαινόμενο

(β) Φαινόμενο γεινίασης

Σχήμα 3.1: Κατανομή ρεύματος και μαγνητικού πεδίου σε αγωγό λόγω του επιδερμικού φαινομένου και λόγω του φαινομένου γεινίασης.

Η ανακατανομή του ρεύματος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του λόγου R_{ac}/R_{dc} πάνω από τη μονάδα, όπου R_{ac} είναι η ενεργός αντίσταση του αγωγού όταν διαρρέεται από ημιτονοειδές ρεύμα δεδομένης συχνότητας και R_{dc} η αντίστασή του όταν διαρρέεται από συνεχές ρεύμα. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, αφού κάποια τμήματα του αγωγού συμβάλλουν λιγότερο στη μεταφορά ρεύματος και άρα η ενεργός διατομή του αγωγού μειώνεται. Παράλληλα με την αύξηση της αντίστασης, η ανακατανομή του ρεύματος έχει πάντα τέτοιο χαρακτήρα ώστε να μειώνεται η σύζευξη της μαγνητικής ροής με το αγωγιμο υλικό, συγκριτικά με την περίπτωση που το ρεύμα είναι συνεχές. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος μειώνεται η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου στο χώρο του αγωγού (εκτός αγωγού παραμένει σταθερή για δεδομένη ένταση ρεύματος). Συνεπώς, η συνολική ενέργεια μαγνητικού πεδίου –εντός και εκτός αγωγού– μειώνεται, γεγονός το οποίο ισοδυναμεί με μείωση της συνολικής αυτεπαγωγής του αγωγού.

Το μέγεθος της αύξησης της ενεργού αντίστασης R_{ac} και της μείωσης του συντελεστή αυτεπαγωγής L_{ac} , είναι τόσο μεγαλύτερο όσο αυξάνονται η συχνότητα f του ρεύματος, καθώς

επίσης και η ειδική αγωγιμότητα σ , η μαγνητική διαπερατότητα μ και οι διαστάσεις της διατομής του αγωγού. Σημαντικό μέγεθος για την περιγραφή του επιδερμικού φαινομένου είναι το επιδερμικό βάθος (skin depth) δ , που ορίζεται ως το βάθος από την επιφάνεια του απομονωμένου αγωγού κυκλικής διατομής στο οποίο, προκειμένου για ημιτονοειδή μεγέθη, η πυκνότητα ρεύματος έχει πάρει την τιμή $1/e$ της τιμής στην επιφάνεια, όπου e η βάση των νεπέριων λογαρίθμων. Το δ είναι συνάρτηση των σ , μ και f και δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\sigma\pi\mu f}} \quad (3.1)$$

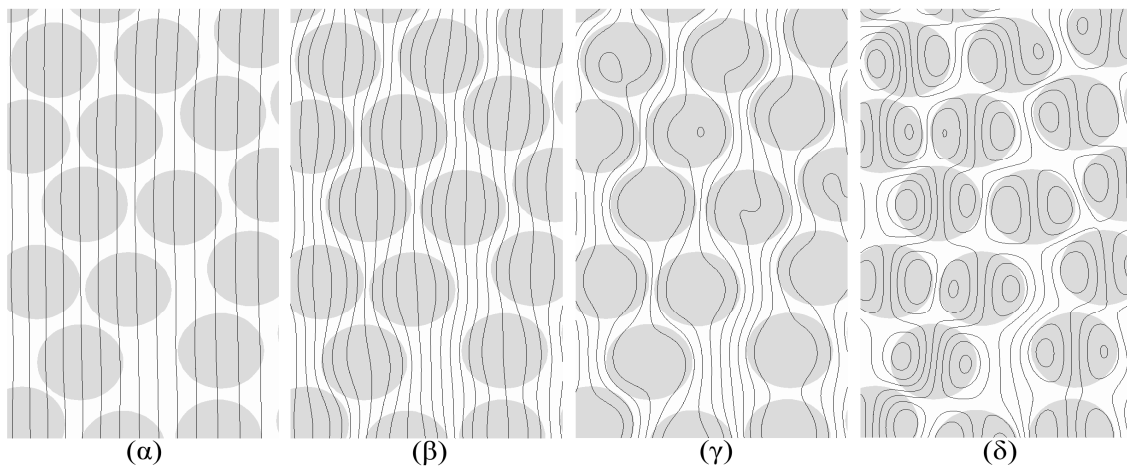
Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για θερμοκρασία 20°C , στη συχνότητα των 50Hz το επιδερμικό βάθος για το χαλκό είναι 9.3mm , ενώ στο 1kHz είναι 2.1mm και στα 50kHz είναι 0.3mm .

3.3. Το φαινόμενο γειτνίασης

Είδαμε λοιπόν ότι μια διατύπωση για την περιγραφή του επιδερμικού φαινομένου θα ήταν να πούμε ότι τα δινορρέυματα υπερτίθενται με το ρεύμα του αγωγού, ώστε να προκύψει η τελική κατανομή της πυκνότητας ρεύματος, ενώ μια άλλη θα ήταν να λέγαμε ότι το ρεύμα ανακατανέμεται με τέτοιο τρόπο ώστε το αγωγίμο υλικό να θωρακίζεται (screening) εν μέρει έναντι του μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Αυτές όμως οι διατυπώσεις αναδεικνύουν τη γενικότητα του φαινομένου και υποδεικνύουν πως θα υπάρξει ανακατανομή του ρεύματος ακόμη και αν η μαγνητική ροή που διαπερνά τον αγωγό δεν οφείλεται στο ρεύμα του ίδιου του αγωγού αλλά στο ρεύμα γειτονικών αγωγών. Αυτή η περίπτωση του ίδιου ουσιαστικά φαινομένου καθορίζει και αυτό που ονομάζουμε φαινόμενο γειτνίασης, την ανακατανομή δηλαδή της πυκνότητας ρεύματος στη διατομή ενός αγωγού εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από γειτονικούς ρευματοφόρους αγωγούς. Στις περιπτώσεις που ένας ρευματοφόρος αγωγός γειτνιάζει με άλλους αγωγούς οι οποίοι διαρρέονται από ρεύμα της ίδιας τάξης (ή και μεγαλύτερης) με το ρεύμα εντός του ίδιου, οι κατανομές του μαγνητικού πεδίου και της πυκνότητας ρεύματος εντός του καθορίζονται κατά κύριο λόγο από την επίδραση των γειτονικών αυτών αγωγών και ανάλογα με τη γεωμετρία της σχετικής τοποθέτησης των αγωγών μπορεί να έχουν οποιαδήποτε μορφή. Βέβαια, στη γενική περίπτωση, η επίδραση αυτή μειώνεται όταν αυξάνονται οι αποστάσεις των γειτονικών αγωγών από τον εξεταζόμενο αγωγό, αλλά για ένα μεγάλο πλήθος αγωγών που οι αποστάσεις από τους γειτονικούς τους αγωγούς είναι της τάξης των διαστάσεων της διατομής αυτών, το φαινόμενο γειτνίασης σε κάθε έναν από αυτούς είναι οπωσδήποτε πολύ σπουδαιότερο από το επιδερμικό. Το αποτέλεσμα είναι και πάλι η συγκέντρωση του ρεύματος στις περιοχές της διατομής του αγωγού όπου το μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται ισχυρότερο και η συνακόλουθη αύξηση της ενεργού αντιστάσεως. Ως παράδειγμα, σε ένα άπειρο σωληνοειδές πηνίο διαρρεόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα, η μαγνητική ένταση είναι μέγιστη εντός του πηνίου και μηδενική εκτός αυτού, με σταδιακή μείωσή της καθώς διατρέχουμε το τυλίγμα από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του πηνίου. Το φαινόμενο γειτνίασης, σε αυτή την περίπτωση (όλοι οι «αγωγοί» είναι σπείρες του ίδιου αγωγού και άρα διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα), θα έχει σαν αποτέλεσμα την αυξημένη συγκέντρωση ρεύματος στο εσωτερικό κάθε μιας στρώσης του τυλίγματος, στην πλευρά δηλαδή εκείνη της

διατομής των αγωγών που είναι πιο κοντά στον άξονα συμμετρίας του πηνίου και η μαγνητική ένταση έχει αυξημένη τιμή (βλ. και Παρ. 4.4 για τη ροή σκέδασης).

Στο Σχ. 3.1 [3] βλέπουμε παραστατικά την επίδραση των δύο φαινομένων (γεινίασης και επιδερμικού) σε αγωγό που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Στην περίπτωση (β) οι γειτονικοί αγωγοί διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα και παράγουν μαγνητικό πεδίο με τη διεύθυνση που εμφανίζεται στο σχήμα. Η συνεχής γραμμή για την κατανομή του ρεύματος στη (β) περίπτωση αντιστοιχεί στις συχνότητες για τις οποίες ο λόγος της ακτίνας του αγωγού προς το επιδερμικό βάθος είναι μικρότερος του 2 ($r/\delta < 2$), ενώ η περίπτωση των υψηλότερων συχνοτήτων παρουσιάζεται με διακεκομμένη γραμμή. Με x σημειώνεται η απόσταση από το κέντρο της διατομής. Στο Σχ. 3.2 φαίνεται το πώς το πεδίο «αποβάλλεται» από τους αγωγούς ενός τυλίγματος καθώς η συχνότητα αυξάνεται.



Σχήμα 3.2: Μεταβολή στην κατανομή του μαγνητικού πεδίου ενός τυλίγματος καθώς αυξάνεται η συχνότητα διαδοχικά από το (α) ως το (δ) (αποτελέσματα προσομοίωσης) [9].

Πρέπει να σημειωθεί ότι ενδείκνυται η χρήση του λόγου r/δ , ως παραμέτρου για την περιγραφή των φαινομένων που συνδέονται με την ανάπτυξη δινορρευμάτων σε ρευματοφόρους αγωγούς κυκλικής διατομής αφού, απουσία πρόσθετων επιδράσεων (π.χ. χωρητικά ρεύματα), είναι η τιμή του παραπάνω λόγου που καθορίζει τη σχετική μεταβολή των διαφόρων μεγεθών και όχι η απόλυτη τιμή της συχνότητας. Για άλλες γεωμετρίες αγωγών χρησιμοποιείται –αντί του r – κάποια αντίστοιχη κρίσιμη διάσταση της διατομής τους, π.χ. το πάχος του αγωγού αν πρόκειται για φύλλα χαλκού. Την παραπάνω σύμβαση συναντάμε στο σύνολο σχεδόν των σχετικών επιστημονικών εργασιών.

Να αναφερθεί τέλος πως, προκειμένου για εφαρμογές στις οποίες τα φαινόμενα επιδερμικό και γεινίασης γίνονται σημαντικά, αναζητούνται από τους ερευνητές τα πλεονεκτήματα της χρήσης αλουμινίου αντί του χαλκού [4]. Η χαμηλότερη ειδική αγωγιμότητα του αλουμινίου οδηγεί σε μεγαλύτερα επιδερμικά βάθη, αντισταθμίζοντας έτσι σημαντικά το αναμφίβολο μειονέκτημά του στις χαμηλές συχνότητες. Όταν σε δεδομένη εφαρμογή οι συχνότητες είναι πολύ υψηλές και στα τυλίγματα δεν υφίσταται συνεχής συνιστώσα του ρεύματος, η χρήση του αλουμινίου, το οποίο μάλιστα τα τελευταία χρόνια έχει καταστεί αρκετά φθηνότερο από το χαλκό, δίνει ενδεχομένως μια οικονομικά προτιμότερη λύση. Τα προβλήματα στη χρήση του αλουμινίου, μέχρι στιγμής, εστιάζονται σε θέματα μεταλλουργικής επεξεργασίας και δυσκολίας στη δημιουργία κολλήσεων και ηλεκτρικών συνδέσεων.

3.4. Μοντέλα περιγραφής των απωλειών χαλκού

Η ερευνητική κοινότητα κλήθηκε να μελετήσει το φαινόμενο των απωλειών στα μαγνητικά στοιχεία από τα μέσα του 19ου αιώνα, με την ανακάλυψη της εναλλασσόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Από την εποχή εκείνη είχε γίνει σαφές ότι τα υλικά που υπόκεινται σε εναλλασσόμενη μαγνητική διέγερση εμφανίζουν κάποιας μορφής απώλειες, που προκαλούν τη θέρμανσή τους. Η ιδιαίτερη κατάσταση που επιβάλλεται σε ένα τύλιγμα διαρρεόμενο από εναλλασσόμενο ρεύμα, όσον αφορά τις ωμικές απώλειες, δεν είχε γίνει ακόμη αντιληπτή, καθώς η χρήση της εναλλασσόμενης ισχύος περιοριζόταν στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρή κλίμακα και της κίνησης (ηλεκτρικές μηχανές και μετασχηματιστές). Σε αυτές τις εφαρμογές τα αποτελέσματα της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής μέσα στον όγκο των ρευματοφόρων αγωγών δε γίνονται εύκολα αντιληπτά, κυρίως λόγω της χαμηλής συχνότητας λειτουργίας. Οι νέες εφαρμογές (π.χ. ραδιοφωνική εκπομπή σήματος) οδήγησαν στη χρήση σημάτων υψηλών συχνοτήτων και στην εμφάνιση αυξημένων πυκνοτήτων ισχύος (μείωση του όγκου των συσκευών για δεδομένη ισχύ) στις διάφορες ηλεκτρικές και αργότερα (μεταπολεμικά κυρίως) ηλεκτρονικές διατάξεις. Αποτέλεσμα ήταν η ανάδειξη των σχετικών φαινομένων και η αποκάλυψη νέων προβλημάτων με θεωρητικό αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον (π.χ. επίδραση των παρασιτικών χωρητικότητων).

Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία, που είχε ολοκληρωθεί από τον Maxwell ήδη από τις αρχές του 20ου αιώνα, αποτελούσε μεν ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για την περιγραφή των φαινομένων, αλλά τόσο δύσχρηστο, που δεν άφηνε περιθώρια αναλυτικής επίλυσης των προβλημάτων.

Ξεκίνησε λοιπόν μια προσπάθεια των ερευνητών να καταγράψουν με τη μεγαλύτερη δυνατή λεπτομέρεια τα φαινόμενα και στη συνέχεια να τα ερμηνεύσουν, ικανοποιώντας έτσι την ανάγκη για ολοκλήρωση της επιστημονικής γνώσης πάνω στο νέο αυτό πεδίο, αλλά και την απαίτηση των σχεδιαστών ΜΣ για απλούς και εύχρηστους κανόνες, με βάση τους οποίους θα μπορούσε να καταστεί δυνατός ο βέλτιστος σχεδιασμός των στοιχείων αυτών.

Το ξέσπασμα του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου έδωσε έντονη ώθηση στην ανάπτυξη των ραδιοεπικοινωνιών, καθώς επίσης και άλλων τομέων σχεδίασης ηλεκτρικών κυκλωμάτων, στα οποία τα μαγνητικά στοιχεία καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το κόστος, τις επιδόσεις και την αξιοπιστία των συσκευών. Η σχεδίαση των μαγνητικών στοιχείων στηρίχθηκε στη μέθοδο των διαδοχικών δοκιμών έως ότου το τελικό προϊόν να ικανοποιεί τις προκαθορισμένες απαιτήσεις. Χάρη σε αυτή τη διεργασία, συγκεντρώθηκε πολύτιμη εμπειρία από τους μηχανικούς – σχεδιαστές της εποχής. Για την καλύτερη αξιοποίηση – αρχειοθέτηση αυτής της γνώσης γράφτηκαν σχετικά εγχειρίδια, που περιείχαν πληθώρα αριθμητικών δεδομένων σε μορφή διαγραμμάτων, πινάκων και εμπειρικών σχέσεων. Αυτές οι σχέσεις εξάγονταν εύκολα με τη μέθοδο της εύρεσης των συντελεστών και συντελεστών - εκθετών, ώστε η προκύπτουσα συνάρτηση να συμπίπτει με τα πειραματικά δεδομένα (curve fitting). Δίνονταν επίσης, με βάση τα προηγούμενα, απλές μεθοδολογίες βήμα προς βήμα, για την γρήγορη, εύκολη και επιτυχημένη σχεδίαση του κατάλληλου μαγνητικού στοιχείου. Το “Radio Engineer’s Handbook” - 1943 [2] είναι ένα τέτοιο εγχειρίδιο που καλύπτει πολλούς σχεδιαστικούς τομείς και πέραν αυτού των μαγνητικών στοιχείων. Μεταξύ άλλων, σημαντική υπήρξε η συμβολή τέτοιων εγχειριδίων στη μετέπειτα θεωρητική ανάλυση των φαινομένων, αφού προσέφεραν έτοιμο πειραματικό υλικό για τη δόμηση νέων περιγραφικών μοντέλων. Παράλληλα, εμφανίστηκαν περιοδικές εκδόσεις όπως το “Wireless Engineer” ή το

“Electrical Engineering” κ.α. που προορίζονταν να κρατούν τη διεθνή επιστημονική και τεχνική κοινότητα ενήμερη για τα πολλά σημαντικά ευρήματα της εποχής εκείνης.

Από μια πληθώρα εργασιών για τον προσδιορισμό και τη μοντελοποίηση των απωλειών χαλκού σε μαγνητικά στοιχεία τρεις θεωρούνται ως οι πλέον σημαντικές κατά τον προηγούμενο αιώνα, αυτές των S. Butterworth - 1922 [5 – 7], P. Dowell - 1966 [1] και J. Ferreira - 1994 [8]).

Αναμφίβολα η σπουδαιότερη εργασία υπήρξε αυτή του Dowell ο οποίος υπολόγισε τις απώλειες χαλκού για μαγνητικό στοιχείο με m στρώσεις τυλίγματος, και βρήκε ότι οι η ενεργός αντίσταση αυξάνεται με το m , με τη συχνότητα f , αλλά και με τον παράγοντα πλήρωσης η που δείχνει πόσο σφιχτά έχει γίνει η τύλιξη. Η αύξηση δεν είναι γραμμική για καμιά από τις τρεις αυτές παραμέτρους.

Ο Butterworth είχε κάνει ουσιαστικά μια μαθηματική αποτύπωση των ως τότε πειραματικών δεδομένων (πολύ χρήσιμη στη μετέπειτα διατύπωση του μοντέλου του Dowell), ενώ η εργασία του Ferreira, αν και χρησιμοποιήθηκε αρκετά για μια περίπου δεκαετία, τελικά δεν άντεξε στον έλεγχο από άλλους ερευνητές [9] και ουσιαστικά εγκαταλείφθηκε.

Σε νεότερες εργασίες γίνονται κυρίως βελτιώσεις του μοντέλου του Dowell, ώστε να περιγράφονται οι απώλειες σε συνθήκες που δεν καλύπτονται από τις συνθήκες του παραπάνω μοντέλου, π.χ. όταν η διέγερση είναι μη ημιτονοειδής ή όταν τα διάφορα τυλίγματα ενός μετασχηματιστή διαρρέονται από ρεύμα σε διαφορετικά τμήματα μιας περιόδου (π.χ. σε μετατροπείς τύπου Flyback), ενώ τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια οι περισσότερες μελέτες στηρίζονται στη χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (προσδιορισμός των κατανομών μαγνητικού πεδίου και πυκνότητας ρεύματος) για τη μελέτη ειδικών σχεδιαστικών επιλογών ή, σπανιότερα, για την επίλυση γενικότερων προβλημάτων [9].

Ο βαθμός αποδοχής των αποτελεσμάτων όλων αυτών των εργασιών από τους σχεδιαστές ΜΣ σχετίζεται κυρίως με την ακρίβειά τους, καθώς επίσης και με την ευκολία χρήσης τους. Συχνά οι προκύπτουσες εκφράσεις είναι τόσο δύσχρηστες που γίνονται πρακτικά ανεφάρμοστες.

Η ανάλυση Fourier είναι ένας τρόπος ώστε η εφαρμογή των προηγούμενων αποτελεσμάτων να επεκταθεί και για μη ημιτονοειδείς κυματομορφές, που είναι του άμεσου ενδιαφέροντος στα ηλεκτρονικά ισχύος. Αν αναλύσουμε λοιπόν την κυματομορφή $i(t)$ του ρεύματος κατά Fourier, αυτή θα μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^{\max} \cos(n\omega t + \phi_n) \quad (3.2)$$

όπου I_{dc} είναι η συνεχής συνιστώσα του ρεύματος, ενώ το πλάτος I_n^{\max} του n -οστού όρου είναι συνάρτηση των n και ω , με ω την κυκλική συχνότητα της βασικής αρμονικής και είναι γενικά φθίνουσα ως προς n (βέβαια, όχι απαραίτητα γνησίως φθίνουσα). Για παράδειγμα, στην κοινή περίπτωση που το $i(t)$ αποτελείται από ορθογώνιους παλμούς συχνότητας $f=1/T$, με ελάχιστη τιμή 0 (για διάστημα χρόνου $T - T_h$) και μέγιστη I_h (για διάστημα χρόνου T_h) και συνεπώς με λόγο κατάτμησης (duty cycle) $D = T_h/T$, το I_n^{\max} θα δίνεται από τη σχέση:

$$I_n^{\max} = \frac{2I_h}{\pi n} \sin\left(\frac{n\omega T_h}{2}\right) \quad (3.3)$$

Η ισχύς P_{Cu} των ωμικών απωλειών, σε κάθε περίπτωση, θα είναι:

$$P_{Cu} = R_{dc} I_{dc}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{n,rms}^2 R_n \quad (3.4)$$

όπου $I_{n,rms} = I_n^{\max} / \sqrt{2}$ η ενεργός τιμή του n -οστού όρου Fourier του ρεύματος και R_n η αντίσταση στη συχνότητα $\omega_n = n\omega$. Τέλος, η συνολική ενεργός αντίσταση R_{eff} του τυλίγματος θα δίνεται από τη σχέση:

$$R_{eff} = P_{Cu} / I_{rms}^2 \quad (3.5)$$

όπου:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{dc}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{n,rms}^2} \quad (3.6)$$

Αν και κατά καιρούς η χρήση πολύκλωνου αγωγού Litz έχει προταθεί ως η απόλυτη λύση για τον περιορισμό των απωλειών χαλκού υψηλών συχνοτήτων, στη εργασία [10] γίνεται μια ανάλυση σχετικά με το πότε συμφέρει, από απόψεως απωλειών, να χρησιμοποιήσει κανείς σύρμα κυκλικής διατομής ή συμμετρικό πολύκλωνο αγωγό (Litz). Προκύπτει το συμπέρασμα ότι για διάμετρο του συμπαγούς σύρματος μέχρι 2δ , η χρήση σύρματος Litz αντί του συμπαγούς σύρματος οδηγεί σε μείωση των απωλειών και είναι προτιμητέα. Για υψηλότερες συχνότητες όμως η δυνατότητα που δίνεται για εμφάνιση δινορρευσμάτων σε όλο τον όγκο του σύρματος Litz, μαζί και με τη σχετική αύξηση της dc αντίστασης του σύρματος Litz που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί, τελικά αυξάνουν τις απώλειες σε τιμή μεγαλύτερη από την προκύπτουσα για συμπαγές σύρμα κυκλικής διατομής. Μια αντίστοιχη ανάλυση υπάρχει και στην [5] για απλό πολύκλωνο αγωγό.

Τέλος, ένα σπουδαίο συμπέρασμα στο οποίο μπορεί κανείς να καταλήξει βασιζόμενος στην ανάλυση Fourier [11], είναι πως αν το πάχος του αγωγίμου φύλλου (όταν έχουμε τύλιγμα αγωγίμων φύλλων) επιλεγεί τέτοιο ώστε το τύλιγμα να εμφανίζει την ελάχιστη ενεργό αντίσταση, για μια οποιαδήποτε κυματομορφή ρεύματος με μικρό αρμονικό περιεχόμενο (και οπωσδήποτε για μια ημιτονοειδή), θα ισχύει ότι:

$$\left(\frac{R_{eff}}{R_{dc}}\right)_{opt}^{foil} \cong \frac{4}{3}, \quad \text{αγωγίμα φύλλα} \quad (3.7\alpha)$$

$$\left(\frac{R_{eff}}{R_{dc}}\right)_{opt}^{round} \cong \frac{3}{2}, \quad \text{αγωγοί κυκλικής διατομής} \quad (3.7\beta)$$

3.5. Γενικά για τις απώλειες πυρήνα

Στις αρχές του περασμένου αιώνα η χρήση μαγνητικών στοιχείων σε λειτουργίες υψηλών συχνοτήτων ήταν αντικείμενο σχετιζόμενο βασικά με την εξέλιξη των ραδιοεπικοινωνιών και η τοποθέτηση των τυλιγμάτων τους πάνω σε ένα υπόβαθρο διηλεκτρικού υλικού (π.χ. πορσελάνη) ήταν μια επαρκής σχεδιαστική λύση. Όμως, σε διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, η απαιτούμενη υψηλή πυκνότητα ισχύος επιβάλλει τη χρήση πυρήνα από μαγνητικό υλικό. Με αυτό τον τρόπο πολλαπλασιάζονται οι δυνατότητες για την –προσωρινή– αποθήκευση ενέργειας μαγνητικού πεδίου. Επίσης, η μαγνητική ροή οδηγείται σε συγκεκριμένη διαδρομή και αποφεύγεται έτσι η πρόκληση ηλεκτρομαγνητικής εκπομπής προς το περιβάλλον, ενώ παράλληλα μειώνονται σημαντικά τα μεγέθη των στοιχείων.

Το πρόβλημα όμως που ανακύπτει με τη χρήση μαγνητικού πυρήνα είναι η εμφάνιση απωλειών ισχύος σε αυτόν υπό μορφή θερμότητας. Η μαγνητική υστέρηση είναι το ένα από τα δυο φαινόμενα που οδηγούν στην εμφάνιση απωλειών σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό όταν αυτό υπόκειται σε περιοδικά μεταβαλλόμενη μαγνητική διέγερση. Το άλλο φαινόμενο είναι η ανάπτυξη δινορρευμάτων στον όγκο του πυρήνα και οι συνεπακόλουθες ωμικές απώλειες. Απλά κράματα σιδήρου, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές συστημάτων συνδεδεμένων με το δίκτυο (π.χ. μετασχηματιστές διανομής και ηλεκτρικές μηχανές), εμφανίζουν πολύ υψηλές απώλειες υστέρησης ανά κύκλο (έχουν μεγάλο εμβαδόν βρόχου υστέρησης), ενώ επιπλέον, στις τυπικές συχνότητες λειτουργίας των μετατροπέων με ηλεκτρονικά ισχύος είναι αδύνατο να εφαρμοστεί η τεχνική μείωσης των απωλειών δινορρευμάτων με ελασματοποίηση του πυρήνα. Έτσι λοιπόν επινοήθηκαν νέα υλικά, όπως είναι οι φερρίτες, που παρά το μειονέκτημα της σχετικά χαμηλής μαγνητικής επαγωγής κορεσμού εμφανίζουν εξαιρετικά χαμηλές απώλειες [3], [12], [13].

Βέβαια, παρότι η χρήση φερριτών έδωσε διέξοδο στο πρόβλημα των απωλειών πυρήνα υποβιβάζοντάς τες σε ανεκτά επίπεδα (σε πολλές περιπτώσεις οι απώλειες δινορρευμάτων μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, όχι όμως και οι απώλειες υστέρησης), δεν τις εξάλειψε εντελώς κι έτσι βλέπουμε ότι σε ένα βέλτιστα σχεδιασμένο μαγνητικό στοιχείο οι απώλειες πυρήνα είναι της ίδιας τάξης με τις απώλειες χαλκού (βλ. και Παρ. 4.3).

3.6. Μαγνητική υστέρηση

Οι μαγνητικές ιδιότητες των ατόμων οφείλονται στη δυνατότητα εμφάνισης μαγνητικής διπολικής ροπής σε αυτά, η οποία με τη σειρά της οφείλεται στο κβαντικό μέγεθος spin των στοιχειωδών σωματιών και στην κίνηση ηλεκτρικών φορτίων σε ατομική κλίμακα [14]. Το σπουδαίο είναι πως οι μαγνητικές ροπές των ατόμων εμφανίζονται κβαντισμένες σε διάφορες

ενεργειακές στάθμες (κατά μέτρο και κατά διεύθυνση) και υπό την επίδραση ενός εξωτερικού αιτίου (π.χ. μαγνητικό πεδίο) είναι δυνατόν να μεταβούν από μια στάθμη σε κάποια άλλη, απορροφώντας το απαιτούμενο ποσό ενέργειας για αυτή τη μεταβολή [15]. Παρά ταύτα, στην πλειονότητα των υλικών, η εφαρμογή οποιουδήποτε εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στις συνήθεις θερμοκρασίες δεν δύναται να επιφέρει κάποια σημαντική μεταβολή στη μακροσκοπική μαγνητική κατάστασή τους, καθώς είτε δεν παρουσιάζεται μαγνητική διπολική ροπή στα άτομα, είτε οι μαγνητικές διπολικές ροπές τους παραμένουν τυχαία προσανατολισμένες λόγω της θερμικής τους ενέργειας.

Οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες στερεών μαγνητικών υλικών, που συνήθως έχουν ως βάση της χημικής τους σύστασης το σίδηρο (Fe), το νικέλιο (Ni) ή το κοβάλτιο (Co), οφείλονται στην αυτογενή ύπαρξη σε αυτά μικροσκοπικών περιοχών (περιοχές Weiss) στις οποίες οι ατομικές διπολικές ροπές εμφανίζονται προσανατολισμένες κατά μία κοινή διεύθυνση και φορά κι έτσι, κάθε μια τέτοια (κορεσμένη) περιοχή εμφανίζει μια στοιχειώδη μαγνητική διπολική ροπή. Στη γενική περίπτωση, ένα δείγμα μαγνητικού υλικού εμφανίζεται μαγνητικά ουδέτερο, καθώς αυτές οι στοιχειώδεις μαγνητικές διπολικές ροπές είναι τυχαία προσανατολισμένες. Με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου όμως, μπορεί να επιτευχθεί ο προσανατολισμός των στοιχειωδών μαγνητικών ροπών σύμφωνα με αυτό, σε ένα βαθμό που εξαρτάται, τόσο από την τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου, όσο και από άλλους παράγοντες σχετικούς με το υλικό. Ο προσανατολισμός αυτός, για κάποια υλικά, διατηρείται σε ένα μεγάλο ποσοστό των δίπολων και μετά την άρση του πεδίου, με αποτέλεσμα το δείγμα να εμφανίζεται μαγνητισμένο. Αντίθετα, η θέρμανση ή ένα ισχυρό μηχανικό σοκ σε ένα μαγνητισμένο δείγμα μπορούν να επαναφέρουν την τυχαία κατανομή των στοιχειωδών μαγνητικών ροπών και το υλικό στη συνέχεια να εμφανίζεται και πάλι συνολικά μαγνητικά ουδέτερο. Οι νόμοι που διέπουν τα φαινόμενα τα σχετιζόμενα με τις διαδικασίες μαγνήτισης έχουν στατιστικό χαρακτήρα, ενώ η λεπτομερής διατύπωση και κατανόησή τους απαιτεί επίσης τη γνώση κβαντικής φυσικής και –αν αναφερόμαστε σε στερεά υλικά– φυσικής στερεάς κατάστασης [16].

Όσον αφορά τώρα τον τρόπο με τον οποίο αυτός ο προσανατολισμός εξαπλώνεται σε ένα μακροσκοπικό δείγμα καθώς το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται, έχουν προταθεί διάφορες θεωρίες που θα αναφερθούν σε επόμενη παράγραφο (Παρ. 3.9). Αυτό που ενδιαφέρει εδώ είναι πως για την αλλαγή αυτή απορροφάται ενέργεια προερχόμενη από το εξωτερικό αίτιο και η οποία αποθηκεύεται στα στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα, ενώ παράλληλα ένα ποσό μετατρέπεται σε θερμότητα. Κατά την αντίθετη μεταβολή της μαγνητικής κατάστασης των δίπολων με την εφαρμογή ενός νέου εξωτερικού αιτίου, ποσοστό της προηγούμενης αποθηκευθείσας ενέργειας μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα, καθιστώντας την όλη διεργασία μια, όπως λέγεται με τους όρους της Φυσικής επιστήμης, μη αντιστρεπτή μεταβολή.

Απουσία δινορρευμάτων, η μαγνητική ένταση \mathbf{H} είναι ανάλογη του ρεύματος i που χρησιμοποιείται εξωτερικά για τη δημιουργία πεδίου και δίνεται από τη σχέση:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = i \quad (3.8)$$

Αν υπάρχει αγωγίμο υλικό στο χώρο και εμφανίζονται δινορρεύματα, στο ρεύμα i θα πρέπει να προσθέσουμε και τον όρο i_{eddy} που αντιπροσωπεύει το διάρρευμα των δινορρευμάτων μέσα από μια ανοικτή επιφάνεια η οποία περατώνεται στην κλειστή καμπύλη για την οποία

υπολογίζεται το ολοκλήρωμα της (3.8). Παρουσία μαγνητικού υλικού, η σχέση ανάμεσα στα H και B είναι η ακόλουθη:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (3.9)$$

όπου M η μαγνήτιση του υλικού. Την ύπαρξη του υλικού και την επίδραση της μαγνήτισης στο μαγνητικό πεδίο του χώρου, μπορούμε να τη λάβουμε υπόψη εισάγοντας τη μαγνητική διαπερατότητα μ του υλικού και τότε η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$B = \mu H \quad (3.10)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα μ_0 για τον κενό χώρο έχει την τιμή $4\pi 10^{-7}$ H/m και η μαγνητική διαπερατότητα ενός υλικού συχνά εκφράζεται με τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r , που είναι ο λόγος της μ προς τη μ_0 ($\mu_r = \mu/\mu_0$). Το σημαντικό για το φαινόμενο της υστέρησης είναι πως η μαγνητική διαπερατότητα δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το H , την ιστορία μαγνήτισης του υλικού και από τη θερμοκρασία του.

Για τη μακροσκοπική περιγραφή του φαινομένου χρησιμοποιούμε το διάγραμμα, στο οποίο η μαγνητική επαγωγή B παρίσταται ως συνάρτηση της μεταβαλλόμενης μαγνητικής έντασης H . Στο Σχ. 3.3 φαίνεται, μεταξύ και άλλων σχετικών καμπυλών, ένας τυπικός βρόχος υστέρησης (μείζων ή κύριος βρόχος). Ο κύριος βρόχος, όταν η μεταβολή του H γίνεται «αργά», αναφέρεται συχνά και ως στατικός βρόχος. Μια ημιτονοειδής με το χρόνο μεταβολή του H μεταξύ των τιμών $\pm H_{max}$ θα έχει σαν αποτέλεσμα την περιοδική διαγραφή του στατικού βρόχου, με τη φορά που σημειώνεται στο σχήμα, εφόσον η συχνότητα είναι επαρκώς χαμηλή (π.χ. ως λίγα kHz αν αναφερόμαστε σε φερρίτες). Σημαντικά είναι τα σημεία τομής του βρόχου με τους άξονες τα οποία σημειώνονται ως B_r (παραμένουσα μαγνητική επαγωγή – remanence ή retentivity) και H_c (δύναμη ή πεδίο εξαναγκασμού ή απομαγνητίζουσα δύναμη – coercive force, coercive field ή demagnetizing force), καθώς και η επαγωγή κορεσμού B_{sat} . Το φαινόμενο του κορεσμού (saturation) είναι επίσης πολύ σημαντικό για τους σχεδιαστές μαγνητικών στοιχείων, αφού αποτελεί ένα σημαντικό περιοριστικό παράγοντα στις δυνατότητες των μαγνητικών στοιχείων. Στην περιοχή κορεσμού, παρά τις όποιες αυξήσεις του H , η μαγνήτιση δεν αυξάνεται και η κλίση της καμπύλης $B(H)$ τείνει στην τιμή μ_0 . Διαιρώντας την κλίση της καμπύλης μαγνήτισης σε οποιοδήποτε σημείο του επιπέδου $H-B$ με το μ_0 προκύπτει η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα μ_d (differential permeability):

$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \quad (3.11)$$

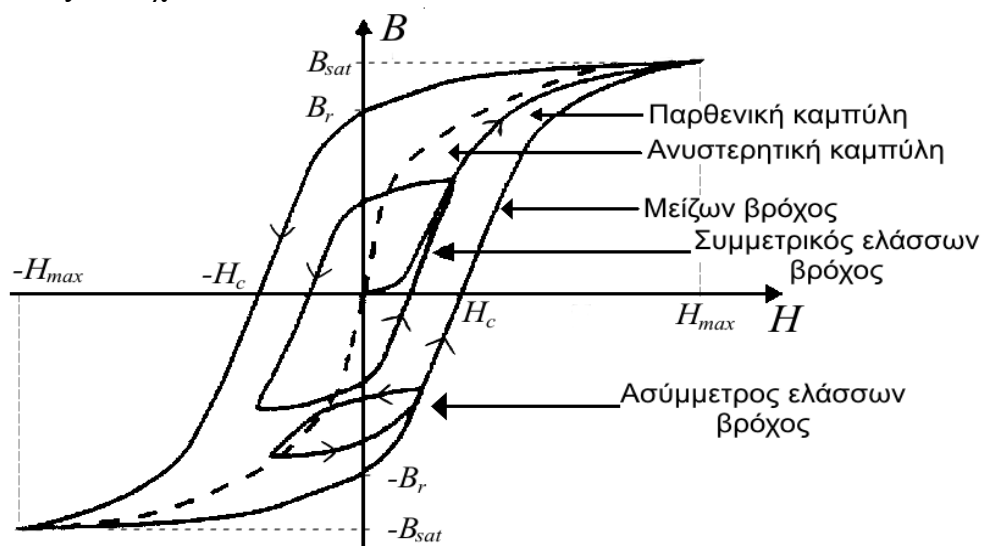
Σε υψηλές συχνότητες το σχήμα του βρόχου υστέρησης ενδέχεται να διαφέρει, με σπουδαιότερη μεταβολή την αύξηση του H_c , που τον κάνει να εμφανίζεται πιο πεπλατυσμένος [17]. Σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες, ή/και για μη ημιτονοειδείς κυματομορφές ρεύματος, το σχήμα του βρόχου ενδέχεται να είναι, εν ολίγοις, ακανόνιστο [18]. Η ενέργεια ανά μονάδα όγκου που προσφέρεται από το εξωτερικό αίτιο μεταβολής του πεδίου, κατά τη διαδικασία της υστερητικής μαγνήτισης ενός υλικού, δίνεται από τη σχέση:

$$W_m = \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad (3.12)$$

όπου B_1 και B_2 είναι η αρχική και η τελική τιμή της μαγνητικής επαγωγής αντίστοιχα. Ποσοστό αυτής της ενέργειας απορροφάται για τη μεταβολή της μαγνήτισης του υλικού, ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα. Συνεπώς, η καταναλωθείσα ενέργεια ανά μονάδα όγκου για έναν πλήρη κύκλο μαγνήτισης δίνεται από το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης.

Ένα μοντέλο όμως για τη μαγνητική υστέρηση, όπως αυτά που θα αναφερθούν παρακάτω, πρέπει εκτός από το μείζονα βρόχο να περιγράφει και μια σειρά από άλλες καμπύλες στο επίπεδο $H-B$ τις οποίες επίσης βλέπουμε στο Σχ. 3.3:

- Αναφερόμενοι σε κλειστή μαγνητική διαδρομή εντός του υλικού (δείγμα υλικού χωρίς διάκενο), η παρθενική καμπύλη διαγράφεται με τη σταδιακή αύξηση της μαγνητικής έντασης, ξεκινώντας από μια κατάσταση στην οποία το υλικό εμφανίζεται μαγνητικά ουδέτερο. Η κλίση της κοντά στην αρχή τον αξόνων καθορίζει αυτό που στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως αρχική μαγνητική διαπερατότητα μ_i (initial permeability), ποσότητα συναρτήσεως της οποίας εκφράζονται πολλά μεγέθη σχετικά με τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού ή ενός πυρήνα κατασκευασμένου από αυτό [3], [12], [13].
- Ένας συμμετρικός ελάσσων βρόχος διαγράφεται με τον ίδιο τρόπο όπως και ο μείζων, διαφέρει όμως ως προς αυτόν στο ότι οι μέγιστες τιμές της μαγνητικής έντασης είναι μικρότερες από $\pm H_{max}$ και αντιστοίχως η μέγιστη τιμή που επιτυγχάνεται για την μαγνητική επαγωγή B είναι αρκετά μικρότερη από την επαγωγή κορεσμού.
- Ένας ασύμμετρος ελάσσων βρόχος θα προκύψει αν κατά τη διαγραφή του κύριου βρόχου ή ενός συμμετρικού ελάσσονος βρόχου υπάρξει μια προσωρινή αλλαγή στην κατεύθυνση μεταβολής του H . Αν π.χ. διαγράφοντας το μείζονα βρόχο, κατά την αύξηση του H και πριν αυτό λάβει την τιμή $+H_c$, επέλθει μια μείωσή του προς αρνητικές τιμές και στη συνέχεια αύξηση και πάλι, θα διαγραφεί ένας ασύμμετρος ελάσσων βρόχος, όπως αυτός του Σχ. 3.3.



Σχήμα 3.3: Η μαγνητική επαγωγή B συναρτήσεως της μαγνητικής έντασης H για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό.

Προϋπόθεση λοιπόν για την ύπαρξη ελασσόνων βρόχων στην περίπτωση περιοδικής μεταβολής του H είναι η ύπαρξη περισσότερων των δύο μεταβολών στο πρόσημο της παραγώγου dH/dt κατά το διάστημα μιας περιόδου. Μια τέτοια κατάσταση είναι τυπική

στις εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς τα μαγνητικά στοιχεία διαρρέονται από ρεύματα με περιοδική μεταβολή στο χρόνο (συνήθως βέβαια όχι ημιτονοειδή, αλλά π.χ. παλμική, τριγωνική ή τραπεζοειδή), που όμως συχνά παρουσιάζουν μια σημαντική κυμάτωση. Αυτή η κυμάτωση μπορεί να οφείλεται είτε σε εξωτερικούς παράγοντες, όπως π.χ. ηλεκτρομαγνητικούς θορύβους, είτε σε εσωτερικούς παράγοντες, όπως π.χ. ταλαντώσεις που σχετίζονται με την ύπαρξη παρασιτικών επαγωγών και χωρητικότητων σε ένα κύκλωμα που εκτελεί υψίσυχη διακοπτική λειτουργία.

- Η ανυστερητική καμπύλη περιγράφει την υποθετική διαδρομή μαγνήτισης του υλικού σε μια περίπτωση που αυτή θα γινόταν χωρίς απώλειες. Πειραματικά, λαμβάνεται έμμεσα, με λήψεις πολλών βρόχων υστέρησης, για διάφορα επίπεδα διέγερσης. Χρησιμοποιείται σε λογισμικά προσομοίωσης κυκλωμάτων, όπως π.χ. το Pspice, για να υπολογιστεί η αρμονική παραμόρφωση των κυματομορφών τάσης – ρεύματος λόγω της ύπαρξης μαγνητικών στοιχείων σε ένα κύκλωμα.

3.7. Η μαγνητική υστέρηση σε υψηλές συχνότητες

Η χρήση μαγνητικού πυρήνα σε ένα μαγνητικό στοιχείο υπαγορεύεται από την ανάγκη για αύξηση της επαγωγής ενός κυκλώματος, για ενίσχυση και οδήγηση της μαγνητικής ροής καθώς και για αποθήκευση ενέργειας σε συγκεκριμένο χώρο (με τη χρήση κατάλληλου διακένου). Έχουν ήδη αναφερθεί επιγραμματικά τα διάφορα προβλήματα που ανακύπτουν με την τοποθέτηση πυρήνα στα μαγνητικά στοιχεία. Στα επόμενα λοιπόν θα αναλυθούν εν συντομία ζητήματα σχετικά με την απώλεια ενέργειας λόγω υστέρησης και δινορρευμάτων και θα γίνει αναφορά στα σπουδαιότερα μακροσκοπικά μοντέλα που περιγράφουν τη μαγνήτιση των υλικών.

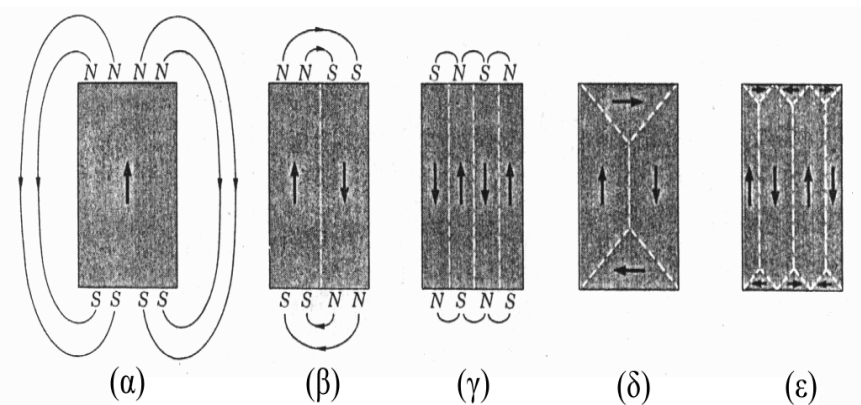
Σκοπός είναι να διαφανεί η πολυπλοκότητα των μηχανισμών, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τα παραπάνω φαινόμενα, καθώς και των νόμων που τα διέπουν, αλλά και να καταστεί σαφές ότι τα διάφορα μοντέλα περιγραφής τους σε μακροσκοπική κλίμακα συνήθως δεν είναι παρά χονδρικές προσεγγίσεις, που η κάθε μια παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο σε περιορισμένο πεδίο εφαρμογής.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι μαγνητικές ιδιότητες των ατόμων της ύλης έχουν την προέλευσή τους στην κίνηση των ηλεκτρονίων σε ατομική κλίμακα και στο κβαντικό μέγεθος spin αυτών. Η συμβολή της μαγνητικής διπολικής ροπής των πυρήνων των ατόμων και των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας των αγωγών στο φαινόμενο του μαγνητισμού είναι ιδιαίτερες περιπτώσεις μικρότερης γενικά σημασίας [16].

Μπορεί κανείς να καταλήξει σε εκφράσεις για τα γνωστά μεγέθη H , B , M με τα οποία περιγράφονται οι μαγνητικές ιδιότητες σε μακροσκοπική κλίμακα, εφαρμόζοντας νόμους της κβαντομηχανικής, της στατιστικής φυσικής και της φυσικής στερεάς κατάστασης. Στον όγκο ενός υλικού, όπου τα άτομα έχουν μια περιοδική χωρική διάταξη (κρυσταλλικό πλέγμα), η δομή του υλικού εμφανίζεται ως η διαδοχική επανάληψη μιας στοιχειώδους διάταξης ατόμων, την οποία ονομάζουμε στοιχειώδη κυψελίδα του πλέγματος. Είναι σχετικά εύκολο να εξετάζονται οι ιδιότητες του υλικού θεωρώντας τη στοιχειώδη κυψελίδα ως τη μικρότερη περιοχή του χώρου που μπορεί να μελετηθεί χωριστά. Έτσι, υπολογίζεται η μαγνητική διπολική ροπή μιας κυψελίδας [16] και εν συνεχεία, οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες ενός δείγματος ανάγονται στη μελέτη της κρυσταλλικής δομής στο μακροσκοπικό δείγμα. Το βέβαιο είναι πως, η δεδομένη κάθε φορά διάταξη των ατόμων σε μια κυψελίδα, σε συνδυασμό με την απαίτηση για ελαχιστοποίηση της μαγνητικής ενέργειας, ευνοούν τον

προσανατολισμό της μαγνητικής διπολικής ροπής της κυψελίδας σε συγκεκριμένες διευθύνσεις.

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά (στην Παρ. 3.8 γίνεται αναφορά στις διάφορες κατηγορίες μαγνητικών υλικών), ο μαγνητικός κορεσμός επιτυγχάνεται όταν οι μαγνητικές ροπές όλων των στοιχειωδών κυψελών του κρυσταλλικού πλέγματος, έχουν ευθυγραμμιστεί σύμφωνα με το εξωτερικό πεδίο. Εάν υποθέσουμε ένα κορεσμένο δείγμα σαν αυτό της (α) περίπτωσης του Σχ. 3.4 [16] και υπολογίσουμε τη μαγνητική ενέργεια που εμπεριέχεται σε αυτό,



Σχήμα 3.4: Διάφορες περιπτώσεις για τη μαγνητική κατάσταση ενός μακροσκοπικού δείγματος, με διαδοχικά μικρότερη ενέργεια.

θα διαπιστώσουμε ότι είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ενέργεια του δείγματος της (β) περίπτωσης, στην οποία το δείγμα αποτελείται από δύο κορεσμένες περιοχές (domains) με αντίθετη μαγνήτιση, ενώ στην περίπτωση (γ) η ενέργεια είναι ακόμη μικρότερη. Οι περιπτώσεις (δ) και (ε) αντιστοιχούν σε μηδενική μαγνητική ενέργεια. Υπό το πρίσμα λοιπόν της αρχής ελαχίστης ενέργειας, που διέπει όλες τις αυτογενείς φυσικές διεργασίες, συμπεραίνουμε ότι η ύπαρξη μαγνητικών περιοχών σε ένα υλικό (περιοχές Weiss) αποτελεί την φυσική κατάληξη ενός συστήματος.

Οι μαγνητικές περιοχές χωρίζονται μεταξύ τους από διαχωριστικές ζώνες, που στη διεθνή βιβλιογραφία ονομάζονται τοιχώματα των περιοχών (domain walls) ή και τοιχώματα Bloch [16]. Κατά την εφαρμογή ενός ασθενούς εξωτερικού πεδίου (της τάξης του mT) σε ένα δείγμα σιδηρομαγνητικού υλικού αποτελούμενο από μαγνητικές περιοχές προκαλείται μια αντιστρεπτή ή, αν δανειστούμε έναν όρο της μηχανικής, «ελαστική» μετατόπιση των τοιχωμάτων των περιοχών, τα οποία θα επανέλθουν στην αρχική τους θέση αν αφαιρεθεί το εξωτερικό πεδίο. Για εφαρμογή ισχυρότερων πεδίων έχουμε μη αντιστρεπτές μετατοπίσεις των τοιχωμάτων, ενώ για πολύ ισχυρά πεδία, πλησιάζοντας τον κορεσμό του δείγματος, παρατηρείται και στροφή του ανύσματος της μαγνήτισης στις περιοχές.

Κατά τη μεταβολή του σχήματος των περιοχών λαμβάνει χώρα ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ γειτονικών περιοχών, η οποία συνοδεύεται από απώλειες. Απώλειες επίσης θα έχουμε λόγω της «τριβής» κατά τη μετατόπιση των τοιχωμάτων, ενώ κατά την περιστροφή του ανύσματος της μαγνήτισης επίσης θα έχουμε απώλειες. Όσο η συχνότητα αυξάνεται, η μετατόπιση των τοιχωμάτων Bloch αποκτά το χαρακτήρα ταλάντωσης με τις δυνάμεις «τριβής» να αποτελούν τον παράγοντα απόσβεσης στην κίνηση αυτή.

Μέσα από την ανάλυση των επιστημονικών δεδομένων γίνεται αντιληπτό πως για κάθε υλικό, πάνω από κάποια συχνότητα, ο υπολογισμός και η θεωρητική ανάλυση των απωλειών υπό συνθήκες περιοδικής μαγνητικής διέγερσης δεν είναι μια απλή υπόθεση συνδυασμού της

υστέρησης και των δινορρευμάτων, όπως αυτά περιγράφονται για χαμηλές συχνότητες. Πάντως, δεδομένου ότι οι σύγχρονες απαιτήσεις στον τομέα των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος οδηγούν σταδιακά σε αύξηση των συχνοτήτων λειτουργίας ακόμη και άνω του 1MHz, έχει γίνει μια ανάλογη πρόοδος στον τομέα της κατασκευής υλικών ώστε να είναι δυνατές τέτοιες εφαρμογές. Ως παράδειγμα, αναφέρουμε τους τύπους φερριτών 3F3, 3F35 και 3F4 της Ferroxcube για εφαρμογές σε διακοπτικές συχνότητες μέχρι 500kHz, 1MHz και 3MHz αντίστοιχα, [13], καθώς επίσης και το φερρίτη N49 της Epcos για συχνότητες ως 1MHz [12].

Ακόμη, πρέπει να αναφερθεί πως, σε κάποια υλικά, οι μαγνητικές ιδιότητες (άρα και οι απώλειες) μεταβάλλονται ανάλογα με τη διεύθυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου. Τα υλικά αυτά αποκαλούνται ανισότροπα ως προς τις μαγνητικές τους ιδιότητες και δεν μας απασχολούν σε καθημερινές εφαρμογές.

Έτσι, χωρίς να εμβαθύνουμε περαιτέρω στη φυσική των φαινομένων, εντοπίζουμε τα αίτια της υστέρησης σε τρεις διαφορετικούς παράγοντες:

- α) Αλληλεπίδραση μεταξύ των μαγνητικών περιοχών.
- β) Εσωτερικές δυνάμεις «τριβής» κατά την μετατόπιση των διαφόρων ασυνεχειών στον όγκο του υλικού.
- γ) Ανισοτροπία.

Το ποιο φαινόμενο επικρατεί κάθε φορά είναι διαφορετικό για τα διάφορα υλικά και εξαρτάται φυσικά και από τα επίπεδα και τη συχνότητα διέγερσης που επιβάλλεται από το εξωτερικό πεδίο.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για να προσεγγίσει κανείς το θέμα της μαγνήτισης των υλικών και να μοντελοποιήσει το βρόχο υστέρησης. Αρκετές από αυτές αποτελούν απλές προσπάθειες εύρεσης κατάλληλων εκφράσεων ώστε τα αποτελέσματά τους να προσεγγίζουν κάποια πειραματικά δεδομένα (curve fitting) και υστερούν σε γενικότητα, ενώ άλλες, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη όλα τα φαινόμενα που σχετίζονται με τις ενεργειακές στάθμες σε μικροσκοπική κλίμακα, γίνονται ιδιαίτερα «βαριές» για εφαρμογή σε πρακτικά προβλήματα.

Στην Παρ. 3.9 θα περιγράψουμε συνοπτικά τέσσερα από τα σπουδαιότερα μακροσκοπικά μοντέλα για τη μαγνητική υστέρηση. Θα δούμε ότι το κάθε ένα από αυτά δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα σε κάποιους μόνον εξ αυτών των μηχανισμών κι έτσι βρίσκει εφαρμογή σε κάποια μόνο κατηγορία υλικών.

3.8. Μαγνητικά υλικά – φερρίτες

Μελετώντας τη συμπεριφορά ενός μακροσκοπικού δείγματος κατά την εφαρμογή επ' αυτού ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, τα μαγνητικά υλικά μπορούν να χωριστούν –κατ' αρχάς– σε τρεις κατηγορίες: Τα διαμαγνητικά, τα παραμαγνητικά και τα σιδηρομαγνητικά.

Τα διαμαγνητικά υλικά, με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μαγνητίζονται ασθενώς, με το άνυσμα της μαγνήτισης να έχει την ίδια διεύθυνση με το εξωτερικό πεδίο και φορά αντίθετη ως προς αυτό. Η πλειονότητα των υλικών έχει διαμαγνητικές ιδιότητες, ενώ το πιο έντονα διαμαγνητικό υλικό είναι το βισμούθιο (Bi). Οι οργανικές ενώσεις και το νερό έχουν επίσης διαμαγνητικές ιδιότητες.

Τα παραμαγνητικά υλικά με εφαρμογή εξωτερικού πεδίου μαγνητίζονται ασθενώς στην ίδια διεύθυνση και φορά με αυτό. Παραδείγματα παραμαγνητικών υλικών είναι το αλουμίνιο (Al) και ο λευκόχρυσος (Pt).

Τέλος, τα σιδηρομαγνητικά υλικά μαγνητίζονται ισχυρά στην ίδια φορά με το εξωτερικό πεδίο. Χωρίς να υπεισέλθουμε σε λεπτομέρειες για τις δυο πρώτες κατηγορίες θα παρατηρήσουμε πως τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι αυτά που παρουσιάζουν πρακτικό ενδιαφέρον αφού έχουν υψηλή θετική τιμή για τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r (ως και 20.000) και χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως είναι οι μόνιμοι μαγνήτες, τα μαγνητικά στοιχεία (πηνία – μετασχηματιστές), οι ηλεκτρικές μηχανές, η μαγνητική αποθήκευση πληροφοριών κ.α. Να αναφέρουμε ακόμη ότι μια βασική διαφορά ανάμεσα στα διαμαγνητικά, τα παραμαγνητικά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά, πέραν του μεγέθους της μαγνήτισής τους, είναι το ότι για τις δυο πρώτες κατηγορίες αυτή παύει να υφίσταται όταν αποσυρθεί το εξωτερικό πεδίο.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά μπορούν επίσης να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με τις μαγνητικές τους ιδιότητες. Ένας γενικός διαχωρισμός τα κατατάσσει σε σκληρά και μαλακά, με τον πρώτο χαρακτηρισμό να αναφέρεται σε εκείνα που παρουσιάζουν υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση B_r (ως ποσοστό της μαγνήτισης κορεσμού) και υψηλή απομαγνητίζουσα δύναμη H_c , ενώ το αντίθετο ισχύει για τα μαλακά υλικά. Τα σκληρά υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών και σε εφαρμογές στις οποίες η «μνήμη» της ιστορίας μαγνήτισης του υλικού είναι απαραίτητη (μαγνητική εγγραφή), ενώ τα μαλακά σε εφαρμογές στις οποίες απαιτούνται χαμηλές απώλειες υστέρησης (π.χ. μαγνητικά στοιχεία), αφού το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης σε αυτά είναι μικρό.

Η βαθύτερη μελέτη των μηχανισμών βάσει των οποίων αλληλεπιδρούν οι στοιχειώδεις μαγνητικές ροπές, τόσο μεταξύ τους όσο και με ένα εξωτερικό πεδίο, οδηγεί στον ορισμό δύο ακόμη κατηγοριών υλικών, που είναι τα σιδηρομαγνητικά και τα αντισιδηρομαγνητικά. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν τις μακροσκοπικές ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών, αλλά γενικά παρουσιάζουν σημαντικά ασθενέστερη μαγνήτιση, ενώ στα αντισιδηρομαγνητικά υλικά η μαγνήτιση που προκαλείται με την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου είναι πρακτικά αμελητέα.

Οι φερρίτες είναι σιδηρομαγνητικά υλικά (οξειδία του σιδήρου) τα οποία άρχισαν να παρασκευάζονται πειραματικά στα τέλη της δεκαετίας του '20, ενώ άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Έχουν το γενικό χημικό τύπο $X-Fe_2O_4$, όπου X είναι κάποιο ή συνδυασμός σε διάφορες αναλογίες κάποιων από τα ακόλουθα μέταλλα: σίδηρος (Fe), μαγγάνιο (Mn), κοβάλτιο (Co), νικέλιο (Ni), χαλκός (Cu), ψευδάργυρος (Zn), μαγνήσιο (Mg) και κάδμιο (Cd). Οι προσμίξεις που επιλέγονται κάθε φορά δίνουν και το όνομά τους στο φερρίτη. Έτσι, για παράδειγμα, μπορούμε να πούμε ότι οι σπουδαιότεροι από απόψεως πρακτικών εφαρμογών είναι οι φερρίτες μαγγανίου – ψευδαργύρου (Mn-Zn) και οι φερρίτες νικελίου – ψευδαργύρου (Ni-Zn).

Αν και έχουν παρασκευαστεί και σκληροί φερρίτες, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στους μαλακούς, οι οποίοι έχουν γενικά μικρότερη μαγνήτιση κορεσμού από τον απλό σίδηρο, διαθέτουν όμως σειρά άλλων πλεονεκτημάτων. Ως τέτοια μπορούμε να αναφέρουμε τις μικρές τιμές για τα B_r και H_c (και άρα το μικρό εμβαδόν βρόχου υστέρησης), την σχετικά υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και τη χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα μέχρι κάποιου ορίου συχνότητας (διαφορετικό για κάθε υλικό), που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τον περιορισμό των απωλειών λόγω δινορρευμάτων.

Ο λόγος για τον οποίο αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα στους φερρίτες με αύξηση της συχνότητας σχετίζεται με το γεγονός ότι ένα μακροσκοπικό δείγμα του υλικού

αποτελείται από μικροσκοπικούς κόκκους (κρυσταλλίτες), οι οποίοι διαχωρίζονται μεταξύ τους με ένα λεπτό μονωτικό στρώμα πολύ μεγάλης αντίστασης. Η μεταξύ τους χωρητικότητα ουσιαστικά βραχυκυκλώνει το μονωτικό στρώμα στις υψηλές συχνότητες κι έτσι τότε, η ειδική αντίσταση του δείγματος παίρνει περίπου την τιμή της ειδικής αντίστασης ενός κρυσταλλίτη. Τυπικές τιμές γι' αυτήν είναι τα $0.001\Omega\text{m}$ για τους φερρίτες Mn-Zn και τα $30\Omega\text{m}$ για τους φερρίτες Ni-Zn [19]. Η συχνότητα για την οποία αρχίζει να γίνεται σημαντική η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι διαφορετική για κάθε τύπο φερρίτη και μπορεί να είναι από λίγες δεκάδες kHz ή λίγες εκατοντάδες kHz (στις περισσότερες περιπτώσεις) ή και μεγαλύτερη, ιδίως για πιο καινούργια υλικά.

Οι φερρίτες Ni-Zn έχουν $\mu_r < 1000$, υψηλή ειδική αντίσταση και μέτρια θερμοκρασιακή σταθερότητα (η μ_r γενικά μειώνεται με τη θερμοκρασία). Προτιμούνται κυρίως σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές (μικρή ισχύς, υψηλή επαγωγή, μεγάλο εύρος συχνοτήτων) για συχνότητες από 0.5 έως 100MHz. Οι φερρίτες Mn-Zn έχουν μ_r από 1000 ως 5000 και ειδική αντίσταση μικρότερη από αυτή των Ni-Zn, η οποία μάλιστα μειώνεται σημαντικά σε συχνότητες αρκετά χαμηλότερες απ' ότι στους φερρίτες Ni-Zn. Επίσης, παρουσιάζουν γενικά μικρότερη B_{sat} από τους φερρίτες Ni-Zn [19]. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές συχνοτήτων από 1kHz ως 2MHz, όπως είναι για παράδειγμα τα μαγνητικά στοιχεία σε μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος.

Εναλλακτικές επιλογές, πέραν των φερριτών, αποτελούν τα άμορφα μέταλλα (κατεργάζονται σε υαλώδη φάση) και κράματα κονιορτοποιημένου σιδήρου, τα οποία έχουν χαμηλότερο κόστος, μεγαλύτερη B_{sat} , αλλά γενικά παρουσιάζουν περισσότερες απώλειες συγκριτικά με τους φερρίτες [9].

3.9. Μοντέλα για τις απώλειες υστέρησης υψηλών συχνοτήτων

Οι μηχανισμοί που επηρεάζουν το φαινόμενο της υστέρησης είναι κατά περίπτωση (ανάλογα και με το υλικό: πολυκρυσταλλικό ή άμορφο, ισότροπο ή ανισότροπο) περίπλοκοι και η αναλυτική τους μελέτη δεν είναι εύκολη υπόθεση. Συνεπώς, η δημιουργία ενός μοντέλου στηρίζεται συχνά σε μια απλοποιημένη αναπαράσταση της μέσης συμπεριφοράς του υλικού. Με βάση λοιπόν αυτή τη μέση συμπεριφορά γίνεται η μοντελοποίηση των μηχανισμών μαγνήτισης, δηλαδή της περιστροφής των μαγνητικών ροπών ή της κίνησης των τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών. Σύμφωνα και με τα όσα αναφέρθηκαν στην Παρ. 3.6, στο όποιο μοντέλο πρέπει επίσης να περιλαμβάνονται και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας μαγνήτισης όπως είναι ο κορεσμός, οι αντιστρεπτές (μη υστερητικές) και οι μη αντιστρεπτές διαδικασίες. Στα επόμενα θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα σπουδαιότερα από τα μακροσκοπικά μοντέλα για τη μαγνητική υστέρηση.

- Το μοντέλο του **Preisach** (1935)

Το μοντέλο αυτό [20] στηρίζεται στη θεώρηση – υπόθεση ότι το υλικό *απαρτίζεται* από ανεξάρτητα (μη αλληλεπιδρώντα) σωματίδια, το καθένα από τα οποία έχει μόνο δύο δυνατές τιμές μαγνήτισης, $+m$ και $-m$. Βάσει των υποθέσεων του μοντέλου, στη θέση του κάθε σωματιδίου, το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης με τα γειτονικά σωματίδια είναι ένα «καθαρό» πεδίο h_i (πεδίο αλληλεπίδρασης – interacting field).

Το κλειδί του μοντέλου είναι μια συνάρτηση κατανομής, που λέγεται συνάρτηση πυκνότητας Preisach και περιγράφει τη στατιστική μαγνητική συμπεριφορά ενός τυχαίου δείγματος μεγάλου αριθμού σωματιδίων, τα οποία θεωρούνται απείρως μικρά. Η χονδρική μορφή της συνάρτησης αυτής προκύπτει πειραματικά και ανάλογα με το υλικό μπορεί να είναι διαφορετική. Η παράμετρος του κλασικού μοντέλου του Preisach, που θα πρέπει να προσδιοριστεί κατά την πειραματική διαδικασία, είναι η μαγνήτιση κορεσμού του δείγματος), ενώ προσαρμοσμένες παράμετροι είναι κάποιες ποσότητες που εμφανίζονται στη συνάρτηση κατανομής.

- Το μοντέλο των **Stoner–Wohlfarth** (1948)

Το μοντέλο των Stoner–Wohlfarth περιγράφει τις καμπύλες μαγνήτισης ενός πολυκρυσταλλικού υλικού που αποτελείται από μικρά σωματίδια τα οποία δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και χαρακτηρίζονται από μονοαξονική ανισοτροπία. Τα σωματίδια αυτά έχουν μέγεθος μικρότερο από το ελάχιστο απαιτούμενο για το σχηματισμό μαγνητικής περιοχής. Η μαγνήτιση κάθε τέτοιου σωματιδίου θεωρείται πως έχει σταθερή τιμή, αλλά η διεύθυνσή της μπορεί να μεταβάλλεται. Η ανισοτροπία καθορίζεται από την ύπαρξη, για κάθε σωματίδιο, ενός άξονα προτιμώμενου προσανατολισμού της μαγνήτισης με τη διεύθυνσή του να σχηματίζει γωνία φ ως προς το άνυσμα του εξωτερικού πεδίου και με μια κατανομή Gauss $F(\varphi)$ να περιγράφει τη στατιστική συμπεριφορά της ποσότητας φ σε ένα τυχαίο δείγμα αποτελούμενο από πολλά σωματίδια. Η μέση τιμή της γωνίας φ αποτελεί τη διεύθυνση του άξονα εύκολης μαγνήτισης, όπως λέγεται, του μακροσκοπικού δείγματος.

Το μοντέλο αυτό μπορεί να περιγράψει τις αντιστρεπτές και μη αντιστρεπτές μεταβολές στην ενεργειακή κατάσταση ενός τέτοιου υποθετικού μαγνητικού σωματιδίου με αλλαγές του H , οι οποίες οφείλονται σε αντίστοιχες μεταβολές της διεύθυνσης μαγνήτισής του. Η συμπεριφορά ενός μακροσκοπικού δείγματος, προκύπτει από τη στατιστική μελέτη αυτής της συμπεριφοράς των σωματιδίων.

- Το μοντέλο του **Globus** (1976)

Το μοντέλο αυτό [21] αναφέρεται στους μαλακούς φερριτες για τους οποίους ο Globus έκανε κάποιες παρατηρήσεις και έπειτα από μερικές υποθέσεις, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μαγνήτιση ενός μακροσκοπικού δείγματος παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με αυτήν ενός μικροσκοπικού, σφαιρικού δείγματος το οποίο αποτελείται από δύο περιοχές με μαγνήτιση σε γωνίες 0° και 180° ως προς το εξωτερικό πεδίο. Η αλλαγή στη συνολική μαγνήτιση του δείγματος αυτού καθορίζεται από την κίνηση του διαχωριστικού τοιχώματος μεταξύ των δύο περιοχών. Οι τρεις βασικές εξισώσεις του μοντέλου δίνουν την ένταση H του πεδίου και τη μαγνήτιση για μη αντιστρεπτές και αντιστρεπτές μεταβολές (η διαχωριστική μεμβράνη μπορεί να παραμορφώνεται και «ελαστικά») και είναι απλές τριγωνομετρικές συναρτήσεις της θέσης του διαχωριστικού τοιχώματος πεπλεγμένες μεταξύ τους

- Το μοντέλο των **Jiles – Atherton** (1986)

Περιγράφει ισοτροπικά, πολυκρυσταλλικά υλικά αποτελούμενα από κόκκους, ο καθένας από τους οποίους απαρτίζεται από πολλές μαγνητικές περιοχές [22]. Μία οποιαδήποτε περιοχή έχει μαγνήτιση σταθερής διεύθυνσης και φοράς. Τα τοιχώματά της μπορούν με την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου να παραμορφώνονται «ελαστικά» (αντιστρεπτές μεταβολές) ή και να μετατοπίζονται (μη αντιστρεπτές μεταβολές), αυξομειώνοντας έτσι το μέγεθος της περιοχής σε συσχετισμό με τις γειτονικές περιοχές. Περιοχές των οποίων η μαγνήτιση έχει άνυσμα με μικρότερη γωνία ως προς εκείνο της μεταβολής του εξωτερικού πεδίου, ευνοούνται περισσότερο από αυτή τη μεταβολή απορροφώντας ενέργεια, που διατίθεται για την επέκτασή τους. Η βασική ιδέα του μοντέλου στηρίζεται στη παραδοχή ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου στη θέση μιας περιοχής, δεν εξαρτάται μόνο από το εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο H , αλλά και από την μαγνήτιση των γειτονικών περιοχών (αλληλεπίδραση μεταξύ περιοχών).

Χωρίς να υπεισέλθουμε στις λεπτομέρειες των παραπάνω μοντέλων, θα κάνουμε μερικές γενικές παρατηρήσεις:

- Τα μοντέλα αυτά πετυχαίνουν, με διαφορετικό βαθμό επιτυχίας το καθένα, να περιγράψουν τις διάφορες καμπύλες που σχετίζονται με το φαινόμενο της μαγνήτισης στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Το κάθε ένα δίνει έμφαση σε διαφορετικά χαρακτηριστικά των υλικών και συνεπώς βρίσκουν εφαρμογή σε διαφορετικά υλικά και για διαφορετικές πρακτικές εφαρμογές. Ονομαστικά μόνον θα αναφέρουμε ότι το μοντέλο των Stoner–Wohlfarth βρίσκει καλύτερη εφαρμογή στα σκληρά μαγνητικά υλικά, των Jiles–Atherton στους μέσους φερρίτες (με ιδιότητες μεταξύ των σκληρών και των μαλακών), του Globus στους μαλακούς φερρίτες ενώ του Preisach στα λεπτά φύλλα σκληρού μαγνητικού υλικού, σε εφαρμογές μαγνητικής εγγραφής [9].
- Σημαντικές για την εφαρμογή του κάθε μοντέλου είναι οι διάφορες παράμετροι αυτών, από τις οποίες άλλες προκύπτουν απευθείας πειραματικά και άλλες με περαιτέρω υπολογισμούς. Το πλήθος και ο εύκολος προσδιορισμός των τιμών των παραμέτρων ενός μοντέλου είναι μείζονος σημασίας για το μηχανικό που ενδιαφέρεται να στηριχτεί σε αυτό και να βγάλει συμπεράσματα χρήσιμα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Στην πράξη, έχοντας κανείς λάβει πειραματικά όσες από τις καμπύλες μαγνήτισης απαιτούνται για τον προσδιορισμό κάποιων εκ των παραμέτρων του μοντέλου (π.χ. στατικός βρόχος, παρθενική καμπύλη, ανυστερητική καμπύλη), αναζητά τις κατάλληλες τιμές των υπολοίπων, ώστε τα προβλεπόμενα από το μοντέλο να περιγράφουν τα όσα παρατηρούνται πειραματικά. Έτσι, ένα μοντέλο δε μπορεί να περιγράψει τις καμπύλες μαγνήτισης όλων των υλικών, όποιες τιμές κι αν επιλέξουμε για αυτές τις προσαρμόσιμες παραμέτρους και συνεπώς, δεν υπάρχει μέχρι στιγμής ένα γενικό μοντέλο που να καλύπτει όλα τα υλικά. Επίσης, ένα μοντέλο το οποίο αρχικά δομήθηκε για μια συγκεκριμένη κατηγορία υλικών, μπορεί πολλές φορές, με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων του, να περιγράψει αρκετά ικανοποιητικά τη συμπεριφορά και άλλων υλικών.
- Η υπεραπλούστευση στις θεωρήσεις των διαφόρων φαινομένων οδηγεί συχνά σε λανθασμένα αποτελέσματα. Έτσι για παράδειγμα, αντί του μοντέλου του Globus που αναφέρεται στους μαλακούς φερρίτες, οι σχεδιαστές μαγνητικών στοιχείων χρησιμοποιούν συνήθως το μοντέλο των Jiles–Atherton (χρησιμοποιείται και στα λογισμικά ανάλυσης κυκλωμάτων, όπως π.χ. στο PSpice), που δίνει γι' αυτά τα υλικά

πιο ακριβή αποτελέσματα από το προηγούμενο, εφόσον βέβαια έχουν επιλεγεί κατάλληλες τιμές για τις παραμέτρους του μοντέλου.

- Μετά την αρχική διατύπωση των μοντέλων, διάφοροι ερευνητές, μεταξύ των οποίων μερικές φορές και οι ίδιοι οι εμπνευστές τους, τα συμπλήρωσαν δίνοντάς τους μια τροποποιημένη μορφή ώστε να λαμβάνονται υπόψη με περισσότερη ακρίβεια κάποια φαινόμενα, διευρύνοντας έτσι το πεδίο εφαρμογής τους. Αντικείμενα τέτοιων τροποποιήσεων έγιναν κυρίως τα πιο δημοφιλή από αυτά: τα μοντέλα του Preisach, των Jiles–Atherton, αλλά και των Stoner–Wohlfarth.

Πάντως, πρέπει να αναφερθεί πως εκτός από τα παραπάνω κλασικά πλέον μοντέλα για την περιγραφή της μακροσκοπικής μαγνητικής συμπεριφοράς των σιδηρομαγνητικών υλικών, έχουν γίνει κατά καιρούς διάφορες άλλες προσπάθειες με μικρή ή μεγαλύτερη επιτυχία.

3.10. Απώλειες δινορρευμάτων – εκφράσεις για τις συνολικές απώλειες του πυρήνα

Τα φαινόμενα της μαγνήτισης και της υστέρησης, όπως είδαμε, επηρεάζονται από ποικίλους παράγοντες, των οποίων η μελέτη οδήγησε στην ανάπτυξη απλών, περιγραφικών μοντέλων. Το φαινόμενο της εμφάνισης δινορρευμάτων όμως, αν και επίσης επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες (οι διαστάσεις του δείγματος για παράδειγμα), υπόκειται αποκλειστικά σε νόμους γνωστούς σε μας από την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell και έτσι η κατανόηση και η ολοκληρωμένη περιγραφή του δε μπορεί παρά να στηρίζονται στην ακριβή επίλυση των σχετικών εξισώσεων. Αποδεικνύεται όμως τελικά ότι σειρά παραγόντων, που σχετίζονται με τη μικροσκοπική δομή των υλικών, εισάγουν προβλήματα, για την επίλυση των οποίων η ηλεκτρομαγνητική θεωρία δεν επαρκεί. Η χωρική ανισοτροπία των διαφόρων υλικών ή των στοιχειωδών σωματίων που τα απαρτίζουν ως προς τις ηλεκτρικές και μαγνητικές τους ιδιότητες, η μεταβολή αυτών των ιδιοτήτων με τη συχνότητα και τη θερμοκρασία, καθώς και η σύζευξη του ηλεκτρικού και του μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου σε κλίμακα στοιχειωδών μαγνητικών δίπολων, είναι μερικές μόνον από αυτές. Τελικά, για τις ανάγκες των πρακτικών εφαρμογών καταλήγει κανείς πάλι σε απλές σχέσεις (μοντέλα), συχνά διαφορετικές για τα διάφορα υλικά και τις διάφορες συνθήκες ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης. Οι σχέσεις αυτές προκύπτουν συνήθως από πειραματικές παρατηρήσεις σε τυπικές εφαρμογές ή και από κάποιες απλές υποθέσεις. Επιπλέον, ο πειραματικός προσδιορισμός των απωλειών λόγω δινορρευμάτων έχει ως προϋπόθεση το διαχωρισμό τους από τις απώλειες υστέρησης, ο οποίος σπάνια είναι εύκολη υπόθεση. Γι' αυτούς τους λόγους, η πειραματική επιβεβαίωση και η εύρεση των πεδίων εφαρμογής των διαφόρων μοντέλων για τις απώλειες δινορρευμάτων είναι εξαιρετικά δύσκολες, ενώ στις εκφράσεις για τις απώλειες πυρήνα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία τα δυο είδη απωλειών συχνά εμφανίζονται μαζί.

Όσον αφορά την αύξηση των απωλειών πυρήνα με τη συχνότητα, μπορεί κανείς να καταλάβει τους λόγους που οδηγούν σε αυτή, αν και η ακριβής αναλυτική έκφραση που την περιγράφει σε κάθε ειδική περίπτωση δεν είναι αυτονόητη. Στις χαμηλές συχνότητες που δε λαμβάνουν χώρα πρόσθετα φαινόμενα, οι απώλειες υστέρησης είναι ανάλογες της συχνότητας, αφού είναι ανάλογες του εμβαδού του βρόχου υστέρησης και άρα, εξαρτώνται αναλογικά από το πόσες φορές διαγράφεται ο βρόχος υστέρησης στη μονάδα του χρόνου.

Αντίστοιχα, αφού η επαγόμενη τάση μεταξύ δυο στοιχειωδών επιφανειών του υλικού είναι ανάλογη της πρώτης χρονικής παραγώγου της μαγνητικής επαγωγής και οι απώλειες δινορρευμάτων ανάλογες του γινομένου της τάσης επί το αντίστοιχο ρεύμα, οι απώλειες δινορρευμάτων θα είναι ανάλογες του τετραγώνου της συχνότητας.

Μια πρώτη παρατήρηση λοιπόν είναι πως, για ημιτονοειδή διέγερση, οι ειδικές απώλειες (απώλειες ανά μονάδα όγκου) του πυρήνα των μαγνητικών στοιχείων μπορούν να δοθούν προσεγγιστικά από μια σχέση της μορφής:

$$P_v = P_{v,hyst} + P_{v,eddy} = C_1(f, T)\Delta B^{x(f, T)} f + C_2(f, T)\Delta B^{y(f, T)} f^2 \quad (3.13)$$

όπου $P_{v,hyst}$ και $P_{v,eddy}$ είναι οι ειδικές απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων αντίστοιχα και ΔB η διαφορά ανάμεσα στην μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής. Τα C_1 και C_2 είναι συναρτήσεις των ιδιοτήτων του υλικού, της συχνότητας f και της θερμοκρασίας T , ενώ οι εκθέτες x, y είναι επίσης συναρτήσεις της συχνότητας και της θερμοκρασίας, γενικά διαφορετικές για κάθε υλικό. Σχετικά με την εξάρτηση των ειδικών απωλειών από τη θερμοκρασία, σημειώνεται πως σε αρκετούς τύπους φερριτών αυτές ελαχιστοποιούνται όταν η θερμοκρασία λαμβάνει δεδομένη τιμή, η οποία συνήθως κυμαίνεται στην περιοχή μεταξύ 60°C και 85°C [12], [13], που είναι και τυπική περιοχή θερμοκρασιών για λειτουργία υπό πλήρες φορτίο. Σε μια πρώτη προσέγγιση και γενικά σε πρακτικές εφαρμογές στις οποίες η συχνότητα δε μεταβάλλεται σημαντικά, οι συντελεστές C_1 και C_2 και οι εκθέτες x, y θεωρούνται σταθεροί. Μάλιστα, για πολλά υλικά, μεταξύ των οποίων και οι φερρίτες, οι εκθέτες x, y είναι περίπου ίσοι με το 2 σε μεγάλη περιοχή συχνοτήτων [19]. Επίσης, είναι προφανές ότι για σχετικά χαμηλές συχνότητες (τυπικά $f < 100\text{kHz}$ για αρκετούς τύπους φερρίτη) στις οποίες η ηλεκτρική αγωγιμότητα των φερριτών είναι πολύ μικρή και η ένταση του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου στον όγκο του πυρήνα είναι επίσης σχετικά μικρή, η τιμή της C_2 είναι περίπου μηδέν, δηλαδή οι απώλειες δινορρευμάτων θεωρούνται αμελητέες.

Μελετώντας πειραματικά δεδομένα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, βλέπει κανείς ότι για ίδια ΔB και f οι απώλειες εξαρτώνται από την κυματομορφή της εφαρμοζόμενης διέγερσης. Μέσα από πειραματικές μετρήσεις, αναδεικνύεται το γεγονός ότι μεγάλες τιμές της χρονικής παραγώγου της μαγνητικής έντασης dH/dt σε μεγάλα τμήματα της περιόδου λειτουργίας έχουν σαν αποτέλεσμα τη διεύρυνση του βρόχου υστέρησης [9]. Με άλλα λόγια, η μορφή του βρόχου δεν καθορίζεται μόνον από τις ακραίες τιμές για τη μαγνητική ένταση αλλά και από τον τρόπο, στο πεδίο του χρόνου, με τον οποίο μεταβαίνει η μαγνητική ένταση από τη μια τιμή στην άλλη. Γενικά, αν θέλει κανείς να χρησιμοποιήσει την (3.13) για διάφορες κυματομορφές πέραν της ημιτονοειδούς, θα πρέπει να καθορίσει για ποια ζώνη συχνοτήτων της βασικής αρμονικής την εφαρμόζει και γι' αυτές τις συχνότητες να προσδιορίσει τις σωστές τιμές των C_1, C_2, x, y (οι οποίες γενικά θα είναι διαφορετικές από τις αντίστοιχες τιμές για ημιτονοειδή διέγερση).

Βέβαια, η σχέση (3.13) είναι ένας μόνο τρόπος να εκφράσει κανείς ένα πειραματικό αποτέλεσμα, που είναι η μεταβολή των ειδικών απωλειών ενός υλικού σε μεταβολές των παραμέτρων $f, \Delta B, T$. Παρόμοιες εκφράσεις έχουν διατυπωθεί ήδη από τα τέλη του 19ου αιώνα. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία βρίσκει κανείς εκφράσεις, όπως αυτή που συναντάμε στην [19]:

$$P_v = C_m f^{x'} \Delta B^{y'} (a - bT + cT^2) \quad (3.14)$$

όπου η μελέτη έχει γίνει για πολύ μικρούς πυρήνες σε σχήμα δακτυλίου, ώστε, λόγω των μικρών διαστάσεων του δείγματος, να περιορίζεται η ανάπτυξη δινορρευμάτων (χωρίς αυτά να είναι πάντα αμελητέα), ιδίως στις συχνότητες των αρκετών εκατοντάδων kHz. Και πάλι το ζητούμενο είναι ο πειραματικός προσδιορισμός, για κάθε υλικό, των σταθερών C_m , x' , y' , a , b , c για τις διάφορες περιοχές συχνοτήτων, όπου σε περίπτωση μη ημιτονοειδούς διέγερσης, με f συμβολίζεται η συχνότητα της βασικής αρμονικής και με ΔB το πλάτος, από κορυφή σε κορυφή, της μαγνητικής επαγωγής. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο πως η ύπαρξη μιας συνεχούς συνιστώσας για τη μαγνητική επαγωγή, στη γενική περίπτωση, οδηγεί σε διαφορετικές απώλειες πυρήνα απ' ότι για το ίδιο ΔB αλλά χωρίς συνεχή συνιστώσα, αφού ο διαγραφόμενος βρόχος είναι διαφορετικός. Πρέπει λοιπόν να καθορίζονται σαφώς οι συνθήκες διέγερσης όταν παρουσιάζονται σχέσεις όπως οι (3.13) και (3.14). Επίσης, μια διαφορετική επιλογή για την έκφραση των απωλειών πυρήνα είναι η χρήση του πλάτους της πρώτης αρμονικής της μαγνητικής επαγωγής αντί του συνολικού της πλάτους. Σε μια προσπάθεια να αποφευχθεί η διαίρεση του φάσματος συχνοτήτων σε περιοχές, η (3.14) μπορεί εναλλακτικά να γραφτεί ως εξής [19]:

$$P = C_m f^{x(f)} \Delta B^{y(f)} (c_1 - c_2 T + c_3 T^2) \quad (3.15)$$

όπου c_1 , c_2 , c_3 θετικές σταθερές.

Είδαμε πως η σχέση (3.13) θεωρείται πολύ απλοποιημένη για να οδηγήσει σε ακριβή αποτελέσματα και δίνει την αληθινή διάσταση του προβλήματος μόνο στις χαμηλές συχνότητες. Για να επεκταθεί η εφαρμογή της σε υψηλότερες συχνότητες πρέπει να θεωρήσει κανείς, όπως άλλωστε συμβαίνει στην πραγματικότητα για κάθε υλικό, ότι όλες οι σταθερές που εμφανίζονται σε αυτή, κάθε άλλο παρά «σταθερές» είναι, αλλά εξαρτώνται από τη συχνότητα και τη θερμοκρασία.

Παρατηρείται λοιπόν πως οι απώλειες δινορρευμάτων, πάνω από κάποιο όριο συχνότητας, ακολουθούν μια εξάρτηση που ξεφεύγει από το νόμο του τετραγώνου που εμφανίζεται στην (3.13). Για να περιγραφεί το φαινόμενο, έχει προταθεί ώστε να υπολογίζονται οι ειδικές απώλειες δινορρευμάτων από δύο όρους, τις κλασικές (classical) P_{cl} και τις πρόσθετες (excess) P_{ex} ή ανώμαλες (anomalous). Έτσι, για ημιτονοειδές B , προκύπτει πως οι ειδικές απώλειες δινορρευμάτων δίνονται από την έκφραση:

$$P_{v, eddy} = P_{cl} + P_{ex} = K_1 (fB)^2 + K_2 (fB)^{3/2} \quad (3.16)$$

με K_1 , K_2 σταθερές. Για άλλες κυματομορφές προκύπτουν αντίστοιχες εκφράσεις. Μετά από εκτενή πειραματική και θεωρητική μελέτη προκύπτει ότι υψηλές τιμές για την παράγωγο της μαγνητικής επαγωγής για μεγάλα τμήματα της περιόδου του σήματος θα έχουν σαν αποτέλεσμα αυξημένες απώλειες δινορρευμάτων, πράγμα αναμενόμενο αφού για τα ίδια χρονικά διαστήματα θα έχουμε υψηλές εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου στον όγκο του πυρήνα. Τα παραπάνω αρχικά εξήχθησαν για την περίπτωση που ο πυρήνας αποτελείται από ελάσματα μαλακού μαγνητικού υλικού, αν και αργότερα χρησιμοποιήθηκαν και για τη μοντελοποίηση των απωλειών σε πυρήνες φερριτή, που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται σε διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος.

Για το διαχωρισμό των τριών –πλέον– όρων των απωλειών, η μέθοδος, που προτείνεται και περιγράφεται λεπτομερώς στην [23], στηρίζεται στις υποθέσεις ότι οι απώλειες

υστέρησης είναι ανάλογες της συχνότητας (ότι δηλαδή οι απώλειες υστέρησης ανά κύκλο είναι σταθερές) και ότι οι εκθέτες στην εξάρτηση των P_{cl} και P_{ex} από τη συχνότητα παραμένουν σταθεροί (π.χ. το 2 και το 3/2 στην (3.16)). Τότε, αν μετρηθούν οι απώλειες σε πολύ χαμηλή συχνότητα ώστε να προσδιοριστούν οι απώλειες υστέρησης (η μέθοδος δεν εφαρμόζεται αν υπάρχουν και ελάσσονες βρόχοι) και είναι γνωστές οι συνολικές απώλειες (συνήθως δίνονται από τον κατασκευαστή του φερρίτη μέχρι κάποιου ορίου συχνότητας), είναι απλή υπολογιστική εργασία ο προσδιορισμός των σταθερών αναλογίας για τις P_{cl} και P_{ex} (π.χ. οι K_1 και K_2 αν αναφερθούμε στην (3.16)) και άρα ο διαχωρισμός των τριών όρων. Με βάση όμως τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για τη μεταβολή του βρόχου υστέρησης με τη συχνότητα, αλλά και με τη μορφή στο χρόνο της επιβαλλόμενης διέγερσης, καταλαβαίνουμε ότι η πρώτη υπόθεση ήδη είναι επισφαλής, ιδίως αν η συχνότητα αυξηθεί πέρα από το 1kHz. Για το λόγο αυτό έχουν γίνει προσπάθειες να συσχετιστούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν για ημιτονοειδή διέγερση με τα προκύπτοντα για μη ημιτονοειδή, όπως είναι π.χ. οι τετραγωνικοί παλμοί, αλλά και πάλι μόνο για την περίπτωση ελασμάτων σιδήρου.

Ακόμη, καθώς ο διαχωρισμός των απωλειών δεν είναι δυνατός όταν ο βρόχος υστέρησης εμφανίζει και ελάσσονες βρόχους, έχουν γίνει μελέτες πάνω στο θέμα του συνδυασμού των εκφράσεων για τις απώλειες δινορρευμάτων με κάποιο από τα μοντέλα της υστέρησης με στόχο τη συνολική μοντελοποίηση των απωλειών πυρήνα. Το τελικό αποτέλεσμα τέτοιων μελετών είναι συχνά η μοντελοποίηση των απωλειών πυρήνα με βάση διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα, για περιορισμένα μόνο πεδία εφαρμογής [9]. Τα ισοδύναμα αυτά κυκλώματα μπορούν στη συνέχεια να εισαχθούν σε λογισμικά προσομοίωσης κυκλωμάτων, ώστε, εκτός από την παραμόρφωση των κυματομορφών τάσης και ρεύματος λόγω της μη γραμμικής σχέσης των B και H , να υπολογίζονται και οι απώλειες.

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, είναι σκόπιμο να αναφερθεί μια σημαντική διαπίστωση, που προκύπτει από τη μελέτη της βιβλιογραφίας σχετικά με το θέμα των απωλειών πυρήνα σε μαγνητικά στοιχεία. Βλέπουμε λοιπόν ότι οι φυσικοί μηχανισμοί που διέπουν την εμφάνιση των απωλειών αυτών μεταβάλλονται τόσο με τη συχνότητα, όσο και με το πλάτος διέγερσης και εξαρτώνται επίσης, τόσο από την ιδιαίτερη μορφή της μεταβολής των μεγεθών (μαγνητική επαγωγή και μαγνητική ένταση) στο πεδίο του χρόνου, όσο και από την ύπαρξη συνεχούς συνιστώσας σε αυτά. Μάλιστα, ο ακριβής χαρακτήρας των ενεργειακών αλληλεπιδράσεων και της εμφάνισης απωλειών, ως προς τις προαναφερθείσες παραμέτρους, μπορεί, για υλικό δεδομένης χημικής σύστασης, να διαφέρει ανάλογα με την ιστορία μαγνήτισής του ή τον τρόπο κατασκευής του (κρυσταλλική δομή). Είναι λοιπόν αδύνατον για τη μελέτη των απωλειών πυρήνα να βασιστεί κανείς στην αρμονική ανάλυση της εφαρμοζόμενης διέγερσης και να αναζητήσει την επίδραση κάθε αρμονικής συνιστώσας, ως ανεξάρτητης από εκείνη των υπολοίπων αρμονικών. Με άλλα λόγια, δε μπορούμε να αναζητήσουμε τις απώλειες πυρήνα εφαρμόζοντας την ανάλυση Fourier, όπως κάνουμε για τις απώλειες χαλκού. Μοναδικό σημείο προσοχής σε συνθήκες μη ημιτονοειδούς διέγερσης είναι, όπως προαναφέρθηκε, το αν στους διάφορους υπολογισμούς για τις απώλειες πυρήνα θα χρησιμοποιηθεί το πλάτος της πρώτης αρμονικής της μαγνητικής επαγωγής ή το συνολικό της πλάτος, με βασικό πάντα μέλημα την πρόβλεψη και αποφυγή του κορεσμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχεδίαση - κατασκευή μαγνητικών στοιχείων

4.1. Γενικά για τη σχεδίαση μαγνητικών στοιχείων

Κατά τη σχεδίαση ενός μαγνητικού στοιχείου για μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος, επιλέγει κανείς το καταλληλότερο από τα διαθέσιμα σύρματα κυκλικής διατομής, ανάλογα με την τιμή του ρεύματος και τη συχνότητα λειτουργίας και σε συνάρτηση πάντα με τους διαθέσιμους μαγνητικούς πυρήνες. Τυλίγματα με σύρμα τετραγωνικής ή ορθογώνιας διατομής, διαστάσεων διατομής της τάξης του 1mm ή μικρότερες, δε συναντώνται σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων και μικρών – μέτριων επιπέδων ισχύος (μέχρι περίπου 500W), καθώς η τοποθέτηση ενός τέτοιου σύρματος δε θα προσέφερε κανένα πλεονέκτημα, ενώ αντίθετα θα οδηγούσε σε μικρό παράγοντα πλήρωσης χαλκού. Αυτό διότι οι μικρές διαστάσεις της διατομής του θα καθιστούσαν προβληματική την προσπάθεια τακτοποιημένης τοποθέτησης των σπειρών σε μια στρώση χωρίς να υπάρχει περιστροφή του σύρματος. Αντίθετα, σε εφαρμογές συχνοτήτων δικτύου και μεγάλων ρευμάτων, αγωγοί ορθογώνιας διατομής χρησιμοποιούνται για την επίτευξη μεγάλου συντελεστή πλήρωσης χαλκού και μείωση της σκέδασης.

Σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, όταν αυξάνεται το ρεύμα ή η συχνότητα λειτουργίας, συνήθως γίνεται χρήση πολύκλωνου αγωγού. Όταν όμως η τιμή του ρεύματος γίνεται πολύ μεγάλη η κατασκευή πολύκλωνου σύρματος με μεγάλο αριθμό κλώνων, αλλά και η τοποθέτησή του στο διαθέσιμο χώρο του παραθύρου του μαγνητικού στοιχείου, με τη βοήθεια π.χ. μιας μπομπίνας (ή καρκάσας, όπως λέγεται κι αλλιώς), γίνεται εξαιρετικά προβληματική. Σε αυτή την περίπτωση είναι πιο πρακτικό να φτιάξει κανείς το τυλίγμα με φύλλα χαλκού. Σε μια τέτοια περίπτωση, αποδεικνύεται [9] πως το βέλτιστο πάχος για το χαλκό (ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες χαλκού) είναι

$$\Delta_{optimum} = \sqrt[4]{3/\sqrt{m}} \quad (4.1)$$

όπου m είναι ο αριθμός των στρώσεων.

Σε σύγχρονες εφαρμογές, στις οποίες η μείωση του μεγέθους των μαγνητικών στοιχείων είναι συχνά η βασικότερη απαίτηση, είναι πλέον τυπική η χρήση επίπεδων μαγνητικών στοιχείων με τυλίγματα τυπωμένου κυκλώματος, όπως θα δούμε αναλυτικότερα παρακάτω.

Αν και σε μερικές εφαρμογές είναι αυστηρά καθορισμένες οι συνθήκες για τη λειτουργία των μαγνητικών στοιχείων, στις περισσότερες των περιπτώσεων οι διάφορες παράμετροι λειτουργίας τους (π.χ. συχνότητα, τάση, ρεύμα, θερμοκρασία) μεταβάλλονται διαρκώς. Επίσης, σχεδόν πάντα είναι κρίσιμης σημασίας η απόκριση των μετατροπέων (άρα και των μαγνητικών στοιχείων) σε μεταβατικά φαινόμενα.

Παρά την πολυετή εξέλιξη στον τομέα των εφαρμογών ηλεκτρονικών ισχύος, οι υπολογισμοί των απωλειών στα μαγνητικά στοιχεία συχνά στηρίζονται στη συσσωρευμένη γνώση, όπως αυτή εκφράζεται μέσα από διάφορους εμπειρικούς κανόνες και συνδυάζεται με τα πειραματικά δεδομένα που προσφέρουν οι κατασκευαστές φερριτών [2], [3], [24], [25], [19], [26]. Οι εμπειρικές αυτές σχέσεις συνήθως περιγράφουν τη λειτουργία των μαγνητικών

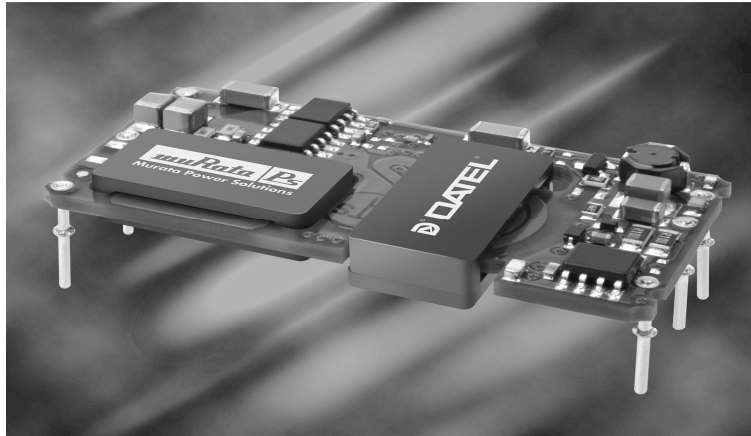
στοιχείων μέσα σε στενά όρια μεταβολής των διαφόρων παραμέτρων, χωρίς να υπάρχουν γενικές μέθοδοι υπολογισμού των απωλειών που να καλύπτουν όλες τις σχεδιαστικές επιλογές. Ως εκ τούτου, κάθε μαγνητικό στοιχείο για κάθε διαφορετική εφαρμογή και για κάθε διαφορετική κατάσταση λειτουργίας αποτελεί κατ' ουσίαν ένα διαφορετικό πρόβλημα που απαιτεί ειδική αντιμετώπιση. Βέβαια, στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει και πληθώρα θεωρητικών μελετών, που όμως κατά κανόνα εστιάζονται σε ειδικά προβλήματα. Μελετώντας τη διεθνή βιβλιογραφία, παρατηρούμε ότι η ακρίβεια και η απλότητα στη διατύπωση των αποτελεσμάτων οποιουδήποτε θεωρητικού μοντέλου έρχονται σε αντιδιαστολή με τη γενικότητά του και συνήθως η προσπάθεια εστιάζεται στην κατεύθυνση ανάδειξης των δύο πρώτων [9].

Οφείλουμε βέβαια να μην ξεχνάμε ότι οι απώλειες ισχύος δεν είναι το μόνο πρόβλημα που σχετίζεται με την ύπαρξη μαγνητικών στοιχείων σε μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος. Σε αρκετές περιπτώσεις είναι επίσης σημαντικές κάποιες άλλες παράμετροι, όπως για παράδειγμα η ηλεκτρομαγνητική εκπομπή προς το περιβάλλον, η παραμόρφωση των κυματομορφών τάσης – ρεύματος λόγω της μη γραμμικής σχέσης μεταξύ μαγνητικής έντασης και μαγνητικής επαγωγής στο υλικό του πυρήνα, καθώς και οι ταλαντώσεις σε τάση και ρεύμα όταν οι παρασιτικές χωρητικότητες του μαγνητικού στοιχείου συνδυάζονται με τη διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα. Τέλος, η επαγωγή σκέδασης στους μετασχηματιστές είναι ένα χαρακτηριστικό που, ανάλογα με την εφαρμογή, μπορεί να αποτελεί πλεονέκτημα ή σοβαρό πρόβλημα.

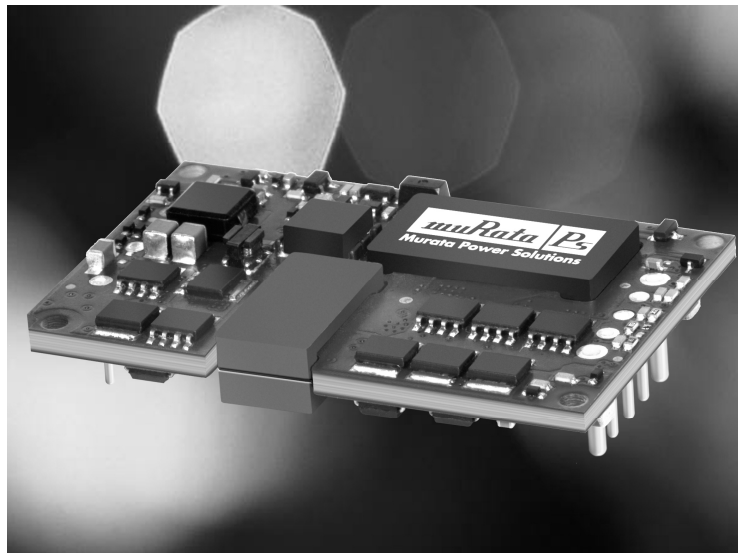
4.2. Επίπεδα μαγνητικά στοιχεία με τυλίγματα τυπωμένου κυκλώματος

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει επιτακτικότερη από ποτέ η ανάγκη για μείωση του μεγέθους των τροφοδοτικών διατάξεων, κυρίως σε ηλεκτρονικές συσκευές, όπως για παράδειγμα οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Τα παθητικά στοιχεία (μαγνητικά στοιχεία – πυκνωτές) αποτελούν σημαντικό ποσοστό στο συνολικό όγκο μιας τέτοιας διάταξης και βασική τεχνική για τη μείωση του μεγέθους τους αποτελεί η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας. Με τη συχνότητα να κυμαίνεται στην περιοχή από 700kHz ως 10MHz δίνεται η δυνατότητα ώστε η πυκνότητα ισχύος στα μαγνητικά στοιχεία να είναι πολλαπλάσια ως προς τις αντίστοιχες τιμές στις συνήθεις διακοπτικές συχνότητες σε μετατροπείς ισχύος (100 - 200kHz). Το τελικό αποτέλεσμα είναι τροφοδοτικά με πυκνότητα ισχύος διέλευσης που, για ισχύ της τάξης των μερικών δεκάδων ή λίγων εκατοντάδων Watt, μπορεί να είναι ακόμη και μεγαλύτερη από $6\text{W}/\text{cm}^3$, όταν σε ένα γραμμικό τροφοδοτικό αντίστοιχες τυπικές τιμές είναι μικρότερες από $0.12\text{W}/\text{cm}^3$ [27]. Μια άλλη δυνατότητα που επίσης προσφέρουν οι πολύ υψηλές διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας είναι η δημιουργία τροφοδοτικών διατάξεων μικρής ισχύος (της τάξης του 1W) σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος [28].

Προκειμένου όμως να μειωθεί το προφίλ των τροφοδοτικών διατάξεων επιβάλλεται να χρησιμοποιηθούν επίπεδα μαγνητικά στοιχεία (planar magnetics), με τυπικό πάχος της τάξης του 1cm, στα οποία το τυλίγμα αποτελείται από αγωγίμους δρόμους επί της πλακέτας πάνω στην οποία μπορεί να βρίσκεται τόσο το κύκλωμα που τροφοδοτείται, όσο και το ίδιο το τροφοδοτικό. Στην περίπτωση ενός μετασχηματιστή για παράδειγμα, το πρωτεύον και το δευτερεύον (ή τα δευτερεύοντα) μπορεί να βρίσκονται αντίστοιχα τυπωμένα στις δυο πλευρές της πλακέτας ή στις διάφορες στρώσεις που μπορεί αυτή να περιέχει. Στο Σχ. 4.1



(α)



(β)

Σχήμα 4.1: Εμπορικές προτάσεις για τροφοδοτικά χαμηλού προφίλ, που περιλαμβάνουν επίπεδα μαγνητικά στοιχεία.(α): 30W, dc-dc, forward μετατροπέας, $2.3 \times 4.9 \times 0.9 \text{ cm}$ ($\sim 3 \text{ W/cm}^3$). (β): 165 W, dc-dc, $3.7 \times 5.8 \times 1 \text{ cm}$ ($\sim 7.5 \text{ W/cm}^3$). Ο βαθμός απόδοσης σε αμφότερες τις περιπτώσεις είναι 90%. [28]

βρίσκονται οι φωτογραφίες δύο εμπορικών τροφοδοτικών [28] με πάχος της τάξης του 1cm, το οποίο, όπως γίνεται φανερό, καθορίζεται από το πάχος των επίπεδων μαγνητικών στοιχείων. Με τους συνηθισμένους τύπους πυρήνα (π.χ. E, UI κλπ) και χρήση αγωγών κυκλικής διατομής ή φύλλων χαλκού για τα τυλίγματα, δεν είναι εφικτή μια τόσο σημαντική μείωση του ύψους του μαγνητικού στοιχείου.

Στα επίπεδα μαγνητικά στοιχεία ο λόγος της εξωτερικής τους επιφάνειας προς την ισχύ διέλευσης λαμβάνει τιμές αρκετά μεγαλύτερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές στις

κλασικές γεωμετρίες πυρήνων κι έτσι δίνεται η δυνατότητα για αποτελεσματικότερη ψύξη, ακόμη και χωρίς εξαναγκασμένη ροή αέρα. Ακόμη, η μεγάλη επίπεδη εξωτερική επιφάνεια των επίπεδων πυρήνων δίνει τη δυνατότητα τοποθέτησης εξωτερικών ψυκτρών αν απαιτείται. Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει η δυνατότητα ύπαρξης ανοιγμάτων επί του πυρήνα για την ελεύθερη ροή αέρα στην υποδοχή (slot) όπου τοποθετείται το τυπωμένο τύλιγμα. Έτσι, για τα τυλίγματα, η ψύξη είναι αρκετά πιο εύκολη απ' ό,τι σε ένα σύνθετος τύλιγμα, δεδομένης και της μεγάλης επιφάνειας που αυτά παρουσιάζουν σε επαφή με τον αέρα. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής απαγωγής θερμότητας από μια θερμοαγώγιμη επιφάνεια (π.χ. μεταλλική) με φυσική ροή αέρα είναι περίπου ίσος με $15\text{W/m}^2\text{grad}$.

Προκειμένου για ένα σπειροειδές τύλιγμα επί της πλακέτας, διαπιστώνει κανείς εύκολα ότι οι απώλειες χαλκού υψηλών συχνοτήτων μπορούν να είναι εξαιρετικά χαμηλές, συγκριτικά πάντα με τις κλασικές γεωμετρίες μαγνητικών στοιχείων, αφού συνήθως πρόκειται ουσιαστικά για μια μόνο στρώση (σημειώνεται ότι οι απώλειες είναι προσεγγιστικά ανάλογες του τετραγώνου του πλήθους των στρώσεων [1]). Το γεγονός αυτό κάνει την επίπεδη γεωμετρία ιδανική για εφαρμογές στις οποίες απαιτείται ένα πηνίο να διαρρέεται από ρεύμα με σημαντική κυμάτωση υψηλής συχνότητας, αφού για τη μείωση των απωλειών της συνεχούς συνιστώσας μπορεί να γίνει αύξηση του πάχους των αγωγίμων δρόμων του τυλίγματος χωρίς μεγάλο κόστος σε απώλειες λόγω δινορρευμάτων.

Για ακόμα μεγαλύτερη μείωση των μεγεθών, όταν πρόκειται για πηνία, χρησιμοποιούνται ολοκληρωμένα μαγνητικά στοιχεία (integrated ή coupled magnetics). Η μέθοδος της ολοκλήρωσης των μαγνητικών στοιχείων, αν και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις επίπεδων μαγνητικών στοιχείων, εφαρμόζεται και στις συνήθεις γεωμετρίες μαγνητικών πυρήνων και έγκειται στην τοποθέτηση επί του ίδιου πυρήνα περισσότερων του ενός πηνίων, όταν η διαφορά φάσης μεταξύ των ρευμάτων τους ευνοεί μια τέτοια επιλογή. Συνήθως πρόκειται για δύο πηνία με τις εναλλασσόμενες συνιστώσες των ρευμάτων τους να παρουσιάζουν διαφορά φάσης 180° , αλλά μπορεί να είναι και περισσότερα. Σε μια τέτοια περίπτωση η μαγνητική ροή σε κάποιο ή κάποια τμήματα του πυρήνα μπορεί να ελαχιστοποιείται ή και να μηδενίζεται, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των απωλειών πυρήνα ή ακόμη και τη δυνατότητα απάλειψης τμημάτων του πυρήνα, που διαφορετικά θα διαρρέονταν από μηδενική μαγνητική ροή. Αποδεικνύεται επίσης [29] ότι με την ολοκλήρωση των μαγνητικών στοιχείων, είναι πιο εύκολη η χρήση τοπολογιών και μεθόδων παλμοδότησης που οδηγούν σε μείωση των απωλειών στα διακοπτικά στοιχεία, όπως π.χ. έναυση – σβέση των στοιχείων υπό μηδενική τάση ή μηδενικό ρεύμα (ZVS ή ZCS). Ακόμη, αναφέρεται ότι για συχνότητες λειτουργίας των τροφοδοτικών διατάξεων μεγαλύτερες από 1MHz και για ισχύ μικρότερη από 100W αναζητούνται από τους ερευνητές τα πιθανά πλεονεκτήματα των επίπεδων μαγνητικών στοιχείων χωρίς πυρήνα.

Με το μέγεθος του τροφοδοτικού επαρκώς μικρό δίνεται η δυνατότητα ώστε αυτό να βρίσκεται σε άμεση εγγύτητα με το κύκλωμα υπό τροφοδότηση (π.χ. λογικά κυκλώματα, απομακρυσμένοι αισθητήρες κλπ), με αποτέλεσμα τη δραστική μείωση των γραμμών τροφοδοσίας, άρα και των ωμικών απωλειών σε αυτές. Σε τυπικές περιπτώσεις εντοπισμένης τροφοδότησης η λειτουργία των ημιαγωγικών διακοπών γίνεται σε συχνότητες ως 10MHz για ισχύ μικρότερη από 10W. Για παράδειγμα, στην [30] λανσάρεται ένα προϊόν για ισχύ 8.2W, με συχνότητα λειτουργίας 4MHz και πυκνότητα ισχύος διέλευσης 2.3W/cm^3 . Για τροφοδοτικές διατάξεις με μετατροπείς συντονισμού ή ημισυντονισμού και για ισχύ μεγαλύτερη από λίγες δεκάδες Watt, οι συχνότητες λειτουργίας σε εμπορικές εφαρμογές κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 700kHz και 2MHz, ενώ διατάξεις που λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο. Βέβαια, επίπεδα μαγνητικά στοιχεία δε χρησιμοποιούνται μόνο σε εφαρμογές με συχνότητες της τάξης των MHz. Ένας επίπεδος μετασχηματιστής για ισχύ 200W και συχνότητα λειτουργίας 200kHz, για

παράδειγμα, μπορεί να έχει πάχος τυπικά ίσο με 0.7cm και μεγάλες διαστάσεις της τάξης των λίγων cm.

Τα επίπεδα μαγνητικά στοιχεία όμως παρουσιάζουν και μειονεκτήματα. Σε μετατροπείς που λειτουργούν σε συχνότητες άνω του 1MHz χρησιμοποιούνται συνήθως οι τοπολογίες Forward ή Flyback ημισυντονισμού κι έτσι απαιτείται η ύπαρξη διακένου στα μαγνητικά στοιχεία, είτε πρόκειται για πηνίο, είτε για μετασχηματιστή απομόνωσης. Επιπλέον, στα μαγνητικά στοιχεία, ανεξάρτητα από την αναγκαιότητα ή μη για αποθήκευση ενέργειας, συχνά τοποθετείται ένα έστω μικρό διάκενο προκειμένου η μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα και κατ' επέκταση και η επαγωγή του στοιχείου να μην επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Σε αντίθεση όμως με τους συνήθεις τύπους πυρήνων, στους οποίους το πεδίο διακένου επηρεάζει ένα μικρό τμήμα του τυλίγματος και αυξάνει τοπικά τις απώλειες [9], στα επίπεδα μαγνητικά στοιχεία το φαινόμενο δύναται να λάβει μεγάλη έκταση. Για τον περιορισμό του προβλήματος αυτού, στο σχεδιασμό του πυρήνα επιβάλλεται η ύπαρξη υποδοχής για τα τυλίγματα που να έχει μεγάλο βάθος (σχετικά ως προς το πάχος της πλακέτας), ώστε να είναι εφικτή η τοποθέτηση των τυλιγμάτων μακριά από το διάκενο. Αυτή η σχεδίαση όμως συνοδεύεται από μικρό παράγοντα πλήρωσης χαλκού της υποδοχής και μικρό συντελεστή σύζευξης μεταξύ των τυλιγμάτων [9]. Υπάρχουν βέβαια και άλλες σχεδιαστικές λύσεις ώστε να περιοριστούν τα προβλήματα που δημιουργεί η ύπαρξη διακένου, κάθε μια από τις οποίες έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η επιλογή κάθε φορά της βέλτιστης λύσης υπαγορεύεται από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Πρόσθετα προβλήματα στα επίπεδα μαγνητικά στοιχεία αποτελούν οι σχετικά σπουδαίες τιμές που ενδέχεται να λαμβάνουν η σκέδαση (όπως ήδη αναφέρθηκε) και οι παρασιτικές χωρητικότητες, μεγέθη τα οποία είναι πολύ σημαντικά για την ορθή λειτουργία των τοπολογιών συντονισμού ή ημισυντονισμού. Καθώς η απάλειψή τους δεν είναι πρακτικά εφικτή, το πρόβλημα τελικά ανάγεται στον ακριβή προσδιορισμό των τιμών τους και στην προσπάθεια να διατηρούνται κατά το δυνατόν σταθερά, ανεξάρτητα π.χ. από τη θερμοκρασία, τη συχνότητα ή τις συνθήκες φόρτισης της διάταξης, έτσι ώστε να συνυπολογίζονται στα στοιχεία συντονισμού L και C [31]. Με δεδομένη μάλιστα τη σχεδίαση των τυλιγμάτων σε τυπωμένο κύκλωμα, είναι εύκολη η διατήρηση σταθερών τιμών για αυτά τα μεγέθη στο σύνολο της γραμμής παραγωγής.

Τέλος, η κατά κανόνα υψηλή συχνότητα λειτουργίας, η ύπαρξη διακένου και η εγγύτητα της τροφοδοτικής διάταξης με τα λογικά κυκλώματα στις εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται επίπεδα μαγνητικά στοιχεία καθιστούν σημαντικότερη την ανάγκη για ηλεκτρομαγνητική θωράκισή τους ώστε να αποφεύγεται η διάχυση ηλεκτρομαγνητικού θορύβου.

4.3. Βέλτιστος σχεδιασμός μαγνητικών στοιχείων

Ο βέλτιστος σχεδιασμός των μαγνητικών στοιχείων δε μπορεί παρά να λαμβάνει υπόψη ταυτόχρονα τις απώλειες του πυρήνα και του τυλίγματος, με παράλληλη προσοχή να δίνεται στην επίτευξη της απαιτούμενης τιμής για το συντελεστή αυτεπαγωγής, αλλά και στον περιορισμό της επαγωγής σκεδάσεως και των παρασιτικών χωρητικοτήτων. Όλα αυτά βεβαίως, οφείλουν να γίνονται υπό την προοπτική ελαχιστοποίησης των αρνητικών παραγόντων (π.χ. όγκος, βάρος, κόστος και χρόνος κατασκευής, ακουστικός και ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος προς το περιβάλλον κ.α.) και της μεγιστοποίησης των ωφέλιμων παραμέτρων (π.χ. απόδοση). Θα δούμε στα επόμενα μερικούς τρόπους για να αντιμετωπίσει κανείς το σχεδιασμό ενός μετασχηματιστή ή ενός πηνίου ως ένα συνολικό πρόβλημα.

Όπως παρουσιάστηκε και στο Κεφ. 3, οι προσπάθειες των διαφόρων θεωρητικών μελετών, πάνω στο θέμα των απωλειών σε μαγνητικά στοιχεία, εστιάζονται στο πώς θα περιγραφούν με τρόπο απλό και κατανοητό φαινόμενα που στη φυσική τους είναι ιδιαίτερα περίπλοκα. Οι προσπάθειες αυτές θεωρούνται επιτυχείς όταν το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα μοντέλο του οποίου οι παράμετροι προκύπτουν εύκολα, είναι απλό στη χρήση του (πάντα σε συνδυασμό με τις δυνατότητες των σύγχρονων υπολογιστών) και μπορεί να περιγράψει εύστοχα τα ποικίλα επιμέρους φαινόμενα. Τελικός στόχος όλων αυτών είναι η βέλτιστη επιλογή, από το σχεδιαστή μαγνητικών στοιχείων, του υλικού και του σχήματος του πυρήνα, της διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας, καθώς και των υπολοίπων παραμέτρων των σχετικών με το τύλιγμα, ώστε να μεγιστοποιηθούν η πυκνότητα της ισχύος διέλευσης και η απόδοση, με παράλληλη ελαχιστοποίηση του όγκου και του κόστους. Συμβιβασμοί μεταξύ των αντικρουόμενων αυτών απαιτήσεων οδηγούν στις τελικές βέλτιστες επιλογές, πάντα υπό τη θεμελιώδη απαίτηση διατήρησης της θερμοκρασίας εντός αποδεκτών ορίων. Η παραπάνω λογική σχεδιασμού ενός μαγνητικού στοιχείου, δε μπορεί παρά να λαμβάνει υπ' όψιν όλους τους εμπλεκόμενους παράγοντες (δηλαδή τον πυρήνα, το τύλιγμα, αλλά και ολόκληρη την υπόλοιπη διάταξη).

Το πρώτο το οποίο θα πρέπει ίσως να σκεφτεί κανείς κατά τη σχεδίαση ενός μαγνητικού στοιχείου είναι ότι η συχνότητα οφείλει να παραμείνει κάτω από κάποιο όριο πέραν του οποίου οι απώλειες αυξάνονται υπέρμετρα και μάλιστα με τρόπο άγνωστο. Στα προηγούμενα κεφάλαια αναφέρθηκαν κάποιοι από τους λόγους που οδηγούν σε έναν τέτοιο περιορισμό, όπως είναι η απότομη αύξηση των απωλειών δινορρευσμάτων πάνω από κάποια συχνότητα, καθώς και τα χωρητικά ρεύματα στο τύλιγμα, τα οποία, σε μη εξεζητημένες κατασκευές, αρχίζουν να δημιουργούν προβλήματα απωλειών και ταλαντώσεων του ρεύματος από σχετικά χαμηλές συχνότητες (λίγες εκατοντάδες kHz). Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα πως για εφαρμογές μετατροπών ισχύος, δύσκολα κανείς θα ξεπεράσει συχνότητες της τάξης των 2MHz χωρίς να καταφύγει σε ειδικές σχεδιαστικές λύσεις, όπως είναι π.χ. τα μαγνητικά στοιχεία τυπωμένου κυκλώματος. Αυτό βέβαια δε σημαίνει ότι οι κλασικές σχεδιαστικές μέθοδοι δεν έχουν καμιά εφαρμογή σε αυτές τις συχνότητες, αλλά, εξαιτίας των πρόσθετων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα, η θεωρητική ανάλυση της μεταβολής των απωλειών κατά την μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων δεν είναι εύκολη, οπότε και ο σχεδιασμός ακολουθεί τη διαδικασία των διαδοχικών δοκιμών με βάση εμπειρικούς κανόνες, ακόμα και κατά την ανάπτυξη βιομηχανικών προϊόντων.

Η απλή λογική υπαγορεύει ότι αφού υπάρχει μια αύξουσα εξάρτηση των απωλειών από τη συχνότητα, αλλά και από το πλάτος ΔB της μαγνητικής επαγωγής, θα πρέπει με αύξηση της συχνότητας f να μειώνεται το ΔB , ώστε οι απώλειες να διατηρούνται κάτω από ένα επιθυμητό όριο. Ο καθορισμός αυτού του ορίου θα μπορούσε να γίνει υπό την απαίτηση της μέγιστης δυνατής απόδοσης. Σε εφαρμογές όμως στις οποίες η ισχύς που διακινείται είναι της τάξης των λίγων εκατοντάδων watt, (π.χ. τροφοδοτικά ηλεκτρονικών διατάξεων), είναι πιο σημαντικό να ελαχιστοποιείται ο όγκος και αυτή η απαίτηση περνά (μεταξύ άλλων) και μέσα από την ανάγκη για διατήρηση της θερμοκρασίας της διάταξης τροφοδοσίας σε λογικά επίπεδα. Σε αντίθετη περίπτωση υποχρεούται κανείς να τοποθετήσει διάφορες ψυκτικές διατάξεις, φυσικής ή εξαναγκασμένης απαγωγής της θερμότητας, με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του όγκου και του βάρους. Σημειώνεται εδώ ότι, σε μια τέτοια διάταξη, τα στοιχεία που κυρίως πάσχουν από αυξήσεις της θερμοκρασίας και στα οποία πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, είναι τα μαγνητικά στοιχεία και τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος.

Παρατηρείται ότι [9] σε ένα δεδομένο μετασχηματιστή, η τελική θερμοκρασία στην κατάσταση θερμικής ισορροπίας, είναι προσεγγιστικά ανάλογη του συνολικού ποσού των απωλειών σε αυτό και ανεξάρτητη του λόγου P_{Cu}/P_{Fe} των απωλειών χαλκού προς τις απώλειες πυρήνα, δηλαδή:

$$\frac{\Delta T}{P_{Cu} + P_{Fe}} \cong \sigma_{\alpha\theta} = R_{th} \quad (4.2)$$

Ο συμβολισμός R_{th} για την τιμή του λόγου αυτού προέρχεται από τον όρο «θερμική αντίσταση» (thermal resistance), καθώς έχει διαστάσεις θερμικής αντίστασης, έτσι όπως αυτή ορίζεται στη φυσική.

Εξάλλου, η ισχύς διελεύσεως P_{th} (throughput power) σε ένα μετασχηματιστή παλμοτροφοδοτικού, δίνεται από τη γενική σχέση αναλογίας:

$$P_{th} \sim N \cdot A_{eff} \cdot \Delta B \cdot f \sqrt{P_{Cu,w}/R_{eff}} \quad (4.3)$$

η ακριβής έκφραση της οποίας (η σταθερά αναλογίας) διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του μετατροπέα και τις εφαρμοζόμενες κυματομορφές. Σε αυτήν A_{eff} είναι η ενεργός διατομή του πυρήνα (ο πυρήνας δεν έχει σταθερή διατομή σε όλο το μήκος της μαγνητικής ροής και η A_{eff} αποτελεί κάτι σαν το «μέσο όρο»), ΔB το πλάτος (από κορυφή σε κορυφή) της μαγνητικής επαγωγής σε αυτόν ενώ N , R_{eff} και $P_{Cu,w}$ είναι ο αριθμός των σπειρών, η ενεργός αντίσταση (εξ. 3.5) και οι απώλειες χαλκού αντίστοιχα, ενός τυλίγματος του μετασχηματιστή (π.χ. του πρωτεύοντος). Η (4.3) πρέπει να συνδυάζεται και με την κατάλληλη έκφραση για τις απώλειες του πυρήνα συναρτήσει των ΔB και f , όπως είναι η π.χ. η (3.13), και βάσει της διαπίστωσης (4.2), να απαιτείται ώστε η ανύψωση της θερμοκρασίας να μην ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή.

Είναι σύνηθες κατά τη σχεδίαση ενός μαγνητικού στοιχείου, η πρώτη κατασκευή, όπως προκύπτει μετά από διάφορες υπολογιστικές προσεγγίσεις, να μην είναι ικανοποιητική κι έτσι να απαιτείται μια δεύτερη προσπάθεια και πολλές φορές περισσότερες, μέχρι το τελικό αποτέλεσμα να έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Σε εργαστηριακές – δοκιμαστικές εφαρμογές, όπου οι απαιτούμενες προδιαγραφές ίσως δεν είναι ιδιαίτερα αυστηρές, ενδέχεται αυτή η διαδικασία να αποφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα μετά από μια-δυο δοκιμές, ενώ σε μια βιομηχανική εφαρμογή ο σχεδιαστής θα πρέπει να αφιερώσει περισσότερο χρόνο ώστε να επιτύχει το βέλτιστο σχεδιασμό.

Για παράδειγμα, από τον υπολογισμό της επαγωγής σκεδάσεως σε ένα μετασχηματιστή με πυρήνα τύπου E, προκύπτει το λογικό συμπέρασμα ότι τύλιγμα με λιγότερες στρώσεις και άρα ψηλό και στενό παράθυρο, έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερη επαγωγή σκέδασης και μικρότερες απώλειες χαλκού στις υψηλές συχνότητες [1], [33] (βλ. επίσης παρ. 4.4). Είναι επίσης γνωστό ότι με τη χρήση τοροειδή πυρήνα οι δυο προηγούμενες ποσότητες ελαχιστοποιούνται [32]. Παρόλα αυτά, σπάνια βλέπει κανείς σε πρακτικές εφαρμογές να υιοθετούνται οι δυο παραπάνω τακτικές κι αυτό γιατί τα προβλήματα που δημιουργούν είναι συχνά περισσότερα από τα οφέλη που προσφέρουν. Είναι ολοφάνερο ότι σε μια κατασκευή, ο μετασχηματιστής είναι πιθανότατα το πιο ογκώδες αντικείμενο και συνεπώς είναι επιβεβλημένο οι διαστάσεις του να παραμείνουν όσο γίνεται μικρότερες. Ο τοροειδής πυρήνας εξάλλου, δε δίνει τη δυνατότητα για εισαγωγή διακένου, καθώς διατίθεται στο εμπόριο ως ένα ενιαίο κομμάτι, ενώ έχει το επιπλέον μειονέκτημα ότι δεν προσφέρεται για πολλαπλές δοκιμές, αφού η τύλιξη και η αφαίρεση του τυλίγματος είναι ιδιαίτερα επίπονες διαδικασίες. Το ίδιο πρόβλημα δεν το έχουμε στους E πυρήνες, διότι το τύλιγμα τοποθετείται συνήθως σε πλαστική μπομπίνα που αφαιρείται και επανατοποθετείται πολύ εύκολα.

Προκειμένου για μείωση της επαγωγής σκέδασης και καλύτερη συμπεριφορά στις υψηλές συχνότητες, καταλήγει κανείς σε επιλογές όπως, για παράδειγμα, η τοποθέτηση πυρήνα με κυλινδρικό στέλεχος, η κατάλληλη διαδοχική διαστρωμάτωση των τυλιγμάτων, καθώς και σε άλλα τεχνάσματα, λιγότερο ή περισσότερο γνωστά στο χώρο των μηχανικών που ασχολούνται με τη μελέτη, το σχεδιασμό και την κατασκευή ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος.

Ως δεύτερο παράδειγμα, θα αναφέρουμε την περίπτωση σχεδίασης ενός πηνίου, όταν αυτό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως πηνίο εξομάλυνσης σε ένα μετατροπέα dc-dc τύπου Buck. Σε αυτό το μετατροπέα κύριο μέλημα του σχεδιαστή είναι η σταθερότητα της συνεχούς τάσης εξόδου. Κάτι τέτοιο εξασφαλίζεται με μια μεγάλη τιμή L της επαγωγής εξομάλυνσης. Η μεγιστοποίηση του L όμως οδηγεί σε ογκώδη κατασκευή, με αυξημένες μάλιστα απώλειες. Μειωμένη τιμή του L εξάλλου, οδηγεί στην απαίτηση για ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές εξομάλυνσης μεγάλης τιμής και (για δεδομένη τάση) μεγάλου μεγέθους, οι οποίοι επιπλέον, παρουσιάζουν προβλήματα μηχανικής αντοχής, ιδίως υπό την επίδραση κραδασμών κι έτσι συχνά απαιτείται ειδική τοποθέτησή τους (π.χ. με την προσθήκη ελαστικών υλικών), που να παρουσιάζει μηχανική στιβαρότητα. Επιπλέον, αν η κατασκευή του πηνίου δεν είναι αρκετά προσεγμένη ή σωστά υπολογισμένη ενδέχεται να παρουσιάζει παρασιτικές χωρητικότητες, οι οποίες, σε συνδυασμό και με τις χωρητικότητες των ημιαγωγικών στοιχείων και τις παρασιτικές επαγωγές, μπορεί να οδηγούν σε ανεπιθύμητες ταλαντώσεις της τάσης πάνω στα διάφορα στοιχεία, αλλά και στην τάση εξόδου. Κάτι τέτοιο όμως, οδηγεί με τη σειρά του στην απαίτηση για επιπλέον πυκνωτές μικρότερης τιμής στην έξοδο (π.χ. πυκνωτές πολυπροπυλενίου), αλλά και τοποθέτηση περισσότερων πυκνωτών εξομάλυνσης μικρότερης τιμής αντί για λίγους μεγαλύτερης τιμής.

Τα παραπάνω αναφέρθηκαν ως απλά παραδείγματα προκειμένου να γίνει φανερό ότι η κατασκευή ενός μαγνητικού στοιχείου δε μπορεί να αποτελέσει μια εργασία ανεξάρτητη από την υλοποίηση του υπόλοιπου κυκλώματος. Ακόμη και μετά το συγκερασμό των απαιτήσεων για βέλτιστη απόδοση συνολικά (θεωρώντας όλους τους παράγοντες απωλειών), οι τελικές επιλογές μπορεί να έχουν εντελώς διαφορετικά κριτήρια (π.χ. κόστος και ευκολία κατασκευής).

Ακολούθως θα αναφερθούμε στη θεωρητική ανάλυση του συσχετισμού μεταξύ των απωλειών πυρήνα και των απωλειών τυλίγματος οι οποίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους και συνεπώς, προκειμένου για βέλτιστο σχεδιασμό, εξετάζονται ως σύνολο.

Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος (μέθοδος McLyman [24], [33]) για το σχεδιασμό πηνίων και μετασχηματιστών στηρίζεται στην παρατήρηση ότι, για δεδομένο πυρήνα, το εμβαδόν A_{eff} της ενεργού διατομής του πυρήνα και το εμβαδόν A_w του παραθύρου που διατίθεται για την τοποθέτηση των τυλιγμάτων μπορούν να συσχετιστούν με παραμέτρους της συσκευής σύμφωνα με τη σχέση:

$$AP = A_{eff} A_w = \left(K \frac{VA}{fB_{max}} \right)^a \quad (4.4)$$

όπου το AP ονομάζεται γινόμενο εμβαδών (area product). Το K είναι συνδυασμός διαφόρων σταθερών ποσοτήτων, VA είναι η φαινόμενη ισχύς και a μία σταθερά. Με δεδομένη την απαιτούμενη ισχύ και για κάποια συγκεκριμένη συχνότητα λειτουργίας, η επιλογή του B_{max} γίνεται με κριτήριο τις μέγιστες επιτρεπτές ειδικές απώλειες στον πυρήνα, ώστε η θερμοκρασία να μην ξεπεράσει κάποιο συγκεκριμένο όριο και χρησιμοποιώντας την (4.2)

κάνουμε την επιλογή του πυρήνα. Ως τυπική τιμή γι' αυτές μπορούν να ληφθούν τα 0.25 W/cm^3 , αν και ανάλογα με το μέγεθος και το υλικό του πυρήνα, η τιμή τους μπορεί να κυμαίνεται από 0.1 W/cm^3 (μεγάλοι πυρήνες) ως 1 W/cm^3 (μικροί πυρήνες). Απομένει να προσδιοριστεί ο αριθμός N των σπειρών του τυλίγματος από τη γνωστή σχέση [2]:

$$V_{rms} = K_w N f B_{max} A_{eff} \quad (4.5)$$

όπου K_w ο παράγοντας κυματομορφής της τάσης (π.χ. $K_w=4.44$ για ημίτονο και $K_w=4$ για τετραγωνικό παλμό [9]). Η παραπάνω μέθοδος, μπορεί να λάβει υπόψη την αύξηση των απωλειών τυλίγματος λόγω δινορρευσμάτων. Απαιτείται γι' αυτό το σκοπό μια ικανοποιητικά ακριβής τιμή για το λόγο R_{eff}/R_{dc} η οποία ενσωματώνεται στην σταθερά K . Η μέθοδος αυτή αν και προσεγγιστική δίνει καλά αποτελέσματα για την έναρξη δοκιμαστικών κατασκευών.

Θα δούμε τώρα τα αποτελέσματα μιας μελέτης του συσχετισμού μεταξύ των απωλειών πυρήνα και τυλίγματος [34] η οποία καταλήγει σε κάποια σπουδαία συμπεράσματα για το λόγο των δύο απωλειών στις συνθήκες βέλτιστης λειτουργίας ενός μαγνητικού στοιχείου.

Σε μια δεδομένη περιοχή συχνοτήτων, μικρού γενικά εύρους και για κάποια δεδομένη θερμοκρασία, οι συνολικές απώλειες του πυρήνα μπορούν να προσεγγιστούν με μια σχέση της μορφής:

$$P_{Fe} = K_1 f^a B_{max}^\beta \quad (4.6)$$

όπου K_1 , a , β σταθερές διαφορετικές για κάθε υλικό, ενώ στο K_1 εμπεριέχεται επίσης και ο όγκος του πυρήνα. Μετά από μια σειρά συλλογιστικών βημάτων και θεωρώντας ίση πυκνότητα ρεύματος στο πρωτεύον όσο και στα δευτερεύοντα τυλίγματα αν πρόκειται για μετασχηματιστή (γενικά ισχύει), προκύπτει πως οι απώλειες χαλκού δίνονται από τη σχέση:

$$P_{Cu} = \frac{a}{f^2 B_{max}^2} \quad (4.7)$$

όπου a μια σταθερά που ενσωματώνει την ακριβή τιμή της αντίστασης R_{dc} των τυλιγμάτων και του λόγου R_{eff}/R_{dc} αυτών στη συχνότητα f , το ποσοστό πλήρωσης του παραθύρου με χαλκό και το συντελεστή κυματομορφής K_w του ρεύματος. Μετά από μερικές μαθηματικές πράξεις προκύπτει ότι, για δεδομένη συχνότητα, όταν η μαγνητική επαγωγή πάρει την τιμή για την οποία θα εμφανίζονται ελάχιστες απώλειες, θα ισχύει:

$$P_{Cu} = \frac{\beta}{2} P_{Fe} \quad (4.8)$$

ενώ αντίστοιχα, για δεδομένη μαγνητική επαγωγή, προκύπτει ότι, στη συχνότητα που θα έχουμε τις ελάχιστες απώλειες, θα είναι:

$$P_{Cu} = \frac{a}{2} P_{Fe} \quad (4.9)$$

Από τα προηγούμενα γίνεται φανερό ότι η ευρέως γνωστή σχέση $P_{Fe}=P_{Cu}$ για τις συνθήκες λειτουργίας μέγιστης απόδοσης, αναφέρεται στην ειδική περίπτωση που στην (4.6) είναι $\alpha=\beta=2$, συνθήκη η οποία γενικά δεν ισχύει ή ισχύει προσεγγιστικά. Ενδεικτικά αναφέρεται πως, για το υλικό 3F3 της Ferroxcube [19], οι εκθέτες α και β παίρνουν αντίστοιχα τις τιμές 1.6 και 2.5 για συχνότητες από 20 ως 300kHz, ενώ είναι 1.8 και 2.5 για συχνότητες από 300 ως 500kHz. Για το υλικό 3F4 της ίδιας εταιρίας τα α και β παίρνουν τέτοιες τιμές, ώστε σε κάποιες περιοχές συχνοτήτων ο ιδανικός λόγος P_{Fe}/P_{Cu} να είναι της τάξης του 0.2, δίνοντας έτσι στην πράξη τη δυνατότητα για ένα σχέδιο με λιγότερες σπείρες απ' ότι αν χρησιμοποιούνταν κάποιο άλλο υλικό.

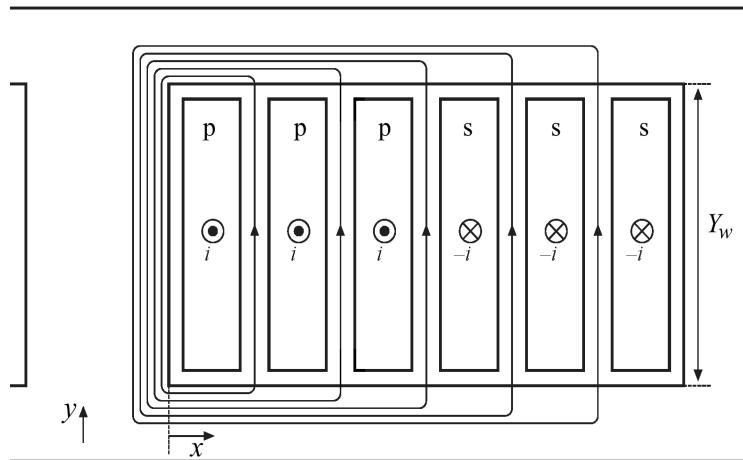
Για κάθε συχνότητα λειτουργίας υπάρχει μια τιμή $B_{max,opt}$ για το πλάτος της μαγνητικής επαγωγής για την οποία, στην ομαλή λειτουργία, οι συνολικές απώλειες είναι ελάχιστες. Το B_{max} πρέπει να επιλεγεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο, ώστε το τελικό σχέδιο να έχει τις ελάχιστες δυνατές σπείρες, άρα και ελάχιστη ροή σκέδασης, όμως οφείλει να παραμείνει αρκετά κάτω από τα επίπεδα κορεσμού του υλικού. Μια επιλογή περί το 10% κάτω από το B_{sat} είναι τυπική ώστε να εξασφαλίσουμε πως, ακόμα και σε μεταβατικά φαινόμενα, ο πυρήνας δε θα μπαίνει στον κόρο (σε κάποιους μετατροπείς απαιτείται μεγαλύτερη διαφορά). Επομένως, αν το υπολογισθέν $B_{max,opt}$ είναι μεγαλύτερο του $0.9B_{sat}$ θα πρέπει είτε να επιλεγεί άλλος πυρήνας είτε να εφαρμοστεί μαγνητική επαγωγή περίπου $0.9B_{sat}$, χωρίς όμως έτσι να υφίσταται βέλτιστη σχεδίαση του μαγνητικού στοιχείου που προκύπτει με τη χρήση του πυρήνα αυτού. Για κάθε πυρήνα λοιπόν, υπάρχει μια συχνότητα f_T κάτω από την οποία είναι $B_{max,opt} > 0.9B_{sat}$ και συνεπώς ο βέλτιστος σχεδιασμός είναι ανέφικτος, οπότε οι λεπτομέρειες της κατασκευής καθορίζονται από την απαίτηση για αποφυγή του κορεσμού. Είναι γεγονός όμως ότι όσο η συχνότητα αυξάνεται στην περιοχή συχνοτήτων πέρα από την f_T όπου μπορούμε να επιτύχουμε βέλτιστο σχεδιασμό, ανακύπτουν σταδιακά τα διάφορα άλλα προβλήματα, που έχουμε ήδη αναφέρει, ενώ το κέρδος σχετικά με την ισχύ διελεύσεως είναι μικρό. Έτσι, σε πρακτικές εφαρμογές, η διακοπτική συχνότητα επιλέγεται τελικά σε μια τιμή κοντά στην f_T . Επίσης, πρέπει να θυμόμαστε ότι σε κάποιες τοπολογίες συντονισμού (π.χ. αντιστροφεείς συντονισμού με dc σύζευξη – RDCLI) η συχνότητα μεταβάλλεται με το φορτίο, καθιστώντας πρακτικά αδύνατο το βέλτιστο σχεδιασμό των μαγνητικών στοιχείων [9].

Κλείνοντας αυτή την παράγραφο οφείλουμε να αναφέρουμε τη σπουδαία συμβολή της χρήσης ηλεκτρονικών υπολογιστών κατά τη διαδικασία βέλτιστου σχεδιασμού μαγνητικών στοιχείων, αλλά και μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος γενικότερα. Με δεδομένο το μεγάλο αριθμό παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη, είναι σημαντική η δυνατότητα χρήσης λογισμικών προσομοίωσης κυκλωμάτων, εντός των οποίων ένα μοντέλο ή μια μεθοδολογία υπολογισμού των απωλειών μπορεί να ενσωματωθεί υπό μορφή ισοδύναμου κυκλώματος.

4.4. Ροή σκέδασης σε ένα μετασχηματιστή, διαγράμματα ΜΕΔ

Η ροή σκέδασης σε ένα μετασχηματιστή είναι το ποσοστό εκείνο της μαγνητικής ροής το οποίο δε διαρρέει πλήρως όλα τα τυλίγματα και συνεπώς δε συμβάλλει κατά 100% στη μαγνητική σύζευξη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερευόντων. Στο απλό παράδειγμα όπου πρωτεύον και το μοναδικό δευτερεύον είναι τυλιγμένα γύρω από το μεσαίο στέλεχος ενός

πυρήνα τύπου E ή P, το ένα εσωτερικά, κοντά στο στέλεχος και το άλλο εξωτερικά, πάνω από το προηγούμενο (Σχ. 4.2), είναι προφανές πως η ροή που διαρρέει το μεσαίο στέλεχος αποτελεί κατά 100% ροή σύζευξης.



Σχήμα 4.2: Γραφική απεικόνιση της ροής σκέδασης μέσα από τα τυλίγματα ενός Μ/Σ τύπου μανδύα.

Καθώς διατρέχουμε το εσωτερικό τυλίγμα προς τα έξω, η ροή που υφίσταται σε αυτές τις περιοχές συζευγνύει μερικώς τα δυο τυλίγματα ενώ η ροή στην περιοχή του εξωτερικού τυλίγματος είναι καθαρά ροή σκέδασης. Στον υπόλοιπο, ελεύθερο χώρο του παραθύρου (αν το παράθυρο δεν είναι γεμάτο από χαλκό σε ολόκληρο το εύρος του κατά τη διεύθυνση x), η ροή, αν και γενικά δεν είναι μηδενική, μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Πρόκειται για ένα χαρακτηριστικό μέγεθος των μετασχηματιστών για το οποίο έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι υπολογισμού και αναπαράστασής του, μαζί με αντίστοιχα ισοδύναμα κυκλώματα για το μετασχηματιστή. Στο κλασικό και πλέον χρησιμοποιούμενο ισοδύναμο κύκλωμα, συμβατικά, εμφανίζεται μοιρασμένη σε σκέδαση πρωτεύοντος και σκέδαση δευτερεύοντος [35]. Σε κάποιες εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, η επαγωγή σκέδασης αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα που υποβιβάζει το άνω όριο για τις δυνατές συχνότητες λειτουργίας ή οδηγεί σε ανεπιθύμητες ταλαντώσεις, συνδυαζόμενη με διάφορες παρασιτικές χωρητικότητες και έτσι καταβάλλεται προσπάθεια ώστε αυτή να είναι μικρή. Σε άλλες περιπτώσεις συνδυάζεται με τα χωρητικά στοιχεία του μετασχηματιστή, ώστε να προκύψει ένα κύκλωμα συντονισμού σε μετατροπείς συντονισμού, χωρίς έτσι να απαιτείται να συνδεθούν εξωτερικά πρόσθετες χωρητικότητες και επαγωγές. Σε μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος του δικτύου διανομής, είναι η σκέδαση που κατά κύριο λόγο περιορίζει τα ρεύματα βραχυκύκλωσης και γι' αυτό επιχειρείται κατά το σχεδιασμό τους να μην είναι πολύ μικρή.

Η ροή σκέδασης που διαρρέει το χαλκό των τυλιγμάτων είναι υπεύθυνη για την αύξηση των απωλειών χαλκού στις υψηλές συχνότητες, αφού οδηγεί στην επαγωγή δινορρευμάτων σε αυτά. Η ροή σκέδασης που διαρρέει το χαλκό μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα, αυτό όμως είναι μικρό γενικά ποσοστό της συνολικής ροής σκέδασης και συνεπώς, αυτή η μείωση δεν απασχολεί ιδιαίτερα τους σχεδιαστές μαγνητικών στοιχείων.

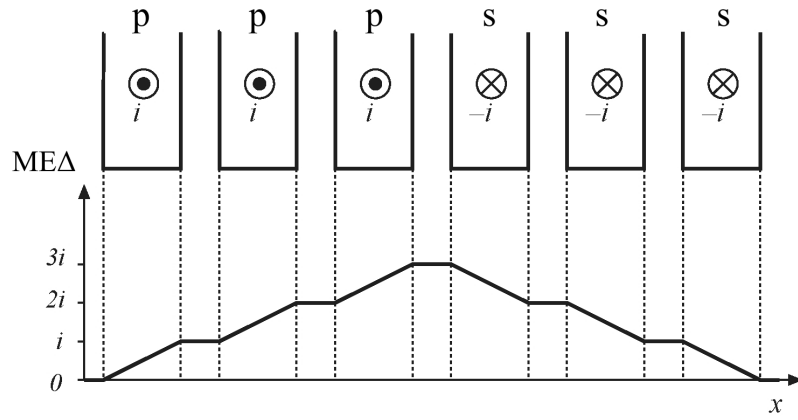
Με απλούς υπολογισμούς [1], προκύπτει πως η επαγωγή σκέδασης είναι μειωμένη σε ένα μετασχηματιστή με ψηλό παράθυρο και λίγες στρώσεις συγκριτικά με ένα αντίστοιχο

μετασχηματιστή μικρού ύψους και πολλών στρώσεων. Η κατασκευή μετασχηματιστών με μεγάλο ύψος όμως γενικά δεν είναι επιθυμητή. Αν απαιτείται λοιπόν περιορισμός της σκέδασης μια σχεδιαστική λύση είναι η κατάλληλη διαστρωμάτωση πρωτεύοντος και δευτερεύοντων, η οποία επιπλέον μειώνει και τις απώλειες δινορρευμάτων.

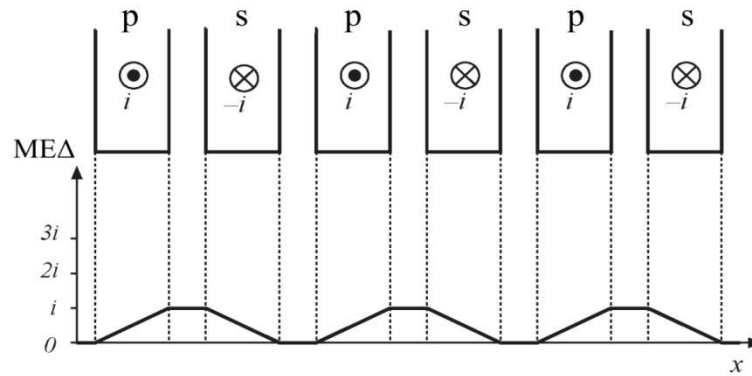
Το επιδερμικό φαινόμενο, είναι πολύ λιγότερο σημαντικό από το φαινόμενο γειτνίασης, ακόμα και αν $m=1$, όπου m το πλήθος των στρώσεων στο υπό μελέτη τμήμα του τυλίγματος, το οποίο εκτείνεται μεταξύ ενός σημείου μηδενικής και ενός άλλου μέγιστης ΜΕΔ. Έτσι, μπορούμε να πούμε πως οι απώλειες είναι προσεγγιστικά ανάλογες του τετραγώνου του πλήθους των στρώσεων.

Στη σειρά σχημάτων του Σχ. 4.3 βλέπουμε τα διαγράμματα ΜΕΔ για διάφορες περιπτώσεις διαστρωμάτωσης των δύο τυλιγμάτων, πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, χωρίς εδώ να ενδιαφέρει αν οι στρώσεις αποτελούνται από αγωγία φύλλα ή από αγωγούς κυκλικής διατομής. Είναι προφανές ότι στις στρώσεις που βρίσκονται σε περιοχές υψηλής ΜΕΔ είναι εντονότερη η ανάπτυξη δινορρευμάτων και κατά συνέπεια είναι και μεγαλύτερη η αύξηση της ενεργού αντίστασης. Έτσι, στρώσεις που βρίσκονται σε περιοχές υψηλής ΜΕΔ έχουν μεγαλύτερες τιμές για τον παράγοντα αντίστασης F_R . Σπείρες της ίδιας στρώσης παρουσιάζουν τον ίδιο παράγοντα αντίστασης, που ισούται ασφαλώς με τον παράγοντα αντίστασης της στρώσης. Αντίστοιχα, σε ένα τμήμα τυλίγματος, που εκτείνεται μεταξύ μηδενικής και μέγιστης ΜΕΔ και στο οποίο οι διάφορες σπείρες ή στρώσεις είναι συνδεδεμένες σε σειρά και διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, η ενεργός αντίσταση είναι το άθροισμα των ενεργών αντιστάσεων των διαφόρων σπειρών ή στρώσεων και ο παράγοντας αντίστασης ισούται με το μέσο όρο των παραγόντων αντίστασής τους [1], [8]. Προφανώς κάτι τέτοιο δεν ισχύει για παράλληλα συνδεδεμένα τυλίγματα και τότε δεν εφαρμόζονται τα γνωστά μοντέλα υπολογισμού της ενεργού αντίστασης. Από τη σύγκριση μεταξύ των Σχ. 4.3(α) και Σχ. 4.3(β) γίνεται ποιοτικά φανερό ότι η αλλαγή στην τοποθέτηση των στρώσεων είναι δυνατόν να οδηγήσει σε συνολικά μικρότερες απώλειες. Προκύπτει εύκολα πως είναι αποδοτικότερη η επιλογή έξι τμημάτων με έκαστο να έχει $m=1$, αντί δύο τμημάτων με $m=3$.

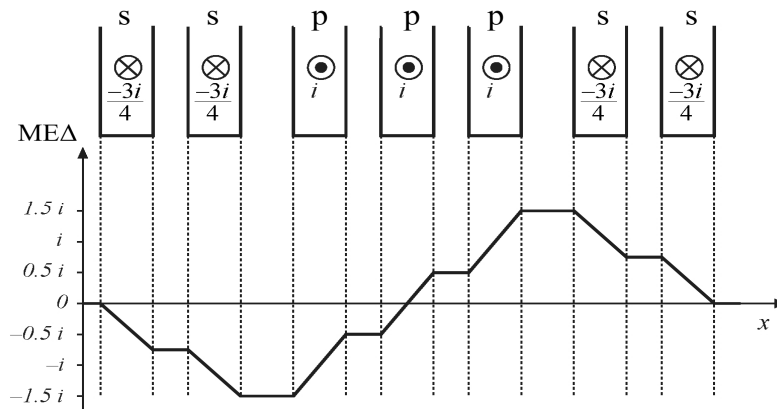
Αντίστοιχα, η τοποθέτηση των τυλιγμάτων που παρουσιάζεται στο Σχ. 4.3(γ) είναι προτιμότερη (από απόψεως ελαχιστοποίησης των απωλειών) από μια άλλη που θα είχε διαχωρισμένες τις τρεις στρώσεις του πρωτεύοντος και τις τέσσερις του δευτερεύοντος. Επίσης βλέπουμε στο Σχ. 4.3(γ) ότι μπορεί κάποιο τμήμα τυλίγματος να περιέχει ημιακέραιο πλήθος στρώσεων (εδώ το πρωτεύον χωρίζεται σε δύο τμήματα με μιάμιση στρώση έκαστο), δηλαδή το σημείο μηδενικής ΜΕΔ να βρίσκεται εντός μιας στρώσης. Σε αυτή την περίπτωση δεν αλλάζει κάτι στην ανάλυση παρά μόνο η ακριβής έκφραση που δίνει το αποτέλεσμα για τον παράγοντα αντίστασης F_R [1]. Για μεγάλο πλήθος στρώσεων πάντως, η σχετική διαφορά είναι μικρή από το αποτέλεσμα που θα προκύψει αν γίνει στρογγυλοποίηση στον κοντινότερο ακέραιο ή ακόμη κι αν χρησιμοποιηθεί απευθείας ένα μοντέλο υπολογισμού των απωλειών (π.χ. αυτό της [1]) θέτοντας όπου m τον ημιακέραιο αριθμό.



(α)



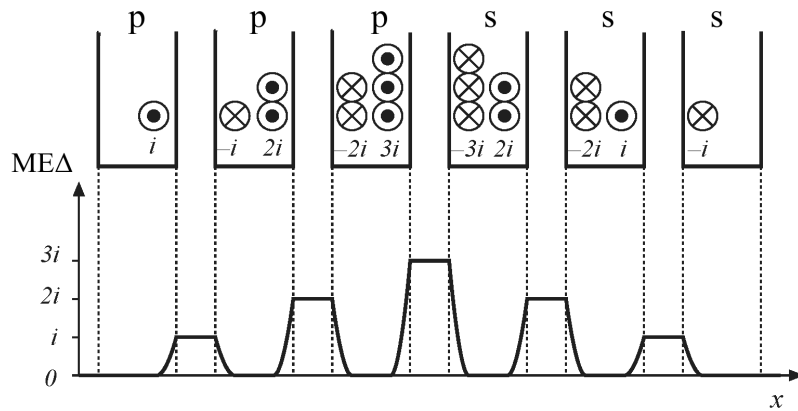
(β)



(γ)

Σχήμα 4.3: Διαγράμματα MEΔ για διαφορετικές δυνατές διαστρωματώσεις των τυλιγμάτων ενός Μ/Σ.

Στα προηγούμενα θεωρήθηκε πως η συχνότητα δεν είναι πολύ υψηλή και η πυκνότητα ρεύματος είναι σταθερή εντός του χαλκού στα διάφορα σημεία της διατομής των τυλιγμάτων, έτσι η ΜΕΔ μεταβάλλεται γραμμικά ως προς x εντός του χαλκού. Για υψηλότερες συχνότητες όμως, για τις οποίες το επιδερμικό βάθος γίνεται συγκρίσιμο με το πάχος των αγωγών (στη διάσταση x), η κατάσταση είναι διαφορετική: Το ρεύμα εντός ενός αγωγού τείνει να συγκεντρώνεται στις περιοχές υψηλής ΜΕΔ (Σχ. 4.4 επάνω)



Σχήμα 4.4: Πυκνότητα ρεύματος και διάγραμμα ΜΕΔ σε υψηλή συχνότητα.

και το διάγραμμα ΜΕΔ δεν αποτελεί γραμμική συνάρτηση του x εντός των στρώσεων (Σχ. 4.4 κάτω). Εντός μιας στρώσης εμφανίζονται ρεύματα με διαφορά φάσης που μπορεί να είναι ως και 180° και το πεδίο εντός του χαλκού (άρα και η ΜΕΔ) μπορεί να λαμβάνει πολύ μικρές, σχεδόν αμελητέες τιμές κι έτσι η μαγνητική ενέργεια εντός του χαλκού μειώνεται σημαντικά. Αντιθέτως, στη γενική περίπτωση, οι περιοχές μεταξύ των στρώσεων μπορεί να θεωρηθούν ως περιοχές σταθερής ΜΕΔ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάστηκαν με τρόπο περιεκτικό μια σειρά από ζητήματα σχετικά με τα μαγνητικά στοιχεία στους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, έτσι όπως προσεγγίζονται κατά βάση από τη σκοπιά του ηλεκτρολόγου μηχανικού και λιγότερο από εκείνη της θεωρητικής φυσικής.

Περιγράφηκαν οι βασικές εφαρμογές των μαγνητικών στοιχείων στα ηλεκτρονικά ισχύος και εξηγήθηκαν οι λόγοι για τους οποίους παρουσιάζουν απώλειες ισχύος με τρόπους αρκετά διαφορετικούς απ' ό,τι στις χαμηλές συχνότητες. Παρατέθηκαν πληροφορίες για τους διάφορους τύπους μαγνητικών υλικών και για τα διάφορα μοντέλα υπολογισμού των απωλειών χαλκού και πυρήνα. Τέλος, έγινε μια συνοπτική περιγραφή των βασικών αρχών στο σχεδιασμό μαγνητικών στοιχείων για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων.

Με την παρουσίαση αυτή να αποτελεί το φιλτράρισμα και τη συμπύκνωση μιας ευρείας βιβλιογραφικής αναζήτησης, προκύπτει σημαντική πιθανότητα να φανεί χρήσιμη στο μελλοντικό σχεδιαστή υψίσυχνων πηνίων και μετασχηματιστών, τουλάχιστο ως σημείο αναφοράς, ως εγχειρίδιο υπάρχουσας γνώσης, για την περαιτέρω διερεύνηση των διαφόρων σημείων που αυτή περιλαμβάνει και έτσι να κερδηθεί πολύτιμος χρόνος, π.χ. στην ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος.

Δίνεται επιπλέον μια στέρεη γνωστική βάση για μια πιθανή μελλοντική εργασία στο γενικότερο πεδίο των παθητικών στοιχείων για μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, που θα περιλαμβάνει κι άλλα θέματα, όπως είναι για παράδειγμα η χρήση πυκνωτών και οι διάφορες τεχνολογίες τους, η χρήση passive snubbers (RC κυκλώματα) για την προστασία των διακοπτικών στοιχείων, οι αντιστάσεις ισχύος, τα πλασματικά φορτία, καθώς ίσως και η μελέτη των παθητικών στοιχείων σε εφαρμογές συχνότητας δικτύου (σε οικιακές – βιομηχανικές εγκαταστάσεις, δίκτυα μεταφοράς – διανομής).

Βιβλιογραφία

- [1]. P. Dowell, “Effects of eddy currents in transformer windings”, *Proc. IEE*, vol. 113, No 8, pp. 1387–94, Aug. 1966.
- [2]. F. Terman, *Radio Engineer’s Handbook*, New York, McGraw-Hill, 1943.
- [3]. E. Snelling, *Soft Ferrites - Properties and Applications*, London, Iliffe Books Ltd, 1969.
- [4]. C. Sullivan, “Aluminum windings and other strategies for HF magnetics in an era of high copper and energy costs”, *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 23, No 4, pp. 2044–2051, Jul. 2008.
- [5]. S. Butterworth, “Eddy current losses in cylindrical conductors, with special applications to the alternating current resistances of short coils”, *Phil. Trans. of the Royal Society of London*, vol. 222, pp. 57–100, 1922.
- [6]. S. Butterworth, “On the alternating current resistance of solenoid coils”, *Proc. of the Royal Society of London*, vol. 107, No 744, pp. 693–715, Apr. 1925.
- [7]. S. Butterworth, “Effective resistance of inductance coils at radio frequencies”, *Exp. Wireless and Wireless Eng.*, vol. 3, p. 203, April 1926, p. 302, May 1926, p. 417, July 1926, p. 483, Aug. 1926.
- [8]. J. Ferreira, “Improved analytical modeling of conductive losses in magnetic components”, *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 9, No 1, pp. 127–131, Jan. 1994.
- [9]. Γ. Δημητρακάκης, *Διερεύνηση των απωλειών μαγνητικών στοιχείων διαρρεόμενων από υψηλής συχνότητας ρεύματα για εφαρμογές σε διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος*, Διδ. Διατρ., Παν/μιο Πατρών Εργ. Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, 2009.
- [10]. B. Carsten, “High frequency conductor losses in switchmode magnetics”, *Proc. HFPC Conf.*, May 1986, Virginia Beach, USA, pp. 155–176.
- [11]. W. Hurley, E. Gath, J. Breslin, “Optimizing the ac resistance of multilayer transformer windings with arbitrary current waveforms”, *IEEE Trans. Power Electr.*, vol 15, No 2, pp. 369–376, March 2000.
- [12]. *EPCOS Data Sheet Overview*, EPCOS AG, Marketing Communications, P.O Box 801709, 81617, Munich, Germany, Aug. 2001.
- [13]. *Data Handbook – Soft Ferrites and Accessories 2005*, Ferroxcube, Sept. 2004.

- [14]. Ν. Σπύρου, *Ιδιότητες των ηλεκτροτεχνικών υλικών*, Εκδόσεις Παν/μίου Πατρών, 2006.
- [15]. Σ. Τραχανάς, *Κβαντομηχανική II, Τρισδιάστατα προβλήματα – Κβαντική θεωρία της ύλης*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, 1986.
- [16]. C. Kittel, “Introduction to Solid State Physics”, J. Wiley&Sons Ltd, 1996.
- [17]. L. Dupre, O. Bottauscio, M. Chiampi, M. Repetto, J. Melkebeek, “Modeling of electromagnetic phenomena in soft magnetic materials under unidirectional time periodic flux excitations”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, No 5, pp. 4171–4184, Sept. 1999.
- [18]. J. Thottuvelil, T. Wilson, H. Owen, “High-frequency measurements techniques for magnetic cores”, *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 5, No 1, pp. 41–53, Jan. 1990.
- [19]. S. Mulder, *Loss formulas for power ferrites and their use in transformer design*, Philips Components, Feb. 1994.
- [20]. F. Preisach, “Über die magnetische nachwirkung”, *Zeits fur Phys.*, vol. 94, pp. 277–302, 1935.
- [21]. A. Globus, “Universal hysteresis loop for soft ferromagnetic material”, *Proc. Europ. Physical Society Conference on Soft Magnetic material*, vol. 2, p. 233, 1975.
- [22]. D. Jiles, D. Atherton, “Theory of ferromagnetic hysteresis”, *J. Magnetism Magn. Mat.*, vol. 61, pp. 48–60, Sept. 1986.
- [23]. J. Zhu, S. Hui, V. Ramsden, “Discrete modeling of magnetic cores including hysteresis, eddy current and anomalous losses”, *Proc. IEE-A*, vol. 140, No 4, pp. 317–322, July 1993.
- [24]. C. McLyman, *Transformer and inductor design handbook*, Marcel Dekker Inc., New York 1978.
- [25]. K. Billings, *Handbook of Switchmode Power Supplies*, New York, McGraw Hill, 1989.
- [26]. A. Van den Bossche, V. Valchev, *Inductors and transformers for power electronics*, CRC Press - Taylor & Francis Group LLC, 2005.
- [27]. K. Fowler, “Power supply design and distribution”, *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, Dec. 2000.
- [28]. <http://www.murata-ps.com> (Μάρτιος 2009)
- [29]. S. Lee, A. Pfaelzer, J. Wyk, “Comparison of different designs of a 42V/14V dc/dc converter regarding losses and thermal aspects”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, No 2, pp. 520–530, March 2007.

- [30]. *Nikkei Electronics*, vol. 910, October 10, 2005.
- [31]. J. Biela, J. Kolar, “Using transformer parasitics for resonant converters – a review of the calculation of the stray capacitance of transformers”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, No 1, pp. 223–233, Jan. 2008.
- [32]. *Magnetic Products – Soft Ferrites Data Handbook*, Philips Components, Dec. 1992.
- [33]. *Power supply design seminar*, Unitrode Corporation, 1993.
- [34]. W. Hurley, W. Wolfe, J. Breslin, “Optimized transformer design: inclusive of high frequency effects”, *IEEE Trans. Power Electr.*, vol 13, No 4, pp. 651–659, Jul. 1998.
- [35]. Α. Σαφάκας, *Ηλεκτρικές Μηχανές Α, Γενικές έννοιες, Μετασχηματιστές, Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος*, Εκδόσεις Παν/μίου Πατρών, 2000.