

# Μελέτη και Σχεδίαση Διάταξης Επαγωγικής Θέρμανσης

Εισηγητής: Κ. Γ. Σιδεράκης

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

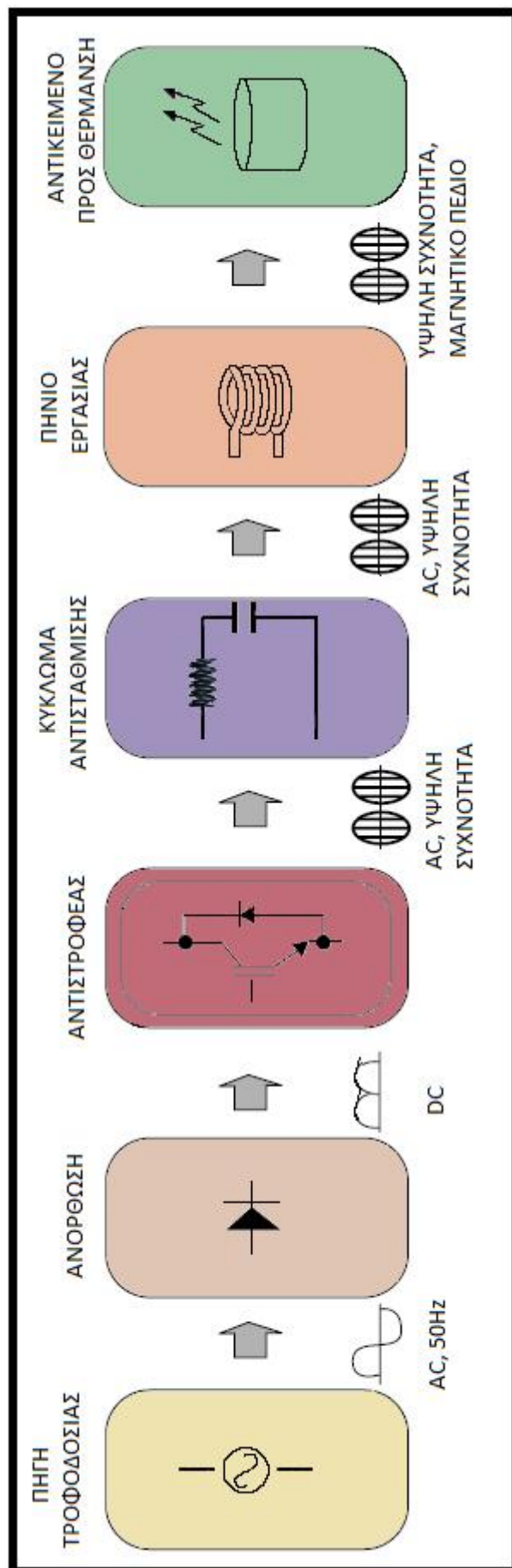
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Τμήμα Ηλεκτρολογίας



Πτυχιακή Εργασία: Σπανού Μαρία

Φεβρουάριος 2012



“Η Ηλεκτρολογία είναι γένος θηλυκού...  
Για να σου δώσει πράγματα,  
πρέπει να ασχοληθείς σοβαρά μαζί της.”

## **Πρόλογος.**

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι, αρχικά, η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της Επαγωγικής Θέρμανσης και των μηχανισμών θέρμανσης, οι οποίοι λαμβάνουν χώρα κατά την εφαρμογή της. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται η Επαγωγική Θέρμανση και ακολουθεί μια σύντομη παρουσίαση της Επαγωγικής Διάταξης. Ακολουθεί η παρουσίαση των τρόπων μοντελοποίησης του αντικείμενου προς θέρμανση με το πηνίο εργασίας. Έπειτα, πραγματοποιείται ανάλυση του κάθε τμήματος της Επαγωγικής Διάταξης και παρουσιάζεται ο σκοπός και ο ρόλος του. Τέλος, στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται και πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του πηνίου εργασίας και ο υπολογισμός των επιμέρους στοιχείων της Επαγωγικής Διάταξης.

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Θεωρητική Εισαγωγή.....	1
1.1 Μαγνητικές ιδιότητες υλικών.....	1
1.1.1 Βασικές έννοιες από την θεωρία του μαγνητισμού.....	1
1.1.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στη μαγνητική συμπεριφορά των υλικών.....	6
1.1.3 Θεωρία των μικροσκοπικών μαγνητικών περιοχών (Domain Theory).....	8
1.1.4 Καμπύλη μαγνήτισης- υστέρησης των μαγνητικών υλικών και.....	9
απώλειες υστέρησης.....	9
1.1.5 Απώλειες λόγω δινορευμάτων (Eddy current losses).....	10
1.2 Ο Νόμος του Faraday- Τάση εξ επαγωγής ενός χρονικά μεταβαλλόμενου.....	10
μαγνητικού πεδίου.....	10
1.3 Επιδερμικό Φαινόμενο (Skin Effect).....	12
1.4 Εξάρτηση της αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία.....	13
1.5 Μετασχηματιστής- Βασικές Αρχές.....	15
1.6 Θερμότητα , Θερμική Ενέργεια, Θερμοχωρητικότητα και Ειδική.....	18
Θερμότητα.....	18
1.6.1 Θερμότητα.....	18
1.6.2 Θέρμανση μέσω ηλεκτρισμού- Αντίσταση.....	18
1.6.3 Σχεδιασμός στοιχείων θέρμανσης.....	19
1.6.4 Μεταφορά Θερμότητας.....	20
1.6.5 Ικανότητα ενεργειακής απολαβής.....	21
1.6.6 Υπολογισμός Θερμικής Ενέργειας.....	21
1.6.7.1 Θέρμανση με Συνεχές Ρεύμα.....	22
1.6.7.2 Θέρμανση με Εναλλασσόμενο Ρεύμα.....	23
1.7 Συντονισμός.....	23
1.7.1 Συντονισμός Σειράς.....	24
1.7.2 Συντονισμός εν παραλλήλω.....	24
1.7.3 Συχνότητα Συντονισμού, Πυκνωτής Συντονισμού και Ποιότητα.....	25
Ισχύος.....	25
1.8 Αντιστροφείς Διακοπτικού Τύπου.....	26
1.8.1 Τεχνικές Ελέγχου της Τάσης Εξόδου.....	26
1.8.1.1 Στρατηγική της Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών.....	26
1.8.1.2 Μετάβαση Με Τετραγωνική Κυματομορφή.....	27
1.8.2 Μονοφασικοί Αντιστροφείς.....	28
1.8.2.1 Αντιστροφείς Με Μισή Γέφυρα (Μονοφασικοί).....	28
1.8.2.2 Αντιστροφείς Με Πλήρη Γέφυρα (Μονοφασικοί).....	29
1.8.2.2.1 Διαμόρφωση PWM με Διπολική Τάση Εξόδου.....	29
1.8.2.2.2 Διαμόρφωση PWM με Μονοπολική Τάση Εξόδου.....	30
1.8.2.2.3 Λειτουργία Τετραγωνικής Κυματομορφής.....	31

<b>Κεφάλαιο 2ο : Δομή Επαγωγικής Διάταξης.....</b>	<b>32</b>
2.1 Ορισμός.....	32
2.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας.....	32
2.3 Επαγωγική Θέρμανση και Σιδηρομαγνητικά Υλικά.....	33
2.4 Εφαρμογές Επαγωγικής Θέρμανσης.....	34
2.5 Διάταξη Επαγωγικής Θέρμανσης.....	35
2.6 Απλοποίηση Κυκλώματος.....	36
2.6.1 Αντικείμενο προς θέρμανση & Πηνίο Εργασίας.....	36
2.7 Κύκλωμα Αντιστάθμισης- Συντονισμού.....	43
2.8 Αντιστροφέας.....	46
<b>Κεφάλαιο 3ο : Απαιτούμενες Προδιαγραφές Επαγωγικής Διάταξης. ....</b>	<b>49</b>
3.1 Αντικείμενο προς θέρμανση.....	49
3.1.1 Χάλυβας.....	49
3.1.1.1 Ορισμός.....	49
3.1.1.2 Κατάταξη των χαλύβων.....	50
3.1.1.3 Τυποποίηση χαλύβων.....	51
3.1.1.4 Θερμικές κατεργασίες.....	51
3.1.1.4.1 Θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης.....	51
3.1.1.4.2 Επιφανειακές θερμικές κατεργασίες χαλύβων.....	52
3.1.1.5 Θερμικές Ιδιότητες Χάλυβα.....	53
3.2 Επιδερμικό Φαινόμενο και βάθος διείσδυσης.....	55
3.3 Πυκνότητα Ισχύος.....	59
3.4 Ο ρόλος του Πηνίου Εργασίας.....	60
3.4.1 Υλικό κατασκευής.....	60
3.4.2 Μαγνητικό πεδίο και πηνίο εργασίας.....	61
3.4.3 Σχεδιασμός πηνίου.....	62
3.4.4 Χαρακτηριστικά Πηνίου Έναντι Συχνότητας.....	66
3.4.5 Χαρακτηριστικά Πηνίου.....	67
3.4.6 Βασικοί τύποι πηνίων.....	69
3.4.6.1 Πηνία πολλών σπειρών έναντι πηνίων μιας σπείρας και ομοιομορφία μαγνητικού πεδίου.....	70
3.4.6.2 Μορφή.....	71
3.4.7 Επιλογή σωλήνα- πηνίου.....	73
3.4.8 Στηρίγματα πηνίου.....	74
3.4.9 Προϋπόθεση Σχεδιασμού Άκρων Πηνίου.....	75
3.5 Βαθμός Απόδοσης.....	77
3.6 Κύκλωμα Αντιστάθμισης- Συντονισμού.....	79
3.7 Αντιστροφέας και Έλεγχος Ισχύος.....	82

<b>Κεφάλαιο 4ο : Υπολογισμοί Επαγωγικής Διάταξης.....</b>	<b>83</b>
4.1 Αντικείμενο προς θέρμανση.....	83
4.2 Πηνίο Εργασίας.....	87
4.3 Υπολογισμός Ισοδύναμου Κυκλώματος.....	90
4.4 Υπολογισμός Ισχύος και Ρεύματος του Πηνίου Εργασίας.....	91
4.5 Υπολογισμός Τάσης Εισόδου και Τάσης Εξόδου του Αντιστροφέα .....	92
4.6 Υπολογισμός Κυκλώματος Αντιστάθμισης- Συντονισμού .....	93
4.7 Διάταξη Επαγωγικής Θέρμανσης .....	95
<b>Κεφάλαιο 5ο : Συμπεράσματα- Προτάσεις.....</b>	<b>96</b>
5.1 Συμπεράσματα.....	96
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα-μελέτη.....	97
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>99</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1- Τυποποίηση Χαλύβων.....</b>	<b>99</b>
1.1 ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΚΑΤΑ AISI-SAE.....	99
1.2 ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΚΑΤΑ DIN.....	100
1.2.1 ΚΟΙΝΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ.....	100
1.2.2 ΚΟΙΝΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ ΓΙΑ ΕΠΙΒΕΛΤΙΩΣΗ Η ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ.....	100
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2- Αμοιβαία Επαγωγή.....</b>	<b>101</b>
2.1 Αμοιβαία Επαγωγή- Ικανότητα Σύζευξης.....	101
2.2 Αμοιβαία Επαγωγή και Πηνίο Εργασίας.....	102
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3- Υπολογισμός Αυτεπαγωγής.....</b>	<b>103</b>
3.1 Υπολογισμός Αυτεπαγωγών Άκρων.....	103
3.2 Υπολογισμός Αυτεπαγωγής Πηνίου Εργασίας.....	105
3.3 Υπολογισμός Αυτεπαγωγής Αντικείμενου προς θέρμανσης.....	109
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4- Υπολογισμός Αντίστασης.....</b>	<b>111</b>
4.1 Υπολογισμός της Αντίστασης του Αντικείμενου προς θέρμανση.....	111
4.2 Υπολογισμός της Αντίστασης του Πηνίου Εργασίας.....	113
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5- Ισοδύναμο Μετασχηματιστή.....</b>	<b>115</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>117</b>
Βιβλιογραφία Παραρτημάτων .....	118



## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> : Θεωρητική Εισαγωγή.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται εν συντομία οι θεμελιώδεις αρχές και το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο που είναι απαραίτητα για την βαθύτερη κατανόηση της επαγωγικής θέρμανσης και των επιμέρους διατάξεων που την απαρτίζουν.

### 1.1 Μαγνητικές ιδιότητες υλικών.

Τα μαγνητικά υλικά είναι μια πολύ σπουδαία κατηγορία βιομηχανικών υλικών που είναι απαραίτητα σε πολλές μηχανολογικές, ηλεκτρικές και κυρίως ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Εξετάζοντας την μαγνητική συμπεριφορά των υλικών μπορούμε να διακρίνουμε δύο γενικές κατηγορίες μαγνητικών φαινομένων. Η πρώτη είναι τα φαινόμενα επαγωγικής μαγνήτισης (induced magnetism).

Τα υλικά αυτά μαγνητίζονται μόνο όταν βρίσκονται υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Απομακρυνόμενα από το μαγνητικό πεδίο δεν παρουσιάζουν μαγνητική συμπεριφορά.

Τα υλικά αυτά ανάλογα με την ιδιαίτερη συμπεριφορά τους στο μαγνητικό πεδίο διακρίνονται σε διαμαγνητικά και παραμαγνητικά (diamagnetic and paramagnetic).

Η δεύτερη κατηγορία είναι τα φαινόμενα αυθόρμητου μαγνητισμού (spontaneous magnetism). Τα υλικά της κατηγορίας αυτής μαγνητίζονται παρουσία μαγνητικού πεδίου και διατηρούν τη μαγνητική τους συμπεριφορά και απουσίας μαγνητικού πεδίου. Ανάλογα με την ιδιαίτερη μαγνητική συμπεριφορά τους διακρίνονται σε σιδηρομαγνητικά (ferromagnetic), αντισιδηρομαγνητικά (antiferromagnetic), και σιδηριμαγνητικά (ferrimagnetic).

#### 1.1.1 Βασικές έννοιες από την θεωρία του μαγνητισμού.

Ο μαγνητισμός έχει διπολική φύση, ενώ όπως είναι γνωστό μαγνητικά μονόπολα δεν έχουν ακόμη ανακαλυφθεί.

Κάθε μαγνητικό πεδίο συνεπάγεται την ύπαρξη δύο μαγνητικών πόλων (ή κέντρων) σε ορισμένη απόσταση μεταξύ τους. Οι πόλοι έχουν αντίθετα φορτία και οι μαγνητικές γραμμές που συνιστούν το πεδίο είναι συνεχείς με φορά από το θετικό προς τον αρνητικό πόλο. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από την πυκνότητα των μαγνητικών γραμμών, την απόσταση και τη μαγνητική ποσότητα των πόλων.

Είναι γνωστό ότι όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα γύρω του παράγεται μαγνητικό πεδίο. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου γύρω από ένα σωληνοειδές πηνίο είναι:

$$H = \frac{0,4 \times \pi \times N \times I}{L} \quad [A/m] \quad 1.1$$

Όπου H: Ένταση του μαγνητικού πεδίου [A/m].

N: αριθμός σπειρών πηνίου.

I: ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο [A].

L: το μήκος πηνίου [m].



## Μαγνητική Επαγωγή (Magnetic induction).

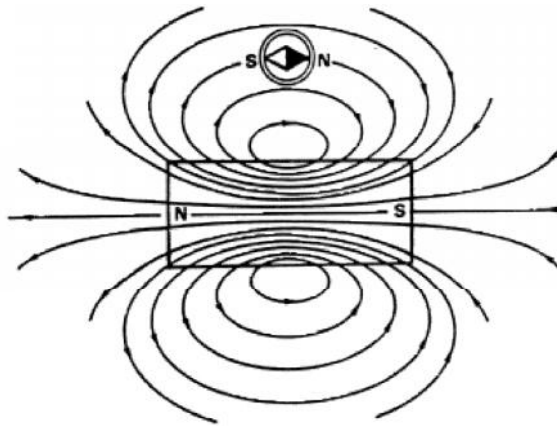
Έστω ότι το σωληνοειδές λειτουργεί σε κενό αέρα. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής που παράγεται από το μαγνητικό πεδίο ονομάζεται επαγωγή και είναι συνάρτηση της έντασης του πεδίου.

$$B = \mu \times H \quad [\text{Tesla}] \quad 1.2$$

Όπου B: επαγωγή [Tesla].

H: Ένταση του μαγνητικού πεδίου [A/m].

$\mu$ : μαγνητική διαπερατότητα του κενού με τιμή  $4\pi \times 10^{-7}$  [Tesla m/A].



Εικόνα 1.1 Γραμμές μαγνητικής επαγωγής ενός απλού ραβδόμορφου μαγνήτη.

Όταν στο σωληνοειδές τοποθετηθεί πυρήνας από μαγνητιζόμενο υλικό το πεδίο έξω από το σωληνοειδές θα είναι ισχυρότερο λόγω του πρόσθετου μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ο μαγνητικός πυρήνας του σωληνοειδούς. Η επαγωγή θα δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{B} = \mu \times \mathbf{H} = \mu_0 \times \mathbf{H} + \mu_0 \times \mathbf{M} \quad [\text{Tesla}] \quad 1.3$$

Όπου  $\mu$ : η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού στο μαγνητικό πεδίο.

M: η μαγνήτιση του υλικού, που εκφράζει την αύξηση της μαγνητικής ροής που επάγεται ανά μονάδα όγκου του υλικού [A/m].

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά στις περισσότερες περιπτώσεις η ποσότητα  $\mu$  είναι πολύ μεγαλύτερη της  $\mu_0 H$ , οπότε για τα υλικά αυτά συχνά χρησιμοποιείται η σχέση  $B = \mu \times H$ .

## Μαγνητική διαπερατότητα (magnetic permeability).

Η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού ορίζεται από την σχέση (1.3) ως ο λόγος της μαγνητικής επαγωγής προς την ένταση του πεδίου:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad 1.4$$

Είναι φανερό ότι όταν οι μαγνητικές ροπές των διπόλων του υλικού ενισχύουν το πεδίο που εφαρμόζεται,  $\mu > \mu_0$ , ενώ όταν αντιτίθεται στο πεδίο,  $\mu < \mu_0$ .

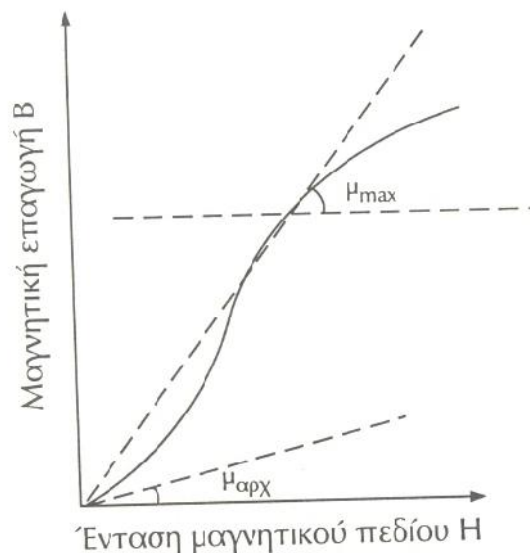
Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου σε ένα υλικό περιγράφεται από τη σχετική διαπερατότητα  $\mu_r$  (relative permeability).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad 1.5$$

οπότε

$$B = \mu_0 \times \mu_r \times H \quad [\text{Tesla}] \quad 1.6$$

Η σχετική διαπερατότητα  $\mu_r$  είναι αδιάστατη ποσότητα. Αποτελεί ένα μέτρο της έντασης του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου και θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν ανάλογη ποσότητα της διηλεκτρικής σταθεράς των διηλεκτρικών υλικών. Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται καθώς το υλικό μαγνητίζεται. Υπολογίζεται από την κλίση της εφαπτομένης σε κάθε σημείο της καμπύλης B-H όπως δείχνεται στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 Καμπύλη Μαγνήτισης Σιδηρομαγνητικού Υλικού

Τα υλικά, που μαγνητίζονται εύκολα, έχουν μεγάλες μαγνητικές διαπερατότητες.

### Μαγνητική επιδεκτικότητα (Magnetic Susceptibility).

Η μαγνήτιση  $M$  του υλικού είναι συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου που την προκαλεί, συνεπώς στην πιο γενική περίπτωση η σχέση μεταξύ  $M$  και  $H$  γράφεται

$$M = f(H) \quad 1.7$$

Για μερικά υλικά όπως τα διαμαγνητικά και τα παραμαγνητικά η συνάρτηση  $f(H)$  ανάγεται σε γραμμική. Η σχέση (1.7) γράφεται:

$$M = \chi \times H \quad 1.8$$

Ο συντελεστής αναλογίας  $\chi$  είναι αδιάστατος και ονομάζεται μαγνητική επιδεκτικότητα.

Η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι θετική για τα παραμαγνητικά υλικά και αρνητική για τα διαμαγνητικά.

Για τα υλικά που παρουσιάζουν αυθόρμητη μαγνήτιση (σιδηρομαγνητικά), επειδή η  $M$  είναι πολύπλοκη συνάρτηση της  $H$ , η  $\chi$  έχει φυσική σημασία αν δεχτούμε ότι εξαρτάται από την  $H$ . Γενικά η μαγνητική επιδεκτικότητα έχει σημασία και χρησιμοποιείται για υλικά με ασθενή μαγνητική συμπεριφορά.

Από τις σχέσεις (1.2)- (1.8) προκύπτει η σχέση μεταξύ μαγνητικής επιδεκτικότητας και σχετικής διαπερατότητας:

$$\mu_r = 1 + \chi \quad 1.9$$

Από την σχέση (1.9) φαίνεται ότι η  $\chi$  είναι συνάρτηση της  $H$  και η  $\mu_r$  είναι επίσης συνάρτηση της  $H$ .

Η συνολική μαγνητική ροή σε μία συγκεκριμένη περιοχή δίνεται από την εξίσωση:

$$= \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad 1.10$$

Όπου  $dA$  είναι η στοιχειώδης μονάδα επιφάνειας της διατομής του πυρήνα. Αν το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής είναι κάθετο στο επίπεδο της διατομής  $A$  και το μέτρο της είναι σταθερό σε όλη την περιοχή, η εξίσωση (1.10) απλουστεύεται και γίνεται:

$$= \quad 1.11$$

Ανάλογα με τη συμπεριφορά των υλικών στο μαγνητικό πεδίο διακρίνουμε τους παρακάτω τύπους μαγνητισμού.

#### Διαμαγνητισμός

Όταν ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο επιδράσει στα άτομα του υλικού προκαλεί παραμόρφωση των τροχιών όπου κινούνται τα ηλεκτρόνια. Λόγω της παραμόρφωσης των τροχιακών διαταράσσεται η μαγνητική κατάσταση των ατόμων και δημιουργούνται μαγνητικά δίπολα που αντιστρατεύονται το εξωτερικό πεδίο προκαλώντας αρνητική μαγνήτιση. Η συμπεριφορά αυτή του υλικού καλείται διαμαγνητισμός.

Η μαγνητική επιδεκτικότητα των διαμαγνητικών υλικών είναι αρνητική και πολύ μικρή, της τάξεως  $\chi = -10^{-6}$ .

Όλα τα υλικά εμφανίζουν διαμαγνητική συμπεριφορά. Δεν εμφανίζουν όμως όλα αρνητική μαγνητική επιδεκτικότητα γιατί σε πολλά από αυτά λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα και άλλα ισχυρότερα μαγνητικά φαινόμενα που εξουδετερώνουν και εξαφανίζουν τα διαμαγνητικά αποτελέσματα. Τα διαμαγνητικά φαινόμενα εξαφανίζονται με την απομάκρυνση του υλικού από το μαγνητικό πεδίο. Ο διαμαγνητισμός δεν εξαρτάται από την θερμοκρασία. Δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο τεχνολογικό ενδιαφέρον.

## Παραμαγνητισμός

Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο υλικά υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου εμφανίζουν μικρή θετική μαγνητική επιδεκτικότητα. Παραμαγνητισμό εμφανίζουν τα υλικά που περιέχουν στη δομή τους άτομα με ασύζευκτα ηλεκτρόνια.

Η παραμαγνητική συμπεριφορά των υλικών αυτών οφείλεται στον προσανατολισμό των μαγνητικών διπολικών ροπών των ατόμων ή μορίων τους παράλληλα προς το εξωτερικό πεδίο.

Απουσία πεδίου τα μαγνητικά δίπολα του υλικού έχουν τυχαίες διευθύνσεις που επηρεάζονται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Υπό την επίδραση πεδίου τα δίπολα τείνουν να προσανατολιστούν παράλληλα προς το πεδίο. Ο τέλειος προσανατολισμός δεν είναι πρακτικά εφικτός γιατί απαιτείται πρακτικά απείρως μεγάλη ένταση πεδίου λόγω ενεργειακής αλληλεπίδρασης μεταξύ των διπόλων.

Ο παραμαγνητισμός είναι αντιστρεπτός (δηλαδή εμφανίζεται απουσία εξωτερικού πεδίου) και εξαρτάται από την θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού ευνοεί την άτακτη διευθέτηση των μαγνητικών διπόλων του με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραμαγνητική συμπεριφορά του.

Επίσης οι χαμηλές θερμοκρασίες ευνοούν τα παραμαγνητικά φαινόμενα. Οι τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας στα παραμαγνητικά υλικά κυμαίνονται από  $10^{-6}$  ÷  $10^{-2}$ . Τυπικά υλικά που εμφανίζουν έντονα παραμαγνητισμό είναι τα αλκαλιμέταλλα, μερικά μεταβατικά μέταλλα και μέταλλα των σπανίων γαιών, το οξυγόνο κλπ.

## Σιδηρομαγνητισμός

Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ορισμένα υλικά υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου αποκτούν μεγάλη μαγνήτιση μέρος της οποίας διατηρούν μετά την απομάκρυνση του πεδίου. Τα υλικά αυτά που διατηρούν μόνιμη μαγνήτιση απουσία μαγνητικού πεδίου ονομάζονται σιδηρομαγνητικά. Τα κυριότερα σιδηρομαγνητικά στοιχεία από τεχνολογική πλευρά είναι τα μεταβατικά μέταλλα σίδηρος, κοβάλτιο, νικέλιο. Επίσης από τις σπάνιες γαίες το γαδολίνιο κάτω από  $16^{\circ}\text{C}$ .

Ο σιδηρομαγνητισμός των μεταβατικών μετάλλων αποδίδεται στον αυθόρμητο προσανατολισμό των μαγνητικών ροπών γειτονικών ατόμων. Το φαινόμενο ονομάζεται αυθόρμητη μαγνήτιση.

Η αυθόρμητη μαγνήτιση συμβαίνει σε ομάδες γειτονικών ατόμων που αποτελούν τις μικροσκοπικές μαγνητικές περιοχές του υλικού. Όταν οι μαγνητικές περιοχές έχουν τυχαίους προσανατολισμούς το υλικό δεν εμφανίζει μαγνητισμό. Η αυθόρμητη μαγνήτιση αποδίδεται στις αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων γειτονικών ατόμων που ονομάζονται αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές είναι κβαντομηχανικού χαρακτήρα και η εξήγηση τους απαιτεί ειδικές γνώσεις κβαντομηχανικής. Με απλούς όρους οι αλληλεπιδράσεις των γειτονικών ατόμων έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενέργειας μεταξύ τους, γνωστής ως ενέργειας ανταλλαγής.

## Αντισιδηρομαγνητισμός

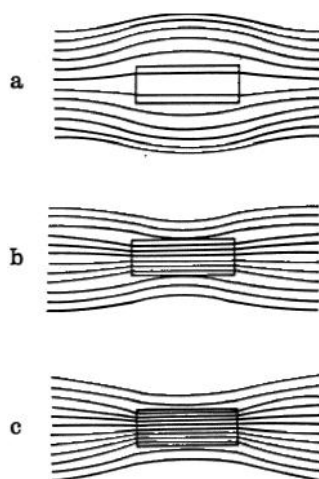
Τα μεταβατικά μέταλλα χρώμιο, μαγγάνιο έχουν δομή ανάλογη με το σίδηρο. Όμως εμφανίζουν την αυθόρμητη τάση τα δίπολα των γειτονικών ατόμων τους να προσανατολίζονται αντιπαράλληλα υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Το φαινόμενο

αυτό ονομάζεται αντισιδηρομαγνητισμός. Τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά εμφανίζουν αρνητική ενέργεια ανταλλαγής.

#### Σιδηριμαγνητισμός

Σε πολλά κεραμικά υλικά τα διαφορετικά ιόντα που αποτελούν τα μόρια τους παρουσιάζουν διαφορετικές μαγνητικές ροπές. Όταν οι μαγνητικές ροπές των διαφορετικών ιόντων προσανατολίζονται αντιπαράλληλα, υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου, τα υλικά αυτά εμφανίζουν μια συνισταμένη μαγνητική ροπή προς μια κατεύθυνση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σιδηριμαγνητισμός. Τα σιδηριμαγνητικά υλικά έχουν τεράστια τεχνολογική σπουδαιότητα. Η μεγάλη σπουδαιότητα οφείλεται στο ότι εκτός από τη μαγνητική τους συμπεριφορά είναι και μονωτικά. Αυτό σημαίνει ότι στα υλικά αυτά κατά τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου δεν επάγονται σημαντικά δινορεύματα με αποτέλεσμα να έχουμε πολύ μικρές ενεργειακές απώλειες. Η μονωτική συμπεριφορά των σιδηρομαγνητικών υλικών αποτελεί ουσιαστικό χαρακτηριστικό διάκρισης τους από τα σιδηρομαγνητικά υλικά. [1]

Τα κυριότερα σιδηριμαγνητικά υλικά είναι οι σιδηρίτες.



Εικόνα 1.3 Δυναμικές γραμμές μαγνητικής επαγωγής σε διαμαγνητικό (a), παραμαγνητικό (b) και σιδηρομαγνητικό (c) υλικό.

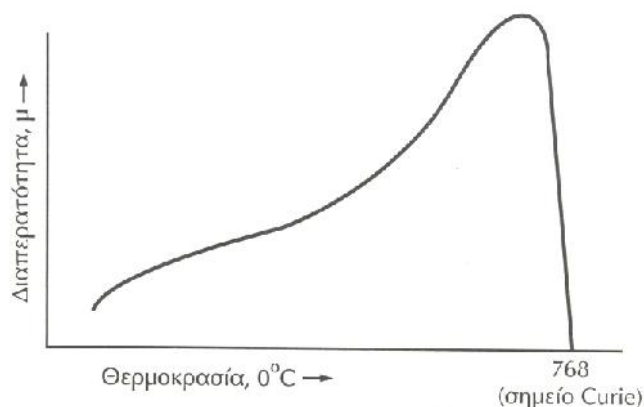
### **1.1.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στη μαγνητική συμπεριφορά των υλικών.**

#### Σιδηρομαγνητισμός

Η παράλληλη διευθέτηση των ατομικών μαγνητικών διπόλων στις μικροσκοπικές μαγνητικές περιοχές (domains) του υλικού είναι ιδανική μόνο στο απόλυτο μηδέν 0 K, όπου η θερμική κίνηση τους μηδενίζεται και δεν επηρεάζει την τέλεια παράλληλη διευθέτησή τους. Καθώς η θερμοκρασία σιδηρομαγνητικού υλικού αυξάνει οπότε έχουμε αύξηση της θερμικής κίνησης των διπόλων. Λόγω της θερμικής κίνησης παρατηρούνται αποκλίσεις από την ιδανική παράλληλη διευθέτησή τους με αποτέλεσμα τη σταδιακή εξασθένιση της σιδηρομαγνητικής συμπεριφοράς του υλικού. Σε μια χαρακτηριστική για κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie ο σιδηρομαγνητισμός του εξαφανίζεται και το υλικό συμπεριφέρεται παραμαγνητικά. Στη

Θερμοκρασία Curie η θερμική κίνηση των διπόλων είναι σημαντική ώστε η ενέργεια ανταλλαγής δεν μπορεί να συγκρατήσει διευθετημένα παράλληλα.

Το φαινόμενο αυτό είναι αντιστρεπτό. Όταν το υλικό ψυχθεί σε θερμοκρασία χαμηλότερη της θερμοκρασίας Curie οι μικροσκοπικές μαγνητικές περιοχές επανασχηματίζονται και το υλικό επανακτά την σιδηρομαγνητική του συμπεριφορά. Οι θερμοκρασίες Curie για τα υλικά σίδηρος, κοβάλτιο, νικέλιο και γαδολίνιο είναι αντίστοιχα 768 °C, 1123 °C, 358 °C και 16 °C .



Εικόνα 1.4 Καμπύλη μαγνήτισης M- Θερμοκρασίας T

Η θερμοκρασία Curie πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη χρησιμοποίηση των σιδηρομαγνητικών υλικών. Για παράδειγμα τα μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε μοτέρ, γεννήτριες, μετασχηματιστές, ρυθμιστές και ως μόνιμοι μαγνήτες πρέπει να έχουν θερμοκρασία Curie σημαντικά μεγαλύτερη της θερμοκρασίας χρησιμοποίησης τους ώστε να αποφεύγεται η απώλεια της μαγνητικής τους συμπεριφοράς.

Επίσης τα κράματα νικελίου και σιδήρου που χρησιμοποιούνται σε σωλήνες καθοδικών ακτίνων, σε φασματογράφους μάζας, σε πυξίδες κλπ δεν πρέπει να εμφανίζουν μαγνητική συμπεριφορά. Συνεπώς η θερμοκρασία Curie των κραμάτων αυτών πρέπει να είναι μικρότερη της θερμοκρασίας χρησιμοποίησης τους.

Η θερμοκρασία Curie ενός υλικού ρυθμίζεται με κατάλληλη κραματοποίηση των σιδηρομαγνητικών στοιχείων. Σχηματίζονται κράματα μεταξύ σιδηρομαγνητικών στοιχείων ή μεταξύ σιδηρομαγνητικών και μη μαγνητικών στοιχείων.

Η μεταβολή των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών με την θερμοκρασία χρησιμοποιείται συχνά σε συσκευές ρύθμισης θερμοκρασίας και σε άλλες εφαρμογές.

Η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της κοντά στη θερμοκρασία Curie. Στη θερμοκρασία αυτή μηδενίζεται απότομα (Εικόνα 1.4)

#### Αντισιδηρομαγνητισμός

Όπως και στο σιδηρομαγνητισμό η ιδανική διευθέτηση των διπόλων εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει τη θερμική τους κίνηση με αποτέλεσμα να έχουμε αποκλίσεις από την ιδανική αντιπαράλληλη διευθέτηση των μαγνητικών ροπών τους. Υπάρχει μία κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Neel, πάνω

από την οποία η αντιαπαράλληλη διευθέτηση των μαγνητικών ροπών εξαφανίζεται πλήρως και το υλικό συμπεριφέρεται σαν παραμαγνητικό. Για το Cr και το Mn η θερμοκρασία Neel είναι 1673 οC και 95 οC αντίστοιχα.

#### Σιδηριμαγνητισμός

Τα σιδηριμαγνητικά υλικά πάνω από μια χαρακτηριστική θερμοκρασία (θερμοκρασία Neel) συμπεριφέρονται σαν παραμαγνητικά.

#### Παραμαγνητισμός

Η μαγνητική επιδεκτικότητα των παραμαγνητικών υλικών ελαττώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας. Η μεταβολή της  $\chi$  με την θερμοκρασία περιγράφεται από τη σχέση:

$$\chi = \frac{c}{T} \quad 1.12$$

Όπου c: σταθερά

T: θερμοκρασία [K]

Για τα υλικά που εμφανίζουν παραμαγνητισμό πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία Curie (ή Neel) η μεταβολή της μαγνητικής τους επιδεκτικότητας στην παραμαγνητική περιοχή δίνεται από την σχέση:

$$\chi = \frac{c}{T-T_c} \quad \text{ή} \quad \chi = \frac{c}{T-T_N} \quad 1.13$$

Όπου  $T_c$  ή  $T_N$ : η θερμοκρασία Curie ή Neel [K]

Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως νόμος Curie- Weiss . Απόκλιση από τη γραμμική συμπεριφορά που περιγράφει η σχέση παρατηρείται σε πολλά σιδηριμαγνητικά υλικά. [1]

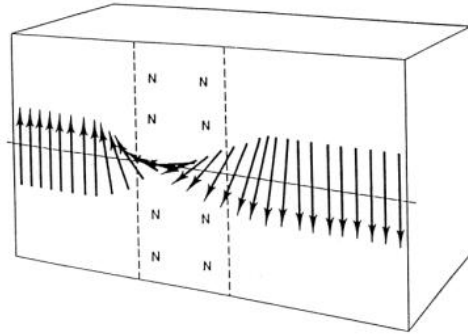
### **1.1.3 Θεωρία των μικροσκοπικών μαγνητικών περιοχών (Domain Theory).**

Η θεωρία αυτή διατυπώθηκε από τον P. Weiss το 1907. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά σε θερμοκρασία της θερμοκρασίας Curie αποτελούνται από μικροσκοπικές μαγνητικές περιοχές. Σε κάθε περιοχή οι μαγνητικές ροπές των ατόμων τους είναι παράλληλα διευθετημένες. Οι περιοχές αυτές δημιουργούνται αυθόρμητα μέσα στους κρυσταλλικούς κόκκους του υλικού, χωρίς να είναι απαραίτητη η επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό που δεν έχει εκτεθεί σε μαγνητικό πεδίο ο προσανατολισμός των μαγνητικών ροπών στις στοιχειώδεις μαγνητικές περιοχές του είναι τυχαίος με αποτέλεσμα να μην εμφανίζει μαγνητική ροπή.

Κάθε «μαγνητική περιοχή» του υλικού χωρίζεται από τις γειτονικές της με στιβάδα ατόμων που ονομάζεται «τοίχωμα» της μαγνητικής περιοχής.

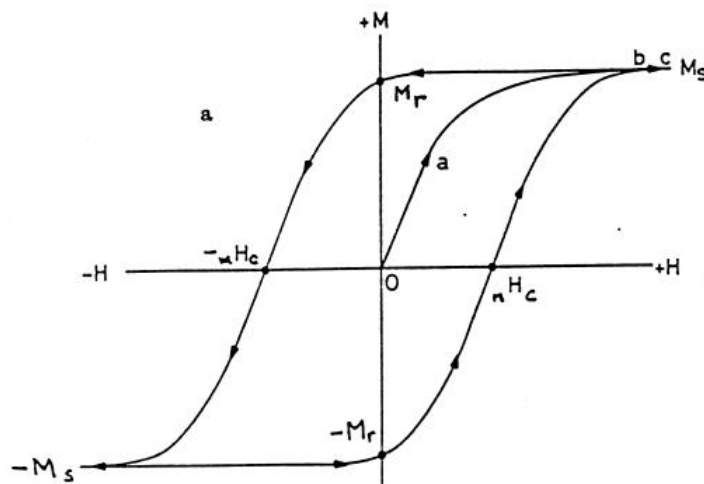
Ο προσανατολισμός των ατομικών μαγνητικών ροπών στο τοίχωμα μεταξύ δυο γειτονικών περιοχών μεταβάλλεται βαθμιαία από τον προσανατολισμό της μιας περιοχής προς τον προσανατολισμό της άλλης. [1]



Εικόνα 1.5 Μεταβολή της διεύθυνσης των ατομικών μαγνητικών ροπών στο «τοίχωμα» μεταξύ δύο γειτονικών «μαγνητικών περιοχών»

### 1.1.4 Καμπύλη μαγνήτισης- υστέρησης των μαγνητικών υλικών και απώλειες υστέρησης.

Η συσχέτιση μεταξύ του πεδίου μαγνήτισης  $H$  και της μαγνήτισης  $M$  ή της μαγνητικής επαγωγής  $B$  παριστάνεται γραφικά από την καμπύλη μαγνήτισης- υστέρησης (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6 Καμπύλη μαγνήτισης- Βρόχος υστέρησης των μαγνητικών υλικών.

Όταν ένα μη μαγνητισμένο υλικό υφίσταται την επίδραση του μαγνητικού πεδίου με βαθμιαία αυξανόμενη ένταση, η μαγνήτιση  $M$  του υλικού αυξάνει από το μηδέν κατά το μήκος της καμπύλης  $OM_s$ . Η μέγιστη τιμή  $+M_s$  που λαμβάνει ονομάζεται μαγνήτιση κορεσμού.

Ελαττώνοντας την ένταση του πεδίου  $H$  η μεταβολή της μαγνήτισης δεν ακολουθεί την αρχική καμπύλη  $OM_s$  αλλά την  $M_sM_r$ . Στο σημείο  $M_r$  όπου η  $H$  είναι μηδέν, η μαγνήτιση δεν μηδενίζεται αλλά παραμένει ποσότητα  $M_r$  στο υλικό γνωστή ως παραμένουσα μαγνήτιση (remanent magnetization).

Αν το μαγνητικό πεδίο εφαρμοστεί τώρα κατά την αρνητική διεύθυνση η καμπύλη μαγνήτισης ακολουθεί τη γραμμή  $M_r-H_c$ . Στο σημείο  $H_c$  η μαγνήτιση μηδενίζεται. Η ένταση του πεδίου απομαγνήτισης έχει αρνητική τιμή  $H_c$  και ονομάζεται



απομαγνητίζουσα δύναμη. Η παραμένουσα αύξηση του μαγνητικού πεδίου προς την αρνητική διεύθυνση οδηγεί στη μέγιστη αρνητική μαγνήτιση κορεσμού  $-M_s$ .

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως παραπάνω παίρνουμε την καμπύλη  $-M_s - M_r H_c M_s$  και ο κύκλος μαγνήτισης- απομαγνήτισης είναι πλήρης. Η περιοχή που ορίζεται από την καμπύλη  $M_s M_r - H_c - M_s - M_r H_c$  ονομάζεται βρόχος υστέρησης

Το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι ισοδύναμο με την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα όγκου του υλικού σε κάθε πλήρη κύκλο μαγνήτισης- απομαγνήτισης. Όσο μικρότερη είναι η μέγιστη τιμή της μαγνητεγερτικής δύναμης που εφαρμόζεται στον πυρήνα, τόσο μικρότερο είναι το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης αλλά και οι αντίστοιχες απώλειες. [1]

### **1.1.5 Απώλειες λόγω δινορευμάτων (Eddy current losses).**

Όταν το μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται σε ένα μαγνητικό υλικό, μεταβάλλεται με πεπερασμένη ταχύτητα, η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής δημιουργεί διαφορές δυναμικού στο υλικό. Αν το υλικό είναι αγωγίμο οι επαγόμενες διαφορές δυναμικού παράγουν ηλεκτρικά ρεύματα που ονομάζονται δινορεύματα (Eddy currents). Τα δινορεύματα αποτελούν την αιτία των απωλειών που εκδηλώνονται με αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Αν το υλικό είναι μονωτής όπως τα σιδηριμαγνητικά υλικά δεν έχουμε δημιουργία δινορευμάτων και φυσικά απώλειες.

Εφόσον οι διαφορές δυναμικού που επάγονται στο υλικό εξαρτώνται από τη συχνότητα μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής, οι απώλειες λόγω δινορευμάτων θα εξαρτώνται από τη συχνότητα μεταβολής του πεδίου. Επίσης θα εξαρτώνται από την ειδική αντίσταση του υλικού και το πάχος του υλικού. Η κύρια επίπτωση των δινορευμάτων συνοψίζεται στο ότι απαιτείται μεγαλύτερη ένταση πεδίου  $H$  για να επιτύχουμε την ίδια μαγνητική επαγωγή με αυτή που επιτυγχάνεται με μικρότερη  $H$  απουσία δινορευμάτων. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μεγέθυνση του βρόχου υστέρησης. Συνεπώς σε χαμηλές συχνότητες εναλλαγής μαγνητικού πεδίου ο βρόχος υστέρησης υλικού έχει ένα ελάχιστο μέγεθος που εξαρτάται κυρίως από τη δομή του υλικού (ατέλειες, προσμίξεις κλπ) ενώ σε υψηλές συχνότητες ο βρόχος υστέρησης μεγαλώνει λόγω της ανάπτυξης πιο σημαντικών δινορευμάτων. Όταν ένα μαγνητικό υλικό υποβάλλεται σε μαγνητικό πεδίο οι απώλειες του είναι το άθροισμα των απωλειών λόγω μαγνητικής υστέρησης και δινορευμάτων. [1]

### **1.2 Ο Νόμος του Faraday- Τάση εξ επαγωγής ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.**

Σύμφωνα με τον Νόμο του Faraday, αν μέσα από μία σπείρα ενός πηνίου διέρχεται μαγνητική ροή, τότε στα άκρα της επάγεται μία τάση  $e_{ind}$  που είναι ανάλογη προς το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής ως προς το χρόνο.

$$e_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad 1.14$$

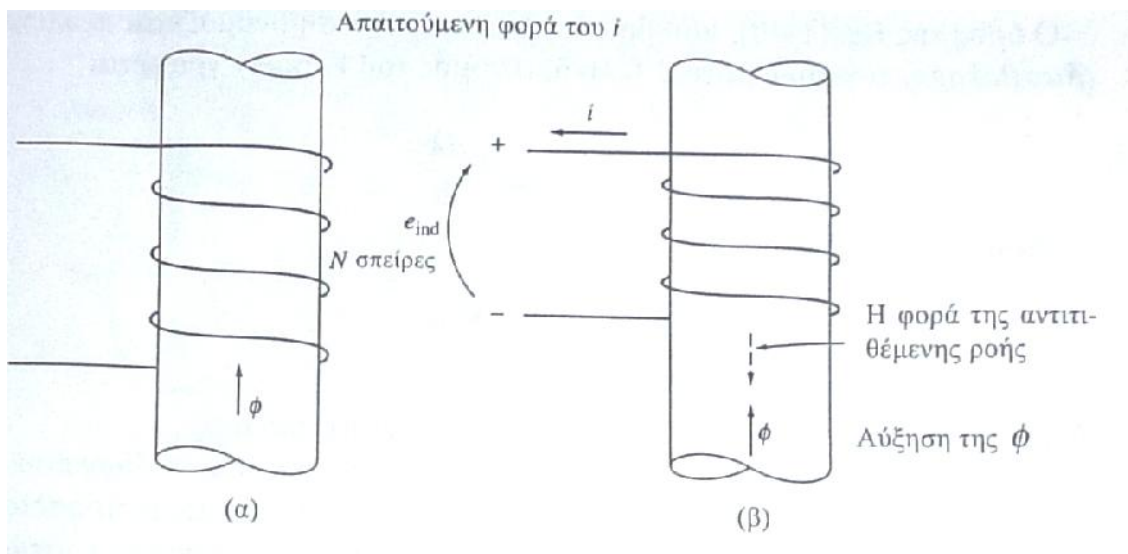
Όπου  $e_{ind}$ : η τάση που επάγεται στα άκρα της σπείρας [V].  
 $\Phi$ : η μαγνητική ροή που διέρχεται μέσα από αυτήν.

Αν ένα πηνίο αποτελείται από  $N$  σπείρες κι αν η ίδια μαγνητική ροή περνάει από κάθε σπείρα του, η τάση που επάγεται στα άκρα του θα είναι:

$$e_{\text{ind}} = -N \frac{d}{dt} \quad 1.15$$

Όπου  $N$ : ο αριθμός των σπειρών του πηνίου.

Το αρνητικό πρόσημο στις παραπάνω σχέσεις (1.14 και 1.15) οφείλεται στο νόμο του Lenz. Σύμφωνα με αυτό το νόμο η πολικότητα της τάσης που αναπτύσσεται είναι τέτοια, ώστε, αν τα άκρα του πηνίου βραχυκυκλωθούν, το παραγόμενο ρεύμα να δημιουργεί μαγνητική ροή που αντιτίθεται στη μεταβολή της αρχικής ροής. Η εικόνα 1.7 βοηθά στην καλύτερη κατανόηση αυτής της αρχής. Αν η τιμή της μαγνητικής ροής του σχήματος αυξάνεται, τότε η διαφορά δυναμικού που επάγεται στο τυλίγμα τείνει να δημιουργήσει ένα πεδίο με ροή που αντιτίθεται στην αύξηση της αρχικής ροής. Στην εικόνα 1.7, η φορά του ρεύματος θα προκαλέσει μαγνητική ροή αντίθετη της αρχικής ή με άλλα λόγια η τάση εξ επαγωγής πρέπει να έχει πολικότητα η οποία να επιβάλλει ένα τέτοιο ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα του πηνίου. Το αρνητικό πρόσημο στις εξισώσεις (1.14) και (1.15) συχνά παραλείπεται αφού προκύπτει από κάποιες φυσικές παρατηρήσεις.



**Εικόνα 1.7** Ο νόμος του Lenz: α) Αύξηση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του τυλίγματος. β) Προσδιορισμός της πολικότητας της τάσης στα άκρα του τυλίγματος.

Κατά την χρήση της εξίσωσης (1.15) σε πρακτικά προβλήματα προκύπτει μια σημαντική δυσκολία. Σε αυτή την εξίσωση γίνεται η υπόθεση ότι η ροή είναι η ίδια για όλες τις σπείρες του τυλίγματος. Όμως, στην πραγματικότητα ένα μέρος της μαγνητικής ροής ξεφεύγει από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει. Όταν οι σπείρες είναι πολύ κοντά η μια με την άλλη, τότε πράγματι, από όλες τους διέρχεται η ίδια μαγνητική ροή και η εξίσωση (1.15) δίνει σωστά αποτελέσματα. Όμως, αν η ροή διαρροής είναι αρκετά μεγάλη ή αν στους υπολογισμούς απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια άλλη εξίσωση στην οποία δεν γίνεται η παραπάνω υπόθεση. [2]

Πιο σωστά λοιπόν, η τάση στα άκρα της  $i$ -οστής σπείρας του πηνίου θα είναι :

$$e_{\text{ind}} = - \frac{d\varphi(i)}{dt} \quad 1.16$$

Αν το τύλιγμα αποτελείται από  $N$  σπείρες, η τάση στα άκρα του θα έχει τιμή

$$e_{\text{ind}} = - \sum_{i=1}^N e_i \quad 1.17$$

### 1.3 Επιδερμικό Φαινόμενο (Skin Effect).

Επιδερμικό Φαινόμενο ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο το εναλλασσόμενο ρεύμα δεν διανέμεται ομοιόμορφα μέσα σε ένα αγωγό. Το μεγαλύτερο μέρος της πυκνότητας του ρεύματος συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του αγωγού και μειώνεται όσο κινούμεθα προς το κέντρο. Με άλλα λόγια το ρεύμα ρέει κυρίως στην επιφάνεια του αγωγού. Το επιδερμικό φαινόμενο προκαλεί αύξηση της αντίστασης του αγωγού καθώς η συχνότητα αυξάνεται, επειδή το βάθος διείσδυσης (skin depth) είναι μικρότερο και επομένως μειώνεται η ενεργή διατομή του αγωγού. [3]

Ρεύμα και βάθος διείσδυσης.

Η μείωση του ρεύματος γίνεται εκθετικά και δίνεται από την σχέση:

$$x = x_0 e^{(-\frac{x}{\delta})} \quad [A] \quad 1.18$$

Όπου  $x$ : το ρεύμα σε βάθος  $x$  [A].

$x_0$ : το ρεύμα σε βάθος  $x=0$  [A].

$\delta$ : το βάθος διείσδυσης [m].

Για  $x=\delta$  προκύπτει ότι  $\delta = 0,368 \times x_0$  [A]

Το βάθος διείσδυσης δίνεται από την σχέση:

$$\delta = 5033 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \times f}} \quad [m] \quad 1.19$$

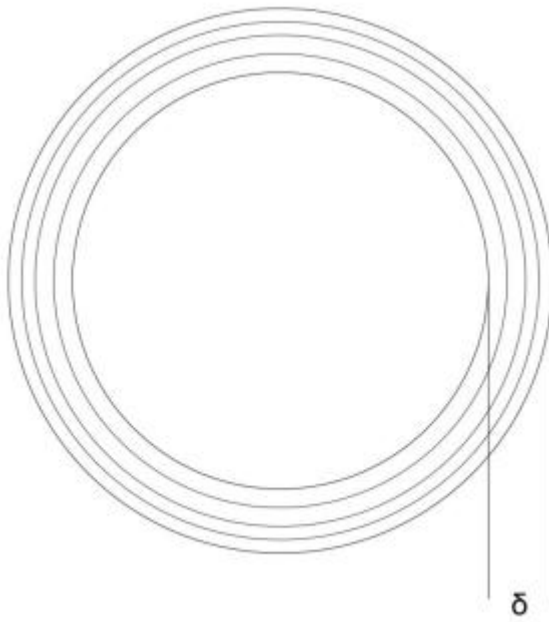
Όπου  $\delta$ : το βάθος διείσδυσης [m].

$f$ : συχνότητα λειτουργίας [Hz].

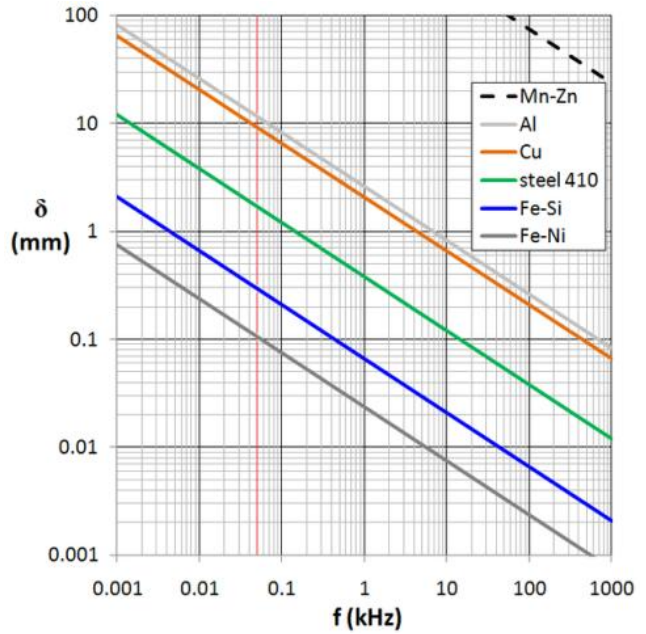
$\mu_r$ : σχετική μαγνητική διαπερατότητα.

$\rho$ : ειδική αντίσταση του υλικού [ $\Omega/\text{cm}$ ].

[4][5]



(α)



(β)

Εικόνα α: Βάθος Διείσδυσης

Εικόνα β: Σχέση Βάθους διείσδυσης και Συχνότητας για διάφορα υλικά

Σύμφωνα με την σχέση (1.19) μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Το βάθος διείσδυσης  $\delta$  εξαρτάται από το υλικό το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αγωγός ( $\rho$ ,  $\mu_r$ ) και την συχνότητα  $f$  (Hz).
- Όσο αυξάνεται η συχνότητα  $f$ , το βάθος διείσδυσης  $\delta$  μειώνεται.
- Όσο μεγαλύτερη σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_r$  έχει το υλικό τόσο το βάθος διείσδυσης  $\delta$  μειώνεται.
- Για  $f =$  σταθερό και αύξηση θερμοκρασίας έχουμε:
  - Για μη μαγνητικά υλικά- αύξηση του  $\delta$ , λόγω της αύξησης της ειδικής αντίστασης του υλικού (θα μελετηθεί παρακάτω η σχέση θερμοκρασίας-ειδικής αντίστασης υλικού).
  - Για μαγνητικά υλικά- αύξηση του  $\delta$ , λόγω αύξησης της ειδικής αντίστασης του υλικού και αύξησης της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού μέχρι την θερμοκρασία Currie. Έπειτα έχουμε μείωση του  $\delta$  και μάλιστα σημαντική.

#### 1.4 Εξάρτηση της αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία.

Η αγωγιμότητα του μεταλλικού αγωγού δίδεται από την σχέση:

$$= \frac{n e^2 \tau}{m} \text{ [A]} \quad 1.20$$

Όπου  $e$ : σταθερά.

$n$ : ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου.

$m$ : μάζα του ηλεκτρονίου.  
 $\tau$ : ο χρόνος ηρεμίας των ηλεκτρονίων.

Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταλλικού αγωγού με τη θερμοκρασία οφείλεται στη μεταβολή του χρόνου ηρεμίας  $\tau$  αφού τα άλλα μεγέθη  $e$ ,  $m$ ,  $n$  που υπεισέρχονται στη σχέση (1.20) δεν μεταβάλλονται με την θερμοκρασία. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία μεταλλικού αγωγού, η θερμική ενέργεια προκαλεί αύξηση του εύρους δόνησης των ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος με αποτέλεσμα να μειώνεται η μέση ελεύθερη διαδρομή των ηλεκτρονίων (δηλαδή η μέση απόσταση που διανύουν μεταξύ των συγκρούσεων) και ο χρόνος ηρεμίας  $\tau$ . Συνεπώς η αγωγιμότητα των μετάλλων ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αποδεικνύεται ότι η ειδική αντίσταση των μετάλλων μεταβάλλεται γραμμικά με την απόλυτη θερμοκρασία.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{n e \mu} [\Omega m^{-1}] \quad 1.21$$

Τα πειραματικά δεδομένα επιβεβαιώνουν τη γραμμική εξάρτηση της ειδικής αντίστασης (ή της αγωγιμότητας) από την απόλυτη θερμοκρασία για μεγάλες περιοχές θερμοκρασίας. Αποκλίσεις από την γραμμικότητα παρατηρούνται κοντά στο απόλυτο μηδέν και στη θερμοκρασία τήξεως του υλικού. Σε εφαρμογές για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης με τη θερμοκρασία χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \theta) [\Omega/m] \quad 1.22$$

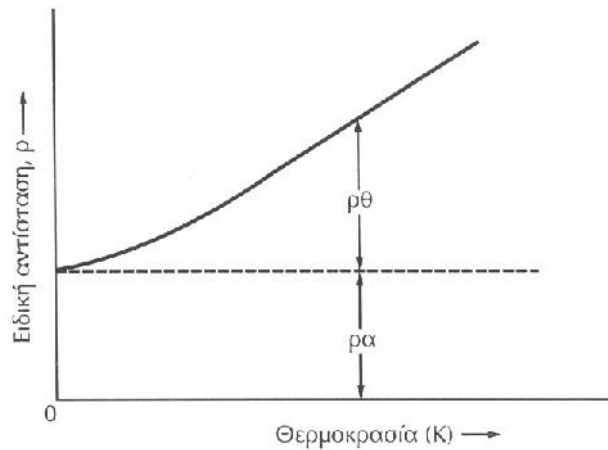
Όπου  $\rho_0$ : η ειδική αντίσταση του υλικού στους  $\theta = 0^\circ C$  [ $\Omega/m$ ].  
 $\rho$ : η ειδική αντίσταση του υλικού στους  $\theta$  [ $\Omega/m$ ].  
 $\theta$ : η θερμοκρασία [ $^\circ C$ ].  
 $\alpha$ : θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης  $^\circ C^{-1}$ .

Οι μετρήσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες δείχνουν ότι η ειδική αντίσταση των περισσότερων μετάλλων λαμβάνει μια οριακή τιμή μεγαλύτερη του μηδενός. Κοντά στο απόλυτο μηδέν το εύρος δόνησης των ατόμων του πλέγματος μειώνεται σημαντικά με αποτέλεσμα η κίνηση των ηλεκτρονίων να μην επηρεάζεται από τα δονούμενα άτομα. Η παραμένουσα αντίσταση του υλικού οφείλεται στις ατέλειες της κρυσταλλικής δομής. Οι ατέλειες θεωρούνται ότι δημιουργούν ενεργειακά φράγματα που παρεμποδίζουν την ευκινησία των ηλεκτρονίων.

Η ειδική αντίσταση ενός μετάλλου θεωρείται ότι αποτελείται από δύο συνιστώσες

$$\rho = \rho_0 + \rho_{ph} [\Omega/m] \quad 1.23$$

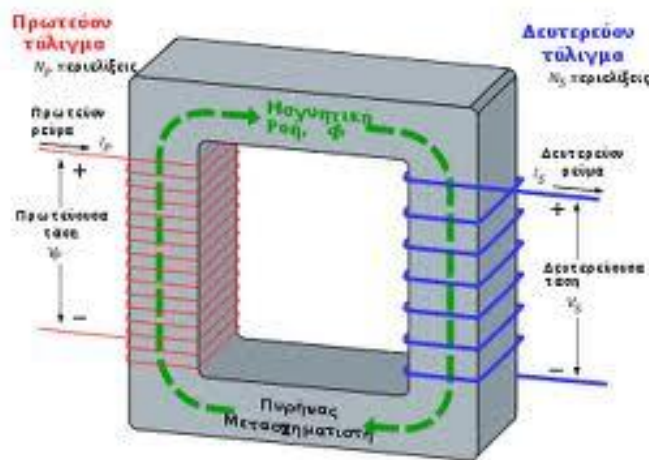
Η  $\rho_0$  αποδίδεται στις ατέλειες της δομής και είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, ενώ η  $\rho_{ph}$  αποδίδεται στη θερμοκρασία και οφείλεται στις συγκρούσεις μεταξύ των ηλεκτρονίων και των δονούμενων ατόμων. [1]



Εικόνα 1.8: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης με την θερμοκρασία

### 1.5 Μετασχηματιστής- Βασικές Αρχές.

Ο μετασχηματιστής βασίζεται σε δύο αρχές: πρώτον, ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο (ηλεκτρομαγνητισμός) και, δεύτερον, ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα τυλιγμένο σύρμα ("τύλιγμα"), επάγει διαφορά δυναμικού στα άκρα του τυλιγματος (ηλεκτρομαγνητική επαγωγή). Μεταβάλλοντας το ρεύμα στο πρωτεύον τυλίγμα, αλλάζει η ένταση του μαγνητικού του πεδίου. Εφόσον το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εκτείνεται και στο δευτερεύον τυλίγμα, επάγεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του δευτερεύοντος. Στο σχήμα φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα μετασχηματιστή. Ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από το πρωτεύον τυλίγμα δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο. Τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τυλίγμα περιελίσσονται γύρω από ένα μαγνητικό πυρήνα πολύ υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, π.χ. από σίδηρο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι όσο το δυνατόν περισσότερες γραμμές του μαγνητικού πεδίου που παράγει το πρωτεύον ρεύμα, βρίσκονται εντός του πυρήνα και περνούν τόσο από το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τυλίγμα.



Εικόνα 1.9: Ένας ιδανικός μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης με επισημασμένη την μαγνητική ροή στον πυρήνα του

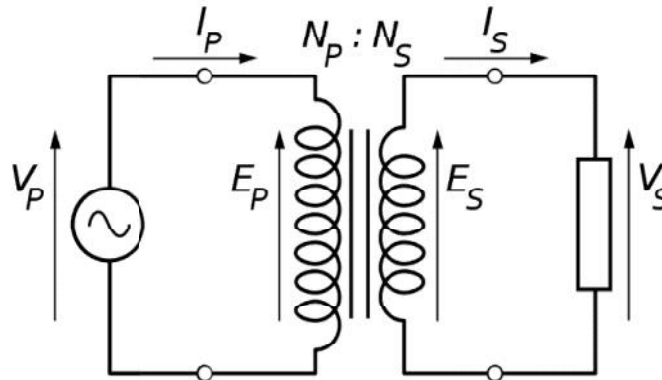
Ιδανική εξίσωση ισχύος.

Αν το δευτερεύον είναι συνδεδεμένο σε φορτίο που επιτρέπει την ροή ρεύματος, τότε έχουμε μετάδοση ισχύος από το πρωτεύον κύκλωμα στο δευτερεύον κύκλωμα. Ιδανικά ο μετασχηματιστής έχει τέλεια αποδοτικότητα, δηλαδή όλη η εισερχόμενη ενέργεια μεταφέρεται από το πρωτεύον, μέσω του μαγνητικού πεδίου, στο δευτερεύον. Αν αυτή η συνθήκη ισχύει, η εισερχόμενη ηλεκτρική ισχύς πρέπει να ισούται με την εξερχόμενη ισχύ.

$$P_{\text{εισόδου}} = I_P V_P \cos \theta_P = P_{\text{εξόδου}} = I_S V_S \cos \theta_S \quad 1.24$$

δίνοντας την εξίσωση του ιδανικού μετασχηματιστή

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} \quad 1.25$$



Εικόνα 1.10: Ο ιδανικός μετασχηματιστής ως στοιχείο κυκλώματος

Αν η τάση αυξηθεί (αυψωθεί) ( $V_S > V_P$ ), τότε το ρεύμα μειώνεται (υποβιβάζεται) ( $I_S < I_P$ ) κατά τον ίδιο συντελεστή. Οι μετασχηματιστές έχουν υψηλή αποδοτικότητα, οπότε αυτός ο τύπος αποτελεί ρεαλιστική προσέγγιση.

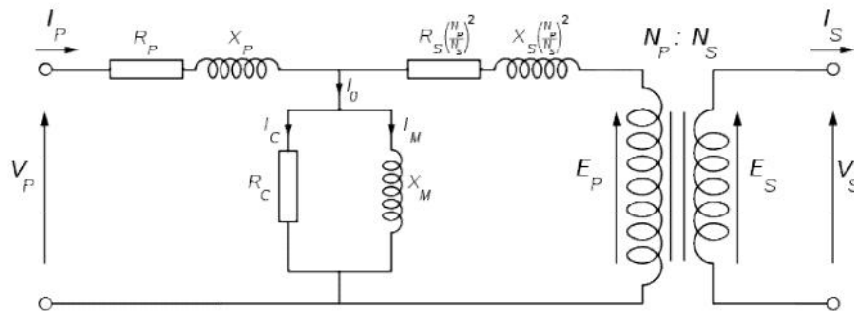
Η αντίσταση στο ένα κύκλωμα μετασχηματίζεται ανάλογα με το τετράγωνο του λόγου περιελίξεων.

Για παράδειγμα, αν μια αντίσταση  $Z_S$  είναι συνδεδεμένη στα άκρα του δευτερεύοντος, εμφανίζεται στο πρωτεύον να έχει αντίσταση  $Z_S(N_P/N_S)^2$ .

Ισοδύναμο κύκλωμα

Οι φυσικοί περιορισμοί των πραγματικών μετασχηματιστών μπορούν να συνοψιστούν σε ένα μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος, το οποίο "χτίζεται" γύρω από το μοντέλο του ιδανικού, χωρίς απώλειες, μετασχηματιστή. Η απώλεια ισχύος στα τυλίγματα εξαρτάται από το ρεύμα και αναπαρίσταται με τις σε σειρά συνδεδεμένες αντιστάσεις  $R_P$  και  $R_S$ . Η απώλεια ροής οδηγεί στην πτώση κλάσματος της εφαρμοζόμενης τάσης, πτώση η οποία δεν συνεισφέρει στην αμοιβαία σύζευξη και, κατά συνέπεια, μπορεί να μοντελοποιηθεί

με τις επαγωγικές αντιδράσεις  $X_P$  και  $X_S$ , συνδεδεμένες σε σειρά με την τέλεια συζευγμένη περιοχή.



**Εικόνα 1.11: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή, με τις δευτερεύουσες σύνθετες αντιστάσεις ανοιγμένες στην πλευρά του πρωτεύοντος**

Οι απώλειες του πυρήνα οφείλονται κυρίως στην υστέρηση και στις επιπτώσεις των δινορευμάτων στον πυρήνα, ενώ είναι ανάλογα του τετραγώνου της ροής του πυρήνα για λειτουργία σε συγκεκριμένη συχνότητα. Καθώς η ροή στον πυρήνα είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης τάσης, οι απώλειές του μπορούν να εκφραστούν με μια αντίσταση  $R_C$  τοποθετημένη παράλληλα με τον ιδανικό μετασχηματιστή. Ένας πυρήνας με πεπερασμένη διαπερατότητα απαιτεί ένα ρεύμα μαγνητισμού  $I_M$  για να διατηρήσει την αμοιβαία ροή σε αυτόν. Το ρεύμα μαγνητισμού είναι συμφασικό με τη ροή. Φαινόμενα κορεσμού οδηγούν στην μη γραμμικότητα της σχέσης μεταξύ των δύο, για λόγους απλότητας όμως αυτό το φαινόμενο τείνει να αγνοείται στα περισσότερα ισοδύναμα κυκλώματα. Με ένα ημιτονοειδές τροφοδοτικό, η ροή του πυρήνα υστερεί της επαγόμενης ΗΕΔ κατά  $90^\circ$  και αυτό το φαινόμενο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως αντίδραση μαγνητισμού  $X_M$  παράλληλα με το στοιχείο απώλειας του πυρήνα. Οι  $R_C$  και  $X_M$  μερικές φορές αναφέρονται από κοινού ως ο "κλάδος μαγνητισμού" του μοντέλου. Αν το δευτερεύον είναι ανοιχτοκυκλωμένο, το ρεύμα  $I_0$  που λαμβάνουμε στον κλάδο μαγνητισμού, αναπαριστά το ρεύμα κενού φορτίου του μετασχηματιστή.

Η δευτερεύουσα σύνθετη αντίσταση  $R_S$  και  $X_S$  συχνά ανάγεται στην πλευρά του πρωτεύοντος, αφού πολλαπλασιαστεί με τον τελεστή  $N^2$ .

Η ανάλυση μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω μεταφέροντας τον κλάδο μαγνητισμού στα αριστερά της σύνθετης αντίστασης του πρωτεύοντος, μια έμμεση παραδοχή ότι το ρεύμα μαγνητισμού είναι χαμηλό, και με την άθροιση στη συνέχεια των σύνθετων αντιστάσεων του πρωτεύοντος και του ανοιγμένου δευτερεύοντος, καταλήγοντας σε μια ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση.

Οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος ενός μετασχηματιστή μπορούν να υπολογιστούν από τα αποτελέσματα δύο δοκιμών στον μετασχηματιστή: της δοκιμής ανοιχτού κυκλώματος και της δοκιμής βραχυκυκλώματος. [6]



## 1.6 Θερμότητα , Θερμική Ενέργεια, Θερμοχωρητικότητα και Ειδική Θερμότητα.

### 1.6.1 Θερμότητα.

Την λέξη θερμότητα την χρησιμοποιούμε όταν περιγράφουμε την μεταφορά ενέργειας από ένα σημείο στο άλλο. Με άλλα λόγια, η ροή θερμότητας είναι η μεταφορά ενέργειας που συντελείται μόνο όταν υπάρχουν διαφορές θερμοκρασίας. Ενώ εσωτερική ενέργεια είναι η ενέργεια που έχει μία ουσία λόγω της θερμοκρασίας της. Η εσωτερική ενέργεια ενός υλικού σχετίζεται με την εσωτερική κίνηση των ατόμων και των μορίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η κίνηση των ατόμων και των μορίων σε ένα υλικό, τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του υλικού.

Πολλές φορές σε ένα υλικό η θερμοκρασία δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη. Όταν σε ένα υλικό δεν υπάρχει ομοιόμορφη θέρμανση γίνεται αυθόρμητα μια προσπάθεια η αυτή η διαφορά θερμοκρασίας να εξαλειφθεί και να αποκτήσει ίδια θερμοκρασία σε όλο το μήκος του. Διαφορά θερμοκρασίας σε ένα υλικό σημαίνει άνιση κατανομή της ενθαλπίας (ολική ενέργεια του συστήματος όταν βρίσκεται υπό σταθερή πίεση) και η δημιουργία ίδιας θερμοκρασίας στο σύνολο του υλικού σημαίνει αναδιανομή της ενέργειας.

### 1.6.2 Θέρμανση μέσω ηλεκτρισμού- Αντίσταση.

Ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα σε κάθε αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα. Καθώς το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε απώλειες, πολλές φορές απαιτείται ο περιορισμός του φαινομένου αυτού. Σε άλλες περιπτώσεις σκοπός είναι η παραγωγή θερμότητας οπότε το μεγάλο ποσό απωλειών δεν είναι δυνατό να αποφευχθεί. Το ρεύμα ρέει μέσα στον αγωγό ή όπως ονομάζεται στοιχείο θέρμανσης.

Ενέργεια  $W$  μετατρέπεται σε θερμότητα ή ισχύς  $P$  καταναλώνεται σε ένα επαγωγό-στοιχείο θέρμανσης, όταν αυτός διαρρέεται από ρεύμα και εκφράζεται από τον νόμο του Joule:

$$W = P \times t = I^2 \times R \times t = \frac{U^2}{R} \times t \quad 1.26$$

Όπου  $R$ : η ηλεκτρική αντίσταση του επαγωγού [ $\Omega$ ].

$I$ : το ρεύμα που διαρρέει τον επαγωγό [ $A$ ].

$U$ : η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του επαγωγού [ $V$ ].

$t$ : ο χρόνος θέρμανσης [ $s$ ].

Από την παραπάνω σχέση παρατηρείται ότι η ισχύς και κατά συνέπεια η ενέργεια εξαρτώνται από την αντίσταση  $R$  του επαγωγού.

$$R = \frac{1}{\gamma_T} \frac{L}{A} = \gamma_\theta \frac{L}{A} \quad 1.27$$

Όπου  $\gamma_\theta$ : η ειδική αντίσταση του επαγωγού.

$\gamma_T$ : η ειδική αγωγιμότητα του επαγωγού.

$L$ : το μήκος του επαγωγού [ $m$ ].

A: η διατομή του επαγωγού [m<sup>2</sup>].

Η ειδική αντίσταση  $\rho_{\theta}$  του επαγωγού εξαρτάται από το υλικό του επαγωγού. Επιπλέον η ειδική αντίσταση  $\rho_{\theta}$  του επαγωγού αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (βλέπε παράγραφο 1.4). Επομένως, τα στοιχεία προς θέρμανση απαιτούν μία ελεγχόμενη πηγή τάσης ή ρεύματος έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό ποσό θερμότητας ή η επιδιωκόμενη θερμοκρασία του στοιχείου.

### **1.6.3 Σχεδιασμός στοιχείων θέρμανσης.**

Ο πιο σημαντικός παράγοντας για την εφαρμογή και την χρήση θερμότητας σε ένα υλικό- προϊόν είναι το ποσό θερμότητας που πρέπει να μεταφερθεί στο υλικό ή στο προϊόν. Παρακάτω, ακολουθεί ένα παράδειγμα, όπου σκοπός είναι η επίτευξη της θέρμανσης του στοιχείου στους 1000 °C (10KW θερμική χωρητικότητα) μέσω 5 θερμαντικών στοιχείων 2KW στα 220V το κάθε ένα.

Σύμφωνα με την σχέση (1.28), η ηλεκτρική αντίσταση είναι ίση με:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{(220V)^2}{10000W} = 24,2 \quad 1.28$$

Ο επαγωγός-θερμικό στοιχείο είναι σε μορφή συμπαγούς ράβδου (ουσιαστικά σύρμα) κατασκευασμένος από CrFeAl με ειδική αντίσταση  $\rho_{\theta} = 1.45 \text{ m}\Omega/\text{m}$ , ο οποίος έχει παράγοντα θερμοκρασίας  $c_T = 1.04$  στους 1000 °C. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται από την θερμοκρασία και στους 1000 °C είναι ίση με  $1.5 \text{ m}\Omega/\text{m}$ .

Η διάμετρος του επαγωγού δίδεται  $d=1.5\text{mm}$  και η διατομή που προκύπτει είναι ίση με  $A=1.8 \text{ mm}^2$ , με την βοήθεια της σχέσης [1.27] προκύπτει το μήκος του επαγωγού  $l=29\text{m}$ .

Η ισχύς που μπορεί να προσδοθεί στον επαγωγό δεν είναι απεριόριστη- μπορεί να μειωθεί ο χρόνος ζωής ή να λιώσει ο επαγωγός . Οριακές τιμές συνιστώνται και εξαρτώνται από την εφαρμογή. Στην δική μας περίπτωση το όριο δεν μπορεί να είναι πάνω από  $2 \text{ W/cm}^2$  . Προκύπτει ότι:

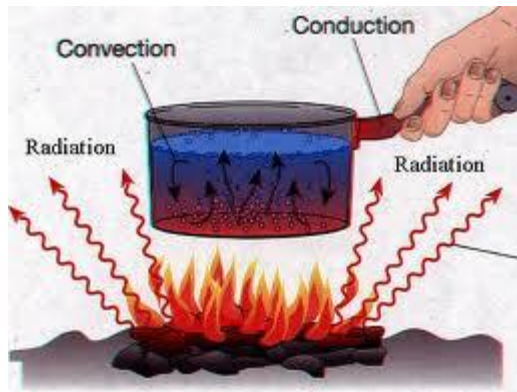
$$\frac{P}{l \times d} = \frac{2000W}{2900\text{cm} \times 0.15\text{cm}} = 1.46 \text{ W/cm}^2 \quad 1.29$$

Σε αυτή την υποτιθέμενη εφαρμογή, η οποία αποτελείται από 5 θερμικά στοιχεία τοποθετημένα σε σειρά διαμέτρου  $d=1.5\text{mm}$  και συνολικού μήκους 29m.

Ένα σημαντικό κριτήριο στην επιλογή των στοιχείων θέρμανσης είναι να έχουν υψηλή αντίσταση. Αν η αντίσταση τους είναι μικρή τότε θα πρέπει να αναπτυχθούν μεγάλα ρεύματα για να επιτευχθούν τα κατάλληλα ποσά θερμότητας. Έτσι πολλές φορές απαιτείται η χρήση μετασχηματιστών, αυξάνοντας τον όγκο, το βάρος και κόστος του εκάστοτε συστήματος. Επιπρόσθετα, μεγάλο πλεονέκτημα θεωρείται, η αντίσταση να μην μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, έτσι εξασφαλίζεται καλύτερος έλεγχος.

### 1.6.4 Μεταφορά Θερμότητας

Τα στοιχεία θέρμανσης σχεδιάζονται και κατασκευάζονται λαμβάνοντας υπόψη τις βασικές παραμέτρους για την θέρμανση μέσω αντίστασης. Η μεταφορά θερμότητας από τα θερμαντικά στοιχεία στα αντικείμενα ή τα προϊόντα προς θέρμανση πραγματοποιείται μέσω τριών μηχανισμών: αγωγή (conduction), συναγωγή (convection) και ακτινοβολία (radiation).



Εικόνα 1.12: Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

Από την εφαρμογή εξαρτάται ποιοι μηχανισμοί λαμβάνουν χώρα και σε τι βαθμό ο καθένας διαμορφώνει το τελικό αποτέλεσμα.

Η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής αποτελεί τον κύριο μηχανισμό θέρμανσης για συμπαγή υλικά. Εκτός από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμαντικού στοιχείου, η αγωγιμότητα εξαρτάται από την αγωγή θερμότητας (conductivity)  $\lambda$  και την διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T$  μεταξύ των δύο μερών (στοιχείου και αντικειμένου θέρμανσης). Η ροή θερμότητας που προκύπτει από την αγωγή είναι:

$$Q_A = \lambda \times A \times \Delta T / L \quad 1.30$$

Όπου  $L$ : το μήκος του επαγωγού [m].

$A$ : η διατομή του επαγωγού [m<sup>2</sup>].

Η συναγωγή συμβαίνει στα υγρά με την θερμότητα να ρέει από το πιο θερμό μέρος του υγρού στο πιο ψυχρό ή μέσω της επαφής του υγρού με άλλα σώματα. Η ροή θερμότητας που μεταφέρεται με συναγωγή εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας που γίνεται ανταλλαγή θερμότητας, την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών και τις ιδιότητες του υγρού.

$$Q_S = h \times A \times \Delta T \quad 1.31$$

Στον μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία η σχέση που δίνει την ροή θερμότητας είναι η εξής:

$$Q_R = \quad \times \quad \times \quad \times \quad ^4 \quad 1.32$$

Όπου T: θερμοκρασία [°C].  
 A: η διατομή της επιφάνειας επαφής [m<sup>2</sup>].  
 ε: σταθερά Stefan- Boltzann.  
 ε: ικανότητα εκπομπής.

### **1.6.5 Ικανότητα ενεργειακής απολαβής.**

Η απόδοση θερμικής ενέργειας εξαρτάται από την ικανότητα μετάδοσης θερμότητας του θερμικού στοιχείου. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το στοιχείο θέρμανσης θερμαίνει το υλικό ή προϊόν με ένα από τους παραπάνω μηχανισμούς ή συνδυασμό αυτών. Κατά την μετάδοση όμως της θερμότητας προς το αντικείμενο προς θέρμανση υπάρχουν απώλειες. Απώλειες, επίσης, παρατηρούνται κατά την θέρμανση του στοιχείου θέρμανσης από την πηγή. Όλες αυτές οι απώλειες πρέπει να ληφθούν υπόψη για να φτάσει στο αντικείμενο προς θέρμανση το επιθυμητό ποσό θερμότητας. Σε διαφορετική περίπτωση, η ποσότητα θερμότητας που θα προσδοθεί στο αντικείμενο προς θέρμανση θα είναι μικρότερη και η επιθυμητή θερμοκρασία δεν θα επιτευχθεί.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η ολική ενέργεια θα δίδεται από την σχέση:

$$W = Q_{\text{Total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad 1.33$$

Όπου Q<sub>1</sub>: η ενέργεια που καταλήγει στο αντικείμενο θέρμανσης.  
 Q<sub>2</sub>: η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την μεταφορά θερμότητας από το στοιχείο θέρμανσης στο αντικείμενο προς θέρμανση.  
 Q<sub>3</sub>: η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την μεταφορά θερμότητας από την πηγή στο αντικείμενο προς θέρμανση.

Συνεπώς η Ικανότητα ενεργειακής απολαβής δίδεται από την σχέση:

$$n = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \quad 1.34$$

Η ενέργεια Q<sub>1</sub> που καταλήγει στο αντικείμενο προς θέρμανση υπολογίζεται από την σχέση (1.37) που παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο. [22]

### **1.6.6 Υπολογισμός Θερμικής Ενέργειας.**

Η ποσότητα της θερμότητας που πρέπει να προσδώσουμε σε ένα υλικό για να αυξήσουμε τη θερμοκρασία ορισμένης μάζας του κατά ορισμένους βαθμούς εξαρτάται από το υλικό. Λόγου χάρη, η θερμότητα που πρέπει να προσδώσουμε σε 1 Kg νερού για να αυξήσουμε την θερμοκρασία του κατά 1°C είναι 4186 J, αλλά για να αυξήσουμε κατά 1°C τη θερμοκρασία 1 Kg χαλκού πρέπει να του προσδώσουμε μόνον 387 J.

Ορίζουμε ως θερμοχωρητικότητα, C, ενός αντικειμένου ορισμένης μάζας τη θερμότητα (θερμική ενέργεια) που πρέπει να του προσδώσουμε για να αυξήσουμε τη θερμοκρασία κατά έναν βαθμό Κελσίου.

Βλέπουμε λοιπόν ότι, όταν προσδώσουμε  $Q$  μονάδες θερμότητας σε ένα αντικείμενο, αυξάνουμε την θερμοκρασία του κατά  $\Delta T$ , τότε

$$Q = C \Delta T \text{ [J]} \quad 1.35$$

Είναι όμως προφανές ότι η θερμοχωρητικότητα ενός αντικειμένου είναι ανάλογη προς τη μάζα του. Για το λόγο αυτό ορίζουμε τη θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μάζας ενός υλικού και η ποσότητα αυτή ονομάζεται ειδική αντίσταση,  $c$ .

$$c = \frac{C}{m} \text{ [J/ Kg } ^\circ\text{C]} \quad 1.36$$

Πολλές φορές, αντί να χρησιμοποιούμε τον όρο ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μάζας, θα λέμε απλώς θερμοχωρητικότητα.

Στον πίνακα αναγράφονται οι τιμές της ειδικής θερμότητας διαφόρων υλικών σε συνήθη θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση.

Τώρα λοιπόν μπορούμε να εκφράσουμε την θερμική ενέργεια  $Q$  που προσδόθηκε σε ένα σώμα μάζας  $m$  και ειδικής θερμότητας  $c$  από το περιβάλλον και του μετέβαλε την θερμοκρασία κατά  $\Delta T$  ως

$$Q = mc \Delta T \text{ [J]} \quad 1.37$$

Λόγου χάρη, η θερμική ενέργεια που πρέπει να προσδώσουμε για να αυξηθεί η θερμοκρασία 0,5 Kg νερού κατά  $3^\circ\text{C}$  ισούται με  $(0,5 \text{ Kg}) \times (4186 \text{ J/ Kg } ^\circ\text{C}) \times (3^\circ\text{C}) = 6280 \text{ J}$ .

[7]

### **1.6.7.1 Θέρμανση με Συνεχές Ρεύμα.**

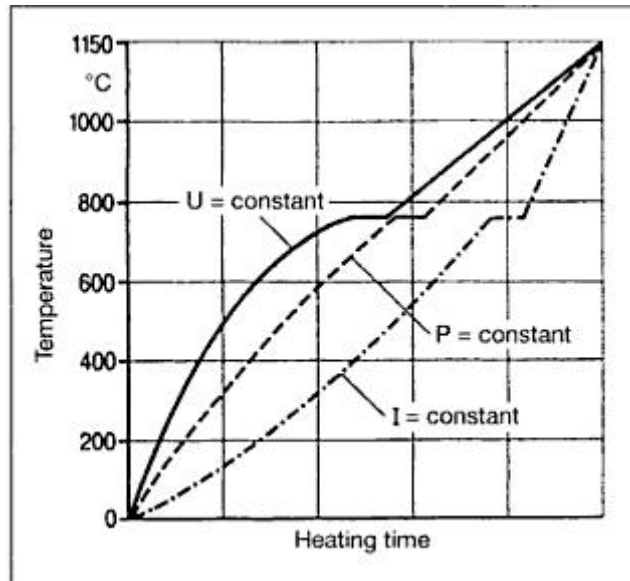
Όταν χρησιμοποιούμε DC, η θερμότητα διανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την διατομή του αγωγού. Βασικά, θέρμανση μπορεί να προκύψει με συνεχές ρεύμα, συνεχή τάση και συνεχή ισχύ.

Όταν χρησιμοποιείται συνεχή ρεύμα, η θερμοκρασία θα αυξηθεί αργά στην αρχή, επειδή η αγωγιμότητα είναι μεγάλη και επομένως η ηλεκτρική αντίσταση είναι μικρή στο αρχικό στάδιο.

Όταν χρησιμοποιείται συνεχή τάση, η θερμοκρασία θα αυξηθεί γρήγορα στην αρχή, επειδή η ηλεκτρική αντίσταση είναι μικρή για χαμηλές θερμοκρασίες.

Όταν χρησιμοποιείται συνεχή ισχύ, πρέπει το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος να είναι ίσο καθ' όλη την διάρκεια της θέρμανσης, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας είναι σχεδόν γραμμική, με εξαίρεση το σημείο μετάβασης (βλέπε εικόνα 1.13).

Στο εύρος χαμηλών θερμοκρασιών η θερμοκρασία είναι η ίδια σε όλη την διατομή του αγωγού, με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, οι θερμοκρασίες που επικρατούν στον πυρήνα είναι υψηλότερες από αυτές που επικρατούν στην επιφάνεια του αγωγού, εξαιτίας των επιφανειακών απωλειών.



Εικόνα 1.13: Απαιτούμενος χρόνος θέρμανσης κατά την θέρμανση με συνεχή τάση, συνεχή ρεύμα, συνεχή ισχύ

#### 1.6.7.2 Θέρμανση με Εναλλασσόμενο Ρεύμα.

Κατά την θέρμανση με εναλλασσόμενο ρεύμα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο (βλέπε παράγραφο 1.3).

Η κατανομή της θερμοκρασίας εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού που θερμαίνεται, την διατομή του και τον ρυθμό θέρμανσης. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η θερμοκρασία είναι υψηλότερη στην επιφάνεια του υλικού και μεταφέρεται προς τον πυρήνα του μέσω της αγωγής. Η διαφορά θερμοκρασίας είναι ακόμη μεγαλύτερη καθώς αυξάνεται η αναλογία  $\alpha/\delta$  (διάμετρος αντικείμενου προς θέρμανση/ βάθος διείσδυσης) και με γρηγορότερη θέρμανση. Στην θερμοκρασία Curie, η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού και του πυρήνα συγκλίνουν, όταν η αναλογία  $\alpha/\delta$  είναι μικρή. [22]

#### 1.7 Συντονισμός.

Όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 2, σημαντικό ρόλο στην Διάταξη της Επαγωγικής Θέρμανσης παίζει το κύκλωμα αντιστάθμισης- συντονισμού. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα ενότητα γίνεται μια σύντομη αναφορά στον συντονισμό και στον τρόπο υλοποίησής του.

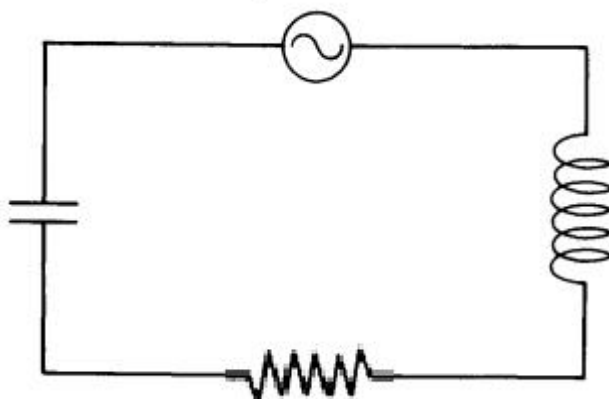
Σε πάρα πολλές εφαρμογές, έτσι και στην Επαγωγική Θέρμανση, γίνεται προσπάθεια ο συντελεστής ισχύος να γίνει ίσος με την μονάδα. Αυτό πραγματοποιείται με την κατάλληλη τοποθέτηση πυκνωτών (και σπανιότερα πηνίων), έτσι ώστε το φορτίο που θα «βλέπει» η πηγή να είναι, όσο το δυνατόν γίνεται, ωμικό. Σκοπός είναι το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος που μεταφέρεται στο φορτίο να είναι ενεργή και να περιοριστεί (αν είναι εφικτό να επαλειφθεί) η άεργος ισχύς.

Για να γίνει κατανοητό το πώς αποθηκεύεται ή σπαταλιέται η ενέργεια σε διάφορα στοιχεία σε ένα κύκλωμα συντονισμού, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η φύση της τάσης που εμφανίζεται στα άκρα τους και του ρεύματος που τα διαρρέει. Όταν μια AC τάση εφαρμόζεται στα άκρα μιας αντίστασης  $R$ , η πτώση τάσης στα άκρα της είναι σε

φάση με το ρεύμα που την διαρρέει και είναι ίση με  $V_R = I \times R$ . Από την άλλη μεριά, σε ένα πυκνωτή ή ένα πηνίο, η τάση και το ρεύμα βρίσκονται σε διαφορά φάσης μεταξύ τους. Στον πυκνωτή το ρεύμα προηγείται της τάσης κατά  $90^\circ$ , ενώ στο πηνίο καθυστερεί κατά  $90^\circ$ . Έτσι η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι ίση με  $V_C = I \times X_C$  και η τάση στα άκρα του πηνίου ίση με  $V_L = I \times X_L$ .

### 1.7.1 Συντονισμός Σειράς.

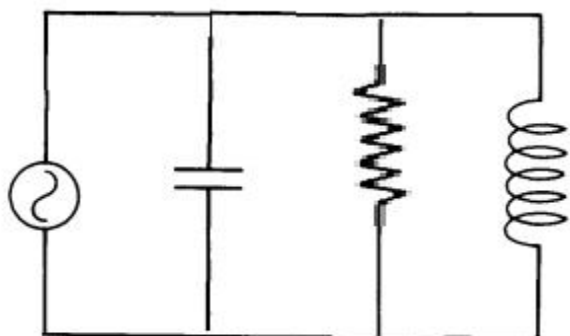
Η ονομασία του συντονισμού υποδηλώνει τον τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα στοιχεία. Στον συντονισμό σειράς (εικόνα 1.14), η επαγωγική αντίδραση είναι ίση με την χωρητική  $X_L = X_C$ , κατά μέτρο αλλά με διαφορά φάσης  $180^\circ$ , οπότε η συνολική εμπέδηση που βλέπει η πηγή είναι ίση με την αντίσταση  $R$  του κυκλώματος.



Εικόνα 1.14: Κύκλωμα Συντονισμού Σειράς.

### 1.7.2 Συντονισμός εν παραλλήλω.

Κατά τον συντονισμό αυτό τα στοιχεία είναι διατεταγμένα παράλληλα (εικόνα 1.15).



Εικόνα 1.14: Κύκλωμα Συντονισμού εν παραλλήλω.

Κατά τον συντονισμό εν παραλλήλω τα ρεύματα του πηνίου και του πυκνωτή είναι ίσα κατά μέτρο αλλά αντίθετης φάσης οπότε αναιρούν το ένα το άλλο. Έτσι, όπως και στον

συντονισμό σειράς, η συνολική εμπέδηση που βλέπει η πηγή είναι η αντίσταση R και είναι η μόνη που καταναλώνει ενέργεια.

### **1.7.3 Συχνότητα Συντονισμού, Πυκνωτής Συντονισμού και Ποιότητα Ισχύος.**

Η συχνότητα συντονισμού είναι η συχνότητα κατά την οποία  $X_L = X_C$  και δίδεται από την σχέση:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \quad 1.38$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει τόσο κατά τον συντονισμό σειράς όσο και κατά τον παράλληλο συντονισμό. Κατά την Επαγωγική Θέρμανση η συχνότητα συντονισμού επιλέγεται να είναι ίση ή πάρα πολύ κοντά στην συχνότητα που παράγει ο αντιστροφέας. Ίση δηλαδή με την συχνότητα που απαιτείται για να προκαλέσει το απαιτούμενο βάθος διείσδυσης δ.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, το φορτίο είναι ωμικό- επαγωγικό (όμοια συμβαίνει και στην Επαγωγική Θέρμανση), οπότε αρκεί να τοποθετηθεί ένα πυκνωτής κατάλληλα με το υπόλοιπο κύκλωμα έτσι ώστε να επιτευχθεί ο συντονισμός. Για τον λόγο αυτό η σχέση (1.38) λύνεται ως προς C και έτσι προκύπτει:

$$C = \left(\frac{1}{2\pi f_o}\right)^2 \times \left(\frac{1}{L}\right) \text{ [F]} \quad 1.38$$

Στην Επαγωγική Θέρμανση χρησιμοποιούνται δύο τύποι πυκνωτών: οι πυκνωτές λαδιού για συχνότητες 10,000 Hz και οι κεραμικοί για συχνότητες μικρότερες των 50 KHz.

Η συνήθης μονάδα μέτρησης των πυκνωτών είναι το Farad [F], επειδή, όμως, είναι πολύ μεγάλη ποσότητα συνήθως χρησιμοποιείται το μF ή το mF. Σε πολλές εφαρμογές και στην Επαγωγική Θέρμανση όμως, σαν μονάδα χρησιμοποιείται η άεργος ισχύς που παράγει ο πυκνωτής (KVAR). Αυτό συμβαίνει επειδή, για διάφορους λόγους μπορεί να αλλάξει η τάση της πηγής ή συχνότητα της οπότε αυτόματα αλλάζει και η χωρητικότητα και κατ'επέκταση η άεργος ισχύς που προσφέρει στην διάταξη. Αν κάποιος θέλει να υπολογίσει την άεργο ισχύ που προσφέρει ο πυκνωτής για συγκεκριμένη τάση και συχνότητα, μπορεί να το κάνει μέσω της σχέσης:

$$Q_C = \frac{2\pi f C V^2}{1000} \text{ [KVAR]} \quad 1.39$$

Ο λόγος της επαγωγικής αντίδρασης προς την αντίσταση του κυκλώματος, συχνά, ονομάζεται συντελεστής ποιότητας και συμβολίζεται με Q. Τα κυκλώματα που έχουν υψηλό συντελεστή ποιότητας παράγουν μεγαλύτερα ρεύματα. Ο συντελεστής ποιότητας για ένα συντονισμένο κύκλωμα μεταβάλλεται από 20 έως 100. Ο συντελεστής ποιότητας προσφέρει, ακόμη, μια σύγκριση ανάμεσα στην συνολική ενέργεια του συντονισμένου κυκλώματος και στην ενέργεια που καταναλώνεται στην συνολική αντίσταση του κυκλώματος. Επειδή ένα «καθαρό» πηνίο ή πυκνωτής δεν καταναλώνουν ενέργεια, οι απώλειες του κυκλώματος μειώνονται με την μείωση της τιμής της αντίστασης. Επομένως, κατά την Επαγωγική Θέρμανση, επειδή σημαντικό μέρος της αντίστασης εμφανίζεται στο

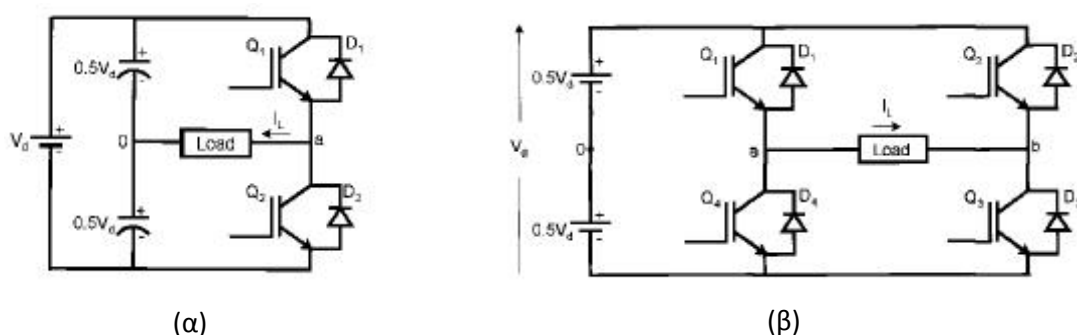


πηνίο εργασίας, η αντίστασή του πρέπει να μειωθεί για να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη απόδοση (efficiency  $\eta$ ). [27]

### 1.8 Αντιστροφείς Διακοπτικού Τύπου.

Σκοπός των αντιστροφέων Dc-Ac είναι η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς ac τάσης εξόδου, με ελεγχόμενα τόσο το πλάτος της όσο και την συχνότητα της. Η έξοδος των αντιστροφέων μπορεί να είναι είτε μιας φάσης είτε τριών. Ενώ, η είσοδος τους μπορεί να είναι είτε μια πηγή τάσης, είτε μια πηγή ρεύματος. Τότε, μιλάμε, για αντιστροφείς πηγής τάσης και για αντιστροφείς πηγής ρεύματος, αντίστοιχα.

Τα δύο κύρια κυκλώματα μονοφασικού αντιστροφέα είναι αυτό της ημι-γέφυρας και της πλήρης γέφυρας. Στην παρούσα πτυχιακή, επιλέγεται, η χρήση αντιστροφέα πλήρης γέφυρας εξαιτίας των πλεονεκτημάτων της έναντι του αντιστροφέα ημι-γέφυρας.



Εικόνα 1.15: Κυκλώματα Αντιστροφέα (α) ημι-γέφυρας (β) πλήρης γέφυρας.

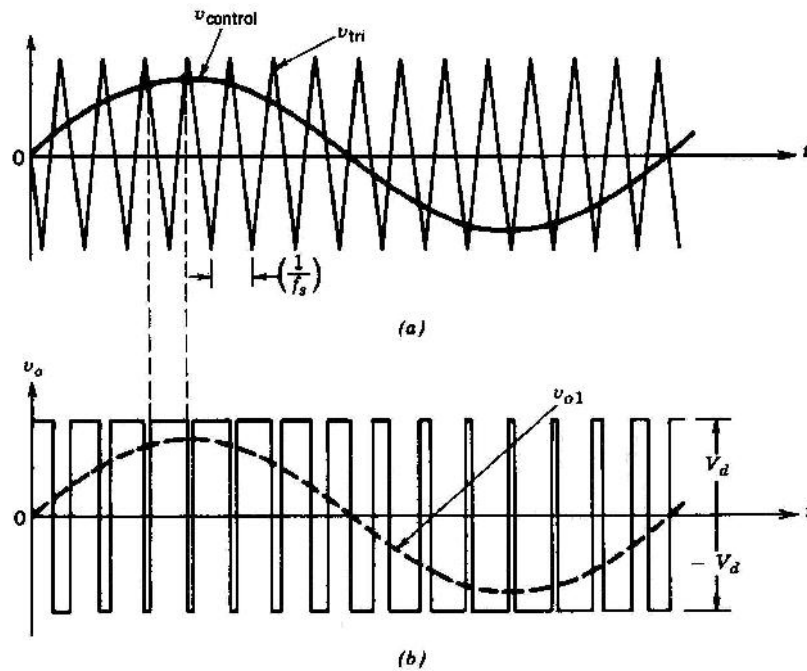
Ο έλεγχος της τάσης εξόδου του αντιστροφέα συνήθως γίνεται με την τεχνική της Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών και την Τετραγωνική κυματομορφή.

### 1.8.1 Τεχνικές Ελέγχου της Τάσης Εξόδου.

#### 1.8.1.1 Στρατηγική της Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών.

Σε κυκλώματα αντιστροφέων η διαμόρφωση PWM είναι πολύπλοκη. Για την παραγωγή μιας ημιτονοειδούς τάσης εξόδου σε μια επιθυμητή συχνότητα  $f_o$ , συγκρίνεται ένα ημιτονοειδές σήμα ελέγχου στην επιθυμητή συχνότητα με μια τριγωνική κυματομορφή, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.16. Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής καθορίζει τη συχνότητα μετάβασης του αντιστροφέα και διατηρείται γενικά σταθερή, όπως και το πλάτος της  $V_{tri}$ .

Πριν από την εξέταση της συμπεριφοράς της διαμόρφωσης PWM, είναι απαραίτητο να οριστούν μερικοί όροι. Η συχνότητα  $f_s$  της τριγωνικής κυματομορφής  $u_{tri}$  καθορίζει τη συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα και λέγεται συχνότητα μετάβασης (switching frequency). Το σήμα ελέγχου  $u_{control}$  χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής και έχει μια συχνότητα  $f_1$ , η οποία είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα (η  $f_1$  ονομάζεται και συχνότητα διαμόρφωσης, modulating frequency). Η τάση εξόδου του αντιστροφέα δεν θα είναι μια τέλεια ημιτονοειδής κυματομορφή, αλλά θα περιέχει αρμονικές της  $f_1$ .



Εικόνα 1.16: Διαμόρφωση Εύρους Παλμών PWM.

Ο συντελεστής Διαμόρφωσης Πλάτους  $m_a$  ορίζεται ως

$$m_a = \frac{V_{\text{control}}}{V_{\text{tri}}} \quad 1.40$$

Όπου  $V_{\text{control}}$ : το πλάτος του σήματος ελέγχου [V].

$V_{\text{tri}}$ : το πλάτος του τριγωνικού σήματος, το οποίο γενικά διατηρείται σταθερό [V].

Ο συντελεστής Διαμόρφωσης Συχνότητας  $m_f$  ορίζεται ως

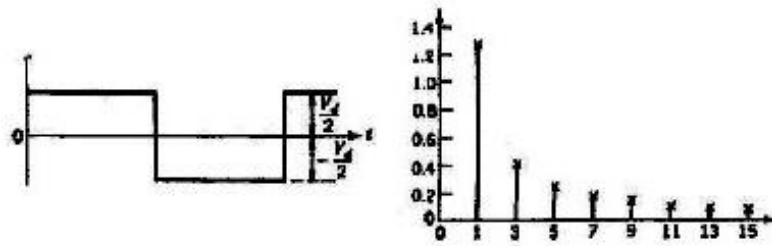
$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad 1.41$$

Όπου  $f_s$ : η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής [Hz].

$f_1$ : η επιθυμητή θεμελιώδη συχνότητα [Hz].

### **1.8.1.2 Μετάβαση Με Τετραγωνική Κυματομορφή.**

Στη μετάβαση με τετραγωνική κυματομορφή κάθε διακόπτης του σκέλους του αντιστροφέα της Εικόνας 1.15(α) είναι κλειστός για μια ημιπερίοδο ( $180^\circ$ ) της επιθυμητής εξόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τάση εξόδου με την κυματομορφή της εικόνας 1.17.

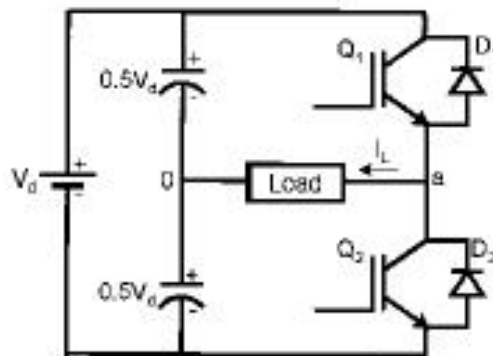


Εικόνα 1.17: Διαμόρφωση Εύρους Παλμών PWM.

## 1.8.2 Μονοφασικοί Αντιστροφέες.

### 1.8.2.1 Αντιστροφέες Με Μισή Γέφυρα (Μονοφασικοί).

Δίνεται ο αντιστροφέας με μισή γέφυρα (εικόνα 1.17). Στα άκρα της dc εισόδου συνδέονται σε σειρά δυο ίδιοι πυκνωτές. Το σημείο σύνδεσης των πυκνωτών βρίσκεται στο μισό δυναμικό, οπότε στα άκρα του κάθε πυκνωτή αναπτύσσεται τάση ίση με  $(V_d/2)$ . Οι χωρητικότητες που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλες, ώστε να είναι λογική η υπόθεση ότι το δυναμικό στο σημείο "ο" παραμένει ουσιαστικά σταθερό σε σχέση με το δυναμικό του αγωγού N. Επομένως, αυτή η δομή κυκλώματος ταυτίζεται με τον βασικό αντιστροφέα ενός σκέλους που εξετάστηκε προηγουμένως και είναι  $u_o = u_{A0}$ .



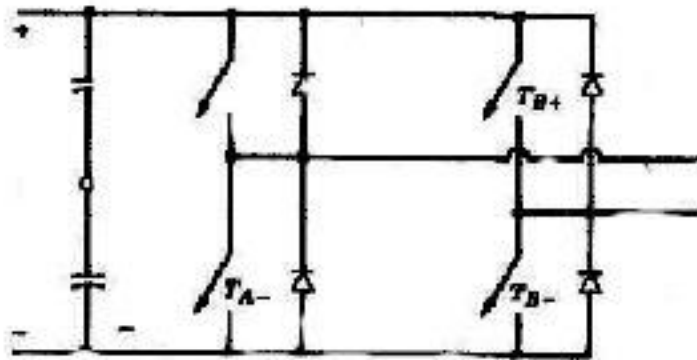
Εικόνα 1.17: Αντιστροφέας με Μισή Γέφυρα.

Θεωρώντας μετάβαση με διαμόρφωση PWM, διαπιστώνεται ότι η κυματομορφή της τάσης εξόδου θα είναι ακριβώς όπως στην εικόνα 1.16(β). Πρέπει να σημειωθεί ότι, ανεξάρτητα από τις καταστάσεις των διακοπών, το ρεύμα μοιράζεται εξίσου μεταξύ των δύο πυκνωτών C+ και C-. (που έχουν ίσες και πολύ μεγάλες χωρητικότητες). Όταν ο T+ είναι κλειστός, άγει είτε ο T+ είτε η D+, ανάλογα με τη φορά του ρεύματος εξόδου και το  $i_o$  μοιράζεται εξίσου μεταξύ των δύο πυκνωτών. Παρόμοια, όταν ο διακόπτης T- είναι κλειστός, άγει είτε ο T- είτε η D-, ανάλογα με τη φορά του ρεύματος εξόδου και το  $i_o$  μοιράζεται εξίσου μεταξύ των δύο πυκνωτών. Επομένως, οι πυκνωτές C+ και C- είναι "ουσιαστικά" συνδεδεμένοι παράλληλα στην πορεία του  $i_o$ . Αυτό, εξηγεί επίσης, γιατί το σημείο σύνδεσης "ο" παραμένει στο μισό δυναμικό. Εφόσον το  $i_o$  πρέπει να περάσει από

τον παράλληλο συνδυασμό των C+ και C-, το  $i_o$  στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας δεν έχει dc συνιστώσα. Επομένως, οι πυκνωτές αυτοί λειτουργούν ως πυκνωτές αποκοπής του dc, εξαλείφοντας έτσι το πρόβλημα κορεσμού του μετασχηματιστή από την πλευρά του πρωτεύοντος, αν χρησιμοποιείται μετασχηματιστής στην έξοδο για να παρέχει ηλεκτρική απομόνωση. Εφόσον το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα ενός τέτοιου μετασχηματιστή δεν θα εξαναγκάζεται σε μηδενισμό με κάθε μετάβαση, η ενέργεια της αυτεπαγωγής διαρροής του μετασχηματιστή δεν παρουσιάζει πρόβλημα στους διακόπτες.

### **1.8.2.2 Αντιστροφείς Με Πλήρη Γέφυρα (Μονοφασικοί).**

Ένας αντιστροφέας με πλήρη γέφυρα φαίνεται στην εικόνα 1.18. Ο αντιστροφέας αυτός αποτελείται από δύο αντιστροφείς ενός σκέλους και προτιμάται σε σχέση με άλλες διατάξεις σε υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος. Με την ίδια dc τάση εισόδου, η μέγιστη τάση εξόδου του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα είναι ιδιπλάσια εκείνης του αντιστροφέα με μισή γέφυρα. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια ισχύ, το ρεύμα εξόδου και τα ρεύματα των διακοπών είναι το μισό εκείνων του αντιστροφέα με μισή γέφυρα. Σε υψηλά επίπεδα ισχύος, αυτό είναι ιδιαίτερο πλεονέκτημα, εφόσον απαιτεί λιγότερους παραλληλισμούς ημιαγωγικών στοιχείων.



Εικόνα 1.18: Αντιστροφέας με Πλήρη Γέφυρα.

#### **1.8.2.2.1 Διαμόρφωση PWM με Διπολική Τάση Εξόδου.**

Εδώ, τα ζεύγη των διακοπών (TA+, TB-) και (TA-, TB+) από τα δύο σκέλη της εικόνας 1.18 αλλάζουν κατάσταση ως ζεύγη διακοπών 1 και 2 αντίστοιχα. Με το είδος αυτό της μετάβασης με διαμόρφωση PWM, η κυματομορφή της τάσης εξόδου του σκέλους A ταυτίζεται με την έξοδο του βασικού αντιστροφέα ενός σκέλους, η οποία καθορίζεται κατά τον ίδιο τρόπο με σύγκριση του  $V_{control}$  και της  $V_{tri}$ . Η έξοδος του σκέλους B του αντιστροφέα είναι αντίθετη της εξόδου του σκέλους A. Και το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου μπορεί να βρεθεί από τις εξισώσεις 1.42 και 1.43.

$$V_{o1} = m_a V_d \quad m_a \leq 1 \quad 1.42$$

Όπου  $V_{o1}$ : το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας [V].

$V_d$ : η τάση εισόδου του αντιστροφέα [V].

$$V_d < V_{o1} < \frac{4}{3}V_d \quad m_a > 1 \quad 1.43$$

### 1.8.2.2.2 Διαμόρφωση PWM με Μονοπολική Τάση Εξόδου.

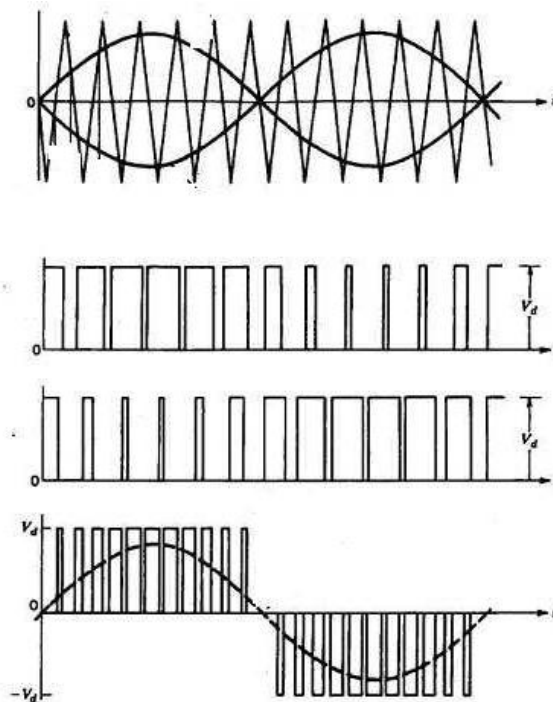
Στη διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου οι διακόπτες στα δυο σκέλη του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα δεν αλλάζουν κατάσταση ταυτόχρονα, όπως στην προηγούμενη διάταξη διαμόρφωσης PWM. Εδώ, τα σκέλη A και B του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα ελέγχονται ξεχωριστά με σύγκριση της  $u_{tri}$  με τα  $u_{control}$  και  $-u_{control}$  αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.19(α), η σύγκριση του  $u_{control}$  με την τριγωνική κυματομορφή έχει ως αποτέλεσμα τα ακόλουθα λογικά σήματα για τον έλεγχο των διακοπών του σκέλους A:

$$\begin{aligned} V_{control} > v_{tri}: & \quad TA+ \text{ on} & \quad \text{και } v_{AN} = V_d \\ V_{control} < V_{tri}: & \quad TA- \text{ on} & \quad \text{και } v_{AN} = 0 \end{aligned}$$

Η τάση εξόδου του σκέλους A του αντιστροφέα σε σχέση με τον αγωγό N που φέρει την αρνητική dc τάση φαίνεται στην εικόνα 1.19(β). Για τον έλεγχο των διακοπών του σκέλους B, το  $(-u_{control})$  συγκρίνεται με την ίδια τριγωνική κυματομορφή, δίνοντας τα ακόλουθα:

$$\begin{aligned} (-V_{control}) > v_{tri}: & \quad TB+ \text{ on} & \quad \text{και } v_{BN} = V_d \\ (-V_{control}) < v_{tri}: & \quad TB- \text{ on} & \quad \text{και } v_{BN} = 0 \end{aligned}$$

Εξαιτίας των διόδων ανατροφοδότησης που συνδέονται αντιπαράλληλα προς τους διακόπτες, οι τάσεις που δίνονται από τις σχέσεις 1.42 και 1.43 είναι ανεξάρτητες από τη φορά του ρεύματος εξόδου  $i_o$ .



Εικόνα 1.19: Διαμόρφωση PWM με Μονοπολική Τάση Εξόδου.

### **1.8.2.2.3 Λειτουργία Τετραγωνικής Κυματομορφής.**

Ο αντιστροφέας με πλήρη γέφυρα μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως αντιστροφέας με τετραγωνική κυματομορφή. Και οι δύο τρόποι διαμόρφωση PWM που εξετάστηκαν προηγουμένως, εκφυλίζονται στον ίδιο τρόπο λειτουργίας τετραγωνικής κυματομορφής, όπου οι διακόπτες (TA+, TB-) και (TA- , TB+) λειτουργούν ως δύο ζεύγη με σχετική διάρκεια αγωγής 0,5.

Όπως συμβαίνει στον τρόπο λειτουργίας τετραγωνικής κυματομορφής, το πλάτος της τάσης εξόδου, που δίνεται παρακάτω, ρυθμίζεται με έλεγχο της dc τάσης εισόδου:

$$V_{o1} = \frac{4}{\pi} V_d \quad 1.44$$

[29]

## Κεφάλαιο 2ο : Δομή Επαγωγικής Διάταξης.

Στην ενότητα αυτή γίνονται κατανοητές έννοιες όπως η Επαγωγική Θέρμανση, παρουσιάζονται πρακτικές εφαρμογές της Επαγωγικής Θέρμανσης, συνδέονται βασικές αρχές και έννοιες που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 1 με την Επαγωγική Θέρμανση και δίνεται και περιγράφεται ένα τυπικό- γενικό σύστημα Επαγωγικής Διάταξης.

### 2.1 Ορισμός.

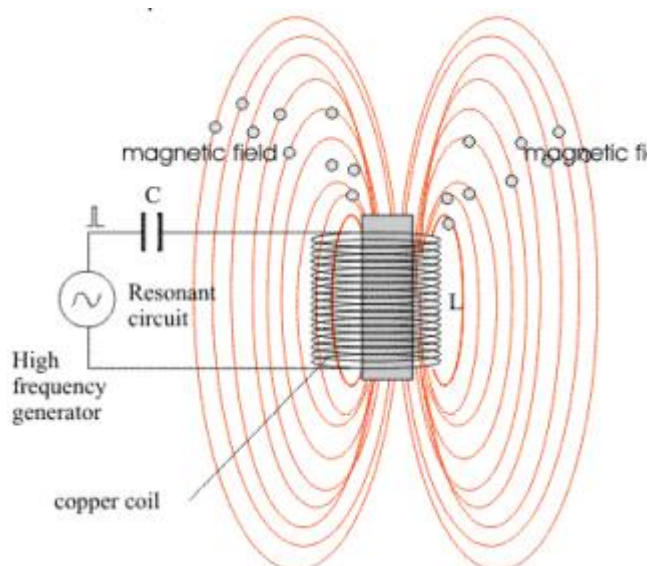
Ο όρος Επαγωγική Θέρμανση αναφέρεται στην διαδικασία θέρμανσης ενός ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού (συνήθως μέταλλο) χωρίς επαφή. Χρησιμοποιεί υψηλής συχνότητας ηλεκτρισμό και η παραγωγή θερμότητας είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης δινορευμάτων (Eddy currents-παράγραφος 1.1.5). Επειδή, είναι χωρίς επαφή δεν μολύνει το προς θέρμανση υλικό και αυτό την κάνει συγκρίσιμη με άλλες μεθόδους θέρμανσης όπου η θερμότητα παράγεται μέσω φλόγας. Εξαιτίας και πάλι αυτού του ιδιαίτερου χαρακτηριστικού "η θέρμανση χωρίς επαφή", όπως πολλές φορές χαρακτηρίζεται, χρησιμοποιείται στην βιομηχανία σε ειδικές εφαρμογές.

### 2.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας.

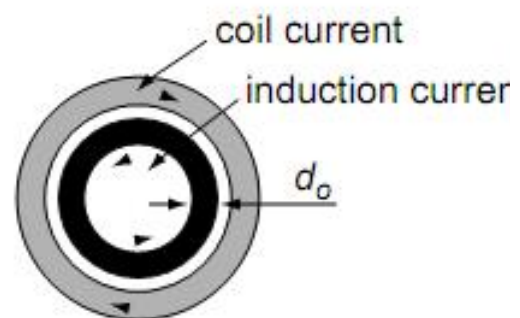
Η Επαγωγική Θέρμανση (Ε. Θ) αποτελείται κυρίως από τρεις (3) βασικές αρχές:

- Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή (παράγραφος 1.2).
- Επιδερμικό Φαινόμενο (παράγραφος 1.3).
- Μεταφορά Θερμότητας (παράγραφος 1.6).

Όσο αφορά τον σίδηρο και κάποιους τύπους χάλυβα, υπάρχει ένας επιπλέον μηχανισμός θέρμανσης γνωστός ως Απώλειες Υστέρησης (παράγραφος 1.1.4). Αναφορά σε αυτό το μηχανισμό γίνεται και στην παράγραφο 2.3 που ακολουθεί.



Εικόνα 2.1: Μεταβαλλόμενο Μαγνητικό Πεδίο



Εικόνα 2.2: Ρεύματα στο εσωτερικό του αντικείμενου προς Θέρμανση

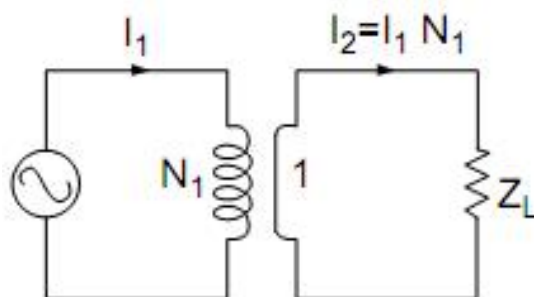
Στην Ε. Θ η δημιουργία θερμότητας στηρίζεται στις Απώλειες Joule σαν αποτέλεσμα των δινορευμάτων. Στο πηνίο εργασίας (work coil- θα δούμε παρακάτω αναλυτικά το ρόλο και την σημασία του στην Ε. Θ) εφαρμόζεται υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενο

ρεύμα , το οποίο παράγει εναλλασσόμενη μαγνητική ροή (πεδίο), η οποία με την σειρά της προκαλεί εναλλασσόμενη τάση ίδιας συχνότητας μέσα στο αντικείμενο προς θέρμανση (work piece). Σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz (παράγραφος 1.2), την στιγμή που μεταβάλλεται η μαγνητική ροή προκαλούνται δινορεύματα τα οποία δημιουργούν μαγνητική ροή, αντίθετης κατεύθυνσης από αυτή του πηνίου εργασίας. Τα δινορεύματα ρέουν μέσα στο αντικείμενο προς θέρμανση- ρέουν στην αντίσταση του αντικειμένου προς θέρμανση και αναπτύσσεται θερμότητα. Τέλος, επειδή η θερμότητα προκαλείται από επαγωγικά ρεύματα, η διαδικασία αυτού του είδους θέρμανσης ονομάζεται Επαγωγική Θέρμανση.

Η βασική θεωρία της Ε. Θ είναι παρόμοια με αυτή των Μετασχηματιστών. Το πηνίο εργασίας αποτελεί το πρωτεύον και το υπό θέρμανση αντικείμενο το δευτερεύον. Οπότε, πολλά από τα χαρακτηριστικά των Μετασχηματιστών είναι χρήσιμα στην ανάπτυξη των επιμέρους στοιχείων της Ε. Θ. (πχ του πηνίου εργασίας). Τα πιο βασικά είναι τα εξής:

- Η ικανότητα σύζευξης μεταξύ των τυλιγμάτων είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης.
- Το ρεύμα στο πρωτεύον πολλαπλασιασμένο από τον αριθμό σπειρών στο πρωτεύον είναι ίσο με το γινόμενο του ρεύματος στο δευτερεύον επί τον αριθμό των σπειρών στο δευτερεύον τύλιγμα.
- Οι απώλειες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος οφείλονται στις ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων τους και στην σταθερά σύζευξης μεταξύ τους.

Το δευτερεύον τύλιγμα- αντικείμενο προς θέρμανση αποτελείται από μια σπείρα (από πολλούς θεωρείται βραχυκυκλωμένο) και υπάρχουν σημαντικές θερμικές απώλειες εξαιτίας της αύξησης του ρεύματος φορτίου.



Εικόνα 2.3: Ισοδύναμο κύκλωμα- Πηνίο Εργασίας και Αντικείμενο προς θέρμανση.

### 2.3 Επαγωγική Θέρμανση και Σιδηρομαγνητικά Υλικά.

Για μέταλλα όπως σίδηρο και κάποιους τύπους χάλυβα, υπάρχει ένας επιπλέον μηχανισμός θέρμανσης γνωστός ως Απώλειες Υστέρησης. Το έντονο εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο μέσα στο πηνίο εργασίας κατ' επανάληψη μαγνητίζει και απομαγνητίζει τους «κρυστάλλους» σιδήρου ή άλλου σιδηρομαγνητικού υλικού. Αυτή η αναστροφής-στρίψιμο των μαγνητικών περιοχών (παράγραφος 1.1.3) προκαλεί σημαντική τριβή και θέρμανση μέσα στο υλικό. Η θέρμανση εξαιτίας αυτού του μηχανισμού είναι γνωστή ως Απώλειες Υστέρησης, και είναι μεγαλύτερη για τα υλικά που έχουν μεγάλο εύρος μέσα στην καμπύλη B- H. Οι Απώλειες Υστέρησης μπορούν να είναι ένας προσοδοφόρος παράγοντας στην παραγωγή θερμότητας κατά την διάρκεια της επαγωγικής θέρμανσης, αλλά εμφανίζεται μόνο στα σιδηρομαγνητικά υλικά.



Για το λόγο αυτό τα σιδηρομαγνητικά υλικά επιλέγονται με μικρή αντίσταση και μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα, ενώ τα μη-σιδηρομαγνητικά υλικά επιλέγονται με μεγάλη αντίσταση και μικρή μαγνητική διαπερατότητα (αναγκαστικά).

#### **2.4 Εφαρμογές Επαγωγικής Θέρμανσης.**

Η Ε. Θ. μπορεί να εφαρμοστεί όπου χρειάζεται να θερμανθεί ένα ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό γρήγορα, καθαρά και με ελεγχόμενο τρόπο. Αξίζει, ακόμη, να σημειωθεί, ότι εφαρμόζεται σε μεγάλο βαθμό για τοπική θέρμανση.

Μία από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές της Ε. Θ είναι το σφράγισμα με μεταλλικά καπάκια ιατρικών μπουκαλιών και μπουκαλιών αναψυκτικών και ποτών. Ένα αλουμινένιο φύλλο τοποθετείται πάνω από το άνοιγμα του πλαστικού ή του γυάλινου μπουκαλιού και θερμαίνεται γρήγορα καθώς το μπουκάλι περνάει κάτω από το μηχάνημα της Ε. Θ. Η θερμότητα λιώνει το φύλλο και αυτό καλύπτει-βιδώνει πάνω στην κορυφή του μπουκαλιού. Έτσι το καπάκι προστατεύει το περιεχόμενο του μπουκαλιού μέχρι ο καταναλωτής να το ανοίξει.

Μία άλλη κοινή εφαρμογή είναι η απομάκρυνση ρύπων από κενούς σωλήνες όπως ο καθοδικός σωλήνας της τηλεόρασης, σωλήνες υπό πίεση και η απομάκρυνση διαφόρων αερίων από λάμπες εκκένωσης. Ένα δαχτυλίδι από αγώγιμο υλικό τοποθετείται μέσα στο κενό γυάλινο δοχείο (σωλήνας). Επειδή η Ε.Θ είναι μια διαδικασία χωρίς επαφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να θερμάνει το αγώγιμο δαχτυλίδι, το οποίο είναι ερμητικά κλεισμένο μέσα στον σωλήνα. Ένα πηνίο εργασίας τοποθετείται πολύ κοντά στο αγώγιμο δαχτυλίδι, εξωτερικά του κενού σωλήνα και η ΑC πηγή ανάβει. Μέσα σε δευτερόλεπτα, το αγώγιμο δαχτυλίδι έχει πυρώσει και τα χημικά στην επιφάνεια του αντιδρούν με οποιαδήποτε αέρια μέσα στον σωλήνα. Το αποτέλεσμα είναι ότι το δαχτυλίδι "ρουφάει" κάθε ίχνος υπολειπόμενου αερίου μέσα στον σωλήνα και έτσι αυξάνει την καθαρότητα του.

Άλλη εφαρμογή είναι η χρήση της Ε. Θ. σε μια διαδικασία που ονομάζεται «Zone purification» και χρησιμοποιείται στην βιομηχανία κατά την κατασκευή ημιαγωγών. Κατά την διεργασία αυτή το πυρίτιο καθαρίζεται με την έννοια της μετακίνησης ζώνης από το λιωμένο υλικό.

Τα χαρακτηριστικό της Ε. Θ. «χωρίς επαφή» σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέρμανση μετάλλων χωρίς το ρίσκο μόλυνσης του υλικού. Έτσι, μεταλλικά ιατρικά εργαλεία μπορούν να αποστειρωθούν με την θέρμανση τους σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ είναι σε κλειστό, αποστειρωμένο περιβάλλον για να σκοτωθούν οι μικροοργανισμοί.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια κατασκευής «τεχνητών» θερμοπιδάκων. Προσπαθούν ουσιαστικά να επιτύχουν την θέρμανση του νερού (έως 60 °C) σε μεγάλες δεξαμενές μέσω της Επαγωγικής Θέρμανσης και την χρήση του σε οικιακές εφαρμογές.

Κύρια εφαρμογή της Επαγωγικής Θέρμανσης είναι η επεξεργασία μετάλλων. Η επαγωγική θέρμανση εξασφαλίζει έλεγχο του ποσού θερμότητας που διοχετεύεται στο υλικό που υπόκειται σε θερμική επεξεργασία. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές στην μεταλλοβιομηχανία. Πολύ υψηλές ταχύτητες θέρμανσης και σχετικά μικροί χρόνοι επεξεργασίας μπορούν να επιτευχθούν επειδή δεν υπάρχει αντίσταση ανάμεσα στην πηγή και το υλικό το οποίο πρόκειται να θερμανθεί, πράγμα που συμβαίνει σε άλλες μεθόδους θέρμανσης. Στην πραγματικότητα, η Επαγωγική Θέρμανση χρησιμοποιείται σε πολλούς κλάδους της επεξεργασίας μετάλλων, κάποιιοι από τους οποίους είναι οι εξής:

- Σφυρηλάτηση
- Σκλήρυνση
- Λιώσιμο (Τήξη)
- Συγκόλληση
- Ανόπτηση
- κ.α.

Όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα (παράγραφος 2.2) οι αρχές στις οποίες στηρίζεται η Επαγωγική Θέρμανση δεν είναι λίγες και καθόλου απλές, αντίθετα αρκετά σύνθετες. Έτσι ο ακριβής υπολογισμός των διαφόρων παραμέτρων που απαρτίζουν την Επαγωγική Διάταξη απαιτεί μεγάλη προσπάθεια.

Μέχρι πρόσφατα τα περισσότερα συστήματα Επαγωγικής Θέρμανσης στηρίζονταν σε εμπειρικές μεθόδους και σε τεχνικές δοκιμών. Αυτές οι παραδοσιακές μέθοδοι (κυρίως για τη κατασκευή του πηνίου εργασίας) είναι χρονοβόρες και ακριβές καθώς στηρίζονται στην κατασκευή και τροποποίηση (και πολλές φορές την αλλαγή) των διαφόρων μερών της Επαγωγικής Διάταξης. Οι διαδικασίες αυτές δεν επιτρέπουν την κατανόηση του τι συμβαίνει μέσα στο πηνίο εργασίας (θερμική προσέγγιση) και δεν παρέχουν καμία ουσιαστική πληροφόρηση για το αν η Επαγωγική διάταξη δουλεύει σωστά ή όχι. Ένα επιπλέον μειονέκτημα των εμπειρικών μεθόδων είναι ότι η «εμπειρία και η τεχνική» μένουν στους κατασκευαστές και δεν μπορούν να μεταλαμπαδευτούν εύκολα.

Σύγχρονη μέθοδος υπολογισμού των μερών της Επαγωγικής Διάταξης αποτελεί η Προσομοίωση με διάφορα υπολογιστικά μοντέλα. Έτσι επιτυγχάνεται μείωση του κόστους και του χρόνου κατασκευής. Είναι πιο σίγουρη η εύρεση του βέλτιστου πχ πηνίου εργασίας, ενώ ταυτόχρονα ο κατασκευαστής έχει ουσιαστική εικόνα για το συμβαίνει στο εσωτερικό του αντικειμένου προς θέρμανση. Ακόμη, μπορεί να κάνει αλλαγές σε διάφορες παραμέτρους και να παρατηρήσει τις αλλαγές στο σύνολο της Επαγωγικής Διάταξης.

Αρχικά, απλά υπολογιστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για λόγους κατανόησης, τα οποία επιτρέπουν την συσχέτιση των στοιχείων της Επαγωγικής Θέρμανσης. Στην πραγματικότητα τα μοντέλα αυτά είναι πιο σύνθετα. Η επιλογή διαφόρων μοντέλων για την περιγραφή της Επαγωγικής Διάταξης αποτελεί ένα μεγάλο πεδίο ερευνών και δίνει διαφορετικές προσεγγίσεις στα διάφορα στοιχεία που απαρτίζουν την Επαγωγική Θέρμανση.

## **2.5 Διάταξη Επαγωγικής Θέρμανσης.**

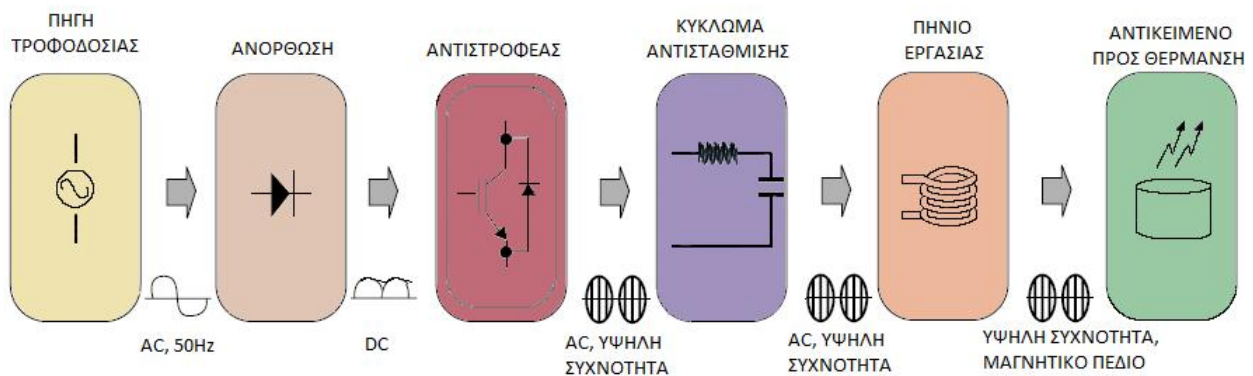
Θεωρητικά. Τρία (3) είναι τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν την Επαγωγική Διάταξη:

- Μια πηγή Υψηλών Συχνοτήτων (Inverter).
- Το πηνίο εργασίας (work coil).
- Το αντικείμενο προς θέρμανση (work piece).

Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα της διάταξης της Ε. Θ. εικόνα 2.4.

Στην πραγματικότητα, τα συστήματα Επαγωγικής Θέρμανσης είναι πιο σύνθετα. Υπάρχουν ακόμη, το σύστημα ανόρθωσης, το φίλτρο εξομάλυνσης, το φίλτρο αντιστάθμισης-συντονισμού, καθώς επίσης και τα συστήματα παλμοδότησης του Inverter και σβέσης του πηνίου εργασίας. Κάποιες φορές παρεμβάλλεται ένας Μετασχηματιστής ανάμεσα στον Inverter το κύκλωμα αντιστάθμισης- συντονισμού. Είτε για γαλβανική απομόνωση είτε για μεταβολή του λόγου των ρευμάτων, Ενώ δεν είναι λίγες οι

περιπτώσεις στις οποίες μετά τον Inverter τοποθετείται ένας πυκνωτής για να “κόβει” την DC συνιστώσα που παράγει ο Inverter.



Εικόνα 2.4: Διάγραμμα Συστήματος Επαγωγικής Θέρμανσης

Μια σύντομη περιγραφή του συστήματος είναι η εξής: Η AC τάση του δικτύου μετατρέπεται σε DC και ακολουθεί εξομάλυνση με την τοποθέτηση κατάλληλου φίλτρου. Ο Inverter, με τη σειρά του, και αφού πρώτα έχει δεχθεί κατάλληλους παλμούς από το σύστημα παλμοδότησης, δημιουργεί AC τάση κατάλληλης- επιθυμητής τιμής και συγκεκριμένης συχνότητας. Μεταξύ του Inverter του πηνίου εργασίας μεσολαβεί το φίλτρο συντονισμού. Αυτό έχει τοποθετηθεί για να εξασφαλιστεί όσο το δυνατό καλύτερη μεταφορά ενέργειας από τον Inverter στο πηνίο εργασίας. Όταν το επιθυμητό AC σήμα φτάσει στο πηνίο εργασίας, αυτό με την σειρά του δημιουργεί εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο και τελικά ζεσταίνει το αντικείμενο προς θέρμανση. Σε αυτό το σημείο ενεργοποιείται και το σύστημα σβέσης, το οποίο έχει σκοπό να απομακρύνει την θερμότητα που δημιουργείται στο πηνίο εργασίας και η οποία δεν είναι επιθυμητή, όσο αφορά το σύστημα της Ε. Θ.

## 2.6 Απλοποίηση Κυκλώματος.

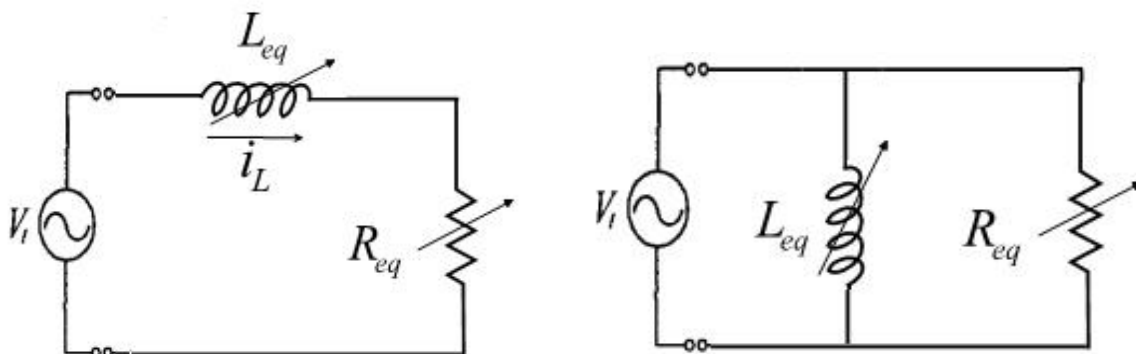
Στην ενότητα αυτή γίνεται απλοποίηση των επιμέρους στοιχείων του συστήματος Ε. Θ. σε αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία. Ουσιαστικά γίνεται μετατροπή των στοιχείων της Επαγωγικής Θέρμανσης σε ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα. Παρουσιάζονται κάποια από τα μοντέλα με τα οποία αναπαριστώνται το αντικείμενο προς θέρμανση και το πηνίο εργασίας και τύποι για τον υπολογισμό των αντίστοιχων παραμέτρων τους. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι πιο συχνές τοπολογίες αντιστάθμισης- συντονισμού και ο τρόπος υπολογισμού τους.

Η βαθύτερη κατανόηση του κυκλώματος από ηλεκτροτεχνική πλευρά αποσκοπεί στον υπολογισμό των απαραίτητων στοιχείων για την κατασκευή του κυκλώματος αντιστάθμισης- συντονισμού, καθώς και των υπολογισμό της τάσης και του ρεύματος εξόδου του Inverter.

### 2.6.1 Αντικείμενο προς θέρμανση & Πηνίο Εργασίας.

Η μοντελοποίηση, για όλες τις περιπτώσεις που ακολουθούν, γίνεται θεωρώντας ότι το αντικείμενο προς θέρμανση είναι ένας χαλύβδινός κύλινδρος και το πηνίο προς θέρμανση πολλών σπειρών, κυλινδρικό, έτσι ώστε να περιβάλλει το αντικείμενο προς θέρμανση.

Τόσο το αντικείμενο προς θέρμανση όσο και το πηνίο εργασίας μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα πηνίο με μία αντίσταση,  $L_{eq}$  και  $R_{eq}$  σε σειρά ή παράλληλα. Στην εικόνα 2.5 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα των δύο αυτών στοιχείων του κυκλώματος. Κατά καιρούς έχουν παρουσιαστεί διάφορα μοντέλα που όλα οδηγούν στον παραπάνω τρόπο απλοποίησης. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια από τα πιο συνήθη μοντέλα καθώς και οι απαραίτητες εξισώσεις που οδηγούν στον υπολογισμό των παραμέτρων  $L_{eq}$  και  $R_{eq}$ .



Εικόνα 2.5: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα εν σειρά (αριστερά) ή παράλληλα (δεξιά).

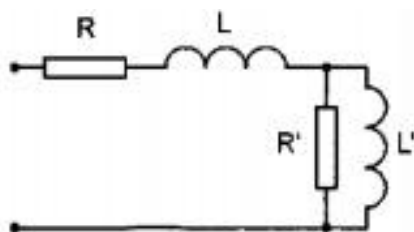
#### Μοντελοποίηση Νο 1.

Η πιο απλή μοντελοποίηση του αντικειμένου θέρμανσης και του πηνίου εργασίας είναι αυτή που περιγράφηκε παραπάνω, δηλαδή ένα πηνίο σε σειρά με μια αντίσταση ή παράλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους (βλέπε εικόνα 2.5).

Όπου η αντίσταση  $R_{eq}$  συσχετίζεται με τις απώλειες στο πηνίο εργασίας και την αντίσταση του αντικειμένου προς θέρμανση. Η επαγωγή  $L_{eq}$  συνδέεται με το επαγωγικό φαινόμενο (αμοιβαία επαγωγή)- την σύνδεση των τυλιγμάτων του πηνίου εργασίας με το αντικείμενο προς θέρμανση. Πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ότι απλοποιεί την ανάλυση, κύριο μειονέκτημα του όμως είναι, ότι δεν προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα, όσο αφορά την εκτίμηση της ισχύς που καταναλώνεται τόσο στην ισχύ που μεταφέρεται στο αντικείμενο προς θέρμανση.

#### Μοντελοποίηση Νο 2.

Ένα πιο ικανοποιητικό ισοδύναμο μοντέλο είναι το εξής:

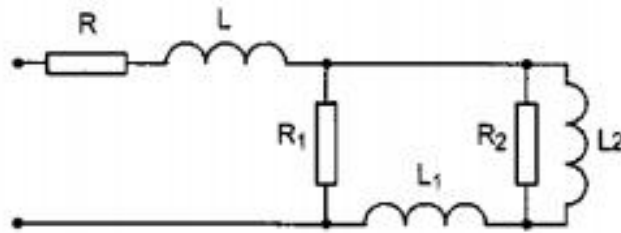


Εικόνα 2.6: Βελτιωμένο Ισοδύναμο Ηλεκτρικό μοντέλο

Το πηνίο εργασίας μπορεί να θεωρηθεί σαν μια επαγωγική διάταξη, της οποίας το αντικείμενο προς θέρμανση αποτελεί τον πυρήνα. Έτσι, η αντίσταση  $R$  εκφράζει τις ωμικές απώλειες, η επαγωγή  $L$  μοντελοποιεί την ροή σκέδασης των τυλιγμάτων του πηνίου εργασίας. Η επαγωγή  $L'$  και η αντίσταση  $R'$  αντιστοιχούν στην ροή και τις μαγνητικές απώλειες του πυρήνα.

Μοντελοποίηση Νο 3.

Ένα άλλο μοντέλο, το οποίο λαμβάνει υπόψη του και τις απώλειες λόγω δινορευμάτων παρουσιάζεται.



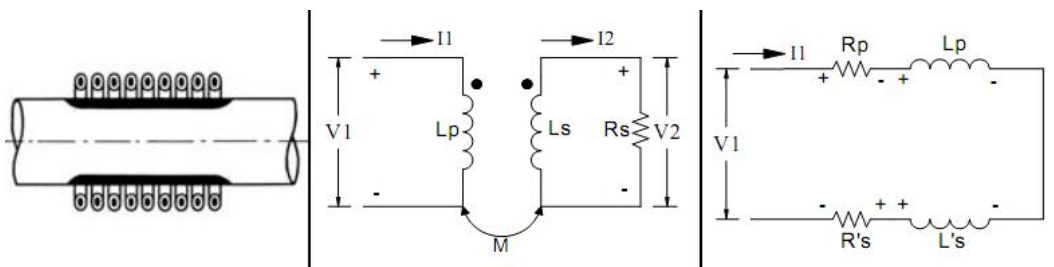
**Εικόνα 2.7: Βελτιωμένο Ισοδύναμο Ηλεκτρικό μοντέλο, το οποίο λαμβάνει υπόψη του και τις απώλειες λόγω δινορευμάτων.**

Η αντικατάσταση της επαγωγής  $L'$  από τις παραμέτρους  $L_1$ ,  $R_2$  και  $L_2$  απαιτείται, έτσι ώστε το μοντέλο να λαμβάνει υπόψη του και τις απώλειες λόγω δινορευμάτων.

Μοντελοποίηση Νο 4.

Στην μοντελοποίηση 4 και 5 το πηνίο εργασίας και το αντικείμενο προς θέρμανση θεωρούνται ως ένας μετασχηματιστής: το πηνίο εργασίας αποτελεί το πρωτεύον τύλιγμα και το αντικείμενο προς θέρμανση το δευτερεύον τύλιγμα, το οποίο αποτελείται από μια σπείρα. (βλέπε εικόνα 2.3).

Στην παρούσα μοντελοποίηση θεωρείται ότι όλη η ροή εισέρχεται στο αντικείμενο προς θέρμανση και επομένως δεν υπάρχουν απώλειες λόγω σκέδασης.



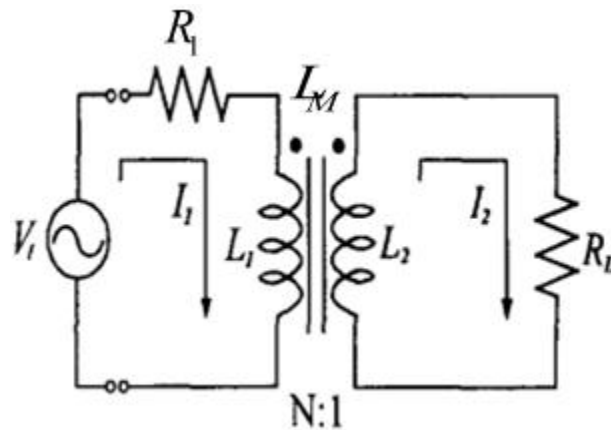
**Εικόνα 2.8: Ισοδύναμο Ηλεκτρικό μοντέλο ανοιγμένο στο πρωτεύον χωρίς απώλειες σκέδασης.**

Η σύνθετη αντίσταση  $R_S$  και  $X_S$  του αντικείμενου προς θέρμανση συχνά ανάγεται στην πλευρά του πρωτεύοντος, αφού πολλαπλασιαστεί με τον τελεστή  $N^2$ , όπου  $N$  ο λόγος μετασχηματισμού, που στην συγκεκριμένη περίπτωση ισούται με τον αριθμό σπειρών του πηνίου, έτσι προκύπτει ότι:

$$R_S = N^2 \times R_S \text{ και } L_S = N^2 \times L_S$$

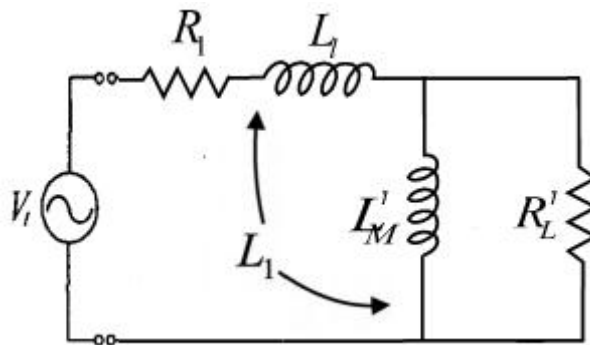
2.1

Μοντελοποίηση Νο 5.

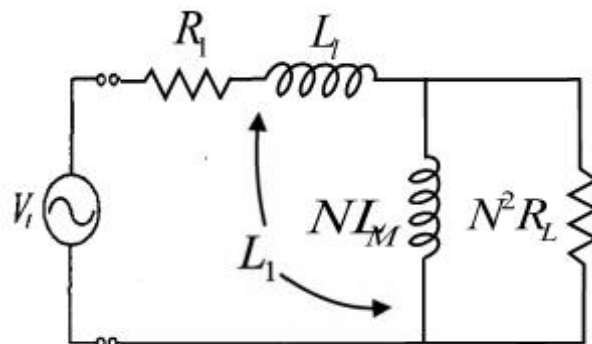


Εικόνα 2.9: Ισοδύναμο πηνίου εργασίας και αντικειμένου προς θέρμανση ως μετασχηματιστή.

Στην μοντελοποίηση αυτή η μαγνητική σύζευξη θεωρείται ισχυρή. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει σκέδαση των μαγνητικών γραμμών. Η οποία εμφανίζεται μονάχα στο πρωτεύον και όχι στο δευτερεύον τύλιγμα. Το δευτερεύον κύκλωμα μπορεί να μεταφερθεί στο πρωτεύον όπως φαίνεται στην εικόνα 2.10.



Εικόνα 2.10: Ισοδύναμο κύκλωμα ανοιγμένο στο πρωτεύον (α) (Μοντελοποίηση Νο5).



Εικόνα 2.10: Ισοδύναμο κύκλωμα ανοιγμένο στο πρωτεύον (β) (Μοντελοποίηση Νο5).

Δηλώνοντας την κοινή επαγωγή ως  $L_M$  προκύπτει ότι:

$$L_1 = L_l + NL_M \quad 2.2$$

Όπου  $L_1$ : η επαγωγή στο πρωτεύον τύλιγμα [H].

$L_l$ : η ροή σκέδασης [H].

$N$ : ο λόγος μετασχηματισμού- ίσος με τον αριθμό των σπειρών στο πρωτεύον.

Η επαγωγή  $L_1$ , προκύπτει, σύμφωνα με τον μαθηματικό τύπο του Wheeler (Harold A. Wheeler, 1942), από την σχέση και αφού πρώτα έχουν ληφθεί υπόψη οι υποδείξεις που έχουν γίνει στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3:

$$L_1 = \frac{r^2 \times N^2}{0.0254(9 \times r + 10 \times l_{wc})} [\mu H] \quad 2.3$$

Όπου  $r$ : η ακτίνα του πηνίου εργασίας [m].

$N$ : ο αριθμός των σπειρών στο πρωτεύον.

$l_{wc}$ : το μήκος του πηνίου εργασίας [m].

Σύμφωνα με την υπόθεση που έγινε, ότι δεν υπάρχουν ροές σκέδασης στο δευτερεύον, η αυτεπαγωγή του αντικείμενου προς θέρμανση υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$L_2 = \frac{L_M}{N} \quad 2.4$$

Η κοινή επαγωγή  $L_M$  εξαρτάται από την απόσταση που έχει το πηνίο εργασίας από το αντικείμενο προς θέρμανση. Περισσότερες πληροφορίες παρέχονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 και ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5.

Προσοχή: Ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής  $L_1$  (και κατ' επέκταση και του  $L_2$ ) δεν είναι απλοϊκός εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου, μπορεί για παράδειγμα να είναι ένας απλός αγωγός, κουλουριασμένο σύρμα σε σπείρες, κουλουριασμένο σύρμα σε σπείρες κυκλικά κ.α. Στην περίπτωση αυτή ο τύπος με τον οποίο υπολογίζεται η αυτεπαγωγή αλλάζει. Επίσης παίζει ρόλο αν το μήκος του αντικειμένου είναι μεγαλύτερο από την διάμετρο του ή το αντίστροφο και σε αυτή την περίπτωση ο τύπος υπολογισμού της αυτεπαγωγής είναι διαφορετικός. Για τον λόγο αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τον υπολογισμό του. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3.

Η αντίσταση  $R_L$  συμβολίζει την αντίσταση του αντικείμενου προς θέρμανση και η αντίσταση  $R_1$  την αντίσταση του πηνίου εργασίας. Ο τρόπος υπολογισμού τόσο της πρώτης  $R_L$ , όσο και της δεύτερης παρουσιάζονται στην ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4 .

Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα που προκύπτει είναι ίδιο με αυτό της εικόνας 2.5.

Όπου

$$L_{eq} = L_1 - A^2 L_2 \quad 2.5$$

και

$$R_{eq} = R_1 + A^2 R_L \quad 2.6$$

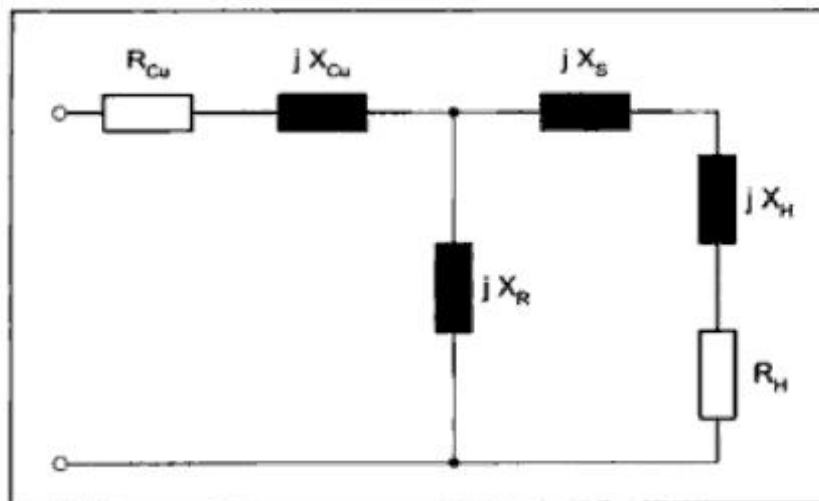
$$A = \omega_s L_M / \sqrt{\omega_s^2 L_2^2 + R_L^2} \quad 2.7$$

Όταν  $L_2 \gg R_L$  τότε  $A = L_M / L_2$ .

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι, επειδή, στο παρόν μοντέλο η ροή σκέδασης στο δευτερεύον θεωρείται αμελητέα, η σχέση 2.5 γίνεται  $L_{eq} = L_{leakage}$  (λεπτομέρειες στο Παράρτημα 5). Όμως, δεν πρέπει να αγνοηθεί και η αυτεπαγωγή των άκρων.

Μοντελοποίηση No 6- Μοντέλο Karl Schonbaser.

Το υπολογιστικό αυτό μοντέλο το επινόησε ο Karl Schonbaser από την σχηματική αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου. Το ρεύμα που ρέει στο πηνίο εργασίας δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Ένα μέρος του μαγνητικού πεδίου περνάει μέσα από το αντικείμενο προς θέρμανση (το μεγαλύτερο αν πρόκειται για σιδηρομαγνητικό υλικό) και ένα άλλο διασκορπίζεται στο κενό ανάμεσα στο πηνίο εργασίας και το αντικείμενο προς θέρμανση. Το ισοδύναμο κύκλωμα που προκύπτει είναι το εξής:



**Εικόνα 2.11: Ισοδύναμο Ηλεκτρικό κύκλωμα για τον υπολογισμό του επαγωγικού ρεύματος και τάσης σύμφωνα με τον Karl Schonbaser.**

Η αντίσταση  $R_H$  και η αντίδραση  $jX_H$  αποτελούν τις συνιστώσες του αντικειμένου προς θέρμανση και υπολογίζονται από τις σχέσεις:



$$R_H = d \cdot h \frac{1}{\kappa} \left( \frac{N}{l} \right)^2 \Phi_{re} \left( \frac{r_0}{\kappa} \sqrt{2} \right) \quad 2.8$$

$$X_H = d \cdot h \frac{1}{\kappa} \left( \frac{N}{l} \right)^2 \Phi_{im} \left( \frac{r_0}{\kappa} \sqrt{2} \right) \quad 2.9$$

- Όπου d: η διάμετρος του αντικειμένου προς θέρμανση.  
h: το ύψος του αντικειμένου προς θέρμανση.  
κ: η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αντικειμένου προς θέρμανση.  
δ: το βάθος διείσδυσης.  
l: το μήκος του πηνίου εργασίας.  
r<sub>0</sub>: η ακτίνα του αντικειμένου προς θέρμανση.

Η αντίδραση της ροής διαρροής  $\Phi_S$  και η αντίδραση της μαγνητικής ροής που εισχωρεί στο αντικείμενο προς θέρμανση  $\Phi_R$  υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\Phi_S = N^2 2 \cdot f \mu_0 \frac{A}{h} \quad 2.10$$

- Όπου N: ο αριθμός των σπειρών.  
f: η συχνότητα λειτουργίας [Hz].  
μ<sub>0</sub>: η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.  
A: η επιφάνεια που παρεμβάλλεται μεταξύ του πηνίου εργασίας και του αντικειμένου προς θέρμανση.  
h: το ύψος του αντικειμένου προς θέρμανση.

$$R_R = N^2 2 \cdot f \mu_0 \frac{A_{IND}}{h_R} \quad 2.11$$

- Όπου N: ο αριθμός των σπειρών.  
f: η συχνότητα λειτουργίας [Hz].  
μ<sub>0</sub>: η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.  
A<sub>IND</sub>: η εσωτερική διατομή του πηνίου.  
h<sub>R</sub> = l - h + 0.46D: ισοδύναμο μήκος του μαγνητικού πεδίου που εισέρχεται στο αντικείμενο προς θέρμανση.  
l: το μήκος του πηνίου εργασίας.  
h: το ύψος του αντικειμένου προς θέρμανση.  
D: εσωτερική διάμετρος του πηνίου εργασίας.

Η αντίσταση του αντικειμένου προς θέρμανση R<sub>Cu</sub> και η αντίδραση X<sub>Cu</sub> υπολογίζονται ως εξής:

$$R_{Cu} = X_{Cu} = N^2 \frac{D}{l \sqrt{f_s}} \quad 2.12$$

- Όπου N: ο αριθμός των σπειρών.

D: εσωτερική διάμετρος του πηνίου εργασίας.  
 fs: Συντελεστής Κάλυψης (fill factor).  
 l: το μήκος του πηνίου εργασίας.  
 κ: η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πηνίου εργασίας.  
 δ: το βάθος διείσδυσης.

Το ισοδύναμο κύκλωμα προκύπτει και πάλι όμοιο με αυτό της εικόνας 2.5 και μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} \quad 2.13$$

$$R_{eq} = R_{Cu} + R_H \left( \frac{R}{v_R + v_S + v_H} \right)^2 \quad 2.14$$

$$X_{eq} = X_{Cu} + (v_S + v_H) \frac{R}{R + v_S + v_H} \quad 2.15$$

[22][23][24][25][26]

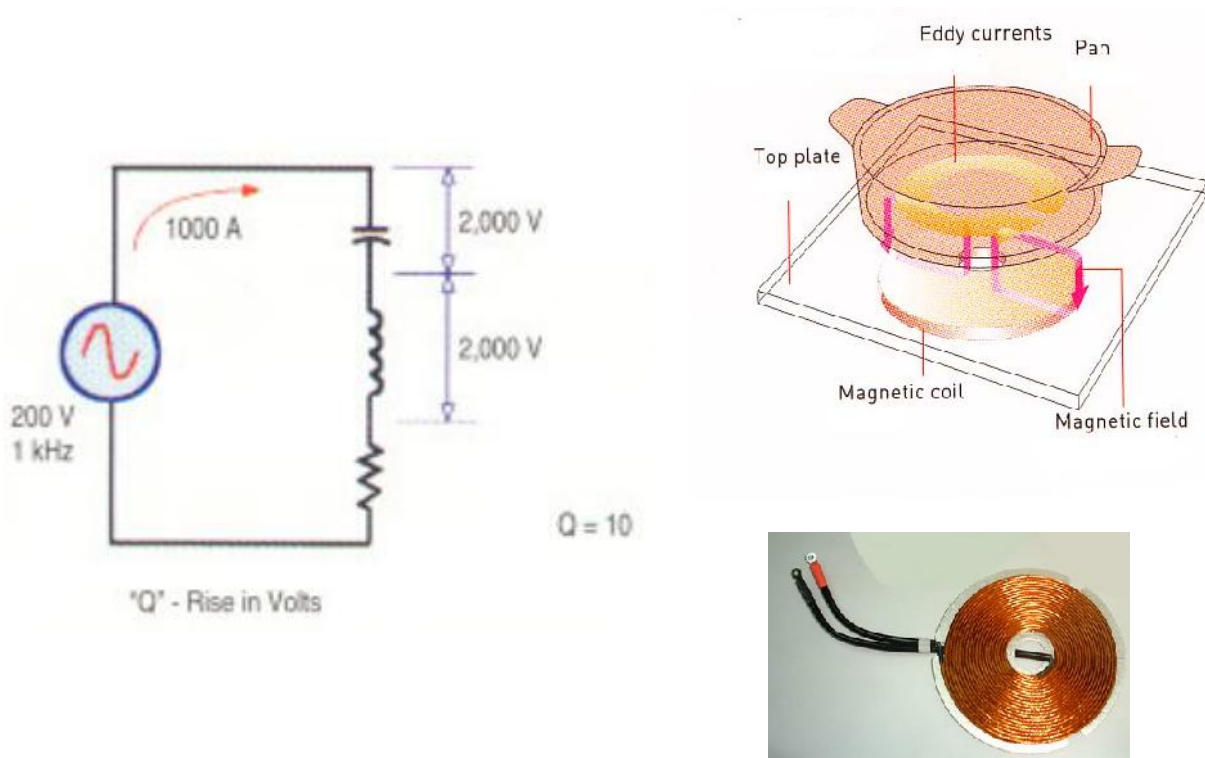
## 2.7 Κύκλωμα Αντιστάθμισης- Συντονισμού.

Στην παράγραφο 1.7 έγινε μια σύντομη παρουσίαση του συντονισμού και των κυκλωμάτων που το αποτελούν, ενώ στην παράγραφο 2.5 παρουσιάστηκε εν συντομία η θέση και ο ρόλος του κυκλώματος συντονισμού στην Επαγωγική Διάταξη. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα (και κατ'επέκταση η χρήση) του κάθε κυκλώματος συντονισμού στην Επαγωγική Θέρμανση και παρουσιάζεται ένα «βελτιωμένο» κύκλωμα που χρησιμοποιείται ευρέως λόγω των πλεονεκτημάτων του έναντι των δύο άλλων κυκλωμάτων που έχουν ήδη αναφερθεί.

### Πυκνωτής Σε Σειρά

Το πηνίο εργασίας συντονίζεται στην επιδιωκόμενη συχνότητα με την τοποθέτηση ενός πυκνωτή σε σειρά. Η τοποθέτηση του πυκνωτή σε σειρά με το υπόλοιπο κύκλωμα «κάνει» το ρεύμα στο φορτίο ημιτονοειδή. Επίσης, αυξάνεται η τάση στα άκρα του πηνίου εργασίας σε σχέση με την τάση που θα έβλεπε το πηνίο εργασίας αν μεταξύ αυτού και του Inverter δεν μεσολαβούσε ο πυκνωτής. Το ρεύμα εξόδου του Inverter είναι το ίδιο με το ρεύμα που βλέπει το πηνίο εργασίας. Για τον λόγο αυτό, το πηνίο εργασίας συχνά αποτελείται από πολλές σπείρες, οι οποίες διαρρέονται από μικρό ρεύμα. Η τοποθέτηση του πυκνωτή σε σειρά συνήθως χρησιμοποιείται σε εστίες μαγειρέματος (rice cookers) όπου τα επίπεδα ισχύος είναι χαμηλά και ο Inverter τοποθετείται κοντά στο αντικείμενο προς θέρμανση. Το κύριο μειονέκτημα της τοποθέτησης του πυκνωτή κατά αυτό τον τρόπο είναι ότι ο Inverter πρέπει να μεταφέρει το ίδιο ρεύμα με το πηνίο εργασίας. Επιπρόσθετα, η τάση αυξάνεται εξαιτίας της σύνδεσης σε σειρά του πυκνωτή όταν το φορτίο δεν είναι συγκεκριμένο και μπορεί να βυθίσει το κύκλωμα. Αυτό δεν είναι πρόβλημα στις εφαρμογές όπως εστίες μαγειρέματος επειδή το αντικείμενο προς

θέρμανση δεν αλλάζει και οι απαιτήσεις είναι γνωστές από την αρχή του σχεδιασμού του συστήματος.



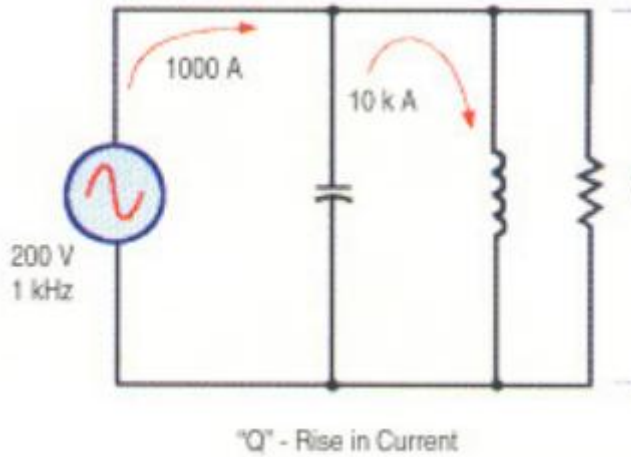
Εικόνα 2.6: Πυκνωτής σε σειρά με το Πηνίο Εργασίας

### Πυκνωτής Παράλληλα

Η τοποθέτηση του πυκνωτή παράλληλα με το υπόλοιπο κύκλωμα «κάνει» το ρεύμα στο φορτίο ημιτονοειδή. Ο παράλληλος συντονισμός αυξάνει το ρεύμα που ρέει στο πηνίο εργασίας, πολύ περισσότερο από το ρεύμα που είναι ικανό να παρέχει από μόνος του ο Inverter. Έτσι μειώνονται σημαντικά οι διατομές των καλωδίων μεταξύ Inverter και πηνίου εργασίας και οι απώλειες αγωγής στον Inverter και στα καλώδια σύνδεσης. Επομένως, το πηνίο εργασίας μπορεί να τοποθετηθεί πολύ μακριά από τον Inverter χωρίς την αύξηση των απωλειών εξαιτίας του μεγάλου μήκους καλωδίου.

Τα πηνία εργασίας στα οποία είναι τοποθετημένος ο πυκνωτής παράλληλα, συχνά, αποτελούνται από λίγες σπείρες χοντρού χαλκού αλλά με μεγάλα ρεύματα πολλών εκατοντάδων ή χιλιάδων Ampere .

Υπάρχουν πάντα απώλειες στο κύκλωμα συντονισμού εξαιτίας των διηλεκτρικών απωλειών στον πυκνωτή και του επιδερμικού φαινομένου στο πηνίο εργασίας. Έτσι ένα μικρό ρεύμα πάντα ρέει από τον Inverter ακόμη και χωρίς αντικείμενο προς θέρμανση. Όταν ένα αντικείμενο προς θέρμανση τοποθετηθεί μέσα στο πηνίο εργασίας, τότε οι απώλειες του συστήματος αυξάνονται. Επομένως, το ρεύμα του κυκλώματος συντονισμού αυξάνεται όταν το αντικείμενο προς θέρμανση τοποθετηθεί μέσα στο πηνίο εργασίας.



**Εικόνα 2.7: Πυκνωτής παράλληλα με το Πηνίο Εργασίας**

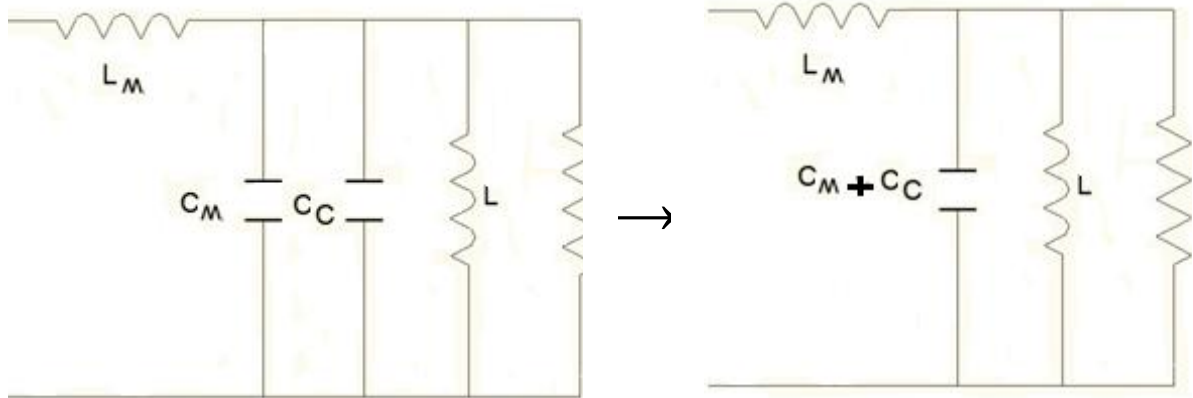
#### Κύκλωμα LLC

Η προσθήκη ενός πηνίου και ενός πυκνωτή ( $L_M$ ,  $C_M$ ), όπως φαίνεται στην εικόνα 2.8 προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα έναντι των δυο προηγούμενων κυκλωμάτων συντονισμού.

Εκτός από την τετραγωνική τάση που παράγει ο αντιστροφέας στην θεμελιώδη συχνότητα, παράγει και μια σειρά αρμονικών σε υψηλότερες συχνότητες. Έτσι τα ρεύματα που θα προέκυπταν αν υπήρχε πχ το παράλληλο κύκλωμα συντονισμού θα ήταν τεράστια εξαιτίας της μείωσης της τιμής της χωρητικής αντίδρασης με την αύξηση των συχνοτήτων. Το γεγονός αυτό πιθανόν να είναι πολύ καταστροφικό για τον αντιστροφέα, καθώς κατά τις μεταβάσεις έναυσης και σβέσης γίνεται προσπάθεια φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή. Η προσθήκη του πηνίου  $L_M$  και του πυκνωτή  $C_M$  αναιρεί αυτό το πρόβλημα. Επειδή η έξοδος του αντιστροφέα «βλέπει» πρώτα το πηνίο  $L_M$  και όλες οι αρμονικές «βλέπουν» μια σταδιακά αυξανόμενη επαγωγική αντίδραση. Αυτό σημαίνει ότι το μέγιστο ρεύμα ρέει στην επιδιωκόμενη συχνότητα και το ρεύμα των αρμονικών περιορίζεται σημαντικά, εξομαλύνοντας έτσι το ρεύμα του φορτίου. Τέλος, με σωστό συντονισμό του συγκεκριμένου κυκλώματος παράγεται ένα επαγωγικό φορτίο. Έτσι καθώς το ρεύμα καθυστερεί μειώνει τις απώλειες έναυσης στους Zero-Voltage-Switching αντιστροφείς.

Συνοπτικά προκύπτει ότι με το συγκεκριμένο κύκλωμα:

- Η ισχύς εξόδου του αντιστροφέα καταλήγει στο αντικείμενο προς θέρμανση.
- Εξασφαλίζει την προστασία του αντιστροφέα.



Εικόνα 2.8: Ισοδύναμο κύκλωμα Ε. Θ με τοποθέτηση κυκλώματος LLC.

[15][16][17]

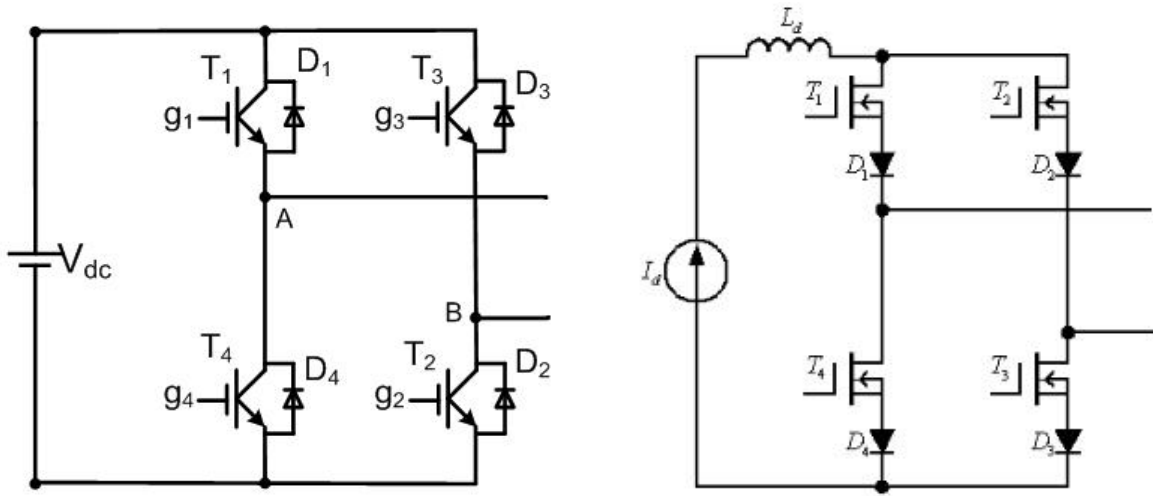
## **2.8 Αντιστροφέας.**

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται κάποιες τοπολογίες αντιστροφέα, οι οποίες συνηθίζουν να βρίσκουν εφαρμογή στις Επαγωγικές Διατάξεις. Δεν γίνεται περαιτέρω διερεύνηση όσο αφορά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των τοπολογιών αυτών. Ούτε σύγκριση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων μεταξύ τους.

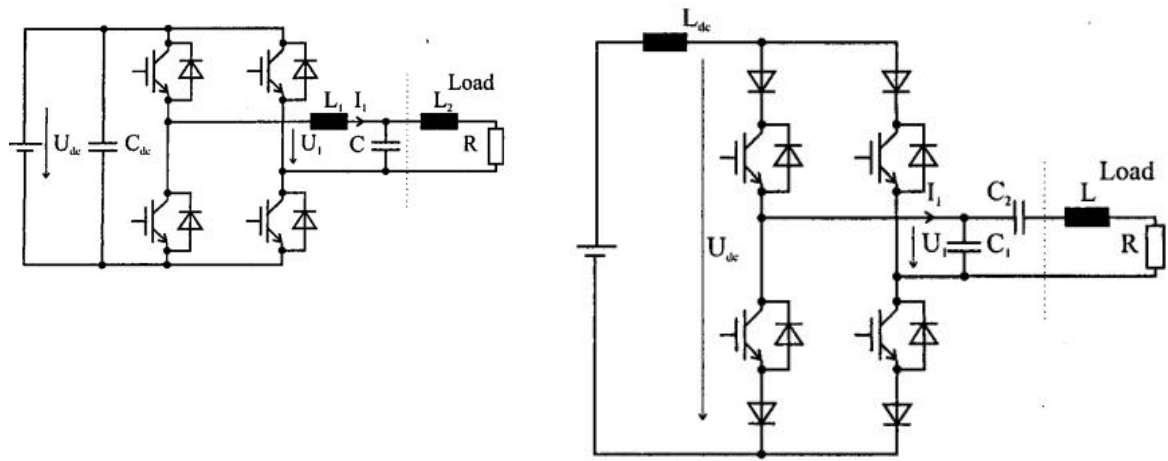
Μια πρώτη διάκριση ανάμεσα στις τοπολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι ανάμεσα σε τοπολογία μισής η πλήρους γέφυρας, όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 1.8.2. Μια άλλη διάκριση είναι ως προς την πηγή τροφοδοσίας του αντιστροφέα, που θα μπορούσε να είναι μια πηγή τάσης ή μια πηγή ρεύματος. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.9.

Συνήθως η χρήση του αντιστροφέα που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζει και το είδος του κυκλώματος αντιστάθμισης-συντονισμού που θα χρησιμοποιηθεί, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.10.

Σε πολλά άρθρα αναφέρεται, επίσης, ότι προτιμάται η χρήση αντιστροφέων με «ομαλή σβέση», «Soft Switching», όπως συνηθίζεται να ονομάζεται στην αγγλική ορολογία. Και εδώ συναντάται η διάκριση ανάμεσα σε «Zero-voltage switching», η οποία αναφέρεται σε περιορισμό των απωλειών κατά την έναυση μέσω του ελέγχου της τάσης και σε «Zero-current switching», όπου περιορίζονται οι απώλειες όταν το κύκλωμα κλείνει με έλεγχο του ρεύματος.

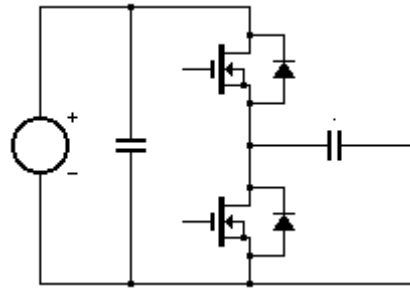


Εικόνα 2.9: Αντιστροφέας Πλήρους Γέφυρας με πηγή τάσης (αριστερά) και με πηγή ρεύματος (δεξιά).



Εικόνα 2.10: Αντιστροφέας Πηγή Τάσης με LL-C φίλτρο (αριστερά) και με Πηγή Ρεύματος με CC-L (δεξιά).

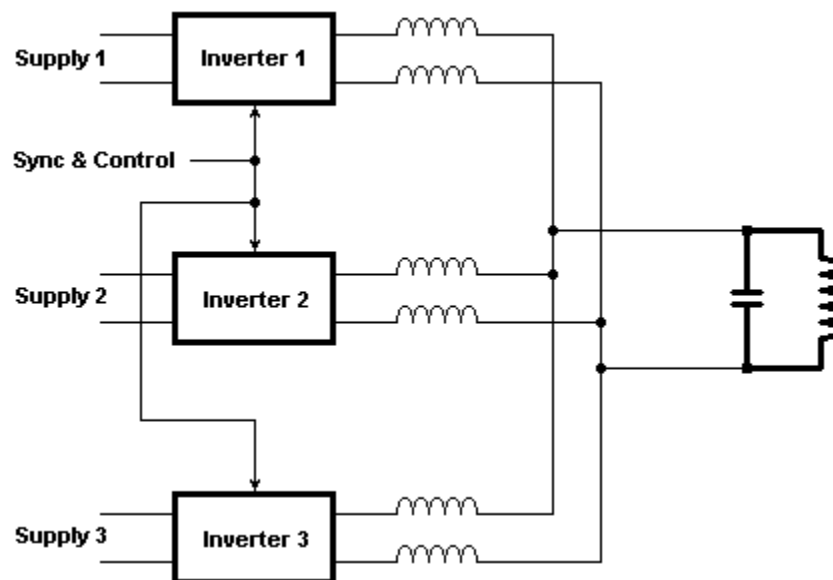
Στην εικόνα 2.11 παρουσιάζεται ένας αντιστροφέας μισής γέφυρας με έναν DC πυκνωτή. Με την χρήση του πυκνωτή κόβεται η DC συνιστώσα που παράγει ο αντιστροφέας



**Εικόνα 2.11: Αντιστροφέας Μισής Γέφυρας με DC Πυκνωτή.**

Φυσικά ο DC πυκνωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και την τοπολογία πλήρους γέφυρας.

Επίσης, σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις, που οι απαιτήσεις σε ισχύ είναι ιδιαίτερα υψηλές μπορεί να πραγματοποιηθεί παράλληλη σύνδεση αντιστροφέων, έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σε ισχύ. Ωστόσο ο κάθε αντιστροφέας δεν συνδέεται απευθείας με το πηνίο εργασίας και το φορτίο, αλλά συνοδεύεται από το «δικό του» φίλτρο αντιστάθμισης-συντονισμού έτσι ώστε το φορτίο να κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλους τους αντιστροφέες.



**Εικόνα 2.12: Διάταξη Επαγωγικής Θέρμανσης με τρεις Αντιστροφέες.**

Βέβαια ο έλεγχος και ο συγχρονισμός της λειτουργίας των αντιστροφέων στην παραπάνω είναι ιδιαίτερα απαιτητικός.

## **Κεφάλαιο 3ο : Απαιτούμενες Προδιαγραφές Επαγωγικής Διάταξης.**

### **3.1 Αντικείμενο προς θέρμανση.**

Αντικείμενο προς θέρμανση ή δοκίμιο (work piece στην αγγλική βιβλιογραφία) ονομάζεται, όπως υπονοεί η ονομασία του, το υλικό ή γενικότερα το αντικείμενο το οποίο πρόκειται να θερμανθεί.

Το αντικείμενο προς θέρμανση και η επεξεργασία στην οποία θα υποβληθεί, είναι η αιτία δημιουργίας της Επαγωγικής Διάταξης και της προσαρμογής της έτσι ώστε να ικανοποιηθούν όλες οι απαιτήσεις που αφορούν την επεξεργασία του.

Οι απαιτήσεις διαφέρουν ανάλογα με την εφαρμογή. Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε νύξη σε αρκετές εφαρμογές, στις οποίες χρησιμοποιείται η Επαγωγική Θέρμανση. Η πιο ευρέως διαδεδομένη από αυτές είναι η σκλήρυνση και γενικότερα η επεξεργασία μετάλλων ή μεταλλικών μερών στην βιομηχανία μετάλλων.

Έτσι πολλά βιβλία στην διεθνή βιβλιογραφία έχουν γραφεί για την κατασκευή Επαγωγικών Διατάξεων θέρμανσης- σκλήρυνσης, σε κάποια αυτά βασίζεται η παρούσα πτυχιακή εργασία και με βάση μιας από τις μεθόδους που αναφέρουν πραγματοποιούνται οι σχετικοί υπολογισμοί.

Σε ένα τυποποιημένο, ποιοτικό σύστημα δεν είναι αναγκαία μόνο η κατανόηση των απαιτήσεων του «αντικειμένου προς θέρμανση» ή ο τρόπος θέρμανσης του. Είναι απαραίτητη η γνώση του υλικού- αντικειμένου προς θέρμανση όσο και η οποιαδήποτε επεξεργασία έχει δεχθεί πριν την Επαγωγική Θέρμανση. Η επιλογή λάθος υλικού ή η έλλειψη πληροφοριών σχετικά με οποιαδήποτε επεξεργασία του κατά το παρελθόν, μπορεί να εμποδίσει την διαδικασία της Επαγωγικής Σκλήρυνσης. Βέβαια, στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας δεν είναι εφικτή η εκτενής ανάλυση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του αντικειμένου και της προγενέστερης επεξεργασίας του. Γίνεται αναφορά σε όσα είναι άκρως απαραίτητα για τον σχεδιασμό της Επαγωγικής Διάταξης.

#### **3.1.1 Χάλυβας.**

Το αντικείμενο προς θέρμανση είναι από χάλυβα, για το λόγο αυτό, παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή για το τι είναι χάλυβας, πως κατηγοριοποιείται, τυποποιήσεις, θερμική επεξεργασία του χάλυβα και θερμικές ιδιότητες χάλυβα. Βέβαια, σημειώνεται για άλλη μια φορά, ότι σε μια εμπορική κατασκευή επαγωγικής διάταξης απαιτείται πιο λεπτομερή αναφορά στις παραμέτρους που πλαισιώνουν το εκάστοτε δοκίμιο.

##### **3.1.1.1 Ορισμός.**

Ο χάλυβας (κοινώς ατσάλι) είναι κράμα σιδήρου– άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2,06% κ.β. άνθρακα, λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Οι κραματωμένοι χάλυβες, όπως π.χ. οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, κ.λπ., αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων.

Είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Χρησιμοποιείται παντού: από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων.



### 3.1.1.2 Κατάταξη των χάλυβων.

Ανάλογα με τη χημική σύστασή τους οι χάλυβες μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες :

Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες. Περιέχουν έως 1,0% Mn και ελάχιστα ποσοστά προσμείξεων θείου (S) και φωσφόρου (P) έως 0,05%. Πρόκειται για μαλακούς χάλυβες (για μικρή περιεκτικότητα C), οι οποίοι παρουσιάζουν αυξημένη συγκολλησιμότητα. οι κοινοί χάλυβες διακρίνονται στις εξής υποκατηγορίες:

- χάλυβες χαμηλού άνθρακα ή μαλακοί χάλυβες (mild steels·  $C < 0,30\%$ ),
- χάλυβες μέτριου άνθρακα (medium carbon steels·  $0,30\% < C < 0,60\%$ ),
- χάλυβες υψηλού άνθρακα (high carbon steels·  $0,60\% < C < 1,00\%$ ), και
- χάλυβες πολύ υψηλού άνθρακα (ultra-high carbon steels·  $1,00\% < C < 2,00\%$ )

Κραματωμένοι χάλυβες.

- Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμείξεις έως 2%. Τέτοιοι είναι οι δομικοί ή κατασκευαστικοί χάλυβες.
- Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμείξεις από 2% έως 10%.
- Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες. Περιέχουν προσμείξεις πάνω από 10%. Τέτοιοι είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, οι ταχυχάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες και οι χάλυβες μαρτενγήρανσης (Maraging) με μεγάλα ποσοστά βολφράμιου (W), βανάδιου (V), μολυβδαίνιου (Mo), χρώμιου (Cr), νικέλιου (Ni) και κοβάλτιου (Co).

Όσον αφορά την περαιτέρω επεξεργασία τους οι χάλυβες διακρίνονται σε :

- Χάλυβες διαμόρφωσης. Αυτοί υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία (έλαση, διέλαση).
- Χυτοχάλυβες. Παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή «χελωνών».

Όσον αφορά την τελική τους χρήση οι χάλυβες διακρίνονται σε :

- Χάλυβες κατασκευών. Είναι χάλυβες με μικρά, σχετικά ποσοστά κραματικών στοιχείων (συνήθως Mn, Cr) και χρησιμοποιούνται σε πλήθος κατασκευών, όπως π.χ. λέβητες, μεταλλικοί σκελετοί, κ.λπ., αλλά και σε στοιχεία μηχανών, όπως π.χ. άξονες, διωστήρες, βαλβίδες, ελατήρια, κ.λπ.
- Ανοξείδωτοι χάλυβες. Είναι χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε Cr (>13%) και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, που απαιτείται υψηλή αντοχή σε διάβρωση, όπως π.χ. στη χημική βιομηχανία. Κατασκευές από ανοξείδωτο χάλυβα είναι σωλήνες, πτερωτές, δοχεία, εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες και οτιδήποτε έρχεται σε επαφή με διαβρωτικό υγρό, καθώς επίσης σε ιατρικά εργαλεία (π.χ. χειρουργικά νυστέρια) και είδη οικιακής χρήσεως, όπως π.χ. είδη κουζίνας, μαχαιροπήρουνα, κ.λπ.
- Εργαλειοχάλυβες. Περιέχουν συνήθως μεγάλα ποσοστά κραματικών στοιχείων (W, Mo, Cr, V), τα οποία ευνοούν την αύξηση της σκληρότητας και της αντίστασης σε φθορά-τριβή. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων κοπής (κοπτικά τόρνου, φρέζας, πλάνης, κ.λπ.) ή διαμόρφωσης (μήτρες, έμβολα, καλούπια χύτευσης και διαμόρφωσης).
- Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή

πυρήνων μετασχηματιστών ηλεκτρικών γεννητριών, μονίμων μαγνητών, κ.λπ. [9]

### **3.1.1.3 Τυποποίηση χαλύβων.**

Η ονοματολογία των χαλύβων γίνεται σύμφωνα με διάφορα συστήματα τυποποίησης το γερμανικό DIN, το γαλλικό ANFOR, το αγγλικό BS, το αμερικάνικο AISI- SAE. Το 1995 συντάχθηκε για πρώτη φορά το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 10020, Τυποποίησης Σιδήρου και Χάλυβα και αναθεωρήθηκε το 2000. Διεθνή πρότυπα είναι τα ISO 4948-1 και ISO 4948-2. Η τυποποίηση στηρίζεται στην χημική σύσταση, στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και την χρήση για την οποία προορίζονται. Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 αναπτύσσεται η ονοματολογία των χαλύβων στα πιο συνήθη συστήματα, που είναι το γερμανικό DIN και το αμερικάνικο AISI- SAE.

### **3.1.1.4 Θερμικές κατεργασίες.**

Με τον όρο θερμική κατεργασία ορίζεται μία διεργασία, κατά την οποία το επεξεργαζόμενο τεμάχιο υφίσταται ένα συγκεκριμένο θερμικό κύκλο με τα ακόλουθα στάδια :

- Θέρμανση από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στην επιθυμητή θερμοκρασία
- παραμονή στην εν λόγω θερμοκρασία για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα
- ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τα παραπάνω στάδια (1)-(3) αποτελούν το γενικευμένο σχήμα μίας οποιασδήποτε θερμικής κατεργασίας.

Οι βασικές παράμετροι, οι οποίες διαφοροποιούν μεταξύ τους τις θερμικές κατεργασίες, είναι οι ακόλουθες :

- Η θερμοκρασία
- Ο χρόνος παραμονής στην παραπάνω θερμοκρασία
- Ο ρυθμός απόψυξης

Το μέσο ή περιβάλλον θέρμανσης (αέρας, τηγμένα άλατα), το μέσο απόψυξης (νερό, λάδι, αλατόνερο), αλλά και η μάζα του κατεργαζόμενου υλικού, είναι βασικά στοιχεία των θερμικών κατεργασιών, γιατί επηρεάζουν σημαντικά τις βασικές τους παραμέτρους.

#### **3.1.1.4.1 Θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης.**

Οι σημαντικότερες οικογένειες θερμικών κατεργασιών χαλύβων είναι οι ακόλουθες :

- Ανόπτηση
- Βαφή
- Επαναφορά

Γενικά, η ανόπτηση, που εφαρμόζεται στους χάλυβες, έχει στόχο τη μείωση της σκληρότητας των εσωτερικών τάσεων, την αύξηση της πλαστικότητας και της κατεργασιμότητας, αλλά και την ομογενοποίηση της χημικής σύστασης χυτών, κυρίως, τεμαχίων. Η βαφή των χαλύβων έχει στόχο τη σκλήρυνσή τους και η επαναφορά, η οποία εφαρμόζεται μετά από βαφή, έχει στόχο την ανάκτηση της δυσθραυστότητας μέσω μικρής μείωσης της σκληρότητας.

### 3.1.1.4.2 Επιφανειακές θερμικές κατεργασίες χαλύβων.

Οι επιφανειακές θερμικές κατεργασίες έχουν ως στόχο τη βελτίωση (σκλήρυνση) της επιφάνειας των χαλύβων, διατηρώντας την ολκιμότητα του εσωτερικού. Βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στις κατεργασίες εργαλείων και καλουπιών διαμόρφωσης, σε εξαρτήματα εδράνων και ολισθητήρων, σε οδοντωτούς τροχούς και σε εξαρτήματα αυτοκινήτων (π.χ. εκκεντροφόρος άξονας), όπου απαιτείται μεγάλη αντοχή σε φθορά και τριβή, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται και υψηλή δυσθραυστότητα.

Παρακάτω, γίνεται μια τυπική αναφορά στις πιο συνηθισμένες επιφανειακές κατεργασίες. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην Επαγωγική Σκλήρυνση διότι αποτελεί πρακτική εφαρμογή της Επαγωγικής Θέρμανσης.

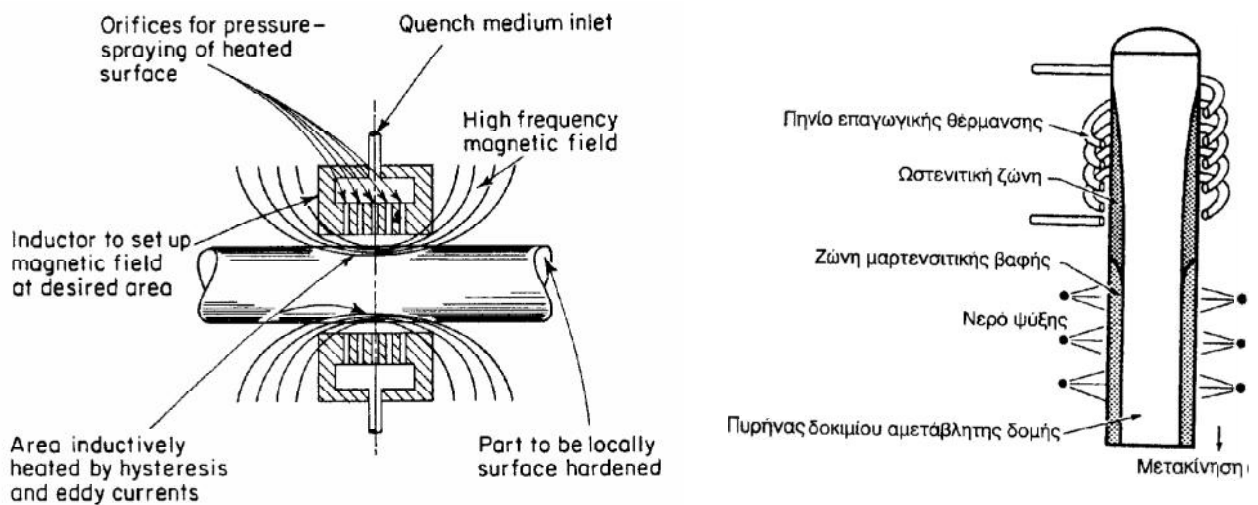
Οι πιο καθιερωμένες βιομηχανικές επιφανειακές κατεργασίες είναι οι ακόλουθες :

- **Ενανθράκωση** (εμπλουτισμός σε άνθρακα της επιφάνειας μαλακού χάλυβα (0.10-0.25%C)).
- **Εναζώτωση** (εμπλουτισμός της επιφάνειας του χάλυβα με άζωτο, που επιτυγχάνεται με θέρμανση στους 500°C).
- **Φλογοβαφή** (με τη βοήθεια φλόγας, που δημιουργείται από καύση μείγματος καυσίμου – οξυγόνου).
- **Επιφανειακή βαφή με δέσμη LASER** (δέσμη laser υψηλής πυκνότητας ισχύος (περίπου  $10^6$  W/cm<sup>2</sup>) και στη συνέχεια ψύχεται στον αέρα).
- **Επαγωγική σκλήρυνση.**

Επαγωγική σκλήρυνση

Κατά την επαγωγική σκλήρυνση με υψίσυχνα ρεύματα, το υλικό τοποθετείται κατάλληλα μέσα σε ένα πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής προκαλεί υψίσυχνα επαγωγικά ρεύματα, τα οποία διεισδύουν σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του υλικού, θερμαίνοντάς το ταυτόχρονα τοπικά. Η θέρμανση αυτή προκαλεί ωστενιτοποίηση της επιφανειακής στιβάδας του υλικού και κατόπιν ακολουθεί απότομη ψύξη (βαφή) για τη σκλήρυνση της επιφάνειας. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στη σκλήρυνση εξαρτημάτων απλής γεωμετρίας, ολισθητήρων, εργαλειομηχανών, κ.λπ. [11][12]

Μπορεί να γίνει μια σημαντική διάκριση ανάμεσα στον τρόπο σκλήρυνσης-θέρμανσης και αφορά το βάθος διείσδυσης της σκλήρυνσης. Μπορεί για παράδειγμα να γίνεται σκλήρυνση σε ένα λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του αντικειμένου προς θέρμανση και τότε μιλάμε για επιφανειακή θέρμανση (surface hardening), μπορεί όμως το βάθος διείσδυσης να προχωρά προς το εσωτερικό του αντικειμένου σε βαθύτερα στρώματα, τότε μιλάμε για δια μέσου σκλήρυνση- θέρμανση (through heating). Επιφανειακή σκλήρυνση εφαρμόζεται σε χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ενώ σε χάλυβες με μεσαία και υψηλά ποσοστά πρόσμιξης άνθρακα εφαρμόζεται δια μέσου θέρμανση. Η διάκριση αυτή γίνεται και θεωρείται αναγκαία διότι παίζει ρόλο στον τρόπο υπολογισμού καθοριστικών παραμέτρων για την Επαγωγική Διάταξη, όπως η συχνότητα και το βάθος διείσδυσης.



Εικόνα 3.1: Βασικές Αρχές της Επαγωγικής Διάταξης.

α) Γενική Διάταξη β) Δράση Μαγνητικού πεδίου

### 3.1.1.5 Θερμικές Ιδιότητες Χάλυβα.

Στο σημείο αυτό, γίνεται νύξη τριών ιδιοτήτων του χάλυβα: της πυκνότητας  $\rho$ , της ειδικής θερμότητας  $c_a$  και της θερμικής αγωγιμότητας  $k$  και πως αυτές μεταβάλλονται με την θερμοκρασία. Γενικές πληροφορίες για την μεταβολή της αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας έχει γίνει στην παράγραφο 1.4, ενώ πληροφορίες για την ειδική θερμότητα δίνονται στην παράγραφο 1.6. Εδώ οι παράμετροι αυτοί μελετώνται πιο συγκεκριμένα για τον χάλυβα.

Η πυκνότητα του χάλυβα  $\rho$ , δηλαδή η μάζα του υλικού ανά μονάδα όγκου δεν μεταβάλλεται με την θερμοκρασία και έχει σταθερή τιμή η οποία εξαρτάται από την χημική σύσταση του χάλυβα. Με άλλα λόγια, η πυκνότητα  $\rho$  του χάλυβα παίρνει διαφορετικές τιμές αν πρόκειται για μαλακό, μεσαίο ή σκληρό, αν είναι αρματωμένος ή όχι κ.τ.λ.

Η ειδική θερμότητα  $c_a$ , περιγράφει το ποσό της εισαγόμενης θερμότητας που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία της μοναδιαίας μάζας του υλικού κατά  $1^\circ\text{C}$ . Η ειδική θερμότητα αυξάνεται δραματικά στους  $700^\circ\text{C}$  κατά την διάρκεια της μεταλλουργικής αλλαγής του χάλυβα και στο σημείο αυτό μπορεί να υπάρξει μια ελαφρώς μικρή καθυστέρηση στην αύξηση της θερμοκρασίας, σε μια καθορισμένη ιδεατή δοκιμή φωτιάς. Πάνω από τους  $750^\circ\text{C}$  η ειδική θερμότητα πέφτει σε χαμηλότερο επίπεδο όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2.

Για τον υπολογισμό της ειδικής θερμότητας  $c_a$  σε διάφορες θερμοκρασίες ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

Για  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} < 600\text{ }^{\circ}\text{C}$

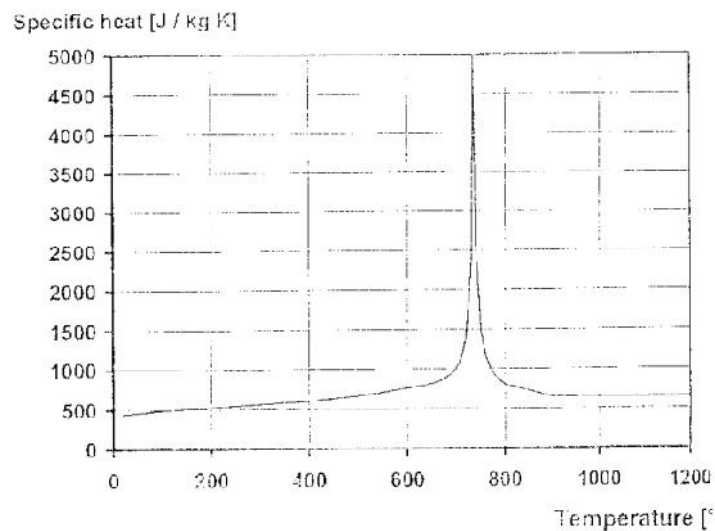
$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \times \theta_{\alpha} - 1,69 \times 10^{-3} \times \theta_{\alpha}^2 + 2,22 \times 10^{-6} \times \theta_{\alpha}^3 \quad 3.1a$$

Για  $600\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} < 735\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_{\alpha}} \quad 3.1b$$

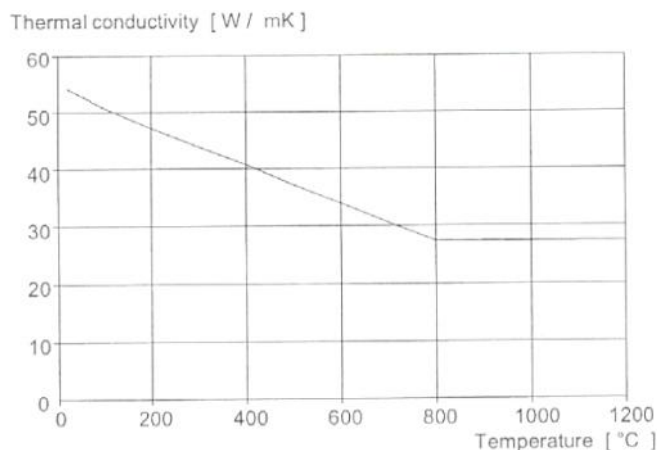
Για  $900\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$c_a = 666 + \frac{17820}{\theta_{\alpha} - 731} \quad 3.1c$$



Εικόνα 3.2: Μεταβολή της ειδικής θερμότητας Ca σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Η θερμική αγωγιμότητα  $k$  για το χάλυβα είναι το ποσό της θερμότητας ανά δευτερόλεπτο, που διέρχεται από την μονάδα επιφάνειας του υλικού για μοναδιαία αύξηση της θερμοκρασίας (μεταβολή θερμοκρασίας  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ανά μονάδα μήκους). Η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα είναι περίπου  $54\text{ W/m }^{\circ}\text{C}$  σε θερμοκρασία δωματίου και μειώνεται σε μια μέση τιμή  $45\text{ W/m }^{\circ}\text{C}$  σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η σχέση της θερμικής αγωγιμότητας φαίνεται στην εικόνα 3.3.



**Εικόνα 3.3: Θερμική αγωγιμότητα για τον χάλυβα σε συνάρτηση με την θερμοκρασία**

Για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας  $k$  σε διάφορες θερμοκρασίες ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Για } 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$k = 54 - 33,3 \times 10^{-3} \times \theta_{\alpha} \quad [\text{W/m }^{\circ}\text{C}] \quad 3.2a$$

$$\text{Για } \theta_{\alpha} > 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$k = 27,3 \quad [\text{W/m }^{\circ}\text{C}] \quad 3.2b$$

[13][14]

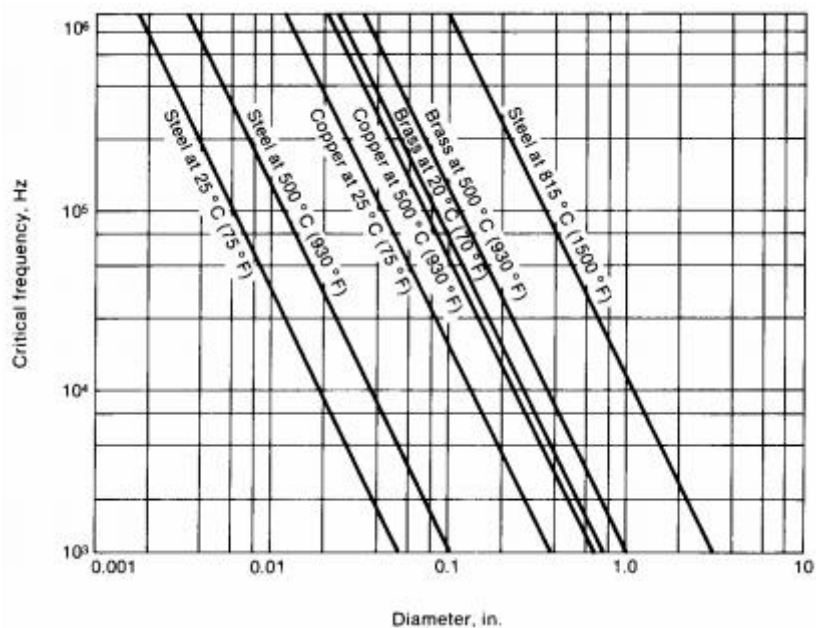
### **3.2 Επιδερμικό Φαινόμενο και βάθος διείσδυσης.**

Όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 1.3, η κύρια φύση της Επαγωγικής Θέρμανσης είναι η δημιουργία δινορευμάτων στην εξωτερική επιφάνεια του αντικειμένου προς θέρμανση, γνωστή ως επιδερμικό φαινόμενο. Σύμφωνα με την σχέση 1.19 το βάθος διείσδυσης  $\delta$  εξαρτάται από AC μαγνητικό πεδίο, την ηλεκτρική αντίσταση και τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα. Το βάθος διείσδυσης μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας και αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

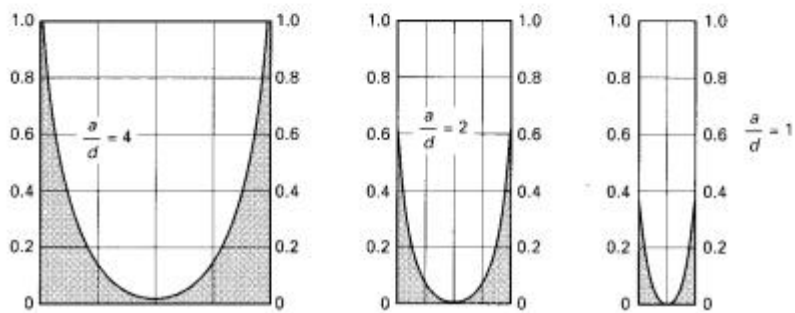
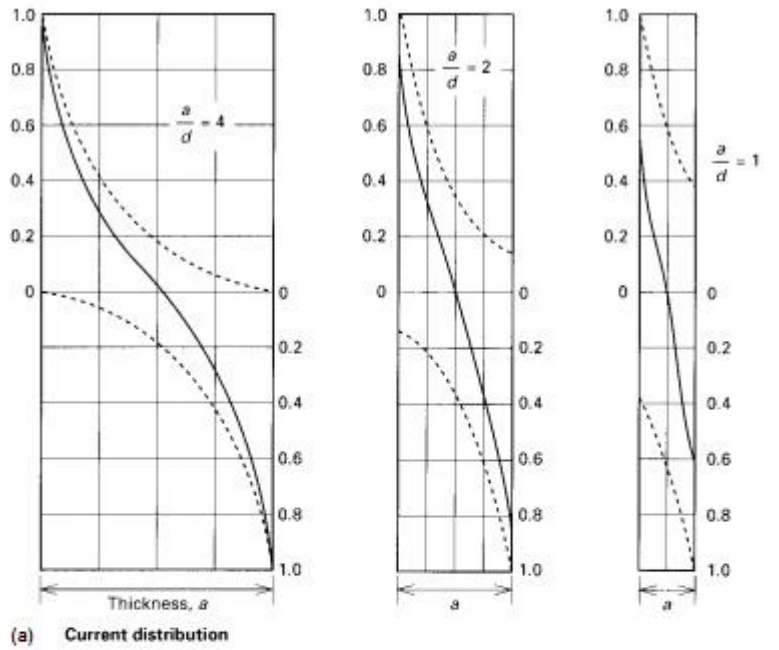
Από την σχέση 1.19 προκύπτει το «ελάχιστο» βάθος διείσδυσης για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, για ορισμένη ισχύ και θερμοκρασία δοκιμίου. Η διατομή του αντικειμένου προς θέρμανση πρέπει να είναι τετραπλάσια του βάθους διείσδυσης, σε διαφορετική περίπτωση θα υπάρξει αναίρεση ρευμάτων. Η εικόνα 3.4 δείχνει την κρίσιμη συχνότητα (ή την ελάχιστη συχνότητα) για την θέρμανση αντικειμένων από διαφορετικό μέταλλο. Η εικόνα 3.5 απεικονίζει 3 διαφορετικά παραδείγματα αναλογιών διαμέτρου αντικειμένου προς θέρμανση ( $\alpha$ ) και βάθους διείσδυσης ( $d$ ) με την αντίστοιχη κατανομή ρευμάτων. Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν την εκθετική αποσύνθεση από κάθε πλευρά, ενώ η συμπαγή γραμμή δίνει το καθαρό άθροισμα της πρόσθεσης των δύο διακεκομμένων γραμμών. Καθώς ο λόγος διαμέτρου/βάθους διείσδυσης μειώνεται από το 4 προς το 1 το καθαρό άθροισμα μειώνεται. Οι καμπύλες θέρμανσης εικόνα 3.5 δείχνουν ότι στην αναλογία  $\alpha/d=4$  συμβαίνει η καλύτερη επιφανειακή κατανομή θέρμανσης.

Εάν επιλεγεί βάθος διείσδυσης συγκρίσιμο ή μεγαλύτερο του μισού της ακτίνας του αντικειμένου προς θέρμανση, θα δημιουργηθούν δύο σύνολα δινορευμάτων κοντά στο κέντρο του δοκιμίου επάγοντας διαμετρικά αλλά αντίθετα την επιφάνεια θέρμανσης. Από πρακτική άποψη, είναι σαν τα επαγωγικά αυτά ρεύματα να αναιρούν το ένα το άλλο. Όταν η διάμετρος του δοκιμίου είναι μικρότερη από το τετραπλάσιο του βάθους διείσδυσης, η ηλεκτρική ικανότητα (βαθμός απόδοσης) πέφτει απότομα. Αντίθετα, μικρή αύξηση στην ηλεκτρική ικανότητα αποκτιέται όταν η διάμετρος του αντικειμένου είναι πολύ μεγαλύτερη του βάθους διείσδυσης.

Μια άλλη σημαντική επίδραση του επιδερμικού φαινομένου είναι στην μετάδοση της θερμότητας. Ικανότητα θέρμανσης (βαθμός απόδοσης) είναι το ποσοστό ενέργειας που μεταδίδεται από το πηνίο εργασίας και φτάνει στο αντικείμενο προς θέρμανση. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5, εάν η αναλογία διαμέτρου/βάθους διείσδυσης πέσει κάτω από το 4, η ικανότητα θέρμανσης πέφτει. Αυτή η αναλογία ορίζεται για τις στρογγυλές ράβδους και είναι η αναλογία που καθορίζει την κρίσιμη συχνότητα για την θέρμανση της. Η εικόνα 3.6 δείχνει την κρίσιμη συχνότητα σαν συνάρτηση της διαμέτρου. Η εικόνα 3.7 δείχνει την ικανότητα θέρμανσης σαν συνάρτηση της κρίσιμης συχνότητας. Υψηλότερες συχνότητες απαιτούνται για την θέρμανση μικρότερων ράβδων, αλλά όπως φαίνεται, όταν η κρίσιμη συχνότητα επιτευχθεί, περαιτέρω αύξηση της συχνότητας έχει μικρή επίδραση στην αύξηση της συνολικής θερμικής ικανότητας.

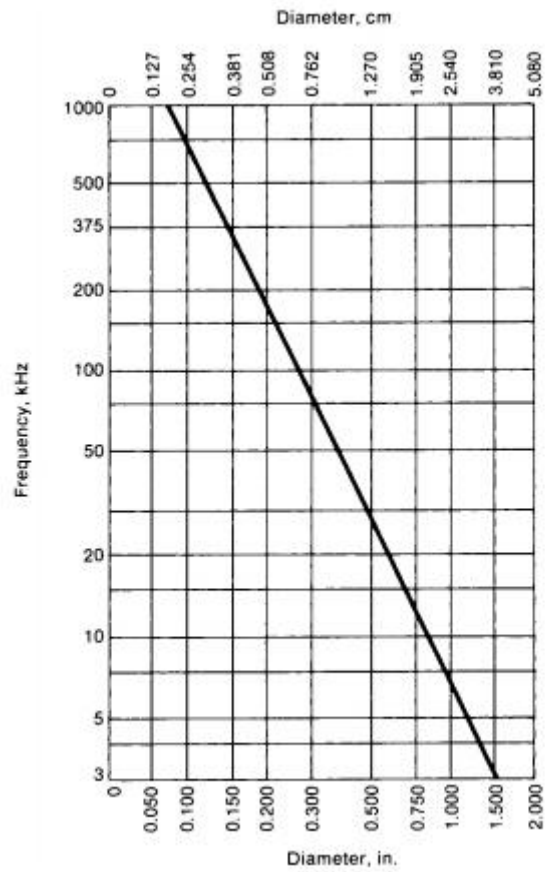


Εικόνα 3.4: Κρίσιμη Συχνότητα για διάφορα μέταλλα.

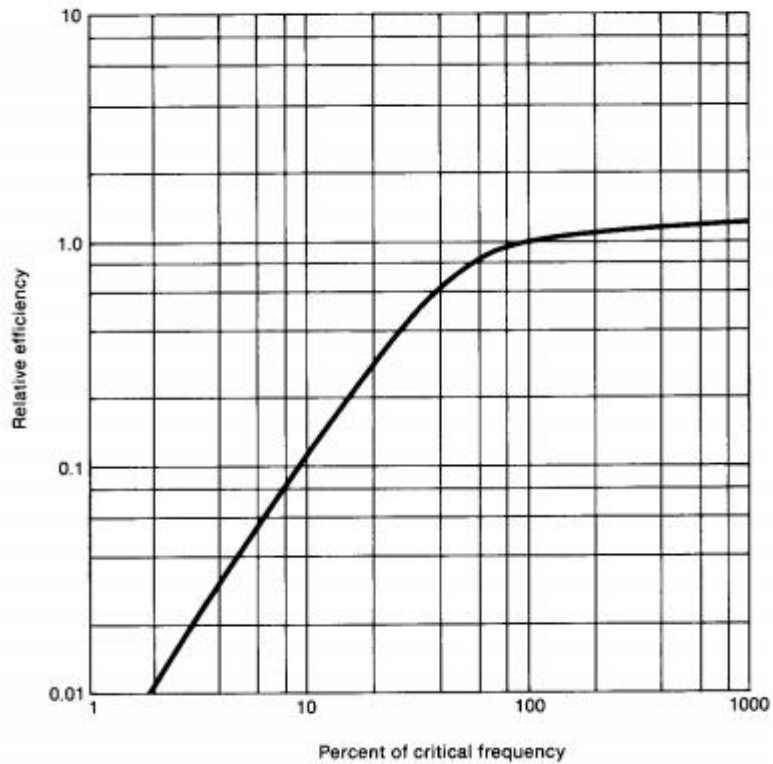


Εικόνα 3.5: Αναλογίες Βάθους διείσδυσης και Πάχους τοιχώματος





Εικόνα 3.6: Κρίσιμη Συχνότητα σαν παράμετρος της διαμέτρου για στρογγυλές ράβδους.



Εικόνα 3.7: Ικανότητα θέρμανσης σαν συνάρτηση της συχνότητας.

Στην δια μέσου θέρμανση, μια συχνότητα κοντά στην κρίσιμη πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε το αντικείμενο προς θέρμανση να θερμανθεί στο εσωτερικό του όσο το δυνατό γρηγορότερα και  $\alpha/d=4$  είναι το επιθυμητό. Από την άλλη πλευρά για επιφανειακή θέρμανση, συχνότητες μεγαλύτερες της κρίσιμης πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό βάθος διείσδυσης.

### **3.3 Πυκνότητα Ισχύος.**

Η επιλογή της ισχύος είναι το ίδιο σημαντική όσο και της συχνότητας. Τόσο η πυκνότητα ισχύος όσο και ο χρόνος θέρμανσης μπορούν να παράγουν πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς με ίδια ή διαφορετικά αποτελέσματα. Η επιλογή αυτών των δύο παραμέτρων εξαρτάται από τον τύπο θέρμανσης, τις εσωτερικές θερμικές απώλειες του αντικειμένου προς θέρμανση και την διάταξη θέρμανσης (πηνίο εργασίας) για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή. Παραδείγματος χάρη, για επιφανειακή θέρμανση μικροί χρόνοι με μεγάλες ποσότητες ισχύος απαιτούνται.

Πυκνότητα Ισχύος για ένα πηνίο εργασίας είναι η μετρούμενη ισχύ εξόδου διαιρεμένη από την συνολική επιφάνεια του αντικειμένου προς θέρμανση με μονάδα μέτρησης  $KW/cm^2$ .

Οι απαιτήσεις ισχύος αναφέρονται στο σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για την θέρμανση του αντικειμένου προς θέρμανση και τις απώλειες (ακτινοβολία, συναγωγή). Η θερμική ενέργεια που απαιτείται για την θέρμανση του αντικειμένου προς θέρμανση μπορεί να υπολογιστεί όταν το υλικό από το οποίο προέρχεται, η ειδική θερμότητα του και βάρος του είναι γνωστά. Είναι η ενέργεια που πρέπει να μεταφερθεί από το πηνίο εργασίας στο αντικείμενο προς θέρμανση και δεν αφορά ενέργεια που καταναλώνεται και εκφράζει απώλειες στο πηνίο, απώλειες μεταφοράς, μετατροπής κ.τ.λ.

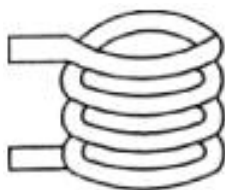
Εάν είναι γνωστές οι απαιτήσεις ισχύος για την θέρμανση του δοκιμίου και οι απώλειες μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η ενέργεια- ισχύ που απαιτείται να παρέχει το πηνίο εργασίας. Για παράδειγμα, εάν το αντικείμενο προς θέρμανση χρειάζεται 50KW για να θερμανθεί και οι απώλειες του συστήματος είναι 50%, τότε η ελάχιστη ισχύ εξόδου της πηγής ενέργειας είναι 100KW. Η ικανότητα μεταφοράς της ενέργειας της πηγής στο πηνίο εργασίας, εξαρτάται από το κύκλωμα σύνδεσης- συντονισμού.

Η επιφανειακή θέρμανση χρησιμοποιείται στην επιφανειακή σκλήρυνση χαλύβδινων μερών, όπως βίδες, γρανάζια κ.τ.λ. Σε αυτού του είδους τις εφαρμογές υψηλές πυκνότητες ισχύος και μικροί χρόνοι θέρμανσης χρησιμοποιούνται όταν το βάθος διείσδυσης είναι μικρό. Οι πυκνότητες αυτές επιλέγονται για την επίτευξη γρήγορης θέρμανσης. Όμως η συχνότητα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Υψηλότερες συχνότητες και υψηλότερες πυκνότητες προκαλούν μικρότερα βάθη διείσδυσης. Επομένως, μικρότερες συχνότητες σε υψηλότερες πυκνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν το ελάχιστο δυνατό βάθος διείσδυσης.

Στην δια μέσου θέρμανση για να μεταδοθεί θερμότητα στο κέντρο του αντικειμένου προς θέρμανση, οι ρυθμοί θέρμανσης για την δια μέσου σκλήρυνση του χάλυβα είναι πολύ μικρότεροι από αυτούς που χρησιμοποιούνται στην επιφανειακή σκλήρυνση. Μετά από λίγο, ο ρυθμός αύξησης της θέρμανσης της επιφάνειας και του κέντρου γίνεται συγκρίσιμος εξαιτίας της αγωγής (conduction) και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και κέντρου γίνεται συγκεκριμένη και πάντα θα υπάρχει ειδικά όσο η διάμετρος του αντικειμένου προς θέρμανση αυξάνεται.

### **3.4 Ο ρόλος του Πηνίου Εργασίας.**

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στην παράγραφο 2.5, το πηνίο εργασίας αποτελεί ένα από τα τρία πιο σημαντικά τμήματα της Επαγωγικής Διάταξης. Σε πολλά άρθρα χαρακτηρίζεται ως η «καρδιά» της Επαγωγικής Διάταξης. Είναι το κύριο μέρος του συστήματος της Επαγωγικής Διάταξης, το οποίο μεταφέρει την ενέργεια στο αντικείμενο προς θέρμανση. Έτσι, για την μέγιστη μεταφορά ενέργειας στο αντικείμενο προς θέρμανση, ο ρόλος του πηνίου είναι πολύ σημαντικός. Το πηνίο εργασίας, γενικά, διαμορφώνεται έτσι ώστε να εισαχθεί στο αντικείμενο προς θέρμανση όσο το δυνατό μεγαλύτερη ποσότητα δυναμικών γραμμών. Μεγαλύτερη ποσότητα δυναμικών γραμμών, μεγαλύτερο ρεύμα αναπτύσσεται στο αντικείμενο προς θέρμανση. Καθώς, το ρεύμα που ρέει στο αντικείμενο προς θέρμανση δημιουργεί την θερμική ενέργεια, ο ρυθμός θέρμανσης και το βάθος διείσδυσης εξαρτώνται απόλυτα από το πηνίο εργασίας. Το πηνίο εργασίας εμφανίζεται σε πολλούς τύπους, μεγέθη και σχήματα και η μορφή του εξαρτάται από την μορφή του αντικειμένου προς θέρμανση. Συνήθως, κατασκευάζεται από χάλκινο σωλήνα-έναν πολύ καλό αγωγό της θερμότητας και του ηλεκτρισμού. Τέλος, το πηνίο εργασίας ψύχεται από νερό, του οποίου η ροή εξασφαλίζεται μέσω κάποιου κυκλοφορητή.



**Εικόνα 3.8 :Πηνίο Εργασίας**

#### **3.4.1 Υλικό κατασκευής.**

Όπως ειπώθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, το πηνίο εργασίας είναι κατασκευασμένο από χαλκό εξαιτίας της μικρής του αντίστασης στα υψηλής συχνότητας ρεύματα. Πηνία φτιαγμένα από σωλήνα για μικρές και μεσαίες ισχύς είναι κατασκευασμένα από εμπορικό χαλκό, ενώ χωρίς προσμίξεις οξυγόνου και υψηλής αγωγιμότητας χαλκός προτιμάται για την κατασκευή πηνίων υψηλής συχνότητας. Οι σωλήνας προτιμάται να έχει υποστεί ανόπτηση πριν την χρήση του.

Ένας σχεδιαστικός περιορισμός είναι η μη-ικανότητα της ροής κατάλληλης ποσότητας νερού μέσα στον σωλήνα-πηνίο έτσι ώστε να εξασφαλιστεί καλή ψύξη του σωλήνα. Η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα περιορίζει το μέγεθος του σωλήνα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Στον πίνακα 3.1 φαίνονται οι διάμετροι σωλήνων που χρησιμοποιούνται συνήθως.

Γύρω από το πηνίο χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά-εξαρτήματα, πχ. για την στήριξη του. Τα υλικά αυτά πρέπει να είναι μη-αγώγιμα και μη σιδηρούχα.

Tubing Type			
Round		Square/Rectangular	
mm	Inches	mm	Inches
3.125	1/8	3.125 × 3.125	1/8 × 1/8
4.688	3/16	4.688 × 4.688	3/16 × 3/16
6.250	1/4	6.250 × 6.250	1/4 × 1/4
9.375	3/8	6.250 × 12.50	1/4 × 1/2
		12.50 × 25.00	1/2 × 1
		12.50 × 37.50	1/2 × 1 1/2

Source: Ref 1

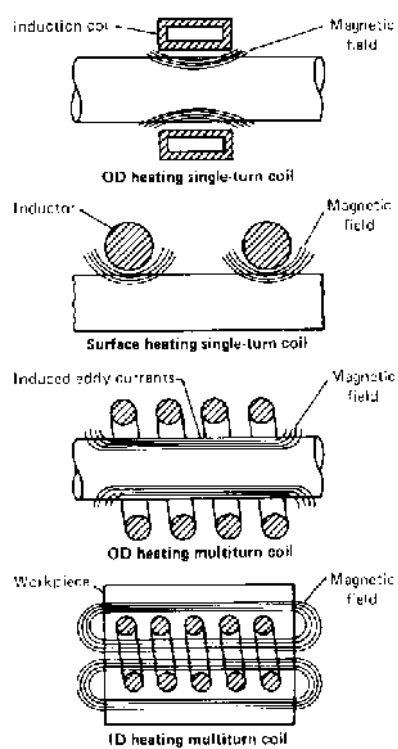
Πίνακας 3.1: Τυπικοί Διάμετροι Πηνίου Εργασίας

### 3.4.2 Μαγνητικό πεδίο και πηνίο εργασίας.

Υπάρχουν δύο κατηγοριοποιήσεις πηνίων που σχετίζονται με την κατεύθυνση των δινορευμάτων, που παράγονται από το πηνίο εργασίας στο αντικείμενο προς θέρμανση:

#### Διαμήκης ροής (αντίθετη της ροής ρεύματος) πηνία.

Είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα με τον σωληνοειδή τύπο πηνίου πιο συχνά να χρησιμοποιείται. Τα πηνία αυτά περικυκλώνουν- τυλίγουν το αντικείμενο προς θέρμανση, με τις σπείρες στις αντίθετες πλευρές του, ώστε το επαγόμενο ρεύμα να ρέει γύρω από το αντικείμενο προς θέρμανση, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.9. Όταν το κενό (air gap) μεταξύ πηνίου εργασίας και αντικειμένου προς θέρμανση είναι ικανοποιητικό, η ικανότητα θέρμανσης αυξάνεται επειδή οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου που περνούν μέσα από το αντικείμενο προς θέρμανση αυξάνονται.

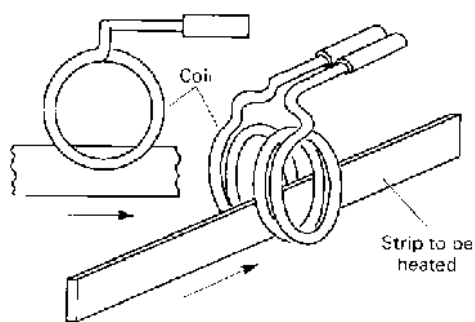


Εικόνα 3.9: Μαγνητικά πεδία από πηνία διαμήκης ροής

Τα σωληνοειδή πηνία εμφανίζονται σε πολλές μορφές, σχήματα και παραλλαγές με το κυλινδρικό πηνίο ως την πιο απλή μορφή.

### Εγκάρσιας ροής πηνία.

Τα πηνία αυτού του τύπου δεν είναι ευρέως διαδεδομένα για την χρήση τους και χρησιμοποιούνται για την θέρμανση αντικειμένων όπου η διατομή του αντικειμένου προς θέρμανση είναι μικρότερη από το γινόμενο  $4 \times \delta$ , όπου  $\delta$  το βάθος διείσδυσης. Η εικόνα 3.10 δείχνει ένα πηνίο τέτοιου τύπου. Το αντικείμενο προς θέρμανση είναι τοποθετημένο ανάμεσα στις σπείρες του πηνίου και το ρεύμα ρέει προς την ίδια κατεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό δεν υπάρχει αναίρεση ρεύματος και τα λεπτά σε διατομή αντικείμενα προς θέρμανση μπορούν να ζεσταθούν εξίσου καλά.



**Εικόνα 3.10: Πηνίο εγκάρσιας ροής**

### 3.4.3 Σχεδιασμός πηνίου.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό του πηνίου εργασίας είναι οι εξής:

- Οι διαστάσεις και το σχήμα του αντικείμενου προς θέρμανση.
- Ο αριθμός των αντικειμένων που θα ζεσταθούν.
- Η επιθυμητή διάταξη σκλήρυνσης.
- Η μέθοδος παραγωγής (πχ scanning or short shot).
- Η συχνότητα.
- Η ισχύς εισόδου.
- Ο τρόπος σβέσης του αντικείμενου προς θέρμανση.
- Η επιθυμητή διάρκεια ζωής και ο τρόπος χρήσης του πηνίου.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό όλοι αυτοί οι παράμετροι είναι σημαντικό να ληφθούν υπό όψη κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του πηνίου. Ο καθένας ξεχωριστά, αλλά και όλοι μαζί καθορίζουν αν το πηνίο θα επιτύχει το «σκοπό» του.

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας πολύ από τους παραπάνω παράγοντες θα αγνοηθούν κατά τους υπολογισμούς, ενώ σε κάποιους άλλους θα γίνει μόνο μια τυπική θεωρητική αναφορά στο πως επηρεάζουν τον ρόλο του πηνίου.

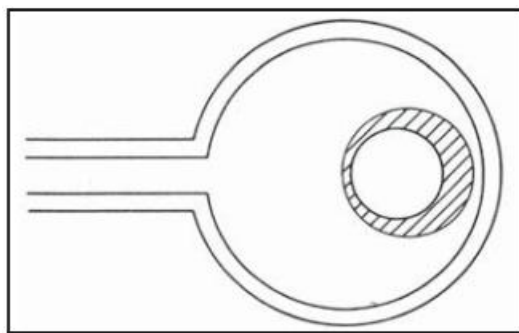
Επίσης γίνεται εμφανές ότι η μελέτη προσεγγίζει την χρήση της Ε. Θ για την σκλήρυνση κάποιου αντικείμενου. Όπως, όμως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 2.4 η Ε. Θ. δεν περιορίζεται μόνο σε αυτή την εφαρμογή. Στα πλαίσια λοιπόν κάποιας άλλης εφαρμογής πχ σφράγισμα μπουκαλιών κάποιοι από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγούμενα αγνοούνται, προστίθενται κάποιοι άλλοι, ενώ μπορεί να μεταβάλλεται η επίδραση των παραγόντων που παραμένουν. Αλλάζουν οι τύποι υπολογισμού των διάφορων παραμέτρων, ο χρόνος που απαιτείται για την θέρμανση, η ακρίβεια και η λεπτομέρεια για το βάθος διείσδυσης κ.α.

Σε κάποιες περιπτώσεις, εξαρτάται από την διαδικασία που χρησιμοποιείται, διαφορετικοί τύποι πηνίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επίσης, το ίδιο πηνίο που χρησιμοποιείται σε συστήματα υψηλής ισχύος πχ επιφανειακή θέρμανση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα χαμηλής ισχύος για δια μέσου θέρμανση.

Πολλά πηνία κατασκευάζονται βασισμένα στην γνώση των αρχών σχεδιασμού του πηνίου και στην εμπειρία, ενώ άλλα πηνία σχεδιάζονται με βάση προγράμματα προσομοίωσης έτσι ώστε να προσαρμοστούν στο αντικείμενο προς θέρμανση (παράγραφος 2.4). Παρ όλα αυτά, στην παρούσα πτυχιακή εργασία δεν θα χρησιμοποιηθεί κάποιο πρόγραμμα προσομοίωσης για τον υπολογισμό των διαστάσεων του πηνίου εργασίας.

Προϋποθέσεις σχεδιασμού για καλή- μεγάλη ικανότητα σύζευξης:

1. Το πηνίο πρέπει να τοποθετηθεί όσο πιο κοντά γίνεται στο αντικείμενο προς θέρμανση για την μέγιστη μεταφορά ισχύος. Έτσι ο μέγιστος αριθμός μαγνητικών γραμμών θα εισχωρήσει στο αντικείμενο προς θέρμανση. Όσο πιο πυκνό είναι το μαγνητικό πεδίο τόσο πιο μεγάλα ρεύματα θα αναπτύσσονται. Στον πίνακα 3.2 φαίνεται η απόσταση πηνίου- αντικειμένου που συνίσταται. Οι απαιτήσεις της απόστασης μεταξύ πηνίου και αντικειμένου μπορούν να εξαρτηθούν και από άλλους παράγοντες όπως, πως το αντικείμενο που θα θερμανθεί ή η θέση που θα έχει σχετικά με το πηνίο, το σχήμα και η περιοχή που θα θερμανθεί.
2. Το μεγαλύτερο μέρος των μαγνητικών γραμμών συγκεντρώνεται στα άκρα του πηνίου εργασίας και μειώνονται όσο κινούμεθα προς το κέντρο του. Επομένως, στο κέντρο του πηνίου εργασίας το μαγνητικό πεδίο είναι εξασθενημένο και ο ρυθμός θέρμανσης είναι μεγαλύτερος στα άκρα. Επίσης, αν ένα αντικείμενο προς θέρμανση τοποθετηθεί μακριά από το κέντρο του πηνίου εργασίας, η περιοχή του αντικειμένου που είναι πιο κοντά στις σπείρες του πηνίου δέχεται μεγαλύτερο μέρος των μαγνητικών γραμμών και θερμαίνεται περισσότερο. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο έντονο στις υψηλές συχνότητες.

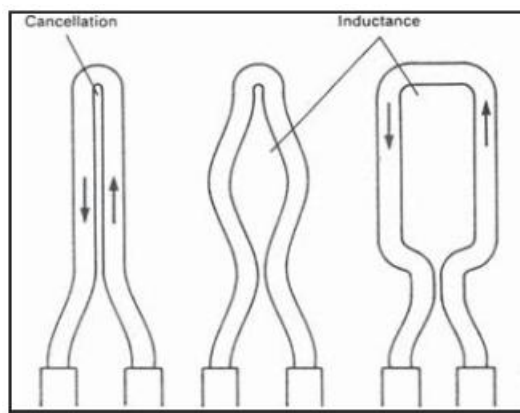


**Εικόνα 3.11: Επαγωγική θέρμανση σε αντικείμενο που δεν είναι τοποθετημένο στο κέντρο**

3. Ο σχεδιασμός των άκρων (leads) του πηνίου πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να εξασφαλίζεται καλή σύζευξη. Στο σημείο όπου τα άκρα και το πηνίο ενώνονται το μαγνητικό πεδίο είναι πιο αδύναμο. Άρα, το μαγνητικό κέντρο του επαγωγέα- πηνίου δεν σημαίνει ότι ταυτίζεται πάντα με το γεωμετρικό του κέντρο. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στα πηνία μιας σπείρας. Καθώς, ο

αριθμός των σπειρών αυξάνεται και το μαγνητικό πεδίο από κάθε σπείρα προστίθεται, το φαινόμενο αυτό γίνεται λιγότερο σημαντικό. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου, πολλές φορές τοποθετείται το αντικείμενο προς θέρμανση όχι ακριβώς στο κέντρο. Σε πολλές εφαρμογές για να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη θέρμανση το αντικείμενο προς θέρμανση περιστρέφεται.

4. Το πηνίο εργασίας πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μην αναιρεί την δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Το πηνίο στα αριστερά στην εικόνα 3.12 δεν έχει επαγωγή επειδή οι απέναντι πλευρές του επαγωγέα είναι πολύ κοντά. Αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ τους δημιουργείται επαγωγή, οπότε αν τοποθετήσουμε αγώγιμο υλικό στο εσωτερικό του πηνίου θα ζεσταθεί. Το πηνίο στα δεξιά παρέχει επιπρόσθετη επαγωγή και είναι πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα καλού πηνίου.



Εικόνα 3.12: Επίδραση του σχεδιασμού του πηνίου στην επαγωγή

5. Το πηνίο πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να είναι άκαμπτο και να μην κινείται όταν εφαρμοστεί σε αυτό η επιθυμητή ισχύ.
6. Το πηνίο πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να μην υπερθερμαίνεται κατά την χρήση και να μην αναπτύσσει ρωγμές. Επειδή πολλές φορές, τα πηνία χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται σε υψηλότερες συχνότητες πρέπει να γίνει πρόβλεψη για καλύτερη ακαμψία και καλύτερη ψύξη.
7. Όλα τα πηνία έχουν σημαντικές απώλειες και χρειάζονται καλή ψύξη. Σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις ισχύος, είναι καλό το σύστημα ψύξης να διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σύστημα.
8. Το πηνίο πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε οι μαγνητικές γραμμές να παράγουν δινορεύματα, τα οποία θα θερμάνουν τις επιθυμητές περιοχές. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση μαγνητικών γραμμών στο εσωτερικό του αντικειμένου προς θέρμανση σημαίνει μεγαλύτερο ρυθμό θέρμανσης. Πηνία μπορούν να σχεδιαστούν σε διαφορετικά σχέδια και μορφές ή με περισσότερες από μια σπείρες. Τα πηνία ραδιοσυχνοτήτων (RF coils) πρέπει να βρίσκονται σε μικρότερες αποστάσεις από το αντικείμενο προς θέρμανση σε σχέση με αυτά των χαμηλών συχνοτήτων. «Συγκεντρωτές» χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τον συντελεστή σύζευξης με αποτέλεσμα την αύξηση των μαγνητικών γραμμών.

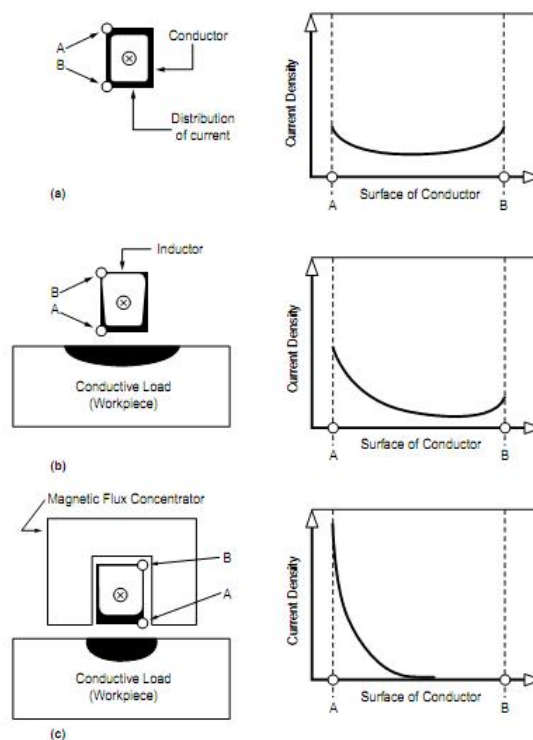
Frequency (kHz)	Coupling to workpiece	
	in.	mm
1–3	0.12–0.24	3–6
10–25	0.08–0.15	2–3.8
50–450	0.06–0.09	1.5–2.25

Source: Ref 5

**Πίνακας 3.2: Προτεινόμενη Απόσταση Πηνίου- Αντικειμένου**

«Μαγνητικής ροής Συγκεντρωτές»

Οι μαγνητικής ροής Συγκεντρωτές ή Ενισχυτές χρησιμοποιούνται πολύ αποτελεσματικά για να αυξήσουν την ικανότητα σύζευξης κάποιων πηνίων. Η εικόνα 3.13(a) δείχνει την κατανομή του ρεύματος. Όταν το αντικείμενο προς θέρμανση τοποθετηθεί μέσα ή κοντά στο πηνίο εργασίας, το ρεύμα αναδιανέμεται όπως φαίνεται στην εικόνα 3.13(b). Ένα σημαντικό μέρος του ρεύματος ρέει κοντά στην επιφάνεια του πηνίου, η οποία βλέπει το αντικείμενο προς θέρμανση. Το υπολειπόμενο ρεύμα συγκεντρώνεται στις πλευρές του πηνίου με το ρεύμα να επάγεται- προκαλείται στην περιοχή κοντά στο αντικείμενο προς θέρμανση και το πηνίο. Μετά την τοποθέτηση του συγκεντρωτή (εικόνα 3.13(c)), πρακτικά όλο το ρεύμα συγκεντρώνεται στην επιφάνεια που βλέπει το αντικείμενο προς θέρμανση.

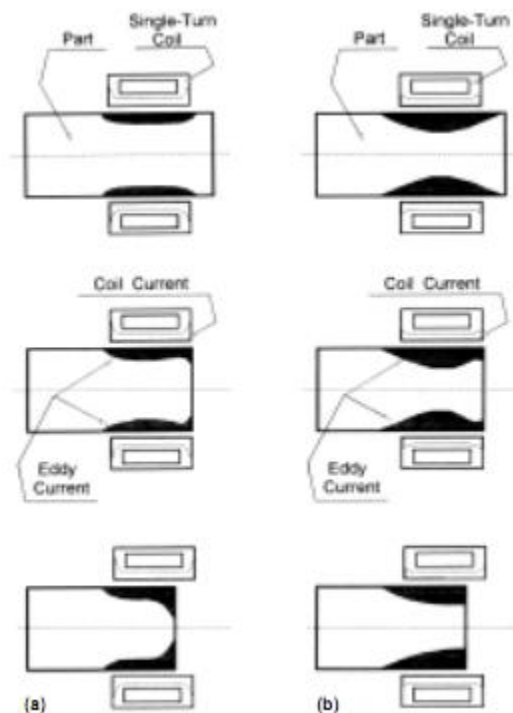


**Εικόνα 3.13: Διανομή ρεύματος σε ευθύ αγωγό.**



### 3.4.4 Χαρακτηριστικά Πηνίου Έναντι Συχνότητας.

Τα πηνία εργασίας σε χαμηλές συχνότητες ( $1 \div 10\text{kHz}$ ) μπορούν να έχουν μηχανικές δονήσεις, οι οποίες απαιτούν άκαμπτη συγκράτηση και τοποθέτηση, ειδικά στην περιοχή του  $1\text{kHz}$ . Πολλών σπειρών (σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους) πηνία θα διασκορπίσουν εάν εφαρμοστεί ισχύ και δεν είναι καλά συγκρατημένα. Οι χαμηλότερες συχνότητες χρησιμοποιούνται για σκλήρυνση με μεγάλο βάθος διείσδυσης και για θέρμανση αντικειμένων μεγαλύτερων διαμέτρων. Πηνία που χρησιμοποιούνται σε συχνότητες μεταξύ  $3 \div 25\text{kHz}$  εύρος τείνουν να είναι λίγων σπειρών αν και πηνία που χρησιμοποιούνται για συνεχή θέρμανση μπαρών ή σωλήνων μπορούν να είναι πολλών σπειρών, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία για σφυρηλάτηση. Συμπαγή πηνία χρησιμοποιούνται σε χαμηλές συχνότητες, ενώ σε υψηλότερες συχνότητες τα πηνία είναι κατασκευασμένα από σωλήνα. Η εικόνα 3.14(a) δείχνει το ρεύμα που παράγεται σε 3 περιοχές σε σχέση με τη θέση του πηνίου στην άκρη της μπάρας για υψηλή συχνότητα, ενώ η εικόνα 3.14(b) δείχνει το ρεύμα για χαμηλές συχνότητες. Στις υψηλές συχνότητες, παρατηρούνται μεγάλες αιχμές, οι οποίες οφείλονται στην μεγαλύτερη συγκέντρωση ρεύματος στην άκρη της μπάρας, η οποία παράγει βαθύτερη θέρμανση. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την επιλογή πηνίου από την άποψη ότι οι υψηλότερες συχνότητες είναι πιο περιορισμένες στην χρήση πλατιών ή πολλών σπειρών πηνία σε συνεχή θέρμανση εξαιτίας του παραπάνω φαινομένου.



Εικόνα 3.14: Ηλεκτρομαγνητισμός και επίδραση a) υψηλών συχνοτήτων, b) χαμηλών συχνοτήτων.

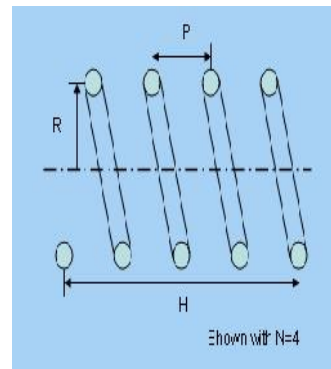
### **3.4.5 Χαρακτηριστικά Πηνίου.**

#### **Coil pitch- Απόσταση μεταξύ σπειρών.**

Coil pitch ή Απόσταση μεταξύ σπειρών ονομάζεται η απόσταση ή αλλιώς το κενό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών σπειρών. Στην εικόνα 3.15 συμβολίζεται με το γράμμα P.

#### **Coupling Distance- Απόσταση Σύζευξης πηνίου με αντικείμενο προς θέρμανση.**

Απόσταση Σύζευξης πηνίου με αντικείμενο προς θέρμανση ή απλά σύζευξη πηνίου αντικειμένου ονομάζεται η απόσταση μεταξύ τους και συμβολίζεται με R στην εικόνα 3.15 που ακολουθεί, γίνεται η θεώρηση ότι το αντικείμενο προς θέρμανση είναι τόσο λεπτό που να μπορεί να αναπαρασταθεί από μια αξονική γραμμή.



**Εικόνα 3.15: Χαρακτηριστικά πηνίου εργασίας, με P συμβολίζεται το Coil Pitch και R η απόσταση μεταξύ πηνίου και αντικειμένου προς θέρμανση**

Όταν χρησιμοποιούνται πηνία με πολλές σπείρες, η απόσταση μεταξύ των σπειρών είναι ευθέως ανάλογη του βάθους διείσδυσης και καθορίζει αν θα υπάρξει ομοιόμορφη θέρμανση ή όχι. Στα πηνία πολλών σπειρών, η απόσταση μεταξύ των σπειρών δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μισό της διαμέτρου του σωλήνα-απαγωγέα. Αν δεν ισχύει αυτός ο περιορισμός ή σύζευξη με το αντικείμενο προς θέρμανση είναι χαλαρή, και μη-ομοιόμορφη θέρμανση θα επιτευχθεί. Εάν το πηνίο εργασίας τοποθετηθεί κοντά στο αντικείμενο προς θέρμανση, η περιοχή θέρμανσης έχει το ίδιο σχήμα με τα τυλίγματα του πηνίου αλλά ομοιόμορφη θέρμανση από άκρη σε άκρη του αντικειμένου προς θέρμανση δεν θα πραγματοποιηθεί. Αυξάνοντας την σύζευξη μεταξύ πηνίου και αντικειμένου, η θέρμανση γίνεται πιο ομοιόμορφη αλλά το πάχος του αντικειμένου που θερμαίνεται μειώνεται. Μια καλή σχέση απόστασης σύζευξης είναι να είναι ίση με την απόσταση μεταξύ των σπειρών και όχι μεγαλύτερη από το διπλάσιο της απόστασης μεταξύ των σπειρών για να επιτευχθεί ομοιόμορφη θέρμανση.

Η επιθυμητή απόσταση σύζευξης πηνίου εξαρτάται από τον τύπο της θέρμανσης (στιγμιαία ή συνεχής) και τον τύπο του υλικού (σιδηρομαγνητικό ή μη σιδηρομαγνητικό). Στην στατική επιφανειακή θέρμανση, στην οποία το αντικείμενο μπορεί να περιστρέφεται αλλά δεν μετακινείται μέσα στο πηνίο, η απόσταση 0.15 cm συνιστάται.

Για συνεχή θέρμανση ή σάρωση, απόσταση 0.19 cm είναι συνήθως απαραίτητη για να επιτρέψει την ποικιλία των αντικειμένων προς θέρμανση. Για δια μέσου θέρμανση (through heating) και μαγνητικά υλικά, πολλών σπειρών πηνία και εφαρμογή χαμηλής ισχύος συνιστώνται. Η απόσταση σύζευξης σε αυτή την περίπτωση μπορεί να είναι πιο χαλαρή από 0.64 cm έως 0.95 cm. Εάν το αντικείμενο προς θέρμανση δεν είναι ευθύ, η απόσταση από το πηνίο πρέπει να μειωθεί. Στις υψηλές συχνότητες, τα ρεύματα του πηνίου είναι χαμηλότερα και σύζευξη πρέπει να αυξηθεί. Σε χαμηλές και μεσαίες συχνότητες τα ρεύματα τα ρεύματα πηνίου είναι συγκριτικά μεγαλύτερα και μπορεί να μειωθεί η απόσταση σύζευξης.

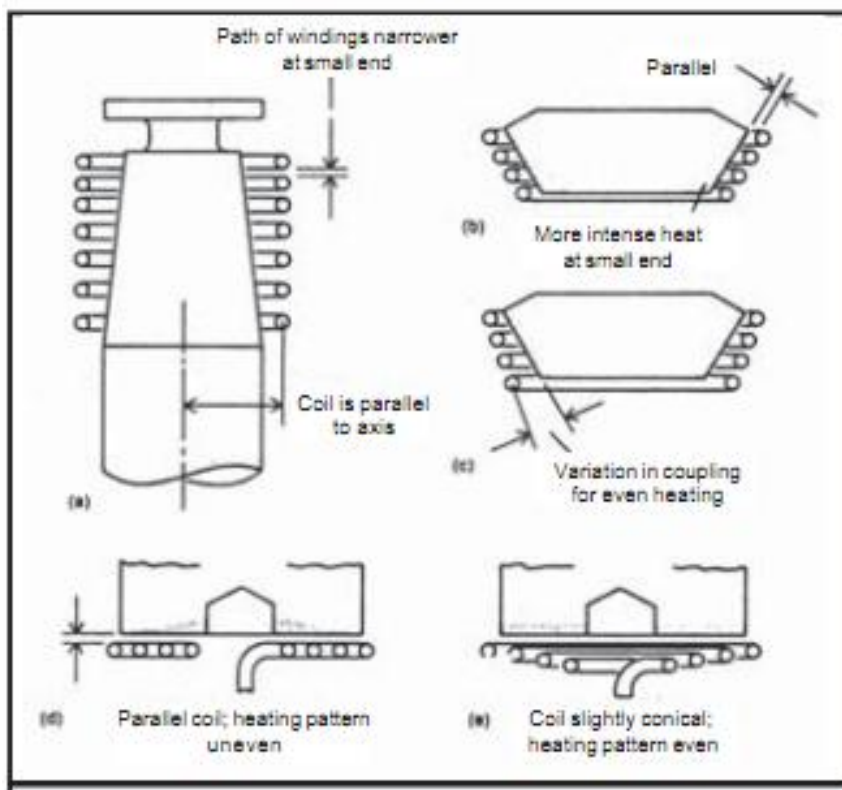
Δίσκοι και αντικείμενα προς θέρμανση με τρύπα στο κέντρο.

Σε όλα τα πηνία η μαγνητική ροή επηρεάζεται από την διατομή και την μάζα του αντικειμένου προς θέρμανση. Όταν το πηνίο προεξέχει στο τέλος του αντικειμένου προς θέρμανση, βαθύτερη θέρμανση παρατηρείται σε εκείνο το σημείο. Για να μειωθεί αυτό το φαινόμενο το πηνίο πρέπει να μεταφερθεί λίγο πριν το τέλος του αντικειμένου ή να σχεδιαστεί από την αρχή έτσι ώστε να μην υπερκαλύπτει το αντικείμενο προς θέρμανση. Η ίδια κατάσταση συμβαίνει και όταν θερμαίνεται ένας δίσκος ή ένας τροχός. Το βάθος της θέρμανσης θα είναι μεγαλύτερο στις άκρες παρά στο κέντρο.

Το ίδιο συμβαίνει στις τρύπες, στα μεγάλα κενά- σχισμές και στις προεξοχές. Αν το αντικείμενο προς θέρμανση περιέχει μια κεντρική κυκλική τρύπα, ένα επιπρόσθετο δινόρευμα δημιουργείται, το οποίο θα προκαλέσει θερμότητα υψηλότερου βαθμού από ότι στο υπόλοιπο αντικείμενο. Η προσθήκη ενός κομματιού χαλκού (ανάλογου σχήματος) μπορεί να ελέγξει την προκύπτουσα θερμότητα. Για αντικείμενα προς θέρμανση που περιέχουν κενά, το συνεχές πέρασμα του ρεύματος διακόπτεται από το κενό και το ρεύμα πρέπει να ταξιδέψει στο εσωτερικό του αντικειμένου για να «κλείσει» κύκλωμα.

Επειδή το μαγνητικό πεδίο τείνει να συγκεντρωθεί προς το κέντρο κατά μήκος του σωληνοειδούς πηνίου, ο ρυθμός θέρμανσης που παράγεται σε αυτή την περιοχή είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό θέρμανσης που παράγεται προς τα άκρα. Επιπλέον, αν το αντικείμενο προς θέρμανση είναι μεγάλου μήκους, η θέρμανση στα άκρα μειώνεται σημαντικά. Για να επιτευχθεί ομοιόμορφη θέρμανση κατά μήκος του αντικειμένου προς θέρμανση, το πηνίο εργασίας πρέπει να τροποποιηθεί. Η τεχνική προσαρμογής των σπειρών μεταξύ τους ή η μεταβολή σύζευξης πηνίου- αντικειμένου είναι δύο από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερης ομοιόμορφης θέρμανσης.

Στην μέθοδο μεταβολής σύζευξης πηνίου- αντικειμένου, μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ πηνίου εργασίας και αντικειμένου προς θέρμανση. Πιο συνηθισμένη είναι η πρώτη μέθοδος, η προσαρμογή των σπειρών, κατά την οποία μεταβάλλεται η απόσταση μεταξύ των σπειρών και ιδιαίτερα στο κέντρο του πηνίου.



Εικόνα 3.16: Μεταβολές για προσαρμογή θέρμανσης (a) προσαρμογή των σπειρών (b) μεταβολής σύζευξης πηνίου- αντικειμένου.

### 3.4.6 Βασικοί τύποι πηνίων.

Διάκριση όσο αφορά την μορφή των πηνίων μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους μια πρώτη προσέγγιση είναι ο διαχωρισμός τους με βάση το πλήθος των αντικειμένων που θερμαίνουν. Όταν το πηνίο θερμαίνει μόνο ένα αντικείμενο είναι «μιας θέσης πηνίο- single-place coil». Όταν το πηνίο θερμαίνει περισσότερα από ένα αντικείμενα είναι «πολλών θέσεων πηνίο- multi-place coil». Ανάλογα με τον αριθμό των αντικειμένων που θερμαίνει μπορεί να είναι δύο θέσεων, τριών θέσεων κ. ο. κ .

Μια άλλη διάκριση είναι με βάση το πλήθος των σπειρών. Αν το πηνίο αποτελείται από μια σπείρα χαρακτηρίζεται ως «μιας σπείρας πηνίο – single-turn coil», εάν αποτελείται από περισσότερες σπείρες τότε ονομάζεται «πολλών σπειρών πηνίο – multi-turns coil».

Άλλοι τρόποι διάκρισης των πηνίων είναι η μορφή που έχει το πηνίο (θα μελετηθεί εκτενέστερα παρακάτω- παράγραφος 3.4.6.2), ο τρόπος δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου (μελετήθηκε στην παράγραφο 3.4.2), η εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιείται κ.α. Πολλές φορές ένα πηνίο μπορεί να τηρεί τις προϋποθέσεις για να ενταχθεί σε περισσότερες από μια κατηγορίες. Πχ το πηνίο πεταλούδα εκτός από την κατηγορία μορφή μπορεί να ενταχθεί και στην κατηγορία των πηνίων εγκάρσιας ροής.

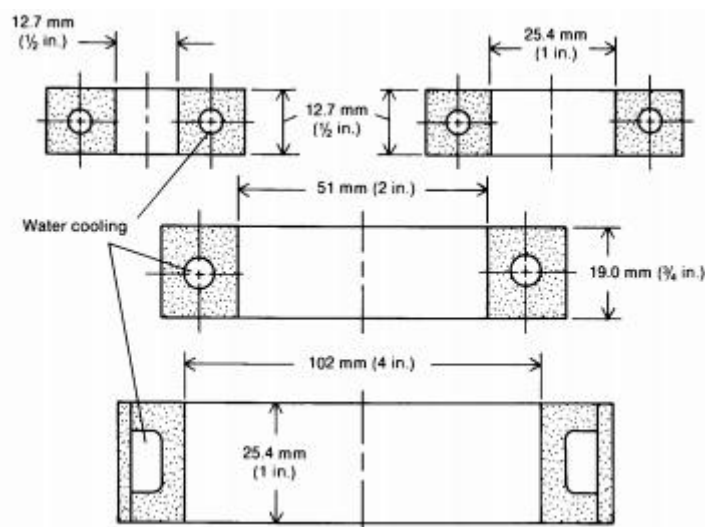
### 3.4.6.1 Πηνία πολλών σπειρών έναντι πηνίων μιας σπείρας και ομοιομορφία μαγνητικού πεδίου.

Οι απαιτήσεις για ομοιόμορφη θέρμανση και το μήκος του πηνίου είναι οι δύο βασικοί παράμετροι που καθορίζουν την επιλογή ανάμεσα σε πηνίο με πολλές σπείρες ή πηνίο μιας σπείρας. Ένα πηνίο πολλών σπειρών με σωστή και ίση απόσταση μεταξύ των σπειρών και καλή σύζευξη με το αντικείμενο προς θέρμανσης μπορεί να αναπτύξει ομοιόμορφη θέρμανση. Παρόμοια ομοιομορφία μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση της απόστασης μεταξύ πηνίου εργασίας και αντικειμένου προς θέρμανση έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο κάθε σπείρας να διασταυρωθεί με αυτά που αναπτύσσονται δίπλα του. Ωστόσο, αυτή η μεταβολή μειώνει την μεταφορά θερμότητας. Όπου, μικροί ρυθμοί θέρμανσης απαιτούνται, για παράδειγμα στην συνεχή θέρμανση, η μεταβολή αυτή της σύζευξης είναι αποδεκτή. Όταν όμως απαιτούνται μεγάλοι ρυθμοί θέρμανσης δεν επιτρέπεται η αύξηση της απόστασης μεταξύ πηνίου εργασίας και αντικειμένου θέρμανσης.

Παρατηρείται ότι όσο το μήκος του αντικειμένου προς θέρμανση αυξάνεται, γίνεται μετάβαση από το πηνίο μιας σπείρας στο πηνίο πολλών σπειρών. Και καθώς, το μήκος του αντικειμένου αυξάνεται, αυξάνεται ο αριθμός των σπειρών που απαιτούνται.

Όταν το μήκος του πηνίου εργασίας υπερβεί 4 στις 8 φορές την διάμετρο του, η ομοιόμορφη θέρμανση με υψηλές πυκνότητες ισχύος είναι δύσκολη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μίας σπείρας ή πολλών σπειρών πηνία, τα οποία μπορούν να σαρώσουν το μήκος του αντικειμένου προς θέρμανση προτιμώνται. Τα πηνία πολλών σπειρών, γενικά, βελτιώνουν την ικανότητα μεταφοράς ενέργειας. Τα πηνία μιας σπείρας είναι επίσης αποτελεσματικά για στενές ζώνες- λωρίδες θερμότητας που είναι σε συμφωνία με την διάμετρο του αντικειμένου προς θέρμανση.

Η σχέση μεταξύ της διαμέτρου και του βέλτιστου ενός πηνίου μιας σπείρας ποικίλει κάπως με το μέγεθος. Ένα μικρό πηνίο μπορεί να φτιαχτεί με ύψος ίσο με την διάμετρο του επειδή το ρεύμα είναι συγκεντρωμένο σε μια μικρή περιοχή. Σε μεγαλύτερο πηνίο, το ύψος δεν πρέπει να υπερβαίνει το μισό της διαμέτρου. Καθώς το άνοιγμα του πηνίου αυξάνεται, ο ρυθμός μειώνεται πχ ένα 5.1 cm ID πηνίο πρέπει να έχει 1.91 cm μέγιστο ύψος και ένα 10.2 cm ID πηνίο πρέπει να έχει 2.5 cm μέγιστο ύψος.



Εικόνα 3.17: Τυπικές αναλογίες για διάφορα μιας-σπείρας πηνία.

### **3.4.6.2 Μορφή.**

- Σωληνοειδή κυκλικά πηνία

Είναι τα πηνία με τον μεγαλύτερο συντελεστή σύζευξης και χρησιμοποιούνται σε τυπικές εφαρμογές επαγωγικής θέρμανσης, όπως την θέρμανση της εξωτερικής πλευράς του αντικειμένου προς θέρμανση. Ο αριθμός των σπειρών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της απαιτούμενης ισχύος για την θέρμανση του αντικειμένου, τις απαιτήσεις της διάταξης θέρμανσης και τις απαιτήσεις της διαδικασίας. Αντικείμενα προς θέρμανση με υψηλές απαιτήσεις παραγωγής πυκνότητας ισχύος τείνουν να χρησιμοποιούν μεγαλύτερα πηνία. Με πολλές σπείρες πηνία χρησιμοποιούνται σε ραδιοσυχνότητες, ενώ μιας και δύο σπειρών πηνία χρησιμοποιούνται στις χαμηλές συχνότητες. Τα σωληνοειδή πηνία σχεδιάζονται με ή χωρίς αναπόσπαστο σύστημα σβέσης και επίσης χρησιμοποιούνται στην συνεχή σκλήρυνση. Πηνία τέτοιου τύπου φαίνονται στις παρακάτω εικόνες που ακολουθούν.

- Κανάλι ή φρουκέτα

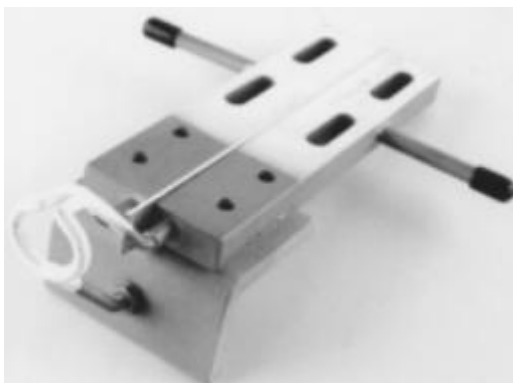
Αυτό το είδος πηνίου στηρίζεται στο σωληνοειδές πηνίο, μόνο που είναι επίπεδο και έχει επιμηκυνθεί. Τα περισσότερα κανάλια πηνία είναι μιας σπείρας. Αντικείμενα προς θέρμανση μπορούν να τοποθετηθούν είτε κάθετα είτε κατά μήκος του πηνίου. Όταν τα άκρα είναι κλειστά σαν καπάκια. Αυτό το είδος πηνίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θερμάνει δίσκους. Όταν το αντικείμενο προς εργασία τοποθετηθεί οριζόντια, τα στρογγυλά τμήματα περιστρέφονται και θερμαίνονται με στιγμιαία θέρμανση. Αντικείμενα προς θέρμανση που έχουν αιχμές, όπως λεπίδες μπορούν να ζεσταθούν με αυτά τα πηνία.



**Εικόνα 3.18: Μιας σπείρας πηνίο**



**Εικόνα 3.19: Μιας σπείρας πηνίο- Στιγμαία Θέρμανση**



**Εικόνα 3.20: Μιας σπείρας πηνίο- Υψηλών**



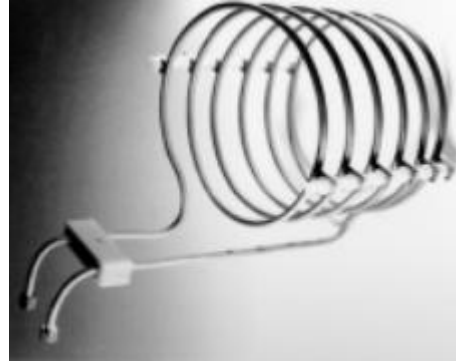
**Εικόνα 3.21: Μιας σπείρας πηνίο- Συνεχή**

### συχνοτήτων

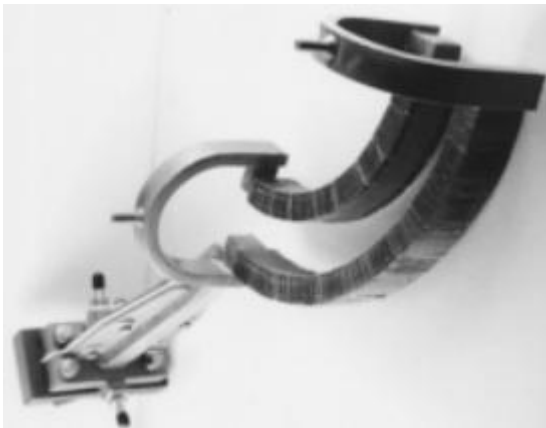


Εικόνα 3.22: Δύο σπειρών πηνίο

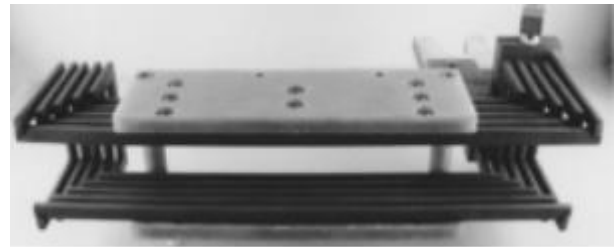
### Θέρμανση



Εικόνα 3.23: Πολλών σπειρών πηνίο- Υψηλών συχνοτήτων



Εικόνα 3.24 : Κυρτό πηνίο τύπου καναλιού



Εικόνα 3.25: Πολλών σπειρών πηνίο τύπου καναλιού

- Εσωτερικά πηνία

Μιας ή πολλών σπειρών πηνία τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την θέρμανση του εσωτερικού τμήματος του αντικειμένου προς θέρμανση. Τα πηνία αυτού του είδους τείνουν να έχουν τον μικρότερο συντελεστή σύζευξης, όμως η χρήση συγκεντρωτών βοηθά στην αύξηση του μαγνητικού πεδίου σημαντικά.



Εικόνα 3.26: Πολλών σπειρών εσωτερικό πηνίο



Εικόνα 3.27: Πολλών τετραγωνικών σπειρών εσωτερικό πηνίο

- Πηνίο τηγανίτα

Είναι κουλουριασμένα πηνία με ένα κυκλικό τρόπο, ο οποίος μοιάζει μάτι κουζίνας και αποτελούν στρογγυλές ή ορθογώνιες επίπεδες επιφάνειες θέρμανσης. Μπορούν να ζεστάνουν τις αιχμές- άκρες ενός λεπτού δίσκου. Τα πηνία τηγανίτες μπορούν να κουλουριαστούν έτσι ώστε οι συγκεντρωμένες σπείρες να δημιουργήσουν μία απόλυτα σφαιρική διάταξη με το κέντρο του να επιμηκύνεται προς τα πάνω.

- Πηνίο πεταλούδα

Η εικόνα 3.28 δείχνει ένα παράδειγμα πηνίου πεταλούδας. Αυτό είναι κουλουριασμένο με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε, στις εξωτερικές κάθετες σπείρες, οι οποίες παράγουν την θερμότητα, η ροή ρεύματος να έχει την ίδια κατεύθυνση. Αυτό το είδος πηνίου, είναι πηνίο τύπου εγκάρσιας ροής και χρησιμοποιείται στην θέρμανση επίπεδων και λεπτών εγκάρσιων τομών.



**Εικόνα 3.28: Πηνίο πεταλούδα**

#### **3.4.7 Επιλογή σωλήνα- πηνίου.**

Δύο από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή του σωλήνα-επαγωγέα είναι οι απώλειες που αναπτύσσονται στο πηνίο εργασίας και το επιδερμικό φαινόμενο.

Απώλειες για τον σωλήνα- επαγωγέα δεν αποτελούν μονάχα οι απώλειες που αναπτύσσονται εξαιτίας της αντίστασης του ( $I^2 \times R$ ). Οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας εφόσον η αντίσταση αυξάνεται. Το πηνίο εργασίας περιβάλλει το αντικείμενο προς θέρμανση και επομένως απορροφά ακτινοβολία και θερμική ενέργεια από το αντικείμενο προς θέρμανση, όταν αυτό θερμαίνεται. Ο σωλήνας- επαγωγέας, πρέπει να επιλεχτεί έτσι ώστε να μπορεί να αποβάλει όλη αυτή την θερμότητα που δημιουργεί τις παραπάνω απώλειες.

Το επιδερμικό φαινόμενο εξαρτάται από την συχνότητα λειτουργίας και την ειδική αντίσταση του υλικού. Καθορίζει το πάχος του σωλήνα και το ελάχιστο πάχος σωλήνα ισοδυναμεί με το διπλάσιο του βάθους διείσδυσης. Προτεινόμενα πάχη σωλήνων φαίνονται στον πίνακα 3.3. Συχνά όμως, επιλέγεται πάχος σωλήνα μικρότερο από το γινόμενο που αναφέρθηκε προηγουμένα.



Frequency	Theoretical wall thickness (= 2 X reference depth (a), mm (in.))	Typical wall thickness available, mm (in.)	Minimum tube diameter (b), mm (in.)
60 Hz	16.80 (0.662)	14.00 (0.550)	42.00 (1.655)
180 Hz	9.70 (0.382)	8.13 (0.320)	24.30(0.955)
540 Hz	5.59 (0.220)	4.67 (0.184)	14.00 (0.550)
1 kHz	4.11 (0.162)	3.43 (0.135)	10.30 (0.405)
3 kHz	2.39 (0.094)	1.98 (0.078)	5.97 (0.235)
10 kHz	1.32 (0.052)	1.07 (0.042)	3.30 (0.130)
450 kHz	0.15 (0.006)	0.89 (0.035)	0.38 (0.015)
1 MHz	0.08 (0.003)	0.89 (0.035)	0.19 (0.0075)

(a) Resistivity of copper assumed to be  $1.67 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  ( $0.66 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{in.}$ ). (b) Tube ID requirements for adequate cooling-water flow should also be considered.

**Πίνακας 3.3: Επιλογή σωλήνα για επαγωγικά πηνία**

### Διαμόρφωση Πηνίου

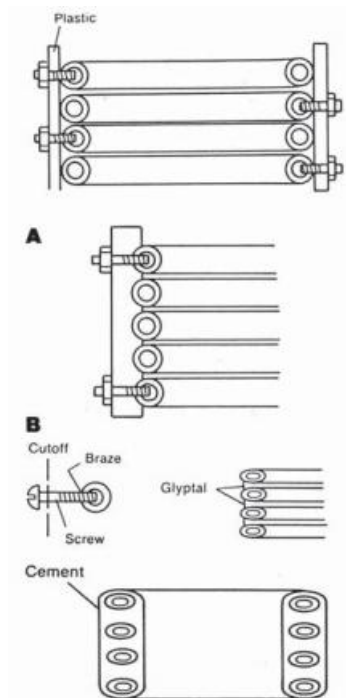
Στην κατασκευή χάλκινων πηνίων πρέπει να σημειωθεί ότι ο χαλκός σκληραίνει με την αλλαγή του σχήματος του- παραμόρφωση του. Επομένως, πολύ κατασκευαστές πραγματοποιούν ανόπτηση στον σωλήνα κάθε λίγες στροφές για να εκτονώσουν αυτή την κατάσταση, με την θέρμανση του σωλήνα μέχρι να κοκκινίσει και έπειτα την γρήγορη σβέση στο νερό. Αυτή η μεσαία ανόπτηση προστατεύει τον σωλήνα από ρωγμές κατά την κατασκευή.

Σε πολλές εργασίες διαμόρφωσης πηνίου, είναι επιθυμητό το γέμισμα του πηνίου με άμμο ή αλάτι έτσι ώστε να αποκλειστεί η περίπτωση καταρροής του σωλήνα. Επιπλέον, υπάρχουν πολλά κράματα με θερμοκρασία τήξης κάτω από τους  $100^\circ\text{C}$ , που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί για αλάτι ή άμμο. Όταν το πηνίο ολοκληρωθεί, βυθίζεται σε βραστό νερό. Το κράμα, τότε, ρέει έξω από το πηνίο και μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί. Με οποιαδήποτε από αυτές τις τεχνικές, ο σωλήνας δρα σαν συμπαγή ράβδο κατά την διαμόρφωση και μπορεί απλά να καθαριστεί έπειτα.

### **3.4.8 Στηρίγματα πηνίου.**

Επειδή ηλεκτρικό ρεύμα ρέει τόσο στο αντικείμενο προς θέρμανση όσο και στο πηνίο, μαγνητεγερτικές δυνάμεις αναπτύσσονται μεταξύ τους. Τα μεγέθη των δυνάμεων αυτών εξαρτώνται από τα μεγέθη των ρευμάτων. Εάν είναι επαρκώς μεγάλα, οι δυνάμεις ίσως προκαλέσουν κίνηση του αντικειμένου προς το πηνίο εργασίας. Εάν, όμως, το αντικείμενο προς θέρμανση έχει μεγάλη μάζα, το πηνίο θα τείνει να κινηθεί προς το αντικείμενο. Οι σπείρες, επίσης, ίσως τείνουν να κινηθούν πιο κοντά η μια προς την άλλη. Είναι σημαντικό λοιπόν, οι σπείρες να στηριχτούν κατάλληλα για να αποφευχθεί κίνηση και πιθανή έλξη σπείρας με σπείρα. Επιπλέον, η κίνηση του πηνίου προς το αντικείμενο προς θέρμανση και το αντίστροφο πρέπει να αποφευχθεί, έτσι ώστε να εμποδιστεί η δημιουργία ανεπιθύμητων αλλαγών στην θέρμανση του αντικειμένου.

Τυπικές τεχνικές στήριξης εμφανίζονται στην εικόνα 3.30. Χάλκινες βίδες στηρίζουν μια παρά μια τις σπείρες. Αυτές οι βίδες προστατεύονται με μονωτικό υλικό, το οποίο ταυτόχρονα τις κρατάει σε συγκεκριμένη απόσταση. Στην εικόνα 3.30(A) το μονωτικό υλικό έχει το περίγραμμα για να συγκρατεί τις σπείρες σχετικά κοντά την μια με την άλλη, ενώ στις ακριανές σπείρες έχουν τοποθετηθεί βίδες. Το μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται για την στήριξη πρέπει να πληρεί τα κριτήρια σχεδιασμού του πηνίου. Επιπρόσθετα, πρέπει να είναι ικανό να αντιστέκεται στην θερμότητα που εκπέμπει το αντικείμενο προς θέρμανση.

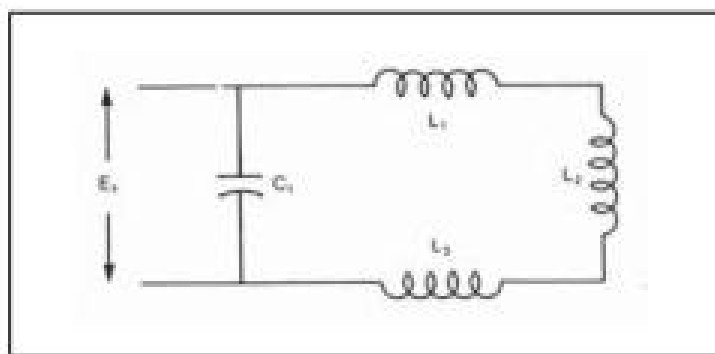


Εικόνα 3.30: Τεχνικές στήριξης σπειρών πηνίου

### 3.4.9 Προϋπόθεσης Σχεδιασμού Άκρων Πηνίου.

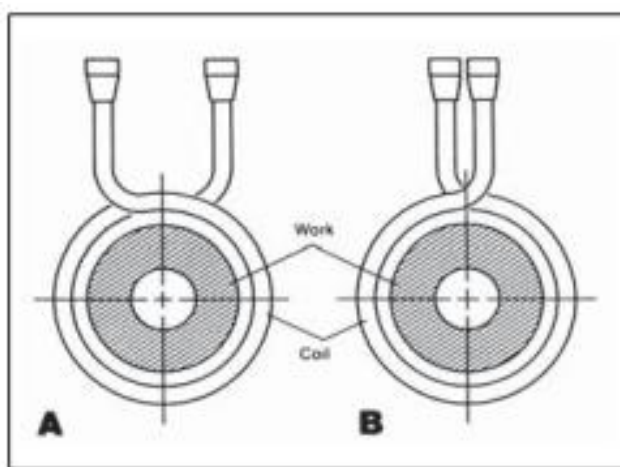
Όλα τα πηνία αναπαριστούν μια επαγωγή σε ένα κύκλωμα. Ωστόσο, στην πράξη, η αναλογία του πηνίου ίσως είναι στην πραγματικότητα μια μικρή αναλογία της συνολικής επαγωγής του κυκλώματος. Μεταξύ των ακροδεκτών της εξόδου του αντιστροφέα ή του κυκλώματος σύνδεσης αντιστροφέα και του πηνίου, ίσως υπάρχει αξιόλογη απόσταση. Σε κάθε περίπτωση, κάποια απόσταση υπάρχει ανάμεσα στο ενεργό πηνίο και τους ακροδέκτες του κυκλώματος σύνδεσης. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των άκρων του πηνίου μπορεί να παίξει σημαντικό παράγοντα στο υπόλοιπο κύκλωμα.

Στην καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των άκρων του πηνίου θα βοηθήσει η εικόνα 3.31. Η επαγωγή του πηνίου αναπαριστάται με το σύμβολο  $L_2$ , κάθε άκρο του πηνίου, που συνδέεται με τον πυκνωτή, έχει την δική του επαγωγή και συμβολίζεται με  $L_1$  και  $L_3$  αντίστοιχα. Εάν εφαρμοστεί τάση στα άκρα των επαγωγών αυτών, τότε κάποια πτώση τάσης εμφανίζεται στα άκρα κάθε μιας. Εάν η επαγωγή του πηνίου  $L_2$  είναι κατά προσέγγιση 10 φορές μεγαλύτερη της συνολικής επαγωγής των άκρων ή μεγαλύτερη, παρουσιάζεται 10% πτώση τάσης στα άκρα του πηνίου. Απώλειες μικρότερες από αυτό το ποσοστό θεωρούνται αμελητέες και μπορούν να παραληφθούν.

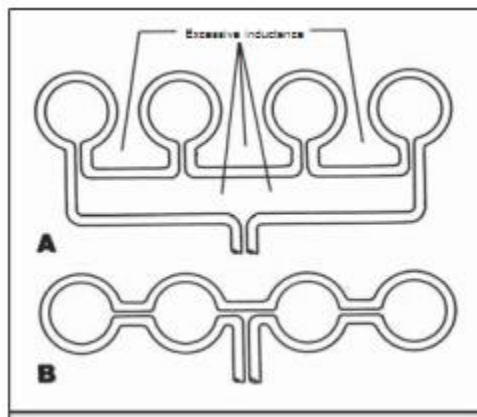


**Εικόνα 3.31:** Κυκλωματικό διάγραμμα με τις επαγωγές των άκρων του πηνίου και την επαγωγή του πηνίου

Μερικά πηνία έχουν πολλές σπείρες, μεγάλη διατομή και επομένως μεγάλη επαγωγή. Για αυτό, οι επαγωγές των άκρων του πηνίου είναι συγκριτικά μικρές. Καθώς η συχνότητα αυξάνεται, τα πηνία γίνονται μικρότερα σε μέγεθος, και επαγωγή και η επαγωγική τους εμπέδηση μειώνονται. Όσο η απόσταση του κυκλώματος σύνδεσης αυξάνεται, οι επαγωγές των άκρων μπορούν να γίνουν σημαντικές- κρίσιμες. Στις εικόνες 3.32 και 3.33 απεικονίζονται τα αποτελέσματα του σχεδιασμού του πηνίου. Στην εικόνα 3.32(A) φαίνονται τα άκρα του πηνίου να έχουν μια απόσταση. Ο χώρος ανάμεσα στα άκρα αναπαριστά μια επαγωγή σχεδόν ίση με την επαγωγή του πηνίου. Επομένως, το κύριο μέρος της τάσης δεν θα εμφανιστεί στην περιοχή θέρμανσης του αντικειμένου. Καλύτερος σχεδιασμός των άκρων παρουσιάζεται στην εικόνα 3.32(B), όπου το κενό μεταξύ των άκρων έχει ελαχιστοποιηθεί και επομένως, βελτιώνεται η ικανότητα θέρμανσης. Στην εικόνα 3.33 παρουσιάζεται επίσης ένα πηνίο μιας σπείρας, πολλών θέσεων. Στην πρώτη περίπτωση ο σχεδιασμός δεν είναι επιτυχής, ενώ στην δεύτερη περίπτωση βελτιώνεται σημαντικά.



**Εικόνα 3.32:** Επίδραση της απόστασης των άκρων του πηνίου, μικρότερη απόσταση μεταξύ τους, μικρότερη επαγωγή και επομένως λιγότερες απώλειες



Εικόνα 3.33: Κατασκευή άκρων πηνίου πολλών θέσεων

Τυπικός σχεδιασμός των άκρων του πηνίου.

Τα άκρα του πηνίου σχεδιάζονται τυπικά κάνοντας χρήση πιάτων ή σωλήνων που ψύχονται με νερό.

Όταν η τάση είναι κάτω από 800V, η διάταξη χαμηλής επαγωγής, γνωστή ως «ψαρό-ουρά», αξιοποιείται. Η «ψαρό-ουρά» είναι ένα ζευγάρι παράλληλων χάλκινων πιάτων, τα οποία ψύχονται με νερό για να διατηρήσουν χαμηλή αντίσταση. Είναι τοποθετημένες οι σωλήνες τους παράλληλα και χωρίζονται φυσικά με τον αέρα σαν μονωτή ή κρατιούνται μαζί από πλαστικές βίδες και παξιμάδια με τεφλόν ή παρόμοιο υλικό.

Καθώς, η επαγωγή του πηνίου αυξάνεται, με την αύξηση του αριθμού των σπειρών ή με την αύξηση της διαμέτρου του πηνίου, το μήκος των άκρων γίνεται λιγότερο κρίσιμο και η χρήση σκέτων χάλκινων σωλήνων γίνεται πιο πρακτική. Ωστόσο, μεγαλύτερα πηνία απαιτούν μεγαλύτερη τάση στους ακροδέκτες. Αυτά τα άκρα πρέπει να κρατηθούν όσο πιο κοντά, είναι δυνατό, το ένα με το άλλο ενώ ταυτόχρονα να διατηρούν επαρκή απόσταση για την αποφυγή δημιουργίας τόξου. Ωστόσο, η καλή τακτική υπαγορεύει ότι τα άκρα του πηνίου πρέπει να έχουν το ελάχιστο μήκος και τα μεγέθη των σωλήνων που χρησιμοποιούνται να συμφωνούν με τις απαιτήσεις που δημιουργούν η συχνότητα, το ρεύμα και η ψύξη.

[5][17][18][19][20][21]

### **3.5 Βαθμός Απόδοσης.**

Ο βαθμός απόδοσης σε ένα Σύστημα Επαγωγικής Θέρμανσης καθορίζεται από τα επιμέρους τμήματα που την απαρτίζουν. Τον αντιστροφέα, το σύστημα σύνδεσης, το κύκλωμα συντονισμού, το πηνίο εργασίας, το αντικείμενο προς θέρμανση και το σύστημα ψύξης. Το κάθε ένα από τα παραπάνω επηρεάζει και διαμορφώνει το ποσό ενέργειας που τελικά θα μεταφερθεί στο αντικείμενο προς θέρμανση.

Για παράδειγμα, το είδος των ημιαγωγικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στον αντιστροφέα, εκτός από το εύρος λειτουργίας, επηρεάζει και τον βαθμό απόδοσης ή ικανότητα του συστήματος επαγωγικής θέρμανσης. Πχ οι αντιστροφείς με θυρήστορ έχουν απόδοση 90% έως 97%, οι αντιστροφείς με τρανζίστορ 75% έως 90% και οι

αντιστροφείς με καθοδικό σωλήνα απόδοση 55% έως 70%. Ευτυχώς, στις μέρες μας, η χρήση των Mosfet και των IGBT μας προσφέρει σχεδόν 100% απόδοση.

Τόσο το σύστημα σύνδεσης (matching system), όσο και το κύκλωμα συντονισμού (tuning system), εισάγουν απώλειες, καθώς τα παθητικά στοιχεία από τα οποία αποτελούνται περιέχουν αντιστάσεις. Επίσης, αν ο λόγος του Μ/ΣΧ δεν παράγει ακριβώς την επιθυμητή τιμή ρεύματος και οι τιμές πηνίων και πυκνωτών είναι διαφορετικές- λόγω τυποποίησης, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ισχύς εξόδου της διάταξης δεν θα είναι αυτή που προσδοκάται.

Ο βαθμός απόδοσης κατά την Επαγωγική Διαδικασία καθορίζεται από δύο επιμέρους παράγοντες, την ικανότητα σύζευξης και την ηλεκτρική ικανότητα του συστήματος. Η πρώτη ορίζεται ως:

$$n = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{l_c}{n_w \times \mu_w}}} \quad 3.3$$

Όπου  $l_c$ : η ειδική αντίσταση του πηνίου εργασίας [ $\Omega \cdot m$ ].

$n_w$ : η ειδική αντίσταση του αντικείμενου προς θέρμανση [ $\Omega \cdot m$ ].

$\mu_w$  η μαγνητική διαπερατότητα του αντικείμενου προς θέρμανση.

Επίσης η ικανότητα σύζευξης μπορεί να βρεθεί από τον Πίνακα 3.4, που ακολουθεί.

Type of coil	Coupling efficiency at frequency of:			
	10 Hz		450 kHz	
	Magnetic steel	Other metals	Magnetic steel	Other metals
Helical around workpiece	0.75	0.50	0.80	0.60
Pancake	0.35	0.25	0.50	0.30
Hairpin	0.45	0.30	0.60	0.40
One turn around workpiece	0.60	0.40	0.70	0.50
Channel	0.65	0.45	0.70	0.50
Internal	0.40	0.20	0.50	0.25

**Πίνακας 3.4: Ικανότητα σύζευξης ανάλογα με την μορφή του πηνίου εργασίας συναρτήσει της συχνότητας f.**

Ενώ η ηλεκτρική ικανότητα ορίζεται από την σχέση:

$$n = \frac{P}{P + P_i} \quad 3.4$$

Όπου P: η ισχύς που εισέρχεται στο αντικείμενο προς θέρμανση [W].

$P_i$ : η ισχύς που καταναλώνεται στο πηνίο εργασίας [W].

Η σχέση 3.4 μπορεί να μετασχηματιστεί και έτσι προκύπτει η σχέση:

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R_C} \quad 3.5$$

Όπου  $R_L$ : η ισοδύναμη αντίσταση του αντικείμενου προς θέρμανση [ $\Omega$ ].

$R_C$ : η αντίσταση του πηνίου εργασίας [ $\Omega$ ].

Η σχέση 3.5 υποδηλώνει, ότι για δεδομένη ισοδύναμη αντίσταση αντικείμενου προς θέρμανση, η ικανότητα  $\eta$  αυξάνεται καθώς μειώνεται η αντίσταση του πηνίου εργασίας. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ο χαλκός, για την κατασκευή του πηνίου εργασίας, εξαιτίας την πολύ χαμηλής ειδικής του αντίστασης. Από την άλλη πλευρά, για δεδομένη αντίσταση πηνίου εργασίας, αύξηση της ικανότητας προκύπτει με αύξηση της αντίστασης του αντικείμενου προς θέρμανση. Με άλλα λόγια είναι «βολικό» το αντικείμενο προς θέρμανση να έχει μεγάλη ισοδύναμη αντίσταση. [17][27][28]

### 3.6 Κύκλωμα Αντιστάθμισης- Συντονισμού.

Όταν επιλέγεται το κύκλωμα αντιστάθμισης να αποτελείται από την ισοδύναμη αυτεπαγωγή  $L_{eq}$  του πηνίου εργασίας και του αντικείμενου προς θέρμανση και έναν πυκνωτή σε σειρά ή παράλληλα (όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.7) τότε με γνωστές τις τιμές των  $L_{eq}$  και της συχνότητας συντονισμού είναι εύκολος ο υπολογισμός της τιμής του πυκνωτή που απαιτείται για την επίτευξη του συντονισμού. Έτσι λύνοντας την σχέση 3.6 ως προς  $C$  προκύπτει η απαιτούμενη τιμή του πυκνωτή (σχέση 3.7).

$$f_o = \frac{1}{2 \times \sqrt{LC}} \quad 3.6$$

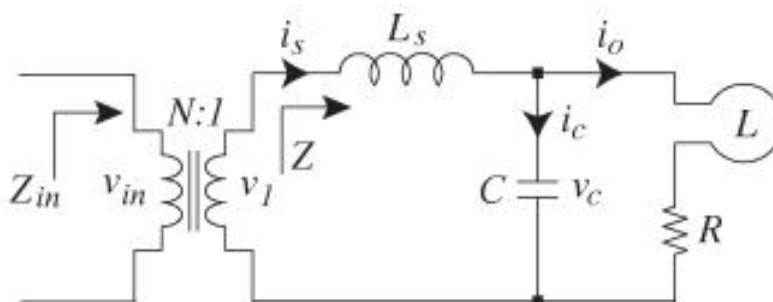
Όπου  $f_o$ : η συχνότητα συντονισμού [Hz].

$L$ : η ισοδύναμη αυτεπαγωγή του πηνίου εργασίας και του αντικείμενου προς θέρμανση [H].

$C$ : ο πυκνωτής [F].

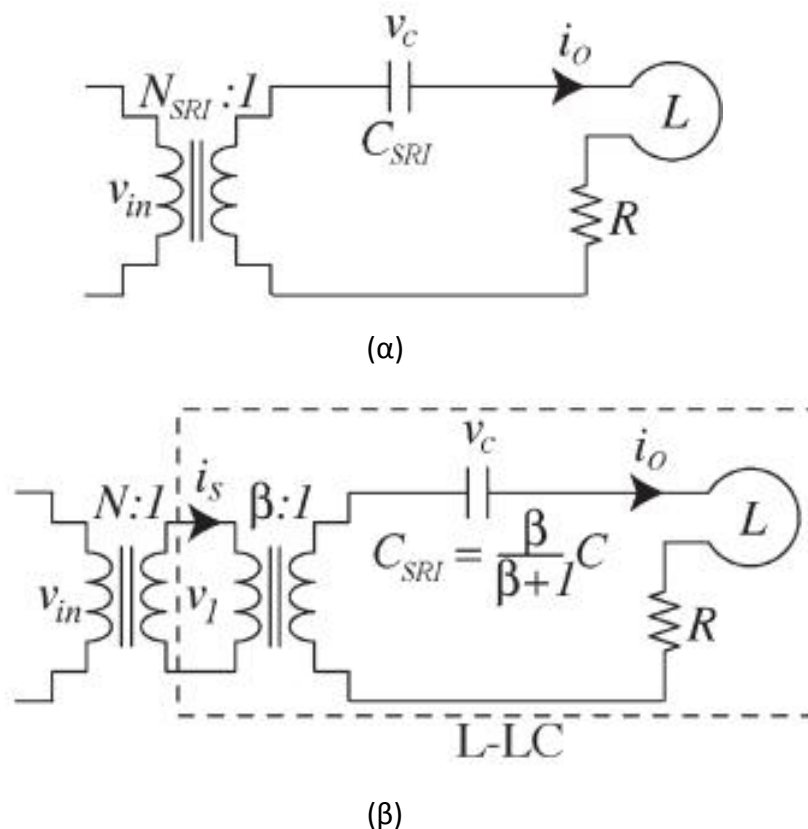
$$C = \left( \frac{1}{2 \times f_o} \right)^2 \times \left( \frac{1}{L} \right) \quad 3.7$$

Τα πράγματα γίνονται πιο σύνθετα όταν επιλέγεται το κύκλωμα αντιστάθμισης συντονισμού να είναι της μορφής LL-C.



**Εικόνα 3.34: LL-C Ταλαντωτής με μετασχηματιστή απομόνωσης και πηνίο εργασίας με αντικείμενο προς θέρμανση σε σειρά.**

Έχει αποδειχθεί ότι το ισοδύναμο κύκλωμα της Επαγωγικής διάταξης με LL-C ταλαντωτή, στην συχνότητα συντονισμού  $f_o$ , συμπεριφέρεται ακριβώς όπως το ισοδύναμο κύκλωμα της Επαγωγικής διάταξης με πυκνωτή σε σειρά. Για τον λόγο αυτό, αν είναι γνωστή η τιμή του πυκνωτή σε σειρά, μπορούν να υπολογιστούν τα στοιχεία του LL-C συστήματος. Δεν πρέπει, βέβαια, να αμελείται το γεγονός ότι, το σύστημα LL-C δρα σαν ένας ενισχυτής ρεύματος με κέρδος  $\beta$  και ότι το ρεύμα καθυστερεί της τάσης. Έτσι προσομοιώνεται όπως ακριβώς το ισοδύναμο κύκλωμα της Επαγωγικής διάταξης με πυκνωτή σε σειρά μαζί με ένα Μ/ΣΧ με λόγο σπειρών  $\beta:1$ , όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



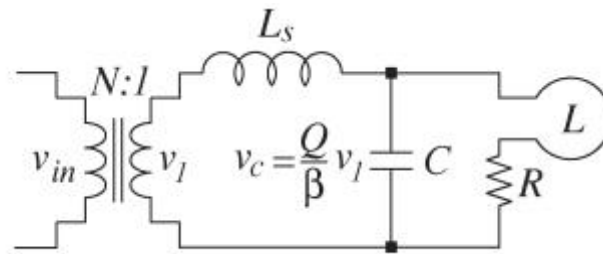
**Εικόνα 3.35: (α) Ταλαντωτής με πυκνωτή σε σειρά και μετασχηματιστή απομόνωσης (β) αντιστοίχιση LL-C Ταλαντωτής με ταλαντωτή με πυκνωτή σε σειρά.**

Οι προδιαγραφές για τον σχεδιασμό του κυκλώματος συντονισμού είναι οι εξής: η ισχύς εξόδου του πηνίου εργασίας  $P_{out}$ , η συχνότητα λειτουργίας  $f_o$  (η οποία εξαρτάται από το βάθος διεύθυνσης που επιθυμείται), την αυτεπαγωγή του πηνίου εργασίας  $L_{eq}$  και τον συντελεστή ποιότητας  $Q$ . Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και την τάση εξόδου του αντιστροφέα μπορεί κανείς να υπολογίσει τα τις τιμές των στοιχείων του ταλαντωτή LL-C.

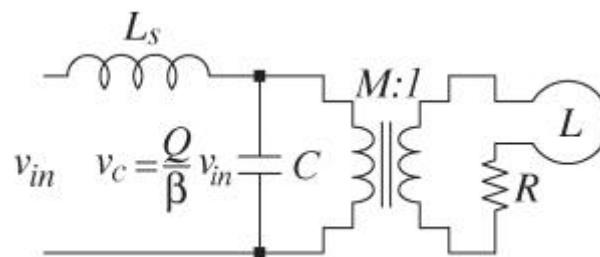
Ο τρόπος σύνδεσης του κυκλώματος συντονισμού- αντιστάθμισης με την έξοδο του αντιστροφέα και το πηνίο εργασίας ποικίλει. Συνήθως, ανάμεσα στην έξοδο του αντιστροφέα και το κύκλωμα συντονισμού παρεμβάλλεται ένας Μ/ΣΧ. Ο Μ/ΣΧ αυτός, ονομάζεται «ενεργός Μ/ΣΧ» και προσαρμόζει την τιμή της αντίστασης του ταλαντωτή, έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή ισχύος. Κάποιες άλλες φορές ένας Μ/ΣΧ, που ονομάζεται «άεργος Μ/ΣΧ» παρεμβάλλεται ανάμεσα στον LL-C ταλαντωτή και το πηνίο εργασίας. Σκοπός του είναι η 'αύξηση' της τιμής της αυτεπαγωγής του πηνίου εργασίας,

έτσι ώστε η τιμή του πυκνωτή που απαιτείται να μειωθεί. Ενώ σε άλλες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η χρήση και των δύο ειδών Μ/ΣΧ.

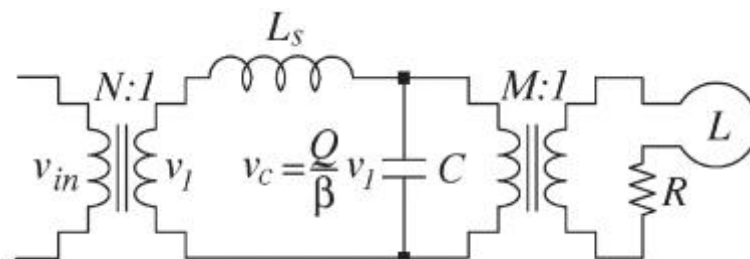
Η συχνότητα λειτουργίας και η ισχύς εξόδου είναι οι δύο παράγοντες που καθορίζουν ποιο είδος Μ/ΣΧ θα χρησιμοποιηθεί. Για υψηλές συχνότητες (>100KHz) και για οποιαδήποτε ισχύ απαιτείται η χρήση του «ενεργού Μ/ΣΧ». Για μικρές συχνότητες (<100KHz) και υψηλές απαιτήσεις ισχύος (>100K) γίνεται χρήση του «άεργου Μ/ΣΧ». Ενώ, για μικρές συχνότητες (<100KHz) και μικρές απαιτήσεις ισχύος χρησιμοποιούνται και τα δύο είδη Μ/ΣΧ. Στην εικόνα 3.36 παρουσιάζονται οι τρεις τοπολογίες που περιγράφηκαν παραπάνω. Αξίζει να σημειωθεί ότι ανάλογα με την τοπολογία που χρησιμοποιείται οι παράμετροι και οι σχέσεις για τον υπολογισμό των στοιχείων του LL-C ταλαντωτή αλλάζουν. Με βάση λοιπόν, την συχνότητα λειτουργίας και την ισχύ εξόδου επιλέγεται η τοπολογία που απαιτείται και οι τιμές  $L_s$  και  $C$  υπολογίζονται με βάση τα άρθρα [30] και [31].



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 3.36: (α) LL-C Ταλαντωτής με «ενεργό Μ/ΣΧ», (β) LL-C Ταλαντωτής με «άεργο Μ/ΣΧ», (γ) LL-C Ταλαντωτής με «ενεργό και άεργο Μ/ΣΧ»,



### **3.7 Αντιστροφέας και Έλεγχος Ισχύος.**

Στην παράγραφο 1.8 έγινε περιγραφή του διακοπτικού αντιστροφέα και στην παράγραφο 2.9 παρουσιάστηκαν κάποιες από τις τοπολογίες που χρησιμοποιούνται στις Διατάξεις Επαγωγικής Θέρμανσης. Στην παρούσα παράγραφο δίνεται μια σύντομη αναφορά του τρόπου ελέγχου της ισχύος που καταλήγει στο πηνίο εργασίας και κατ'επέκταση στο αντικείμενο προς θέρμανση. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο έλεγχος της ισχύος πραγματοποιείται με μεταβολή των χαρακτηριστικών του αντιστροφέα, όπως θα δούμε παρακάτω.

- Μεταβολή της DC τάσης εισόδου του αντιστροφέα.

Η ισχύς στην έξοδο του αντιστροφέα μπορεί να ελαττωθεί με την μείωση της τάσης εισόδου του. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί, όταν η είσοδος του αντιστροφέα είναι ένα μεταβαλλόμενο DC τροφοδοτικό. Πράγμα, που μπορεί να πραγματοποιηθεί, με την χρήση ενός ανορθωτή από θυρήσορ. Η μεταβολή της τάσης εισόδου του αντιστροφέα προσφέρει πλήρη έλεγχο της ισχύος από 0% έως 100%, καθώς η ισχύς που προκύπτει από τον αντιστροφέα είναι κατά προσέγγιση ανάλογη του τετραγώνου της τάσης εισόδου του.

Δεν πρέπει να ξεχνάμε ωστόσο, ότι η ισχύς του πηνίου εργασίας εξαρτάται και από την εμπέδηση που βλέπει στα άκρα του ο αντιστροφέας και η οποία διαμορφώνεται από το αντικείμενο προς θέρμανση, το πηνίο εργασίας, το κύκλωμα συντονισμού και το σύστημα σύνδεσης. Έτσι, εάν απαιτείται ακριβής έλεγχος της ισχύος, πρέπει να μετράται και να συγκρίνεται συνεχώς με την επιθυμητή και μέσω κάποιου κυκλώματος ανατροφοδότησης να διορθώνονται τυχόν αποκλίσεις.

- Μεταβολή του Duty- Cycle.

Η ισχύς εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να μεταβληθεί με μεταβολή του χρόνου αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων του αντιστροφέα. Όταν ο χρόνος αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων καθορίζει την μέση τιμή της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Έτσι, για Duty- Cycle 0%, η τάση εξόδου του αντιστροφέα είναι 0. Μηδενική θα είναι και η ισχύς του αντιστροφέα. Όταν το Duty- Cycle είναι μικρό, τότε από τις διόδους ελεύθερης διέλευσης περνάνε σημαντικά ρεύματα. Για τον λόγο αυτό, η τεχνική μεταβολής του Duty- Cycle, δεν χρησιμοποιείται για υψηλής ισχύος Επαγωγικές Διάταξης.

- Μεταβολή της Συχνότητας λειτουργίας του Αντιστροφέα.

Η ισχύς του πηνίου εργασίας μπορεί να αλλάξει εάν η συχνότητα «φύγει» από την συχνότητα συντονισμού. Όσο πιο μακριά από την συχνότητα συντονισμού είναι η νέα συχνότητα τόσο η άεργος ισχύς του κυκλώματος αυξάνεται και έτσι περιορίζεται η ενεργός ισχύς. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι, η ισχύς μπορεί μόνο να μειωθεί. Ενώ, η μέγιστη τιμή δίνεται κατά τον συντονισμό.

- Μεταβολή της τιμής του πηνίου εργασίας.

Η αλλαγή του πηνίου εργασίας μπορεί να μεταβάλει τόσο το ποσό ισχύος που μεταφέρεται στο αντικείμενο προς θέρμανση, όσο και την συνολική σύνθετη αντίσταση που «βλέπει» ο αντιστροφέας. Μια ενδεχόμενη αλλαγή του πηνίου εργασίας αλλάζει την απαιτούμενη συχνότητα συντονισμού και έχει τα ίδια επακόλουθα με αυτά τις προηγούμενης μεθόδου.

## Κεφάλαιο 4ο : Υπολογισμοί Επαγωγικής Διάταξης.

Πριν την κατασκευή και την εφαρμογή οποιασδήποτε διατάξεις Επαγωγικής Θέρμανσης, οι λεπτομέρειες για τις απαιτήσεις της θέρμανσης πρέπει να καθοριστούν. Ο τύπος της θέρμανσης, ο χρόνος θέρμανσης, το αντικείμενο προς θέρμανση, η μέγιστη θερμοκρασία και ούτω καθεξής. Η επιλογή του εξοπλισμού (συχνότητα, ρυθμός παρεχόμενης ισχύος), ο σχεδιασμός του πηνίου, ο υπολογισμός των στοιχείων του κυκλώματος αντιστάθμισης- συντονισμού και των τιμών εξόδου (τάση, ρεύμα) του αντιστροφέα παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο.

### 4.1 Αντικείμενο προς θέρμανση.

Πρώτος και πιο σημαντικός παράγοντας είναι η επιλογή του αντικειμένου προς θέρμανση. Το δοκίμιο που επιλέγεται είναι μια συμπαγή ράβδος εξωτερικής διαμέτρου 30mm, ύψους 100mm και μάζας 571gr. Η γεωμετρία που επιλέγεται δεν είναι τυχαία: Απλοποιεί τους υπολογισμούς (σε δοκίμια διαφορετικής- σύνθετης γεωμετρίας ο υπολογισμός των παραμέτρων είναι πιο δύσκολος), καθορίζει το σχήμα του πηνίου εργασίας, την μορφή του μαγνητικού πεδίου και, λεπτομέρειες θα δοθούν παρακάτω. Το δοκίμιο είναι κατασκευασμένο από μη μαγνητικό χάλυβα 1040 κατά AISI-SAE.

Το γεγονός ότι είναι μη μαγνητικός μας εξασφαλίζει σχετική μαγνητική διαπερατότητα ίση με την μονάδα  $\mu_r = 1$ .

Η ονομασία του 1040 (με την βοήθεια του Παραρτήματος Α) δίδει τις εξής πληροφορίες:

- Κοινώς χάλυβας
- Χωρίς προσμίξεις
- 0,4% ποσοστό άνθρακα

Από το ποσοστό άνθρακα 0,4% γίνεται αντιληπτό ότι πρόκειται για χάλυβα με μέτρια περιεκτικότητα σε άνθρακα σύμφωνα με την παράγραφο 3.1.1.2 (Κατάταξη των χαλύβων). Το ποσοστό αυτό καθορίζει σύμφωνα με την παράγραφο 3.1.1.4.2 (Επιφανειακές θερμικές κατεργασίες χαλύβων) τον τρόπο σκλήρυνσης- θέρμανσης του αντικειμένου. Ο τρόπος που επιλέγεται είναι η **δια μέσου σκλήρυνση- θέρμανση**. Μια σημαντική διευκρίνιση που πρέπει να γίνει στο σημείο αυτό είναι, ότι σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας δεν είναι η σκλήρυνση του δοκιμίου, αλλά η θέρμανση του μέσω Επαγωγικής Διάταξης. Η εκάστοτε εφαρμογή (σκλήρυνση, βαφή, ανόπτηση κ.α.) ορίζει τον τρόπο υπολογισμού των διαφόρων παραμέτρων πχ βάθος διείσδυσης, συχνότητα, απαιτούμενη ισχύς, σχεδιασμός πηνίου κλπ. Έτσι και εδώ πρέπει να ακολουθηθεί ένα μοντέλο. Γίνεται, λοιπόν, η θεώρηση ότι το δοκίμιο θα υποβληθεί σε σκλήρυνση μέσω επαγωγής. Οπότε λαμβάνονται υπόψη οι προδιαγραφές που απαιτούνται για τον υπολογισμό των διάφορων επιμέρους στοιχείων της Επαγωγικής Διάταξης για δια μέσου σκλήρυνση- θέρμανση. Όμως επειδή, όπως είπαμε και προηγουμένως σκοπός δεν είναι η σκλήρυνση αλλά η θέρμανση του δοκιμίου, δεν ακολουθούνται αυστηρά όλες οι προδιαγραφές που απαιτούνται για την εφαρμογή της μεθόδου της δια μέσου σκλήρυνσης- θέρμανσης (πχ επιθυμητή θερμοκρασία θέρμανσης, χρόνος παραμονής στην επιθυμητή θερμοκρασία, σβέση κλπ).

Όσο αφορά την επιθυμητή θερμοκρασία θέρμανσης επιλέγεται ίση με  $t_{\alpha} = 400^{\circ}\text{C}$ . Η επιλογή οφείλεται στο εύρος θερμοκρασιών που μπορεί να μετρήσει η κάμερα υπερύθρων.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συνοπτικός πίνακας (πίνακας 4.1) με τις βασικές προδιαγραφές του αντικειμένου προς θέρμανση, με την βοήθεια των οποίων γίνονται υπολογισμοί για την συχνότητα  $f$  (Hz), το βάθος διείσδυσης  $\delta$  (mm), την απαιτούμενη ισχύ για την θέρμανση του δοκιμίου στην επιθυμητή θερμοκρασία κλπ.

<b>Προδιαγραφές Αντικειμένου Προς Θέρμανση</b>	
<b>Προδιαγραφή</b>	<b>Τιμή</b>
Υλικό	Χάλυβας 1040
Σχήμα	Κυλινδρικό συμπαγές
Διάμετρος(mm)	30
Μήκος(mm)	100
Αντίσταση ( $\Omega$ m)	$12.7 \times 10^{-8}$ (στους 20 °C) $57.94 \times 10^{-8}$ (στους 400 °C)
Σχετική Μαγνητική Διαπερατότητα	1
Ειδική Θερμότητα (J/Kg °C)	443.3 (στους 25 °C) 605.9 (στους 400 °C)
Πυκνότητα (Kg/m <sup>3</sup> )	8082.1
Θερμοκρασία Τήξης (°C)	1476
Θερμοκρασία Σκλήρυνσης (°C)	843÷890

**Πίνακας 4.1**

Βασικές παράμετροι στην επιλογή της συχνότητας αποτελούν το βάθος διείσδυσης  $\delta$ , ο τρόπος θέρμανσης (έχει ήδη επιλεγεί η δια μέσου θέρμανση), το μέγεθος και η γεωμετρία του αντικειμένου προς θέρμανση.

Στην δια μέσου θέρμανση για στρογγυλή ράβδο, σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 3.2, ισχύει η σχέση :

$$\frac{A}{\delta} = 4 \quad 4.1$$

Όπου A: η διάμετρος του αντικειμένου προς θέρμανση [mm].

$\delta$ : το βάθος διείσδυσης [mm].

Άρα το βάθος διείσδυσης από την παραπάνω σχέση είναι  $\delta_{\theta}=7,5$  mm.

- Επιλογή Συχνότητας.

Ο υπολογισμός της συχνότητας  $f$  γίνεται με δύο τρόπους:

#### A Τρόπος

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζεται η σχέση που συνδέει τον τρόπο θέρμανσης, το βάθος διείσδυσης  $\delta$  και την συχνότητα για την επαγωγική σκλήρυνση του χάλυβα. Για δια μέσου θέρμανση (through hardening) και διατομή δοκιμίου 30mm, η ελάχιστη συχνότητα για να επιτευχθεί το απαραίτητο βάθος διείσδυσης είναι 3KHz.

Θέτοντας όπου  $f = 3\text{KHz}$  στην σχέση 1.19 προκύπτει ότι  $\delta = 6.9\text{mm}$ , κοντά στον θεωρητικό υπολογισμό  $\delta_0 = 7.5\text{mm}$  που έγινε προηγουμένως και σε καμία περίπτωση μεγαλύτερο από αυτό.

Case depth		Diameter		Frequency				
mm	in.	mm	in.	1 kHz	3 kHz	10 kHz	50 kHz	450 kHz
0.38–1.27	0.015–0.050	6.35–25.4	1/4–1	...	...	...	...	Good
1.29–2.54	0.051–0.100	11.11–15.88	7/16–5/8	...	...	Fair	Good	Good
		15.88–25.4	5/8–1	...	...	Good	Good	Good
		25.4–50.8	1–2	...	Fair	Good	Good	Good
		>50.8	>2	Fair	Good	Good	Good	Poor
2.56–5.08	0.101–0.200	19.05–50.8	1–2	...	Fair	Good	Good	Poor
		50.8–101.6	2–4	Fair	Good	Good	Good	Poor
		>101.6	>4	Good	Good	Fair	Good	Poor
5.08–10.0	0.200–0.400	>8	>2	Good	Good	Fair	Poor	Poor
<b>Through hardening</b>								
		1.59–6.35	1/16–1	...	...	...	...	Good
		6.35–12.7	1/4–1/2	...	...	Fair	Fair	Good
		12.7–25.4	1/2–1	...	Fair	Good	Good	Fair
		25.4–50.8	1–2	Fair	Good	Fair	Poor	...
		50.8–76.2	2–3	Good	Good	Poor	...	...
		76.2–152.4	3–6	Good	Poor	Poor	...	...
		>152.4	>6	Poor	Poor	Poor	...	...

Good indicates most efficient frequency. Fair indicates the frequency is less efficient. Poor indicates not a good frequency for this depth. The coil power density must be kept within the recommended ranges. Source: Ref 1

**Πίνακας 4.2 : Επιλογή Συχνότητας**

Από τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όσο η διάμετρος του αντικειμένου αυξάνεται και (ή) το βάθος διείσδυσης αυξάνεται μικρότερες συχνότητες πρέπει να εφαρμοστούν για να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα, τόσο για την δια μέσου όσο και για την επιφανειακή σκλήρυνση. [17]

#### B Τρόπος

Για στρογγυλή ράβδο, η κρίσιμη συχνότητα είναι η συχνότητα στην οποία η διάμετρος της ράβδου είναι κατά προσέγγιση 4 φορές το βάθος διείσδυσης (σχέση 4.1), στην δική μας περίπτωση 7.5mm.

Η κρίσιμη ή ελάχιστη συχνότητα για στρογγυλή ράβδο δίνεται από την σχέση:

$$f_c = 4 \times 10^8 \rho / \mu r d^2 \text{ [Hz]} \quad 4.2$$

Όπου  $\rho$ : η ειδική αντίσταση [ $\Omega \text{ cm}$ ].

$\mu_r$ : σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.

$d$ : η διάμετρος του αντικείμενου προς θέρμανση [ $\text{cm}$ ].

Από τους υπολογισμούς προκύπτει ότι  $f_c = 2387 \text{ H}$  και  $\delta = 7.5 \text{ mm}$ . Άρα για  $f \gg f_c$  το βάθος διείσδυσης  $\delta$  θα αυξηθεί και αυτό δεν είναι επιθυμητό.

Τελικά επιλέγεται  $f = 3 \text{ KHz}$  για την συχνότητα λειτουργίας του Inverter. [27]

Όσο αφορά τώρα την δια μέσου θέρμανση, αν εφαρμοστεί συχνότητα μικρότερη των 3KHz, εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου θα υπάρξει ακύρωση ρευμάτων και έτσι δεν θα προκύψει η επιθυμητή θέρμανση του δοκιμίου. Αν εφαρμοστεί μεγαλύτερη συχνότητα, η παροχή ισχύος θα πρέπει να μειωθεί, έτσι ώστε η θερμότητα να μεταφερθεί από τα εξωτερικά στρώματα του χάλυβα προς τα εσωτερικά. Σε διαφορετική περίπτωση, η επιφάνεια θα υπερθερμανθεί, ίσως αρχίσει να παραμορφώνεται ή και να λιώνει ενώ στο εσωτερικό δεν θα έχουν επιτευχθεί τέτοιες θερμοκρασίες.

- Πυκνότητα ισχύος και χρόνος θέρμανσης.

Ο χρόνος που επιλέγεται για την θέρμανση του δοκιμίου είναι  $t = 120 \text{ sec}$ .

Με την χρήση της σχέσης  $Q = mc\Delta T$  (1.25) υπολογίζουμε την θερμική ενέργεια που είναι απαραίτητη για την θέρμανση του δοκιμίου στους  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  και είναι ίση με  $Q = 131464 \text{ J}$ .

Για χρόνο  $t = 120 \text{ sec}$ , η απαραίτητη ισχύ που πρέπει να προσδοθεί στο δοκίμιο υπολογίζεται και είναι ίση με  $P = 1096 \text{ W}$  και η πυκνότητα ισχύος  $D = 0,001011 \text{ kW/cm}^2$  που πρέπει να δεχτεί.

Η επιλογή του χρόνου  $t = 120 \text{ sec}$  δεν είναι εξακριβωμένο ότι χρησιμοποιείται στην δια μέσου θέρμανση. Η επιλογή είναι καθαρά υποκειμενική.

Αποτελέσματα για Αντικείμενο Προς Θέρμανση		
Προδιαγραφή	Τιμή/ Μέθοδος	
Εφαρμογή	Σκλήρυνση	
Μέθοδος Θέρμανσης	Δια μέσου Θέρμανση	
Τρόπος Θέρμανσης	Ομοιόμορφη	
Χρόνος Θέρμανσης (s)	120	
Ελάχιστη Συχνότητα (Hz)	3000	
Βάθος διείσδυσης (mm)	$\delta_\theta$	$\delta$
	7.5	6.9
Απαιτούμενη Ισχύς (W)	1096	

Πίνακας 4.3

## 4.2 Πηνίο Εργασίας.

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 3, το πηνίο εργασίας είναι συνήθως κατασκευασμένο από χαλκό. Επίσης, όλες η πληροφορίες που σχετίζονται και αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3 (μορφή, σχήμα, αποστάσεις) γίνεται προσπάθεια να αξιοποιηθούν. Παρακάτω ακολουθεί ένας σύντομος πίνακας με τις προδιαγραφές του πηνίου εργασίας, που απαιτούνται για τον τρόπο κατασκευής του.

Προδιαγραφές Πηνίου Εργασίας	
Προδιαγραφή	Τιμή
Υλικό	Χαλκός
Σχήμα-Μορφή	Σωληνοειδές
Αντίσταση ( $\Omega$ m)	$1.7 \times 10^{-8}$ (στους 20 °C)
Σχετική Μαγνητική Διαπερατότητα	1
Θερμοκρασία Τήξης (°C)	1084

Πίνακας 4.4

- Πάχος τοιχώματος αγωγού- επαγωγέα.

Το πάχος του τοιχώματος του επαγωγού υπολογίζεται σύμφωνα με τις υποδείξεις του πίνακα 4.5 και είναι ίσο με το διπλάσιο του βάθους διείσδυσης  $t_{hw}=2 \times \delta_{cu1}=2 \times 1.198 \text{mm}=2.39 \text{mm}$ . Επαληθεύεται και από τον πίνακα 4.2 για  $f=3 \text{KHz}$ .

- Εσωτερική διάμετρος αγωγού- επαγωγέα.

Και πάλι με την χρήση του πίνακα 4.5 προκύπτει ότι η ελάχιστη εσωτερική διάμετρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι 5.97mm.

Στην πραγματικότητα τα παραπάνω αποτελέσματα δεν θα χρησιμοποιηθούν, διότι χάλκινος σωλήνας με την συγκεκριμένη διατομή με το ανάλογο πάχος δεν βρέθηκε, οπότε χρησιμοποιήθηκε χάλκινος σωλήνας με άλλη διατομή  $d_{out}=19.05 \text{mm}$  και πάχος τοιχώματος ίσο με το βάθος διείσδυσης  $\delta_{cu}=1.2 \text{mm}$ . Η προϋπόθεση ότι το πάχος του τοιχώματος πρέπει να είναι ίσο με το διπλάσιο του βάθους διείσδυσης  $t_{hw}=2 \times \delta_{cu}$  δεν τηρήθηκε επειδή θα αυξανόταν σημαντικά η δυσκαμψία του χάλκινου σωλήνα και επομένως η προσαρμογή του σε ότι αφορά την διάμετρο και τον αριθμό των σπειρών. Έτσι οι υπολογισμοί προσαρμόζονται στην νέα αυτή διατομή και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

Frequency	Theoretical wall thickness (= 2 X reference depth (a), mm (in.))	Typical wall thickness available, mm (in.)	Minimum tube diameter (b), mm (in.)
60 Hz	16.80 (0.662)	14.00 (0.550)	42.00 (1.655)
180 Hz	9.70 (0.382)	8.13 (0.320)	24.30(0.955)
540 Hz	5.59 (0.220)	4.67 (0.184)	14.00 (0.550)
1 kHz	4.11 (0.162)	3.43 (0.135)	10.30 (0.405)
3 kHz	2.39 (0.094)	1.98 (0.078)	5.97 (0.235)
10 kHz	1.32 (0.052)	1.07 (0.042)	3.30 (0.130)
450 kHz	0.15 (0.006)	0.89 (0.035)	0.38 (0.015)
1 MHz	0.08 (0.003)	0.89 (0.035)	0.19 (0.0075)

(a) Resistivity of copper assumed to be  $1.67 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  ( $0.66 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{in.}$ ). (b) Tube ID requirements for adequate cooling-water flow should also be considered.

Πίνακας 4.5 : Επιλογή σωλήνα για επαγωγικά πηνία

- Coil pitch- Coupling Efficiency.

Η απόσταση μεταξύ των σπειρών και του πηνίου εργασίας με το αντικείμενο προς θέρμανση προκύπτουν από την σχέση  $d_{out}/2=19.05\text{mm}/2=9.53\text{mm}$  για να εξασφαλίσουμε ομοιόμορφη θέρμανση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί, βέβαια, και ο πίνακας 3.2.

- Αριθμός Σπειρών αγωγού N.

Ο αριθμός των σπειρών δίνεται από την σχέση:

$$N = \frac{l_w}{d_{out} + C_p} \quad 4.3$$

Όπου,  $l_w$ : μήκος αντικειμένου προς θέρμανση [mm].

$d_{out}$ : εξωτερική διάμετρος του σωλήνα-επαγωγέα [mm].

$C_p$ : coil coupling [mm].

Άρα  $N=100\text{mm}/(19.05+9.53)\text{mm}=3.5 \approx 4$  σπείρες.

- Μήκος σωλήνα- επαγωγέα.

Το μήκος του αγωγού υπολογίζεται από την σχέση:

$$l_{coil} = 2 \times l_{lead} + N \sqrt{(2\pi r_m)^2 + (1.5d_{out})^2} \quad 4.4$$

Όπου  $l_{coil}$ : μήκος του πηνίου εργασίας- επαγωγέα [mm].

$l_{lead}$ : μήκος άκρου του πηνίου [mm].

N: ο αριθμός των σπειρών.

$r_m$ : εσωτερική ακτίνα του πηνίου εργασίας- επαγωγέα [mm].

$d_{out}$ : εξωτερική διάμετρος του σωλήνα-επαγωγέα [mm].

Τίθεται το μήκος των άκρων ίσο με  $2 \times l_{lead} = 2 \times 200\text{mm} = 400\text{mm}$  για να πραγματοποιηθεί εύκολα και σωστά η διάταξή τους (όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.4.8), πρέπει όμως να σημειωθεί ότι έτσι δεν πληρείται μια άλλη προδιαγραφή που αναφέρεται στην ίδια παράγραφο (επαγωγή πηνίου 10 φορές μεγαλύτερη της επαγωγής των άκρων- άρα σημαντικές απώλειες). Το μήκος του αγωγού προκύπτει σύμφωνα με την παραπάνω σχέση ίσο με  $l_{coil} = 1026,6\text{mm}$ .

Στην συνέχεια ακολουθεί ο πίνακας 4.6 και 4.7. Στον πίνακα 4.6 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του επαγωγέα που χρησιμοποιήθηκε και στον πίνακα 4.7 τα αποτελέσματα των υπολογισμών για την κατασκευή του πηνίου εργασίας- επαγωγέα.

#### Χάλκινος Σωλήνας- Επαγωγέας

Προδιαγραφή	Τιμή/ Μέθοδος
Εξωτερική Διάμετρος $d_{out}$ (mm)	19.05
Εσωτερική Διάμετρος $d_{in}$ (mm)	16.65
Πάχος Τοιχώματος $t_{hw}$ (mm)	1.2

Πίνακας 4.6

#### Αποτελέσματα για Πηνίο Εργασίας- Επαγωγέα

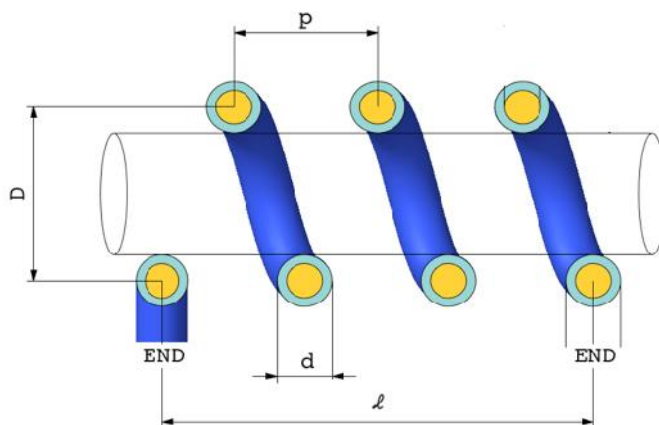
Προδιαγραφή	Τιμή/ Μέθοδος
Χρήση	Πηνίο
Μαγνητικό Πεδίο	Εγκάρσια Ροή
Σχήμα/Μορφή	Σωληνοειδές Κυκλικό Πολλών Σπειρών
Εξωτερική Διάμετρος $d_{out\_conductor}$ (mm)	87.15
Εξωτερική Ακτίνα $r_{out\_conductor}$ (mm)	43.575
Εσωτερική Διάμετρος $d_{in\_conductor}$ (mm)	49.05
Εσωτερική Ακτίνα $r_{in\_conductor}=r_m$ (mm)	24.525
Απόσταση μεταξύ σπειρών $C_{pitch}$ (mm)	9.53
Απόσταση μεταξύ πηνίου- αντικειμένου (mm)	9.53
Αριθμός Σπειρών	4
Μήκος Άκρου (mm)	200
Συνολικό Μήκος Πηνίου (mm)	1026.6

Πίνακας 4.7



### 4.3 Υπολογισμός Ισοδύναμου Κυκλώματος.

Ο υπολογισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος γίνεται με βάση την μοντελοποίηση N<sup>0</sup> 5 που αναφέρεται στην παράγραφο 2.6.1 και την βοήθεια των ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ 2,3,4 και 5.



Εικόνα 4.1: Χρήσιμα μεγέθη για τον υπολογισμό του ισοδύναμου κυκλώματος.

Στην εικόνα 4.1 φαίνονται κάποιοι από τις παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος. Ο λόγος που παρουσιάζονται στην εικόνα 4.1 και καταγράφονται στον πίνακα 4.8 είναι να μην υπάρξει σύγχυση με τα μεγέθη που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Χρήσιμα Μεγέθη	
Προδιαγραφή	Τιμή/ Μέθοδος
Διάμετρος Αντικείμενου προς Θέρμανση (mm)	30
Διάμετρος χάλκινου σωλήνα d (mm)	19.05
Απόσταση μεταξύ σπειρών p (mm)	9.53
Απόσταση μεταξύ πηνίου- αντικειμένου Cc(mm)	9.53
Μέση Διάμετρος D (mm)	68.1
Μέση Ακτίνα R (mm)	34.05
Μήκος Πηνίου l (mm)	104.755

Πίνακας 4.8

**Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα για τον Υπολογισμό του Ισοδύναμου Κυκλώματος ανοιγμένο στην πλευρά του πρωτεύοντος.**

Παράμετρος	Σύμβολο	Ποσότητα	Μονάδα
Υπολογισμός Αυτεπαγωγής Άκρων	$L_{leads}$	0.222	μH
Υπολογισμός Αυτεπαγωγής Πηνίου	$L_1$	0.539	μH
Υπολογισμός Ροής Σκέδασης	$L_{leakage}$	0.275	μH
Υπολογισμός Αμοιβαίας Επαγωγής	$L_M$	0.264	μH
Υπολογισμός Αυτεπαγωγής Αντικείμενου Θέρμανσης	$L_2$	0.066	μH
Υπολογισμός Αντίστασης Αντικείμενου Θέρμανσης	$R_L$	0.00089	Ω
Υπολογισμός Αντίστασης Πηνίου	$R_1$	0.00026	Ω
Υπολογισμός Συντελεστή A	A	4	-
Υπολογισμός Ισοδύναμης Αυτεπαγωγής	$L_{eq}$	0.497	μH
Υπολογισμός Ισοδύναμης αντίστασης	$R_{eq}$	0.00115	Ω

**Πίνακας 4.9**

#### **4.4 Υπολογισμός Ισχύος και Ρεύματος του Πηνίου Εργασίας.**

Στην παράγραφο 4.1 υπολογίζεται η ισχύς που απαιτείται για την θέρμανση του δοκιμίου στους 400 °C για χρόνο 120s και είναι ίση με  $P_{workpiece}=1096 \text{ W}$  . Με την βοήθεια του πίνακα 3.4 (παράγραφος 3.5) και των σχέσεων 4.5 και 4.6 υπολογίζονται η ισχύς που πρέπει να προσδίδει το πηνίο εργασίας στο αντικείμενο προς θέρμανση, η τάση και το ρεύμα που θα το διαρρέει.

Έτσι με την βοήθεια του πίνακα 3.4 προκύπτει ότι η ισχύς του πηνίου εργασίας πρέπει να είναι ίση με  $P_{work\_coil}=2 \times P_{workpiece}=2 \times 1096 \text{ W} = 2192 \text{ W}$ .

Από την σχέση 3.4 υπολογίζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου που πρέπει να δημιουργηθεί και στην συνέχεια με εφαρμογή της σχέσης 3.5 προκύπτει το ρεύμα του πηνίου εργασίας.

$$P = \pi \cdot d \cdot h \cdot H^2 \sqrt{\pi \cdot \rho \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f \cdot C \cdot F} \quad 4.5$$

- Όπου P: η ισχύς του αντικείμενου προς θέρμανση [W].  
d: η διατομή του αντικείμενου προς θέρμανση [m].  
h: το ύψος του αντικείμενου προς θέρμανση [m].  
H: η ένταση του μαγνητικού πεδίου [A/m].  
ρ: η ειδική αντίσταση του δοκιμίου [Ω]  
μ<sub>0</sub>: η μαγνητική διαπερατότητα του κενού [4×π×10<sup>-7</sup> H/m].  
μ<sub>r</sub>: η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του δοκιμίου [-].  
f: η εφαρμοζόμενη συχνότητα [Hz].  
F: ο συντελεστής μεταφοράς [d/δ].  
C: ο συντελεστής σύζευξης [από τον πίνακα 3.4].

Προσοχή η παραπάνω σχέση ισχύει για τον υπολογισμό της ισχύος κυλινδρικού δοκιμίου.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου γύρω από ένα σωληνοειδές πηνίο είναι:

$$H = \frac{0,4 \times \pi \times N \times I}{L} \quad [\text{A/m}] \quad 4.6$$

- Όπου H: Ένταση του μαγνητικού πεδίου [A/m].  
N: αριθμός σπειρών πηνίου.  
I: ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο [A].  
L: το μήκος πηνίου [m].

Έτσι το ρεύμα του πηνίου εργασίας προκύπτει ίσο με I<sub>coil</sub>=174,77 A.

#### 4.5 Υπολογισμός Τάσης Εισόδου και Τάσης Εξόδου του Αντιστροφέα.

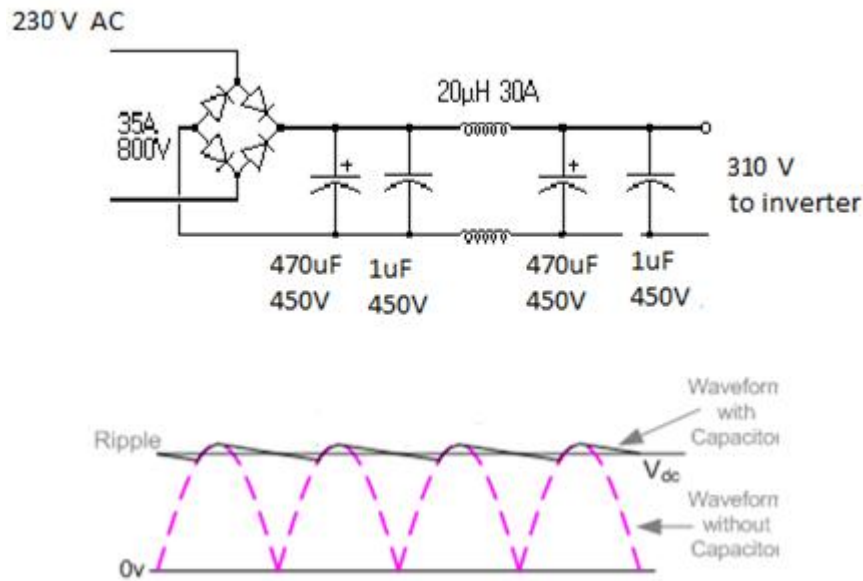
Πριν τον υπολογισμό του κυκλώματος αντιστάθμισης- συντονισμού πραγματοποιείται υπολογισμός της τάσης εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα.

- Τάση Εισόδου του Αντιστροφέα V<sub>d</sub>.

Όπως γίνεται φανερό με συνδυασμό των παραγράφων 2.7, 3.6 και τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου (απαιτήση μεγάλου ρεύματος στο πηνίο εργασίας) μας «συμφέρει» να ανορθώσουμε και να εξομαλύνουμε την τάση του δικτύου χωρίς να χρησιμοποιηθεί μετασχηματιστής υποβιβασμού της τάσης.

Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται κατάλληλη ανορθωτική γέφυρα (KBCP 3510) και στην συνέχεια φίλτρο ώστε να περιοριστεί η κυμάτωση στο 5%.

Έτσι προκύπτει ότι η τάση εισόδου του αντιστροφέα είναι περίπου ίση με V<sub>d</sub>=310V.



Εικόνα 4.2: Ανόρθωση Τάσης Δικτύου και Φίλτρο Εξομάλυνσης.

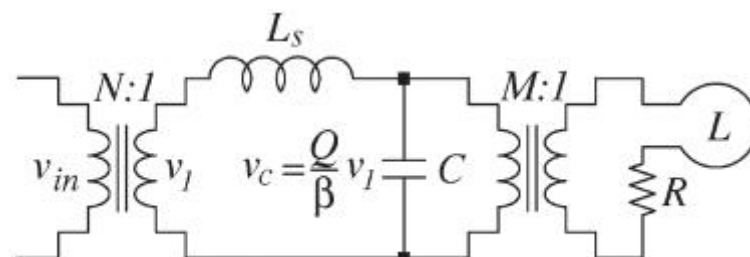
- Τάση Εξόδου του Αντιστροφέα  $V_{out\_αντιστροφέα}$ .

Επιλέγεται αντιστροφέας πλήρους γέφυρας και επιλέγεται η λειτουργία της Τετραγωνικής Κυματομορφής. Έτσι η έξοδος του αντιστροφέα υπολογίζεται από την σχέση 1.44 και είναι ίση με  $V_{out\_αντιστροφέα}=278V$ .

#### 4.6 Υπολογισμός Κυκλώματος Αντιστάθμισης- Συντονισμού.

Όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 3.6 η συχνότητα λειτουργίας  $f_o$  και η επιθυμητή τιμή της ισχύος εξόδου  $P_{out}$  καθορίζουν από την μια το πόσοι και ποιοι μετασχηματιστές θα χρησιμοποιηθούν και από την άλλη τον τρόπο (και τους τύπους) υπολογισμού των παθητικών στοιχείων  $L_s$  και  $C$  για την κατασκευή του φίλτρου LL-C.

Στην δική μας περίπτωση τόσο οι απαιτήσεις σε ισχύ όσο και σε συχνότητα είναι χαμηλές, οπότε επιλέγεται η χρήση ταλαντωτή LL-C με ενεργό και άεργο μετασχηματιστή. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3. Οι τύποι για τον υπολογισμό των τιμών των  $L_s$  και  $C$  στοιχείων, των τάσεων και των ρευμάτων τους καθώς και των αριθμό των σπειρών των μετασχηματιστών παρέχονται στην βιβλιογραφία [30] και [31].



Εικόνα 4.3: Ταλαντωτής LL-C με «ενεργό» και «άεργο» μετασχηματιστή.

Συνοπτικά προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

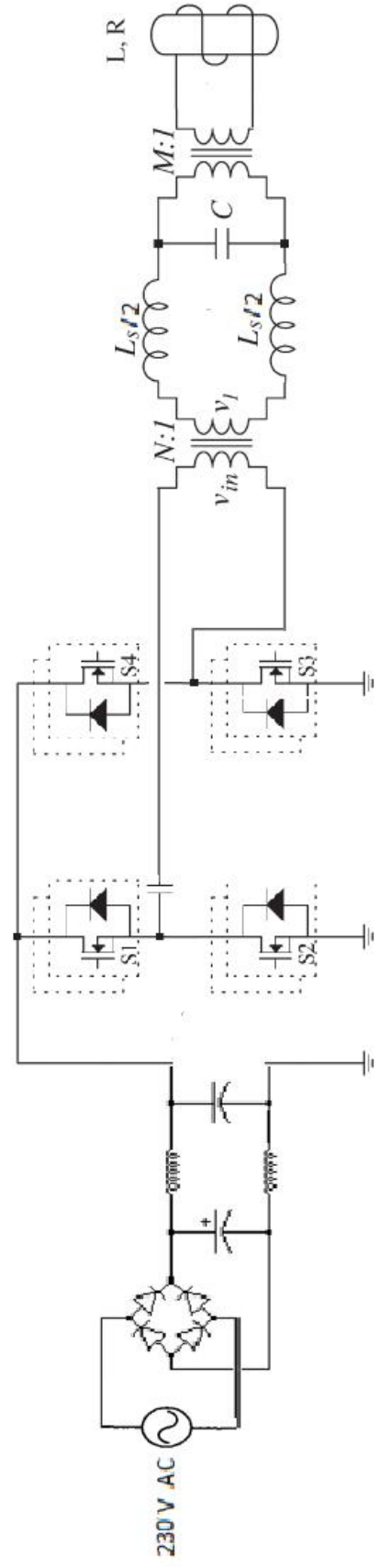
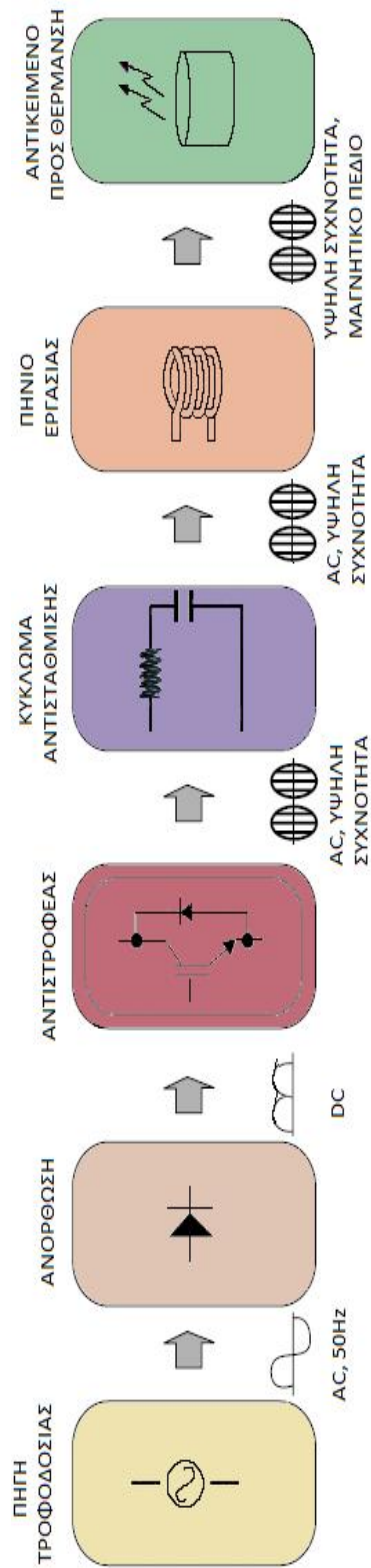
Μέγεθος	Σύμβολο	Ποσότητα	Μονάδα
Τάση Εισόδου	$V_{in}$	278.11	V
Αριθμός Σπειρών Ενεργού Μ/ΣΧ	N	5	-
Επαγωγή	$L_s$	222.64	$\mu\text{H}$
Πυκνωτής	C	37.48	$\mu\text{F}$
Αριθμός Σπειρών Άεργου Μ/ΣΧ	M	1	-
Μέγιστη Τάση Πυκνωτή	$V_{c\_max}$	250	V
Μέγιστο Ρεύμα Πυκνωτή	$i_{c\_max}$	176.63	A
Πηνίο Εργασίας + Αντικείμενο προς Θέρμανση	L	0.497	$\mu\text{H}$
Αντίσταση	R	0.00115	$\Omega$

**Πίνακας 4.10**

Τις περισσότερες φορές δεν είναι δυνατό να βρεθεί τυποποιημένη τιμή για τον πυκνωτή C. Για τον λόγο αυτό τοποθετούνται πολλοί πυκνωτές παράλληλα μεταξύ τους. Επιλέγονται έτσι ώστε να αντέχουν την μέγιστη τάση  $V_{c\_max}$  και το μέγιστο ρεύμα  $i_{c\_max}$ . Για παράδειγμα, στην δική μας περίπτωση θα επιλέγαμε πυκνωτές CSP200 (2.4 $\mu\text{F}$ - 400V<sub>rms</sub>-500A<sub>rms</sub>). Απαιτούνται 16 τέτοιοι πυκνωτές και η συνολική τους χωρητικότητα ισούται με 38.4 $\mu\text{F}$ , οπότε οι τιμές  $V_{c\_max}$  και  $i_{c\_max}$  πρέπει να επαναπροσδιοριστούν.

Όσο αφορά τους μετασχηματιστές, επειδή οι συχνότητες, στις περισσότερες εφαρμογές της Επαγωγικής Θέρμανσης, είναι ιδιαίτερα υψηλές χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές με πυρήνα από φερρίτη και όχι από μαλακό σίδηρο.

## 4.7 Διάταξη Επαγωγικής Θέρμανσης.



## Κεφάλαιο 5ο : Συμπεράσματα- Προτάσεις.

### 5.1 Συμπεράσματα.

Όπως είδαμε και στο πρώτο κεφάλαιο το πεδίο των γνώσεων που απαιτείται για την μελέτη της Επαγωγικής Θέρμανσης είναι ιδιαίτερα ευρύ. Απαιτούνται γνώσεις όσο αφορά τον ηλεκτρομαγνητισμό, την θερμοδυναμική, τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος και τις υψηλές συχνότητες.

Κάθε τμήμα της επαγωγικής διάταξης παίζει το δικό του ιδιαίτερο ρόλο στην Επαγωγική Διάταξη και καθορίζει κάποιες από τις παραμέτρους της. Πιο αναλυτικά:

Αντικείμενο προς θέρμανση (work piece): Το αντικείμενο προς θέρμανση, είναι κατά την γνώμη μου το πιο σημαντικό κομμάτι της Επαγωγικής Διάταξης. Πρώτα από όλα, είναι αυτό που καθορίζει το είδος της εφαρμογής. Παραδείγματος χάριν, αν είναι μια κατσαρόλα τότε η Επαγωγική Διάταξη είναι ουσιαστικά ένα «Επαγωγικό Μάτι», όπως αυτά που έχουμε στην κουζίνα μας. Αν είναι ιατρικά εργαλεία ή καθοδικός σωλήνας τότε η Επαγωγική Διάταξη θα αναλάβει να «καθαρίσει» τα αντικείμενα αυτά. Ακόμη όμως και για το ίδιο υλικό πχ ένα κομμάτι μέταλλο η εφαρμογή μπορεί να διαφέρει. Μπορεί να απαιτείται σκλήρυνση ή λιώσιμο του μετάλλου. Αφού λοιπόν, το αντικείμενο προς θέρμανση καθορίζει την εφαρμογή, καθορίζει και τις παραμέτρους οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την σωστή εκτέλεση τις εφαρμογής, όπως παραδείγματος χάριν η θερμοκρασία.

Για να είναι επιτυχής η εφαρμογή πρέπει να γίνει και μια μελέτη όσο αφορά την χημική σύσταση και την μαγνητική συμπεριφορά του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το αντικείμενο προς θέρμανση. Δεν μπορεί για παράδειγμα, να ζητείται σκλήρυνση ενός χαλύβδινου σωλήνα στους 1300°C, όταν είναι γνωστό ότι η σκλήρυνση του επιτυγχάνεται στους 850 °C με 890 °C και από την άλλη ότι το συγκεκριμένο κράμα λιώνει στους 1470 °C. Στους 1300°C δεν θα έχει επιτευχθεί σκλήρυνση και αφετέρου θα αλλοιωθεί σημαντικά η χημική σύσταση του κράματος.

Ακόμη το σχήμα του αντικειμένου προς θέρμανση καθορίζει την μορφή του πηνίου εργασίας και κατ επέκταση την ροή του μαγνητικού πεδίου. Έτσι, όσο πιο περίπλοκο είναι το σχήμα του αντικειμένου προς θέρμανση τόσο πιο σύνθετη θα είναι και η γεωμετρία του πηνίου εργασίας και τόσο πιο δύσκολη η ομοιόμορφη κατανομή της θερμικής ενέργειας στο αντικείμενο προς θέρμανση.

Τέλος όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του αντικειμένου προς θέρμανση τόσο πιο εύκολη είναι η παραγωγή θερμότητας λόγω των απωλειών που προκαλούν τα δινορεύματα. Στα σιδηρομαγνητικά υλικά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η θερμοκρασία Curie και η μεταβολή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το αντικείμενο προς θέρμανση. Στα υλικά με μαγνητική διαπερατότητα 1 δεν υπάρχει αυτή η ανάγκη για αναπροσαρμογή των σχέσεων. Ενώ στα μονωτικά υλικά η χρήση της Επαγωγικής Θέρμανσης είναι άτοπη.

Πηνίο Εργασίας (work coil): Μετά το αντικείμενο προς θέρμανση το πιο σημαντικό στοιχείο της Επαγωγικής Διάταξης. Το σχήμα του πηνίου εργασίας, όπως περιγράφηκε και στην προηγούμενη παράγραφο καθορίζεται από το αντικείμενο προς θέρμανση. Για τον λόγο αυτό η μορφή του δεν είναι σταθερή αλλά ποικίλει. Είναι κατασκευασμένο, συνήθως, από χαλκό και σκοπός του είναι να δημιουργήσει κατάλληλο μαγνητικό πεδίο για την θέρμανση του αντικειμένου προς θέρμανση. Ο σχεδιασμός του πηνίου εργασίας είναι ιδιαίτερα απαιτητικός: απόσταση από το αντικείμενο προς θέρμανση, απόσταση

μεταξύ των σπειρών, αριθμός σπειρών, μήκος άκρων είναι παράμετροι που επηρεάζουν την μορφή του μαγνητικού πεδίου, του βάθους διείσδυσης, των απωλειών και άλλων παραμέτρων.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό της γεωμετρίας του πηνίου εργασίας είναι ο καθορισμός της σχέσης για τον υπολογισμό της ισοδύναμης αυτεπαγωγής. Όσο πιο σύνθετη είναι η γεωμετρία τόσο πιο δύσκολη η εύρεση κατάλληλης σχέσης για τον υπολογισμό της ισοδύναμης αυτεπαγωγής και πολλές φορές γίνεται ανάλυση σε απλούστερες μορφές και στην συνέχεια τα αποτελέσματα τον εκάστοτε υπολογισμών προστίθενται.

Κύκλωμα αντιστάθμισης –Συντονισμού: Ένα επίσης σπουδαίο τμήμα της Επαγωγικής διάταξης. Καθορίζει το ποσό ενέργειας που καταλήγει στο πηνίο εργασίας από τον αντιστροφέα. Για απλά φίλτρα παράλληλα ή σειράς όλη ισχύ του αντιστροφέα μετατρέπεται σε ενεργό. Σε αντίθεση, σε πιο σύνθετα φίλτρα LL-C ή CC-L ένας μέρος της ισχύος του αντιστροφέα μετατρέπεται σε άεργο. Παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα έναντι των απλών φίλτρων, όπως προστασία σε περίπτωση βραχυκύκλωσης της διάταξης και για τον λόγω αυτό προτιμώνται. Από την άλλη πλευρά ο σχεδιασμός ενός απλού φίλτρου είναι ευκολότερος και δεν υποχρεωτική η χρήση μετασχηματιστών.

Μετασχηματιστές: Πολλές φορές η χρήση ενός μετασχηματιστή 1:1 πραγματοποιείται στις επαγωγικές διατάξεις έτσι ώστε να εξασφαλιστεί γαλβανική απομόνωση ακόμη και αν το φίλτρο που επιλέγεται είναι πυκνωτής και πηνίο σε σειρά ή παράλληλα μεταξύ τους. Όταν χρησιμοποιούνται πιο σύνθετα φίλτρα, τότε η χρήση ενός ή δύο μετασχηματιστών είναι αναπόφευκτη και καθορίζονται από τις απαιτήσεις σε ισχύ και σε συχνότητα.

Αντιστροφέας: Είναι το μέρος εκείνο της διάταξης με την μεγαλύτερη ευαισθησία. Οποιαδήποτε μεταβολή, είτε από το δίκτυο είτε στο πηνίο εργασίας (ανοιχτό-κύκλωμα ή βραχυκύκλωμα) μπορεί όχι μόνο να επηρεάσει αλλά και να καταστρέψει κάποιο ή κάποια από τα στοιχεία, από τα οποία αποτελείται. Τα ημιαγωγικά στοιχεία του μπορεί να είναι Mosfet ή Igbt, εξαρτάται από την εφαρμογή. Επίσης αν η πηγή τους είναι πηγή τάσης ή ρεύματος καθορίζει το είδος του σύνθετου (αν επιλεγεί) φίλτρου. Επίσης, μέσω της ισχύς εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να γίνει ρύθμιση της ισχύος που τελικά καταλήγει στο πηνίο εργασίας. Διατηρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους-μέρη της διάταξης σταθερά μπορεί να υπάρξει ένα εύρος μεταβολών στην θερμοκρασία του δοκιμίου και στο βάθος που διεισδύει η θερμοκρασία αυτή.

## **5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα-μελέτη.**

Πριν την υλοποίηση της Διάταξης επαγωγικής Θέρμανσης θα ήταν καλό να πραγματοποιηθεί μια βαθύτερη έρευνα όσο αφορά τα φίλτρα LL-C, CC-L και των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν έναντι των απλών φίλτρων. Επίσης, έρευνα όσο αφορά τις τοπολογίες του αντιστροφέα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους θα ήταν καλό να γίνει ώστε να ληφθούν επιπλέον παράμετροι και να συνυπολογιστούν κατά την κατασκευή της διάταξης. Έτσι ώστε να μην «δημιουργηθούν» προβλήματα, όσο αφορά την λειτουργία της διάταξης και στην συνέχεια την αλλαγή των διάφορων μερών της διάταξης πχ χρήση άλλου πηνίου. Ακόμη, έρευνα όσο αφορά τους μετασχηματιστές με πυρήνα από φερρίτη και σε τι εύρος ισχύος μπορούν χρησιμοποιηθούν πρέπει να διεξαχθεί.

Ένα σημαντικό βήμα στην μελέτη της Επαγωγικής Θέρμανσης και στην υλοποίηση της διάταξης της είναι η χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης. Μέσω υπολογιστικού προγράμματος, αρχικά, να γίνει μοντελοποίηση του αντικειμένου προς θέρμανση. Στην



συνέχεια μέσω του ίδιου ή άλλου προγράμματος να βρεθεί η μορφή- σχήμα, η απόσταση από το αντικείμενο προς θέρμανση, ο αριθμός και η απόσταση των σπειρών (αν βέβαια απαιτούνται) έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το βέλτιστο μαγνητικό πεδίο και επομένως η αποδοτικότερη μεταφορά ενέργεια στο αντικείμενο προς θέρμανση.

Στην συνέχεια, είναι καλό αν υπάρχει κάποιο πρόγραμμα για τον υπολογισμό των αυτεπαγωγών, των αντιστάσεων του πηνίου εργασίας και του αντικειμένου προς θέρμανση, τόσο ξεχωριστά όσο και μεταξύ τους ως ισοδύναμο μοντέλο, έτσι ώστε να αποφευχθεί η χρήση μοντελοποίησης των παραπάνω στοιχείων, η οποία θα έχει προσεγγιστικά αποτελέσματα.

Αφού, λοιπόν, πραγματοποιηθούν τα παραπάνω, θα είναι καλό πριν την κατασκευή να προηγηθεί μια προσομοίωση του κυκλώματος σε κατάλληλο πρόγραμμα πχ το P-Spice. Έτσι ώστε να βεβαιωθούμε ότι η διάταξη θα λειτουργήσει, τι ρεύματα και τάσεις προσδοκούμε να πάρουμε, και τι θα γίνει σε περίπτωση πχ βραχυκυκλώματος.

Αφού πλέον έχει κατασκευαστεί η Επαγωγική Διάταξη μια άλλη σειρά από έρευνες μπορεί να γίνει. Κρατώντας, όλα τα μέρη της διάταξης σταθερά και μεταβάλλοντας μονάχα το αντικείμενο προς θέρμανση μπορεί να γίνει μια καταγραφή των τάσεων και των ρευμάτων του κυκλώματος. Επίσης, μπορεί να γίνει σύγκριση των τιμών που παίρνει σε κάθε περίπτωση η ισοδύναμη επαγωγή και αντίσταση. Τέλος, αν και δεν μας αφορά άμεσα ως ηλεκτρολόγους, μπορεί να γίνει μελέτη της κατανομής της θερμότητας στο εκάστοτε αντικείμενο προς θέρμανση. Συνεχίζοντας, μεταβάλλοντας μεμονωμένα ή συνδυασμό τμημάτων της επαγωγικής διάταξης μπορούν να καταγραφούν τάσεις, ρεύματα και ισχύς. Έτσι, έπειτα από σύγκριση να γίνει φανερό πχ πιο πηνίο είναι πιο αποδοτικό, πιο φίλτρο κατάλληλο για συγκεκριμένο τύπο αντιστροφέα ή με ποια επιμέρους στοιχεία της διάταξης θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1- Τυποποίηση Χαλύβων.

### 1.1 ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΚΑΤΑ AISI-SAE

Ο χάλυβας δηλώνεται με έναν τετραψήφιο αριθμό ΧΥΖΖ, τα ψηφία του οποίου σημαίνουν:

X: οικογένεια χάλυβα (βλ. Πίν. 1α)

Υ: ποσοστό κυρίων στοιχείων κραμάτωσης στον χάλυβα (βλ. Πίν. 1β).

ΖΖ: περιεκτικότητα άνθρακα (C) πολλαπλασιασμένη επί 100%.

Μπροστά από τον κωδικό του χάλυβα μπορεί να υπάρχει ένα κεφαλαίο γράμμα της λατινικής αλφαβήτου που δηλώνει τη μεταλλουργική διαδικασία για την παραγωγή του χάλυβα (Πίν. 2).

Σειρά χάλυβα	Οικογένεια χάλυβα
1ΥΖΖ	Κοινοί ή Μαγγανιούχοι χάλυβες
2ΥΖΖ	Νικελιούχοι χάλυβες
3ΥΖΖ	Νικελιοχρωμιούχοι χάλυβες
4ΥΖΖ	Μολυβδαινούχοι ή Χρωμιομολυβδαινούχοι ή Νικελιομολυβδαινούχοι Ni-Cr-Mo χάλυβες
5ΥΖΖ	Χρωμιούχοι χάλυβες
6ΥΖΖ	Χρωμιοβαναδιούχοι χάλυβες
7ΥΖΖ	Χάλυβες Βολφραμίου-Χρωμίου
8ΥΖΖ	Χάλυβες Ni-Cr-Mo
9ΥΖΖ	Μαγγανιοπυριτιούχοι ή Ni-Cr-Mo χάλυβες

Πίνακας 1 α: Ονοματολογία χαλύβων κατά AISI-SAE (Κωδικός Χ)

Σειρά χάλυβα	Οικογένεια χάλυβα
10ΖΖ	Κοινοί χάλυβες
11ΖΖ	Κοινοί χάλυβες ελεύθερης κοπής (free-cutting) με S
12ΖΖ	Κοινοί χάλυβες ελεύθερης κοπής (free-cutting) με S και P
13ΖΖ	Χαλυβοκράματα μαγγανίου [ $\pi(\text{Mn})=1.60-1.90\%$ ]
23ΖΖ	Χαλυβοκράματα νικελίου [ $\pi(\text{Ni})=3.5\%$ ]
25ΖΖ	Χαλυβοκράματα νικελίου [ $\pi(\text{Ni})=5\%$ ]
31ΖΖ	Χαλυβοκράματα νικελίου-χρωμίου [ $\pi(\text{Ni})=1.25\%$ , $\pi(\text{Cr})=0.60\%$ ]
32ΖΖ	Χαλυβοκράματα νικελίου-χρωμίου [ $\pi(\text{Ni})=1.75\%$ , $\pi(\text{Cr})=1\%$ ]
33ΖΖ	Χαλυβοκράματα νικελίου-χρωμίου [ $\pi(\text{Ni})=3.50\%$ , $\pi(\text{Cr})=1.50\%$ ]
40ΖΖ	Χαλυβοκράματα μολυβδαινίου [ $\pi(\text{Mo})=0.25\%$ ]
41ΖΖ	Χαλυβοκράματα χρωμίου-μολυβδαινίου [ $\pi(\text{Cr})=1\%$ , $\pi(\text{Mo})=0.20\%$ ]
43ΖΖ	Χαλυβοκράματα νικελίου-χρωμίου-μολυβδαινίου
46ΖΖ	Χαλυβοκράματα νικελίου-μολυβδαινίου [ $\pi(\text{Ni})=1.75\%$ , $\pi(\text{Mo})=0.25\%$ ]
48ΖΖ	Χαλυβοκράματα νικελίου-μολυβδαινίου [ $\pi(\text{Ni})=3.5\%$ , $\pi(\text{Mo})=0.25\%$ ]
51ΖΖ	Χαλυβοκράματα χρωμίου [ $\pi(\text{Cr})=0.80\%$ ]
52ΖΖ	Χαλυβοκράματα χρωμίου [ $\pi(\text{Cr})=1.5\%$ ]
61ΖΖ	Χαλυβοκράματα χρωμίου-βαναδίου
86ΖΖ	Χαλυβοκράματα νικελίου-χρωμίου-μολυβδαινίου [ $\pi(\text{Ni})=0.55\%$ , $\pi(\text{Cr})=0.50\%$ , $\pi(\text{Mo})=0.20\%$ ]
92ΖΖ	Χαλυβοκράματα μαγγανίου-πυριτίου [ $\pi(\text{Mn})=0.80\%$ , $\pi(\text{Si})=2\%$ ]
94ΖΖ	Χαλυβοκράματα μαγγανίου-πυριτίου- νικελίου-χρωμίου-μολυβδαινίου

Πίνακας 1 β): Ονοματολογία χαλύβων κατά AISI-SAE (Κωδικός Υ, αντιπροσωπευτικοί τύποι)

Πρόθεμα	Μεταλλουργική διαδικασία παραγωγής χάλυβα
A	Κραματομένος χάλυβας σε κάμινο όξινης επένδυσης
B	Κοινός χάλυβας σε κάμινο Bessemer
C	Κοινός χάλυβας σε κάμινο ανοικτής εστίας με βασική επένδυση
D	Κοινός χάλυβας σε κάμινο ανοικτής εστίας με όξινη επένδυση
E	Χάλυβας σε ηλεκτρική κάμινο
X	Χάλυβας ειδικής σύστασης (εκτός προδιαγραφών)

**Πίνακας 2: Επεξήγηση προθέματος**

Παράδειγμα: 1160 (1: Κοινός χάλυβας, 1:Με πρόσμιξη S, 60:  $\pi(C)=0,55-0,66\%$  κ.β.)

## 1.2 ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΚΑΤΑ DIN

### 1.2.1 ΚΟΙΝΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Συμβολισμός: St XX(YY)

όπου St: (από τη γερμανική λέξη Stahl=χάλυβας)

XX: η ελάχιστη αντοχή του χάλυβα σε εφελκυσμό, εκφρασμένη σε  $\text{daN/mm}^2$ .

YY: (προαιρετικά) αφορούν ειδικές (ποιοτικές) προδιαγραφές αντίστοιχου πίνακα

DIN

Παράδειγμα: Ο χάλυβας St 3722, είναι κοινός χάλυβας ελάχιστης αντοχής σε εφελκυσμό  $37 \text{ daN/mm}^2$  που ικανοποιεί τις προδιαγραφές του DIN 1622.

### 1.2.2 ΚΟΙΝΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ ΓΙΑ ΕΠΙΒΕΛΤΙΩΣΗ Η ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ

Συμβολισμός: C XX ή C XX K

όπου: XX: η  $\pi(C)$  πολλαπλασιασμένη επί 100.

K: δηλώνει ότι το ποσοστό των ακαθαρσιών είναι πολύ μικρό.

Παράδειγμα: Ο χάλυβας C 40 K, είναι κοινός χάλυβας με  $\pi(C)=0.40\%$  και εξαιρετικής καθαρότητας που προορίζεται για επιβελτίωση ή ενανθράκωση.

Ειδικά προθέματα, δηλωτικά της θερμικής ή άλλης κατεργασίας που έχει υποστεί ο χάλυβας:

E: Ενανθράκωση

G: Ανόπτηση

N: Εξομάλυνση

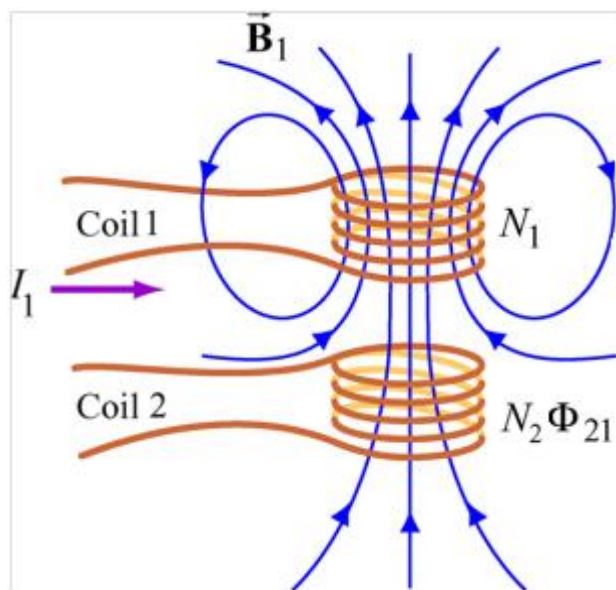
V: Επιβελτίωση

GS: Χυτοχάλυβας (προϊόν χύτευσης)

[Π1][Π2]

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2- Αμοιβαία Επαγωγή.

### 2.1 Αμοιβαία Επαγωγή- Ικανότητα Σύζευξης.



Εικόνα Π2.1: Μεταβολή στο ρεύμα του Πηνίου1 προκαλεί μεταβολή στην μαγνητική ροή του Πηνίου 2.

Όταν δύο πηνία είναι τοποθετημένα το ένα δίπλα στο άλλο, και το πρώτο διαρρέεται από ρεύμα, δημιουργεί μαγνητικό πεδίο γύρω του ένα μέρος του οποίου περνά από το δεύτερο πηνίο. Κάθε μεταβολή στο ρεύμα  $I_1$  του Πηνίου1 συνοδεύεται από την δημιουργία ρεύματος στο Πηνίο2. Αυτό συμβαίνει επειδή μεταβάλλεται το μαγνητικό πεδίο στο Πηνίο1 και επομένως η μαγνητική ροή στο Πηνίο2. Συνεπώς στο Πηνίο2 επάγεται ΗΕΔ.

Το φαινόμενο αυτό εμφάνισης επαγόμενης ΗΕΔ στο Πηνίο 2, όταν μεταβάλλεται το ρεύμα στο Πηνίο1, ονομάζεται Αμοιβαία Επαγωγή Μ.

$$E_2 = -\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t} = -M\frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad [V] \quad 2.1$$

Όπου  $E_2$ : η επαγόμενη τάση στο Πηνίο2 [V].

$\Phi_2$ : η μεταβολή της μαγνητικής ροής στο Πηνίο2 [W].

$I_1$ : η μεταβολή του ρεύματος στο Πηνίο1 [A].

Η Αμοιβαία Επαγωγή δύο γειτονικών πηνίων εξαρτάται από τις διαστάσεις των δύο πηνίων, τον αριθμό των σπειρών του κάθε πηνίου, την σχετική θέση των αξόνων των δύο πηνίων και την σχετική μαγνητική διαπερατότητα των πυρήνων.

Η ικανότητα σύζευξης  $K$  μεταξύ δύο πηνίων είναι ίση με τον λόγο της μαγνητικής ροής που «κόβει» το ένα πηνίο προς την μαγνητική ροή που παράγει το άλλο πηνίο. Εάν τα πηνία είναι τοποθετημένα πάρα πολύ κοντά έτσι ώστε όλη η μαγνητική ροή του ενός να εισέρχεται στο δεύτερο, τότε  $K=1$ .

Η Αμοιβαία Επαγωγή εκφράζεται συχνά ως συνάρτηση της ικανότητας σύζευξης και των αυτεπαγωγών των πηνίων  $L_1$  και  $L_2$ , έτσι προκύπτει:

$$M = K\sqrt{L_1 L_2} \text{ [H]} \quad 2.2$$

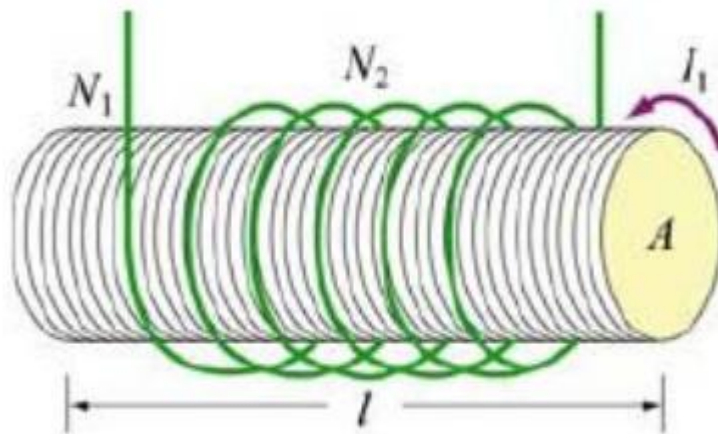
Προσοχή: Ο συντελεστής σύζευξης  $K$  μπορεί να πάρει τιμές από  $0 \leq K \leq 1$ .

Για σιδηρούχους πυρήνες:  $K=0.99$

Για πηνία χωρίς πυρήνα:  $K=0.4$  έως  $0.7$

### 2.2 Αμοιβαία Επαγωγή και Πηνίο Εργασίας.

Με την σχέση 2.2 μπορεί να υπολογιστεί η Αμοιβαία Επαγωγή που αναπτύσσεται μεταξύ δύο πηνίων. Στην περίπτωση που το αντικείμενο προς θέρμανση είναι κυλινδρικό και το πηνίο εργασίας έχει μορφή ελατηρίου (εικόνα Π2.2) τότε η Αμοιβαία Επαγωγή μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 2.3.



**Εικόνα Π2.2: Μεταβολή στο ρεύμα του Πηνίου1 προκαλεί μεταβολή στην μαγνητική ροή του Πηνίου 2.**

$$M = K \frac{N_1 N_2 \mu_0}{l} \text{ [H]} \quad 2.3$$

Όπου  $N_1$ : ο αριθμός των σπειρών στο πηνίο εργασίας.

$N_2$ : ο αριθμός των σπειρών στο αντικείμενο προς θέρμανση.

$\mu_0$ : η μαγνητική διαπερατότητα του κενού του

$A$ : η διατομή του αντικείμενου προς θέρμανση [ $m^2$ ].

$l$ : το μήκος του αντικείμενου προς θέρμανση [ $m$ ].

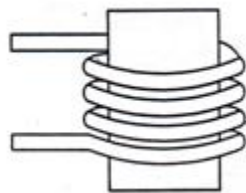
[Π3][Π4][Π5][Π7]

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3- Υπολογισμός Αυτεπαγωγής.

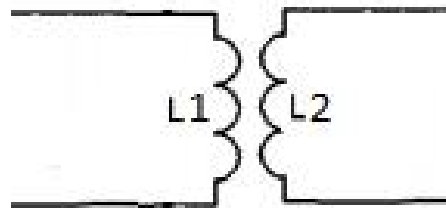
Συνηθίζεται να λέγεται ότι ένας αγωγός έχει αντίσταση για παράδειγμα  $R=5 \Omega$ . Στην πραγματικότητα όμως περιέχει και μία αυτεπαγωγή. Η τιμή της είναι πάρα πολύ μικρή και για τον λόγο αυτό είθισται να αγνοείται. Όταν όμως το μήκος του αγωγού αυξηθεί σημαντικά ή κοντά σε αυτόν βρεθούν άλλοι αγωγοί τότε η επαγωγή αυτή αυξάνεται σημαντικά και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την σωστή λειτουργία του κυκλώματος και τις επιδράσεις που μπορεί να έχει σε αυτό.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η αυτεπαγωγή εξαρτάται από το μήκος του αγωγού. Άλλοι παράμετροι από τους οποίους εξαρτάται είναι η διάμετρος (ή η ακτίνα) του αγωγού, το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος, η μορφή του, η ύπαρξη γειτονικών αγωγών και το πλήθος αυτών κ.α.

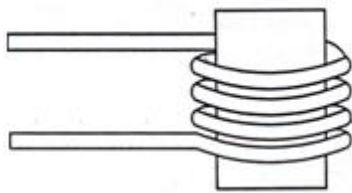
Σκοπός του παρόντος παραρτήματος είναι ο υπολογισμός των αυτεπαγωγών του πηνίου εργασίας και του αντικείμενου προς θέρμανση. Στην εικόνα Π3.1(α) βλέπουμε το αντικείμενο προς θέρμανση μαζί με το πηνίο εργασίας, ενώ στην εικόνα Π3.(β) ακολουθεί ένα ισοδύναμο με τις αυτεπαγωγές από τις οποίες αποτελείται ο συνδυασμός αυτών των στοιχείων.



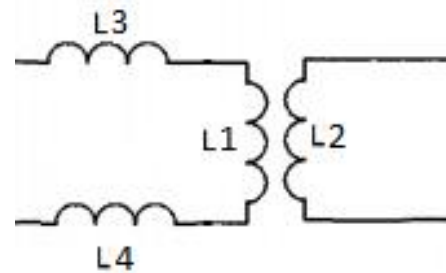
Π3.1(α<sub>1</sub>)



Π3.2(α<sub>1</sub>)



Π3.1(α<sub>2</sub>)



Π3.2(α<sub>2</sub>)

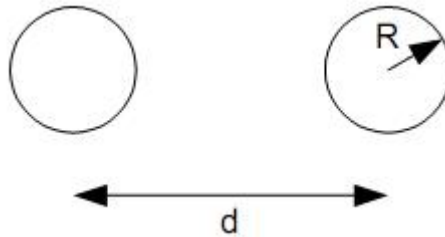
**Εικόνα Π3.1: (α) Αντικείμενο προς θέρμανση και το πηνίο εργασίας, (β) Ισοδύναμο με τις αυτεπαγωγές από τις οποίες αποτελείται ο συνδυασμός αυτών των στοιχείων.**

#### 3.1 Υπολογισμός Αυτεπαγωγών Άκρων.

Παρατηρείται από την εικόνα Π3.1, ότι αν το μήκος των άκρων είναι σημαντικό-αναφορά γίνεται στην παράγραφο 3.4.8- τότε πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και όχι να αγνοείται (εικόνα Π3.1).

Τα άκρα του πηνίου εργασίας μπορούν να θεωρηθούν σαν δύο αγωγοί ο ένας δίπλα στον άλλο, εικόνα Π3.2. Όπου οι ακτίνες τους είναι ίσες και το ρεύμα που τις διαρρέει είναι ίσο κατά μέτρο αλλά αντίθετης φοράς.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η απόσταση  $d$  πρέπει είναι πολύ μεγαλύτερη από την ακτίνα  $R$ . Όσο αφορά την Επαγωγική Θέρμανση αυτό δεν είναι πάντα εφικτό διότι υπάρχει κίνδυνος να συμβεί αυτό που περιγράφεται στην παράγραφο 3.4.8 και αναλύεται με την βοήθεια της εικόνας 3.32. Από την άλλη πλευρά τα άκρα δεν μπορούν να έρθουν πάρα πολύ κοντά. Υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί: Για παράδειγμα αν  $d=2*R$ , τότε τα άκρα είναι σε επαφή μεταξύ τους και έχω βραχυκύκλωμα. Από την άλλη μια αναλογία  $d=3*R$  θεωρείται ικανοποιητική.



**Εικόνα Π3.2: Δύο αγωγοί ο ένας δίπλα στον άλλο.**

Για  $d \gg R$  χρησιμοποιείται η σχέση:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} l \times \ln \frac{d}{R} \quad [\text{H}] \quad 3.1$$

Όπου  $l$ : το μήκος του αγωγού [m].

$d$ : η απόσταση μεταξύ των άκρων από τα κέντρα τους [m].

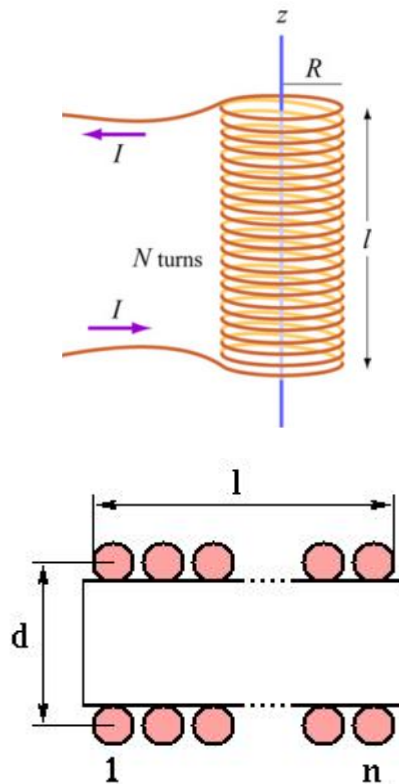
$R$ : η ακτίνα του άκρου [m].

Αν  $d$  συγκρίσιμο με  $R$  τότε χρησιμοποιείται πιο αναλυτική έκφραση:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} l \times \ln \left| \frac{d}{2R} + \sqrt{\left(\frac{d}{2R}\right)^2 - 1} \right| \quad [\text{H}] \quad 3.2$$

Οπότε στην περίπτωση της Επαγωγικής Θέρμανσης η σχέση 3.2 βρίσκει εφαρμογή.

### 3.2 Υπολογισμός Αυτεπαγωγής Πηνίου Εργασίας.



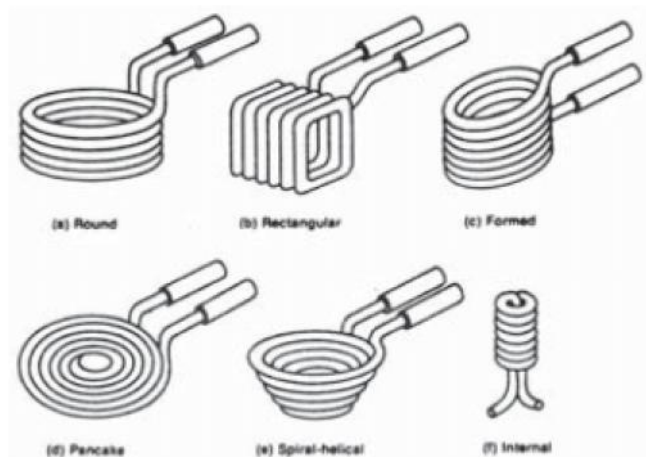
Εικόνα Π3.3: Διαστάσεις Πηνίου Εργασίας.

Στην εικόνα Π3.3 φαίνονται οι διαστάσεις, διάμετρος και μήκος που θα έχει το πηνίο εργασίας-επαγωγός.

Για τον υπολογισμό της Αυτεπαγωγής του Πηνίου Εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλές μέθοδοι, άλλες αναλυτικές και άλλες όχι.

Σημαντικό θεωρείται το πρώτο βήμα: Ο καθορισμός της μορφής του πηνίου. Δεν απαραίτητο όπως σημειώνεται στην παράγραφο 3.4.2 και 3.4.6 το πηνίο εργασίας να είναι της ίδιας μορφής με αυτό που παρουσιάζεται στην εικόνα Π3.3. Μπορεί να είναι κυλινδρικό (εικόνα Π3.3), κυλινδρικό πολλών επιπέδων, πηνίο τηγανίτα (flat) κ.α. Μπορεί επίσης να είναι κυλινδρικό και να αλλάζει το σχήμα (εικόνα Π3.4). Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι, ο τύπος για τον υπολογισμό της Αυτεπαγωγής του πηνίου δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του.





**Εικόνα Π3.4: Διαφορετικές Μορφές Πηνίων Εργασίας.**

Οι τύποι που θα παρουσιαστούν παρακάτω αναφέρονται σε πηνία με μορφή παρόμοια με αυτή της εικόνας Π3.3.

Υπολογίζεται ο λόγος  $d/l$ . Όταν ο λόγος αυτός είναι μεγαλύτερος της μονάδας η διάμετρος του πηνίου είναι μεγαλύτερη του μήκους του και όταν ο λόγος αυτός είναι μικρότερος της μονάδας συμβαίνει το αντίθετο. Από το αποτέλεσμα εξαρτάται ποιος τύπος θα χρησιμοποιηθεί.



**Εικόνα Π3.5: Λόγος  $d/l$**

Όπως είπαμε και προηγουμένως υπάρχουν αρκετοί τύποι με τους οποίους μπορεί να υπολογιστεί η αυτεπαγωγή  $L$  του πηνίου εργασίας. Κάποιοι από τους οποίους παρουσιάζονται παρακάτω:

### Φόρμουλα Wheeler.

$$L_1 = \frac{r^2 \times N^2}{9 \times r + 10 \times l_{wc}} \quad 3.3$$

Όπου  $L_1$ : η αυτεπαγωγή [μH].  
r: η ακτίνα του επαγωγού [ίντσες].  
N: ο αριθμός των σπειρών.  
 $l_{wc}$ : το μήκος του επαγωγού [ίντσες].

$$L_1 = \frac{r^2 \times N^2}{0.0254(9 \times r + 10 \times l_{wc})} \quad 3.4$$

Όπου  $L_1$  σε μH και r,  $l_{wc}$  σε μέτρα.

Η παραπάνω σχέση έχει σφάλμα 1% για λόγους  $d/l < 3$ . Ενώ για  $d/l = 5$ , η παραπάνω σχέση θα δώσει σφάλμα 4% από την πραγματική τιμή.

### Φόρμουλα Esnault- Pelterie.

$$L_1 = 0.1008 \frac{r^2 \times N^2}{l + 0.92r} \quad 3.5$$

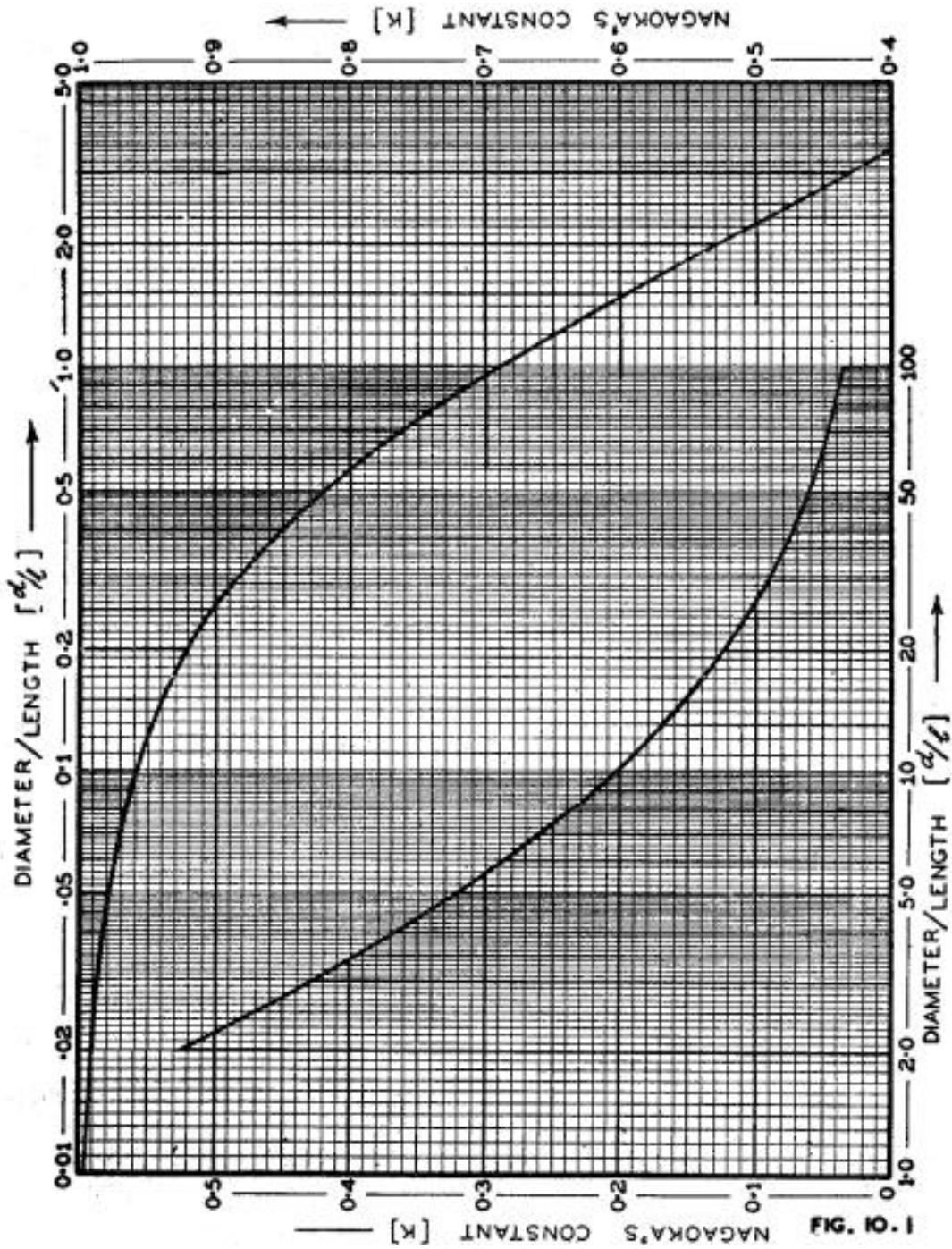
Όπου  $L_1$ : η αυτεπαγωγή [μH]  
r: η ακτίνα του επαγωγού [ίντσες]  
N: ο αριθμός των σπειρών  
l: το μήκος του επαγωγού [ίντσες]

### Φόρμουλα 3.

$$L_1 = N^2 \mu r \mu_0 \frac{\pi \times r^2}{l} K \quad 3.6$$

Όπου  $L_1$ : η αυτεπαγωγή [H].  
r: η ακτίνα του επαγωγού [m].  
N: ο αριθμός των σπειρών.  
l: το μήκος του επαγωγού [m].  
K: Σταθερά της Nagoka, δίδεται από τον Πίνακα 3.1.

Στον πίνακα 3.1 υπάρχουν δύο γραφικές παραστάσεις- καμπύλες. Όταν  $d/l < 1$ , χρησιμοποιείται η πάνω καμπύλη, ενώ όταν  $d/l > 1$  χρησιμοποιείται η κάτω καμπύλη.



Πίνακας 3.1: Σταθερά Κ

Άλλη εκδοχή της παραπάνω σχέσης είναι η εξής :

$$L_1 = 0,10028N^2 \frac{r^2}{l} K \quad 3.7$$

Όπου  $L_1$ : η αυτεπαγωγή [μΗ]

$r$ : η ακτίνα του επαγωγού [ίντσες]

$N$ : ο αριθμός των σπειρών

$l$ : το μήκος του επαγωγού [ίντσες]

$K$ : Σταθερά της Nagoaka, δίδεται από τον Πίνακα 1.

#### Φόρμουλα 4.

Όταν το μήκος του Πηνίου Εργασίας είναι μικρότερο σε σχέση με την διάμετρο του μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$L_1 = \frac{r^2 \times N^2}{(9 - (\frac{r}{5l}))r + 10l} \quad 3.8$$

Όπου  $L_1$ : η αυτεπαγωγή [μΗ].

$r$ : η ακτίνα του επαγωγού [ίντσες].

$N$ : ο αριθμός των σπειρών.

$l$ : το μήκος του επαγωγού [ίντσες].

Η σχέση έχει ακρίβεια 2% για  $d/l > 20$ . Το σφάλμα προσεγγίζει το +2% για  $2.0 < d/l < 3.5$  και για  $d/l = 20$ . Το σφάλμα προσεγγίζει το -2% για  $10 < d/l < 12$ .

Οι παραπάνω φόρμουλες είναι προσεγγίσιμες και όχι αναλυτικές. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την χρήση τους, έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλες οι προϋποθέσεις με βάση τις οποίες έχουν σχεδιαστεί. Σε διαφορετική περίπτωση τα αποτελέσματα θα είναι λανθασμένα. Κάτι τέτοιο θα οδηγήσει και σε περαιτέρω λανθασμένους υπολογισμούς, αφού αποτελούν την βάση για τον υπολογισμό άλλων παραμέτρων της Επαγωγικής Διάταξης.

### 3.3 Υπολογισμός Αυτεπαγωγής Αντικείμενου προς θέρμανσης.

Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η αυτεπαγωγή του αντικείμενου προς θέρμανση παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.6.1- σχέση 2.4, κατά την περιγραφή του 5<sup>ου</sup> μοντέλου.

Ο υπολογισμός γίνεται με βάση την σχέση:

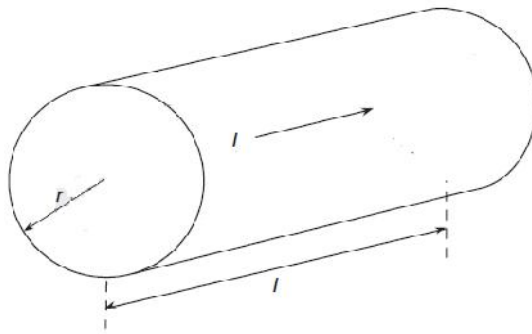
$$L_2 = \frac{L_M}{N} \quad 3.9$$

Όπου  $L_2$ : η αυτεπαγωγή του αντικείμενου προς θέρμανση.

$L_M$ : η αμοιβαία επαγωγή του πηνίου εργασίας και αντικείμενου προς θέρμανση.

$N$ : ο αριθμός των σπειρών του πηνίου εργασίας, ίσος με τον λόγο μετασχηματισμού.

Στην περίπτωση που το αντικείμενο προς θέρμανση είναι συμπαγής κύλινδρος, όπως φαίνεται στην εικόνα Π3.6, η αυτεπαγωγή  $L_2$  μπορεί να υπολογιστεί και από την σχέση 3.10.



Εικόνα Π3.6: Συμπαγής Κύλινδρος

$$L_2 = \frac{\mu_0}{8\pi} \times l \quad [H] \quad 3.10$$

Βέβαια έχει γίνει η υπόθεση ότι το υλικό είναι μη μαγνητικό  $\mu_r=1$  και το ρεύμα είναι ομοιόμορφα κατανομημένο (με άλλα λόγια το επιδερμικό φαινόμενο αγνοείται).

Καλό, λοιπόν, θα είναι να γίνεται έλεγχος για το αν υπάρχουν αυτές οι προδιαγραφές ή μπορούν να δημιουργηθούν. Παραδείγματος χάριν, το υλικό να είναι μη μαγνητικό και το βάθος διείσδυσης  $\delta$  να είναι μεγάλο έτσι ώστε να κατανέμεται το ρεύμα στην μεγαλύτερη επιφάνεια του αντικειμένου προς θέρμανση. Επίσης, έχει αγνοηθεί το γεγονός ότι το πηνίο εργασίας βρίσκεται πάρα πολύ κοντά στον κύλινδρο- αντικείμενο προς θέρμανση.

[π8][π9][π10][π11][ π12][π13]

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4- Υπολογισμός Αντίστασης.

Σκοπός του Παραρτήματος 4 είναι ο υπολογισμός των αντιστάσεων του αντικειμένου προς θέρμανση  $R_L$  και του πηνίου εργασίας  $R_1$ .

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά την Επαγωγική Θέρμανση δημιουργούνται δινορεύματα στο αντικείμενο προς θέρμανση. Εξαιτίας των δινορευμάτων δημιουργούνται θερμικές απώλειες. Σε αυτού του τύπου τις απώλειες (λόγω δινορευμάτων) στηρίζεται η επαγωγική Θέρμανση.

Για τον λόγο αυτό πρέπει το πηνίο εργασίας να διαρρέεται από μεγάλο ρεύμα, είτε να έχει μεγάλη αντίσταση  $R_L$ , είτε συνδυασμός και τον δύο.

### 4.1 Υπολογισμός της Αντίστασης του Αντικείμενου προς Θέρμανση.

Η ισοδύναμη αντίσταση  $R_L$  είναι η αντίσταση του αντικείμενου προς θέρμανση, η οποία αν τοποθετηθεί σε σειρά με το πηνίο εργασίας θα καταναλώσει την ίδια θερμότητα που θα καταναλωθεί όταν τα δινορεύματα ρέουν στο πραγματικό αντικείμενο προς θέρμανση.

Για συμπαγή στρογγυλή ράβδο, η ισοδύναμη αντίσταση  $R_L$  προκύπτει ως συνάρτηση του  $r^2$  και της αντίστασης που προκύπτει εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου (ουσιαστικά ένα στρώμα ίσο με το βάθος διείσδυσης  $\delta$ , στην επιφάνεια του κυλίνδρου) και υπολογίζεται από την σχέση:

$$R_L = \frac{l}{A} N^2 K_R \quad 4.1$$

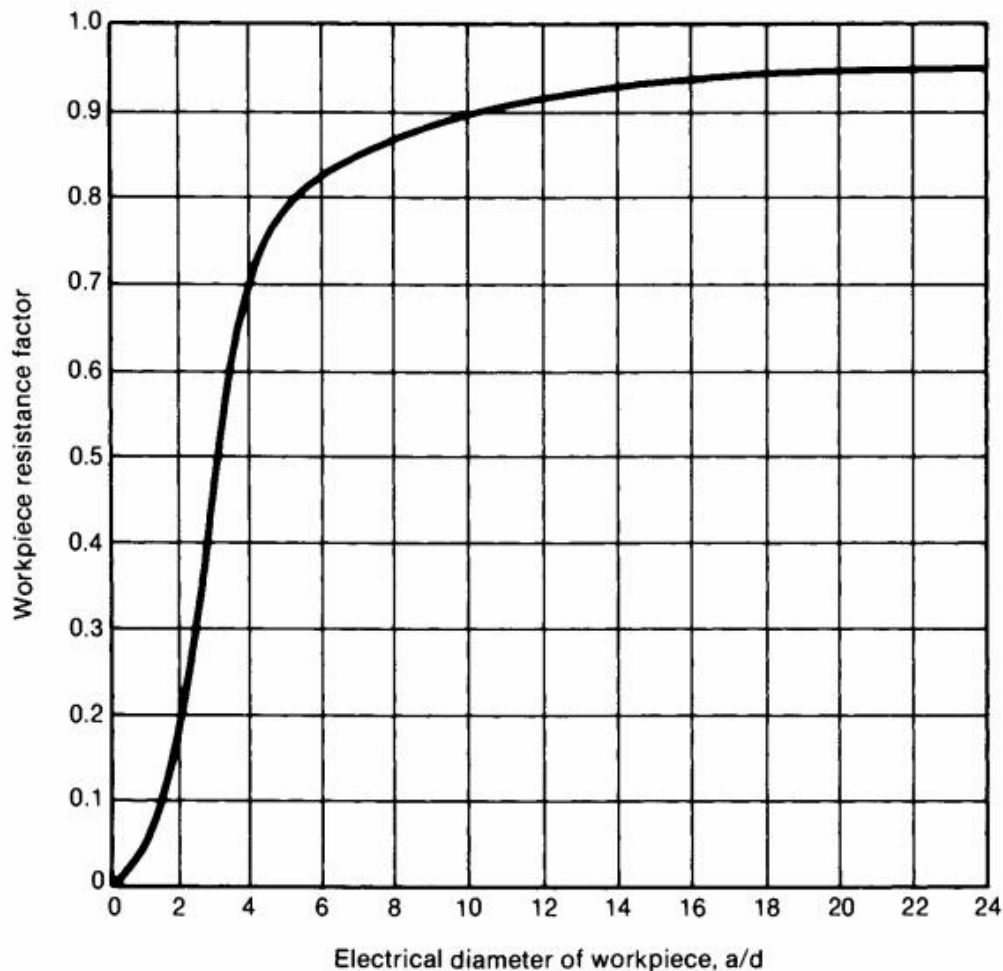
Όπου  $\rho$ : η ειδική αντίσταση του υλικού στην επιθυμητή θερμοκρασία θέρμανσης του αντικείμενου [ $\Omega \text{ m}$ ].

$l$ : η απόσταση που διανύουν τα δινορεύματα ( $2 \cdot \pi \cdot r_{\text{out}}$ ) [m].

$A$ : η διατομή (βάθος διείσδυσης  $\times$  μήκος αντικείμενου προς θέρμανση ( $\delta \times l$ )) [ $\Omega \text{ m}$ ].

$N$ : ο αριθμός των σπειρών.

$K_R$ : συντελεστής διόρθωσης, σχετίζεται με τον λόγο  $\alpha/\delta$  (εξωτερική διάμετρος/ βάθος διείσδυσης) και δίδεται από τον Πίνακα 4.1.



Πίνακας 4.1: Συντελεστής διόρθωσης  $K_R$  συναρτήσεως του λόγου  $a/d$  για συμπαγή στρογγυλή μπάρα.

Ο Πίνακας 4.1 δείχνει ότι ο συντελεστής διόρθωσης  $K_R$  είναι μια συνάρτηση του λόγου  $a/d$ . Παρατηρείται ότι ο συντελεστής διόρθωσης  $K_R$  αυξάνεται ραγδαία για τιμές από  $0 < a/d < 4$ . Για τιμές μεγαλύτερες από 4, παρατηρείται μικρή αύξηση του συντελεστή  $K_R$ , για μεγάλες αυξήσεις του λόγου  $a/d$ .

Ο συντελεστής  $K_R$  μπορεί ακόμη να δείξει ότι, η ηλεκτρική ικανότητα- απόδοση πέφτει σημαντικά όταν ο λόγος  $a/d$  γίνει μικρότερος του 4 για συμπαγή στρογγυλή μπάρα (και μικτότερος από 2.25 για λεπτές πλάκες και ελάσματα)- το  $R_L$  μειώνεται σημαντικά (παράγραφος 3.5) και υπάρχει αλληλοαναιρέση ρευμάτων (τα δινορεύματα που επάγονται από κάθε πλευρά «προσκρούουν» το ένα με το άλλο και επειδή έχουν αντίθετο πρόσημο, εξουδετερώνουν το ένα το άλλο) . Ενώ, αντίθετα, για σημαντική αύξηση του λόγου  $a/d$  δεν μεταβάλλεται σημαντικά η ηλεκτρική απόδοση.

Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης αντίστασης  $R_L$ , για αντικείμενο προς θέρμανση με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά η σχέση 4.1 διαμορφώνεται κατάλληλα (Elements of Induction Heating, S. Zinn, S. L. Semiatin, p 9-25) καθώς εξαρτάται από το σχήμα, το υλικό (ειδική αντίσταση, ειδική μαγνητική διαπερατότητα) κ.α.

**Ιδιαίτερη Προσοχή:** Αν λάβουμε υπόψη την σχέση 4.1 για τον υπολογισμό της αντίστασης του αντικειμένου προς θέρμανση τότε στην σχέση 2.6 (της παραγράφου 2.6.1-

κατά την περιγραφή του μοντέλου N<sup>ο</sup> 5) δεν πρέπει η  $R_L$  να πολλαπλασιαστεί με τον παράγοντα  $A^2$ .

#### 4.2 Υπολογισμός της Αντίστασης του Πηνίου Εργασίας.

Είναι σημαντικό, κατά την κατασκευή της Επαγωγικής Διάταξης να υπολογιστούν και οι απώλειες του πηνίου εργασίας. Συνήθως επιλέγεται να κατασκευάζεται από χαλκό. Ο λόγος είναι ότι ο χαλκός έχει την μικρότερη ειδική αντίσταση  $\rho$  σε σχέση με άλλα μέταλλα που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του πηνίου εργασίας.

Η αντίσταση  $R_1$  του πηνίου εργασίας, λαμβάνοντας υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$R_1 = \frac{L}{A_1} \quad 4.2$$

Όπου  $\rho$ : η ειδική αντίσταση του υλικού [ $\Omega \text{ m}$ ].

$L$ : το μήκος του πηνίου εργασίας [ $\text{m}$ ].

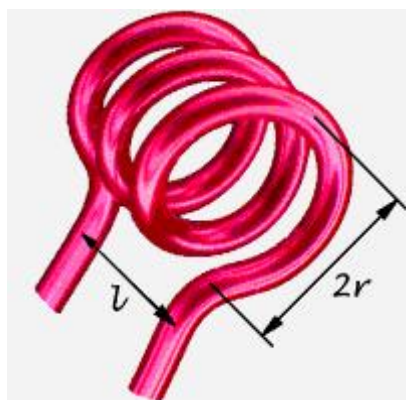
$A_1$ : η ενεργός διατομή του πηνίου εργασίας

$$(A_1 = \pi \times r_{out}^2 - \pi \times (r_{out} - r_\delta)^2) \text{ [m}^2\text{]}.$$

$r_{out}$ : η εξωτερική ακτίνα του πηνίου εργασίας [ $\text{m}$ ].

$r_\delta$ : η ακτίνα που προκύπτει αν από την εξωτερική ακτίνα του πηνίου εργασίας αφαιρεθεί το βάθος διείσδυσης  $\delta$  [ $\text{m}$ ].

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι το μήκος  $L$  του πηνίου εργασίας δεν είναι ίσο με  $l$ , όπως φαίνεται στην εικόνα Π4.1



**Εικόνα Π4.1: Μήκος πηνίου εργασίας για υπολογισμό της αντίστασης του διαφορετικο από  $l$ .**

Το μήκος με το οποίο πρέπει να υπολογιστεί η αντίσταση  $R_1$ , προκύπτει αν «ξεδιπλωθεί» το πηνίο εργασίας. Ακόμη και αν το μήκος των άκρων δεν είναι σχετικά μεγάλο (Παράρτημα 3 -παράγραφος 3.1) καλό θα ήταν να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς για να εξασφαλιστεί όσο τον δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς. Για ευκολία και μείωση των πράξεων, μπορεί το μήκος των άκρων να



προστεθεί στο «ξετυλιγμένο» μήκος του πηνίου εργασίας. Έτσι η σχέση 4.2 μπορεί να γίνει:

$$R_1 = \rho \frac{(L + L_{\text{κρων}})}{A_1} \quad 4.3$$

Όπου  $\rho$ : η ειδική αντίσταση του υλικού [ $\Omega \text{ m}$ ].

$L_{\text{κρων}}$ : το μήκος των άκρων του πηνίου εργασίας [m].

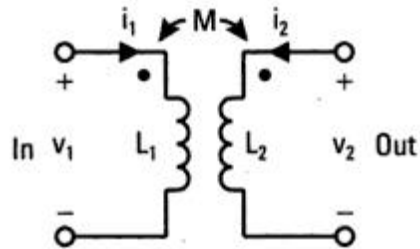
$A_1 = \pi \cdot (r_{\text{out}})^2 - \pi \cdot (r_{\text{out}} - \delta)^2$ : Διατομή Αγωγού Πηνίου Εργασίας [ $\text{m}^2$ ].

Τέλος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αν το σύστημα της Επαγωγικής Διάταξης θα περιλαμβάνει σύστημα ψύξης του πηνίου εργασίας. Στις περιπτώσεις που το σύστημα ψύξης παραλείπεται, η ειδική αντίσταση του επαγωγού θα αυξηθεί και θα πρέπει να υπολογιστεί εκ νέου η νέα τιμή της για να γίνουν με βάση αυτή οι υπολογισμοί της αντίστασης  $R_1$ .

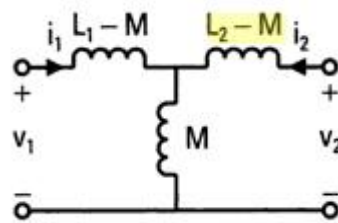
[27]

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5- Ισοδύναμο Μετασχηματιστή.

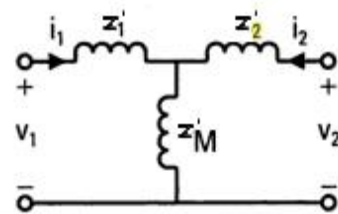
Το ισοδύναμο του μετασχηματιστή (εικόνα Π5.1) και οι σχέσεις που το περιγράφουν ακολουθούν και είναι οι εξής:



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα Π5.1: Ισοδύναμο Μετασχηματιστή.

$$Z'_1 = R_1 + j(X_{L1} - AX_M) \quad 5.1$$

$$Z'_M = jAX_M \quad 5.2$$

$$Z'_2 = A^2R_2 + j(A^2X_{L2} - AX_M) \quad 5.3$$

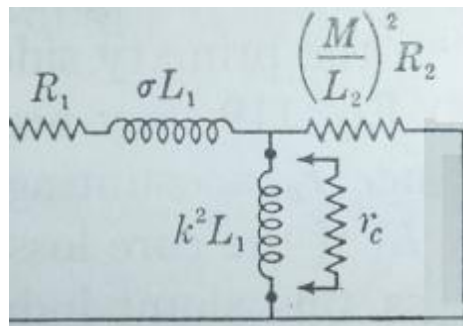
Όταν όμως ισχύει  $\frac{M}{L_2} = A$  (όπως δηλαδή συμβαίνει στην παράγραφο 2.6.1 κατά την μοντελοποίηση N<sup>ο</sup> 5 ) τότε οι σχέσεις 5.1, 5.2 και 5.3 μετασχηματίζονται σε 5.4, 5.5 και 5.6 αντίστοιχα.

$$Z'_1 = R_1 + j\sigma X_{L1} \quad 5.4$$

$$Z'_M = jk^2 X_M \quad 5.2$$

$$Z'_2 = A^2 R_2 + j0 = \left(\frac{M}{L_2}\right)^2 R_2 \quad 5.3$$

Και το ισοδύναμο μοντέλο του μετασχηματιστή μετατρέπεται όπως φαίνεται παρακάτω:



(α)

Εικόνα Π5.2: Ισοδύναμο Μετασχηματιστή για  $A=M/L_2$ .

## Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Ε. Σαββάκης 2002, Τεχνολογία Υλικών- Υλικά τεχνολογικών εφαρμογών, 2<sup>η</sup> έκδοση. Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος «Ιών».
- [2] Stephen J. Charman 2003, Ηλεκτρικές Μηχανές AC- DC, 3η έκδοση. Θεσσαλονίκη: Εκδοτικός Όμιλος «Τζιόλα».
- [3] [http://en.wikipedia.org/wiki/Skin\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect).
- [4] Κ. Γ. Σιδεράκης 2010, Ηλεκτροτεχνικές Εφαρμογές- Σημειώσεις Διαλέξεις.
- [5] Han Phyong Wai, Soe Sandar Aung και Thidar Win, Work Coil Design used in Induction Hardening Machine. IEEE Transactions on Magnetics, p. 352÷356.
- [6] <http://el.wikipedia.org/wiki/Μετασηματιστής>.
- [7] R. A. Serway 1990, Physics for Scientists & Engineers, 3<sup>η</sup> έκδοση. Αθήνα: Βιβλιοπωλείο Κορφιάτη- Κεντρική διάθεση.
- [8] <http://el.wikipedia.org/wiki/Χάλυβας>.
- [11] [http://www.m3.tuc.gr/.../THERMIKES\\_KATERGASIESw](http://www.m3.tuc.gr/.../THERMIKES_KATERGASIESw).
- [12] [http://courseware.mech.ntua.gr/.../Epifaniakes\\_katergasies](http://courseware.mech.ntua.gr/.../Epifaniakes_katergasies).
- [13] [http://www.civil.auth.gr/emv/files/Paparizou\\_Xaidw.pdf](http://www.civil.auth.gr/emv/files/Paparizou_Xaidw.pdf).
- [14] <http://portal.tee.gr/portal/page/.../kelllepidrasiThermokrSeldiotites.pdf>.
- [15] [http://en.wikipedia.org/wiki/Induction\\_heating](http://en.wikipedia.org/wiki/Induction_heating).
- [16] <http://www.richieburnett.co.uk/indheat.html>.
- [17] Richard E. Haimbaugh 2001, Practical Induction Heating. Αμερική: Εκδοτικός Όμιλος «ASM International».
- [18] S. Zinn and S.L. Semiatin, Coil design and fabrication: basic design and Modifications, tech note 1.
- [19] S. Zinn and S.L. Semiatin, Coil design and fabrication: fabrication principles, tech note 3.
- [20] Han Phyong Wai, Soe Sandar Aung και Thidar Win, Design Calculation and Performance Testing of Heating Coil in Induction Surface Hardening Machine, IEEE Transactions on Magnetics, p. 416÷420.
- [21] Alexander Boadi, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka and Masato Enokizono, Designing of Suitable Construction of High Frequency Induction Heating Coil by Using Finite- Element Method, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, NO. 10, October 2005, p. 416÷420.
- [22] Alfred Muhlbauer, Axel Von Starck, Carl Kramer, Handbook of Thermoprocessing Technologies. Έτος Έκδοσης 2007, Εκδοτικός οίκος «Vulkan- Verlag GmbH».

- [23] Francois Forest, Eric Laboure, Francois Costa, Member, IEEE, and Jean Yves. Gaspard, Principle of a Multi-Load/Single Converter System for Low Power Induction Heating, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 15, NO. 2, MARCH 2000.
- [24] Julio Walter and Gerardo Ceglia , Using Numerical Methods to Design and Control Heating Induction Systems.
- [25] Andras Kelemen and Nimrod Kutasi , Modelling and Analysis of the Induction-Heating Converters .
- [26] Jung-gi Lee, Sun-kyoung Lim, Kwang-hee Nam and Dong-ik Choi, DESIGN METHOD OF AN OPTIMAL INDUCTION HEATER CAPACITANCE FOR MAXIMUM POWER DISSIPATION AND MINIMUM POWER LOSS CAUSED BY ESR.
- [27] S. Zinn and S.L. Semiatin 1988, Elements of Induction Heating- Design, Control, and Applications. Εκδοτικός οίκος «ASM International®».
- [28] G. Manuel and MTE Khan, Design of an Induction Heating Domestic Water Heater System. Cape Peninsula University of Technology, Bellville, South Africa.
- [29] Ned Mohan, Tore M. Undeland and William P. Robbins, Ηλεκτρονικά Ισχύος- Μετατροπείς, Εφαρμογές, Σχεδίαση. Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε.
- [30] Jose M. Espi Huerta, Enrique J. Dede Garcia Santamaria, Rafael Garcia Gil and Jaime Castello Moreno, Design of the L-LC Resonant Inverter for Induction Heating Based on Its Equivalent SRI. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 54, NO. 6, DECEMBER 2007.
- [31] J. M. Espi & E. J. Dede, Design considerations for three element L-LC resonant inverters for induction heating.

### Βιβλιογραφία Παραρτημάτων

- [Π1] <http://www.m3.tuc.gr/.../ΥΛΙΚΑ/.../SIDHROUXA KRAMATAw...>
- [Π2] <http://courseware.mech.ntua.gr/.../Biomixanika kramata Xalibes>.
- [Π3] U.A. Bakshi, A. V. Bakshi, Circuits and Networks, 1η έκδοση. Εκδοτικός Όμιλος «Technical Publications Pune».
- [Π5] <http://www.cedengineering.com/upload/Inductance.pdf>.
- [Π6] <http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/coursenotes/modules/guide11.pdf>.
- [Π7] [http://www.allaboutcircuits.com/vol\\_2/chpt\\_9/1.html](http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_9/1.html).

- [Π8] Clayton R. Paul, Inductance Loop and Partial, Copyright 2010. New Jersey:Εκδοτικός Όμιλος «John Wiley and Sons, Inc ».
- [Π9] <http://paleoelectronics.com/RDH4/CHAPTR10.PDF>.
- [Π10] Thomson, Inductance Calculation Techniques (Part II), Δεκέμβριος 1999
- [Π11] H. Naoga, The inductance Coefficients of Solenoids. Journal of the College of Science, Imperial University, Japan. Vol XXVII., Article 6.
- [Π12] [http://www.g3ynh.info/zdocs/magnetics/part\\_1.html](http://www.g3ynh.info/zdocs/magnetics/part_1.html).
- [Π13] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Thomas Overbye, Power System Analysis and Design, 5η έκδοση.













