

---

# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

Αρχές σχεδίασης μετασχηματιστών ισχύος για εφαρμογές σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Φοιτητής: ΚΕΝΤΡΟ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ  
ΑΜ: 51204268

Επιβλέπων Καθηγητής: ΤΣΕΚΟΥΡΑΣ Ι. ΓΕΩΡΓΙΟΣ  
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ - ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2020





---

# DIPLOMA THESIS

---

Design principles for power transformers with emphasis to ship power system applications



UNIVERSITY OF WEST  
FACULTY OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Student: KENTRO DIMITRIOS  
Registration Number: 51204268

Supervisor: TSEKOURAS J. GEORGIOS  
ASSISTANT PROFESSOR

ATHENS - EGALEO, SEPTEMBER 2020





**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**Κέντρο Δημήτριος, Σεπτέμβριος, 2020**

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### **ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπόγραφα ότι η παρούσα εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα αποκλειστικά και ότι είμαι ο αποκλειστικός συγγραφέας του κειμένου της.

Η εργασία μου δεν προσβάλλει οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας ή προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής ή λογοκλοπής.

Κάθε βοήθεια που έλαβα για την ολοκλήρωση της εργασίας είναι αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στο κείμενό της. Ειδικότερα, έχω αναφέρει ευδιάκριτα μέσα στο κείμενο και με την κατάλληλη παραπομπή όλες τις πηγές δεδομένων, κώδικα προγραμματισμού Η/Υ, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης, και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Επιπλέον, όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης κατά τα διεθνή πρότυπα.

Τέλος δηλώνω ενυπόγραφα ότι αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ημερομηνία: 18 Σεπτεμβρίου 2020

Κέντρο Δημήτριος





## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από το σπουδαστή Κέντρο Δημήτριο του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής κατά το ακαδημαϊκό έτος 2019 – 2020 υπό την επίβλεψη του καθηγητή Δρ. Γεώργιο Ι. Τσεκούρα.

Στο κύριο Τσεκούρα οφείλω τις θερμές ευχαριστίες μου για την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της διεκπεραίωσης της συγκεκριμένης διπλωματικής όπως επίσης και για όλες τις γνώσεις που μου προσέφερε μέσω κάθε λεπτού της διδασκαλίας του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου όπως επίσης και όλους τους φίλους μου που έδειξαν κατανόηση και μου προσέφεραν την υποστήριξη τους.



## Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αφορά τις αρχές διαστασιολόγησης μετασχηματιστή ισχύος με κλασικές μεθοδολογίες που καλύπτουν τόσο το ηλεκτρικό μέρος, όσο και το μηχανολογικό (μηχανική αντοχή, θερμική καταπόνηση), με σκοπό να αξιοποιηθεί σε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου ή λιμένος που διασυνδέεται με την τροφοδότηση του πλοίου από ξηρά. Περιλαμβάνει αντίστοιχη αριθμητική εφαρμογή και ανάπτυξη κώδικα σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, στα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης των πλοίων, στη χρήση των μετασχηματιστών σε πλοία και λιμένες και αναφέρονται οι ιδιαιτερότητες των μετασχηματιστών σε τέτοιες εφαρμογές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται η βασική θεωρία και οι αρχές λειτουργίας μονοφασικών και τριφασικών μετασχηματιστών. Πραγματοποιείται η ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος ενός μετασχηματιστή μαζί με τον υπολογισμό των βασικών μεγεθών του. Παρουσιάζονται όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά που φέρει ένας μετασχηματιστής, επεξηγούνται οι διαφορετικοί τύποι μετασχηματιστών όπως επίσης και οι δοκιμές στις οποίες υπόκεινται αυτοί κατά την παραγωγή τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της κλασικής μεθόδου σχεδίασης του μετασχηματιστή. Επεξηγούνται όλα τα στάδια κατά το σχεδιασμό του και όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διαδικασία αυτή. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση σε κατασκευαστικά και ενεργειακά ζητήματα, όπως η διαμόρφωση των κύριων τμημάτων που απαρτίζουν το μετασχηματιστή, η θερμική μελέτη αυτού, οι αντοχές σε υπερτάσεις, η τεχνολογία των μονωτικών υλικών κα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία από τις πολλαπλές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση ενός μετασχηματιστή. Συγκεκριμένα αναπτύσσονται βήμα βήμα όλα τα υπολογιστικά βήματα, επεξηγούνται όλοι οι παράμετροι οι οποίοι επηρεάζουν οποιαδήποτε υπολογιστική σχέση εντός της μεθόδου και επεξηγούνται όλοι οι πιθανοί περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται για την εύρεση εφικτής λύσης.

Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελείται από την ανάπτυξη κώδικα σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB της διαδικασίας βελτιστοποίησης που παρουσιάζεται στο τέταρτο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα με την επιλογή μόλις μερικών παραμέτρων και την εκτέλεση του, ο κώδικας δημιουργεί πίνακα αποτελεσμάτων, που εμπεριέχει σημαντικές παραμέτρους του μετασχηματιστή, με όλες τις εφικτές λύσεις ταξινομημένες κατά αύξουσα σειρά με γνώμονα το συνολικό κόστος κατοχής. Για την επίδειξη της ικανότητας του συγκεκριμένου κώδικα εκτελούνται τρία διαφορετικά παραδείγματα για τρεις διαφορετικές ομάδες παραμέτρων που αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικούς μετασχηματιστές και εμφανίζονται – σχολιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα τους.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση στα συμπεράσματα των προηγούμενων κεφαλαίων, παρουσιάζονται συνοπτικά νέες τεχνολογίες μετασχηματιστών και αναπτύσσονται περιοχές για περαιτέρω μελέτη – έρευνα πάνω στο θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος η εργασία συμπληρώνεται με τη βιβλιογραφία και το παράρτημα το οποίο εμπεριέχει αναλυτικά τον αναπτυχθέντα κώδικα που χρησιμοποιήθηκε στο πέμπτο κεφάλαιο.

## Λέξεις – κλειδιά

Μετασχηματιστές, συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων, αρχές σχεδίασης, βελτιστοποίηση, MATLAB.



## Abstract

The object of the present thesis concerns the principles of power transformer dimensioning with classic methodologies that cover both the electrical part and the mechanical part (mechanical strength, thermal stress), in order to be utilized in a ship or port power system that is interconnected with its power supply. ship from land. Includes a corresponding arithmetic application and code development in MATLAB programming environment.

The first chapter is an introduction to power systems, ship propulsion systems, the use of transformers in ships and ports and mentions the specifics of transformers in such applications.

The second chapter develops the basic theory and operating principles of single-phase and three-phase transformers. The analysis of the equivalent circuit of a transformer is performed together with the calculation of its basic quantities. All the important characteristics of a transformer are presented, the different types of transformers are explained as well as the tests to which they are subjected during their production.

The third chapter analyzes the classic transformer design method. All the steps during its design and all the parameters that affect this process are explained. Special emphasis is given to construction and energy issues, such as the configuration of the main parts that make up the transformer, its thermal study, resistance to surges, the technology of insulation materials, etc.

The fourth chapter presents one of the multiple processes used to optimize a transformer. Specifically, all the computational steps are developed step by step, all the parameters that affect any computational relationship within the method are explained and all the possible constraints that must be met to find a feasible solution are explained.

The fifth chapter consists of the development of code in MATLAB programming environment of the optimization process presented in the fourth chapter. More specifically, by selecting just a few parameters and executing it, the code creates a scoreboard, which contains important parameters of the transformer, with all the possible solutions sorted in ascending order based on the total cost of ownership. To demonstrate the capability of this code, three different examples are run for three different parameter groups corresponding to three different transformers and their respective results are displayed - commented on.

The sixth chapter reviews the conclusions of the previous chapters, briefly presents new transformer technologies and develops areas for further study - research on the topic of this thesis.

Finally, the work is supplemented with the bibliography and the annex which contains in detail the developed code used in the fifth chapter.

## Keywords

Transformers, ship electric power systems, design principles, optimization, MATLAB.





## Περιεχόμενα

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

#### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΛΙΜΕΝΩΝ

1.1	Εισαγωγή στη σχεδίαση συστημάτων πρόωσης και συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων .....	1
1.2	Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....	1
1.2.1	Εισαγωγή.....	1
1.2.2	Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας .....	1
1.3	Σύστημα πρόωσης.....	3
1.4	Μετασχηματιστής και ιδιαιτερότητες του στην εφαρμογή του σε πλοία και λιμένες ...	4
1.5	Δομή Διπλωματικής.....	5

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

#### ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

2.1	Σκοπός και χρήση μετασχηματιστών.....	7
2.2	Βασική δομή μετασχηματιστή .....	8
2.2.1	Δομικά στοιχεία μετασχηματιστή .....	8
2.2.2	Κατηγοριοποίηση μετασχηματιστών .....	12
2.3	Λειτουργία μετασχηματιστή εν κενώ.....	16
2.3.1	Εύρεση λόγου μετασχηματισμού .....	16
2.3.2	Ρεύμα κενής λειτουργίας και ρεύμα διέγερσης.....	19
2.4	Ιδανικός μετασχηματιστής.....	21
2.5	Πραγματικός μετασχηματιστής .....	25
2.5.1	Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα .....	25
2.5.2	Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα .....	26
2.5.3	Υπολογισμός ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης πραγματικού μετασχηματιστή ....	29
2.6	Χαρακτηριστικά λειτουργίας μετασχηματιστή.....	31
2.6.1	Εκατοστιαία πτώση τάσης μετασχηματιστών .....	31
2.6.2	Τάση βραχυκύκλωσης.....	32
2.6.3	Βαθμός απόδοσης μονοφασικού μετασχηματιστή.....	33
2.6.4	Βαθμός απόδοσης ενέργειας .....	35
2.6.5	Υπερφόρτιση .....	36
2.7	Πειραματικός προσδιορισμός λειτουργικών χαρακτηριστικών μετασχηματιστή .....	37
2.7.1	Εισαγωγή.....	37
2.7.2	Δοκιμή ανοικτοκύκλωσης (No-Load Loss Test).....	37
2.7.3	Δοκιμή βραχυκύκλωσης (Load Loss Test) .....	39
2.7.4	Δοκιμή προσδιορισμού πολικότητας (Polarity Test) .....	40

2.7.5	Λοιπές Δοκιμές Μετασχηματιστή.....	42
2.8	Μεταβατική συμπεριφορά μετασχηματιστή.....	44
2.8.1	Εισαγωγή.....	44
2.8.2	Υπερένταση κατά τη βραχυκύκλωση μετασχηματιστή.....	44
2.8.3	Ηλέκτριση μετασχηματιστή – Ένταση Παρεμβολής.....	45
2.8.4	Υπερτάσεις.....	46
2.9	Παραλληλισμός μονοφασικού μετασχηματιστή.....	47
2.9.1	Εισαγωγή – Προνόμια παραλληλισμού μετασχηματιστών.....	47
2.9.2	Συνθήκες – Απαιτήσεις για την παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστών.....	47
2.10	Ειδικοί τύποι μονοφασικού μετασχηματιστή.....	49
2.10.1	Αυτομετασχηματιστής.....	49
2.10.2	Μετασχηματιστής τάσης.....	50
2.10.3	Μετασχηματιστής έντασης.....	51
2.11	Σύνδεση μονοφασικών μετασχηματιστών σε τριφασικά δίκτυα.....	51
2.11.1	Εισαγωγή.....	51
2.11.2	Είδη συνδέσεων μονοφασικών μετασχηματιστών σε τριφασικά δίκτυα.....	52
2.12	Τριφασικοί μετασχηματιστές.....	55
2.12.1	Εισαγωγή.....	55
2.12.2	Συμβολισμός ακροδεκτών.....	55
2.12.3	Συνδεσμολογίες τριφασικού μετασχηματιστή.....	55
2.13	Ειδικοί τύποι τριφασικού μετασχηματιστή.....	59
2.14	Ονομαστικά στοιχεία μετασχηματιστή.....	60
2.15	Μονωτικά υλικά μετασχηματιστή.....	64
2.16	Βλάβες μετασχηματιστή.....	65
2.16.1	Αιτία βλαβών μετασχηματιστή.....	65
2.16.2	Αποφυγή βλαβών μετασχηματιστή.....	66
2.17	Προδιαγραφές μετασχηματιστών – Συμπεράσματα.....	66
2.18	Επισκόπηση.....	67

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

#### ΚΛΑΣΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ68

3.1	Τυποποίηση σειράς παραγωγής - Πλαίσια.....	68
3.1.1	Εισαγωγή.....	68
3.1.2	Πλαίσια.....	69
3.2	Θερμικό Όριο.....	70
3.3	Ισχύς και Τάση Εξόδου.....	73
3.3.1	Συσχέτιση ενεργειακών μεγεθών και κύριων διαστάσεων μετασχηματιστή.....	73
3.3.2	Παράγοντες οριοθέτησης των μεγεθών μετασχηματιστή.....	74

3.4	Υπολογισμός Απωλειών .....	76
3.5	Προκαταρτική σχεδίαση .....	77
3.5.1	Βασικοί παράμετροι .....	77
3.5.2	Εξάρτηση και αναλογία πολλαπλών παραμέτρων .....	78
3.6	Διαμόρφωση Πυρήνα.....	79
3.6.1	Υπολογισμός διατομής πυρήνα, βημάτων ελασμάτων και συντελεστή πλήρωσης.	79
3.6.2	Υπολογισμός βάρους πυρήνα.....	81
3.6.3	Χαρακτηριστικά Σιδηρομαγνητικού υλικού .....	81
3.6.4	Τύποι πυρήνων μονοφασικών, τριφασικών μετασχηματιστών και τύποι ενώσεων	83
3.6.5	Υπολογισμός απωλειών κενής λειτουργίας .....	85
3.7	Διαμόρφωση τυλιγμάτων .....	85
3.7.1	Εισαγωγή .....	85
3.7.2	Δομές τυλιγμάτων .....	86
3.7.3	Υπολογισμός βασικών παραμέτρων.....	90
3.8	Μηχανικές δυνάμεις.....	95
3.8.1	Εισαγωγή .....	95
3.8.2	Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης .....	96
3.8.3	Αναπτυσσόμενες δυνάμεις βραχυκυκλώσεως – μηχανικές καταπονήσεις .....	97
3.9	Ρεύμα μαγνήτισης .....	102
3.9.1	Εισαγωγή .....	102
3.9.2	Ρεύμα κενής λειτουργίας και αρμονικές .....	102
3.10	Θερμική μελέτη.....	107
3.10.1	Εισαγωγή .....	107
3.10.2	Ροή θερμότητας .....	107
3.10.3	Υπολογισμός διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ τυλιγμάτων και λαδιού.....	109
3.10.4	Υπολογισμός διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ λαδιού και περιβάλλοντος.....	112
3.10.5	Μεταβατικό - παροδικό στάδιο θερμικής φόρτισης μετασχηματιστή.....	113
3.11	Δεξαμενή ψύξης.....	114
3.12	Τελική διαμόρφωση μετασχηματιστή.....	115
3.13	Θόρυβος μετασχηματιστών .....	117
3.14	Καταπονήσεις από υπερτάσεις και μονώσεις .....	118
3.14.1	Εισαγωγή .....	118
3.14.2	Δοκιμές αντοχής μόνωσης μετασχηματιστή.....	118
3.14.3	Επίδραση κρουστικών τάσεων στη μόνωση.....	119
3.14.4	Μέσα ηλεκτρικής μόνωσης μετασχηματιστών.....	122
3.15	Απαιτήσεις εξαρτημάτων μετασχηματιστών .....	124

3.15.1	Εισαγωγή .....	124
3.15.2	Σύστημα βηματικής μεταβολής τάσης χωρίς φορτίο .....	124
3.15.3	Σύστημα βηματικής μεταβολής τάσης υπό φορτίο .....	125
3.16	Ειδικοί μετασχηματιστές.....	126
3.16.1	Αυτομετασχηματιστής.....	126
3.16.2	Μετασχηματιστής με τρία τυλίγματα .....	128
3.16.3	Τριμνοφασικοί μετασχηματιστές.....	129
3.16.4	Μετασχηματιστής ουδετερώσεως – κόμβου .....	130
3.16.5	Μετασχηματιστής γειώσεως.....	130
3.17	Συμπεράσματα .....	131

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

##### ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΚΛΑΣΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

4.1	Εισαγωγή.....	132
4.2	Πρόβλημα βελτιστοποίησης .....	132
4.2.1	Εισαγωγή.....	132
4.2.2	Αντικειμενικές συναρτήσεις.....	132
4.2.3	Περιορισμοί.....	134
4.3	Μεθοδολογία.....	137
4.3.1	Εισαγωγή – παράμετροι σχεδιασμού .....	137
4.3.2	Αλγόριθμος.....	142
4.3.3	Υπολογισμός τάσης ανά στροφής τυλίγματος και πάχος στηρίγματος του πυρήνα 144	
4.3.4	Υπολογισμός του πάχους μόνωσης μεταξύ των στρώσεων των αγωγών των τυλιγμάτων.....	145
4.3.5	Υπολογισμός διαστάσεων τυλιγμάτων και πυρήνα .....	145
4.3.6	Υπολογισμός μάζας πυρήνα και απωλειών λειτουργίας εν κενώ .....	149
4.3.7	Υπολογισμός του επαγωγικού μέρους της τάσης βραχυκύκλωσης .....	151
4.3.8	Υπολογισμός των απωλειών χαλκού.....	155
4.3.9	Υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσης .....	157
4.3.10	Υπολογισμός του μήκους τυλιγμάτων.....	157
4.3.11	Υπολογισμός διαστάσεων δεξαμενής.....	158
4.3.12	Υπολογισμός ανύψωσης θερμοκρασίας των τυλιγμάτων και του λαδιού.....	158
4.3.13	Υπολογισμός απαγωγής θερμότητας.....	160
4.3.14	Υπολογισμός της μάζας των μονωτικών υλικών.....	162
4.3.15	Υπολογισμός της μάζας των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού.....	163
4.3.16	Υπολογισμός της μάζας του λαδιού .....	164
4.3.17	Υπολογισμός της μάζας των μεταλλικών φύλλων .....	164

4.3.18	Υπολογισμός της μάζας των αυλακωμένων πάνελ δεξαμενής.....	165
4.3.19	Υπολογισμός του κόστους των κύριων υλικών.....	165
4.3.20	Υπολογισμός του κόστους κατοχής.....	165
4.4	Συμπεράσματα .....	166

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

5.1	Εισαγωγή – εφαρμογή για μετασχηματιστή λαδιού για λιμενική εγκατάσταση .....	167
5.2	Χαρακτηριστικά και ανάπτυξη κώδικα MATLAB.....	167
5.3	Προσομοίωση ενδεικτικού μετασχηματιστή .....	168
5.4	Σημεία ενδιαφέροντος.....	173
5.5	Συμπεράσματα .....	173

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1	Μετασχηματιστές νέας τεχνολογίας .....	174
6.1.1	Μετασχηματιστής με πυρήνα άμορφου σιδήρου .....	174
6.1.2	Υπεραγώγιμοι Μετασχηματιστές.....	174
6.2	Τελικά συμπεράσματα .....	175
6.3	Περιοχές για περαιτέρω έρευνα .....	176

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	.....	178
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	.....	180

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 2.1:</b> Αποδεκτή διάρκεια υπερφόρτισης με βάση το ποσοστό της, το συνεχές φορτίο πριν την υπερφόρτιση και την θερμοκρασία του λαδιού κατά την εκκίνηση της .....	36
<b>Πίνακας 2.2:</b> Τάσεις διηλεκτρικής δοκιμής έναντι των ονομαστικών τάσεων λειτουργίας .....	43
<b>Πίνακας 2.3:</b> Ενδεικτικές τιμές σφαλμάτων τάσεις και γωνίας για διάφορες κλάσεις μετασχηματιστών τάσης .....	51
<b>Πίνακας 2.4:</b> Πίνακας απωλειών μετασχηματιστή άνευ φορτίου κατά CENELEC 1992 .....	61
<b>Πίνακας 2.5:</b> Κλάσεις μόνωσης και μέγιστες συνεχόμενες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας για μηχανές κατά VDE 530 .....	62
<b>Πίνακας 2.6:</b> Πίνακας απωλειών μετασχηματιστή υπό πλήρη φορτίο κατά CENELEC 1992 .....	62
<b>Πίνακας 2.7:</b> Κλάσεις θερμοκρασίας που αντιστοιχούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες έναυσης σε εκρηκτικό περιβάλλον .....	64
<b>Πίνακας 2.8:</b> Αναλυτική περιγραφή του συμβολισμού IP κατά DIN 40050 .....	65
<b>Πίνακας 3.1:</b> Αντιστοιχία τύπου πλαισίου μετασχηματιστή με την ισχύ λειτουργίας του .....	69
<b>Πίνακας 3.2:</b> Θερμικά όρια για διαφορετικές κλάσεις μονώσεων σε μετασχηματιστή ξηρού τύπου με βάση την δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας της IEC 60076-11 .....	71
<b>Πίνακας 3.3:</b> Ενδεικτικό εύρος ανοχών κατά το σχεδιασμό του μετασχηματιστή .....	79
<b>Πίνακας 3.4:</b> Καθορισμός διαμέτρου πυρήνα και αγωγών λαδιού με βάση το πλήθος βημάτων των ελασμάτων .....	80
<b>Πίνακας 3.5:</b> Συντελεστής πλήρωσης $K_{sp}$ για διάφορους τύπους μονώσεων όπως επίσης και διαφορετικά πάχη ελασμάτων .....	82
<b>Πίνακας 3.6:</b> Πίνακας προσδιορισμού συντελεστή $\epsilon$ για τις επιπρόσθετες απώλειες .....	95
<b>Πίνακας 3.7:</b> .....Πίνακας εμπειρικού υπολογισμού των απωλειών καλύμματος λόγω ρεύματος διαπεραστήρων .....	95
<b>Πίνακας 3.8:</b> Πίνακας εύρεσης τιμής του συντελεστή $K_{duct}$ συναρτήσει το ακτινικού μεγέθους του πηνίου και του πάχους των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού .....	112
<b>Πίνακας 3.9:</b> Τιμές τάσης για τη δοκιμή εφαρμοσμένης διηλεκτρικής αντοχής και κρουστικής τάσης για πλήθος ονομαστικών τάσεων λειτουργίας .....	119
<b>Πίνακας 3.10:</b> Πλήθος βηματικών μεταβολών για τη δομή του σχήματος 3.49(b) .....	125
<b>Πίνακας 3.11:</b> Πιθανές τιμές βηματικής μεταβολής τάσης για την επιλογή κάθε τριπλέτας επαφών του σχήματος 3.50 .....	125
<b>Πίνακας 3.12:</b> Πιθανές τιμές βημάτων και ποσοστών βηματικής μεταβολής τάσης για διάφορες ονομαστικές ισχύς και τάσης λειτουργίας .....	126
<b>Πίνακας 3.13:</b> Κατηγορίες φόρτισης τυλιγμάτων μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων .....	129
<b>Πίνακας 4.1:</b> Παράμετροι υπολογισμού διατομών των αγωγών του μετασχηματιστή .....	137 - 138
<b>Πίνακας 4.2:</b> Παράμετροι περιγραφής μετασχηματιστή .....	138
<b>Πίνακας 4.3:</b> Ειδικοί παράμετροι μετασχηματιστή .....	138
<b>Πίνακας 4.4:</b> Προκαθορισμένοι παράμετροι μετασχηματιστή .....	139
<b>Πίνακας 4.5:</b> Παράμετροι κόστους μετασχηματιστή .....	139

<b>Πίνακας 4.6:</b> Παράμετροι σχεδιασμού μετασχηματιστή .....	139 - 140
<b>Πίνακας 4.7:</b> Λοιπές παράμετροι μετασχηματιστή.....	140 - 142
<b>Πίνακας 4.8:</b> Επιλογή μονωτικού πάχους με βάση τη μέγιστη επαγόμενη τάση και μέγιστη κρουστική τάση.....	149
<b>Πίνακας 4.9:</b> Πίνακας τιμών της συνάρτησης $FN(Ducts_{HV})$ .....	153

## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 1.1:</b> Δομή ενός βασικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας .....	2
<b>Σχήμα 2.1:</b> Εσωτερική δομή της συσκευής Buchholz .....	10
<b>Σχήμα 2.2:</b> (α) Μετασχηματιστής ελαίου – υγρού τύπου, (β) μετασχηματιστής ξηρού τύπου .....	14
<b>Σχήμα 2.3:</b> Δοχείο διαστολής μετασχηματιστή με τις παρελκόμενες συσκευές .....	15
<b>Σχήμα 2.4:</b> Τύποι τυλιγμάτων μετασχηματιστή. (α) κυλινδρικά – σωληνωτά τυλίγματα, (β) κυλινδρικά – σωληνωτά με το τύλιγμα χαμηλής τάσης διαχωρισμένο σε δύο τμήματα, (γ) δισκοειδή τυλίγματα .....	16
<b>Σχήμα 2.5:</b> (α) Ηλεκτρικό/Μαγνητικό κύκλωμα μετασχηματιστή σε λειτουργία εν κενώ, (β) διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και μαγνητικών ροών σε λειτουργία εν κενώ .....	17
<b>Σχήμα 2.6:</b> (α) Ηλεκτρικό/Μαγνητικό κύκλωμα μετασχηματιστή σε λειτουργία εν κενώ (με αντίθετες πολικότητες στα τυλίγματα), (β) διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και μαγνητικών ροών σε λειτουργία εν κενώ .....	19
<b>Σχήμα 2.7:</b> Κυματομορφή ρευμάτων μαγνήτισης και διέγερσης – Διαδικασία εξαγωγής.....	20
<b>Σχήμα 2.8:</b> (α) Ιδανικός μονοφασικός μετασχηματιστής υπό φορτίο, με προστιθέμενες μαγνητικές ροές, (β) το αντίστοιχο μαγνητικό του κύκλωμα.....	23
<b>Σχήμα 2.9:</b> Αναγωγή σύνθετης αντίστασης $Z_2$ στο πρωτεύον τύλιγμα ιδανικού μετασχηματιστή (α) αρχική κατάσταση, (β) αναγωγή στο πρωτεύον, (γ) απλοποίηση κυκλώματος .....	23
<b>Σχήμα 2.10:</b> Αναγωγή σύνθετης αντίστασης $Z_1$ στο δευτερεύον τύλιγμα ιδανικού μετασχηματιστή (α) Αρχική κατάσταση (β) αναγωγή στο δευτερεύον .....	24
<b>Σχήμα 2.11:</b> (α) Λειτουργία πραγματικού μετασχηματιστή υπό φορτίο, (β) ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή.....	25
<b>Σχήμα 2.12:</b> Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή στο πρωτεύον .....	27
<b>Σχήμα 2.13:</b> Πρωτεύον τύλιγμα με ενσωματωμένο τον εγκάρσιο κλάδο μαγνήτισης .....	27
<b>Σχήμα 2.14:</b> Ισοδύναμο κύκλωμα του δευτερεύοντος κλάδου πραγματικού μετασχηματιστή.....	28
<b>Σχήμα 2.15:</b> Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή.....	29
<b>Σχήμα 2.16:</b> Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή με αναγωγή των στοιχείων και φορτίου του δευτερεύοντος στο πρωτεύον .....	29
<b>Σχήμα 2.17:</b> Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή με αναγωγή των στοιχείων του πρωτεύοντος στο δευτερεύον.....	29
<b>Σχήμα 2.18:</b> Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή με αναγωγή των στοιχείων του πρωτεύοντος στο δευτερεύον και μεταφορά του εγκάρσιου κλάδου στα ανάντη του πρωτεύοντος τυλίγματος .....	30

<b>Σχήμα 2.19:</b> Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρεύματος φορτίου με επαγωγική φόρτιση μονοφασικού μετασχηματιστή χωρίς τον εγκάρσιο κλάδο.....	31
<b>Σχήμα 2.20:</b> Διακύμανση εκατοστιαίας πτώσης τάσης $\epsilon(\%)$ συναρτήσει (α) της έντασης ρεύματος φορτίου και σταθερής γωνίας φορτίου και (β) της γωνίας φορτίου και σταθερής έντασης ρεύματος..	32
<b>Σχήμα 2.21:</b> Βαθμός απόδοσης μετασχηματιστή και συμπεριφορά απωλειών χαλκού και σιδήρου συναρτήσει του συντελεστή φορτίου ( $(S_{\phi}/S_N) \cdot 100\%$ ).....	35
<b>Σχήμα 2.22:</b> Πειραματική διάταξη δοκιμής ανοικτοκύκλωσης μονοφασικού μετασχηματιστή .....	37
<b>Σχήμα 2.23:</b> Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή κατά την δοκιμή ανοικτοκύκλωσης.....	38
<b>Σχήμα 2.24:</b> Πειραματική διάταξη δοκιμής βραχυκύκλωσης μονοφασικού μετασχηματιστή με τροφοδοσία στο τυλίγμα υψηλής τάσης .....	39
<b>Σχήμα 2.25:</b> Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης ..	39
<b>Σχήμα 2.26:</b> Πολικότητες μονοφασικού μετασχηματιστή (α) Τυλίγματα αφαιρετικά περιτυλιγμένα (β) Τυλίγματα προσθετικά περιτυλιγμένα .....	41
<b>Σχήμα 2.27:</b> (α) Διάταξη προσδιορισμού πολικότητας μετασχηματιστή, σύμβολο ακροδεκτών μετασχηματιστή (β) αφαιρετικής πολικότητας, (γ) προσθετικής πολικότητας .....	42
<b>Σχήμα 2.28:</b> Ορθή διάταξη παραλληλισμού μετασχηματιστών με συνδεδεμένο βολτόμετρο για επιβεβαίωση της ορθής πολικότητας .....	48
<b>Σχήμα 2.29:</b> Συνδεσμολογία ενός μονοφασικού αυτομετασχηματιστή.....	49
<b>Σχήμα 2.30:</b> Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τάσης.....	50
<b>Σχήμα 2.31:</b> Συνδεσμολογία μετασχηματιστή εντάσεως με αμπερόμετρο εν σειρά στο δευτερεύον τυλίγμα .....	51
<b>Σχήμα 2.32:</b> Τριφασική συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα μονοφασικών μετασχηματιστών .....	53
<b>Σχήμα 2.33:</b> Τριφασική συνδεσμολογία τρίγωνο – τρίγωνο μονοφασικών μετασχηματιστών .....	53
<b>Σχήμα 2.34:</b> Τριφασική συνδεσμολογία αστέρα – τρίγωνο μονοφασικών μετασχηματιστών .....	54
<b>Σχήμα 2.35:</b> Τριφασική συνδεσμολογία τρίγωνο – αστέρα μονοφασικών μετασχηματιστών .....	54
<b>Σχήμα 2.36:</b> Ισοδύναμο κύκλωμα, σύμβολο και απλοποιημένο σύμβολο αστέρα.....	56
<b>Σχήμα 2.37:</b> Ισοδύναμο κύκλωμα, σύμβολο και απλοποιημένο σύμβολο τριγώνου.....	57
<b>Σχήμα 2.38:</b> Ισοδύναμο κύκλωμα, σύμβολο και απλοποιημένο σύμβολο τεθλασμένου αστέρα.....	57
<b>Σχήμα 2.39:</b> Διανυσματικό διάγραμμα τάσεως τυλιγμάτων συνδεσμολογίας τεθλασμένου αστέρα..	58
<b>Σχήμα 2.40:</b> Σύμβολα προστασίας έναντι σκόνης και διείσδυσης νερού IP .....	63
<b>Σχήμα 3.1:</b> Κύριες διαστάσεις τριφασικού μετασχηματιστή τύπου πυρήνα .....	68
<b>Σχήμα 3.2:</b> Επίδραση θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην επιτρεπτή ποσοστιαία φόρτιση μετασχηματιστή με σταθερή θερμοκρασία νερού στους 25°C.....	69
<b>Σχήμα 3.3:</b> Καμπύλες αύξησης θερμοκρασίας τυλιγμάτων, πυρήνα και πλαισίου μετασχηματιστή. Στον κάθετο άξονα ορίζεται η θερμοκρασία σε °C και στον οριζόντιο άξονα ο χρόνος σε ώρες.....	72



<b>Σχήμα 3.4:</b> Αύξηση βημάτων των ελασμάτων ισοδυναμεί σε δημιουργία μίας πιο κυκλικής μορφολογίας καλύπτοντας σε μεγαλύτερο βαθμό το τεταρτοκύκλιο .....	73
<b>Σχήμα 3.5:</b> Διαδρομή λαδιού σε κλειστό κύκλωμα μέσα στο μετασχηματιστή και απεικόνιση της θερμοκρασίας συναρτήσει του ύψους.....	75
<b>Σχήμα 3.6:</b> Καμπύλες προσδιορισμού διαμέτρου κορμών πυρήνα του μετασχηματιστή συναρτήσει της ισχύος εξόδου και της τάσης τυλιγμάτων .....	77
<b>Σχήμα 3.7:</b> Σύστημα σύσφιξης ελασμάτων για διάμετρο μεγαλύτερη των 250 mm.....	80
<b>Σχήμα 3.8:</b> Τοποθέτηση ελασμάτων κατά την ένωση κορμών και ζυγμάτων σε στοιβαχτό πυρήνα κατά (α) 90°, (β) 45°, (γ) 30°/60° και (δ) ειδική κατασκευή τυλιχτού πυρήνα .....	82
<b>Σχήμα 3.9:</b> Μονοφασικοί μετασχηματιστές τύπου πυρήνα (αριστερά) και τύπου μανδύα – κελύφους (δεξιά).....	83
<b>Σχήμα 3.10:</b> Υλοποίηση τριφασικού μετασχηματιστή τύπου πυρήνα από τρεις μονοφασικούς πυρήνες τύπου πυρήνα. ....	83
<b>Σχήμα 3.11:</b> Πιθανές εκδοχές τριφασικών μετασχηματιστών τύπου (α) πυρήνα, (β) μανδύα – κελύφους πέντε σκελών, (γ) μανδύα – κελύφους τριών σκελών.....	84
<b>Σχήμα 3.12:</b> Σύνδεση κορμών και ζυγμάτων μέσω (α) Αρθρωτής σύνδεσης και (β) Θηλυκωτής σύνδεσης .....	85
<b>Σχήμα 3.13:</b> Διάκενα συναρτήσει της δοκιμής διηλεκτρικής αντοχής όπου (α) τιμή διακένου μεταξύ τυλίγματος Υ.Τ. και Χ.Τ και (c) τιμή διακένου μεταξύ τυλίγματος Υ.Τ. και ζυγώματος πυρήνα....	86
<b>Σχήμα 3.14:</b> Μονοκόμματο τύλιγμα επίπεδων αγωγών όπου στην περίπτωση (α) υπάρχει μόνωση μεταξύ των δύο στρώσεων και στην περίπτωση (b) υπάρχει διάλυλος.....	87
<b>Σχήμα 3.15:</b> Μονοκόμματο τύλιγμα στρογγυλών αγωγών όπου h το μήκος του τυλίγματος και $h_m$ το μαγνητικό ύψος αντίστοιχα .....	88
<b>Σχήμα 3.16:</b> Μονοκόμματο τύλιγμα συνεστραμμένων αγωγών .....	88
<b>Σχήμα 3.17:</b> Τύλιγμα μεμονωμένων πηνίων. Στα αριστερά απεικονίζεται η πλάγια όψη και στα δεξιά η κάτοψη της στήλης.....	89
<b>Σχήμα 3.18:</b> Διαδικασία μορφοποίησης τουμπαριστού τυλίγματος .....	89
<b>Σχήμα 3.19:</b> Τελικές δομές στηλών για α) Τύλιγμα μονοκόμματων επίπεδων αγωγών δύο στρώσεων, β) Τύλιγμα μονοκόμματων στρογγυλών αγωγών δύο στρώσεων, γ) Τύλιγμα μεμονωμένων πηνίων και δ) Τύλιγμα μονοκόμματων συνεστραμμένων αγωγών με τρεις συστροφές. ....	90
<b>Σχήμα 3.20:</b> Μαγνητικές γραμμές κατά την λειτουργία μετασχηματιστή για α) κυλινδρικά τυλίγματα ίσου μήκους b) κυλινδρικά τυλίγματα άνισου μήκους και c) δισκοειδή τυλίγματα .....	90
<b>Σχήμα 3.21:</b> Αναλογίες για ποσοστό επαγωγικής αντίδρασης, καταπόνηση βραχυκύκλωσης και αξονική καταπόνηση διαφόρων κυλινδρικών τυλιγμάτων ανόμοιων μηκών σε σύγκριση με αυτών ίσου μήκους .....	91
<b>Σχήμα 3.22:</b> Μορφολογία κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης .....	96
<b>Σχήμα 3.23:</b> Αναπαράσταση ακτινικών δυνάμεων στα κυλινδρικά τυλίγματα ενός μετασχηματιστή. ....	98
<b>Σχήμα 3.24:</b> Αναπαράσταση αξονικών θλιπτικών δυνάμεων στα τυλίγματα του μετασχηματιστή.....	99

<b>Σχήμα 3.25:</b> Περίπτωση αμφίπλευρης και μονόπλευρης μετατόπισης τυλιγμάτων .....	100
<b>Σχήμα 3.26:</b> Δημιουργία συμμετρικής διατμητικής δύναμης ή δύναμης οπής λόγω των ενδιάμεσων λήψεων στο τύλιγμα Υ.Τ .....	101
<b>Σχήμα 3.27:</b> α) Συνδεσμολογία τριγώνου – αστέρα τριφασικού μετασχηματιστή β) διάγραμμα κατανομής ρευμάτων αντίστοιχης συνδεσμολογίας .....	103
<b>Σχήμα 3.28:</b> α) Συνδεσμολογία αστέρα – τριγώνου τριφασικού μετασχηματιστή β) διάγραμμα κατανομής ρευμάτων αντίστοιχης συνδεσμολογίας .....	105
<b>Σχήμα 3.29:</b> Συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα με ουδέτερο στο πρωτεύον τύλιγμα τριφασικού μετασχηματιστή β) διάγραμμα κατανομής ρευμάτων αντίστοιχης συνδεσμολογίας .....	105
<b>Σχήμα 3.30:</b> Κατανομή μαγνητικών ροών σε μετασχηματιστή πέντε στηλών .....	106
<b>Σχήμα 3.31:</b> Διαφορά θερμοκρασίας τυλίγματος συναρτήσει της ακτινικής απόστασης $a_1$ από την εσωτερική διάμετρο του.....	108
<b>Σχήμα 3.32:</b> Τρεις διαφορετικοί τύποι δεξαμενών μετασχηματιστή υγρού τύπου. Στα αριστερά πρόκειται για μία λεία δεξαμενή χωρίς ψυγεία και ανεμιστήρες.....	109
<b>Σχήμα 3.33:</b> Αποστατικά τοποθετημένα στα πηνία του τυλίγματος.....	111
<b>Σχήμα 3.34:</b> Καμπύλη θερμοκρασιακής διαφοράς λαδιού – περιβάλλοντος συναρτήσει της θερμικής φόρτισης μετασχηματιστή .....	112
<b>Σχήμα 3.35:</b> Καμπύλη θερμοκρασιακής διαφοράς τυλιγμάτων – λαδιού κατά το μεταβατικό στάδιο .....	113
<b>Σχήμα 3.36:</b> Δομή σωληνωτής δεξαμενής μετασχηματιστή ισχύος 250 kVA.....	114
<b>Σχήμα 3.37:</b> Κατακόρυφη όψη στήλης .....	116
<b>Σχήμα 3.38:</b> Συναρμολόγηση των άκρων των φάσεων του δευτερεύοντος τυλίγματος.....	116
<b>Σχήμα 3.39:</b> Στάθμη θορύβου LpA σε dB συναρτήσει της ισχύος μετασχηματιστή για μαγνητική επαγωγή 1,75 T .....	117
<b>Σχήμα 3.40:</b> Διάγραμμα συνδεσμολογίας δοκιμής εφαρμοσμένης διηλεκτρικής αντοχής για τον έλεγχο της εξωτερικής μόνωσης του μετασχηματιστή .....	118
<b>Σχήμα 3.41:</b> Διάγραμμα συνδεσμολογίας δοκιμής επαγόμενης τάσης.....	119
<b>Σχήμα 3.42:</b> Μορφολογία πλήρους κύματος κρουστικής τάσης .....	120
<b>Σχήμα 3.43:</b> Μορφολογία διακοπόμενου κύματος κρουστικής τάσης.....	120
<b>Σχήμα 3.44:</b> Απεικόνιση της έναυσης της κρουστικής τάσης ως υψίσυγχο σήμα .....	121
<b>Σχήμα 3.45:</b> Χωρητικότητες και επιπρόσθετα ρεύματα στο μονοκόμματο κυλινδρικό τύλιγμα Υ.Τ. κατά την κρουστική τάση .....	121
<b>Σχήμα 3.46:</b> Διαφοροποίηση τρόπου μεταβολής κρουστικής τάσης για διαφορετικές τιμές του συντελεστή $\alpha$ . Όπου για συντελεστή $\alpha$ ίσο με μηδέν επικρατεί γραμμική μεταβολή.....	122
<b>Σχήμα 3.47:</b> Διάγραμμα τυλίγματος Υ.Τ. με επιπρόσθετες χωρητικότητες $C_{ad}$ για τη χωρητική εξουδετέρωση της χωρητικότητας $C_e$ και καμπύλη μεταβολής κρουστικής τάσης για το αντίστοιχο διάγραμμα .....	123
<b>Σχήμα 3.48:</b> Καμπύλη μεταβολής κρουστικής τάσης συναρτήσει του ύψους τυλίγματος με την προσθήκη χωρητικών υλικών ενδιάμεσα των πρώτων σπειρών του τυλίγματος .....	123

<b>Σχήμα 3.49:</b> Σύστημα βηματικής μεταβολής τάσης χωρίς φορτίο με διαχωρισμό του τυλίγματος σε άνω και κάτω τμήμα. (a) Δομή με τέσσερις επαφές, (b) δομή με 6 επαφές για περαιτέρω μεταβολή της τάσης .....	124
<b>Σχήμα 3.50:</b> Σύστημα βηματικής μεταβολής τάσης χωρίς φορτίο με επαφές των τυλιγμάτων που συνδέονται με τον ουδέτερο κόμβο του αστέρα του τυλίγματος.....	125
<b>Σχήμα 3.51:</b> Σύστημα βηματικής μεταβολής υπό φορτίο. (a) Δομή χωρίς αναστροφή, (β) Δομή που περιέχει αναστροφή.....	126
<b>Σχήμα 3.52:</b> Διαγράμματα μονοφασικών αυτομετασχηματιστών με ομόρροπα τυλίγματα και αντίρροπα τυλίγματα.....	127
<b>Σχήμα 3.53:</b> Αυτομετασχηματιστής ως διαιρέτης τάσης.....	128
<b>Σχήμα 3.54:</b> Πιθανές τοποθετήσεις των τριών τυλιγμάτων όπου στα αριστερά βρίσκεται ο κορμός του πυρήνα .....	129
<b>Σχήμα 3.55:</b> Δομή πυρήνα – τυλιγμάτων τριμνοφασικού μετασχηματιστή .....	130
<b>Σχήμα 3.56:</b> Μετασχηματιστής ουδετερώσεως .....	130
<b>Σχήμα 3.57:</b> Μετασχηματιστής γειώσεως.....	131
<b>Σχήμα 4.1:</b> Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μικρού και του μεγάλου πυρήνα ενός μετασχηματιστή .....	144
<b>Σχήμα 4.2:</b> Μόνωση μεταξύ στρώσεων τυλίγματος X.T. με αγωγούς αποτελούμενος από χάλκινα φύλλα .....	145
<b>Σχήμα 4.3:</b> Μόνωση μεταξύ στρώσεων τυλίγματος Y.T. με στρογγυλούς χάλκινους αγωγούς ....	146
<b>Σχήμα 4.4:</b> Γεωμετρικές διαστάσεις εμφανιζόμενες σε τομή του μετασχηματιστή .....	148
<b>Σχήμα 4.5:</b> Μορφολογικοί παράμετροι μικρού και μεγάλου πυρήνα.....	150
<b>Σχήμα 4.6:</b> Καμπύλη ορισμού ειδικών απωλειών λειτουργίας εν κενώ συναρτήσει της έντασης μαγνητικού πεδίου .....	150
<b>Σχήμα 4.7:</b> Διάμετροι τυλιγμάτων .....	154
<b>Σχήμα 4.8:</b> Γεωμετρικές παράμετροι των τυλιγμάτων .....	154
<b>Σχήμα 4.9:</b> Διαστάσεις δεξαμενής μετασχηματιστή .....	158
<b>Σχήμα 4.10:</b> Διάγραμμα ορισμού καμπυλών gradient συναρτήσει της μέσης ανύψωσης θερμοκρασίας του χαλκού .....	159
<b>Σχήμα 4.11:</b> Καμπύλη εύρεσης συντελεστή απαγωγής θερμότητας δεξαμενής μέσω συναγωγής TCC και ακτινοβολίας TRC συναρτήσει της μέσης αύξησης θερμοκρασίας του λαδιού.....	160
<b>Σχήμα 4.12:</b> Καμπύλη εύρεσης συντελεστή απαγωγής θερμότητας δεξαμενής μέσω των αυλακωμένων πάνελ CPC συναρτήσει του πλάτους $D_{panel}$ των αυλακωμένων πάνελ.....	160
<b>Σχήμα 6.1:</b> Σημείο άλματος από κανονική σε υπεραγωγίμη κατάσταση για το θάλειο, το μόλυβδο και το κάδμιο.....	174

## Κατάλογος Εικόνων

<b>Εικόνα 1.1:</b> Πλοίο το οποίο περιέχει ζεύγος προπελών για την πρόωση του .....	3
<b>Εικόνα 2.1:</b> Δομή τριφασικού μετασχηματιστή.....	8
<b>Εικόνα 2.2:</b> Ανεμιστήρες ψύξης σε έναν τριφασικό μετασχηματιστή.....	11

<b>Εικόνα 2.3:</b> Διαδικασία τοποθέτησης των μονωτήρων σε έναν τριφασικό Μ/Σ Υ.Τ.....	11
<b>Εικόνα 3.1:</b> Διαφοροποίηση θερμοκρασίας του μετασχηματιστή μεταξύ ανώτατου και κατώτατου σημείου της δεξαμενής λαδιού στο οποίο έχει βυθιστεί μέσα.....	70
<b>Εικόνα 3.2:</b> Διαμορφωμένο έλασμα αγωγών λαδιού που τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια των τυλιγμάτων με σκοπό την ενίσχυση της ψύξης του μετασχηματιστή.....	75
<b>Εικόνα 3.3:</b> Στρογγυλοί αγωγοί.....	86
<b>Εικόνα 3.4:</b> Ορθογώνιοι αγωγοί - μπάρες .....	86
<b>Εικόνα 3.5:</b> Τριφασικός μετασχηματιστής 280 MVA/400 – 150 - 30 kV τύπου OFAF σε ηλεκτρικό υποσταθμό του Λαυρίου κατά την κατασκευή. ....	115

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΛΙΜΕΝΩΝ

### 1.1 Εισαγωγή στη σχεδίαση συστημάτων πρόωσης και συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων

Κάθε πλοίο σχεδιάζεται και κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να ικανοποιεί συγκεκριμένες προϋποθέσεις και να μπορεί να διεξάγει με επιτυχία την αποστολή του. Για την επίτευξη της αποστολής του το πλοίο θα χρειάζεται και τις αντίστοιχες λειτουργίες – χαρακτηριστικά που θα προκύπτουν από τα αντίστοιχα συστήματα που θα πρέπει να έχουν συμπεριληφθεί σε αυτό. Τέτοια συστήματα μπορεί να είναι το σύστημα πρόωσης, το σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, το σύστημα διαχείρισης και παροχής καυσίμου, το σύστημα συντήρησης – διατήρησης του φορτίου κα. Το κάθε ένα από τα προαναφερόμενα συστήματα μπορεί να αποσυντεθεί σε επιμέρους εξαρτήματα με διαφορετικές λειτουργίες και χαρακτηριστικά που απαιτούν τις απαραίτητες γνώσεις για την κατανόηση της λειτουργίας τους όπως επίσης και το σωστό σχεδιασμό – επιλογή αυτών.

Τα δύο συστήματα ενδιαφέροντος στη προκειμένη περίπτωση είναι το **σύστημα πρόωσης (propulsion system)** που αποτελεί ένα **σύστημα πλατφόρμας (platform system)** και παρέχει την κινητικότητα στο πλοίο και το **σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (power system)** σε ένα πλοίο αποτελεί ένα **σύστημα υποστήριξης (support system)** και διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια σε όλα τα σημεία του πλοίου που περιέχουν ηλεκτρικές μηχανές και συσκευές όπως κινητήρες, συσκευές θέρμανσης και φωτιστικά σώματα κα.

### 1.2 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

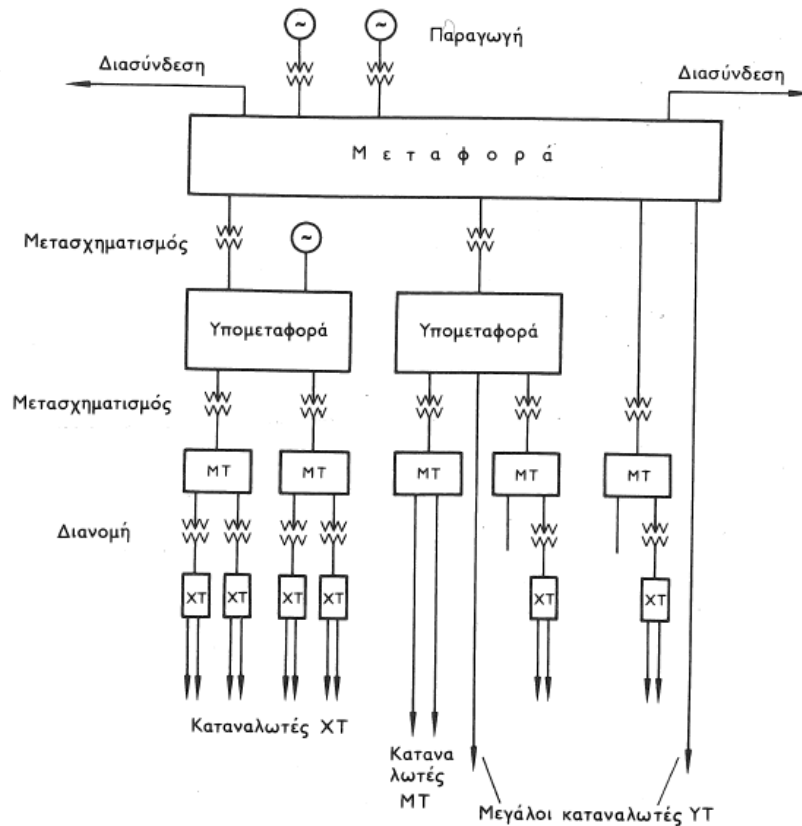
#### 1.2.1 Εισαγωγή

Ο γενικός σκοπός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε ορισμένα σημεία κατανάλωσης. Το κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει τα δικά του χαρακτηριστικά λειτουργίας που αυτά διαμορφώνονται ανάλογα με τις απαιτήσεις των καταναλωτών εντός αυτού. Πιο συγκεκριμένα ένα σύστημα ενέργειας επιλέγεται, ώστε να παρέχει εναλλασσόμενο ή συνεχές ρεύμα, να μπορεί να λειτουργήσει υπό ένα μέγιστο επίπεδο φόρτισης, να μπορεί να ανταπεξέλθει σε αλλαγές στο επίπεδο φόρτισης του είτε εάν πρόκειται για αλλαγή στη ζήτηση ενεργούς ισχύος, είτε άεργου ισχύος, είτε και των δύο ταυτοχρόνως, στην περίπτωση εναλλασσόμενου ρεύματος. Επίσης, σημαντικές απαιτήσεις για την ποιότητα της ενέργειας αποτελούν η σταθερή συχνότητα λειτουργίας, η σταθερή τάση λειτουργίας όπως και η μεγάλη αξιοπιστία, δηλαδή η συνεχόμενη παροχή στους καταναλωτές χωρίς παύσεις. Με όλα τα παραπάνω κριτήρια και απαιτήσεις το σύστημα αυτό θα πρέπει να λειτουργεί με ένα κόστος που θα είναι οικονομικά ικανοποιητικό και θα προκαλεί ελάχιστα οικολογικά κόστη για να μπορεί να θεωρηθεί εφικτό.

#### 1.2.2 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Το κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από διαφορετικά στοιχεία, τα οποία προσδίδουν σε αυτό τη δομή που χρειάζεται για την ικανοποίηση συγκεκριμένων αναγκών. Η πιο βασική ανάγκη είναι το μέγεθος της ενέργειας που θα πρέπει να παρέχεται από αυτό προς τους

καταναλωτές. Ανάλογα με το μέγεθος το σύστημα αυτό μπορεί να καλύπτει καταναλωτές σε όλο το εύρος του κράτους, σε μικρότερες περιοχές όπως περιφέρειες ή ακόμα και σε πολύ μικρά και απομονωμένα σημεία για ιδιωτική χρήση.



Σχήμα 1.1: Δομή ενός βασικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. [7, σελ. 2, Σχήμα 1].

Οι τρεις κύριες υποδιαιρέσεις ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

### 1) Το σύστημα παραγωγής

Σκοπός του συστήματος αυτού είναι η παραγωγή και η μορφοποίηση της ενέργειας ώστε να μπορεί να μεταφερθεί σε άλλα γεωγραφικά σημεία. Σε αυτό το σύστημα εμπεριέχονται οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και οι σταθμοί ανύψωσης της τάσης σε υψηλή τάση (Υ.Τ).

### 2) Το σύστημα μεταφοράς

Σκοπός του συστήματος αυτού είναι η αξιόπιστη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλαπλά μακρινά ή κοντινά γεωγραφικά σημεία. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τα δίκτυα των γραμμών Υ.Τ., τους υποσταθμούς ζεύξεως που είναι απαραίτητη για την ένωση δύο ή περισσότερων δικτύων γραμμών Υ.Τ., τους υποσταθμούς μετασχηματισμού, όπου σε αυτούς γίνεται μεταβολή από ένα επίπεδο τάσης σε ένα άλλο και τους σταθμούς υποβιβασμού όπου η τάση μεταβάλλεται από Υ.Τ. σε Μ.Τ. Τυπικές τιμές των επιπέδων τάσης που επικρατούν στα δίκτυα των γραμμών Υ.Τ. τάσης είναι τα 66 kV, 110 kV, 150 kV, 220 kV κ.α.

### 3) Το σύστημα διανομής

Σκοπός του συστήματος αυτού είναι η μετατροπή της Υ.Τ. σε Μ.Τ. και Χ.Τ. και η παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας στους τοπικούς καταναλωτές. Στο σύστημα αυτό περιλαμβάνονται τα δίκτυα διανομής Μ.Τ. και Χ.Τ., οι υποσταθμοί διανομής στους οποίους πραγματοποιείται η υποβίβαση του επιπέδου της τάσης από Μ.Τ. σε Χ.Τ. Στη περίπτωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας δεν υπάρχει το σύστημα μεταφοράς λόγω της μικρής έκτασης της εγκατάστασης του σχήματος 1.1.

## 1.3 Σύστημα πρόωσης

Το σύστημα πρόωσης αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά συστήματα σε ένα πλοίο διότι είναι αυτό το οποίο προκαλεί την ώση σε αυτό και ρυθμίζεται η ταχύτητα που θα κινείται το πλοίο μέσα από αυτό. Το σύστημα πρόωσης χωρίζεται σε τρία κύρια υποσυστήματα, τα οποία είναι:

### 1) Το σύστημα της κινητήριας δύναμης

Το σύστημα της κινητήριας δύναμης είναι υπεύθυνο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω χημικής ενέργειας. Η μετατροπή της ενέργειας από χημική σε μηχανική μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν πετρελαιοκινητήρα, ένα αεριοστρόβιλο ή ακόμα και με έναν ατμοστρόβιλο. Οι πετρελαιοκινητήρες είναι οι πιο διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις εφόσον η κατανάλωσή τους είναι σχετικά μικρότερη άρα και πιο οικονομική σε σύγκριση με τις άλλες επιλογές. Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται σε πλοία μικρού μεγέθους ή σε ταχύπλοα λόγω της μεγαλύτερης αναλογίας μάζας – ισχύος που προσφέρουν σε σύγκριση με τους πετρελαιοκινητήρες.

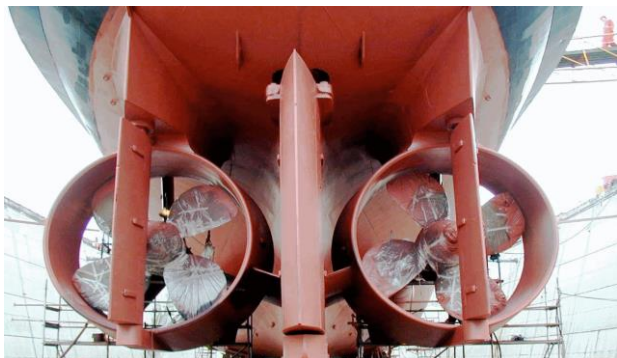
### 2) Το σύστημα μετάδοσης

Το σύστημα μετάδοσης διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό αναλόγως αν η μετάδοση της ενέργειας γίνεται με μηχανικό ή ηλεκτρικό τρόπο. Στην περίπτωση μηχανικής μετάδοσης, αυτή πραγματοποιείται είτε με άμεση ζεύξη της μηχανής που παράγει ενέργεια στην προπέλα μέσω ενός άξονα, είτε με σύνδεση από τη μηχανή σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων και από αυτό μέσω ενός άξονα στην προπέλα. Εναλλακτικά, για την περίπτωση όπου η μετάδοση πραγματοποιείται με ηλεκτρικό τρόπο, δηλαδή πρόκειται για ηλεκτροπρόωση, η μηχανή που παράγει τη μηχανική ενέργεια είναι άμεσα συνδεδεμένη με μία γεννήτρια, η οποία μετατρέπει την ενέργεια σε ηλεκτρική και αυτή μεταδίδεται μέσω του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στην προπέλα. Το συγκεκριμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί είτε να παρέχει ενέργεια στην προπέλα και μόνο, είτε ταυτοχρόνως με αυτή να μεταδίδει ενέργεια και στις υπόλοιπες μηχανές – συσκευές του πλοίου που απαιτούν τροφοδότηση.

Η συγκεκριμένη υλοποίηση αποτελεί μία ακριβότερη κατασκευή λόγω της προσθήκης μίας γεννήτριας στο συνολικό σύστημα, η οποία αυξάνει το κόστος κατασκευής, ωστόσο ο βαθμός απόδοσης του συστήματος παραμένει υψηλός, εφόσον οι γεννήτριες έχουν πολύ μεγάλους βαθμούς απόδοσης, ενώ η υλοποίηση αυτή επιτρέπει τον εύκολο χειρισμό της ώσης σε σύγκριση με την άμεση μηχανική σύνδεση μέσω άξονα.

### 3) Το σύστημα του προωθητικού μέσου.

Το σύστημα αυτό αποτελείται από το προωθητικό μέσο το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μία προπέλα, ή ένα πλήθος από προπέλες. Στόχος του είναι η αξιοποίηση της ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας που προσδίδεται σε αυτό για την ώση του πλοίου.



*Εικόνα 1.1: Πλοίο το οποίο περιέχει ζεύγος προπελών για την πρόωση του. [42]*



## 1.4 Μετασχηματιστής και ιδιαιτερότητες του στην εφαρμογή του σε πλοία και λιμένες

Οι μετασχηματιστές αποτελούν σημαντικές μηχανές στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, αφού η αλλαγή του επιπέδου τάσης είναι συχνή και αναγκαία για την εξυπηρέτηση διάφορων σκοπών. Ως εκ τούτου οι μετασχηματιστές βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή εσωτερικά των πλοίων και των λιμένων. Βέβαια λόγω της ιδιαίτερης κατασκευής των πλοίων και των πολλαπλών ειδικών απαιτήσεων που έχουν, όπως η αξιοπιστία στη λειτουργία των συστημάτων τους, η μεγιστοποίηση εξοικονόμησης ενέργειας, αλλά και η διατήρηση ικανοποιητικής ενεργειακής ποιότητας εντός του δικτύου του πλοίου, σε αυτά τοποθετούνται μετασχηματιστές με διαφορετικά χαρακτηριστικά από αυτά των συμβατικών μετασχηματιστών που μπορούν να βρεθούν σε ένα διεθνή σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ή σε ένα ιδιωτικό σύστημα ενέργειας εντός μιας επιχείρησης – βιομηχανίας. Κάποια βασικά χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- Για απλά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων, αυτά τροφοδοτούνται μέσω τριφασικών γεννητριών με τάσεις 380 V για τριφασική σύνδεση και 220 V για μονοφασική σύνδεση με συχνότητα λειτουργίας 50 Hz για συστήματα ευρωπαϊκού τύπου.
- Επιπλέον υπάρχουν και περιπτώσεις φορτίων όπου απαιτούν τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος με επίπεδο τάσης 12 V, 24 V, 48 V, 110 V, κα. Σε αυτή τη περίπτωση πραγματοποιείται η υποβίβαση του επιπέδου τάσης μέσω μετασχηματιστών και ύστερα γίνεται η μετατροπή από εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές μέσω ανορθωτικής διάταξης.
- Στην περίπτωση όπου τα πλοία περιέχουν δίκτυα Υ.Τ τότε οι συνήθεις τιμές παραγόμενης τάσης των γεννητριών είναι 3,3 kV, 6,6 kV και 11 kV.
- Στην πλειοψηφία των τριφασικών δικτύων που εμπεριέχουν τριφασικούς μετασχηματιστές, η πιο συνηθής συνδεσμολογία σε αυτούς είναι αυτή του αστέρα – τριγώνου και σε μερικές περιπτώσεις αυτή του τριγώνου – τριγώνου.
- Όταν υπάρχουν συσκευές όπου απαιτούν μικρότερη τάση λειτουργίας, τότε χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές υποβίβασης για την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου.
- Για τα μονοφασικά φορτία η διαδικασία της σύνδεσης θέλει σκέψη για τον ισομοιρασμό τους μεταξύ των φάσεων, ώστε να μην προκύψει μεγάλη ασυμμετρία στο δίκτυο.
- Τα συστήματα φωτισμού που είναι μονοφασικά τροφοδοτούνται μέσα από τριφασικούς μετασχηματιστές υποβίβασης, που αποτελούνται από τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ευχέρεια για την αποκατάσταση βλάβης έναντι της περίπτωσης ενός ενιαίου τριφασικού μετασχηματιστή που σε αυτή τη περίπτωση το σύστημα δεν θα λειτουργεί λόγω της απώλειας και των τριών φάσεων, αλλά και η αποκατάσταση του τριφασικού μετασχηματιστή θα είναι πιο ακριβή, εφόσον η κατασκευή του είναι πιο ακριβή από αυτή ενός μονοφασικού.
- Λόγω της ανάγκης μερικών κρίσιμων φορτίων να τροφοδοτούνται συνεχώς, αυτά συνδέονται απευθείας στη γεννήτρια, ώστε να μην σταματήσει η παροχή σε αυτά σε περίπτωση βλάβης του δικτύου του πλοίου.
- Η παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστών στα δίκτυα των πλοίων συνιστάται για την απόκτηση εφεδρείας, σε περίπτωση βλάβης ενός από τους παράλληλους μετασχηματιστές, ώστε τα κρίσιμα φορτία, όπως όργανα ναυσιπλοΐας, να μπορούν να λειτουργήσουν ακόμα και στην περίπτωση της βλάβης ή ακόμα και στην ανάγκη συντήρησης.
- Οι μετασχηματιστές που προορίζονται για την εκκίνηση μεγάλων κινητήρων εντός του πλοίου απαιτούνται να έχουν διπλό τυλίγμα με δύο διαφορετικά τυλίγματα στο δευτερεύον για τη ρύθμιση της έντασης του ρεύματος στον κινητήρα κατά την εκκίνηση του.



- Στα πολεμικά πλοία απαιτείται η χρήση τριών μονοφασικών μετασχηματιστών ξηρού τύπου σε τριφασικά δίκτυα για λόγους ασφάλειας. Επίσης πολλά όργανα εντός των πολεμικών πλοίων έχουν την ιδιαιτερότητα να λειτουργούν σε υψηλή συχνότητα λειτουργίας όπως αυτή των 400 Hz.
- Η ύπαρξη ενός μετασχηματιστή εντός δικτύου κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος περιορίζει σε μεγάλο βαθμό το ρεύμα βραχυκυκλώσεως λόγω της σύνθετης αντίστασης του, κάτι το οποίο είναι πλεονέκτημα όσο αφορά την προστασία ευαίσθητων συσκευών και οργάνων που μπορεί να εμπεριέχονται στο ίδιο δίκτυο.

## 1.5 Δομή Διπλωματικής

Η δομή της παρούσα διπλωματικής πέρα του εισαγωγικού πρώτου κεφαλαίου περιλαμβάνει συνολικά 6 κεφάλαια και 2 παραρτήματα.

Ειδικότερα στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο θα αναπτυχθούν οι εφαρμογές και θα περιγραφεί ο σκοπός ενός μετασχηματιστή. Θα επεξηγηθούν τα δομικά στοιχεία του μετασχηματιστή όπως και τα βασικά μεγέθη αυτών μαζί με τη μαθηματική διατύπωση που αντιστοιχεί για το καθένα από αυτά. Θα προσδιοριστεί ο ιδανικός και ο πραγματικός μετασχηματιστής μαζί με τα κυκλώματα που αντιστοιχούν σε αυτούς. Θα περιγραφούν οι πειραματικές διαδικασίες για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων μεγεθών. Επίσης θα δοθεί ίδια βαρύτητα στους μονοφασικούς, όσο και στους τριφασικούς μετασχηματιστές. Θα γίνει διάκριση μεταξύ των διάφορων κατηγοριών των μετασχηματιστών, επεξήγηση των προδιαγραφών, των βλαβών που μπορούν να προκύψουν σε αυτούς και τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο πολλές από τις έννοιες του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου όπως και άλλες θα επεξηγηθούν σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια, εφόσον θα περιγραφεί η λογική η οποία ακολουθεί για τον προσδιορισμό της τελικής δομής ενός μετασχηματιστή. Πιο συγκεκριμένα θα γίνει ανάπτυξη σε θέματα όπως ο προσδιορισμός γεωμετρικών διαστάσεων του μετασχηματιστή στον πυρήνα, τα τυλίγματα, τη δεξαμενή κα., θα αναλυθούν οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν στις δομές αυτών, οι πιθανές επιλογές και οι λόγοι που επιλέγονται αυτές. Θα περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο γίνονται οι υπολογισμοί κατά τη θερμική μελέτη, για το ρεύμα μαγνήτισης, για το πάχος των μονωτικών όπως επίσης και για τις μηχανικές καταπονήσεις που θα μπορεί να δεχθεί ο μετασχηματιστής κατά τη λειτουργία του. Ως αποτέλεσμα με το 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο θα μπορεί κανείς να καταλάβει τη λογική πίσω από τον αναλυτικό σχεδιασμό ενός μετασχηματιστή και τα κριτήρια για τις επιλογές συγκεκριμένων υλικών/δομών που επιλέγονται με βάση τη χρήση και τις απαιτήσεις αυτού, όπως επίσης και την επίτευξη της συνολικής σχεδίασης σε ικανοποιητικά λογικά πλαίσια.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναπτύσσεται η διαδικασία μέσω της οποίας υπολογίζονται όλες οι παράμετροι οι οποίες είναι απαραίτητες για τον τελικό ορισμό των μεγεθών του μετασχηματιστή, όπως επίσης και το τελικό κόστος κατοχής του μετασχηματιστή. Επαναλαμβάνοντας τα βήματα της διαδικασίας του 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου, για διαφορετικές τιμές σε ορισμένες παραμέτρους θα μπορεί κανείς να έχει ως αποτέλεσμα πολλαπλές εφικτές λύσεις ως προς τα μεγέθη, τους περιορισμούς και το κόστος κατοχής για το μετασχηματιστή που θα προκύψει.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναπτύσσεται κώδικας βασιζόμενος στη διαδικασία κλασικής σχεδίασης μετασχηματιστών που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4. Εισάγονται εντός του κώδικα όλα τα βήματα που έχουν αναλυθεί με τις αντίστοιχες παραμέτρους και τους περιορισμούς και στο τέλος όλες οι εφικτές λύσεις αποθηκεύονται σε πίνακα που ταξινομούνται σε αύξοντα σειρά με βάση το ολικό κόστος κατοχής του μετασχηματιστή. Επιπροσθέτως, ο κώδικας αυτός δίνει την επιλογή για την αλλαγή πολλαπλών προκαθορισμένων παραμέτρων, όπως η τάση στα τυλίγματα X.T. και Y.T., την συχνότητα λειτουργίας κλπ. Επίσης δίνεται η δυνατότητα για την αλλαγή συγκεκριμένων

χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή όπως η μορφολογία των αγωγών των τυλιγμάτων, το υλικό του αγωγού, η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων κα. Επιπλέον πραγματοποιείται η εκτέλεση του ανωτέρω κώδικα για τις εξής περιπτώσεις,

- Μ/Σ ισχύος 1600 kVA, 20 kV/400 V, 50 Hz, τρίγωνο – αστέρα, με στρογγυλούς αγωγούς στα τυλίγματα Χ.Τ. και Υ.Τ. για λιμάνι.
- Μ/Σ ισχύος 25 kVA, 440 V/220 V, 60 Hz, τρίγωνο – τρίγωνο, με φύλλα στο τύλιγμα Χ.Τ. και στρογγυλούς αγωγούς στο τύλιγμα Υ.Τ. για πλοίο του πολεμικού ναυτικού για τροφοδοσία φωτισμού, μπριζών κλπ χωρίς δοχείο διαστολής.
- Μ/Σ ισχύος 25 kVA, 440 V/220 V, 60 Hz, τρίγωνο – τρίγωνο, με φύλλα στο τύλιγμα Χ.Τ. και ορθογώνιους αγωγούς στο τύλιγμα Υ.Τ. για πλοίο του πολεμικού ναυτικού για τροφοδοσία φωτισμού, μπριζών κλπ χωρίς δοχείο διαστολής.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μία αναφορά σε μετασχηματιστές νέων τεχνολογιών οι οποίοι είναι είτε στα στάδια μελέτης, είτε χρησιμοποιούνται σε μικρή κλίμακα λόγω της μη πλήρους ανεπτυγμένης τεχνολογίας πάνω στον τομέα ενδιαφέροντος αυτών. Επίσης αναφέρονται κάποιες ιδιαιτερότητες για τους μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται σε πλοία και λιμενικές εγκαταστάσεις και επιπροσθέτως γίνεται σύνοψη των αποτελεσμάτων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

### 2.1 Σκοπός και χρήση μετασχηματιστών

Ο κύριος σκοπός της χρήσης μετασχηματιστών είναι η μετάβαση από ένα επίπεδο τάσης σε ένα άλλο επίπεδο κρατώντας σταθερή συχνότητα κατά τη μετάβαση από το ένα επίπεδο στο άλλο. Ένας **μετασχηματιστής (transformer)** μπορεί είτε να ανυψώσει το επίπεδο της τάσης (**Step – Up Transformer**) ή να το υποβιβάσει (**Step – Down Transformer**) διατηρώντας ίδια έξοδο ισχύος έχοντας όμως διαφοροποίηση στο ρεύμα αντίστροφα από ότι στην τάση, δηλαδή για ανύψωση τάσης προκαλεί μείωση ρεύματος και για υποβίβαση τάσης αντίστοιχα αύξηση ρεύματος. Κύριο θετικό χαρακτηριστικό των μετασχηματιστών ισχύος είναι η πολύ υψηλή απόδοση τους που τους επιτρέπει να μεταφέρουν μεγάλα ποσά ενέργειας με ιδιαίτερα χαμηλές απώλειες.

Η απόδοση ενός μετασχηματιστή κυμαίνεται από 95 έως 99%. Εκτός από την ίδια την υψηλή απόδοση τους αν τοποθετηθεί ένας μετασχηματιστής ανύψωσης στην αρχή ενός δικτύου και ένας υποβίβασης στο τέλος του ίδιου του δικτύου, οι θερμικές απώλειες που θα υπάρχουν, λόγω του χαμηλού ρεύματος μεταξύ των δύο μετασχηματιστών, θα είναι πολύ χαμηλά διότι είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος με βάση τον **νόμο του Joule**.

Η χρησιμότητα τους εφαρμόζεται μόνο σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος διότι λειτουργούν μόνο στο εναλλασσόμενο ρεύμα, όπως θα εξηγηθεί και σε επόμενη παράγραφο λόγω του φαινομένου που αξιοποιούν. Συνιστάται η χρήση μετασχηματιστών σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της υψηλής απόδοσης σε σύγκριση με τους καταμεριστές τάσης, οι οποίοι μπορούν να δουλέψουν είτε σε εναλλασσόμενο ρεύμα είτε σε συνεχές, για τον υποβιβασμό τάσης, αλλά οι θερμικές απώλειες κατά τη λειτουργία τους είναι αρκετά υψηλές ώστε να θεωρηθεί ως μία μη οικονομική λύση σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μετασχηματιστές θα μπορούσαν να συγκριθούν με διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύων όπως διάφοροι μετατροπείς που υπάρχουν (π.χ. DC – DC Converter, AC – AC Converter κλπ.) γιατί και οι δύο διατάξεις έχουν πολύ καλό βαθμό απόδοσης, αλλά τα ηλεκτρονικά ισχύος για μεγάλες τιμές ισχύος αυξάνουν το κόστος της κατασκευής σε μεγάλο βαθμό.

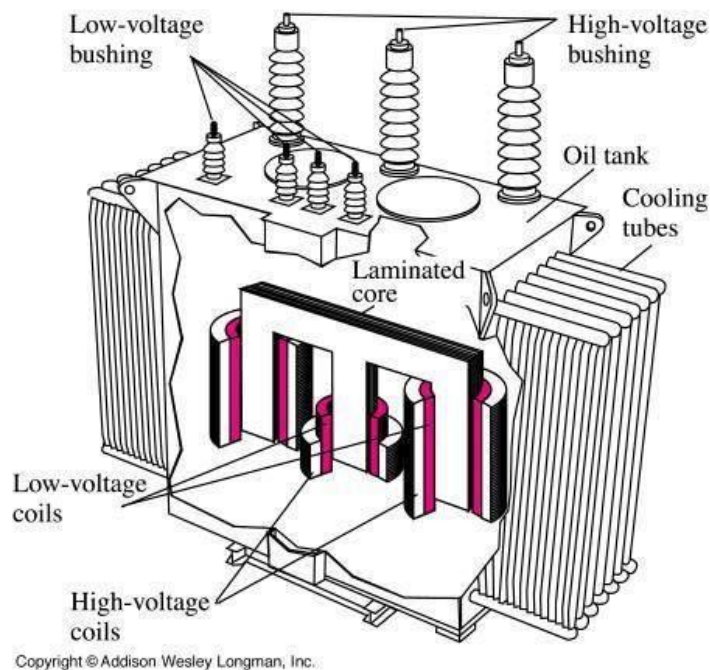
Επίσης οι μετασχηματιστές έχουν δώσει την ικανότητα να μπορούν να συνδεθούν παλιά δίκτυα με καινούργια τα οποία λειτουργούν σε υπερυψηλή τάση κάτι το οποίο πιο παλιά δεν ήταν εφικτό. Ο μετασχηματιστής επιτρέπει να συνδεθούν αυτά τα δύο δίκτυα διαφορετικών επιπέδων τάσης χωρίς να χρειαστεί να πραγματοποιηθεί κάποια μεγάλη τροποποίηση στο παλιό δίκτυο. Πέραν της παραπάνω ικανότητας του ο μετασχηματιστής επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προστατευτικό μέσο σε ένα κύκλωμα για την προστασία του χρήστη. Πιο συγκεκριμένα ο μετασχηματιστής ένα προς ένα, δηλαδή αυτός που έχει λόγο μετασχηματισμού ίσου με τη μονάδα ή αλλιώς ίδιο επίπεδο τάσης και στα δύο τυλίγματα του αξιοποιείται σε εγκαταστάσεις όπου είναι απαραίτητη η γαλβανική απομόνωση του κυκλώματος για την περαιτέρω προστασία του χρήστη (π.χ. γραμμή φωτισμού σε κήπο/μπάνιο).

## 2.2 Βασική δομή μετασχηματιστή

### 2.2.1 Δομικά στοιχεία μετασχηματιστή

Ένας μετασχηματιστής αποτελείται κυρίως από τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

1. Τον **πυρήνα (Core)**, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την προσανατολισμένη μαγνητική ροή μεταξύ των τυλιγμάτων, η οποία θα δημιουργηθεί από την αξιοποίηση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί το **πρωτεύον τύλιγμα (Primary winding)** και θα αποδώσει **στο δευτερεύον τύλιγμα (Secondary winding)**, ώστε αυτό στη συνέχεια αυτό να δημιουργήσει ηλεκτρικό ρεύμα.
2. Τα **τυλίγματα**, τα οποία είναι υπεύθυνα για την προσανατολισμένη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος έτσι ώστε να δημιουργηθεί μέσω του πρωτεύοντος μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο μέσω του πυρήνα αξιοποιείται από το δευτερεύον τύλιγμα για την ανάπτυξη τάσης άρα και ρεύμα.
3. Τους **μονωτήρες (Bushings)** που είναι υπεύθυνοι για τη σύνδεση των αγωγών των τυλιγμάτων.
4. Το **σύστημα ψύξης (Cooling system)** το οποίο διατηρεί επιτρεπτή τη θερμοκρασία σε όλη την εγκατάσταση του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.



Εικόνα 2.2: Δομή τριφασικού μετασχηματιστή. [43]

#### 2.2.1.1 Πυρήνας

Ο πυρήνας ενός μετασχηματιστή ισχύος αποτελείται από πολλαπλά ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού πάχους 0.23 – 0.50, mm τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους και πιεσμένα μαζί για να δημιουργήσουν μία μορφή δέσμης. Το σιδηρομαγνητικό υλικό που χρησιμοποιείται είναι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων πυριτιούχος χάλυβας, με 4 – 5% πυρίτιο, λόγω του χαμηλού κόστους που έχει, την υψηλή διαπερατότητα για μεγάλες τιμές μαγνητικής επαγωγής όπως και τις χαμηλές απώλειες πυρήνα. Εμπλουτίζοντας το σιδηρομαγνητικό υλικό με μεγαλύτερη αναλογία στο πυρίτιο μπορούν να μειωθούν περαιτέρω οι απώλειες δινορρευμάτων με το μειονέκτημα όμως της αύξησης του βαθμού σκλήρυνσης και τη ψαθυρότητα του υλικού. Ένας τρόπος για την περαιτέρω μείωση των δινορρευμάτων είναι η μείωση του πάχους των ελασμάτων, αυτό βέβαια προϋποθέτει μία αύξηση στο κόστος λόγω της αυξημένης δυσκολίας στην παραγωγή λεπτών ελασμάτων. Αξιοποιώντας

ελάσματα ψυχρής εξέλασης προσανατολισμένων κόκκων και τοποθετώντας μεταξύ τους μόνωση τύπου μονωτικού χαρτιού πάχους 0.02 – 0.03 mm ή μονωτικού βερνικιού μέσω επιχρίσματος ή μία λεπτή στρώση εφύαλωσης λίγων  $\mu\text{m}$  επιτυγχάνεται συντελεστής πλήρωσης κατ' όγκο περίπου ίσο με 96%.

Ο πυρήνας χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα, τα κατακόρυφα τμήματα τα οποία ονομάζονται κορμοί και τα οριζόντια τμήματα τα οποία ονομάζονται ζυγώματα. Συνηθίζεται το άνω ζύγωμα να μην είναι συνδεδεμένο με τα άλλα τμήματα του πυρήνα έτσι ώστε να μπορεί να αφαιρείται για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η τοποθέτηση των τυλιγμάτων μέσα στον πυρήνα. Μια ιδιαίτερη διαφοροποίηση συναντάται στη μορφή του πυρήνα για μετασχηματιστή τηλεπικοινωνίας, όπου ο αέρας αποτελεί τον ίδιο τον πυρήνα.

### 2.2.1.2 Τυλίγματα

Τα τυλίγματα αποτελούν τους ρευματοφόρους αγωγούς, είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο (για ισχύες έως και 1000 kVA) ή χαλκό ανάλογα με τις απαιτήσεις ως προς τη χρήση του ίδιου του μετασχηματιστή. Σε περίπτωση που ο μετασχηματιστής έχει ως κύριο στόχο τη μείωση του όγκου που καταλαμβάνει σε έναν χώρο, τότε πρέπει να κατασκευαστεί με τυλίγματα χαλκού, εφόσον η ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού είναι μεγαλύτερη από αυτή του αλουμινίου και έτσι θα μπορεί να επιλεγεί μικρότερη διατομή αγωγών με βάση το χαλκό σε σύγκριση με το αλουμίνιο. Μαζί με την επιλογή του υλικού ενδέχεται και η αντίστοιχη θερμική και μηχανική αντοχή του υλικού που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη μελέτη της εγκατάστασης. Τα τυλίγματα φέρουν στην επιφάνεια βερνίκι τύπου καπρόν ή τέλερεν για διαμέτρους έως 0.35 mm, βαμβάκι έως και τα 1,3 mm και μονωτικό χαρτί για μεγαλύτερες διατομές ως μονωτικά μέσα για την αποφυγή βραχυκυκλώματος μεταξύ τους. Ο λόγος που τα τυλίγματα είναι τοποθετημένα γύρω από τον κορμό/κορμούς του πυρήνα είναι η μείωση της ροής σκέδασης.

Το τύλιγμα το οποίο συνδέεται άμεσα με το δίκτυο και φέρει τα χαρακτηριστικά του, δηλαδή αναπτύσσεται τάση  $V_1$  πάνω σε αυτό ίση με αυτή του δικτύου και μέσα από αυτό ρέει ανάλογο ρεύμα έντασης  $I_1$  ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα, όπως επίσης και η  $V_1$  ως τάση πρωτεύοντος και το  $I_1$  ως ρεύμα πρωτεύοντος. Το τύλιγμα που αναπτύσσει τάση διαφορετικού επιπέδου, δηλαδή έχει μετασχηματισμένη τάση ονομάζεται δευτερεύον τύλιγμα και αντίστοιχα η τάση  $V_2$  που εφαρμόζεται ονομάζεται τάση δευτερεύοντος, όπως και το ρεύμα  $I_2$  ονομάζεται ρεύμα δευτερεύοντος.

### 2.2.1.3 Λοιπά βοηθητικά Εξαρτήματα - Διατάξεις

Τα εξαρτήματα που θα επεξηγηθούν παρακάτω αποτελούν απαραίτητα τμήματα του μετασχηματιστή για την ομαλή λειτουργία του:

#### 1. Δοχείο διαστολής λαδιού

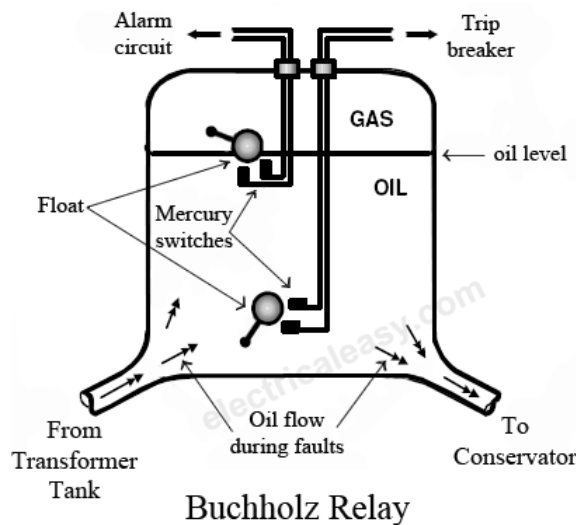
Εμφανίζονται σε μετασχηματιστές υγρού τύπου (επεξηγούνται παρακάτω στην παράγραφο 2.2.2.1) μαζί με επιμέρους τμήματα όπως σωλήνες ασφαλείας, **συσσκευή Buchholz (Buchholz relay)**, για την σωστή και ομαλή κυκλοφορία του λαδιού για την ψύξη του μετασχηματιστή. Το δοχείο λειτουργεί ως ένας αποθηκευτικός χώρος λαδιού ο οποίος συγκρατεί ένα ποσό λαδιού το οποίο κυκλοφορεί μέσα στο μετασχηματιστή με τη βοήθεια αντλίας και ψύχεται σε κάποιο σημείο όπου υπάρχει κάποιο ψυγείο και πραγματοποιείται ψύξη είτε με τη βοήθεια ψηκτρών, είτε με τη βοήθεια ανεμιστήρων.

Μεγάλη χρησιμότητα έχει η συσκευή Buchholz η οποία λειτουργεί ως συσκευή αναφοράς, δηλαδή μέσω αυτής μπορεί να ειδοποιηθεί το προσωπικό της εγκατάστασης σε περίπτωση μικρού ή και μεγάλου σφάλματος. Πρόκειται για ένα μικρό δοχείο το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ του

δοχείου διαστολής λαδιού (**conservator**) και της δεξαμενής λαδιού (**transformer tank**) που βυθίζεται μέσα ο μετασχηματιστής. Εσωτερικά περιέχει δύο **φλοτέρ (float)** τα οποία έχουν πάνω τους συνδεδεμένο έναν **διακόπτη υδραργύρου (mercury switch)** το καθένα. Το ένα φλοτέρ βρίσκεται ψηλά κοντά στον δειγματολήπτη αερίων ο οποίος βρίσκεται στην κορυφή του δοχείου και το δεύτερο φλοτέρ βρίσκεται χαμηλά κοντά στην είσοδο του σωλήνα που φέρει λάδι από τη δεξαμενή του μετασχηματιστή.

Κατά την κανονική λειτουργία του μετασχηματιστή τα φλοτέρ αυτά και οι διακόπτες ισορροπούν χωρίς να προκαλούν κάποια αλλαγή σε όλο το σύστημα.

Σε περίπτωση κάποιου μικρού βραχυκυκλώματος/υπερθέρμανσης του μετασχηματιστή η απότομη αλλαγή στην θερμοκρασία του λαδιού μπορεί να προκαλέσει αέρια εντός του κλειστού συστήματος ψύξης, αυτά τα αέρια λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας σε σχέση με το υγρό λάδι οδεύουν προς το υψηλότερο σημείο του κλειστού συστήματος, δηλαδή στο δοχείο διαστολής λαδιού. Πριν φτάσουν όμως σε αυτό περνάνε από τη συσκευή Buchholz στη οποία αυτά τα αέρια οδεύοντας προς τα πάνω, προκαλούν την πτώση του λαδιού και στη συνέχεια ως αποτέλεσμα την πτώση του φλοτέρ που βρίσκεται ψηλά. Αυτό προκαλεί τη ροή του υδραργύρου που υπάρχει μέσα στον διακόπτη να πέσει και να βραχυκυκλώσει τις δύο επαφές που έχει ο διακόπτης αυτός στέλνοντας σήμα στο κέντρο ελέγχου για μικρό σφάλμα κατά τη λειτουργία. Επίσης ο δειγματολήπτης αερίου κατακρατάει ένα μικρό ποσό αερίου το οποίο μπορεί να συλλεχτεί αργότερα για περαιτέρω μελέτη για την επίπτωση ή την αιτία του σφάλματος.



Σχήμα 2.1 Εσωτερική δομή της συσκευής Buchholz [44]

Σε περίπτωση που το σφάλμα είναι μεγαλύτερο και δημιουργηθεί μεγάλος όγκος αερίων, αυτός ο όγκος θα έρθει με μεγάλη ορμή προς το δοχείο και έτσι θα ανασηκώσει το κάτω φλοτέρ το οποίο και αυτό με την ίδια λογική αντίστοιχα θα βραχυκυκλώσει το διακόπτη υδραργύρου, ο οποίος βραχυκυκλώνει ένα **κύκλωμα προστασίας (trip breaker)** το οποίο διακόπτει τη λειτουργία του μετασχηματιστή για την αποφυγή μεγάλης βλάβης της εγκατάστασης.

## 2. Ανεμιστήρες

Χρησιμοποιούνται για τη διευκόλυνση απαγωγής θερμότητας στην εγκατάσταση του μετασχηματιστή.





Εικόνα 3.2 Ανεμιστήρες ψύξης σε έναν τριφασικό μετασχηματιστή. [45]

### 3. Μονωτήρες

Οι μονωτήρες οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη σύνδεση μεταξύ των φάσεων του δικτύου με το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή. Αναλόγως με το επίπεδο τάσης οι μονωτήρες έχουν διαφοροποιήσεις και στα υλικά τους. Για τους μονωτήρες μέσης τάσης (35 kV) έχουμε εξωτερική δομή από πορσελάνη, ενώ εσωτερικά γεμίζονται με λάδι ή αέρα. Ενώ για μονωτήρες υψηλής τάσης λόγω των μεγαλύτερων αναγκών επαρκούς μόνωσης και αντοχής των υλικών, εξωτερικά παραμένουν ίδιοι με αυτούς της μέσης τάσης, εσωτερικά όμως η δομή τους αποτελείται από πολλαπλά στρώματα μονωτικών υλικών και μεταλλικών φύλλων, τα οποία είναι τυλιγμένα γύρω από την αγωγή ράβδο.



Εικόνα 2.3 Διαδικασία τοποθέτησης των μονωτήρων σε έναν τριφασικό Μ/Σ υψηλής τάσης. [46]

### 4. Διατάξεις προστασίας του μετασχηματιστή

Λόγω της μεγάλης μεταφερόμενης ισχύος ή της απαίτησης συνεχόμενης λειτουργίας του μετασχηματιστή, ενσωματώνονται διατάξεις, οι οποίες προστατεύουν το μετασχηματιστή από διάφορα σφάλματα ή και χειρισμούς του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας που βραχυπρόθεσμα μπορεί να καταπονούν τον μετασχηματιστή. Οι διατάξεις αυτές χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με το σκοπό – χρησιμότητα τους στις παρακάτω:

### **a. Υπερτάσεις**

Μπορεί να προκληθεί είτε από φυσικό αίτιο, είτε από χειρισμό του δικτύου. Για την προστασία του μετασχηματιστή από κεραυνούς εγκαθίστανται αλεξικέραυνα σε αυτόν, τα οποία περιορίζουν τα υψηλά κύματα τάσης που δημιουργεί ένας κεραυνός κατά τη διάρκεια που χτυπά το σώμα του μετασχηματιστή. Σε περίπτωση υπέρτασης λόγω σφάλματος ή χειρισμού του δικτύου αξιοποιούνται διατάξεις με στραγγαλιστικά πηνία γείωσης, σπινθηριστών ή άλλων πιο εξειδικευμένων διατάξεων για την προστασία του μετασχηματιστή.

### **b. Υπερεντάσεις**

Επιτυγχάνεται με τοποθέτηση σωστών διαστασιολογημένων ασφαλειών, έως και τα επίπεδα τάσης 35 kV, οι οποίες συνοδεύονται από διακόπτες φορτίου για τη δυνατότητα ζεύξης – απόζευξης του μετασχηματιστή από το δίκτυο. Ως εναλλακτική λύση μπορούν να τοποθετηθούν αυτόματοι διακόπτες ισχύος χαρακτηριστικής «αντίστροφου χρόνου», όπου για μία δεδομένη τιμή μεγαλύτερη της φυσιολογικής το κύκλωμα ανοίγει και όσο πιο μεγάλη είναι αυτή η τιμή τόσο πιο γρήγορα αποκρίνεται ο διακόπτης και ανοίγει το κύκλωμα.

### **c. Υπερφορτίσεις**

Όπως και στις υπερεντάσεις έτσι και στις υπερφορτίσεις με σωστή διαστασιολόγηση των ασφαλειών, αυτές μπορούν να προστατέψουν το μετασχηματιστή και από τα δύο φαινόμενα.

### **d. Ασφάλεια και προστασία ανθρώπινου προσωπικού της εγκατάστασης**

Όποιο στοιχείο το οποίο βρίσκεται υπό τάση και θα μπορεί να αποτελέσει παράγοντα ατυχήματος πρέπει να περιβάλλεται από κατάλληλο γειωμένο μεταλλικό μονωτικό περίβλημα. Όλα τα μεταλλικά στοιχεία θα πρέπει να είναι κατάλληλα γειωμένα και να υπάρχουν σε εμφανή σημεία ενδείξεις υψηλής τάσης για την αποφυγή ατυχημάτων. Λόγω των προγραμματιζόμενων διακοπών λειτουργίας του μετασχηματιστή για συντήρηση, θα πρέπει να εξασφαλίζεται σωστή διάταξη απόζευξης – ζεύξης του μετασχηματιστή και για τις δύο πλευρές του δικτύου, την οποία θα μπορεί να αξιοποιεί το τεχνικό συνεργείο με ασφάλεια. Επίσης εκτός τις παραπάνω διατάξεις θα πρέπει να έχει εγκατασταθεί κατάλληλος γειωτής, ο οποίος θα μπορεί να αποφορτίσει οποιαδήποτε χωρητική φόρτιση που μπορεί να υπάρχει εσωτερικά του μετασχηματιστή.

### **e. Υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας – Βλάβες στο σύστημα ψύξης**

Με την χρήση κατάλληλων θερμικών ηλεκτρονόμων γίνεται έλεγχος της θερμοκρασίας και σε περίπτωση απότομης αύξησης ή όταν αυτή υπερβεί το όριο ασφάλειας τότε οι ηλεκτρονόμοι στέλνουν σήμα για ένδειξη σφάλματος.

### **f. Εσωτερικά βραχυκυκλώματα και σφάλματα**

Αξιοποιούνται κατάλληλοι διαφορικοί ηλεκτρονόμοι που αποτρέπουν τους αυτόματους διακόπτες ισχύος να ανοίξουν σε περίπτωση μεταβατικών ρευμάτων σε περίπτωση εκκίνησης ή πολύ μικρού σφάλματος.

## **2.2.2 Κατηγοριοποίηση μετασχηματιστών**

Λόγω της πολυπλοκότητας της κατασκευής ενός μετασχηματιστή και το μεγάλο εύρος εφαρμογών του, ο μετασχηματιστής χωρίζεται σε πολλαπλές κατηγορίες ανάλογα με τα παρακάτω κριτήρια:

- Σκοπός χρήσης – εφαρμογή του μετασχηματιστή
- Μηχανισμός ψύξης και μονωτικά μέσα
- Μορφολογία τυλιγμάτων



### **2.2.2.1 Κατηγοριοποίηση με βάση το σκοπό εφαρμογής**

Η εφαρμογή του μετασχηματιστή είναι σημαντικό να είναι γνωστή, διότι οι προδιαγραφές και τα υλικά κατασκευής του διαφέρουν αρκετά ανάλογα και την εφαρμογή του. Οι κύριες κατηγορίες με το παραπάνω κριτήριο απεικονίζονται παρακάτω:

#### **1. Μετασχηματιστές Διανομής**

Χρησιμοποιούνται σε δίκτυα διανομής ως μέσο μετατροπής του επιπέδου τάσης από μεσαίας τάσης σε χαμηλή τάση στο δίκτυο των οικιακών/μικρών καταναλωτών. Η ονομαστική τους ισχύς κυμαίνεται από τα 50 έως και τα 1600 kVA.

#### **2. Μετασχηματιστές ισχύος**

Εγκαθίστανται στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την ανύψωση της τάσης σε υψηλά επίπεδα για τη μεταφορά όπως επίσης και στους υποσταθμούς μεταφοράς υψηλής τάσης για την ανύψωση ή την υποβίβαση. Η ονομαστική ισχύς τους υπερβαίνει τα 2 MVA.

#### **3. Αυτομετασχηματιστές**

Αξιοποιούνται στην εκκίνηση κινητήρων ΕΡ (εναλλασσόμενου ρεύματος) όπως επίσης στη σύνδεση δικτύων διαφορετικών επιπέδων τάσεων λόγω της ικανότητας τους να μπορούν να τροποποιήσουν σε μικρά όρια το επίπεδο τάσης που λειτουργούν. Η ικανότητα τους αυτή προέρχεται από το γεγονός ότι υπάρχει μόνο ένα τύλιγμα πάνω στον πυρήνα και έτσι μπορούν να επιλεχθούν ενδιάμεσες λήψεις πάνω στο τύλιγμα με αποτέλεσμα την ανύψωση ή την υποβίβαση της τάσης. Κύριο μειονέκτημα όμως καθιστά το γεγονός του μονού τυλίγματος, το οποίο αφαιρεί την ικανότητα της γαλβανικής απομόνωσης.

#### **4. Μετασχηματιστές δοκιμών**

Ορίζονται για δοκιμές σε ψηλές και υπερυψηλές τάσεις.

#### **5. Ειδικοί μετασχηματιστές ισχύος**

Χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές όπου ζητείται μεγάλη παροχή ισχύος ή ρεύματος όπως π.χ. σε έναν βιομηχανικό φούρνο ή σε εργασίες με συγκόλληση.

#### **6. Μετασχηματιστές οργάνων**

Κύριο κριτήριο η ποιότητα των υλικών/κατασκευής με σκοπό την καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών μετρούμενων τιμών τάσης/ρεύματος μέσα από τα όργανα με ελάχιστες διακυμάνσεις. Ενσωματώνεται σε μετρητικά/ιατρικά/αισθητήρια όργανα.

#### **7. Μετασχηματιστές τηλεπικοινωνιών**

Στόχος τους η ακριβής αναπαραγωγή ενός σήματος σε ένα μεγάλο εύρος συχνότητας και τάσης. Σε αντίθεση με τους μετασχηματιστές ισχύος δεν στοχεύουν στην υψηλή απόδοση/μείωση απωλειών, αλλά στην πιστότητα της πληροφορίας που θα δεχθούν/θα αναπαράξουν.

### **2.2.2.2 Κατηγοριοποίηση με βάση το σύστημα ψύξης και τα μονωτικά υλικά**

Λόγω της μεγάλης ισχύος που διαπερνά τα τυλίγματα του μετασχηματιστή ακόμα και με τις χαμηλές θερμικές απώλειες και τις απώλειες που προκαλούνται από τον πυρήνα, λόγω δινορρευμάτων και του βρόχου υστέρησης, το ποσό της θερμότητας που εκλύεται είναι πολύ μεγάλο για να μπορεί ο μετασχηματιστής να λειτουργήσει σε μόνιμη κατάσταση χωρίς κάποιο μηχανισμό ψύξης. Ανάλογα με την ισχύ, το είδος του τυλίγματος, του πυρήνα και τις εξωτερικές συνθήκες

επιλέγεται κατάλληλο ψυκτικό μέσω ώστε να μπορεί ο μετασχηματιστής να λειτουργεί κανονικά χωρίς να υπερθερμαίνεται στα ονομαστικά μεγέθη μόνιμης λειτουργίας.

Αρχικά χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με το σύστημα ψύξης:

1. Στους μετασχηματιστές ξηρού τύπου. Στους συγκεκριμένους τοποθετείται πάνω στο τύλιγμα εποξειδική ρητίνη / υαλοβάμβακας και ψύχονται είτε από μόνοι τους μέσω του φυσικού αερισμού απελευθερώνοντας τη θερμότητα στο περιβάλλον (κατηγορία εξαερισμού N) ή με τη βοήθεια εξαναγκασμένου αερισμού (κατηγορία εξαερισμού F), δηλαδή με κάποιον μηχανισμό ανεμιστήρων. Λόγω της στερεάς μορφής των μονωτικών που τοποθετούνται πάνω στα τυλίγματα και τον πυρήνα, οι μετασχηματιστές αυτοί υπάγονται στην Α κατηγορία.



(α)



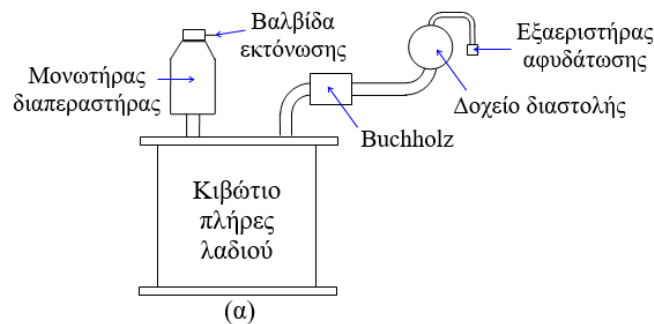
(β)

Σχήμα 2.2: (α) Μετασχηματιστής ελαίου – υγρού τύπου, (β) μετασχηματιστής ξηρού τύπου. [6, σελ. 15, Σχήμα 2.15].

2. Στους μετασχηματιστές υγρού τύπου (ή τύπου λαδιού). Εφαρμόζονται για εγκαταστάσεις η οποίες απαιτούν πιο αποτελεσματική ψύξη λόγω του ότι το λάδι ως ψυκτικό μέσο είναι πιο αποτελεσματικό εφόσον έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, μεγαλύτερο ειδικό βάρος και μεγαλύτερη ειδική θερμότητα. Για αυτόν το λόγο η θερμότητα απάγεται πιο σύντομα στο περιβάλλον και ταυτοχρόνως μπορεί να συσσωρεύσει μεγαλύτερες ποσότητες θερμότητας για σύντομα χρονικά διαστήματα σε περίπτωση υπερφόρτισης του μετασχηματιστή ή του δικτύου που χρησιμοποιείται. Ο μετασχηματιστής βυθίζεται μέσα στο ψυκτικό υγρό και μέσω ενός κυκλώματος υπάρχει συνεχόμενη ροή του λαδιού για την αποτελεσματικότερη ψύξη του. Το κύκλωμα αυτό, το οποίο απεικονίζεται παρακάτω, αποτελείται από το κιβώτιο που βρίσκεται ο μετασχηματιστής και το ψυκτικό μέσο, το δοχείο διαστολής, η συσκευή Buchholz, ο εξαεριστήρας, ο μονωτήρας διαπερατότητας και η βαλβίδα εκτόνωσης.

Αναλόγως τη θερμοκρασία που μπορούν να αντέξουν, τα μονωτικά υλικά αυτά χωρίς να χάσουν τις ψυκτικές τους ιδιότητες ή την αποτελεσματικότητά τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στην κατηγορία K με μονωτικά υλικά όπως εστέρες και ρευστή σιλικόνη και την κατηγορία O αντίστοιχα με ορυκτό έλαιο ή εύφλεκτο συνθετικό υγρό. Σε περίπτωση όπου οι παραπάνω μέθοδοι δεν είναι αρκετά αποτελεσματικοί και χρειάζεται περαιτέρω ψύξη, ο μετασχηματιστής βυθίζεται σε ένα εξωτερικό κιβώτιο, το οποίο σφραγίζεται, γεμάτο με νερό και λειτουργεί ως δεύτερο στρώμα ψύξης με τη βοήθεια ενός εξωτερικού ψυγείου όπου φθάνει το νερό με βοήθεια αντλίας και ψύχεται. Οι μετασχηματιστές με αυτήν τη μορφή κατατάσσονται στην κατηγορία W. Ένα τελευταίο μέσο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι αέρια με σημείο ανάφλεξης άνω των 300 °C (κατηγορία G), τα οποία

έρχονται σε επαφή με το μετασχηματιστή άμεσα και μέσω συναγωγής λόγω της άμεσης τεχνητής κυκλοφορίας (κατηγορίας εξαερισμού D) ψύχουν το μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.3: Δοχείο διαστολής μετασχηματιστή με τις παρελκόμενες συσκευές. [6, σελ. 16, Σχήμα 2.16].

### 2.2.2.3 Κατηγοριοποίηση με βάση τη μορφολογία των τυλιγμάτων

Τα τυλίγματα διαφοροποιούνται στη μορφολογία και την επιλογή υλικών και διατομών με βάση των κριτηρίων χρήσης τους. Βασικοί στόχοι κατά την επιλογή της μορφολογίας των τυλιγμάτων είναι:

- Η ελαχιστοποίηση θερμικών απωλειών κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή σε ονομαστικά μεγέθη, όπως επίσης και την ικανότητα απαγωγής των θερμικών απωλειών αυτών χωρίς πρόωρη φθορά των ίδιων των τυλιγμάτων ή της μόνωσης τους,
- Στη μηχανική αντοχή που θα χρειαστεί να αντέξουν κατά την εκκίνηση ή σε περίπτωση μικρών σεναρίων βραχυκυκλωμάτων,
- Στην εξασφάλιση της αναγκαίας τάσης ανά σπείρα που είναι ανάλογη με τον αναγκαίο αριθμό σπειρών.

Έτσι οι μετασχηματιστές κατηγοριοποιούνται σε δύο κύριες κατηγορίες με βάση τη μορφολογία των τυλιγμάτων, αυτές οι κατηγορίες τυλιγμάτων είναι:

#### 1) Τα κυλινδρικά ή σωληνωτά ή αλλιώς συγκεντρικά τυλίγματα.

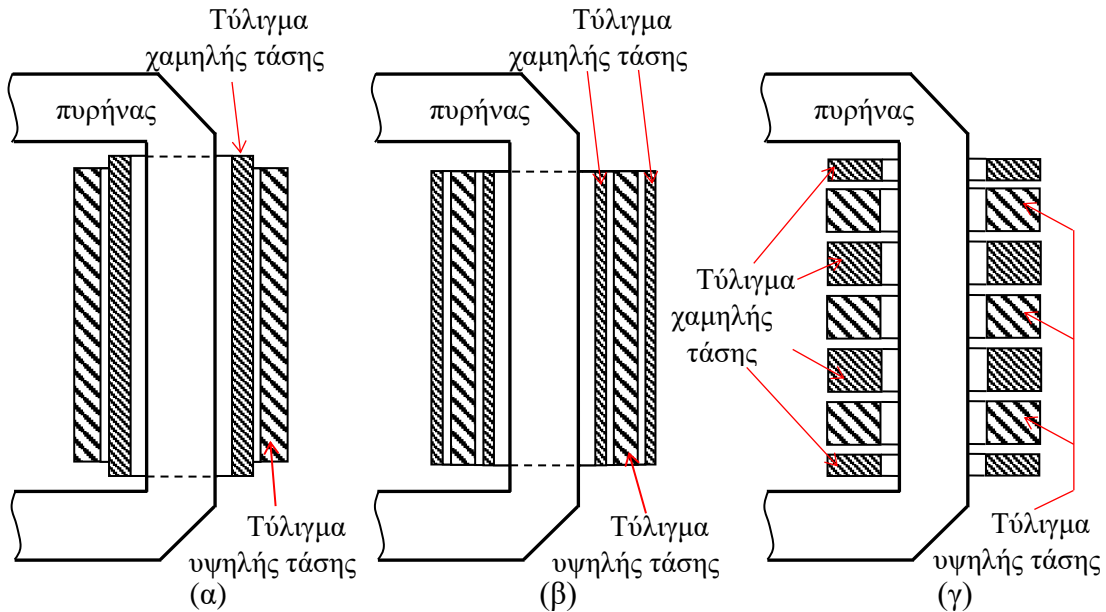
Οι μετασχηματιστές αυτού του τύπου έχουν το χαμηλής τάσης τύλιγμα το οποίο περιβάλλει τον πυρήνα και το ίδιο περιβάλλεται από το τύλιγμα υψηλής τάσης, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 2.4(α). Αυτό γίνεται με στόχο την εξοικονόμηση υλικού και την προστασία του τυλίγματος κατά τη διάρκεια της βραχυκύκλωσης όπου αναπτύσσονται μεγάλα ρεύματα και εφαρμόζονται υψηλές ροπές στα τυλίγματα. Περαιτέρω βελτίωση σε αυτήν την κατηγορία μετασχηματιστή πραγματοποιείται με το διαχωρισμό του τυλίγματος χαμηλής τάσης σε δύο μισά τμήματα, τα οποία το πρώτο μισό θα περιβάλλει τον πυρήνα και θα περιβάλλεται από το τύλιγμα υψηλής τάσης και το δεύτερο μισό θα περιβάλλει το τύλιγμα υψηλής τάσης, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 2.4(β). Ως αποτέλεσμα πραγματοποιείται μείωση της σκέδασης και η χρήση λιγότερης μόνωσης μεταξύ πυρήνα – τυλιγμάτων.

#### 1) Τα δισκοειδή τυλίγματα.

Σε αυτήν την περίπτωση τα δύο τυλίγματα, χαμηλής και υψηλής τάσης, χωρίζονται σε επιμέρους πηνία τα οποία έχουν μορφή δίσκων, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 2.4(γ). Έτσι αυτά τα δισκία τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο εναλλάξ, δηλαδή ένας δίσκος τυλίγματος χαμηλής τάσης πάνω σε ένα δίσκο τυλίγματος υψηλής τάσης και κάτω από αυτό ένας δίσκος τυλίγματος χαμηλής τάσης, δημιουργώντας ένα σωρό δίσκων. Όπως και στην περίπτωση των κυλινδρικών τυλιγμάτων έτσι και εδώ το τύλιγμα χαμηλής τάσης μπορεί να χωρισθεί σε δύο μισά τυλίγματα και έπειτα σε δίσκους με τρία στρώματα, δηλαδή χαμηλής τάσης τύλιγμα – υψηλής τάσης τύλιγμα – χαμηλής τάσης τύλιγμα, για τη μείωση της σκέδασης και την εξοικονόμηση μόνωσης μεταξύ πυρήνα – τυλιγμάτων.

Άλλα λοιπά είδη τυλιγμάτων τα οποία χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εφαρμογές και μπορούν να βρεθούν σε εξειδικευμένη βιβλιογραφία είναι:

- 2) Τα **ελικοειδή** τυλίγματα.
- 3) Τα τυλίγματα **διπλής στρώσης**.
- 4) Τυλίγματα **περιτυλιγμένων φύλλων αλουμινίου**.



Σχήμα 2.4: Τύποι τυλιγμάτων μετασχηματιστή. (α) κυλινδρικά – σωληνωτά τυλίγματα, (β) κυλινδρικά – σωληνωτά με το τύλιγμα χαμηλής διαχωρισμένο σε δύο τμήματα, (γ) δισκοειδή τυλίγματα. [6, σελ. 12, Σχήμα 2.12].

## 2.3 Λειτουργία μετασχηματιστή εν κενώ

### 2.3.1 Εύρεση λόγου μετασχηματισμού

Λειτουργία εν κενώ ή αλλιώς **κενή λειτουργία** ονομάζεται η κατάσταση στην οποία ο μετασχηματιστής στο πρωτεύον τροφοδοτείται με μία εναλλασσόμενη πηγή τάσης ημιτονοειδούς μορφής  $v_1(t)$ , ενώ το δευτερεύον τύλιγμα είναι ανοιχτοκυκλωμένο, δηλαδή δεν υπάρχει κάποιο φορτίο συνδεδεμένο σε αυτό. Θεωρείται ότι η  $v_1(t)$  όπως απεικονίζεται στην παρακάτω μορφή:

$$v_1(t) = \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_1 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2.3.1)$$

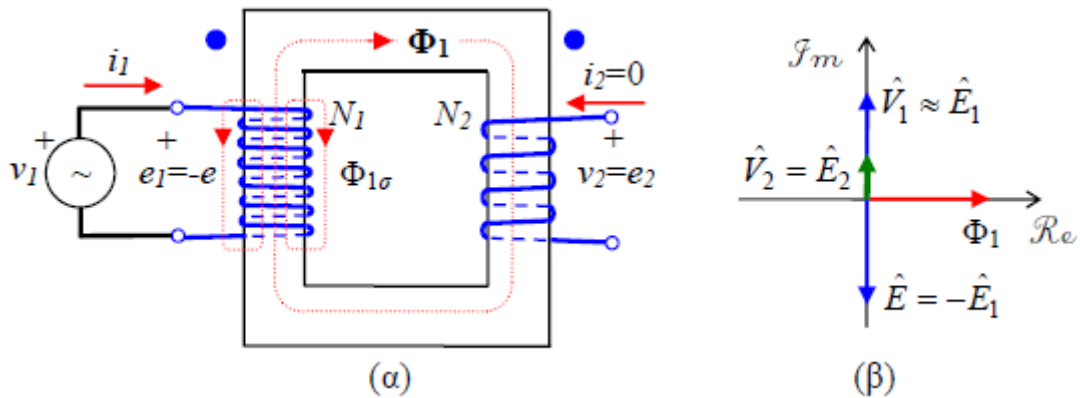
Όπου:

- $\tilde{V}_1$ : Η ενεργός τιμή της τάσης της πηγής που εφαρμόζεται στο πρωτεύον τύλιγμα σε Volts [V]
- $\omega$ : Η γωνιακή ταχύτητα σε rad/sec [rad/s]

Λόγω αυτής της εφαρμοζόμενης τάσης στο πρωτεύον τύλιγμα, διαρρέεται από ρεύμα, η ένταση του οποίου είναι ίση με το 2% έως 10% του ονομαστικού ρεύματος ενός μετασχηματιστή ισχύος. Αυτό το ρεύμα αποκαλείται **ρεύμα διέγερσης** και συμβολίζεται ως  $i_\phi$ .

Το ρεύμα αυτό προκαλεί μαγνητική ροή  $\Phi_1$  από την οποία ένα μικρό μέρος της δεν περνά στο δευτερεύον λόγω του αέρα και έτσι δεν υφίσταται ωφέλιμη, αυτό το μικρό ποσό ονομάζεται μαγνητική **ροή σκέδασης** του πρωτεύοντος τυλιγματος και συμβολίζεται ως  $\Phi_{1\sigma}$ , το οποίο κυμαίνεται στο 0,5% υπό συνθήκες κενού φορτίου. Το υπόλοιπο μεγάλο ποσό καθιστά την **ωφέλιμη**

μαγνητική ροή  $\Phi_m$  η οποία μέσω του σιδηρομαγνητικού πυρήνα, όπως απεικονίζεται και στο παρακάτω σχήμα, φθάνει στο δευτερεύον τύλιγμα.



Σχήμα 2.5: (α) Ηλεκτρικό/Μαγνητικό κύκλωμα μετασχηματιστή σε λειτουργία εν κενώ, (β) διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και μαγνητικών ροών σε λειτουργία εν κενώ. [6, σελ. 19, Σχήμα 2.17].

Το ρεύμα διέγερσης  $i_\varphi$  είναι εναλλασσόμενο με αποτέλεσμα να δημιουργεί μία εναλλασσόμενη μαγνητική ροή  $\Phi_1$  η οποία με τη σειρά της αναπτύσσει μία αντιηλεκτρεγερτική δύναμη  $e(t)$  στο πρωτεύον τύλιγμα, η οποία είναι ίση και αντίθετη με την πτώση τάσης πάνω στο πρωτεύον τύλιγμα  $e_1(t)$ . Πιο αναλυτικά ισχύει ότι:

$$e(t) = -N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = -e_1(t) \quad (2.3.2)$$

Όπου:

- $N_1$ : Πλήθος τυλιγμάτων στο πρωτεύον τύλιγμα
- $\Phi_1$ : Μαγνητική ροή εντός του πυρήνα από το πρωτεύον

Αν θεωρηθεί η αντίσταση του μετασχηματιστή στο πρωτεύον μη αμελητέα εφαρμόζοντας το νόμο των τάσεων του Kirchhoff, η τάση της πηγής θα είναι ίση με το άθροισμα της πτώσης τάσης στην αντίσταση  $R_1$  συν την επαγωγική πτώση τάσης πάνω στο ίδιο τύλιγμα  $e_1(t)$ , δηλαδή:

$$v_1(t) = i_\varphi(t) \cdot R_1 + e_1(t) \quad (2.3.3)$$

Επειδή και το ρεύμα σκέδασης  $i_\varphi(t)$  αλλά και η αντίσταση  $R_1$  στο πρωτεύον έχουν μικρές τιμές, ο πρώτος όρος της (2.3.3) μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος και έτσι με βάση τη (2.3.1) προκύπτει ότι:

$$v_1(t) = \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_1 \cdot \cos(\omega \cdot t) \approx e_1(t) = \sqrt{2} \cdot \tilde{E}_1 \cdot \cos(\omega \cdot t) = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} \quad (2.3.4)$$

Όπου:

- $\tilde{E}_1$ : Η ενεργός τιμή της επαγωγικής πτώσης τάσης που εφαρμόζεται στο τύλιγμα.

Με κατάλληλη ολοκλήρωση στο πεδίο του χρόνου προσδιορίζεται η μαγνητική ροή  $\Phi_1(t)$  όπως ακολουθεί παρακάτω:

$$\frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{E}_1}{N_1} \cdot \cos(\omega \cdot t) \rightarrow \Phi_1(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{E}_1}{N_1 \cdot \omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \rightarrow \quad (2.3.5)$$

$$\Phi_1(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{E}_1}{N_1 \cdot \omega} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.3.6)$$

Η σχέση (2.3.6) παίρνει μέγιστη τιμή όταν το συνημίτονο είναι ίσο με τη μονάδα και έχει τιμή ίση με:

$$\Phi_{1,max} = \frac{\sqrt{2} \cdot \widetilde{E}_1}{N_1 \cdot \omega} = \frac{\sqrt{2} \cdot \widetilde{E}_1}{N_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\widetilde{E}_1}{4.44 \cdot N_1 \cdot f} \quad (2.3.7)$$

Όπως το πρωτεύον έτσι και το δευτερεύον τυλίγμα διαρρέεται από μαγνητική ροή  $\Phi_2(t)$  και επάγεται πάνω στα άκρα του δευτερεύοντος τυλίγματος των  $N_2$  ελιγμάτων ή τάση  $e_2(t)$ , η οποία αντίστοιχα είναι ίση με:

$$e_2(t) = \sqrt{2} \cdot \widetilde{E}_2 \cdot \cos(\omega \cdot t) = N_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} \quad (2.3.8)$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως και με τις σχέσεις (2.3.6) και (2.3.7) προκύπτει η αντίστοιχη εξίσωση για τη μαγνητική ροή  $\Phi_2(t)$  και τη μέγιστη μαγνητική ροή  $\Phi_{2,max}$  στο δευτερεύον:

$$\Phi_2(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot \widetilde{E}_2}{N_2 \cdot \omega} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.3.9)$$

$$\Phi_{2,max} = \frac{\sqrt{2} \cdot \widetilde{E}_2}{N_2 \cdot \omega} = \frac{\sqrt{2} \cdot \widetilde{E}_2}{N_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\widetilde{E}_2}{4.44 \cdot N_2 \cdot f} \quad (2.3.10)$$

Λόγω του ότι η μαγνητική ροή  $\Phi_2(t)$  ταυτίζεται πρακτικά με την κοινή μαγνητική ροή  $\Phi_m$ , η οποία είναι ίση με τη μαγνητική ροή  $\Phi_1(t)$  αγνοώντας ροές σκέδασης, από τις σχέσεις (2.3.7) και (2.3.10) προκύπτει η παρακάτω ισότητα:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\widetilde{E}_1}{\widetilde{E}_2} \approx \frac{\widetilde{V}_1}{\widetilde{V}_2} = a \quad (2.3.11)$$

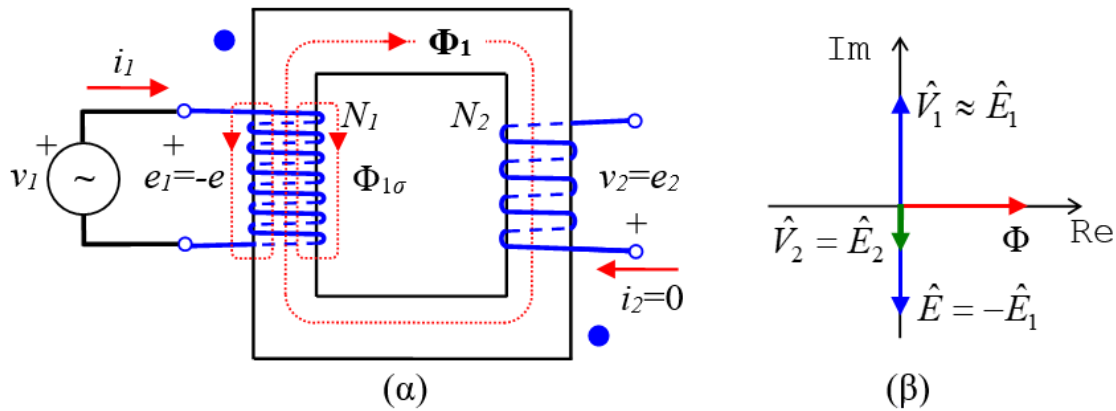
Ο λόγος  $\widetilde{V}_1/\widetilde{V}_2$  ορίζεται ως **λόγος μετασχηματισμού** ή **σχέση μεταφοράς**  $a$  και είναι προσεγγιστικά ίσος με τον αντίστοιχο λόγο  $N_1/N_2$ , καθώς για υπολογιστικό σφάλμα μικρότερο του 0.5% η ισότητα  $v_1(t) = e_1(t)$  ισχύει για πραγματικούς μετασχηματιστές. Επίσης, όταν πρόκειται για ανοιχτοκύκλωση στο δευτερεύον, ισχύει καθολικά η σχέση  $v_2(t) = e_2(t)$ . Όσο μικρότερη είναι η ωμική αντίσταση στο πρωτεύον, τόσο πιο πολύ προσεγγίζει ο λόγος  $\widetilde{V}_1/\widetilde{V}_2$  το λόγο  $N_1/N_2$ . Στην περίπτωση που η ωμική αντίσταση είναι ίση με μηδέν, τότε ισχύει:

$$Av R_1 = 0 \rightarrow \frac{N_1}{N_2} = \frac{\widetilde{E}_1}{\widetilde{E}_2} = \frac{\widetilde{V}_1}{\widetilde{V}_2} = a \quad (2.3.12)$$

Σε περίπτωση που οι τάσεις στους ακροδέκτες του πρωτεύοντος  $v_1(t)$  και του δευτερεύοντος  $v_2(t)$  είναι συμφασικές όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.5, όπου εμφανίζεται και το διάγραμμα τάσεων και μαγνητικών ροών.

Στην περίπτωση όπου τα τυλίγματα έχουν αντίστροφη πολικότητα, δηλαδή τα τυλίγματα του δευτερεύοντος έχουν αντιστραφεί, τότε δημιουργείται διαφορά φάσης μεταξύ των τάσεων  $v_1(t)$  και  $v_2(t)$ , η οποία όμως δεν επηρεάζει το λόγο μετασχηματισμού, εφόσον σε αυτόν εμπεριέχονται οι ενεργές τιμές των τάσεων. Παρακάτω παρουσιάζεται αντίστοιχο σχήμα όπου εμφανίζεται η διάταξη των τυλιγμάτων και το διάγραμμα τάσεων και μαγνητικών ροών.





Σχήμα 2.6: (α) Ηλεκτρικό/Μαγνητικό κύκλωμα μετασχηματιστή σε λειτουργία εν κενώ (με αντίθετες πολικότητες στα τυλίγματα), (β) διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και μαγνητικών ροών σε λειτουργία εν κενώ. [6, σελ. 20, Σχήμα 2.18].

### 2.3.2 Ρεύμα κενής λειτουργίας και ρεύμα διέγερσης

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του μετασχηματιστή εν κενώ το ρεύμα πρωτεύοντος, δηλαδή το ρεύμα διέγερσης  $i_{\phi}(t)$ , δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο αντίστοιχο μαγνητικό κύκλωμα του μετασχηματιστή με ισχύ ίση με  $v_1(t) \cdot i_{\phi}(t)$  η οποία είναι ίση με τις **θερμικές απώλειες χαλκού (Copper Loss)** της ωμικής αντίστασης του πρωτεύοντος τυλίγματος  $R_1$  συν τις **απώλειες υστέρησης (Hysteresis Loss)** και **δινορρευμάτων (Eddy current loss)** στον πυρήνα.

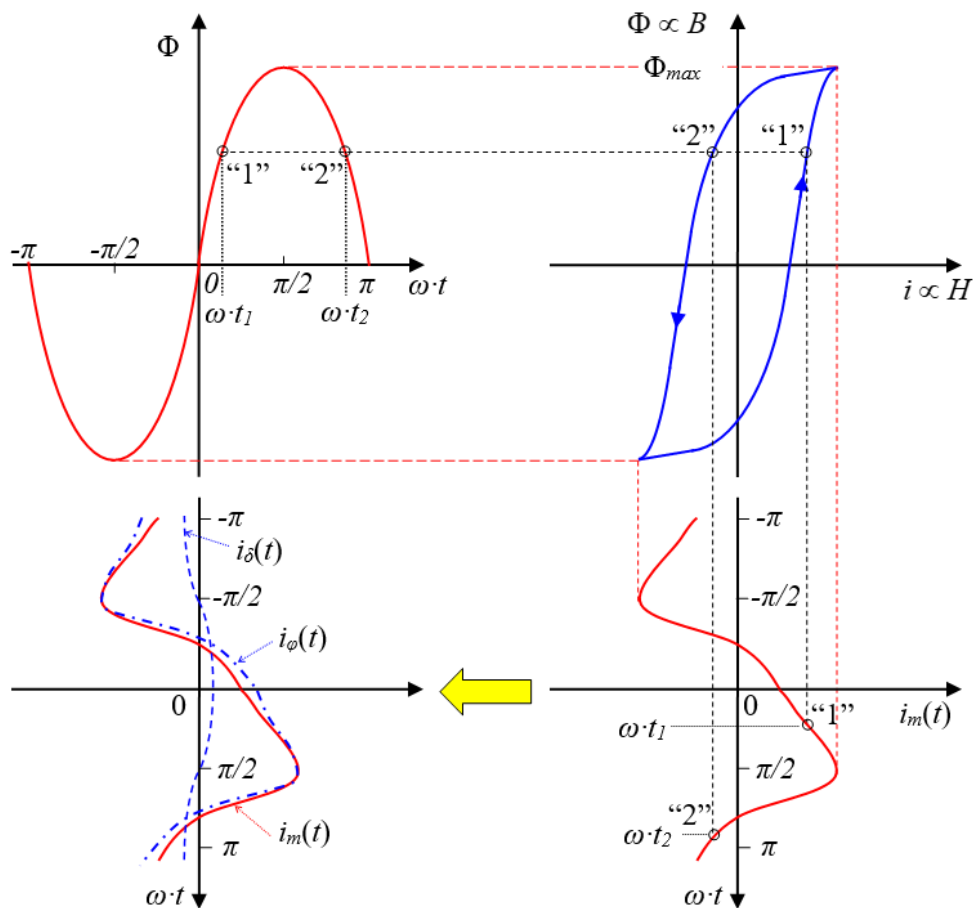
Το ρεύμα διέγερσης υπό κανονικές περιπτώσεις είναι περιοδικό με συχνότητα  $f$  η οποία θα είναι ίδια με αυτή της προερχόμενης πηγής και θα έπρεπε να έχει ημιτονοειδή μορφή. Ωστόσο αυτό δεν ισχύει, η μορφή του ρεύματος δεν είναι ημιτονοειδής και αυτό οφείλεται στο ότι ο βρόχος υστέρησης δεν έχει γραμμική συμπεριφορά, με αποτέλεσμα την δημιουργία μίας σημαντικής **τρίτης αρμονικής (Third Harmonic)** ρεύματος, δηλαδή μία συνιστώσα του ολικού ρεύματος διέγερσης η οποία έχει **τριπλάσια** συχνότητα  $3f$  από ότι έχει η πηγή η οποία επιβάλλει αντίστοιχη συχνότητα  $f$  στο ρεύμα διέγερσης. Παρακάτω εμφανίζεται σχήμα το οποίο απεικονίζει τη μορφή αυτή, η οποία σχολιάστηκε παραπάνω.

Το ρεύμα διέγερσης  $i_{\phi}(t)$  μπορεί να αναλυθεί με την εφαρμογή των σειρών Fourier αξιοποιώντας τις ενεργές τιμές των επιμέρους συνιστωσών. Λόγω της συμμετρίας δεν υπάρχουν άρτιες αρμονικές, αλλά μόνο περιττές. Λόγω της μη περιττότητας του ρεύματος εμφανίζονται όροι που εμπεριέχουν ημίτονο και συνημίτονο. Έτσι προκύπτει η παρακάτω σχέση η οποία εκφράζει το συνολικό ρεύμα διέγερσης με εφαρμογή των σειρών Fourier:

$$i_{\phi}(t) = \sqrt{2} \cdot \left\{ \left( \widetilde{I}_{1s} \cdot \sin(\omega \cdot t) + \widetilde{I}_{3s} \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t) + \widetilde{I}_{5s} \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t) + \dots \right) \right. \\ \left. + \left( \widetilde{I}_{1c} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \widetilde{I}_{3c} \cdot \cos(3 \cdot \omega \cdot t) + \widetilde{I}_{5c} \cdot \cos(5 \cdot \omega \cdot t) + \dots \right) \right\} \quad (2.3.13)$$

Το **θεμελιώδες** ρεύμα ή αλλιώς η **αρμονική 1<sup>ης</sup> τάξης**  $i_{\phi-1}(t)$  αποτελείται από μία ημιτονοειδή συνιστώσα συμφασική με τη μαγνητική ροή  $\Phi$ , που αποτελεί την 1<sup>η</sup> αρμονική του ρεύματος μαγνήτισης:

$$i_{m-1}(t) = i_{\phi-1s}(t) = \sqrt{2} \cdot \widetilde{I}_{1s} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.3.14)$$



Σχήμα 2.7: Κυματομορφή ρευμάτων μαγνήτισης και διέγερσης – Διαδικασία εξαγωγής. [6, σελ. 21, Σχήμα 2.19].

Και από μία συμφασική συνημιτονοειδή συνιστώσα με την αναπτυσσόμενη τάση στα άκρα του πρωτεύοντος, προπορευόμενη κατά  $90^\circ$  της αντίστοιχης μαγνητικής ροής.

$$i_{\varphi-1c}(t) = \sqrt{2} \cdot \tilde{I}_{1c} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2.3.15)$$

Εν τέλει η απορροφούμενη ισχύ του πυρήνα είναι ίση με:

$$P_{\pi} = \tilde{E}_1 \cdot \tilde{I}_{1c} \quad (2.3.16)$$

Αυτή η ισχύς εκφράζει της απώλειες που προκύπτουν στον πυρήνα η οποίες είναι ανάλογες του ρεύματος διέγερσης, το οποίο διαχωρίζεται σε αυτό της υστέρησης και σε αυτό των δινορρευμάτων. Το  $i_{1c}(t)$  αποτελείται αντίστοιχα από το ρεύμα υστέρησης  $i_{\varphi}(t)$  και το ρεύμα δινορρευμάτων  $i_{\delta}(t)$ , άρα μπορεί να θεωρηθεί ότι η συνιστώσα  $i_{1c}(t)$  είναι το συνολικό ρεύμα το οποίο διαρρέει μέσα στον πυρήνα, και το συμβολίζουμε ως  $i_{\pi}(t)$ .

Η 1<sup>η</sup> (θεμελιώδης) και η 3<sup>η</sup> συνιστώσα του ρεύματος διέγερσης είναι αυτές οι οποίες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη μορφή της συνολικής μορφής του ρεύματος παραμορφώνοντας την κορυφή λόγω των μεγάλων ενεργών τιμών τους. Ο υπολογισμός των δύο αυτών συνιστωσών απεικονίζεται παρακάτω από τις σχέσεις (2.3.17) και (2.3.18) αντίστοιχα:

$$\tilde{I}_1 = \sqrt{\tilde{I}_{1s}^2 + \tilde{I}_{1c}^2} = \sqrt{\tilde{I}_{1s}^2 + \tilde{I}_{\pi}^2} \quad (2.3.17)$$



$$\tilde{I}_3 = \sqrt{\tilde{I}_{3s}^2 + \tilde{I}_{3c}^2} \quad (2.3.18)$$

Εάν υπάρχει μεγάλη ανάγκη για τον περιορισμό της παραμόρφωσης τότε προτείνεται η λειτουργία σε χαμηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής. Μία διάταξη η οποία θα μπορούσε να επωφεληθεί από αυτό είναι ένας τηλεπικοινωνιακός μετασχηματιστής στους οποίους και μία πολύ μικρή παραμόρφωση μπορεί να έχει δυσμενή αποτελέσματα για τον αρχικό στόχο – ρόλο του ίδιου του μετασχηματιστή.

Στη συνέχεια ορίζεται το ισοδύναμο ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης  $i_{\varphi-eq}$  το οποίο αποτελείται από:

$$i_{\varphi-eq} = \sqrt{2} \cdot (\tilde{I}_{m-eq} \cdot \sin(\omega \cdot t) + \tilde{I}_{\pi} \cdot \cos(\omega \cdot t)) = i_{\varphi} \quad (2.3.19)$$

Όπου:

- $\tilde{I}_{m-eq}$  : Το ισοδύναμο ρεύμα μαγνήτισης
- $\tilde{I}_{\pi}$  : Το ρεύμα πυρήνα

Παρατηρείται ότι η ενεργός τιμή του ισοδύναμου ρεύματος μαγνήτισης υστερεί κατά  $90^\circ$  από την ενεργό τιμή του ρεύματος πυρήνα ο οποίος είναι συμφασικός με την τιμή της  $e_1(t)$ . Η ενεργός τιμή του ισοδύναμου ρεύματος μαγνήτισης αποτελείται από το πλήθος όλων των μονών αρμονικών, δηλαδή είναι ίση με:

$$\tilde{I}_{m-eq} = \sqrt{I_{1s}^2 + I_{3s}^2 + I_{3c}^2 + I_{5s}^2 + I_{5c}^2 + \dots} \quad (2.3.20)$$

Χαρακτηριστικό του ισοδύναμου ρεύματος μαγνήτισης είναι το γεγονός ότι θεωρείται συμφασικό με τη μαγνητική ροή αν και αυτό το ρεύμα δεν υπάρχει στην πραγματικότητα, αλλά θεωρείται για λόγους διευκόλυνσης.

Έτσι λοιπόν από τις σχέσεις (2.3.19) και (2.3.20) προκύπτει ότι η ενεργός τιμή του ισοδύναμου ρεύματος διέγερσης  $\tilde{I}_{\varphi-eq}$  είναι ίσο με την ενεργό τιμή του ισοδύναμου ρεύματος μαγνήτισης συν του ρεύματος πυρήνα  $\tilde{I}_{\pi}$ , δηλαδή:

$$\tilde{I}_{\varphi-eq} = \sqrt{\tilde{I}_{m-eq}^2 + \tilde{I}_{\pi}^2} = \sqrt{I_{1s}^2 + I_{3s}^2 + I_{3c}^2 + I_{5s}^2 + I_{5c}^2 + \dots + \tilde{I}_{\pi}^2} = \tilde{I}_{\varphi} \quad (2.3.21)$$

## 2.4 Ιδανικός μετασχηματιστής

Κατά τη λειτουργία ενός πραγματικού μετασχηματιστή υπάρχουν πολλαπλές αιτίες για την ύπαρξη απωλειών ισχύος. Τέτοιες αιτίες μπορεί να είναι οι θερμικές απώλειες οι οποίες έχουν ως αίτιο την ύπαρξη ωμικής αντίστασης στα τυλίγματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Επίσης απώλειες στο σιδηρομαγνητικό υλικό – πυρήνα του μετασχηματιστή λόγω της μαγνητικής υστέρησης, η οποία οφείλεται στο βρόχο υστέρησης, όπως και των δινορρευμάτων. Θεωρώντας όλες αυτές τις απώλειες αμελητέες ένας μετασχηματιστής μπορεί να θεωρηθεί **ιδανικός**, διότι λειτουργεί αξιοποιώντας όλο το ποσό ισχύος που του προσδίδεται και το οδηγεί προς την «έξοδο» του συστήματος δηλαδή προς το δευτερεύον χωρίς να χάνεται κάποιο ποσοστό κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας.

Πιο συγκεκριμένα, ένας μετασχηματιστής θεωρείται ιδανικός όταν κατέχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- Δεν υπάρχουν θερμικές απώλειες στα τυλίγματα. Για να ισχύει αυτό θα πρέπει τα τυλίγματα των μετασχηματιστών να έχουν μηδενική ωμική αντίσταση σε όλο το μήκος τους και να είναι καθαρά επαγωγικά φορτία, τα οποία δημιουργούν την κατάλληλη μαγνητική ροή εντός του κυκλώματος μαγνήτισης.
- Δεν υπάρχουν απώλειες δινορρευμάτων. Για αυτόν το λόγο θα πρέπει το σιδηρομαγνητικό υλικό – πυρήνας του μετασχηματιστή να έχει άπειρη ωμική αντίσταση, η οποία δεν θα επιτρέπει τη διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε αυτό.
- Δεν υπάρχουν απώλειες μαγνητικής υστέρησης. Για να είναι ορθό αυτό, θα πρέπει η μαγνητική διαπερατότητα του σιδηρομαγνητικού υλικού – πυρήνα να είναι άπειρη, έτσι ώστε η μαγνητική αντίσταση στο μαγνητικό κύκλωμα χωρίς διάκενο να είναι μηδέν. Έτσι ως αποτέλεσμα η ένταση του μαγνητικού πεδίου στα διάφορα σημεία του μαγνητικού κυκλώματος είναι μηδέν.
- Δεν υπάρχουν απώλειες μαγνητικής σκέδασης. Για να ικανοποιείται αυτή η συνθήκη θα πρέπει η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα να είναι ίση με μηδέν έτσι ώστε να μην υπάρχει μαγνητική ροή σκέδασης και θα διαπερνά από τα δύο τυλίγματα ίδια μαγνητική ροή.

Εάν ισχύουν και οι 4 παραπάνω ιδιότητες, τότε από τις δύο τελευταίες ισχύει ότι το συνολικό ρεύμα διέγερσης είναι μηδέν. Ενώ από τις πρώτες δύο ισχύουν οι σχέσεις (2.3.4) και (2.3.8) αντίστοιχα, δηλαδή:

$$v_1(t) = e_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} \quad (2.3.4)$$

$$v_2(t) = e_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} \quad (2.3.8)$$

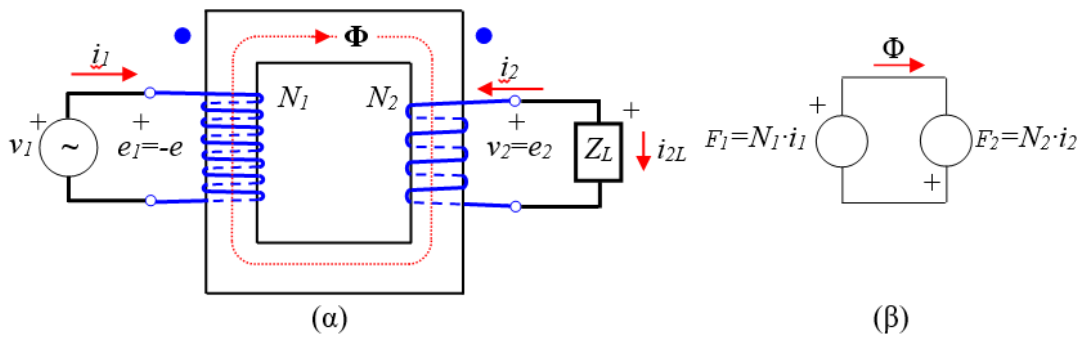
Λόγω της μηδενικής ωμικής αντίστασης από τις σχέσεις (2.3.4) και (2.3.8) προκύπτει ο λόγος μετασχηματισμού της σχέσης (2.3.12). Εφόσον η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος είναι μηδενική, έτσι και η συνολική μαγνητεγερτική δύναμη είναι μηδενική, ώστε εντός του μαγνητικού κυκλώματος να υπάρχει πεπερασμένη μαγνητική ροή.

Με βάση την πρόσθεση των μαγνητεγερτικών δυνάμεων που έχουν ίδιες φορές όπως φαίνεται και στο σχήμα παραπάνω ισχύει:

$$0 = N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 \rightarrow \frac{N_1}{N_2} = -\frac{i_2}{i_1} = \frac{i_{2L}}{i_1} \quad (2.4.1)$$

Όπως φαίνεται και από το σχήμα αλλά και από τη σχέση (2.4.1) προκύπτει ότι το  $i_{2L}$  είναι ίσο, αλλά αντίθετο του  $i_2$ , καθώς έχει συνδεδεμένη φορά με την τάση του φορτίου  $Z_L$ . Το αρνητικό πρόσημο στο λόγο  $i_1/i_2$  στη σχέση (2.4.1) οφείλεται στις προστιθέμενες φορές των μαγνητεγερτικών δυνάμεων. Σε περίπτωση που δεν ήταν προστιθέμενες, αλλά αφαιρούμενες, τότε αυτό το αρνητικό πρόσημο θα απαλειφόταν από την εξίσωση και έτσι η σχέση (2.4.1) τροποποιείται στην παρακάτω εκδοχή:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2}{i_1} = -\frac{i_{2L}}{i_1} \quad (2.4.2)$$



Σχήμα 2.8: (α) Ιδανικός μονοφασικός μετασχηματιστής υπό φορτίο, με προστιθέμενες μαγνητικές ροές, (β) το αντίστοιχο μαγνητικό του κύκλωμα. [6, σελ. 25, Σχήμα 2.21].

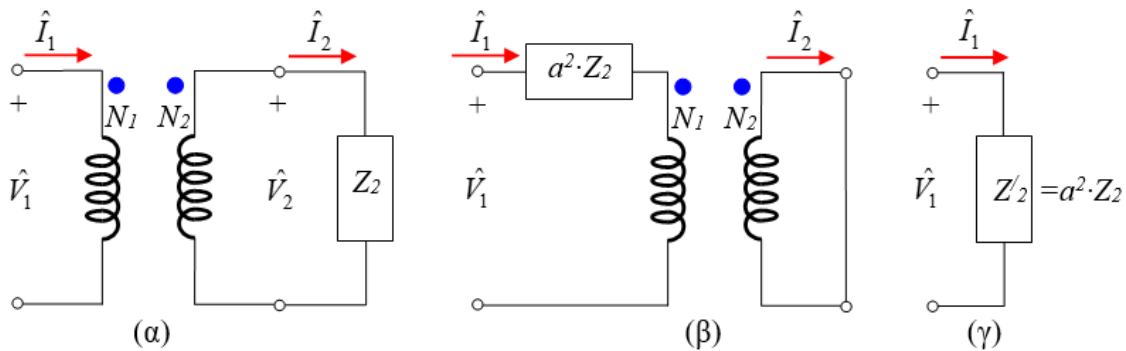
Εφαρμόζοντας ως σύνολο τις σχέσεις (2.3.12), (2.4.1) και (2.4.2) μπορεί να περιγράψει πλήρως η λειτουργία ενός ιδανικού μετασχηματιστή μέσω της παρακάτω συνδυαστικής σχέσης (στην οποία λείπει το αρνητικό πρόσημο για να μπορεί να εφαρμοσθεί σωστά αναλόγως της συνδεσμολογίας):

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{i_{2L}}{i_1} = a \quad (2.4.3)$$

Μέσω τις παραπάνω σχέσεις έχοντας γνωστά τα χαρακτηριστικά της μίας πλευράς (τύλιγμα), δηλαδή του πρωτεύοντος ή του δευτερεύοντος, εύκολα υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά της άλλης.

Η σχέση (2.4.3) ισχύει σε κάθε χρονική στιγμή για τις αντίστοιχες στιγμιαίες τιμές τάσεων και ρευμάτων στον ιδανικό μετασχηματιστή. Έτσι ισχύει και για τους αντίστοιχους **φασιθέτες (Phasors)**:

$$a = \frac{\hat{V}_1}{\hat{V}_2} = \frac{\hat{I}_2}{\hat{I}_1} \quad (2.4.4)$$



Σχήμα 2.9: Αναγωγή σύνθετης αντίστασης  $Z_2$  στο πρωτεύον τύλιγμα ιδανικού μετασχηματιστή (α) αρχική κατάσταση, (β) αναγωγή στο πρωτεύον, (γ) απλοποίηση κυκλώματος. [6, σελ. 26, Σχήμα 2.22].

Θέτοντας ότι υπάρχει μία σύνθετη αντίσταση  $Z_2$  η οποία είναι συνδεδεμένη στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή και απαιτείται η αναγωγή της στο πρωτεύον τύλιγμα. Η σύνθετη αντίσταση η οποία θα υπάρχει στο πρωτεύον και θα συμβάλλει στο ίδιο αποτέλεσμα στη θέση της  $Z_2$ , δηλαδή η αναγόμενη  $Z'_2$  θα είναι ίση με:

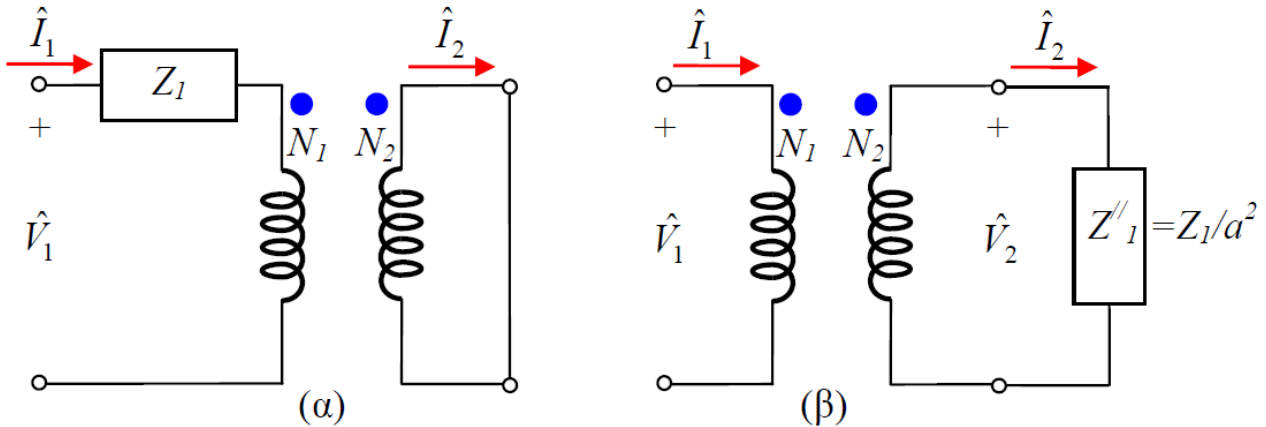
$$Z'_2 = \frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = \frac{a \cdot \hat{V}_2}{\hat{I}_1/a} = a^2 \cdot \frac{\hat{V}_2}{\hat{I}_2} = a^2 \cdot Z_2 \quad (2.4.5)$$

Η  $Z'_2$  ονομάζεται αντίσταση δευτερεύοντος ανηγμένη στο πρωτεύον.

Αντίστοιχα στην περίπτωση που υπάρχει μία σύνθετη αντίσταση  $Z_1$  η οποία είναι συνδεδεμένη στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή και απαιτείται η αναγωγή της στο δευτερεύον τύλιγμα, τότε αυτή θα είναι αντίστοιχα ίση με:

$$Z_1'' = \frac{\hat{V}_2}{\hat{I}_2} = \frac{\hat{V}_1/a}{a \cdot \hat{I}_1} = \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = \frac{Z_1}{a^2} \quad (2.4.6)$$

Αντίστοιχα η  $Z_1'$  ονομάζεται αντίσταση πρωτεύοντος ανηγμένη στο δευτερεύον.



Σχήμα 2.10: Αναγωγή σύνθετης αντίστασης  $Z_1$  στο δευτερεύον τύλιγμα ιδανικού μετασχηματιστή (α) Αρχική κατάσταση (β) αναγωγή στο δευτερεύον. [6, σελ. 27, Σχήμα 2.23].

Αντίστοιχα εάν ήταν επιθυμητό να εκφραστούν οι δύο παραπάνω ισοδύναμες αντιστάσεις των σχέσεων (2.4.5) και (2.4.6) σε αγωγιμότητες τότε αυτές θα ισοδυναμούν με:

$$Y_2' = \frac{Y_2}{a^2} \quad (2.4.7)$$

$$Y_1'' = a^2 \cdot Y_1 \quad (2.4.8)$$

Μέσα από τις παραπάνω σχέσεις είναι ικανός ο υπολογισμός των τάσεων των δύο αντιστάσεων αντίστοιχα, δηλαδή η πτώση τάσης για την αντίσταση πρωτεύοντος ανηγμένη στο δευτερεύον και αντίστοιχα η πτώση τάσης για την αντίσταση δευτερεύοντος ανηγμένη στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή. Παρακάτω ακολουθούν αντίστοιχα οι δύο όροι που αναφέρθηκαν:

$$V_{Z_1}'' = \frac{V_{Z_1}}{a} \quad (2.4.9)$$

$$V_{Z_2}' = a \cdot V_{Z_2} \quad (2.4.10)$$

Τελικά μπορεί να μετρηθεί και η ένταση ρεύματος των δύο αυτών αντιστάσεων. Αντίστοιχα και για τις δύο περιπτώσεις ισχύει:

$$I_{Z_1}'' = a \cdot I_{Z_1} \quad (2.4.11)$$

$$I_{Z_2}' = \frac{I_{Z_2}}{a} \quad (2.4.12)$$

## 2.5 Πραγματικός μετασχηματιστής

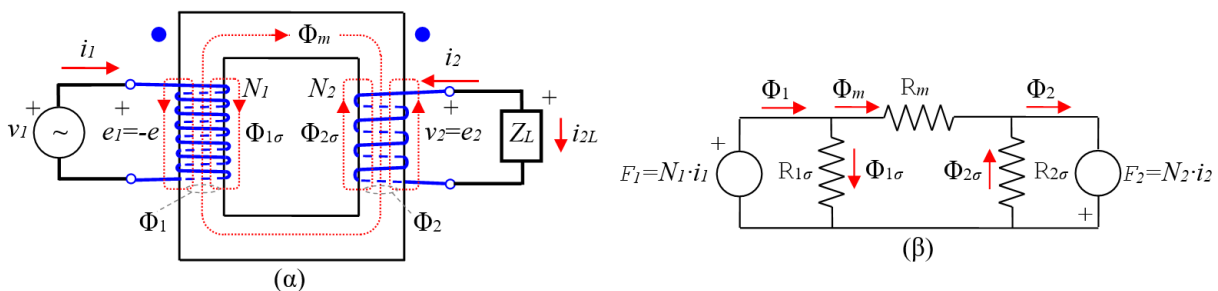
### 2.5.1 Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα

Στην προηγούμενη παράγραφο όπου αναπτύχθηκε η έννοια ενός ιδανικού μετασχηματιστή, τέθηκε σε ισχύ η παραδοχή ότι δεν υπάρχουν απώλειες μαγνητικής σκέδασης. Στην πραγματικότητα όμως για τον προσδιορισμό ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος του πραγματικού μετασχηματιστή καθίσταται αναγκαίο να μελετηθεί το μαγνητικό του κύκλωμα, το οποίο εμπεριέχει μαγνητικές αντιστάσεις, οι οποίες προκαλούν την εμφάνιση των απωλειών μαγνητικής σκέδασης.

Πιο συγκεκριμένα η μαγνητική ροή του πρωτεύοντος  $\Phi_1$  απαρτίζεται από δύο συνιστώσες, από τη ροή μαγνήτισης ή κοινή μαγνητική ροή  $\Phi_M$  η οποία διέρχεται από το δευτερεύον τύλιγμα και από τη μαγνητική ροή σκέδασης πρωτεύοντος  $\Phi_{1\sigma}$  η οποία κλείνει κύκλωμα μέσω του αέρα. Αντίστοιχα αν το δευτερεύον τύλιγμα διαρρέεται από ρεύμα, τότε υπάρχει μια μαγνητική ροή  $\Phi_2$  η οποία απαρτίζεται αντίστοιχα από δύο όρους, από τη ροή μαγνήτισης  $\Phi_M$  και τη μαγνητική ροή σκέδασης δευτερεύοντος  $\Phi_{2\sigma}$ , η οποία κλείνει κύκλωμα μέσω του αέρα αντίστοιχα όπως και η  $\Phi_{1\sigma}$ .

Λόγω του ότι ο μετασχηματιστής δεν είναι ιδανικός σε αυτή την περίπτωση, η κάθε μία από τις παραπάνω τρεις μαγνητικές ροές συναντά αντίστοιχα και τη δική της μαγνητική αντίσταση. Δηλαδή για τη  $\Phi_M$  υφίσταται αντίστοιχα η μαγνητική αντίσταση μαγνήτισης  $R_M$ , για τις  $\Phi_{1\sigma}$  και  $\Phi_{2\sigma}$  υπάρχουν αντίστοιχα οι  $R_{1\sigma}$  και  $R_{2\sigma}$  οι οποίες ονομάζονται μαγνητική αντίσταση σκέδασης πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα. Λόγω του ότι η ροή μαγνήτισης  $\Phi_M$  είναι κοινή για τα δύο τυλίγματα και εμπλέκει μόνο τον πυρήνα, δηλαδή σιδηρομαγνητικό υλικό (υψηλή μαγνητική διαπερατότητα), σε σύγκριση με τις  $\Phi_{1\sigma}$  και  $\Phi_{2\sigma}$ , οι οποίες έχουν ως μέσο κυρίως τον αέρα (χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα), αλλά και σε ένα μικρό βαθμό τον πυρήνα, η μαγνητική αντίσταση  $R_M$  είναι πολύ μικρότερη από τις δύο αντίστοιχες μαγνητικές αντιστάσεις  $R_{1\sigma}$  και  $R_{2\sigma}$  των μαγνητικών ροών σκέδασης και έτσι η ροή μαγνήτισης είναι μεγαλύτερη από τις δύο μαγνητικές ροές σκέδασης.

Στη συνέχεια ακολουθεί το σχήμα 2.11 στο οποίο παρουσιάζονται οι μαγνητικές ροές αυτές όπως και οι αντιστάσεις στο αντίστοιχο μαγνητικό κύκλωμα ενός πραγματικού μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.11: (α) Λειτουργία πραγματικού μετασχηματιστή υπό φορτίο, (β) ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή. [6, σελ. 30, Σχήμα 2.27].

Εφαρμόζοντας το νόμο του Kirchhoff για τους κόμβους του μαγνητικού κυκλώματος προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\Phi_1 = \Phi_{1\sigma} + \Phi_m \quad (2.5.1)$$

$$\Phi_2 = \Phi_{2\sigma} + \Phi_m \quad (2.5.2)$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Kirchhoff για τους βρόχους του μαγνητικού κυκλώματος προκύπτουν οι επιπρόσθετες σχέσεις:

$$-F_1 + \Phi_{1\sigma} \cdot R_{1\sigma} = 0 \rightarrow N_1 \cdot i_1 = \Phi_{1\sigma} \cdot R_{1\sigma} \quad (2.5.3)$$

$$-F_2 + \Phi_{2\sigma} \cdot R_{2\sigma} = 0 \rightarrow N_2 \cdot i_2 = \Phi_{2\sigma} \cdot R_{2\sigma} \quad (2.5.4)$$

$$-\Phi_{1\sigma} \cdot R_{1\sigma} + \Phi_m \cdot R_m - \Phi_{2\sigma} \cdot R_{2\sigma} = 0 \rightarrow N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 = \Phi_m \cdot R_m = F_m \quad (2.5.5)$$

Όπως είχε προαναφερθεί στον ιδανικό μετασχηματιστή λόγω της μηδενικής μαγνητικής αντίστασης του κυκλώματος αντίστοιχα και η συνολική μαγνητεγερτική δύναμη ισούται με μηδέν. Στον πραγματικό μετασχηματιστή όμως λόγω της ύπαρξης μαγνητικής αντίστασης  $R_M$ , η μαγνητεγερτική δύναμη  $F_M$  είναι ίση με το γινόμενο της προαναφερόμενης μαγνητικής αντίστασης και της ροής μαγνήτισης  $\Phi_M$  όπως υποδεικνύει και η σχέση (2.5.5). Εάν θεωρηθεί ότι το ρεύμα διέγερσης  $i_\varphi$  ανηγμένο στο πρωτεύον είναι το αίτιο για την παραγωγή της μαγνητεγερτικής δύναμης μαγνήτισης  $F_m$ , τότε προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 = N_1 \cdot i_\varphi \rightarrow i_1 + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2 = i_\varphi \rightarrow i_1 + i'_2 = i_\varphi \quad (2.5.6)$$

## 2.5.2 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Εφόσον η μελέτη πλέον γίνεται σε πραγματικό μετασχηματιστή, αυτό ισοδυναμεί και στην ύπαρξη ωμικής αντίστασης στο ηλεκτρικό κύκλωμα του. Για να υλοποιηθεί το αντίστοιχο **ισοδύναμο κύκλωμα (Equivalent Circuit)** του μετασχηματιστή, αρχικά η μελέτη ξεκινάει από το πρωτεύον τύλιγμα. Εφαρμόζοντας εναλλασσόμενη τάση στο τύλιγμα του πρωτεύοντος δημιουργείται μαγνητική ροή  $\Phi_1$  η οποία είναι και αυτή μεταβλητή στο χρόνο αντίστοιχα με την εφαρμοζόμενη τάση. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday και εμπεριέχοντας και την ωμική αντίσταση  $R_1$  του πρωτεύοντος προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$v_1(t) = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} \quad (2.5.7)$$

Εφόσον έχει αναλυθεί η μαγνητική ροή σε δύο επιμέρους συνιστώσες από τη σχέση (2.5.1), συνδυάζοντας αυτήν με τη σχέση (2.5.7) προκύπτει ότι:

$$v_1(t) = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d(\Phi_{1\sigma} + \Phi_m)}{dt} = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (2.5.8)$$

Από τη σχέση (2.5.1) όμως υποδεικνύεται ότι η μαγνητική ροή μαγνήτισης  $\Phi_m$  είναι η ίδια και στα δύο τυλίγματα, οπότε ο τελευταίος όρος της σχέσης (2.5.8) αντιστοιχεί στην αντιηλεκτρεγερτική δύναμη  $e(t)$  του πρωτεύοντος του ιδανικού μετασχηματιστή. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για την επαγωγική πτώση τάσης πάνω στο πρωτεύον τύλιγμα του ιδανικού μετασχηματιστή  $e_1(t)$ . Η ροή σκέδασης πρωτεύοντος λόγω του ότι κλείνει μέσω του αέρα δεν επιδρά στο μετασχηματισμό των τάσεων του ιδανικού μετασχηματιστή και έτσι ο δεύτερος όρος της σχέσης (2.5.8) αντιστοιχεί στην πτώση τάσης πάνω στην αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος  $L_{1\sigma}$ . Από τους δύο παραπάνω συλλογισμούς προκύπτει:

$$v_1(t) = R_1 \cdot i_1 + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_1}{dt} + e_1(t) \quad (2.5.9)$$

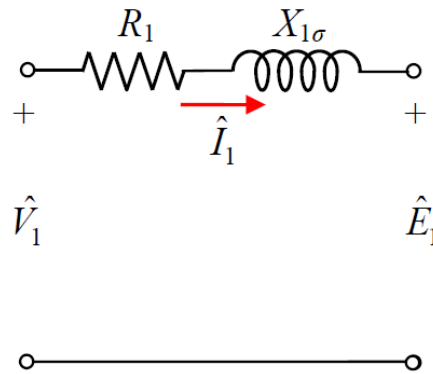
Αντίστοιχα στο πεδίο της συχνότητας η σχέση (2.5.9) αναγράφεται σε μορφή φασιθετών όπως έχει παρακάτω:

$$\widehat{V}_1 = R_1 \cdot \widehat{I}_1 + j \cdot L_{1\sigma} \cdot \omega \cdot \widehat{I}_1 + \widehat{E}_1 \rightarrow \widehat{V}_1 = R_1 \cdot \widehat{I}_1 + j \cdot X_{1\sigma} \cdot \widehat{I}_1 + \widehat{E}_1 \quad (2.5.10)$$

Όπου  $X_{1\sigma}$  είναι η αντίδραση σκέδασης πρωτεύοντος η οποία είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας – κυκλικής συχνότητας της λειτουργίας του κυκλώματος, που ορίζεται ως εξής:

$$X_{1\sigma} = L_{1\sigma} \cdot \omega \quad (2.5.11)$$

Η εφαρμοζόμενη τάση εισόδου του μετασχηματιστή στο πρωτεύον  $v_1(t)$  είναι ίση με το άθροισμα της πτώσης τάσης της ωμικής αντίστασης  $R_1$ , της πτώση τάσης της αυτεπαγωγής σκέδασης  $L_{1\sigma}$  και της επαγωγικής τάσης  $e_1(t)$  στο πρωτεύον τύλιγμα λόγω της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης, με συνέπεια να υλοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα του πραγματικού μετασχηματιστή στο πρωτεύον όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή στο πρωτεύον. [6, σελ. 33, Σχήμα 2.28(α)].

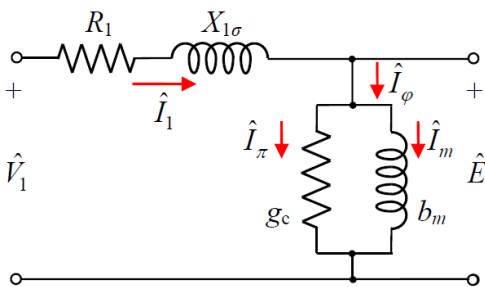
Εάν αναλυθεί η σχέση (2.3.19) και μετατραπεί σε μορφή με αγωγιμότητες, τότε η σχέση αυτή μετατρέπεται ως εξής:

$$\hat{I}_\varphi = \tilde{I}_\pi \cdot j \cdot \tilde{I}_m = (g_c - j \cdot b_m) \cdot \hat{E}_1 \quad (2.5.12)$$

Όπου:

- $g_c$ : Ισοδύναμη αγωγιμότητα απωλειών πυρήνα (Αντίστοιχη συμβολή των αγωγιμοτήτων για τις απώλειες που προκύπτουν από των πυρήνα και τα δινορρεύματα).
- $b_m$ : Ισοδύναμη αγωγιμότητα μαγνήτισης.

Η μιγαδική μονάδα  $j$  προκύπτει γιατί όπως είχε αναφερθεί τα δύο αυτά ρεύματα έχουν διαφορά φάσης  $90^\circ$  και το ρεύμα του πυρήνα είναι συμφασικό με την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη  $e_1(t)$  στο πρωτεύον. Εφόσον λοιπόν ισχύει ότι το ρεύμα του πρωτεύοντος  $i_1$  είναι το άθροισμα των ρευμάτων  $i'_2$  (ρεύμα δευτερεύοντος ανηγμένο στο πρωτεύον) και  $i_\varphi$  (ρεύμα μαγνήτισης) όπως έχει διατυπωθεί και στη σχέση (2.5.6) τότε με βάση αυτό και τη σχέση (2.5.12) η οποία δείχνει τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ρευμάτων αντίστοιχα, προκύπτει ο **εγκάρσιος κλάδος μαγνήτισης (Excitation or Shunt Branch)** ο οποίος απαρτίζεται από 2 παράλληλα στοιχεία, την ωμική αντίσταση, η οποία είναι η **αντίσταση πυρήνα**  $R_c$  με αντίστοιχη αγωγιμότητα απωλειών πυρήνα  $g_c$  και διαρρέεται από το ρεύμα πυρήνα  $\tilde{I}_\pi$ , και από μία καθαρά επαγωγική αντίδραση, λόγω του ότι υπάρχει μια διαφορά φάσης μεταξύ των δύο αγωγιμοτήτων όπως αναφέρεται και εμφανίζεται στην σχέση (2.5.12) που είναι ίση με  $90^\circ$ . Η επαγωγική αντίσταση  $X_m$  αυτή ονομάζεται **επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης**, έχει αντίστοιχη διαπερατότητα  $b_m$  και διαρρέεται από ρεύμα μαγνήτισης  $\tilde{I}_m$ . Έτσι ο εγκάρσιος



Σχήμα 2.13: Πρωτεύον τύλιγμα με ενσωματωμένο τον εγκάρσιο κλάδο μαγνήτισης. [6, σελ. 33, Σχήμα 2.28(β)].



κλάδος ενσωματώνεται στο πρωτεύον και αναπαρίσταται στο σχήμα 2.13.

Στη συνέχεια για την αναπαράσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος ως κύκλωμα, η διαδικασία είναι παρόμοια αυτής του πρωτεύοντος τυλίγματος. Δηλαδή εφαρμόζοντας αυτήν τη φορά ως ρεύμα εισόδου το ρεύμα του δευτερεύοντος  $i_2$ , έχοντας ως δεδομένο ότι υπάρχει αντίστοιχα μία ωμική αντίσταση στο δευτερεύον  $R_2$  εφόσον διαρρέεται ρεύμα και έχοντας και τη μαγνητική ροή στο δευτερεύον  $\Phi_2$  η οποία είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, εφαρμόζοντας το νόμο του Faraday όπως και στην περίπτωση του πρωτεύοντος προκύπτει η ακόλουθη σχέση για την τάση στα άκρα του δευτερεύοντος:

$$v_2(t) = R_2 \cdot i_2 + N_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} = R_2 \cdot i_2 + N_2 \cdot \frac{d\Phi_{2\sigma}}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (2.5.13)$$

Όπως και στην περίπτωση του πρωτεύοντος έτσι και στο δευτερεύον ο πρώτος όρος αντιστοιχεί στην πτώση τάσης πάνω στην ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος. Ο δεύτερος όρος αντιστοιχεί στην πτώση τάσης πάνω στην αυτεπαγωγή σκέδασης του δευτερεύοντος  $L_{2\sigma}$ . Ενώ ο τρίτος όρος είναι η επαγωγική πτώση τάσης πάνω στο δευτερεύον τυλίγμα του ιδανικού μετασχηματιστή. Έτσι ισοδύναμα προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$v_2(t) = R_2 \cdot i_2 + L_{2\sigma} \cdot \frac{di_2}{dt} + e_2(t) \quad (2.5.14)$$

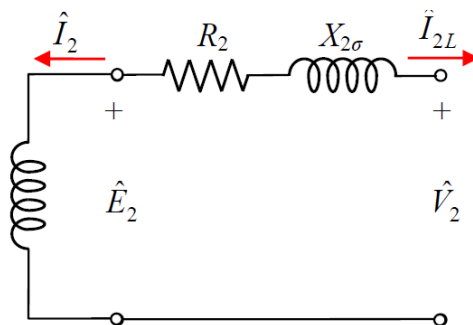
Αντίστοιχα στο πεδίο συχνότητας με φασιθέτες η παραπάνω σχέση καταλήγει ως εξής:

$$\widehat{V}_2 = R_2 \cdot \widehat{I}_2 + j \cdot L_{2\sigma} \cdot \omega \cdot \widehat{I}_2 + \widehat{E}_2 \rightarrow \widehat{V}_2 = R_2 \cdot \widehat{I}_2 + j \cdot X_{2\sigma} \cdot \widehat{I}_2 + \widehat{E}_2 \quad (2.5.15)$$

Όπου  $X_{2\sigma}$  είναι η αντίδραση σκέδασης δευτερεύοντος η οποία είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας – κυκλικής συχνότητας της λειτουργίας του κυκλώματος, που ορίζεται ως εξής:

$$X_{2\sigma} = L_{2\sigma} \cdot \omega \quad (2.5.16)$$

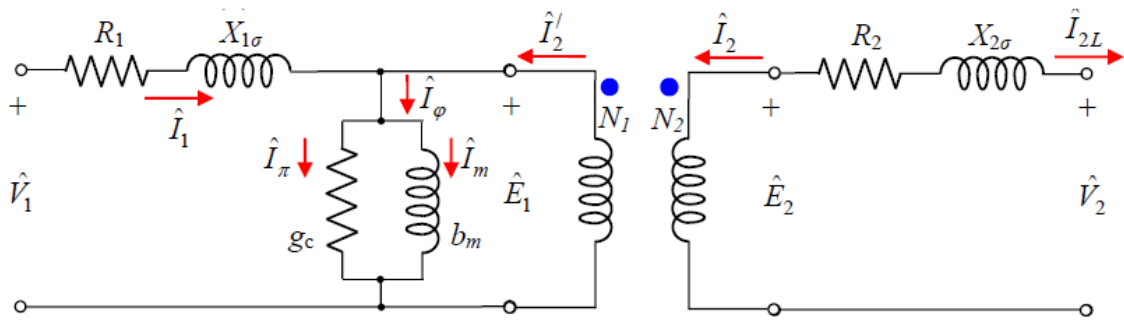
Ο δευτερεύον κλάδος αποτελείται από την ωμική αντίσταση δευτερεύοντος  $R_2$  και την επαγωγική αντίδραση δευτερεύοντος  $X_{2\sigma}$  και απεικονίζεται στο σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14: Ισοδύναμο κύκλωμα του δευτερεύοντος κλάδου πραγματικού μετασχηματιστή. [6, σελ. 33, Σχήμα 2.28(γ)].

Αν ενσωματωθούν τα σχήματα 2.13 και 2.14 μαζί, δημιουργείται το συνολικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός πραγματικού μετασχηματιστή. Το αντίστοιχο κύκλωμα απεικονίζεται στο σχήμα 2.15.



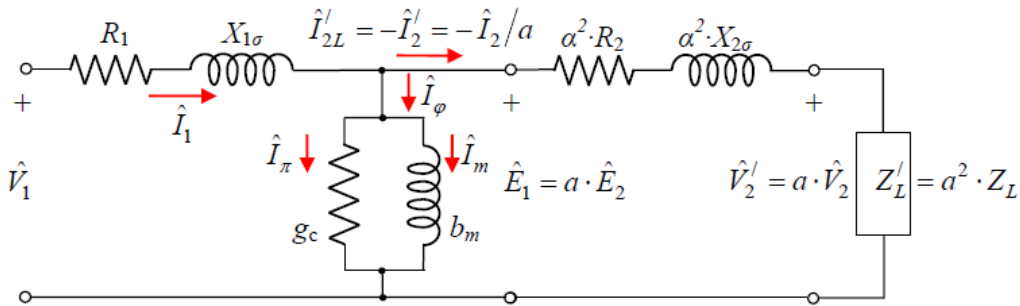


Σχήμα 2.15: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή. [6, σελ. 33, Σχήμα 2.28(γ)].

Σε περίπτωση που η ένταση του ρεύματος του δευτερεύοντος τυλίγματος  $i_{2L}(t)$  θεωρηθεί με συνδεδεμένη φορά ως προς το φορτίο, που θα ήταν αντίθετη με τη φορά του ρεύματος  $i_2(t)$ , τότε η σχέση (2.5.15) μετατρέπεται σε:

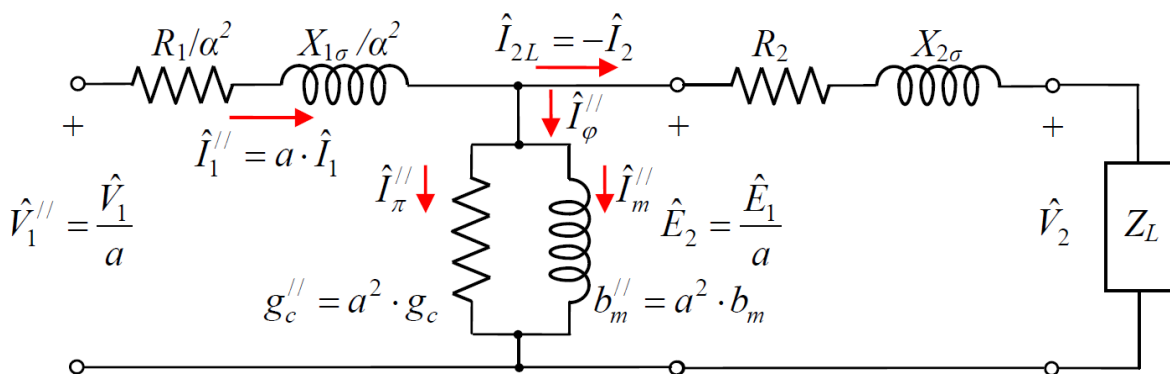
$$\hat{V}_2 = \hat{E}_2 - R_2 \cdot \hat{I}_{2L} - j \cdot X_{2\sigma} \cdot \hat{I}_{2L} \quad (2.5.17)$$

Αν πραγματοποιηθεί αναγωγή των δευτερεύοντων στοιχείων στο πρωτεύον, τότε το κύκλωμα καταλήγει να έχει τη μορφή του σχήματος 2.16.



Σχήμα 2.16: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή με αναγωγή των στοιχείων και φορτίου του δευτερεύοντος στο πρωτεύον. [6, σελ. 35, Σχήμα 2.31].

Αντίστοιχα αν γίνει αναγωγή των στοιχείων του πρωτεύοντος στο δευτερεύον, τότε το ισοδύναμο κύκλωμα προσδιορίζεται στο σχήμα 2.17.

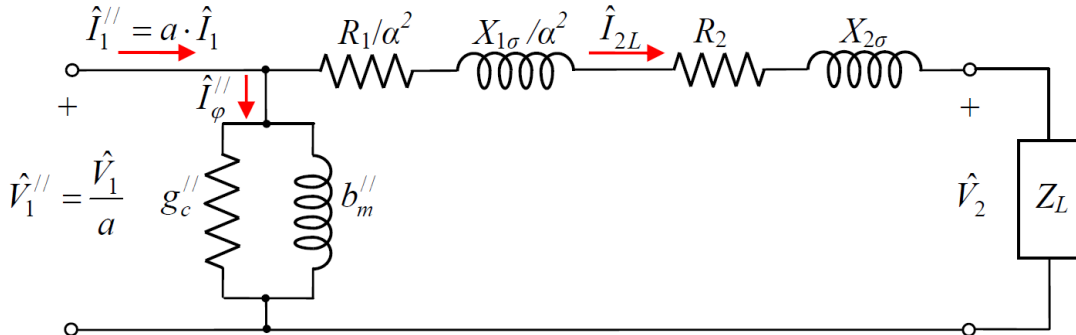


Σχήμα 2.17: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή με αναγωγή των στοιχείων του πρωτεύοντος στο δευτερεύον. [6, σελ. 37, Σχήμα 2.34].

### 2.5.3 Υπολογισμός ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης πραγματικού μετασχηματιστή

Έχοντας ένα πραγματικό μετασχηματιστή και ανάγοντας όλα τα στοιχεία του πρωτεύοντος στο δευτερεύον, εξίσου και του εγκάρσιου κλάδου, το κύκλωμα καταλήγει να είναι ίδιο με αυτό του

σχήματος 2.17. Στη συνέχεια λόγω του ότι το ρεύμα διέγερσης έχει μικρή τιμή αντίστοιχα και η πτώση τάσης πάνω στον εγκάρσιο κλάδο θα είναι εξίσου μικρή, γίνεται η παραδοχή ο εγκάρσιος κλάδος να μεταφέρεται αριστερά από την ωμική αντίσταση  $R_1/a^2$  και την επαγωγική αντίδραση  $X_{1\sigma}/a^2$  και τοποθετηθεί στα ανάντη του πρωτεύοντος τυλίγματος διότι η πρόσθετη αντίστοιχη πτώση τάσης πάνω στη σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος τυλίγματος μπορεί να αγνοηθεί, και έτσι το κύκλωμα καταλήγει πλέον να έχει την μορφή του σχήματος 2.18.



Σχήμα 2.18: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή με αναγωγή των στοιχείων του πρωτεύοντος στο δευτερεύον και μεταφορά του εγκάρσιου κλάδου στα ανάντη του πρωτεύοντος τυλίγματος. [6, σελ. 42, Σχήμα 2.41].

Από το σχήμα 2.18 προκύπτει ότι η συνολική σύνθετη αντίσταση είναι το άθροισμα των δύο σύνθετων αντιστάσεων, δηλαδή αυτής του πρωτεύοντος και αυτής του δευτερεύοντος. Έτσι προκύπτει η **ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση μετασχηματιστή ανηγμένη στο δευτερεύον**  $Z_{eq-s}$  και εκφράζεται ως εξής:

$$Z_{eq-s} = R_{eq-s} + j \cdot X_{eq-s} = \left( \frac{R_1}{a^2} + R_2 \right) + j \cdot \left( \frac{X_{1\sigma}}{a^2} + X_{2\sigma} \right) \quad (2.5.18)$$

Όπου:

- $R_{eq-s}$ : Ισοδύναμη συνολική ωμική αντίσταση μετασχηματιστή ανηγμένη στο πρωτεύον,
- $X_{eq-s}$ : Ισοδύναμη συνολική επαγωγική αντίδραση μετασχηματιστή ανηγμένη στο πρωτεύον.

Αντίστοιχα στην περίπτωση της αναγωγής των στοιχείων του δευτερεύοντος τυλίγματος στο πρωτεύον και μεταφορά του εγκάρσιου κλάδου ανάντη του δευτερεύοντος τυλίγματος, τότε αντίστοιχα η **ισοδύναμη (Equivalent) σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή ανηγμένη στο πρωτεύον**  $Z_{eq-p}$  θα ήταν ίση με:

$$Z_{eq-p} = R_{eq-p} + j \cdot X_{eq-p} = (R_1 + a^2 \cdot R_2) + j \cdot (X_{1\sigma} + a^2 \cdot X_{2\sigma}) \quad (2.5.19)$$

Όπου:

- $R_{eq-p}$ : Ισοδύναμη συνολική ωμική αντίσταση μετασχηματιστή ανηγμένη στο δευτερεύον
- $X_{eq-p}$ : Ισοδύναμη συνολική επαγωγική αντίδραση μετασχηματιστή ανηγμένη στο δευτερεύον



$$\varepsilon(\%) = \frac{\tilde{V}_1'' - \tilde{V}_2}{\tilde{V}_1''} \cdot 100\% = \frac{\tilde{V}_1 - \alpha \cdot \tilde{V}_2}{\tilde{V}_1} \cdot 100\% \quad (2.6.4)$$

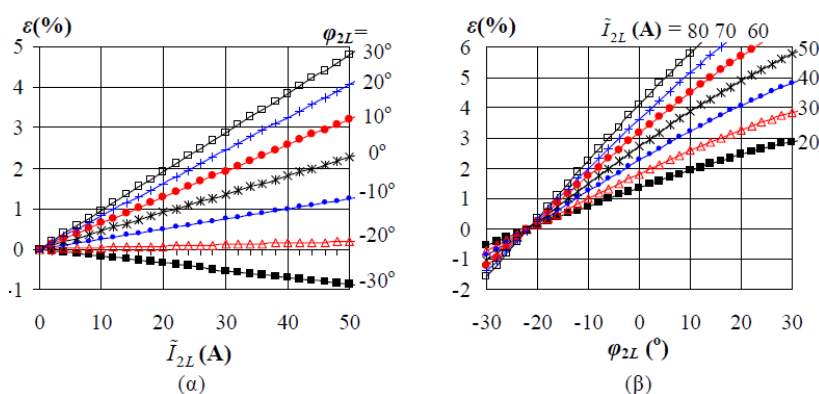
Μέσα από το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρεύματος φορτίου για επαγωγική φόρτιση του σχήματος 2.19 (μπορεί να αναλυθεί αντιστοίχως και για ωμική ή χωρητική φόρτιση, αλλά το διανυσματικό διάγραμμα διαφέρει) προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\hat{V}_1'' = \hat{V}_2 + \hat{I}_{2L} \cdot (R_{eq-s} + j \cdot X_{eq-s}) \quad (2.6.5)$$

Εάν αναλυθεί περαιτέρω η παραπάνω σχέση, τότε προκύπτει μέσω αυτής η προσεγγιστική σχέση υπολογισμού της εκατοστιαίας πτώσης τάσης:

$$\varepsilon(\%) \approx \frac{\tilde{I}_{2L} \cdot (R_{eq-s} \cdot \cos\varphi_{2L} + X_{eq-s} \cdot \sin\varphi_{2L})}{\tilde{V}_1/a} \cdot 100\% \quad (2.6.6)$$

Με βάση την παραπάνω σχέση τα μόνα μεταβαλλόμενα μεγέθη άρα και υπεύθυνα για τη μεταβολή της εκατοστιαίας πτώσης τάσεως  $\varepsilon(\%)$  είναι το ρεύμα φορτίου  $\tilde{I}_{2L}$  όπως και το συνημίτονο γωνίας φορτίου  $\cos\varphi_{2L}$ . Στο σχήμα 2.20 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή της εκατοστιαίας πτώσης τάσης συναρτήσει ( $\alpha$ ) της έντασης ρεύματος του φορτίου για σταθερή γωνία φορτίου και ( $\beta$ ) συναρτήσει της γωνίας φορτίου για σταθερή ένταση ρεύματος φορτίου:



Σχήμα 2.20: Διακύμανση εκατοστιαίας πτώσης τάσης  $\varepsilon(\%)$  συναρτήσει (α) της έντασης ρεύματος φορτίου και σταθερής γωνίας φορτίου και (β) της γωνίας φορτίου και σταθερής έντασης ρεύματος. [6, σελ. 50, Σχήμα 2.46].

Παρατηρείται ότι για γωνία  $\varphi_{2L}$  μικρότερη από περίπου ( $-20\%$ ), δηλαδή για μεγάλα χωρητικά φορτία, η εκατοστιαία πτώση τάσης  $\varepsilon(\%)$  γίνεται αρνητική και έτσι η τάση φορτίου γίνεται μεγαλύτερη από αυτή που θα υπήρχε σε περίπτωση λειτουργίας εν κενώ, δηλαδή εμφανίζεται το φαινόμενο της υπέρτασης.

Αναφορικά πέραν από τους τρόπους υπολογισμού της εκατοστιαίας πτώσης τάσεως μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος, μπορεί να υπολογισθεί και με γραφικό τρόπο. Το τρίγωνο Kapp είναι ένας γραφικός τρόπος υπολογισμού που μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία.

## 2.6.2 Τάση βραχυκύκλωσης

Θεωρώντας έναν πραγματικό μετασχηματιστή ο οποίος είναι βραχυκυκλωμένος στο δευτερεύον αλλά το πρωτεύον διαρρέεται από ένταση ρεύματος ίση με την ονομαστική του μετασχηματιστή  $\tilde{I}_{1,n}$  και εφαρμόζεται μία τάση στην είσοδο του πρωτεύοντος, υπό αυτές τις συνθήκες, αυτή η τάση στο πρωτεύον ονομάζεται **τάση βραχυκύκλωσης (Short Circuit Voltage)  $V_{1,\beta\rho}$**  και ορίζεται μαθηματικά ως:

$$V_{1,\beta\rho} = \tilde{I}_{1,n} \cdot |Z_{eq-p}| \quad (2.6.7)$$

Όπου το μέτρο της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης ανηγμένης στο πρωτεύον μετράται κατά την δοκιμή βραχυκύκλωσης, όπως θα αναλυθεί και σε επόμενη παράγραφο, αγνοώντας τον εγκάρσιο κλάδο και την επίδραση του στις μετρήσεις. Το αντίστοιχο ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος μπορεί εύκολα να αναχθεί στο δευτερεύον τύλιγμα με βάση την σχέση (2.4.11) και έτσι προκύπτει αντίστοιχα:

$$\tilde{I}_{1,n}'' = a \cdot \tilde{I}_{1,n} \quad (2.6.8)$$

Η τάση βραχυκύκλωσης εκφράζεται με τη μορφή ποσοστού ως προς την ονομαστική τάση του πρωτεύοντος τυλίγματος  $V_{1,n}$  και ονομάζεται **εκατοστιαία τάση βραχυκύκλωσης**  $v_{\beta\rho}(\%)$ :

$$v_{\beta\rho}(\%) = \frac{V_{1,\beta\rho}}{\tilde{V}_{1,n}} \cdot 100\% \quad (2.6.9)$$

Αναλογικά η τάση βραχυκύκλωσης αυξάνεται όσο αυξάνεται και η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή ωστόσο η εκατοστιαία τάση βραχυκύκλωσης μειώνεται. Τυπικές τιμές για ονομαστική ισχύς από 15 kVA έως και 40 MVA είναι από 3,5% έως 11%. Σε ακραίες περιπτώσεις το εύρος αυτό μπορεί να φτάσει από 3% έως και 25%.

## 2.6.3 Βαθμός απόδοσης μονοφασικού μετασχηματιστή

### 2.6.3.1 Γενικός ορισμός βαθμού απόδοσης

**Βαθμός απόδοσης** ή **απόδοση ισχύος η (Power Efficiency)** μίας συσκευής (γεννήτριας, κινητήρα, μετασχηματιστή, αντλίας κλπ.) ορίζεται ως ο λόγος της ισχύς εξόδου  $P_{εξ}$  (χρήσιμη ισχύς) προς την ισχύ εισόδου  $P_{εισ}$  (καταναλισκόμενη ισχύ), δηλαδή:

$$\eta = \frac{P_{εξ}}{P_{εισ}} \quad (2.6.10)$$

Όπου η ισχύς εξόδου  $P_{εξ}$  είναι αποτέλεσμα της ισχύς εισόδου  $P_{εισ}$  μείον την **ισχύ απωλειών (Power losses)**  $P_{απ}$  της συσκευής, δηλαδή η ισχύ που χάνεται κατά τη μετατροπή – μετάδοση από την είσοδο στην έξοδο μέσα στην συσκευή. Άρα η σχέση (2.6.10) θα μπορούσε να οριστεί και ως:

$$\eta = \frac{P_{εισ} - P_{απ}}{P_{εισ}} \quad (2.6.11)$$

Η τιμή της απόδοσης μπορεί να πάρει τιμές από 1, δηλαδή όταν οι απώλειες είναι μηδέν ( $P_{απ} = 0$ ), οπότε η ισχύς εισόδου  $P_{εισ}$  είναι ίδια με την ισχύ εξόδου  $P_{εξ}$ , έως 0, όταν οι απώλειες είναι ίσες με την ισχύ εισόδου ( $P_{απ} = P_{εισ}$ ), δηλαδή η ισχύς εξόδου είναι μηδέν ( $P_{εξ} = 0$ ).

Η απόδοση μιας συσκευής θα μπορούσε να υπολογισθεί μέσω ταυτόχρονης μέτρησης των ισχύων εισόδου και εξόδου αλλά αυτό δεν είναι οικονομικά εφικτό τις περισσότερες φορές λόγω του ότι αυτή η διαδικασία είναι αρκετά ακριβή και ταυτοχρόνως δύσκολη για μεγάλες ηλεκτρικές μηχανές. Για αυτόν το λόγο αξιοποιείται η ισχύς απωλειών η οποία διακρίνεται σε υποκατηγορίες όπου αυτές μπορούν να υπολογισθούν ευκολότερα και να ληφθεί μέσω αυτών ο βαθμός απόδοσης.

### 2.6.3.2 Κατηγορίες απωλειών μετασχηματιστή

Κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή οι απώλειες οι οποίες λαμβάνουν χώρα είναι 2:

#### 1. Απώλειες Πυρήνα (Core Losses) ή Απώλειες Σιδήρου (Iron Losses)

Οι απώλειες αυτές χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, στις **απώλειες υστέρησης** και στις **απώλειες δινορρευμάτων**.

##### a. Απώλειες υστέρησης

Οι απώλειες υστέρησης  $P_{υσ}$  οφείλονται στην ύπαρξη του βρόχου υστέρησης των σιδηρομαγνητικών υλικών, πρόκειται για απώλειες ισχύος που συμβαίνουν λόγω του έργου που απαιτείται για να μαγνητιστεί/απομαγνητιστεί το σιδηρομαγνητικό υλικό σε κάθε περίοδο. Πιο συγκεκριμένα κατά τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου λόγω του εναλλασσόμενου ρεύματος, τα δίπολα εσωτερικά του σιδηρομαγνητικού υλικού μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται σε κάθε περίοδο, έτσι μέσω αυτής της εναλλαγής κατάστασης προκαλείται «τριβή» η οποία απελευθερώνει ένα μικρό ποσό ενέργειας σε κάθε εναλλαγή της κατάστασης σε μορφή θερμότητας. Οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος (ή αλλιώς του ρυθμού μεταβολής κατάστασης των δίπολων). Η ενδεικτική σχέση που περιγράφει τις απώλειες αυτές παρουσιάζεται παρακάτω:

$$P_{υσ} = \eta_v \cdot V \cdot f \cdot B_{max}^n \quad (2.6.12)$$

Όπου:

- $B_{max}$  : Η μέγιστη τιμή της χρονικά μεταβαλλόμενης μαγνητικής επαγωγής
- $n$  και  $n_u$  : Σταθερές του υλικού
- $V$  : Ο όγκος του υλικού
- $f$  : Η συχνότητα λειτουργίας

##### b. Απώλειες δινορρευμάτων

Πρόκειται για ένα μικρό ποσό της ολικής μαγνητικής ροής κατά τη μετάδοση από το πρωτεύον τύλιγμα στο δευτερεύον όπου καταλήγει να δημιουργήσει μέσα στο σιδηρομαγνητικό υλικό δίνες ρεύματος που κυκλοφορούν μέσα στον πυρήνα και απελευθερώνουν την ισχύ τους σε μορφή θερμότητας στο περιβάλλον λόγω της δεδομένης ηλεκτρικής αντίστασης του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα. Η αντίστοιχη ενδεικτική σχέση που περιγράφει τις απώλειες δινορρευμάτων παρουσιάζεται παρακάτω:

$$P_{\delta} = K_{\delta} \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot B_{max}^2 \cdot V \quad (2.6.13)$$

Όπου:

- $K_{\delta}$ : Συντελεστής του υλικού και διόρθωσης τιμής λόγω των ατελειών του μαθηματικού μοντέλου που προέκυψε η σχέση (2.6.13)
- $t$ : Πάχος ελάσματος

Οπότε οι απώλειες πυρήνα  $P_{\pi}$  ή οι απώλειες σιδήρου  $P_{Fe}$  εκφράζονται ως μαθηματική έκφραση με τον παρακάτω τύπο ο οποίος εμπεριέχει τις δύο συνιστώσες απωλειών που ορίστηκαν παραπάνω:

$$P_{\pi} = P_{Fe} = P_{υσ} + P_{\delta} \quad (2.6.14)$$



## 2. Απώλειες χαλκού (Copper losses)

Οι απώλειες χαλκού  $P_{Cu}$  ή απώλειες Joule ή θερμικές απώλειες είναι αυτές οι οποίες προκαλούνται λόγω των ωμικών αντιστάσεων που έχουν τα τυλίγματα του μετασχηματιστή, που διαρρέονται από ρεύμα, το αποβαλλόμενο ποσό ισχύος είναι ανάλογο του τετραγώνου της έντασης ρεύματος μετατρέπεται σε θερμότητα και απάγεται στο περιβάλλον. Έτσι η σχέση περιγράφει τις απώλειες αυτές είναι ίση με:

$$P_{Cu} = \tilde{I}_1^2 \cdot R_1 + \tilde{I}_{2L}^2 \cdot R_2 \quad (2.6.15)$$

Οι δύο διαφορετικοί τύποι απωλειών μπορούν να υπολογιστούν μέσω πειραματικών διαδικασιών όπως θα αναλυθεί και στην παράγραφο 2.7 αναλυτικά.

Με τους δύο τύπους απωλειών που αναλύθηκαν παραπάνω μπορούν να εκφραστούν οι συνολικές απώλειες μετασχηματιστή κατά τη λειτουργία του από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{απ} = P_{Cu} + P_{Fe} \quad (2.6.16)$$

### 2.6.3.3 Βαθμός απόδοσης μετασχηματιστή

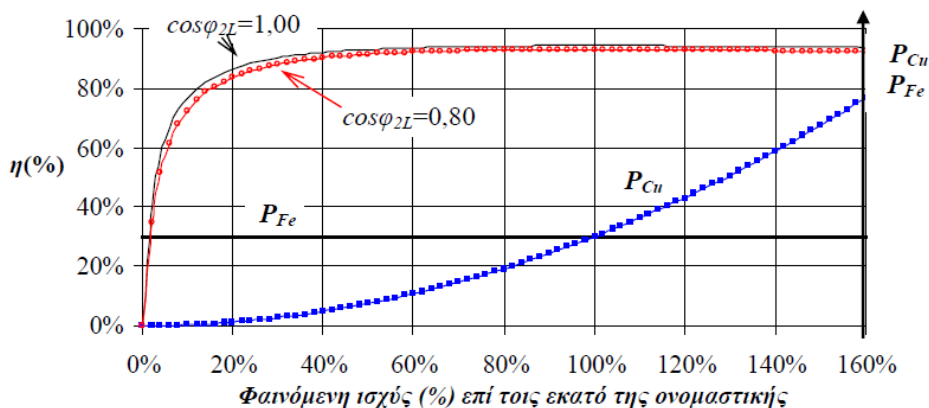
Έχοντας ορισθεί πλέον οι απώλειες ενός μετασχηματιστή η σχέση (2.6.10) μπορεί πλέον να ορισθεί πιο συγκεκριμένα ως:

$$\eta = \frac{P_{εξ}}{P_{εισ}} = \frac{P_{εξ}}{P_{εξ} + P_{απ}} = \frac{P_{εξ}}{P_{εξ} + P_{Cu} + P_{Fe}} = \frac{\tilde{V}_2 \cdot \tilde{I}_{2L} \cdot \cos\varphi_{2L}}{\tilde{V}_2 \cdot \tilde{I}_{2L} \cdot \cos\varphi_{2L} + \tilde{I}_1^2 \cdot R_1 + \tilde{I}_{2L}^2 \cdot R_2 + P_{Fe}} \quad (2.6.17)$$

Οι μετασχηματιστές έχουν πολύ υψηλή απόδοση που κυμαίνεται στο 95% για ονομαστικά φορτία, ενώ για μικρότερα φορτία η απόδοση μειώνεται σε μικρό βαθμό. Αυτή η επίδραση του φορτίου απεικονίζεται πιο αναλυτικά στο σχήμα 2.21.

### 2.6.4 Βαθμός απόδοσης ενέργειας

Όταν ένας μετασχηματιστής λειτουργεί υπό σταθερό φορτίο, τότε ο βαθμός απόδοσης ισχύος ικανοποιεί τις ανάγκες για την ανάλυση του σε ωφέλιμη ενέργεια και μη. Όταν όμως το φορτίο δεν είναι σταθερό, όπως γίνεται με τους μετασχηματιστές των δικτύων διανομής, αλλά μεταβάλλεται, τότε αντίστοιχα και ο βαθμός απόδοσης ισχύος μεταβάλλεται ανάλογα, κάτι που τον καθιστά όχι και τόσο χρήσιμο. Σε αυτήν την περίπτωση εισάγεται ο ορισμός του **βαθμού απόδοσης ενέργειας**  $\eta_{εν}$ , ο οποίος υπολογίζει το ποσοστό της ωφέλιμης ενέργειας σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, συνήθως μία ημέρα (αλλά μπορεί να υπολογισθεί και για μία εβδομάδα, ένα μήνα κλπ.), προς την καταναλισκόμενη ενέργεια για το ίδιο χρονικό διάστημα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μία καλύτερη απεικόνιση της συμπεριφοράς του στοιχείου αυτού ως προς το ενεργειακό ζήτημα. Έτσι ο



Σχήμα 2.21: Βαθμός απόδοσης μετασχηματιστή και συμπεριφορά απωλειών χαλκού και σιδήρου συναρτήσει του συντελεστή φορτίου  $((S\varphi/S_N) \cdot 100\%)$ . [6, σελ. 61, Σχήμα 2.50].

βαθμός απόδοσης ενέργειας ή ο **βαθμός απόδοσης πλήρους ημέρας** στην προκειμένη περίπτωση ορίζεται ως:

$$\eta_{εν-24\omega\rho} = \frac{E_{εξ}}{E_{εισ}} = \frac{E_{εξ}}{E_{εξ} + E_{απ}} = \frac{E_{εξ}}{E_{εξ} + E_{Cu} + E_{Fe}} = \frac{E_{εξ}}{E_{εξ} + E_{Cu} + 24 \cdot P_{Fe}} \quad (2.6.18)$$

Όπου:

- $E_{εισ}$ : Η ενέργεια που δίνεται στο μετασχηματιστή για το ορισμένο χρονικό διάστημα (24 ώρες σε αυτήν την περίπτωση)
- $E_{εξ}$ : Η ενέργεια που δίνει ο μετασχηματιστής στο ίδιο ορισμένο χρονικό διάστημα
- $E_{Cu}$ : Η καταναλισκόμενη ενέργεια λόγω των απωλειών χαλκού του μετασχηματιστή για το ορισμένο χρονικό διάστημα

Παρατηρείται ότι στη σχέση (2.6.18) η ενέργεια απωλειών πυρήνα  $E_{Fe}$  ισοδυναμεί με τις απώλειες πυρήνα επί 24 ώρες, δηλαδή όσες είναι οι ώρες του χρονικού διαστήματος μέτρησης. Αυτό συμβαίνει διότι με βάση το σχήμα 2.21 απεικονίζεται ότι οι απώλειες πυρήνα παραμένουν ίδιες ανεξαιρέτως του συντελεστή φορτίου του μετασχηματιστή.

## 2.6.5 Υπερφόρτιση

Όταν ένας μετασχηματιστής λειτουργεί στα ονομαστικά μεγέθη, αυτό ισοδυναμεί στο ότι δουλεύει με τέτοιο φορτίο που μπορεί να αποδώσει συνεχώς την απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζεται το φορτίο χωρίς να παρουσιάσει κάποια βλάβη καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του, λειτουργώντας δηλαδή σε ασφαλές συνθήκες. Δύο σημαντικές συνθήκες είναι η θερμοκρασία των τυλιγμάτων και η θερμοκρασία του λαδιού του μετασχηματιστή. Εάν η θερμοκρασία των τυλιγμάτων αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό, υπάρχει κίνδυνος αλλοίωσης ή ακόμα και καταστροφής του μονωτικού βερνικιού, το οποίο εφαρμόζεται πάνω σε αυτά, ώστε να μη βραχυκυκλώνουν μεταξύ τους εφόσον βρίσκονται σε επαφή. Η θερμοκρασία του λαδιού έχει εξίσου σημαντικό ρόλο, διότι σε περίπτωση αυξημένης θερμοκρασίας σε σύγκριση με την ασφαλή θερμοκρασία λειτουργίας του λαδιού, η ψυκτική ικανότητα τους για την απαγωγή θερμότητας από τα τυλίγματα μειώνεται δραστικά, με αποτέλεσμα τα ίδια τα τυλίγματα να υπερθερμαίνονται λόγω ανικανότητας απαγωγής της συσσωρευμένης θερμότητας και έτσι μπορεί να ακολουθήσει αλλοίωση ή καταστροφή του μονωτικού βερνικιού όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Πριν την **υπερφόρτιση (Overload)** ενός μετασχηματιστή θα πρέπει να ληφθούν δύο βασικοί παράγοντες οι οποίοι θα συντελέσουν σημαντικά στη διάρκεια και στο ποσοστό υπερφόρτισης, σε σχέση με την ονομαστική τιμή φορτίου, που θα δεχθεί ο μετασχηματιστής. Αυτοί οι δύο παράγοντες είναι το φορτίο λειτουργίας του μετασχηματιστή πριν την υπερφόρτιση και η θερμοκρασία του λαδιού κατά την εκκίνηση της υπερφόρτισης. Αναλόγως με τις δύο αυτές συνθήκες ο μετασχηματιστής μπορεί να λειτουργήσει με υπερφόρτιση για συγκεκριμένο χρόνο ανάλογα με το φορτίο που δέχεται με βάση των παρακάτω πίνακα:

Προηγούμενο συνεχόμενο φορτίο (% της ονομαστικής ισχύος)	Θερμοκρασία λαδιού (°C)	Επίπεδο υπερφόρτισης (% της ονομαστικής ισχύος)				
		10%	20%	30%	40%	50%
		Επιτρεπτή διάρκεια υπερφόρτισης (λεπτά)				
50	55	180	90	60	30	15
75	68	120	60	30	15	8
90	78	60	30	15	8	4

Πίνακας 2.1: Αποδεκτή διάρκεια υπερφόρτισης με βάση το ποσοστό της, το συνεχές φορτίο πριν την υπερφόρτιση και την θερμοκρασία του λαδιού κατά την εκκίνηση της. [17, σελ. 33, Table 1.4 (Μεταφρασμένος)].



Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι δεν πρέπει να θεωρηθεί ίδια η θερμοκρασία λαδιού με αυτή των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή, διότι απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του λαδιού (2-4 ώρες) υπό συνεχόμενα σταθερό φορτίο, ενώ τα τυλίγματα φτάνουν σε ισορροπία σε μόλις 2-6 λεπτά. Ως αποτέλεσμα αν δεν ληφθεί υπόψη η διαφοροποίηση των δύο αυτών θερμοκρασιών, θα πρέπει να γίνει επιλογή της διάρκειας της υπερφόρτισης με προσοχή, διότι τα τυλίγματα μπορεί να υπερβούν την κρίσιμη τιμή της θερμοκρασίας που ανέρχεται στους 105° C, χωρίς να το ενδεικνύει αυτό η θερμοκρασία του λαδιού.

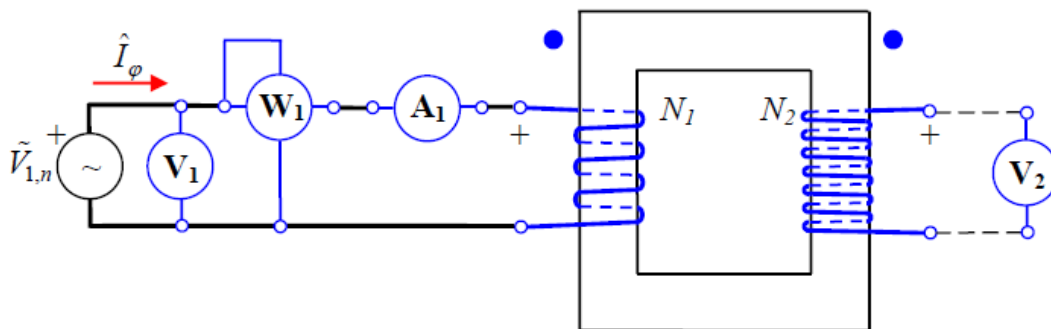
## 2.7 Πειραματικός προσδιορισμός λειτουργικών χαρακτηριστικών μετασχηματιστή

### 2.7.1 Εισαγωγή

Ο προσδιορισμός και η γνώση της συμπεριφοράς του μετασχηματιστή κατά τη λειτουργία είναι σημαντική και για αυτόν το λόγο πραγματοποιείται μία πληθώρα δοκιμών, οι οποίες καθορίζουν σημαντικά μεγέθη του μετασχηματιστή, όπως αυτά τα οποία απαιτούνται για τον υπολογισμό των απωλειών μετασχηματιστή και μεγέθη τα οποία δεν πρέπει να ξεπερνάνε συγκεκριμένα όρια για την ομαλή λειτουργία του.

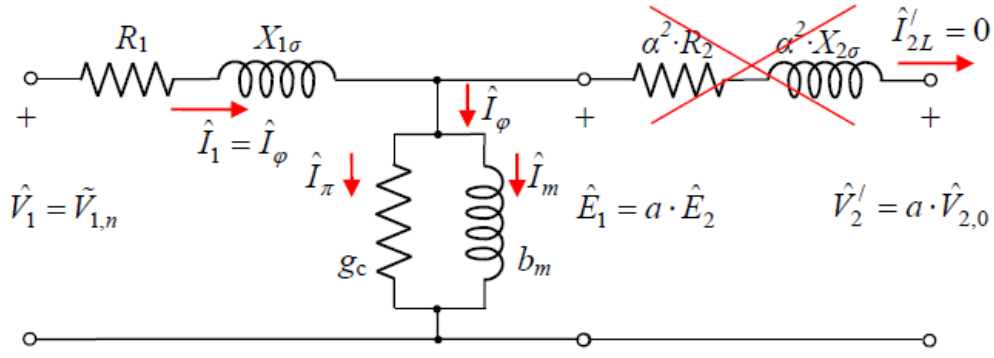
### 2.7.2 Δοκιμή ανοικτοκύκλωσης (No-Load Loss Test)

Εφαρμόζοντας μία δεδομένη ημιτονοειδή εναλλασσόμενη τάση, η αντίστοιχη αναπτυσσόμενη μαγνητική ροή του πυρήνα παραμένει σχεδόν σταθερή κατά τη μεταβολή του φορτίου, όπως είχε γίνει αναφορά στο σχήμα 2.21. Συνεπώς μέσω της δοκιμής ανοικτοκύκλωσης του μετασχηματιστή, δηλαδή με ανοιγμένο το δευτερεύον τύλιγμα, μπορούν να προσδιορισθούν οι απώλειες πυρήνα – σιδήρου. Η πειραματική διάταξη η οποία χρησιμοποιείται κατά τη διεξαγωγή αυτής της δοκιμής απεικονίζεται στο σχήμα 2.22.



Σχήμα 2.22: Πειραματική διάταξη δοκιμής ανοικτοκύκλωσης μονοφασικού μετασχηματιστή. [6, σελ. 64, Σχήμα 2.51].

Λόγω του ότι το δευτερεύον τύλιγμα είναι ανοικτοκυκλωμένο, το ολικό ρεύμα που διαρρέεται στο πρωτεύον τύλιγμα είναι το ρεύμα διέγερσης  $\hat{I}_\varphi$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.23, το οποίο είναι πολύ μικρό, για αυτόν το λόγο η πτώση τάσης πάνω στη σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος τυλιγματος είναι εξίσου μικρή και έτσι αγνοείται όπως επίσης αγνοούνται και οι απώλειες πάνω στο ωμικό κομμάτι της, οι οποίες είναι πολύ μικρές αντίστοιχα. Αυτό που απομένει είναι ο εγκάρσιος κλάδος μαγνήτισης, εφόσον το δευτερεύον τύλιγμα δεν διαρρέεται από κάποιο ρεύμα, ο οποίος διαρρέεται από το ρεύμα διέγερσης. Έτσι με βάση τη συνδεσμολογία του σχήματος 2.22 η ισχύς που εισέρχεται στο κύκλωμα  $P_1$ , θα εμφανίζεται στην ένδειξη του βατομέτρου  $W_1$  και θα είναι ίση με τις απώλειες πυρήνα  $P_{\Pi}$  (ή  $P_{Fe}$ ).



Σχήμα 2.23: Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή κατά την δοκιμή ανοικτοκύκλωσης. [6, σελ. 64, Σχήμα 2.52].

Από το βολτόμετρο  $V_1$  και το αμπερόμετρο  $A_1$  μετρούνται αντίστοιχα οι ενεργές τιμές της τάσης  $\tilde{V}_1$  και της έντασης ρεύματος  $\tilde{I}_\varphi$  αντίστοιχα. Το μέτρο της σύνθετης αγωγιμότητας διέγερσης  $|Y_\varphi|$  του εγκάρσιου κλάδου θα είναι περίπου ίσο με τη σύνθετη αγωγιμότητα ανοικτοκύκλωσης και προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$|Y_\varphi| \approx \frac{\tilde{I}_\varphi}{\tilde{V}_1} \quad (2.7.1)$$

Όπου η αγωγιμότητα ανοικτοκύκλωσης αποτελείται από:

$$Y_\varphi = g_c - j \cdot b_m \Rightarrow |Y_\varphi| = \sqrt{g_c^2 + b_m^2} \quad (2.7.2)$$

Μέσα από την ένδειξη του βαττομέτρου και την ένδειξη του βολτομέτρου μπορεί να προσδιοριστεί η αγωγιμότητα απωλειών πυρήνα  $g_c$ , όπως αναγράφεται παρακάτω:

$$P_1 = \tilde{V}_1 \cdot g_c \Rightarrow g_c = \frac{P_1}{\tilde{V}_1^2} \quad (2.7.3)$$

Έχοντας γνωστή την αγωγιμότητα απωλειών πυρήνα  $g_c$  και την αγωγιμότητα ανοικτοκύκλωσης μπορεί πλέον εύκολα να υπολογιστεί η αγωγιμότητα μαγνήτισης  $b_m$  από την παρακάτω σχέση:

$$b_m = \sqrt{|Y_\varphi|^2 - g_c^2} \Rightarrow b_m = \sqrt{\left(\frac{\tilde{I}_\varphi}{\tilde{V}_1}\right)^2 - \left(\frac{P_1}{\tilde{V}_1^2}\right)^2} \quad (2.7.4)$$

Περαιτέρω, μπορούν να υπολογιστούν οι εντάσεις ρεύματος απωλειών πυρήνα  $\tilde{I}_\pi$  και μαγνήτισης  $\tilde{I}_m$  όπως απεικονίζεται παρακάτω:

$$P_1 = \tilde{V}_1 \cdot \tilde{I}_\pi \Rightarrow \tilde{I}_\pi = \frac{P_1}{\tilde{V}_1} \quad (2.7.5)$$

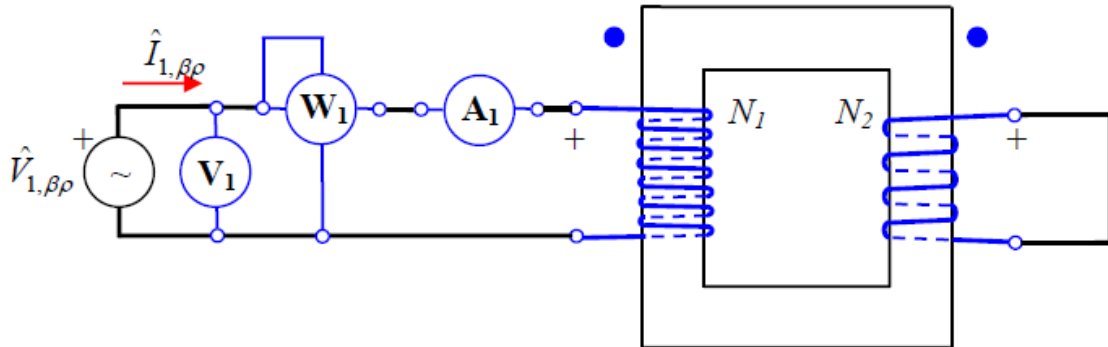
και

$$\tilde{I}_m = \sqrt{\tilde{I}_\varphi^2 - \tilde{I}_\pi^2} \quad (2.7.6)$$

Η δοκιμή ανοικτοκύκλωσης για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα μπορούν να πραγματοποιηθούν και στα δύο τυλίγματα, χαμηλής και υψηλής τάσης. Ωστόσο εάν πραγματοποιηθεί στο τύλιγμα υψηλής τάσης το ρεύμα που θα διαρρέει το τύλιγμα θα είναι μικρό και ως αποτέλεσμα θα υπάρχει μεγαλύτερη εισαγωγή σφάλματος στις μετρήσεις, ώστε να προσδιορισθούν όλοι οι παραπάνω παράμετροι που παρουσιάστηκαν. Συνεπώς προτιμάται η δοκιμή ανοικτοκύκλωσης από τη μεριά του τυλίγματος χαμηλής τάσης.

### 2.7.3 Δοκιμή βραχυκύκλωσης (Load Loss Test)

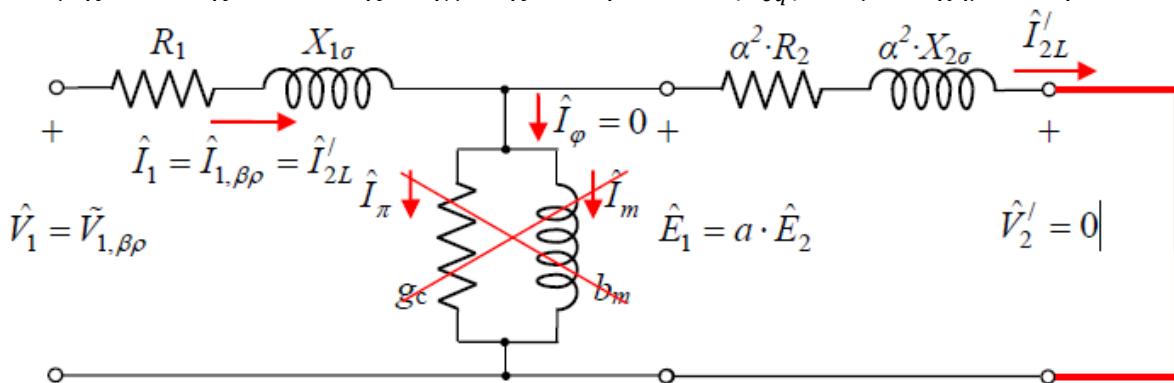
Με τη δοκιμή αυτή προσδιορίζεται η ισοδύναμη ωμική αντίσταση πρωτεύοντος  $R_{eq-p}$  και η ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση πρωτεύοντος  $X_{eq-p}$  του μετασχηματιστή, άρα καθίσταται ικανός ο υπολογισμός των απωλειών χαλκού για οποιοδήποτε φορτίο συνδεδεμένο στο μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.24: Πειραματική διάταξη δοκιμής βραχυκύκλωσης μονοφασικού μετασχηματιστή με τροφοδοσία στο τυλίγμα υψηλής τάσης. [6, σελ. 67, Σχήμα 2.53].

Κατά τη δοκιμή αυτή το δευτερεύον τυλίγμα του μετασχηματιστή βραχυκυκλώνεται, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.24, και στο πρωτεύον εφαρμόζεται τάση χαμηλή, διότι λόγω της βραχυκύκλωσης μία μικρή μεταβολή στην τάση ισοδυναμεί σε μεγάλη μεταβολή της έντασης του ρεύματος, τέτοια ώστε το ρεύμα που ρέει να μην υπερβαίνει το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή. Η ανάλογη τάση που απαιτείται για να επιτευχθεί ρεύμα βραχυκύκλωσης ίσο με αυτό της ονομαστικής λειτουργίας του μετασχηματιστή είναι από 3% έως 10% της ονομαστικής του πρωτεύοντος τυλίγματος.

Λόγω της μικρής αναπτυσσόμενης τάσης στο πρωτεύον τυλίγμα του μετασχηματιστή, ο εγκάρσιος κλάδος μαγνήτισης θα διαρρέεται από πολύ μικρό ρεύμα κάτι το οποίο τον κάνει να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής. Έτσι, εφόσον ο εγκάρσιος κλάδος αγνοείται και το ρεύμα το οποίο ρέει στο πρωτεύον και το δευτερεύον είναι ίσο με αυτό της ονομαστικής λειτουργίας, το βατόμετρο  $W_1$  θα καταμετρά τις απώλειες χαλκού  $P_{Cu}$  ή αλλιώς την ισχύ βραχυκύκλωσης  $P_{βρ}$  του μετασχηματιστή και στα δύο τυλίγματα. Το βολτόμετρο  $V_1$  και το αμπερόμετρο  $A_1$  θα καταμετρούν αντίστοιχα την τάση βραχυκύκλωσης  $\tilde{V}_{1,βρ}$  και το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $\tilde{I}_{1,βρ}$  στο πρωτεύον. Συνεπώς καθίσταται ικανός ο υπολογισμός του μέτρου της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης ανηγμένης στο πρωτεύον  $|Z'_{eq}|$  του μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.25: Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης. [6, σελ. 67, Σχήμα 2.54].

$$|Z_{eq-p}| = \frac{\tilde{V}_{1,\beta\rho}}{\tilde{I}_{1,\beta\rho}} \quad (2.7.7)$$

Το μέτρο της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης αναλύεται σε:

$$|Z_{eq-p}| = \sqrt{(R_{eq-p})^2 + (X_{eq-p})^2} \quad (2.7.8)$$

Από τις ενδείξεις του βαττομέτρου  $W_1$  και του αμπερομέτρου  $A_1$  μπορεί να υπολογισθεί η ισοδύναμη ωμική αντίσταση ανηγμένη στο πρωτεύον  $R_{eq-p}$ :

$$R_{eq-p} = \frac{P_{1,\beta\rho}}{\tilde{I}_{1,\beta\rho}^2} \quad (2.7.9)$$

Και εν τέλει η ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση ανηγμένη στο πρωτεύον  $X_{eq-p}$ :

$$X_{eq-p} = \sqrt{(Z_{eq-p})^2 - (R_{eq-p})^2} \Rightarrow X_{eq-p} = \sqrt{\left(\frac{\tilde{V}_{1,\beta\rho}}{\tilde{I}_{1,\beta\rho}}\right)^2 - \left(\frac{P_{1,\beta\rho}}{\tilde{I}_{1,\beta\rho}^2}\right)^2} \quad (2.7.10)$$

Το μειονέκτημα αυτής της δοκιμής είναι το ότι δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός των στοιχείων του δευτερεύοντος και του πρωτεύοντος ξεχωριστά παρά μόνο ως ισοδύναμα ανηγμένα στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον τύλιγμα. Για αυτόν το λόγο γίνεται η παραδοχή ισότητας μεταξύ των στοιχείων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος ώστε να υπάρχει μία προσεγγιστική τιμή όταν απαιτείται, δηλαδή οι τιμές αυτές είναι ίσες με:

$$R_1 = R'_2 = 0.5 \cdot R_{eq-p} \quad (2.7.11)$$

Και:

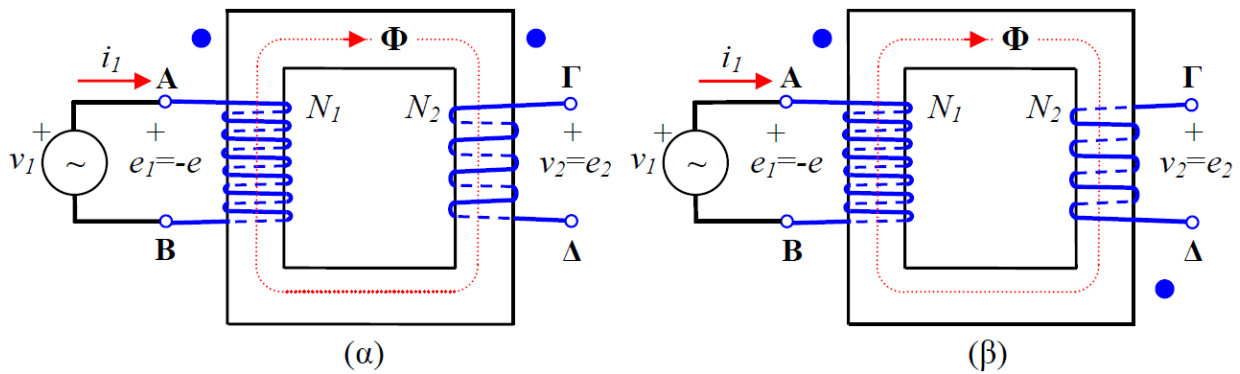
$$X_1 = X'_2 = 0.5 \cdot X_{eq-p} \quad (2.7.12)$$

Σε περίπτωση ανάγκης μεγαλύτερης ακρίβειας για τις παραπάνω τιμές, οι ωμικές αντιστάσεις μπορούν να μετρηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια μέσω δοκιμής με συνεχές ρεύμα και με τη βοήθεια ωμομέτρου αντίστοιχα σε κάθε τύλιγμα εφόσον λόγω του συνεχούς ρεύματος, αυτό δεν θα περνάει από το ένα τύλιγμα στο άλλο.

#### 2.7.4 Δοκιμή προσδιορισμού πολικότητας (Polarity Test)

Μέσω αυτής της δοκιμής μπορεί να προσδιορισθεί η φορά των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή, δηλαδή το αν η πολικότητα τους είναι **αφαιρετική (subtractive)** ή **προσθετική (additive)**. Αποτελεί **δοκιμή σειράς** για μετασχηματιστές όπως θα αναφερθεί και στην επόμενη παράγραφο.

Πιο συγκεκριμένα αν θεωρηθούν τα Α και Β ως ακροδέκτες στο πρωτεύον του μετασχηματιστή και Γ, Δ ως ακροδέκτες στο δευτερεύον τύλιγμα αντίστοιχα, τότε, εάν εφαρμοστεί μία εναλλασσόμενη ημιτονοειδής τάση στους Α και Β, τότε στους Γ και Δ θα μπορεί να εμφανιστεί συμφασική τάση ή αντίθετη πολικότητας αναλόγως τη φορά των τυλιγμάτων.



Σχήμα 2.26: Πολικότητες μονοφασικού μετασχηματιστή (α) Τυλίγματα αφαιρετικά περιτυλιγμένα (β) Τυλίγματα προσθετικά περιτυλιγμένα [6, σελ. 69, Σχήμα 2.55].

Στην περίπτωση (α) όπου τα τυλίγματα είναι αφαιρετικά τυλιγμένα, όταν ο ακροδέκτης Α βρίσκεται σε μεγαλύτερο δυναμικό από τον Β έτσι αντίστοιχα και ο Γ, δηλαδή ο γειτονικός του Α, βρίσκεται σε μεγαλύτερο δυναμικό από τον Δ.

Ισχύει ότι για μία κλειστή διαδρομή το άθροισμα των δυναμικών είναι μηδέν:

$$V_{AB} + V_{B\Delta} + V_{\Delta\Gamma} + V_{\Gamma A} = 0 \quad (2.7.13)$$

Εφαρμόζοντας τη σχέση (2.4.3) στην προκειμένη περίπτωση προκύπτει ότι:

$$\alpha = V_{AB}/V_{\Gamma\Delta} \Rightarrow V_{AB} = \alpha \cdot V_{\Gamma\Delta} \quad (2.7.14)$$

Βραχυκυκλώνοντας τους ακροδέκτες Β και Δ μέσω των σχέσεων (2.7.13) και (2.7.14) προκύπτει:

$$V_{A\Gamma} = V_{AB} + V_{\Delta\Gamma} = V_{AB} - V_{\Gamma\Delta} = \alpha \cdot V_{\Gamma\Delta} - V_{\Gamma\Delta} = (\alpha - 1) \cdot V_{\Gamma\Delta} \quad (2.7.15)$$

Όπου αυτό ισοδυναμεί στο ότι τα τυλίγματα είναι περιτυλιγμένα αφαιρετικά λόγω της διαφοράς τάσεων, ενώ οι μαγνητικές ροές τους είναι αθροιζόμενες.

Στην περίπτωση (β) όπου τα τυλίγματα είναι προσθετικά τυλιγμένα, όταν ο ακροδέκτης Α βρίσκεται σε μεγαλύτερο δυναμικό από τον Β τότε ο Γ βρίσκεται σε χαμηλότερο δυναμικό από τον Δ. Αντίστοιχα σε αυτήν την περίπτωση θα ισχύει:

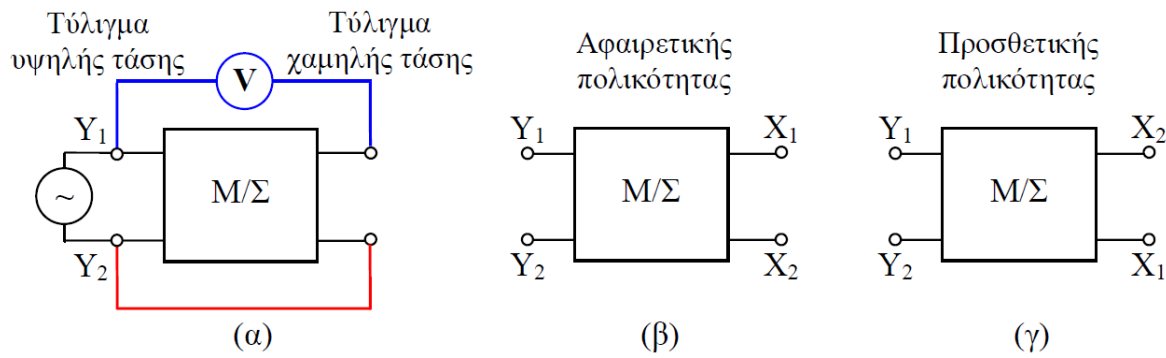
$$\alpha = -V_{AB}/V_{\Gamma\Delta} \Rightarrow V_{AB} = -\alpha \cdot V_{\Gamma\Delta} \quad (2.7.16)$$

Βραχυκυκλώνοντας τους ακροδέκτες Β και Δ μέσω των σχέσεων (2.7.13) και (2.7.16) προκύπτει αντίστοιχα:

$$V_{A\Gamma} = V_{AB} + V_{\Delta\Gamma} = V_{AB} - V_{\Gamma\Delta} = -\alpha \cdot V_{\Gamma\Delta} - V_{\Gamma\Delta} = -(\alpha + 1) \cdot V_{\Gamma\Delta} = (\alpha + 1) \cdot V_{\Delta\Gamma} \quad (2.7.17)$$

Όπου αυτό ισοδυναμεί στο ότι τα τυλίγματα είναι περιτυλιγμένα προσθετικά λόγω της πρόσθεσης των τάσεων, ενώ οι μαγνητικές ροές τους είναι αφαιρούμενες.

Προτιμάται η συνδεσμολογία με τα αφαιρετικά τυλίγματα διότι η τάση η οποία καταπονεί τις μονώσεις των τυλιγμάτων είναι μικρότερη εφόσον οι τάσεις αφαιρούνται μεταξύ τους και δεν προστίθενται όπως στην περίπτωση των προσθετικά περιτυλιγμένων τυλιγμάτων.



Σχήμα 2.27: (α) Διάταξη προσδιορισμού πολικότητας μετασχηματιστή, σύμβολο ακροδεκτών μετασχηματιστή (β) αφαιρετικής πολικότητας, (γ) προσθετικής πολικότητας. [6, σελ. 70, Σχήμα 2.56].

Για τον προσδιορισμό της πολικότητας του μετασχηματιστή, πραγματοποιείται βραχυκύκλωση μεταξύ του ακροδέκτη  $Y_2$  του τυλίγματος υψηλής τάσης και του γειτονικού του ακροδέκτη από το τύλιγμα χαμηλής τάσης, ενώ παρεμβάλλεται βολτόμετρο στον ακροδέκτη  $Y_1$  του τυλίγματος υψηλής τάσης και του αντίστοιχα γειτονικού ακροδέκτη από το τύλιγμα χαμηλής τάσης. Έτσι το τύλιγμα υψηλής τάσης τροφοδοτείται από μία εναλλασσόμενη πηγή τάσης και αναλόγως την ένδειξη του βολτομέτρου διαπιστώνεται η πολικότητα των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή. Εάν η τάση αναφοράς του βολτομέτρου είναι μεγαλύτερη από αυτή της τροφοδοσίας, τότε τα τυλίγματα είναι προσθετικά εφόσον προστίθενται και οι τάσεις μεταξύ τους σύμφωνα με τη σχέση (2.7.17). Στην περίπτωση που η τάση αναφοράς του βολτομέτρου είναι μικρότερη από αυτή της τροφοδοσίας τότε τα τυλίγματα είναι αφαιρετικά, εφόσον αφαιρούνται οι τάσεις μεταξύ του σύμφωνα με την σχέση (2.7.15).

## 2.7.5 Λοιπές Δοκιμές Μετασχηματιστή

Εκτός από τις δοκιμές – μετρήσεις που προηγήθηκαν παραπάνω υπάρχει ένα ευρύ φάσμα δοκιμών μετασχηματιστή που μελετάνε και καλύπτουν χαρακτηριστικά και συμπεριφορές αυτού κατά τη λειτουργία ή και κατά τα σφάλματα. Οι δοκιμές αυτές ακολουθούν πιστά το πρότυπο IEC 60076, από τον τόμο 1 έως τον τόμο 5. Επίσης οι δοκιμές αυτές χωρίζονται σε κατηγορίες αναλόγως της σημασίας των δοκιμών αλλά και το μέγεθος ισχύος των μετασχηματιστών. Οι 3 κατηγορίες δοκιμών είναι οι εξής:

- **Δοκιμές σειράς (Routine Tests):** Πρόκειται για δοκιμές οι οποίες υποβάλλονται καθολικά σε κάθε μετασχηματιστή.

### 1. Μέτρηση αντίστασης τυλιγμάτων (Winding Resistance)

Κατά τη μέτρηση αυτήν εφαρμόζεται συνεχές ρεύμα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και μετράται η αντίσταση του κάθε τυλίγματος, ενώ ταυτοχρόνως καταγράφεται και η θερμοκρασία του τυλίγματος, διότι είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την τιμή της αντίστασης, όπως απεικονίζεται στους παρακάτω τύπους:

Για χαλκό ισχύει:

$$R_w = R_c \cdot \frac{235 + \theta_w}{235 + \theta_c} \quad (2.7.18)$$

Και για αλουμίνιο:

$$R_w = R_c \cdot \frac{225 + \theta_w}{225 + \theta_c} \quad (2.7.19)$$

## 2. Μέτρηση σχέσης μετασχηματισμού (Voltage Ratio)

Μέσω αυτής της μέτρησης συγκρίνεται η μετρούμενη σχέση μετασχηματισμού του μετασχηματιστή που υπολογίζεται με τη βοήθεια σχεσιόμετρου και συγκρίνεται με αυτή που ορίζει ο κατασκευαστής για να επαληθευτεί η σωστή τιμή της.

## 3. Δοκιμή εφαρμοσμένης διηλεκτρικής αντοχής (Applied Voltage Dielectric Test)

Η δοκιμή αυτή διαρκεί ένα λεπτό έχει ως στόχο τον έλεγχο των μονωτικών υλικών που έχουν τα τυλίγματα πάνω τους ώστε να μπορούν αυτά να αντέχουν την απαιτούμενη τάση δοκιμής (α) μεταξύ τους, δηλαδή το πρωτεύον με το δευτερεύον, (β) τα τυλίγματα με το δοχείο του μετασχηματιστή και (γ) τα τυλίγματα με το μαγνητικό κύκλωμα, δηλαδή με τον πυρήνα του μετασχηματιστή. Η τάση δοκιμής που εφαρμόζεται είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική. Μερικές ενδεικτικές τιμές ακολουθούν στον πίνακα 2.2.

## 4. Δοκιμή επαγόμενης τάσης (Induced Voltage Dielectric Test)

Σε τριφασικό μετασχηματιστή εφαρμόζεται διπλάσια τάση από την αντίστοιχη ονομαστική τάση λειτουργίας του μετασχηματιστή για ένα λεπτό. Μέσα από αυτήν τη δοκιμή ελέγχεται η αντοχή των υλικών του μετασχηματιστή να αντέξει από μία βραχυπρόθεσμη και δυσμενή συνθήκη που θα μπορούσε να τον καταστρέψει.

Ονομαστική τάση λειτουργίας	Τάση διηλεκτρικής δοκιμής
Μέχρι 1 kV	3 kV
3 kV	10 kV
6,3 kV	20 kV
10 kV	28 kV
15 kV	38 kV
20 kV	50 kV
33 kV	70 kV
45 kV	95 kV
63 kV	140 kV
110 kV	230 kV
150 kV	325 kV
220 kV	395 kV
400 kV	630 kV

Πίνακας 2.2: Τάσεις διηλεκτρικής δοκιμής έναντι των ονομαστικών τάσεων λειτουργίας. [5, σελ. 24, Πίνακας 3].

## 5. Δοκιμή συστήματος βηματικής μεταβολής τάσης υπό φορτίο (On load tap changer Test)

Κύριος στόχος της δοκιμής αυτής είναι να ελεγχθεί η σωστή και αξιόπιστη μετάβαση του συστήματος σε πολλαπλές και διαφορετικές λήψεις χωρίς την παρουσία κάποιου προβλήματος κατά τη διεξαγωγή.

➤ **Δοκιμές τύπου (Type Tests):** Πρόκειται για δοκιμές στις οποίες επιλέγεται ένας μετασχηματιστής ή ένας μικρός αριθμός μετασχηματιστών του ίδιου τύπου και υπόκεινται συγκεκριμένες δοκιμασίες ώστε να διαπιστωθεί η αξιοπιστία και η αποφυγή μίας προβληματικής σειράς. Παρακάτω ακολουθούν παραδείγματα δοκιμών αυτής της κατηγορίας:

1. Δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας (Temperature Rise Test)
2. Δοκιμή κρουστικής τάσης (Lightning Impulse Test)
3. Δοκιμή θορύβου (Determination of Sound Levels)



➤ **Ειδικές δοκιμές (Special Tests):** Δοκιμές οι οποίες πραγματοποιούνται έπειτα ειδικής συμφωνίας μεταξύ αγοραστή και κατασκευαστή. Ονομαστικά μερικές από αυτές αναφέρονται παρακάτω:

1. Δοκιμή αντοχής σε βραχυκύκλωμα.
  - a. Δυναμική καταπόνηση (Dynamic Stress).
  - b. Θερμική καταπόνηση (Thermal Stress).
2. Μέτρηση των αρμονικών του ρεύματος κενής λειτουργίας (Measurement of the Harmonics of the no-load current).
3. Μέτρηση μερικών εκκενώσεων.
4. Μέτρηση της ομοπολικής αντίστασης (μηδενικής ακολουθίας).
5. Μέτρηση στάθμης ραδιοφωνικών παρεμβολών (Radio Interference Voltage).
6. Μέτρηση της ισχύος των ανεμιστήρων και των αντλιών λαδιού.
7. Μέτρηση της χωρητικότητας των τυλιγμάτων, προς γη και μεταξύ τους, μέτρηση του συντελεστή απωλειών ( $\tan\delta$ ) και της αντίστασης μόνωσης των τυλιγμάτων προς γη.

## 2.8 Μεταβατική συμπεριφορά μετασχηματιστή

### 2.8.1 Εισαγωγή

Σημαντικό κομμάτι στη λειτουργία του μετασχηματιστή είναι η δυναμική συμπεριφορά του κατά τα μεταβατικά φαινόμενα, δηλαδή κατά τη διάρκεια σύνδεσης του μετασχηματιστή στο δίκτυο με το κλείσιμο του αυτόματου διακόπτη ή του διακόπτη φορτίου που διαθέτει, όταν βραχυκυκλωθούν τα άκρα του ή όταν αρχικά ζητείται μία ισχύ επιπέδου  $P_A$  και έπειτα λόγω εναλλαγής η ανάγκη αυτή αλλάζει σε ένα άλλο επίπεδο ισχύος  $P_B$ , το οποίο μπορεί να είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από το προηγούμενο. Κατά τη μετάβαση από το ένα επίπεδο ισχύος στο άλλο ο μετασχηματιστής ενδέχεται να εμφανίσει βραχυπρόθεσμα φαινόμενα όπως υπερένταση, υπέρταση ή υπόταση. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να διαρκέσουν μόλις μερικά δευτερόλεπτα, αλλά λόγω των μεγάλων τους τιμών μπορούν να προκαλέσουν φθορά ή ακόμα και σοβαρή βλάβη στο μετασχηματιστή.

Πιο αναλυτικά η υπερένταση έχει ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση των τυλιγμάτων σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι στην κανονική λειτουργία και ασκούνται μεγάλες δυνάμεις Laplace μεταξύ τους. Οι υπερτάσεις καταπονούν τις μονώσεις των τυλιγμάτων, με αποτέλεσμα τη μείωση χρόνου ζωής ή και σε ακραίο βαθμό την καταστροφή τους ως αποτέλεσμα τη βραχυκύκλωση των τυλιγμάτων. Οι υποτάσεις λόγω του ότι τα μεγέθη είναι μικρότερα από αυτά της ονομαστικής λειτουργίας δεν προκαλούν κάποια φθορά στο μετασχηματιστή, αλλά μπορούν να επηρεάσουν το φορτίο, το οποίο τροφοδοτεί ο μετασχηματιστής, αν αυτό είναι ευαίσθητο στις μεταβολές της τάσης.

### 2.8.2 Υπερένταση κατά τη βραχυκύκλωση μετασχηματιστή

Κατά τη βραχυκύκλωση του δευτερεύοντος ενός μετασχηματιστή το πρωτεύον τύλιγμα αυτού δέχεται πολλαπλάσια ένταση ρεύματος σε σχέση με την ονομαστική. Γι' αυτόν το λόγο οι καταπονήσεις που δέχεται εκείνο το βραχυπρόθεσμο χρονικό διάστημα είναι σημαντικές και πρέπει να ληφθούν αντίστοιχα μέτρα. Υπάρχουν δύο βασικές περιπτώσεις για την υπερένταση και αυτές είναι:

**Ένταση μόνιμης βραχυκύκλωσης ή ονομαστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης  $\tilde{I}'_{1,\beta\rho}$ :** Όταν εφαρμόζεται τάση τροφοδοσίας ίση με αυτή της ονομαστικής τιμής, τότε στο πρωτεύον τύλιγμα ρέει η ένταση μόνιμης βραχυκύκλωσης κατά τη μόνιμη κατάσταση. Δηλαδή αν αγνοηθεί ο εγκάρσιος κλάδος στο ισοδύναμο κύκλωμα, το οποίο είναι ανηγμένο στο πρωτεύον, τότε ισχύει η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της έντασης μόνιμης βραχυκύκλωσης:



$$\tilde{I}'_{1,\beta\rho} = \frac{\tilde{V}_{1,n}}{\sqrt{(R_{eq-p})^2 + (X_{eq-p})^2}} = \frac{\tilde{V}_{1,n}}{|Z_{eq-p}|} \quad (2.8.1)$$

**Κανονική ένταση βραχυκύκλωσης ή ονομαστικό ρεύμα  $\tilde{I}'_{1,\beta\rho,n}$ :** Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.6.2 για βραχυκυκλωμένο δευτερεύον τύλιγμα και τάση βραχυκύκλωσης, θα προκύπτει ως αποτέλεσμα η ροή ονομαστικού ρεύματος στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή. Δηλαδή θα ισχύει:

$$\tilde{I}'_{1,\beta\rho,n} = \frac{\tilde{V}_{1,\beta\rho}}{\sqrt{(R_{eq-p})^2 + (X_{eq-p})^2}} = \frac{\tilde{V}_{1,\beta\rho}}{|Z_{eq-p}|} = \tilde{I}_{1,n} \quad (2.8.2)$$

Σε συνδυασμό των σχέσεων (2.6.9), (2.8.1) και (2.8.2) προκύπτει η παρακάτω αναλογία μεταξύ της έντασης μόνιμης βραχυκύκλωσης και της τάσης βραχυκύκλωσης ενός μετασχηματιστή:

$$\tilde{I}_{1,\beta\rho} = \frac{\tilde{V}_{1,n}}{|Z_{eq-p}|} = \frac{\tilde{V}_{1,n}/\tilde{I}_{1,n}}{|Z_{eq-p}|/\tilde{I}_{1,n}} = \tilde{I}_{1,n} \cdot \frac{Z_{1,n}}{|Z_{eq-p}|} \Rightarrow \tilde{I}_{1,\beta\rho} = \tilde{I}_{1,n} \cdot \frac{1}{v_{\beta\rho}(\%)} \quad (2.8.3)$$

Έτσι ως αποτέλεσμα ακόμα και η ύπαρξη μιας μικρής εκατοστιαίας τάσης βραχυκύκλωσης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πολύ μεγάλης έντασης μόνιμης βραχυκύκλωσης σε σχέση με την τιμή της ονομαστικής έντασης ρεύματος για τη μόνιμη κατάσταση. Σε περίπτωση μεταβατικής κατάστασης, υπάρχει επιπλέον το κρουστικό ρεύμα, το οποίο γίνεται ακόμα μεγαλύτερο, 50 – 100 φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού, και έτσι ασκεί μεγαλύτερες καταπονήσεις στο μετασχηματιστή στις οποίες πρέπει να ληφθούν μέτρα προστασίας του ίδιου. Αυτό πραγματοποιείται με την τοποθέτηση στραγγαλιστικών πηνίων τα οποία περιορίζουν αυτό το ρεύμα προστατεύοντας το μετασχηματιστή από τις μεγάλες δυναμικές καταπονήσεις, οι οποίες είναι ανάλογες του τετραγώνου της έντασης ρεύματος που διαρρέει τον μετασχηματιστή.

### 2.8.3 Ηλέκτριση μετασχηματιστή – Ένταση Παρεμβολής

Κατά τη σύνδεση του μετασχηματιστή στο δίκτυο, μέχρι να αποκατασταθεί η ισορροπία στο σύστημα, για ένα μικρό χρονικό διάστημα, ο μετασχηματιστής διαρρέεται από μεγάλη ένταση ρεύματος. Αυτή η ένταση ονομάζεται **ένταση παρεμβολής  $I_{1,\pi\alpha\rho}$**  και αυτή η βραχυπρόθεσμη διάρκεια μέχρι τη μόνιμη κατάσταση ονομάζεται **ηλέκτριση ή ενεργοποίηση ή παρεμβολή μετασχηματιστή**.

Για τη διατύπωση αυτού του φαινομένου θεωρείται ένας μετασχηματιστής στον οποίον αγνοείται ο εν σειρά κλάδος του δευτερεύοντος, έχοντας έτσι ίση ισότητα μεταξύ της έντασης ρεύματος του πρωτεύοντος με το ρεύμα διέγερσης, και το δευτερεύον του είναι ανοικτοκυκλωμένο. Έτσι ισχύει η παρακάτω σχέση για την τάση τροφοδοσίας, δηλαδή την τάση του πρωτεύοντος.

$$v_1(t) = R_1 \cdot i_1(t) + L_1 \cdot \frac{di_1(t)}{dt} \Rightarrow \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_1 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) = R_1 \cdot i_\varphi(t) + L_1 \cdot \frac{di_\varphi(t)}{dt} \quad (2.8.4)$$

Η μαγνητική ροή  $\Phi_1$  είναι εξαρτώμενη του ρεύματος διέγερσης  $i_\varphi$ . Αν υποθεθεί ότι η σχέση μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών είναι γραμμική μέσω του συντελεστή αυτεπαγωγής  $L_1$ , τότε η πεπλεγμένη ροή  $\lambda_1$  θα ορίζεται ως:

$$\lambda_1(t) = N_1 \cdot \Phi_1(t) = L_1 \cdot i_\varphi(t) \quad (2.8.5)$$

Έτσι από τον συνδυασμό των σχέσεων (2.8.4) και (2.8.5) προκύπτει η παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d\Phi_1(t)}{dt} + \frac{R_1}{L_1} \cdot \Phi_1(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_1}{N_1} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) \quad (2.8.6)$$

Μέσα από περαιτέρω ανάλυση των παραπάνω σχέσεων προκύπτει η παρακάτω συνολική λύση:

$$\Phi_1(t) = \Phi_{max} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0 - \theta) + C \cdot e^{\frac{R_1}{L_1} t} \quad (2.8.7)$$

Όπου το  $\Phi_{max}$  στην προκειμένη περίπτωση είναι ίσο με:

$$\Phi_{max} = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_1 \cdot L_1}{N_1 \cdot \sqrt{R_1^2 + (L_1 \cdot \omega)^2}} \quad (2.8.8)$$

Στη σχέση (2.8.7) ο πρώτος όρος αποτελεί την μόνιμη μαγνητική ροή του ρεύματος διέγερσης ενώ ο δεύτερος όρος αποτελεί παροδική συνεχή συνιστώσα, όπου η σταθερά C είναι εξαρτημένη από τις αρχικές συνθήκες. Για  $t = 0$  ισχύει ότι η στιγμιαία μαγνητική ροή είναι ίση με τον παραμένοντα μαγνητισμό  $\Phi_\pi$  και αναλόγως το σημείο της διακοπής λειτουργίας του μετασχηματιστή καθορίζεται αντίστοιχα θετικό ή αρνητικό πρόσημο στον παραμένοντα μαγνητισμό. Έτσι η σταθερά C θα ορίζεται ως:

$$C = \pm \Phi_\pi - \Phi_{max} \cdot \cos(\varphi_0 - \theta) \quad (2.8.9)$$

Έτσι σε συνδυασμό των σχέσεων (2.8.7) και (2.8.9) προκύπτει η τελική λύση:

$$\Phi_1(t) = \Phi_{max} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0 - \theta) + [\pm \Phi_\pi - \Phi_{max} \cdot \cos(\varphi_0 - \theta)] \cdot e^{\frac{R_1}{L_1} t} \quad (2.8.10)$$

Η παραμένουσα μαγνήτιση  $\Phi_\pi$  έχει μέγεθος περίπου με το 20% του μέγιστου πλάτους μαγνήτισης  $\Phi_{max}$ . Η γωνία οριστεί ίση με  $\varphi_0 = \theta$ , τότε έχοντας δύο φορές τον όρο της μέγιστου πλάτους μαγνήτισης  $\Phi_{max}$  η συνολική στιγμιαία μέγιστη τιμή θα είναι ίση με 220% της  $\Phi_{max}$  μαζί με την παραμένουσα μαγνήτιση  $\Phi_\pi$ .

## 2.8.4 Υπερτάσεις

Οι υπερτάσεις οι οποίες ξεπερνούν την τιμή της ονομαστικής τάσης κατά 350% είναι επικίνδυνες και για αυτό το λόγο εφαρμόζονται μέτρα προστασίας στους μετασχηματιστές όπως θα αναλυθεί και παρακάτω ανάλογα με το μέγεθος της υπέρτασης όπως και το αίτιο που την προκαλεί. Τα πιο συνήθη είδη είναι:

➤ **Υπερτάσεις λόγω ατμοσφαιρικών εκκενώσεων:** Οι εκκενώσεις αυτές μπορούν να πραγματοποιηθούν κοντά ή και απευθείας στις γραμμές μεταφοράς. Συχνά πραγματοποιείται αυτό το φαινόμενο σε ορεινές περιοχές ή κατά τη διάρκεια καταιγίδων όπου οι γραμμές μεταφοράς έχουν κοντά τους ηλεκτρικά φορτισμένα νέφη. Οι υπερτάσεις που δημιουργούνται άμεσα από τον κεραυνό οδεύουν και προς τις δύο κατευθύνσεις της γραμμής και πραγματοποιείται απόσβεση κατά το μήκος της διαδρομής. Έτσι ανάλογα το πόσο κοντά ή μακριά βρίσκεται ένας μετασχηματιστής από το σημείο εκκένωσης θα καθορίσει και το μέγεθος της υπέρτασης το οποίο θα υποστεί. Το μέγεθος αυτό μπορεί να πάρει τιμές από 7 έως και 12 φορές της ονομαστικής τάσης. Για την ελαχιστοποίηση των υπερτάσεων αυτού του είδους, οι γραμμές μεταφοράς ενισχύονται με αγωγούς γείωσης, τοποθετούνται αλεξικέραυνα και συστήματα αντικεραυνικής προστασίας στους υποσταθμούς.

➤ **Υπερτάσεις από χειρισμούς:** Κατά τη σύνδεση – αποσύνδεση του μετασχηματιστή από το δίκτυο τη στιγμή που ανοίγει – κλείνει ο αυτόματος διακόπτης ισχύος ή ο διακόπτης φορτίου, κατά τη γρήγορη μεταβολή της ζήτηση ισχύος όπως επίσης και κατά την αποκοπή ενός αγωγού ή σπασίματος ενός μονωτήρα, δημιουργούνται υπερτάσεις οι οποίες έχουν 2 έως 5 φορές την τιμή της ονομαστικής τάσης. Οι περιπτώσεις υπερτάσεων από τη μεταβολής ζήτησης ισχύος και τη σύνδεση – αποσύνδεση περιορίζονται μέσω αντιστάθμισης των ηλεκτρικών δικτύων με στραγγαλιστικά πηνία γείωσης (πηνία σβέσης, πηνία Petersen) ή και σε σπάνιες περιπτώσεις με ωμικές αντιστάσεις.

➤ **Υπερτάσεις από βραχυκυκλώματα:** Η ένωση των αγωγών της γραμμής μεταφοράς του δικτύου ή η τυχαία στιγμιαία προσγείωση μίας φάσης προκαλεί υπέρταση μεγέθους 7 έως 8 φορές της τιμής της ονομαστικής τάσης. Για την αποφυγή της καταστροφής του μετασχηματιστή απαιτείται ειδικό κύκλωμα προστασίας έναντι των υπερτάσεων.

➤ **Υπερτάσεις από συντονισμό:** Λόγω της κατασκευαστικής μορφολογίας του μετασχηματιστή μπορεί μέσα από κάποια επιβαλλόμενη συχνότητα να αναπτυχθεί υπέρταση μεγάλου μεγέθους εξαιτίας φαινομένων συντονισμού. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με την ορθότερη σχεδίαση των μετασχηματιστών από τους κατασκευαστές.

## 2.9 Παραλληλισμός μονοφασικού μετασχηματιστή

### 2.9.1 Εισαγωγή – Προνόμια παραλληλισμού μετασχηματιστών

Δύο ή περισσότεροι μετασχηματιστές μπορούν να συνδεθούν παράλληλα για να εξυπηρετήσουν το ίδιο φορτίο – δίκτυο, με σκοπό την καλύτερη, την πιο οικονομική ή και την πιο ασφαλή λειτουργία του. Κάποιοι από τους λόγους που πραγματοποιείται παραλληλισμός μετασχηματιστών περιγράφονται παρακάτω:

➤ **Επέκταση του υφιστάμενου φορτίου σε υπάρχουσα εγκατάσταση:** Με την πάροδο του χρόνου μπορεί να χρειαστεί επέκταση της εγκατάστασης, άρα και μεγαλύτερη ζήτηση ισχύος. Για αυτόν το λόγο προστίθεται επιπρόσθετος μετασχηματιστής για την κάλυψη των νέων αναγκών.

• **Απόκτηση εφεδρείας για κρίσιμα φορτία – Αύξηση αξιοπιστίας:** Σε περιπτώσεις όπου το φορτίο πρέπει να λειτουργεί χωρίς διακοπές, τότε τοποθετείται επιπρόσθετος μετασχηματιστής/μετασχηματιστές έτσι, ώστε αν ένας βγει εκτός λειτουργίας είτε λόγω απρόοπτου σφάλματος είτε λόγω ανάγκης συντήρησης, η εγκατάσταση θα μπορέσει να συνεχίσει να λειτουργεί ακόμα και με μειωμένη παροχή ισχύος ώστε να καλύψει τα κρίσιμα – ευπαθή φορτία. Είναι προτιμότερο να υπάρχουν πολλαπλοί μετασχηματιστές, έτσι, ώστε να υπάρχει μικρότερη πιθανότητα για την πλήρη διακοπή τροφοδοσίας της εγκατάστασης.

• **Οικονομική Λειτουργία:** Επιλέγονται πολλαπλοί μετασχηματιστές, που στο σύνολο πληρούν τη μέγιστη ζήτηση ισχύος, με σκοπό τη κάλυψη ενός μεγάλου εύρους τιμών ισχύος σε μία εγκατάσταση έτσι, ώστε να βγαίνουν εκτός λειτουργίας μερικοί μετασχηματιστές, όταν η ζήτηση είναι χαμηλή, με αποτέλεσμα αυτοί που είναι σε λειτουργία να δουλεύουν σε μεγάλη απόδοση σε σχέση με την περίπτωση όπου η εγκατάσταση θα είχε ένα μεγάλο μετασχηματιστή και αυτός για μικρή ζήτηση ισχύος θα λειτουργούσε με μικρή απόδοση.

### 2.9.2 Συνθήκες – Απαιτήσεις για την παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστών

Για να μπορούν να λειτουργήσουν δύο ή παραπάνω μονοφασικοί μετασχηματιστές παράλληλα χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων σε αυτούς ή το δίκτυο θα πρέπει να τηρούνται οι παρακάτω συνθήκες:

• **Ορθή πολικότητα κατά τις συνδέσεις:** Στην περίπτωση που είναι ανάστροφα πολωμένοι μεταξύ τους τότε θα διαρρέεται ρεύμα μέσα τους με σύνθετη αντίσταση η οποία θα είναι ίση με το άθροισμα των αντίστοιχων σύνθετων αντιστάσεων του κάθε μετασχηματιστή και τάση το άθροισμα

των τάσεων τους. Έτσι θα υπάρχει μεγαλύτερη πτώση τάσης εσωτερικά των μετασχηματιστών και περαιτέρω απώλειες.

Αναλυτικά για να πραγματοποιηθεί η ορθή πολικότητα, πρέπει να συνδεθεί το κάθε τύλιγμα, πρωτεύοντος και δευτερεύοντος στους αντίστοιχους ζυγούς με την ίδια πολικότητα. Παρεμβάλλοντας ένα βολτόμετρο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.28, αν η πολικότητα είναι ορθή τότε το βολτόμετρο θα εμφανίζει μηδενική ένδειξη. Σε περίπτωση που η ένδειξη του είναι διπλάσια αυτής του δευτερεύοντος τυλίγματος, τότε η πολικότητα είναι αντίστροφη.

- **Ίσες ονομαστικές τάσεις:** Σε περίπτωση που είναι διαφορετικές οι ονομαστικές τάσεις των μετασχηματιστών, θα λειτουργούν σε διαφορετικό επίπεδο φόρτισης και έτσι ενδέχεται κάποιος από αυτούς είτε να υπερφορτιστεί, με αποτέλεσμα για μακρόχρονη λειτουργία να παρουσιάσει βλάβη ή και να καταστραφεί, είτε να λειτουργεί σε χαμηλό επίπεδο φόρτισης και να έχει χαμηλό βαθμό απόδοσης. Βέβαια επειδή πάντα θα υπάρχει μία μικρή διακύμανση επιτρέπεται μία πολύ μικρή ανοχή της τάξης του  $\pm 0,5\%$ .

- **Τα μέτρα των τάσεων βραχυκύκλωσης να είναι αντιστρόφως ανάλογα με τις ονομαστικές ικανότητες ή τα ονομαστικά ρεύματα:** Όταν ισχύει αυτό οι μετασχηματιστές ανυψώνονται κατά τη λειτουργία στις μέγιστες επιτρεπτές θερμοκρασίες τους. Στην περίπτωση που δεν ισχύει αυτό, το φορτίο μοιράζεται ανομοιόμορφα και έτσι κάποιιοι θα υπερθερμαίνονται και κάποιιοι θα λειτουργούν κάτω των ανώτατων ορίων ισχύος με ασφάλεια.

- **Ίσοι λόγοι των ισοδύναμων επαγωγικών αντιδράσεων προς τις ισοδύναμες ωμικές αντιστάσεις:** Αν δεν ισχύει αυτό τα ρεύματα των μετασχηματιστών και του φορτίου δεν θα είναι συμφασικά, με αποτέλεσμα να μειώνεται η παροχή φαινόμενης ισχύος από τους μετασχηματιστές στο φορτίο.

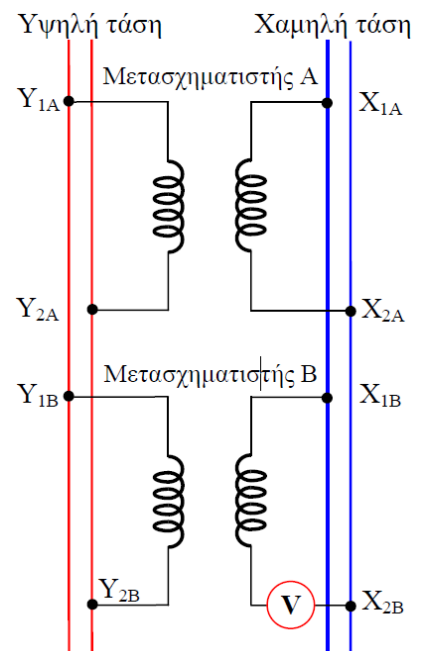
- **Ίδιες εκατοστιαίες τάσεις βραχυκύκλωσης:**
  - με ανοχές  $\pm 7,5\%$  για εκατοστιαίες τάσεις βραχυκύκλωσης μεγαλύτερες από  $10\%$ .
  - με ανοχές  $\pm 10\%$  για εκατοστιαίες τάσεις βραχυκύκλωσης μικρότερες από  $10\%$ .

Σε περίπτωση που οι παραλληλισμένοι μετασχηματιστές έχουν ίδιο λόγο μετασχηματισμού, αλλά διαφορετικές τάσεις βραχυκύκλωσης και δεν επιτρέπεται σε κάποιον από αυτούς να υπερφορτωθεί κατά τη λειτουργία τους, τότε αυτός με την ελάχιστη τάση βραχυκύκλωσης λειτουργεί στα ονομαστικά μεγέθη. Ως αποτέλεσμα το φορτίο διαμοιράζεται ομοιόμορφα, με βάση την εκατοστιαία τάση βραχυκύκλωσης τους και την ονομαστική φαινόμενη ισχύ τους σε όλους τους μετασχηματιστές χωρίς κάποιος από αυτούς να υπερφορτωθεί. Η σχέση παρακάτω περιγράφει το ποσό φαινόμενης ισχύος που θα πρέπει να δεχθεί ένας  $i$  μετασχηματιστής σε ένα πλήθος  $n$  παραλληλισμένων μετασχηματιστών:

$$S_i = S_{n,i} \cdot \frac{v_{\beta\rho,min}}{v_{\beta\rho,i}} \quad (2.9.1)$$

Όπου:

- $S_{n,i}$ : η ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή  $i$ ,



Σχήμα 2.28 Ορθή διάταξη παραλληλισμού μετασχηματιστών με συνδεδεμένο βολτόμετρο για επιβεβαίωση της ορθής πολικότητας. [6, σελ. 80, Σχήμα 2.58(a)].

- $v_{\beta\rho,min}$ : η ελάχιστη εκατοστιαία τάση βραχυκύκλωσης των παραλληλισμένων μετασχηματιστών,
- $v_{\beta\rho,i}$ : η εκατοστιαία τάση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή  $i$ .

Το μειονέκτημα σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι οι μετασχηματιστές αυτοί δεν θα μπορούν να λειτουργήσουν όλοι στα ονομαστικά μεγέθη και έτσι θα υπάρχει ένα μικρό ποσό εγκατεστημένης ισχύος που δεν θα μπορεί να αξιοποιηθεί από τους ίδιους. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος  $v_{\beta\rho,min}/v_{\beta\rho,i}$ , τόσο μικρότερο θα είναι και το ποσό ισχύος που δεν θα μπορεί να αξιοποιηθεί από τον κάθε μετασχηματιστή. Όταν ο λόγος αυτός έχει τιμή ίση με τη μονάδα, τότε όλοι οι μετασχηματιστές θα λειτουργούν στα ονομαστικά μεγέθη τους.

• Η αναλογία μεταξύ των ονομαστικών ισχύων των μετασχηματιστών πρέπει να είναι μικρότερη του 3:1.

## 2.10 Ειδικοί τύποι μονοφασικού μετασχηματιστή

### 2.10.1 Αυτομετασχηματιστής

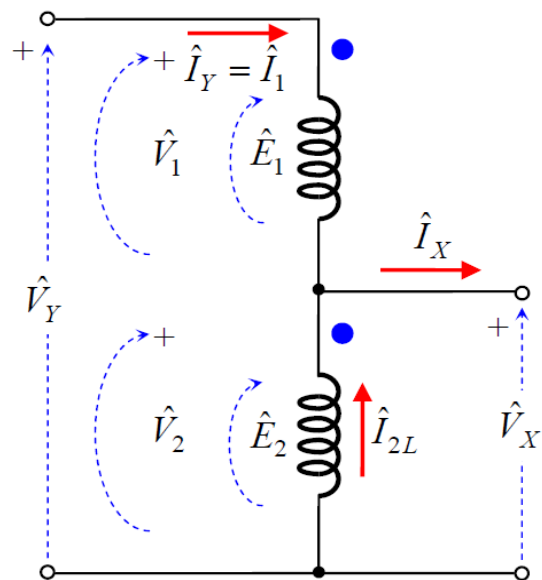
Πρόκειται για έναν κανονικό μετασχηματιστή με τη διαφορά ότι τα τυλίγματα του ίδιου είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Λόγω της σύνδεσης αυτής των τυλιγμάτων τα τυλίγματα εσωτερικά έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, αλλά εξωτερικά οι ακροδέκτες παραμένουν οι ίδιοι. Πιο συγκεκριμένα στο τύλιγμα σειράς διαρρέεται το ονομαστικό ρεύμα της πλευράς υψηλής τάσης, ενώ στο παράλληλο ή κοινό τύλιγμα εφαρμόζονται και οι 2 τάσεις, δηλαδή και αυτή της υψηλής αλλά και της χαμηλής πλευράς. Η μορφολογία ενός τέτοιου μετασχηματιστή αναπαρίσταται στο σχήμα 2.29.

Λόγω της ιδιαιτερότητας αυτής ο αυτομετασχηματιστής έχει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με έναν απλό μετασχηματιστή, αυτά είναι:

- Μικρότερο μέγεθος,
- Χαμηλότερο κόστος,
- Μεγαλύτερη απόδοση,
- Μικρότερο ρεύμα διέγερσης και
- Μικρότερη εκατοστιαία πτώση τάσης.

Παρουσιάζονται και τα εξής μειονεκτήματα όμως με αυτήν τη δομή λειτουργίας:

- Εξάπλωση βλαβών από το ένα τύλιγμα στο άλλο. Σε περίπτωση που προκύψει κάποιο σφάλμα – βλάβη στο ένα από τα δύο τυλίγματα λόγω της σειριακής συνδεσμολογίας το τυλιγμάτων, το σφάλμα αυτό θα επηρεάσει και το άλλο τύλιγμα.
- Μεγαλύτερες καταπονήσεις στον ίδιο τον αυτομετασχηματιστή και το δίκτυο λόγω της ανάπτυξης μεγαλύτερων ρευμάτων βραχυκύκλωσης.
- Ανικανότητα χρήσης ως μετασχηματιστής απομόνωσης. Δεν παρέχει γαλβανική απομόνωση λόγω της άμεσης αγωγίμης σύνδεσης των δύο τυλιγμάτων.



Σχήμα 2.29: Συνδεσμολογία ενός μονοφασικού αυτομετασχηματιστή. [6, σελ. 87, Σχήμα 2.62].

Με βάση την λειτουργία του και τα παραπάνω χαρακτηριστικά οι αυτομετασχηματιστές μπορούν να αξιοποιηθούν με τους παρακάτω τρόπους:



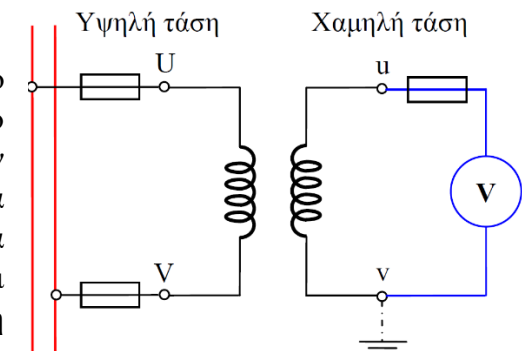
- Εκκίνηση ασύγχρονων κινητήρων,
- Σύνδεση δικτύων υψηλής τάσης,
- Σε οικιακές συσκευές όπου ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος,
- Σε μικρότερα μεγέθη ως αυτομετασχηματιστές μεταβλητού λόγου (Variac) για τη λήψη μεταβλητής τάσης.

## 2.10.2 Μετασχηματιστής τάσης

Πρόκειται για έναν μετασχηματιστή ο οποίος δεν έχει ως σκοπό λειτουργίας τη μετάβαση ισχύος από ένα επίπεδο τάσης σε ένα άλλο και τη μεταφορά της, αλλά την παροχή συγκεκριμένης ισχύος η οποία θα τροφοδοτήσει όργανα μέτρησης, τα οποία ελέγχουν τη συμπεριφορά δικτύων ή ηλεκτρικές μηχανές υψηλής τάσης. Έτσι αυτό το είδος μετασχηματιστή έχει το ρόλο ενός στοιχείου επιτήρησης – προστασίας για άλλα σημαντικά στοιχεία σε ένα δίκτυο. Διεθνείς κανονισμοί όπως το πρότυπο DIN ή και το VDE έχουν ορίσει ως τάση δευτερεύοντος τα 100 V ανεξαιρέτως το επίπεδο τάσης του πρωτεύοντος τυλίγματος (βέβαια για ειδικές ανάγκες – εγκαταστάσεις αυτό μπορεί να αλλάξει). Για αυτόν το λόγο ο μετασχηματιστής μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού, εφόσον γίνεται η μετάβαση από την υψηλή τάση στα 100 V.

Ως προς τις κατασκευαστικές του ιδιότητες – ιδιαιτερότητες ο μετασχηματιστής τάσης έχει τα δύο τυλίγματα του απολύτως απομακρυσμένα όπου το κάθε ένα από αυτά είναι τυλιγμένο σε διαφορετικό κορμό του πυρήνα με αποτέλεσμα την πλήρη γαλβανική απομόνωση. Άλλες ιδιαιτερότητες στην κατασκευή του είναι η τοποθέτηση ασφαλειών στο πρωτεύον και στο δευτερεύον για την αποφυγή τυχαιών βραχυκυκλωμάτων που δεν πρέπει να προκληθούν στο δευτερεύον, όπως επίσης και το να είναι γειωμένο το δευτερεύον τύλιγμα.

Λόγω της ανάγκης για μέτρηση – επιτήρηση ο μετασχηματιστής αυτός έχει μία μεγάλη αντίσταση στο δευτερεύον, αφού κατά την πλειοψηφία των περιπτώσεων συνδέεται βολτόμετρο στην έξοδο του ως φορτίο. Βέβαια σε περίπτωση ανάγκης περισσότερων οργάνων, τα προστιθέμενα όργανα συνδέονται σε σειρά και όχι παράλληλα, ώστε να μην παρακάμπτεται η μεγάλη αντίσταση που τοποθετείται στο δευτερεύον. Παρακάτω ακολουθεί μία απλή απεικόνιση της πιο συνήθους συνδεσμολογίας αυτού του μετασχηματιστή:



Σχήμα 2.30 Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τάσης. [6, σελ. 95, Σχήμα 2.66].

Εκτός των βασικών τεχνικών μεγεθών ενός μετασχηματιστή, όπως ο λόγος μεταφοράς, η φαινόμενη ισχύς κλπ. που αναγράφονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά ένα σημαντικό μέγεθος, λόγω και της χρησιμότητας αυτού του είδους μετασχηματιστών, είναι η κλάση που φέρει για τα όργανα μέτρησης τα οποία συνδέονται με αυτόν. Οι κλάσεις συνήθως είναι εξαρτημένες από τη φαινόμενη ισχύ του μετασχηματιστή. Υπάρχουν δύο κυρίως σφάλματα τα οποία είναι ανάλογα της κλάσης του μετασχηματιστή όπως απεικονίζεται στον πίνακα 2.3, το σφάλμα τάσης  $F_u$  και το σφάλμα γωνίας  $F_\phi$ . Η σχέση η οποία καθορίζει το σφάλμα τάσης  $F_u$  ορίζεται ως:

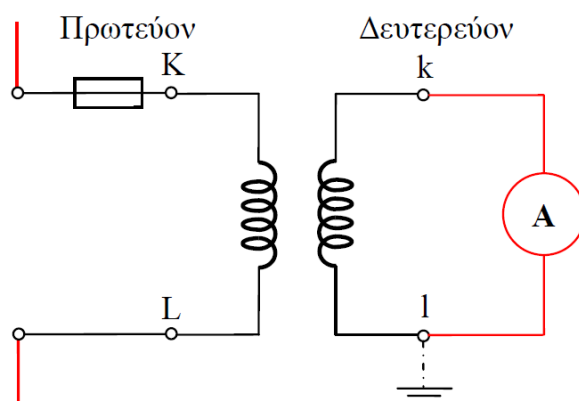
$$F_u = \frac{a \cdot \tilde{V}_2 - \tilde{V}_1}{\tilde{V}_1} \cdot 100\% \quad (2.10.1)$$

Κλάση	$F_u$ (%)	$F_\phi$ (λεπτά μοίρας ( $^\circ$ ) $1^\circ=60'$ )
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1	1,0	40
3	3,0	120

Πίνακας 2.3: Ενδεικτικές τιμές σφαλμάτων τάσεις και γωνίας για διάφορες κλάσεις μετασχηματιστών τάσης. [6, σελ. 95, Πίνακας 2.1].

### 2.10.3 Μετασχηματιστής έντασης

Όπως ο μετασχηματιστής τάσης, έτσι και ο μετασχηματιστής έντασης έχει το ρόλο μιας διάταξης επιτήρησης – ελέγχου ενός φορτίο – δικτύου. Λόγω των μεγάλων ρευμάτων σε κάποιες περιπτώσεις απαιτούνται μετασχηματιστές εντάσεως, διότι τα υπόλοιπα όργανα δεν μπορούν να λειτουργήσουν για τόσο μεγάλες εντάσεις. Οι μετασχηματιστές αυτοί κατασκευάζονται ώστε να λειτουργούν με ένταση ρεύματος 1 ή 5 A στο δευτερεύον τύλιγμα και πρέπει πάντα να είναι βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον και εν σειρά να παρεμβάλλεται το αντίστοιχο αμπερόμετρο και να μην ανοιχτοκυκλώνεται το δευτερεύον, διότι μπορεί να αναπτυχθούν υψηλές τάσεις, οι οποίες είναι επικίνδυνες για τον πυρήνα και για τις μονώσεις των τυλιγμάτων.



Σχήμα 2.31: Συνδεσμολογία μετασχηματιστή εντάσεως με αμπερόμετρο εν σειρά στο δευτερεύον τύλιγμα. [6, σελ. 96, Σχήμα 2.67].

Επειδή το δευτερεύον δεν πρέπει να ανοιχτοκυκλώνεται αποφεύγεται η τοποθέτηση ασφαλειών σε αυτό και σε περίπτωση που χρειαστεί να αποσυνδεθεί το όργανο μέτρησης βραχυκυκλώνεται πρώτα το τύλιγμα και έπειτα διεξάγεται η αφαίρεση του. Επίσης για την αποφυγή υπερτάσεων βραχυκυκλώνεται το δευτερεύον. Στο σχήμα 2.31 εμφανίζεται η συνδεσμολογία ενός μετασχηματιστή εντάσεως.

Αντίστοιχα όπως και το μετασχηματιστή τάσης έτσι και στο μετασχηματιστή εντάσεως ένα από τα πιο σημαντικά τεχνικά χαρακτηριστικά είναι η κλάση του η οποία καθορίζει και το σφάλμα των μετρήσεων.

## 2.11 Σύνδεση μονοφασικών μετασχηματιστών σε τριφασικά δίκτυα

### 2.11.1 Εισαγωγή

Σε ένα τριφασικό δίκτυο εκτός από τριφασικούς μετασχηματιστές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αντίστοιχα και τρεις μονοφασικοί μετασχηματιστές για να καλύψουν το ίδιο ρόλο λειτουργίας σε ένα σημείο ανύψωσης ή υποβιβασμού.

Σε αυτήν την περίπτωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν τέσσερις διαφορετικές βασικές συνδεσμολογίες οι οποίες έχουν και τα δικά τους εξής χαρακτηριστικά και επιλέγονται ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου στο σημείο όπου θα γίνει η τοποθέτηση. Για να μπορεί να προσδιοριστεί ένας λόγος μετασχηματισμού για τη μετάβαση της τάσης με τους τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές θα πρέπει να γίνουν κάποιες παραδοχές:

- Οι μονοφασικοί μετασχηματιστές είναι ιδανικοί, όμοιοι μεταξύ τους και έχουν ίδιο λόγο μετασχηματισμού ίσο με:

$$n = N_1/N_2 \quad (2.11.1)$$

- Υπάρχει συμμετρία μεταξύ των τριών διατάξεων και έτσι ελέγχεται μόνο η μία φάση.
- Υπάρχει συμμετρική θετική ακολουθία στην πηγή, δηλαδή διαφορά φάσης  $120^\circ$  από την α φάση στη β, από τη β στη γ και από τη γ στην α.
- Το φορτίο το οποίο εξυπηρετείται είναι συμμετρικό και έχει επαγωγικό χαρακτήρα.
- Παραλείπονται τα ρεύματα διέγερσης λόγω της μικρής τους σημασίας

Επιπλέον εισέρχονται δύο διαφορετικές τάσεις όπως και δύο διαφορετικές εντάσεις ρεύματος. Για την τάση υπάρχει η **πολική τάση**, η οποία είναι και αυτή η οποία αναπτύσσεται μεταξύ δύο φάσεων, ενώ η **φασική τάση** είναι η τάση που αναπτύσσεται επάνω στη μία φάση. Αντίστοιχα υπάρχει το **πολικό ρεύμα** ή το **ρεύμα γραμμής** το οποίο είναι αυτό που διαρρέει τη γραμμή μεταφοράς μεταξύ των δύο ηλεκτρικών στοιχείων, ενώ το **φασικό ρεύμα** είναι αυτό το οποίο διαρρέει το τύλιγμα της φάσης του ηλεκτρικού στοιχείου.

## 2.11.2 Είδη συνδέσεων μονοφασικών μετασχηματιστών σε τριφασικά δίκτυα

Έπειτα από τις παραδοχές και τους ορισμούς οι συνδεσμολογίες αυτές οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν είναι οι εξής:

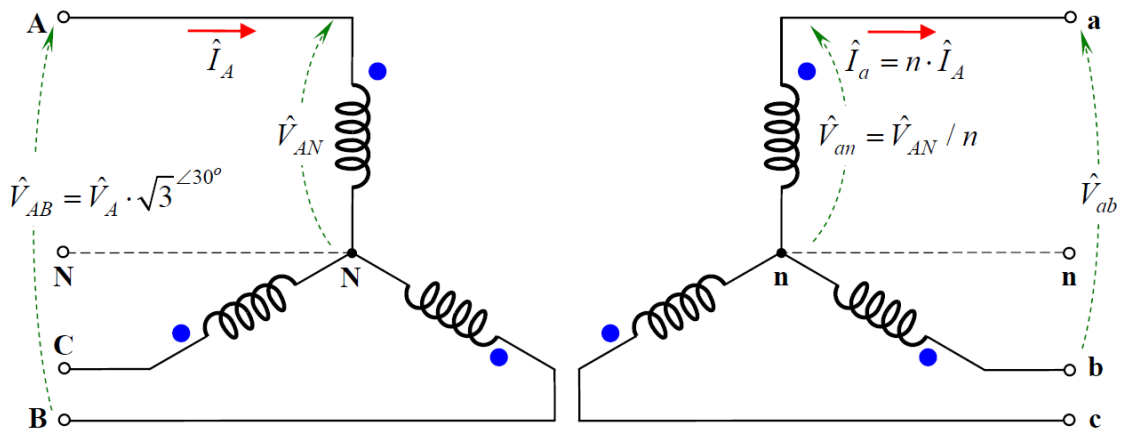
### I. Σύνδεση Αστέρα – Αστέρα

Οι ιδιότητες της παραπάνω συνδεσμολογίας είναι οι εξής:

- Η πολική τάση είναι μεγαλύτερη της φασικής  $\sqrt{3}$  φορές και προηγείται κατά  $30^\circ$ .
- Το ρεύμα γραμμής είναι ίσο και συμφασικό με το φασικό ρεύμα.
- Σε περίπτωση ύπαρξης ουδετέρου λόγω της συμμετρίας και της παράβλεψης των ρευμάτων διέγερσης το διανυσματικό άθροισμα των αντίστοιχων ρευμάτων στον κοινό τους κόμβο είναι μηδενικό.
- Σε περίπτωση μη ύπαρξης ουδετέρου λόγω της συμμετρίας τάσεων δεν αναπτύσσεται τάση μεταξύ των κοινών κόμβων της πηγής και του φορτίου.
- Ο λόγος μετασχηματισμού είναι ίσος με το λόγο των ελιγμάτων.

$$\hat{a} = \frac{\hat{V}_{AB}}{\hat{V}_{ab}} = \frac{\hat{V}_A \cdot \sqrt{3}^{\angle 30^\circ}}{\hat{V}_a \cdot \sqrt{3}^{\angle 30^\circ}} = \frac{\hat{V}_A}{\hat{V}_a} = \frac{N_1}{N_2} = n \quad (2.11.2)$$





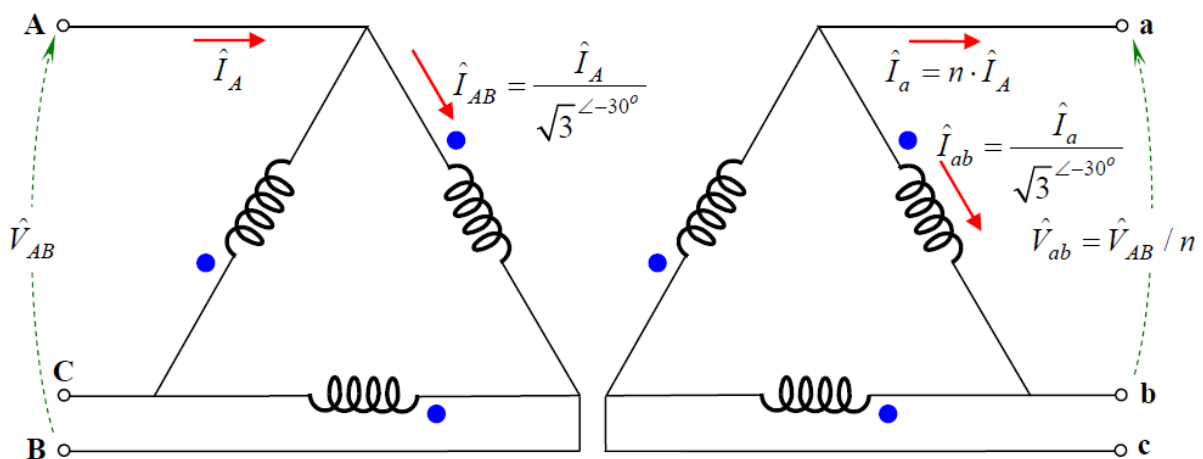
Σχήμα 2.32: Τριφασική συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα μονοφασικών μετασχηματιστών. [6, σελ. 97, Σχήμα 2.68(α)].

## II. Σύνδεση Τριγώνου – Τριγώνου

Οι ιδιότητες της παραπάνω συνδεσμολογίας είναι οι εξής:

- Η πολική τάση είναι ίση με τη φασική τάση.
- Το ρεύμα γραμμής είναι μεγαλύτερο του φασικού ρεύματος  $\sqrt{3}$  φορές και προηγείται κατά  $30^\circ$ .
- Δυνατότητα λειτουργίας με δύο από τους τρεις μετασχηματιστές, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διατάξεις στις οποίες έχουμε απώλεια λειτουργίας του δικτύου, σε περίπτωση σφάλματος ή συντήρησης, με φαινόμενη ισχύ ίση με το 57,7% της ονομαστικής τριφασικής ισχύος.
- Ο λόγος μετασχηματισμού είναι ίσος με το λόγο των ελιγμάτων όπως και στην περίπτωση της συνδεσμολογίας αστέρα – αστέρα.

$$\hat{\alpha} = \frac{\hat{V}_{AB}}{\hat{V}_{ab}} = \frac{\hat{V}_A}{\hat{V}_a} = \frac{N_1}{N_2} = n \quad (2.11.3)$$

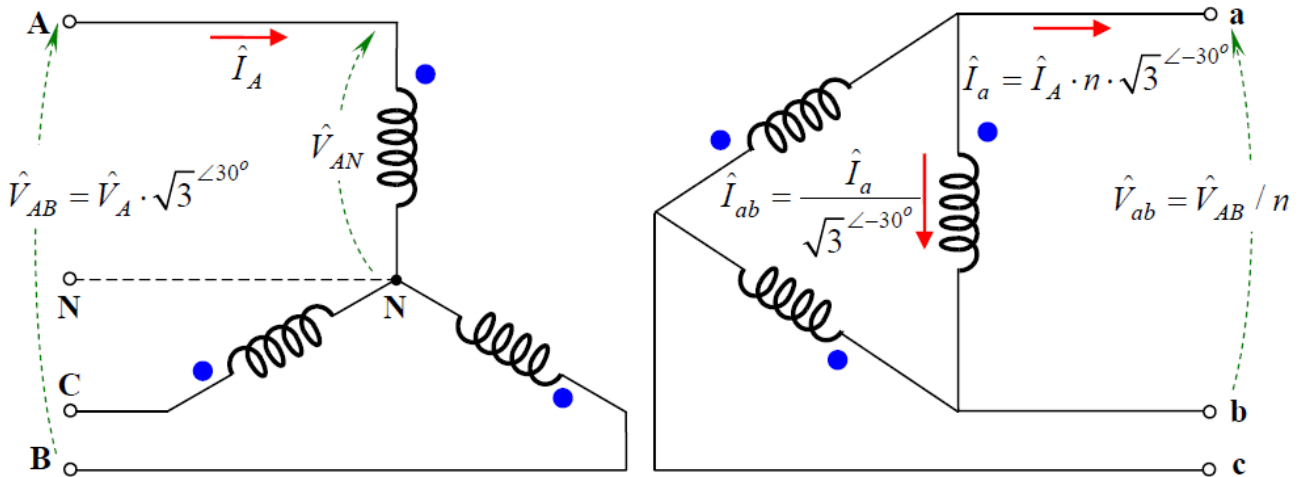


Σχήμα 2.33: Τριφασική συνδεσμολογία τρίγωνο – τρίγωνο μονοφασικών μετασχηματιστών. [6, σελ. 97, Σχήμα 2.68(β)].

### III. Σύνδεση Αστέρα – Τριγώνου

Λόγω της διαφορετικής συνδεσμολογίας στις δύο άκρες τις συνδεσμολογίας αυτής, ο μιγαδικός λόγος μετασχηματισμού θα φέρνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\hat{\alpha} = \frac{\hat{V}_{AB}}{\hat{V}_{ab}} = \frac{\hat{V}_A \cdot \sqrt{3}^{\angle 30^\circ}}{\hat{V}_a} = \frac{\hat{V}_A}{\hat{V}_a} \cdot \sqrt{3}^{\angle 30^\circ} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \sqrt{3}^{\angle 30^\circ} = n \cdot \sqrt{3}^{\angle 30^\circ} \quad (2.11.4)$$

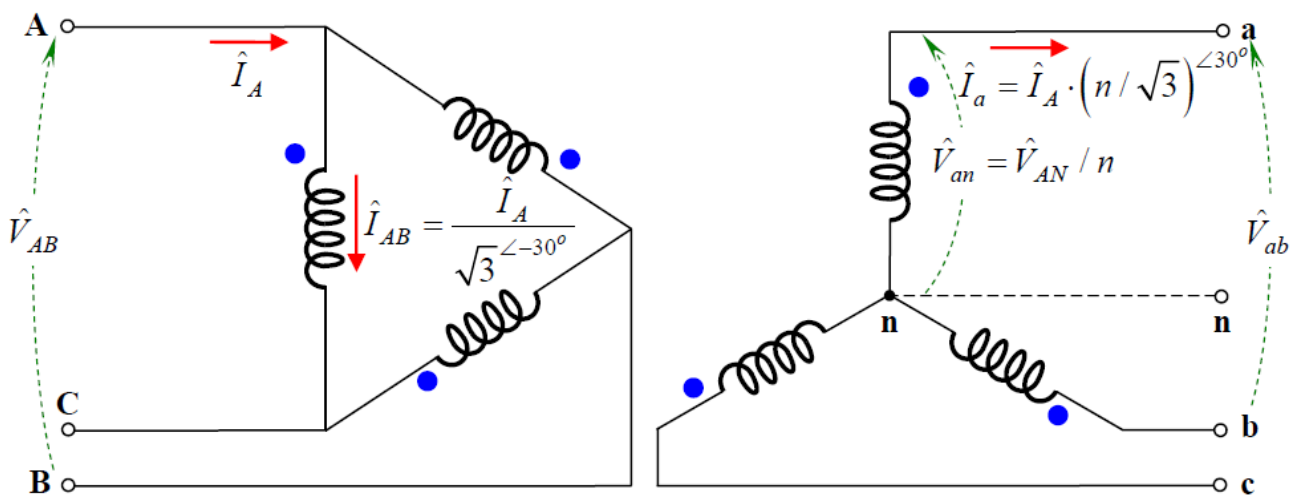


Σχήμα 2.34: Τριφασική συνδεσμολογία αστέρα – τρίγωνο μονοφασικών μετασχηματιστών. [6, σελ. 97, Σχήμα 2.68(γ)].

### IV. Σύνδεση Τριγώνου – Αστέρα

Όπως και στην σύνδεση αστέρα – τριγώνου έτσι και εδώ ο λόγος μετασχηματισμού δεν είναι ίσος με το λόγο των ελιγμάτων, αλλά θα ισχύει:

$$\hat{\alpha} = \frac{\hat{V}_{AB}}{\hat{V}_{ab}} = \frac{\hat{V}_A}{\hat{V}_a \cdot \sqrt{3}^{\angle 30^\circ}} = \frac{\hat{V}_A}{\hat{V}_a} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{\angle -30^\circ} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{\angle -30^\circ} = \left(\frac{n}{\sqrt{3}}\right)^{\angle -30^\circ} \quad (2.11.5)$$



Σχήμα 2.35: Τριφασική συνδεσμολογία τρίγωνο – αστέρα μονοφασικών μετασχηματιστών. [6, σελ. 97, Σχήμα 2.68(δ)].

## 2.12 Τριφασικοί μετασχηματιστές

### 2.12.1 Εισαγωγή

Εκτός από την εγκατάσταση τριών μονοφασικών μετασχηματιστών σε ένα τριφασικό δίκτυο υπάρχει και η επιλογή τοποθέτησης ενός τριφασικού μετασχηματιστή. Ένας τριφασικός μετασχηματιστής μπορεί να είναι είτε τύπου μανδύα, είτε τύπου κελύφους που αντίστοιχα θα αποτελείται από 3 ή 5 σκέλη. Συγκριτικά αυτές οι τρεις κατηγορίες δε διαφέρουν στον τρόπο λειτουργίας στη μόνιμη κατάσταση υπό συμμετρικό φορτίο, αλλά κατά τη μεταβατική περίοδο φόρτισης με ασύμμετρο φορτίο ή στην περίπτωση ανάπτυξης αρμονικών 3<sup>ης</sup> τάξης λόγω συνδεσμολογίας αστέρα – αστέρα.

Όπως κάθε συνδεσμολογία – κατασκευή έτσι και αυτοί έχουν τα θετικά και τα αρνητικά τους. Στα θετικά τους έναντι των τριών μονοφασικών μετασχηματιστών συμπεριλαμβάνεται το μικρότερο συνολικό βάρος, κόστος και η καλύτερη απόδοση. Αντιθέτως οι τριφασικοί μετασχηματιστές υστερούν στο τμήμα της μεταφοράς λόγω του μεγάλου όγκου που καταλαμβάνουν όπως και στην τοποθέτηση, πιο αργή αντικατάσταση της βλάβης λόγω της δομής και της λειτουργίας τους, αλλά και η εφεδρεία είναι πιο δαπανηρή εφόσον θα πρέπει να αντικατασταθεί ολόκληρος ο τριφασικός μετασχηματιστής με έναν ίδιο σε περίπτωση σφάλματος, ενώ σε περίπτωση τριών μονοφασικών θα πρέπει να αντικατασταθεί μόνο ο ένας από τους τρεις.

### 2.12.2 Συμβολισμός ακροδεκτών

#### Με βάση το γερμανικό πρότυπο:

Για το τύλιγμα υψηλής τάσης αντιστοιχούν στους ακροδέκτες τα σύμβολα U, V και W, ενώ για το τύλιγμα χαμηλής τάσης τα σύμβολα u, v και w. Μία δεύτερη επιλογή συμβολισμού είναι αντίστοιχα για το πρωτεύον τύλιγμα 1U, 1V και 1W, για το δευτερεύον τύλιγμα 2U, 2V και 2W και σε περίπτωση που ο μετασχηματιστής έχει και τρίτο τύλιγμα τότε αντίστοιχα για αυτό ισχύει 3U, 3V και 3W. Για περαιτέρω περιγραφή χρησιμοποιείται και ένα νούμερο έπειτα από το γράμμα για τη δήλωση της συνδεσμολογίας του τυλίγματος, δηλαδή 1U1, 1U2, 1V2, 1V3, 1W3 και 1W1 για έναν τριφασικό μετασχηματιστή σε συνδεσμολογία τριγώνου στο πρωτεύον τύλιγμα του.

#### Με βάση τους αγγλικούς κανονισμούς B.S 171

Για το τύλιγμα υψηλής τάσης αντιστοιχούν στους ακροδέκτες τα σύμβολα A, B και C, ενώ στο τύλιγμα χαμηλής τάσης αντιστοιχούν τα a, b και c. Όπως και στο γερμανικό πρότυπο έτσι και στο αγγλικό εναλλακτικά μπορούν να εκφραστούν οι ακροδέκτες με βάση το πρωτεύον τύλιγμα ως 1A, 1B και 1C, για το δευτερεύον 2A, 2B και 2C και αντίστοιχα σε περίπτωση τρίτου τυλίγματος 3A, 3B και 3C. Για την επισήμανση των τυλιγμάτων χρησιμοποιούνται δείκτες, δηλαδή 1A<sub>1</sub>, 1A<sub>2</sub> κτλ. Σε περίπτωση που υπάρχουν n ενδιάμεσες λήψεις, τότε ο συμβολισμός για την τελευταία λήψη θα είναι 1A<sub>n</sub> έτσι ο μικρότερος δείκτης, δηλαδή 1, θα υποδεικνύει το μέγιστο δυναμικό και ο μεγαλύτερος δείκτης, δηλαδή n, θα υποδεικνύει το ελάχιστον δυναμικό του τυλίγματος.

### 2.12.3 Συνδεσμολογίες τριφασικού μετασχηματιστή

#### 2.12.3.1 Εισαγωγή

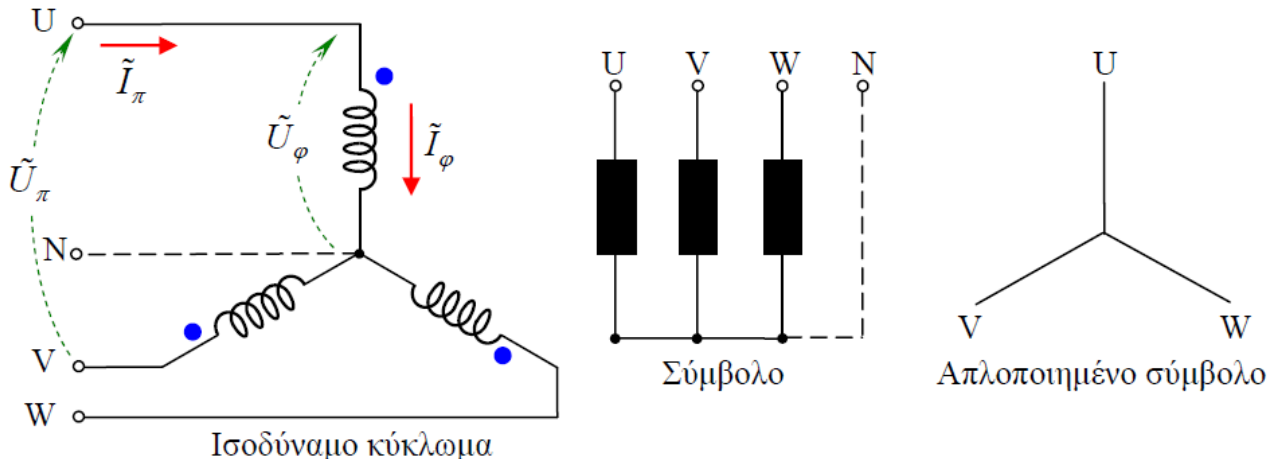
Υπάρχουν τρεις κύριες συνδεσμολογίες τυλιγμάτων για τους τριφασικούς μετασχηματιστές οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν και στα δύο τυλίγματα, ακολουθούν παρακάτω συνοπτικά:

- Αστέρα (συμβολίζεται με Y και y για το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα αντίστοιχα)

- Τρίγωνο (συμβολίζεται με D και d για το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα αντίστοιχα)
- Τεθλασμένου αστέρα ή ζιγκ – ζαγκ (συμβολίζεται με Z και z για το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα αντίστοιχα).

### 2.12.3.2 Συνδεσμολογία αστέρα

Κατά τη συνδεσμολογία αυτή τα άκρα των τριών τυλιγμάτων συνδέονται μαζί δημιουργώντας έτσι τον ουδέτερο κοινό κόμβο, ο οποίος μπορεί να αξιοποιηθεί για τη σύνδεση αντισταθμιστικών πηνίων σε δίκτυα υψηλής τάσης, όπως επίσης και για τη σύνδεση του ουδέτερου στα δίκτυα χαμηλής τάσης σε μονοφασικά φορτία.



Σχήμα 2.36: Ισοδύναμο κύκλωμα, σύμβολο και απλοποιημένο σύμβολο αστέρα. [6, σελ. 111, Σχήμα 2.77].

Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της συνδεσμολογίας είναι η διαφορά της πολικής τάσης  $\tilde{V}_\pi$  κατά  $\sqrt{3}$  φορές μεγαλύτερη από τη φασική τάση  $\tilde{V}_\varphi$ , ενώ το ρεύμα γραμμής  $\tilde{I}_\pi$  είναι ίσο με το φασικό ρεύμα  $\tilde{I}_\varphi$ . Επίσης περιγράφονται και η σχέση της τάσης ανά έλιγμα  $u_w$  και το μέτρο της τριφασικής φαινόμενης ισχύος  $|S_{3\varphi}|$ . Παρακάτω ακολουθούν οι σχέσεις αυτές:

$$\tilde{V}_\pi = \sqrt{3} \cdot \tilde{V}_\varphi \quad (2.12.1)$$

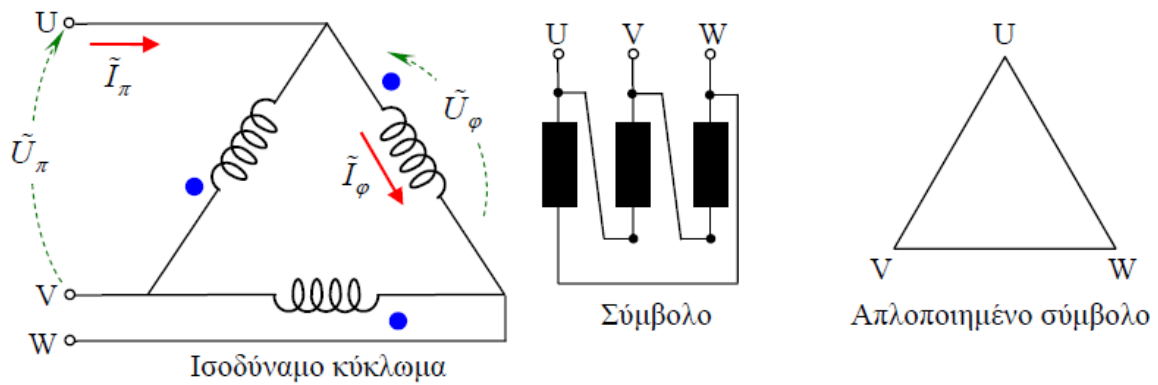
$$\tilde{I}_\pi = \tilde{I}_\varphi \quad (2.12.2)$$

$$u_w = \frac{\tilde{V}_\varphi}{N} = \frac{\tilde{V}_\pi}{\sqrt{3} \cdot N} \quad (2.12.3)$$

$$|S_{3\varphi}| = 3 \cdot \tilde{V}_\varphi \cdot \tilde{I}_\varphi = \sqrt{3} \cdot \tilde{V}_\pi \cdot \tilde{I}_\pi \quad (2.12.4)$$

### 2.12.3.3 Συνδεσμολογία Τρίγωνο

Κατά τη συνδεσμολογία αυτή το κάθε τέλος ενός τυλιγματος είναι συνδεδεμένο με την αρχή του επόμενου τυλιγματος. Βασικά πλεονεκτήματα της συνδεσμολογίας αυτής είναι η αντιμετώπιση των συνιστωσών τρίτης αρμονικής, η ομοιόμορφη φόρτιση του δικτύου στα ανάντη του μετασχηματιστή για ασύμμετρη φόρτιση όπως και η διατομή των τυλιγμάτων είναι μικρότερες συγκριτικά με αυτές του αστέρα με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση υλικού. Αντιθέτως όμως δεν υπάρχει η δυνατότητα ύπαρξης ουδέτερου κόμβου και λόγω της πολικής τάσης που εφαρμόζεται στα τυλιγματα οι καταπονήσεις είναι μεγαλύτερες όπως και οι ανάγκες καλύτερης μόνωσης που καθιστούν το κόστος κατασκευής μεγαλύτερο.



Σχήμα 2.37: Ισοδύναμο κύκλωμα, σύμβολο και απλοποιημένο σύμβολο τριγώνου. [6, σελ. 112, Σχήμα 2.78].

Συγκριτικά με τη συνδεσμολογία αστέρα, αυτή του τριγώνου έχει ίσες πολικές και φασικές τάσεις αλλά έχει το ρεύμα γραμμής κατά  $\sqrt{3}$  φορές μεγαλύτερο από το φασικό ρεύμα. Αντίστοιχα οι σχέσεις αυτές και κάποιες άλλες ακολουθούν παρακάτω:

$$\tilde{V}_\pi = \tilde{V}_\varphi \quad (2.12.5)$$

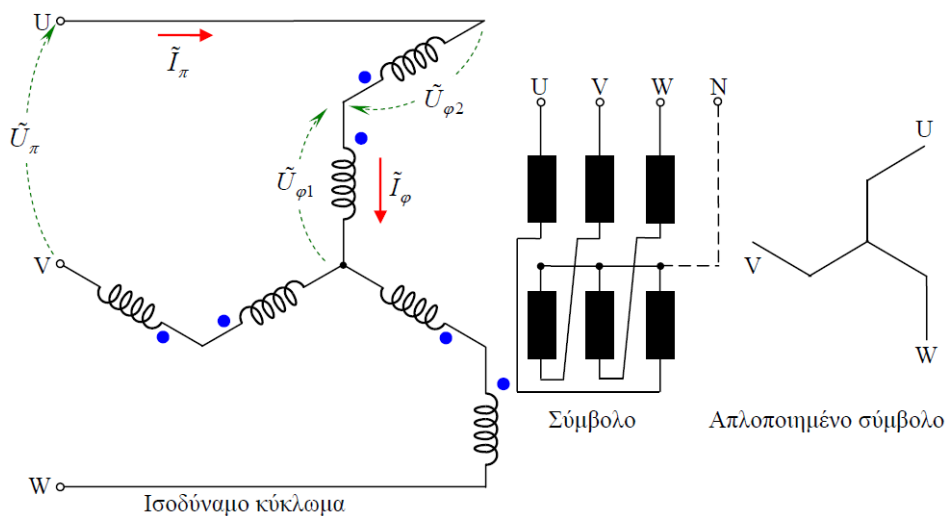
$$\tilde{I}_\pi = \sqrt{3} \cdot \tilde{I}_\varphi \quad (2.12.6)$$

$$u_w = \frac{\tilde{V}_\varphi}{N} = \frac{\tilde{V}_\pi}{N} \quad (2.12.7)$$

$$|S_{3\varphi}| = 3 \cdot \tilde{V}_\varphi \cdot \tilde{I}_\varphi = \sqrt{3} \cdot \tilde{V}_\pi \cdot \tilde{I}_\pi \quad (2.12.8)$$

#### 2.12.3.4 Συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα ή ζιγκ - ζαγκ

Η ιδιαιτερότητα της συνδεσμολογίας αυτής είναι ότι το κάθε τύλιγμα φάσης διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα τα οποία τοποθετούνται σε διαφορετικούς κορμούς του πυρήνα. Τα μισά από αυτά τοποθετούνται με αντίθετη μαγνητική πολικότητα κάτι τα οποίο ενισχύει τη μεγαλύτερη συνολική θεμελιώδη τάση και απαλείφει τις τρίτες αρμονικές που αναπτύσσονται σε κάθε φάση. Λόγω αυτής της κατασκευαστικής ιδιαιτερότητας το κόστος κατασκευής είναι μεγαλύτερο από τις δύο συνήθεις περιπτώσεις συνδεσμολογιών. Χρησιμοποιείται σε μονοφασικά φορτία και λόγω της ικανότητας ύπαρξης ουδετέρου υπερیشχει της συνδεσμολογίας τριγώνου, εφόσον σε αυτήν την περίπτωση είναι αδύνατη η ύπαρξη του.



Σχήμα 2.38: Ισοδύναμο κύκλωμα, σύμβολο και απλοποιημένο σύμβολο τεθλασμένου αστέρα. [6, σελ. 113, Σχήμα 2.79].

Λόγω τους ισάριθμου διαμοιρασμού σπειρών μεταξύ των δύο επιμέρους τυλιγμάτων, οι τάσεις των δύο αυτών είναι ίσες, δηλαδή:

$$\tilde{V}_{\varphi 1} = \tilde{V}_{\varphi 2} \quad (2.12.9)$$

Μέσα από διανυσματική ανάλυση, όπως αυτή στο σχήμα 2.39 που ακολουθεί παρακάτω, αποδεικνύεται ότι οι παραπάνω τάσεις  $\tilde{V}_{\varphi 1}$  και  $\tilde{V}_{\varphi 2}$  είναι ίσες με τις τάσεις  $\hat{V}_a/2$  και  $\hat{V}_c/2$  με διαφορά φάσης ίση με  $60^\circ$  οπότε η τιμή της συνολικής φασικής τάσης θα είναι ίση με:

$$\hat{V}_{\varphi} = 0,5 \cdot (\hat{V}_a - \hat{V}_c) \quad (2.12.10)$$

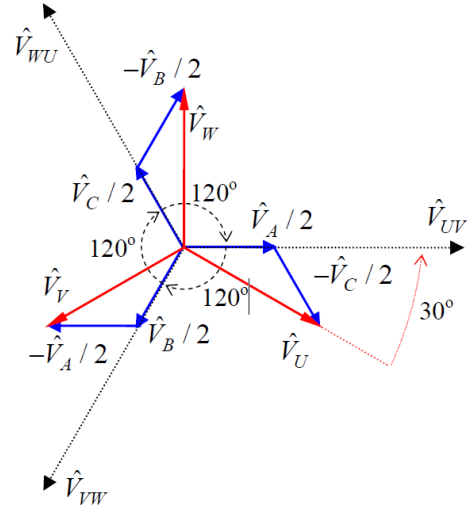
Για την περίπτωση τις συνδεσμολογίας αυτής η συσχέτιση μεταξύ πολικής και φασικής τάσης, αλλά και ρεύματος γραμμής και φασικού ρεύματος είναι ίδια με την περίπτωση του αστέρα. Όμως για την περίπτωση της τάσης ανά έλιγμα παρατηρείται η εξής διαφοροποίηση που ακολουθεί παρακάτω:

$$\tilde{V}_{\pi} = \sqrt{3} \cdot \tilde{V}_{\varphi} \quad (2.12.11)$$

$$\tilde{I}_{\pi} = \tilde{I}_{\varphi} \quad (2.12.12)$$

$$u_w = \frac{\tilde{V}_{\varphi 1}}{N/2} = \frac{\tilde{V}_{\varphi}/\sqrt{3}}{N/2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\tilde{V}_{\pi}}{N} \quad (2.12.13)$$

$$|S_{3\varphi}| = 3 \cdot \tilde{V}_{\varphi} \cdot \tilde{I}_{\varphi} = \sqrt{3} \cdot \tilde{V}_{\pi} \cdot \tilde{I}_{\pi} \quad (2.12.14)$$



Σχήμα 2.39: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεως τυλιγμάτων συνδεσμολογίας τεθλασμένου αστέρα. [6, σελ. 113, Σχήμα 2.80(α)].

### 2.12.3.5 Ωριαία ένδειξη φάσης, ομάδες ζεύξης και ομάδες συνδέσεων

Από τις παραπάνω βασικές συνδεσμολογίες που παρουσιάστηκαν μπορούν να προκύψουν οι εξής συνδέσεις ή αλλιώς ζεύξεις μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος, αυτές είναι οι: Yy, Yd, Yz, Dy, Dd και Dz σε πρακτικό και θεωρητικό επίπεδο όπως επίσης και οι Zy, Zd και Zz αποκλειστικά σε θεωρητικό επίπεδο. Συνδυάζοντας αυτές τις συνδεσμολογίες με την επιλογή ορθής ή ανάστροφης πολικότητας στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, προκύπτει η **ομάδα ζεύξης (vector group)**, και έτσι μπορεί να επιτευχθεί ένας εύρος διαφορετικών φασικών αποκλίσεων μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Πιο συγκεκριμένα στο τριφασικό σύστημα αυτή η διαφορά φάσης είναι ακέραιο πολλαπλάσιο των  $30^\circ$ . Από αυτή τη φασική απόκλιση μεταξύ της τάσης πρωτεύοντος  $\hat{V}_1$  και  $\hat{V}_2$  ορίζεται και η **ωριαία ένδειξη φάσης λ** (ή αλλιώς ως **αριθμός ομάδας ζεύξης**) η οποία είναι ένας ακέραιος αριθμός. Πιο συγκεκριμένα:

$$\theta = \angle \hat{V}_1 - \angle \hat{V}_2 = \lambda \cdot 30^\circ \quad (2.12.15)$$

Η φασική απόκλιση αυτή με βήμα  $30^\circ$  μπορεί να μεταβληθεί από  $0^\circ$  (ή  $360^\circ$ ) έως και  $330^\circ$ , άρα αντίστοιχα και η ωριαία ένδειξη φάσης λ μπορεί να λάβει ακέραιες τιμές από 0 έως και 11. Οι συνηθέστερες τιμές της ωριαίας ένδειξης φάσης είναι 0, 5, 6 και 11 δηλαδή  $0^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$  και  $330^\circ$  αντίστοιχα.

### 2.13.3.6 Πειραματικός προσδιορισμός πρόσθετων στοιχείων τριφασικών μετασχηματιστών

Πέρα από τις βασικές πειραματικές δοκιμές όπως οι δοκιμές βραχυκύκλωσης, ανοικτοκύκλωσης κλπ, που διεξάγονται και στους μονοφασικούς μετασχηματιστές, υπάρχουν άλλες δύο βασικές δοκιμές που πρέπει να πραγματοποιηθούν:



### 1) Εύρεση ωριαίας ένδειξης φάσης

Έχοντας συνδεδεμένες τις φάσεις του πρωτεύοντος τυλίγματος στο δίκτυο και αυτές του δευτερεύοντος ανοικτοκυκλωμένες, στην περίπτωση που δεν υπάρχει ουδέτερος κόμβος σε κάποια από τις δύο πλευρές του μετασχηματιστή, κατασκευάζεται ένας μέσω τριών όμοιων αντιστάσεων μεγάλης τιμής με κατάλληλη μονωτική ικανότητα. Συνδέοντας έναν κατάλληλο παλμογράφο διπλής δέσμης, εμφανίζονται οι κυματομορφές των τάσεων των δύο τυλιγμάτων και μέσω αυτών μπορεί να υπολογισθεί ο λόγος μετασχηματισμού, η διαφορά φάσης και έτσι και η ωριαία ένδειξη φάσης.

### 2) Έλεγχος προϋποθέσεων παραλληλισμού

Ο έλεγχος αυτός επιτυγχάνεται με τους δύο μετασχηματιστές που είναι έτοιμοι προς παραλληλισμό τροφοδοτώντας και τους δύο στο πρωτεύον τύλιγμα από το ίδιο δίκτυο. Έπειτα με ένα βολτόμετρο συνδέεται το δευτερεύον τύλιγμα  $u$  του 1<sup>ου</sup> μετασχηματιστή με το δευτερεύον τύλιγμα  $u'$  του δευτερεύον του 2<sup>ου</sup> μετασχηματιστή, η ένδειξη του βολτομέτρου θα πρέπει να είναι μηδενική για αυτό το ζεύγος τυλιγμάτων, όπως αντίστοιχα και για τα ζεύγη  $v - v'$  και  $w - w'$  ταυτοχρόνως.

## 2.13 Ειδικοί τύποι τριφασικού μετασχηματιστή

Εκτός από τους τριφασικούς μετασχηματιστές και το συνδυασμό μονοφασικών μετασχηματιστών για γενική χρήση, όπως τη μετάβαση από ένα επίπεδο τάσης σε ένα άλλο για την βέλτιστη μεταφοράς ισχύος υπάρχει και μία πληθώρα εφαρμογών για αυτούς που αποσκοπούν είτε την προστασία, είτε τη ρύθμιση χαρακτηριστικών σε ένα δίκτυο. Μερικές από αυτές τις σημαντικές κατηγορίες αναγράφονται παρακάτω:

- Τριφασικοί ή συστοιχία μονοφασικών μετασχηματιστών ως **αυτομετασχηματιστές** για τη ρύθμιση του επιπέδου τάσης σε υποσταθμούς.
- **Μετασχηματιστές μετασχηματισμού φάσεων**, οι οποίοι έχουν τη συνδεσμολογία μορφής εξαφασικού αστέρα.
- **Μετασχηματιστές υψηλής επαγωγικής αντίδρασης** οι οποίοι μπορεί να έχουν από 3% - 10% ανά μονάδα σύνθετη αντίσταση σε συνήθεις περιπτώσεις έως και 90% σε ειδικές περιπτώσεις. Χωρίζονται στις εξής υποκατηγορίες:
  - **Μετασχηματιστές παιχνιδιών**, οι οποίοι λόγω της μεγάλης σύνθετης αντίστασης περιορίζουν σε μεγάλο βαθμό το ρεύμα βραχυκύκλωσης ώστε αυτό να ανέρχεται σε λίγα mA, σε περίπτωση που κάποιο παιδικό παιχνίδι βραχυκυκλώσει λόγω του λάθους χειρισμού από τα παιδιά προστατεύοντάς τα από πιθανή ηλεκτροπληξία και τραυματισμό.
  - Ειδικούς μετασχηματιστές οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι ειδικά για χρήση σε φούρνους ηλεκτρικού τόξου, σε συσκευές ιονισμού αερίων και σε καυστήρες πετρελαίου όπου το φορτίο απαιτεί ειδική συμπεριφορά κατά την έναυσή του.
  - **Τριφασικούς ρυθμιστές επαγωγικής άεργου ισχύος** που χρησιμοποιούνται σε μεγάλες γραμμές μεταφοράς για τον έλεγχο της εύρυθμης λειτουργίας των γραμμών αυτών.
- **Συσκευές επαγωγικής θέρμανσης**: Όπου το πρωτεύον πρόκειται για ένα πηνίο μεγάλης ισχύος, ενώ το δευτερεύον έχει την μορφή λιωμένου χάλυβα, λειτουργώντας με συντελεστή ισχύος στο επίπεδο του 0,2 λόγω του πολύ μεγάλου ρεύματος μαγνήτισης.
- **Μετασχηματιστές υψηλής συχνότητας** που μπορούν να λειτουργήσουν και σαν φίλτρα που αποτρέπουν τα σήματα χαμηλής συχνότητας να αναμειχθούν με τα υψίσυχνα σήματα στην έξοδο του συστήματος. Επίσης σε αεροναυπηγικές εφαρμογές όπου η μεγάλη συχνότητα (π.χ. 400 Hz) λειτουργίας οδηγεί στη μείωση βάρους των αντίστοιχων συσκευών με τη συχνότητα αυτή.

- **Μετασχηματιστές μετατόπισης φάσης** οι οποίοι είναι διαστασιολογημένοι συγκεκριμένα ώστε να μεταβάλλουν τη συνολική σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς όταν τοποθετούνται σειριακά και έτσι εν συνέχεια τη ροή φορτίου.
- **Μετασχηματιστές έλξης** οι οποίοι είναι ανθεκτικοί στην υπερφόρτιση τους και χρησιμοποιούνται συχνά σε ηλεκτρικούς σιδηρόδρομους λόγω του μεγάλου ρεύματος που απαιτείται κατά την εκκίνηση του συρμού.
- **Μετασχηματιστές ουδετέρωσης και γείωσης** όπου χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός ουδέτερου κόμβου, ο οποίος ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου μπορεί και να γειωθεί.
- **Μετασχηματιστής ως στραγγαλιστικό πηνίο**, ο οποίος περιέχει ενδιάμεσες λήψεις και χρησιμοποιείται στην εκκίνηση ηλεκτρικών κινητήρων.
- **Μετασχηματιστής εκκίνησης**, σε δομικό συνδυασμό του προηγούμενου μετασχηματιστή, του αυτομετασχηματιστή και μίας διάταξης διακοπών, είναι ικανός για την εκκίνηση μεγάλων ηλεκτρικών κινητήρων.
- **Μετασχηματιστές έγχυσης συχνότητας**: Με τη βοήθεια συχνογεννήτριας στέλνουν παλμούς στο δίκτυο για τη μετάδοση σημάτων.
- **Μετασχηματιστές απομόνωσης**: Πρόκειται για ένα μετασχηματιστή με λόγο μετασχηματισμού ίσο με ένα και έχει ως σκοπό την προστασία του χρήστη εφόσον η δουλειά του είναι να απομονώνει γαλβανικά δύο ηλεκτρικά δίκτυα, όπου το δεύτερο δεν είναι γειωμένο. Χρησιμοποιείται συχνά στις μονάδες εντατικής θεραπείας, στα χειρουργεία νοσοκομείων, στα αγγεία συστήματα πλοίων, σε ηλεκτρικά δίκτυα που μπορούν να βραχούν κατά τη λειτουργία τους, σε μπάνια και σε πισίνες.

## 2.14 Ονομαστικά στοιχεία μετασχηματιστή

Εκτός από τα βασικά ονομαστικά μεγέθη όπως είναι η τάση, η φαινόμενη ισχύς και η συχνότητα λειτουργίας, υπάρχουν και άλλα βασικά στοιχεία τα οποία είναι σημαντικά και πρέπει να τηρούνται ή να είναι γνωστά σε περίπτωση ανάγκης για την ομαλή λειτουργία του μετασχηματιστή.

Η **ονομαστική λειτουργία** καθορίζεται από τα μεγέθη τα οποία αναγράφονται πάνω στην πινακίδα η οποία έχει τοποθετηθεί από τον κατασκευαστή πάνω στο μετασχηματιστή σε εμφανή σημείο και είναι πιστοποιημένα από τον ίδιο μέσα από πολλαπλές μετρήσεις και δοκιμές σαν αυτές οι οποίες αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.7. Τα στοιχεία αυτά ακολουθούν παρακάτω:

- Η **κατασκευαστική εταιρεία** του μετασχηματιστή.
- Ο **κωδικός** του μετασχηματιστή από την εταιρεία του που οδηγεί στον τύπο του.
- Ο **σειριακός αριθμός κατασκευής** ο οποίος είναι μοναδικός για κάθε μετασχηματιστή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καταγραφεί ιστορικού συντήρησης του ίδιου.
- Το **έτος κατασκευής** του.
- Ο **κανονισμός με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η κατασκευή και η συναρμολόγηση του** (π.χ VDE).
- Η **ονομαστική ισχύς ή ονομαστική ικανότητα**, δηλαδή η φαινόμενη ισχύς που δίνει ο μετασχηματιστής στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος κατά την ονομαστική του λειτουργία και απεικονίζεται σε kVA ή σε MVA αναλόγως το μέγεθος του ίδιου.
- Η **κατηγορία του μετασχηματιστή** όπως για μετασχηματιστή ισχύος αναγράφεται LT (**Low Tension**) και για μετασχηματιστή διανομής υψηλής ισχύος αναγράφεται LDT κα.
- Η **ονομαστική συχνότητα**, δηλαδή η συχνότητα στην οποία είναι προορισμένος να λειτουργεί ο μετασχηματιστής και εκφράζεται σε Hz.
- Οι **ονομαστικές τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος**. Πιο συγκεκριμένα αν υπάρχει και ενδιάμεση λήψη αναγράφεται και αυτή και εκφράζονται σε V ή kV αναλόγως το μέγεθος του



μετασχηματιστή. Επίσης η ονομαστική τάση του δευτερεύοντος που αναγράφεται πρόκειται για αυτήν κατά την εν κενώ λειτουργία του μετασχηματιστή.

- Οι **ονομαστικές εντάσεις ρεύματος πρωτεύοντος και δευτερεύοντος** οι οποίες προκύπτουν από τις αναγραφόμενες ονομαστικές τάσεις και την ονομαστική ικανότητα του μετασχηματιστή. Εκφράζεται σε A κυρίως, αλλά αναλόγως το μέγεθος μπορεί και να εκφραστεί σε mA και kA.
- Η **ομάδα ζεύξης** του μετασχηματιστή.
- Η **ανά μονάδα σύνθετη αντίσταση** συνήθως για λειτουργία σε 30 °C ή εναλλακτικά αντί για αυτήν δίνεται η **τάση βραχυκύκλωσης** μέσα από την οποία μπορεί να υπολογιστεί άμεσα η ανά μονάδα σύνθετη αντίσταση.
- Η **αύξηση της θερμοκρασίας (Temperature Rise)**, δηλαδή το ανώτερο όριο θερμοκρασίας που μπορεί να φτάσει ο μετασχηματιστής κατά την ονομαστική λειτουργία χωρίς να παρουσιάσει κάποιο πρόβλημα ή υποστεί κάποια βλάβη σε αδιάκοπη λειτουργία, για θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 30 °C.
- Το **υψομετρικό όριο λειτουργίας** του μετασχηματιστή. Σε περίπτωση που ο μετασχηματιστής πρέπει να τοποθετηθεί σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 1000 m, τότε θα πρέπει να αναγράφεται πάνω στην πινακίδα το υψομετρικό όριο λειτουργίας του μετασχηματιστή αυτού.
- Η **κλάση μόνωσης**, αναπαρίσταται με ένα γράμμα το οποίο αντιστοιχεί και σε μία κατηγορία με βάση τον πίνακα 2.3, ο οποίος αναγράφει τις κλάσεις μόνωσης για μηχανές κατά VDE 530 και μέγιστες συνεχώς επιτρεπόμενες θερμοκρασίες.
- Η **κατηγορία λειτουργίας** δηλαδή αν λειτουργεί συνεχόμενα (κατηγορία S1) ή βραχυχρόνιος (κατηγορία S2) ή περιοδικός με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (από κατηγορία S3 έως S8 ανάλογα τις ιδιαιτερότητες της μονάδας) κατά τον VDE 530.
- Οι **απώλειες άνευ φορτίου** ή αλλιώς **απώλειες πυρήνα**.

Ονομαστική ισχύς (kVA)	Απώλειες λειτουργίας εν κενώ (W)			Αντίσταση Βραχυκύκλωσης (%)
	Λίστα Α'	Λίστα Β'	Λίστα Γ'	
50	190	145	125	4
100	320	260	210	4
160	460	375	300	4
250	650	530	425	4
400	930	750	310	4
630	1300	1030	860	4
630	1200	940	800	6
1000	1700	1400	1100	6
1600	2600	2200	1700	6
2500	3800	3200	2500	6

Πίνακας 2.4: Πίνακας απωλειών μετασχηματιστή άνευ φορτίου κατά CENELEC 1992. [17, σελ. 30, Table 1.2 (Μεταφρασμένος)].

Κλάση μόνωσης	Χρήση	Συνήθη μονωτικά υλικά	Μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας
Y		Βαμβάκι, μετάξι, χαρτί, presspan, χωρίς ελαστικό, πολυαιθυλένιο, πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), πλεξιγκλάς, πολυστυρόλη	90 °C
A	Μετασχηματιστές, πηνία εντός λαδιού	Βαμβάκι, μετάξι, χαρτί, εμποτισμένα με λακ μονωτικά, μονωτικό λάδι	105 °C
E	Ηλεκτρικές μηχανές (παλαιότερα)	Σμάλτο για σύρματα περιελίξεων από οξικό πολυβινύλιο, πλαστικά φύλλα, φαινολικές ρητίνες με οργανικές προσμείξεις, εποξειδικές και πολυαμιδικές ρητίνες.	120 °C
B	Συνήθης περίπτωση μηχανών <100 kW	Σμάλτο για σύρματα περιελίξεων από πολυτερεφθαλικά παράγωγα, σύνθετα υλικά από υαλοίνες, μίκα, αμιάντος με συνδετικό εποξειδικής ή αλκυλικής ρητίνης, πλαστικά φύλλα από πολυεστέρες τερεφθαλικού οξέος με αιθυλενογλυκόλη.	130 °C
F	Συνήθης περίπτωση μηχανών >100 kW	Σμάλτο για σύρματα περιελίξεων από πολυεστεροϊμίδια, σύνθετα υλικά από υαλοίνες, μίκα, αμιάντος εμποτισμένος με σιλικονούχες ρητίνες.	155 °C
H	Μηχανές ειδικών συνθηκών, π.χ. σε φούρνους, λέβητες	Υαλοίνες, μίκα εμποτισμένη με ελαστικό σιλικόνης, τεφλόν ελαστικό σιλικόνης.	180 °C (κατά IEC 190 °C)
C		Μίκα, πορσελάνη, ύαλος, χαλαζίας χωρίς εμποτισμό	>180 °C (κατά IEC >190 °C)

Πίνακας 2.5: Κλάσεις μόνωσης και μέγιστες συνεχόμενες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας για μηχανές κατά VDE 530. [6, σελ. 126, Πίνακας 2.4].

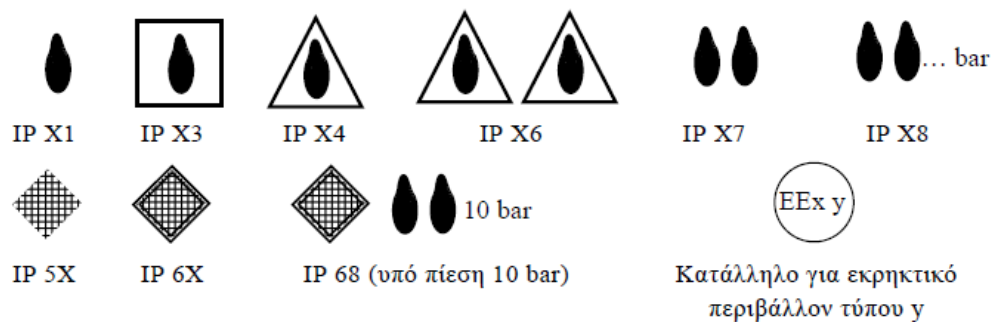
- Οι απώλειες πλήρους φορτίου ή απώλειες χαλκού ή θερμικές απώλειες ή απώλειες Joule.

Ονομαστική ισχύς (kVA)	Απώλειες λειτουργίας υπό πλήρη φορτίο (W)			Αντίσταση Βραχυκύκλωσης (%)
	Λίστα Α'	Λίστα Β'	Λίστα Γ'	
50	1100	1350	875	4
100	1750	2150	1475	4
160	2350	3100	2000	4
250	3250	4200	2750	4
400	4600	6000	3850	4
630	6500	8400	5400	4
630	6750	8700	5600	6
1000	10500	13000	9500	6
1600	17000	20000	14000	6
2500	26500	32000	22000	6

Πίνακας 2.6: Πίνακας απωλειών μετασχηματιστή υπό πλήρη φορτίο κατά CENELEC 1992. [17, σελ. 30, Table 1.3 (Μεταφρασμένος)].

- Το **διανυσματικό διάγραμμα για κάθε συνδεσμολογία** του μετασχηματιστή. Δηλαδή για τις περιπτώσεις συνδεσμολογίας αστέρα με ουδέτερο ή χωρίς, τριγώνου και τεθλασμένου αστέρα.
- Τα **επίπεδα θορύβου** του μετασχηματιστή κατά τη λειτουργία του.
- Το **ρεύμα βραχυκύκλωσης ασύμμετρου και συμμετρικού σφάλματος**, εφόσον το πρώτο καταπονεί μηχανικά το μετασχηματιστή, ενώ το συμμετρικό σφάλμα καταπονεί το μετασχηματιστή θερμικά.

- Το **ρεύμα βραχυκύκλωσης** όταν το δευτερεύον τυλίγμα του μετασχηματιστή είναι ανοικτοκυκλωμένο. Εκφράζεται ως ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος του πρωτεύοντος τυλίγματος.
- Η **μέθοδος ψύξης** κατά τον IEC 76-2/93 που χαρακτηρίζεται από τέσσερα γράμματα:
  - 1<sup>ο</sup> γράμμα: Αντιστοιχεί στο ψυκτικό μέσο (λάδι, αέρας) που βρίσκεται σε επαφή με τα τυλίγματα.
  - 2<sup>ο</sup> γράμμα: Αντιστοιχεί στο είδος κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου (φυσική ή τεχνητή – βεβιασμένη).
  - 3<sup>ο</sup> γράμμα: Αντιστοιχεί στο ψυκτικό μέσο που βρίσκεται σε επαφή με το εξωτερικό σύστημα ψύξης.
  - 4<sup>ο</sup> γράμμα: Αντιστοιχεί στο είδος κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου (φυσική ή τεχνητή – βεβιασμένη).
- Η **κατηγορία προστασίας IP (International Protection)** η οποία αποτελείται από δύο ψηφία, το πρώτο ψηφίο υποδηλώνει την προστασία σε νερό – υγρασία και το δεύτερο ψηφίο σε ξένα σωματίδια όπως σκόνη, άμμο κλπ. Στον πίνακα 2.7 αναγράφονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της κάθε βαθμίδας προστασίας.



Σχήμα 2.40: Σύμβολα προστασίας έναντι σκόνης και διείσδυσης νερού IP. [6, σελ. 126, Σχήμα 2.89].

- Η **κατηγορία προστασίας EE** από έκρηξη σε εκρηκτικά περιβάλλοντα, όπως πρατήρια καυσίμων, αποθήκες καυσίμων, πυρομαχικών, βιομηχανία με εύφλεκτα χημικά και ορυχεία. Για την αποφυγή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετασχηματιστής ο οποίος είναι κατασκευασμένος να λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας, να είναι κλειστός χωρίς να έχει επαφή με το περιβάλλον του. Συγκεκριμένα στην πινακίδα αναγράφονται τα τέσσερα γράμματα EEx και το 4ο το οποίο μπορεί να είναι ένα από τα παρακάτω:
  - d: Για προστασία με δοχείο ασφαλείας που περιβάλλει το μετασχηματιστή έτσι, ώστε αν γίνει έκρηξη το κέλυφος του δοχείου θα αποτρέψει τη μετάδοση της έκρηξης προς το περιβάλλον.
  - e: Αυξημένη προστασία λόγω του εύφλεκτου περιβάλλοντος μέσω της μείωσης σπινθήρων και της μείωσης της θερμοκρασίας λειτουργίας, η οποία θα καταστήσει πιο δύσκολη την έναυση της εκρηκτικής ουσίας που υπάρχει στο περιβάλλον.
  - p: Προστασία με υπερπίεση, όπου ο μετασχηματιστής είναι ενσωματωμένος μέσα σε χώρο με αδρανές αέριο υπό πίεση, με σκοπό τον περιορισμό εισόδου του εκρηκτικού μέσου μέσα στο μετασχηματιστή.
  - i: Για προστασία μέσω περιορισμού της ελκυσμένης ενέργειας από σπινθήρες που δεν μπορεί να προκαλέσει έναυση.
  - q: Για προστασία μέσω άμμου χαλαζία που περιβάλλει το μετασχηματιστή.
  - 0: Για προστασία μέσω λαδιού στο οποίο βυθίζεται μέσα ο μετασχηματιστής.

Επιπροσθέτως πρέπει να ληφθεί υπόψη το είδος των εκρηκτικών υλικών για τα οποία οι παραπάνω τρόποι προστασίας είναι αποτελεσματικοί. Βασικό κριτήριο για την αποτελεσματικότητα είναι η κλάση θερμοκρασίας του μετασχηματιστή.

Κλάση θερμοκρασίας	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Θερμοκρασία έναυσης (°C)	>450	300-450	200-300	135-200	100-135	85-100

Πίνακας 2.7: Κλάσεις θερμοκρασίας που αντιστοιχούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες έναυσης σε εκρηκτικό περιβάλλον. [6, σελ. 128, Πίνακας 2.6].

- Το **βασικό επίπεδο κρουστικής διέγερσης (BIL)**. Πρόκειται για την αντοχή του μονωτικού υλικού για την αποφυγή της αλλοίωσης ή και καταστροφής του κατά τη διάρκεια της μεταβατικής τάσης.

## 2.15 Μονωτικά υλικά μετασχηματιστή

Ως κύριο μονωτικό ενός μετασχηματιστή χρησιμοποιείται ειδικό λάδι, το οποίο ακολουθεί προδιαγραφές και χαρακτηριστικά κατά IEC 296/1969. Οι κύριοι στόχοι του λαδιού είναι η ηλεκτρική μόνωση των τυλιγμάτων, όπως επίσης και η ψύξη του μετασχηματιστή.

Τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή ακολουθούν παρακάτω και είναι εξίσου σημαντικά όλα για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία του. Αυτά είναι:

- Η **οπτική εμφάνιση** του λαδιού πρέπει να είναι διαυγή, χωρίς αυτό να περιέχει κάποιο είδος μικροσωματιδίων μέσα του.
- Η **πυκνότητα** δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 895 kg/m<sup>3</sup> στους 20 °C.
- Το **κινηματικό ιξώδες** το οποίο εξαρτάται άμεσα από την κατηγορία του λαδιού και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι 1 St = 1 cm<sup>2</sup> τότε πιο συγκεκριμένα ισχύει:
  - Για κατηγορία λαδιού I στους 20 °C η τιμή είναι ίση με 40 cSt, ενώ για -15 °C η τιμή ανέρχεται στα 800 cSt.
  - Για κατηγορία λαδιού II οι τιμές είναι 25 cSt για τους 20 °C και 1800 cSt στους -30 °C.
- Το **ελάχιστο σημείο ανάφλεξης** εντός δοχείου:
  - Για κατηγορία λαδιού I το σημείο ανάφλεξης βρίσκεται στους 140 °C.
  - Για κατηγορία λαδιού II αντίστοιχα στους 130 °C.
- Το **μέγιστο σημείο ροής**
  - Για κατηγορία λαδιού I βρίσκεται στους -30 °C.
  - Για κατηγορία λαδιού II αντίστοιχα στους -45 °C.
- Ο **βαθμός εξουδετέρωσης** να μην υπερβαίνει τα 0,03 mg KOH/g.
- **Μηδενική περιεκτικότητα** σε Θείο (S).
- Η **Διηλεκτρική αντοχή** πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με 30 kV/cm για καινούργιο λάδι και μεγαλύτερη ή ίση με 50 kV/cm για λάδι που έχει υποστεί επεξεργασία.
- Ο **συντελεστής απωλειών** πρέπει να είναι μικρότερος από 0,005 για εύρος λειτουργίας με επιβαλλόμενη τάση από 500 kV/m έως 1000 kV/m και συχνότητα λειτουργίας από 50 έως 62 Hz.
- Η **σταθερότητα στην οξείδωση του λαδιού χωρίς πρόσθετα αντιοξειδωτικά** όπου έπειτα από την οξείδωση ο βαθμός εξουδετέρωσης να μην ξεπερνά τα 0,4 mg KOH/g και λάσπη 1 %ο κατά βάρος το μέγιστο.

<b>1° χαρακτηριστικό ψηφίο:</b> Βαθμός προστασίας από επαφή και διείσδυση ξένων σωματιδίων.	
Κλίμακα: = 0 ως 6	Περιγραφή
IP 0X	Χωρίς καμία προστασία από επαφή και ξένα σωματίδια
IP 1X	Προστασία από ξένα σωματίδια > 50 mm. Αποκλείεται η επαφή με το σώμα, όχι όμως και με τα δάκτυλα.
IP 2X	Προστασία από ξένα σωματίδια > 12 mm. Αποκλείεται η επαφή με τα δάκτυλα.
IP 3X	Προστασία από ξένα σωματίδια > 2,5 mm. Αποκλείεται η επαφή μέσω εργαλείων, όπως καταβιδιών ή συρμάτων με διάσταση άνω των 2,5 mm.
IP 4X	Προστασία από ξένα σωματίδια > 1 mm. Αποκλείεται η επαφή μέσω εργαλείων με διάσταση άνω του 1 mm.
IP 5X	Προστασία από επικαθήμενη σκόνη στο εσωτερικό. Αποκλείεται τελείως η επαφή.
IP 6X	Πλήρης προστασία από σκόνη (κονιοστεγία). Αποκλείεται τελείως η επαφή.
<b>2° χαρακτηριστικό ψηφίο:</b> Βαθμοί προστασίας από διείσδυση νερού.	
Κλίμακα: = 0 ως 8	Περιγραφή
IP X0	Χωρίς καμία προστασία έναντι νερού.
IP X1	Προστασία από σταγονίδια νερού που πέφτουν κατακόρυφα.
IP X2	Προστασία από σταγονίδια νερού που πέφτουν με κλίση μέχρι και 15° ως προς την κατακόρυφο.
IP X3	Προστασία από σταγονίδια νερού που πέφτουν με κλίση μέχρι και 60° ως προς την κατακόρυφο.
IP X4	Προστασία από νερό που ψεκάζεται από όλες τις κατευθύνσεις.
IP X5	Προστασία από νερό που πέφτει υπό μορφή δέσμης από όλες τις κατευθύνσεις.
IP X6	Προστασία από νερό υπό συνθήκες παροδικής πλημμύρας.
IP X7	Προστασία από νερό από παροδικό εμβαιτισμό υπό συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και χρόνου.
IP X8	Προστασία από νερό από μόνιμο εμβαιτισμό (κατάδυση) υπό συγκεκριμένη πίεση.
<b>Επιπλέον στοιχεία:</b>	
IP W XX	Το γράμμα «W» δηλώνει πρόσθετη προστασία έναντι καιρικών συνθηκών.
IP XX S	Το γράμμα «S» δηλώνει ότι η δοκιμή νερού έγινε σε στάση.
IP XX M	Το γράμμα «M» δηλώνει ότι η δοκιμή νερού έγινε σε λειτουργία.
<b>Παράδειγμα:</b> Μετασχηματιστής βαθμού προστασίας IP44 παρέχει προστασία από ξένα σωματίδια > 1 mm και από ψεκαζόμενο νερό από όλες τις κατευθύνσεις. Είναι κατάλληλος για στεγασμένο χώρο, ακατάλληλος για την ύπαιθρο σε περίπτωση δυνατής βροχής.	

Πίνακας 2.8: Αναλυτική περιγραφή του συμβολισμού IP κατά DIN 40050. Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται μόνο η μία από τις δύο προστασίες η άλλη αντικαθίσταται με X. [6, σελ. 127, Πίνακας 2.5].

## 2.16 Βλάβες μετασχηματιστή

### 2.16.1 Αιτία βλαβών μετασχηματιστή

Ο λόγος για τη διαταραχή της ομαλής λειτουργίας ενός μετασχηματιστή μπορεί να οφείλεται από τον ίδιο, είτε να οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες. Για αυτόν το λόγο τα αίτια βλαβών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες, στα **εσωτερικά αίτια** και στα **εξωτερικά αίτια** αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα τα εσωτερικά αίτια είναι:

- Ελαττωματική ψύξη του μετασχηματιστή που οδηγεί στην υπερθέρμανση του,
- Ελαττωματική μόνωση των αγωγών στα τυλίγματα που μπορεί να οδηγήσει στη βραχυκύκλωση τους,
- Λάθος οξύτητα του λαδιού ψύξης,
- Υπερθερμάνσεις του πυρήνα,
- Η δυσκολία κυκλοφορίας του λαδιού εσωτερικά λόγω έμφραξης με αποτέλεσμα τη μειωμένη ψύξη του μετασχηματιστή,
- Μειωμένη διηλεκτρική αντοχή του λαδιού,
- Διαρροή και απώλεια λαδιού από το κέλυφος του μετασχηματιστή.

- Η οξείδωση των μεταλλικών επιφανειών εσωτερικά του μετασχηματιστή.

Ενώ τα βασικά εξωτερικά αίτια είναι τα παρακάτω:

- Υπερτάσεις που προέρχονται από άμεσα κεραυνικά πλήγματα πάνω στο μετασχηματιστή ή έμμεσα κοντά στη γραμμή μεταφοράς που είναι συνδεδεμένος ο ίδιος.
- Υπερτάσεις που οφείλονται σε σφάλμα του δικτύου, σε απότομη μεταβολή του φορτίου που εξυπηρετεί ο μετασχηματιστής ή σε βραχυκυκλώματα που παίρνουν μέρος στο δίκτυο που εξυπηρετεί αυτός.
- Πολλαπλές υπερφορτίσεις που καταπονούν και φθείρουν σε βάθος χρόνου το μετασχηματιστή με πιο γοργό ρυθμό.

## 2.16.2 Αποφυγή βλαβών μετασχηματιστή

Για την αποφυγή των βλαβών και τον περιορισμό των επιδράσεων τους απαιτείται να τηρείται τακτική συντήρηση του μετασχηματιστή με εξειδικευμένο προσωπικό και κατάλληλα υλικά όπως και τις αντίστοιχες προστατευτικές διατάξεις που προτρέπουν σφάλματα και βλάβες. Πιο συγκεκριμένα οι προστατευτικές διατάξεις που έχουν αυτό το σκοπό είναι οι εξής:

- Διατάξεις προστασίας έναντι βραχυκύκλωσης, δηλαδή διακόπτες ισχύος, ασφάλειες τήξης κ.α. Έτσι προστατεύεται ο μετασχηματιστής από υπερφόρτιση και υπερεντάσεις – βραχυκύκλωμα εντός του μετασχηματιστή.
- Διατάξεις προστασίας έναντι βραχυκύκλωσης φάσης προς γη, όπως ηλεκτρονόμοι γης και διαφορικοί ηλεκτρονόμοι προστασίας που διεγείρουν τους αυτόματους διακόπτες ισχύος.
- Συνδυαστικό σύστημα γείωσης με ηλεκτρονόμο υπερέντασης προς προστασία από σφάλματα προς το κέλυφος του μετασχηματιστή.
- Το δοχείο διαστολής λαδιού του μετασχηματιστή που αναπληρώνει οποιαδήποτε απώλεια λαδιού, με περισσότερες πληροφορίες στην παράγραφο 2.2.1.3.
- Το φίλτρο αέρα που συγκρατεί τη φυσιολογική υγρασία εντός.
- Τη συσκευή Buchholz η οποία έχει αναλυθεί αναλυτικά στην παράγραφο 2.2.1.3.
- Αλεξικέραυνα που προστατεύουν το μετασχηματιστή από κεραυνικά πλήγματα.

Μαζί με τον έλεγχο των παραπάνω διατάξεων και την αντικατάσταση τυχόν ελαττωματικών πραγματοποιούνται και μία σειρά μετρήσεων και δοκιμών κατά τη διάρκεια της συντήρησης για να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του μετασχηματιστή. Κάποιες από αυτές έχουν αναλυθεί και στην παράγραφο 2.7.5 και είναι οι εξής:

- Μέτρηση πηνίου με βομβητή (τζιτζίκι),
- Μέτρηση ωμικών αντιστάσεων,
- Μέτρηση σχέσης μετασχηματισμού
- Μέτρηση επιπέδου μόνωσης με τη βοήθεια κατάλληλων μετρητικών οργάνων, όπως Megger μεταξύ των τυλιγμάτων και από κάθε τύλιγμα προς τη γη.
- Μέτρηση των χαρακτηριστικών στοιχείων του λαδιού του μετασχηματιστή, όπως η διηλεκτρική αντοχή, οι φυσικοχημικοί έλεγχοι, η αεριοχρωματογραφία και η διηλεκτρική φασματοσκοπία.

## 2.17 Προδιαγραφές μετασχηματιστών – Συμπεράσματα

Κατά την παραγγελία ενός μετασχηματιστή είναι σημαντικό να αναγράφονται αναλυτικά με όλες τις λεπτομέρειες όλες οι λειτουργικές απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή. Αυτά τα στοιχεία ακολουθούν παρακάτω:



- ο τύπος του μετασχηματιστή (εσωτερικού, εξωτερικού χώρου, ειδικών προδιαγραφών και αναγκών όπως για πλοία ή για αεροσκάφη),
- η φαινόμενη ονομαστική ισχύς,
- οι ονομαστικές τάσεις των τυλιγμάτων,
- ο λόγος μετασχηματισμού εν κενώ λειτουργία,
- η ονομαστική συχνότητα λειτουργίας,
- η ομάδα ζεύξης,
- η διευκρίνιση για την ύπαρξη ουδέτερου κόμβου ή όχι,
- η εκατοστιαία τάση βραχυκύκλωσης επί της ονομαστικής,
- ο τρόπος λειτουργίας, συνεχόμενος ή διακοπτόμενος,
- ο τύπος μονώσεως,
- το επίπεδο μόνωσης, δηλαδή η ονομαστική τάση μόνωσης,
- ο τρόπος ψύξης,
- τα τεχνικά χαρακτηριστικά της λαμαρίνας που χρησιμοποιείται στον πυρήνα,
- τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων,
- ο τύπος του μεταγωγέα και διευκρίνιση για τη δυνατότητα εξωτερικού χειρισμού με ή χωρίς φορτίο.
- το υλικό που χρησιμοποιείται στο φίλτρο αέρα (silicagel κα.),
- το δοχείο διαστολής λαδιού με τους αντίστοιχους δείκτες λαδιού,
- το θερμόμετρο για την καταγραφή της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή,
- η συσκευή Buchholz,
- επιθυμητές διαστάσεις μετασχηματιστή σε περίπτωση ανάγκης λόγω έλλειψης ή μεγάλης σημασίας του χώρου,
- το βάρος με και χωρίς το λάδι,
- απώλειες πυρήνα και τυλιγμάτων υπό ονομαστική λειτουργία,
- ο βαθμός απόδοσης για ένα πλήθος επιπέδων φόρτισης,
- το υψόμετρο εγκατάστασης και λειτουργίας όπως επίσης οποιαδήποτε άλλη ιδιαιτερότητα του περιβάλλοντος (π.χ. κοντά στην θάλασσα λόγω του αλατιού θα πρέπει να υπάρχουν προστατευτικά μέτρα για την αποφυγή οξειδωσης του μετασχηματιστή),
- η στάθμη θορύβου,
- οι αποστάσεις μεταξύ των αξόνων μεταφοράς του μετασχηματιστή,
- τα απαραίτητα στοιχεία για τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμού που συνοδεύουν το μετασχηματιστή για τη λειτουργία του.

Μαζί με τις παραπάνω λεπτομέρειες ο μετασχηματιστής θα υποβληθεί και σε κάποιες δοκιμές – μετρήσεις για να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία και δυναμική συμπεριφορά του. Οι δοκιμές αυτές έχουν προαναφερθεί στην παράγραφο 2.7.5.

## 2.18 Επισκόπηση

Με τις βασικές έννοιες, θεωρία και λειτουργία του μετασχηματιστή, μπορεί να δημιουργηθεί μία εικόνα για το εύρος χρησιμότητας και σημασίας αυτής της ηλεκτρικής μηχανής σε πραγματικές εφαρμογές. Για περαιτέρω πληροφορίες για το πως μπορεί να κατασκευαστεί ένας μετασχηματιστής ακολουθεί το κεφάλαιο 3, όπου σε αυτό αναπτύσσεται η διαδικασία κλασσικού σχεδιασμού και υπολογισμού βασικών μεγεθών και ορίων λειτουργίας του.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# ΚΛΑΣΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

### 3.1 Τυποποίηση σειράς παραγωγής - Πλαίσια

#### 3.1.1 Εισαγωγή

Κατά τη μελέτη και τη διαδικασία σχεδιασμού ενός μετασχηματιστή υπάρχουν βασικές απαιτήσεις και προϋποθέσεις που πρέπει να δηλωθούν εξ αρχής από τη μεριά του πελάτη αλλά και να τηρηθούν από τη μεριά του σχεδιαστή – κατασκευαστή. Προϋποθέσεις όπως η γνώση των ονομαστικών μεγεθών του μετασχηματιστή, π.χ. τάση πρωτεύοντος/δευτερεύοντος, συχνότητα ονομαστικής λειτουργίας, διαστάσεις κ.α. όπως αναφέρονται αναλυτικότερα και στην παράγραφο §2.17. Με βάση αυτές τις απαιτούμενες προδιαγραφές ο σχεδιαστής μπορεί να προβεί στο σχεδιασμό του μετασχηματιστή έχοντας ταυτόχρονα υπόψη του κάποια βασικά κριτήρια που θα διαμορφώσουν όλη τη διαδικασία της κατασκευής, όπως μερικά από τα βασικά που ακολουθούν παρακάτω:

- Κόστος των υλικών του μετασχηματιστή, όπως το σιδηρομαγνητικό υλικό για τον πυρήνα, χαλκός για τα τυλίγματα του, μονωτικά υλικά, λάδι δεξαμενής αν πρόκειται για μετασχηματιστή βυθισμένο σε λάδι κ.α.

- Εύρεση κατάλληλων διαστάσεων σιδηρομαγνητικών φύλλων ή ρολών για τη μείωση της φύρας και συνεπώς τη μείωση της σπατάλης υλικού που οδηγεί στη μείωση κόστους υλικών, που προκύπτει κατά τη διαμόρφωση τους σε ελάσματα.

- Το χρονοδιάγραμμα και το σύνολο των εργατοωρών που θα πρέπει να αφοσιωθούν για την ολοκλήρωση της κατασκευής του. Σωστός προγραμματισμός των διεργασιών μπορεί να οδηγήσει σε ελαχιστοποίηση των συνολικών απαιτούμενων εργατοωρών και ως αποτέλεσμα σε μείωση του κόστους.

- Πλήρης κάλυψη των απαιτήσεων του καταναλωτή κατά την παράδοση του μετασχηματιστή.

- Σχεδιασμός, ο οποίος θα επιτρέπει στην εύκολη συντήρηση, αλλά και αποκατάσταση τυχούσας βλάβης.

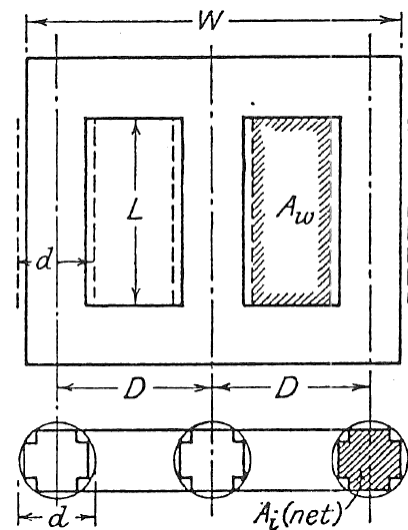
- Μορφολογία η οποία θα επιτρέπει τη σωστή και επαρκή ψύξη του.

- Κατάλληλος σχεδιασμός για την αντοχή σε θερμικές – μηχανικές – ηλεκτρικές καταπονήσεις κατά την ομαλή λειτουργία, αλλά και σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.

- Ικανοποιητικά επίπεδα απόδοσης κατά τη λειτουργία του.

- Αν υπάρχουν προηγούμενες σειρές που έχουν παραχθεί από το σχεδιαστή, να λάβει ο ίδιος υπόψη συχνά προβλήματα που προέκυψαν από αυτούς κατά τη λειτουργία τους ώστε να διαμορφώσει το νέο μετασχηματιστή με τέτοιο τρόπο που θα απαλειφθούν αυτά.

Με την εμπειρία ένας σχεδιαστής θα μπορεί να κρίνει και να πάρει τις κατάλληλες αποφάσεις με μεγαλύτερη ευκολία λόγω πείρας ή να καταλήξει σε ένα πιο οικονομικό αποτέλεσμα. Βέβαια λόγω των σύγχρονων τυποποιήσεων στη διαστασιολόγηση και στα ονομαστικά μεγέθη οι σχεδιαστές έχουν περιορισμένη ελευθερία επιλογών κατά το σχεδιασμό. Επιπροσθέτως μερικοί παράγοντες είναι αντίθετοι μεταξύ τους, δηλαδή σε περίπτωση βελτίωσης κάποια παραμέτρου κάποια άλλη μπορεί να γίνει χειρότερη, οπότε σε αυτές τις περιπτώσεις ο σχεδιαστής καλείται να κρίνει τι είναι προτιμότερο. Με βάση αυτές τις τυποποιήσεις οι μετασχηματιστές κατασκευάζονται ώστε να καλύπτουν ένα μικρό



Σχήμα 3.1: Κύριες διαστάσεις τριφασικού μετασχηματιστή τύπου πυρήνα. [21, σελ. 135, Fig. 96].



εύρος επιθυμητής ισχύος και δεν κατασκευάζονται συγκεκριμένα για την κάθε ξεχωριστή περίπτωση ισχύος.

### 3.1.2 Πλαίσια

Με βάση αυτές τις τυποποιήσεις κάθε εταιρεία επιλέγει να δημιουργήσει σειρές από μετασχηματιστές, οι οποίοι θα καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος ισχύος λειτουργίας, αλλά αυτό θα είναι χωρισμένο σε μικρά εύρη, όπου το καθένα θα αντιστοιχεί και σε ένα τύπο **πλαίσιου (frame)**. Το κάθε πλαίσιο αποτελείται από σταθερές τιμές, όπου με βάση το σχήμα 3.1, οι τιμές αυτές αφορούν τα παρακάτω μεγέθη:

- W: Το πλάτος μεταξύ των ακραίων κορμών του μετασχηματιστή,
- D: Η απόσταση των κέντρων δύο γειτονικών κορμών,
- d: Η διάμετρος του πυρήνα, και τη μεταβλητή τιμή,
- L: Το μήκος του μετασχηματιστή,
- $A_i$ : Η καθαρή επιφάνεια - διατομή του πυρήνα, δηλαδή που αποτελείται από σιδηρομαγνητικό υλικό και όχι από αέρα.

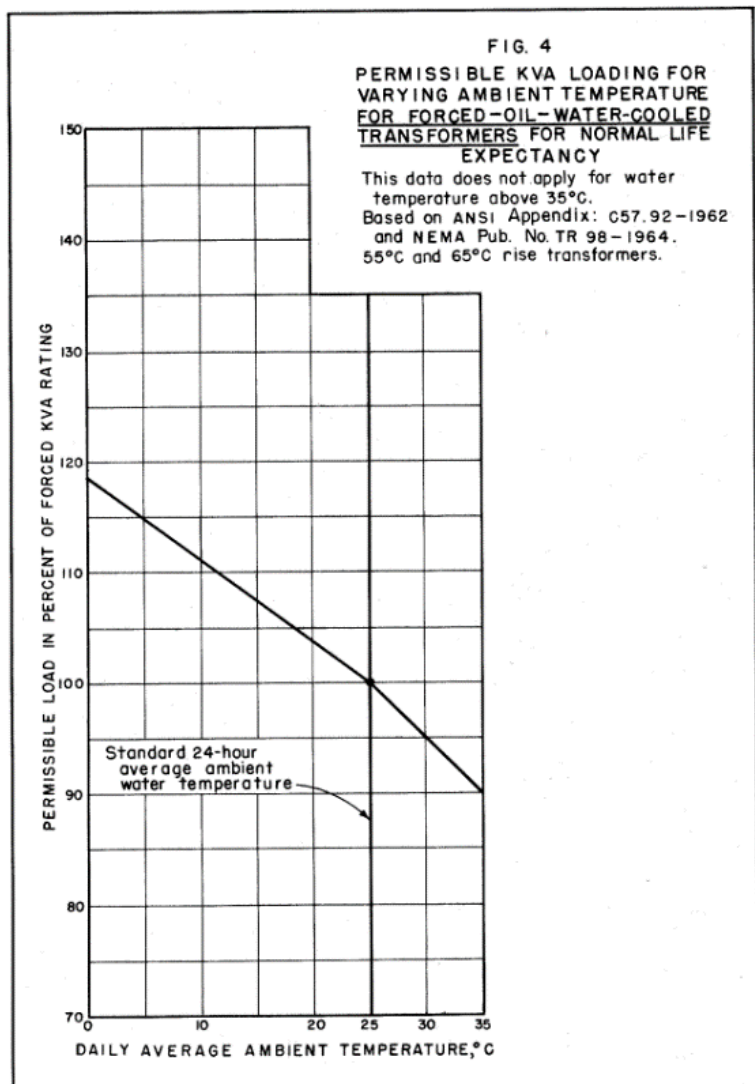
Τύπος πλαισίου	I	II	III	IV	V
Εύρος ισχύος λειτουργίας [kVA]	10-40	40-100	100-300	300-500	500-1200

Πίνακας 3.1: Αντιστοιχία τύπου πλαισίου μετασχηματιστή με την ισχύ λειτουργίας του. [21, σελ. 134].

Όλες αυτές οι τιμές αποτελούν τις κύριες διαστάσεις για τον πυρήνα του μετασχηματιστή με αποτέλεσμα όσο μεγαλύτερες είναι αυτές τόσο μεγαλύτερη να είναι και η ισχύς του. Οι τιμές αυτές απεικονίζονται στο σχήμα 3.1 όπως επίσης στον πίνακα 3.1 απεικονίζεται ένα πλήθος από τύπους πλαισίων που αντιστοιχούν και στα αντίστοιχα εύρη ισχύων.

Για την επιλογή τύπου πλαισίου, όπως και την επιλογή τιμών για τις κύριες διαστάσεις του πυρήνα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπολογιστής για τη διευκόλυνση στο μεγάλο όγκο υπολογισμών προγραμματίζοντας τον κατάλληλα και δίνοντας τη σωστή βαρύτητα σε κάθε παράμετρο έτσι, ώστε να μπορεί να βελτιστοποιήσει τις διαστάσεις και να μειώσει τη φύρα των υλικών.

Σχήμα 3.2: Επίδραση θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην επιτρεπτή ποσοστιαία φόρτιση μετασχηματιστή με σταθερή θερμοκρασία νερού στους 25°C. [47, σελ. 13, Fig 4].

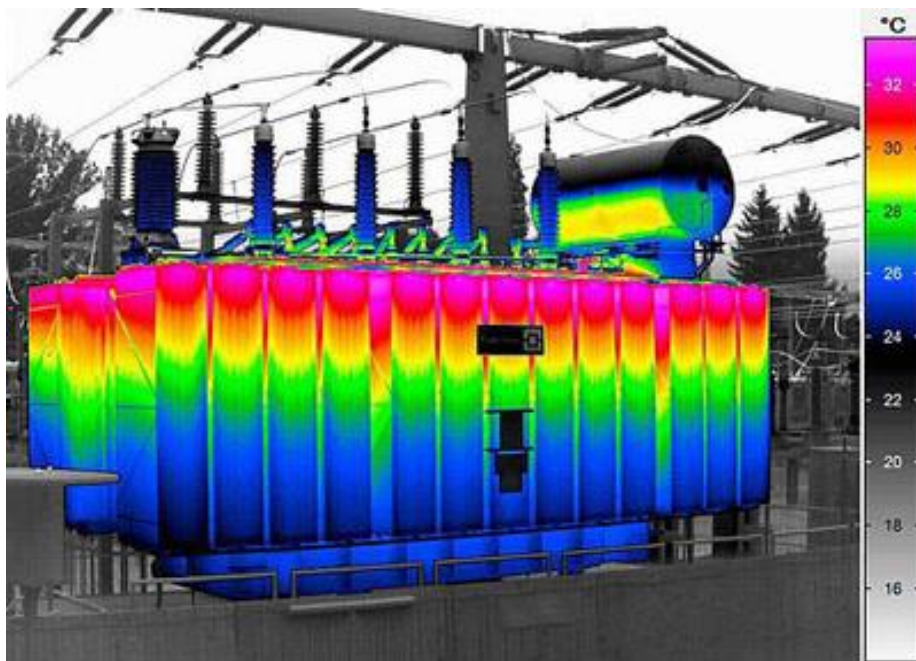


### 3.2 Θερμικό Όριο

Με την αύξηση του μεγέθους του πλαισίου σε ένα μετασχηματιστή, άρα και της ονομαστικής ισχύος του αντίστοιχα αυξάνονται οι ανάγκες για καλύτερη και αποδοτικότερη ψύξη λόγω του ότι οι μεγαλύτερες μάζες των υλικών που αξιοποιούνται στους μετασχηματιστές δημιουργούν μεγαλύτερα μονοπάτια για τη μετάδοση θερμότητας κάτι το οποίο καθιστά την απαγωγή δυσκολότερη.

Το κύριο ζήτημα με το θερμικό όριο λειτουργίας ενός μετασχηματιστή έχει να κάνει με τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορούν τα τυλίγματα να λειτουργήσουν χωρίς να καταστρέψουν τη μόνωση τους. Το πιο συνήθεις υλικό που μπορεί να βρεθεί στα τυλίγματα της μόνωσης είναι η κυτταρίνη (**cellulose**). Ο ρυθμός της φθοράς του βασίζεται κυρίως στους παράγοντες όπως την υγρασία περιβάλλοντος, τις ηλεκτρικές καταπονήσεις, την ποιότητα του ελαίου στο οποίο είναι βυθισμένα τα τυλίγματα, την ποιότητα της μόνωσης όπως και τη θερμοκρασία λειτουργίας των τυλιγμάτων η οποία είναι και η πιο σημαντική.

Μεγάλη βαρύτητα δίνεται στη θερμοκρασία λειτουργίας του μετασχηματιστή για αυτόν το λόγο. Σε περίπτωση μεγάλης θερμοκρασίας λειτουργίας η μόνωση στα τυλίγματα φθείρεται με πιο γοργό ρυθμό και έτσι η διάρκεια ζωής της γίνεται μικρότερη με αποτέλεσμα, αν γίνει πολύ μικρή η αντικατάσταση της μόνωσης, να είναι ακριβή και να μην ικανοποιεί οικονομικά κριτήρια για την απόσβεση της επένδυσης. Σε αντίθεση, αν η λειτουργία θερμοκρασίας είναι πολύ χαμηλή, η μόνωση ενδέχεται να διαρκέσει για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, αλλά προκύπτει το πρόβλημα όπου ο μετασχηματιστής δεν λειτουργεί σε ονομαστικά μεγέθη και ως αποτέλεσμα δε είναι ενεργειακά αποδοτικός.



Εικόνα 3.1: Διαφοροποίηση θερμοκρασίας του μετασχηματιστή μεταξύ ανώτατου και κατώτατου σημείου της δεξαμενής λαδιού στο οποίο έχει βυθιστεί μέσα. [48]

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2, η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το ποσοστό της φόρτισης του μετασχηματιστή, ώστε αυτός να μπορεί να λειτουργεί έχοντας μία ικανοποιητική διάρκεια ζωής στη μόνωση των τυλιγμάτων. Αναλόγως την ποιότητα της μόνωσης ορίζονται αντίστοιχα και η **συνεχή μέγιστη φόρτιση (continuous maximum rating)** του μετασχηματιστή, η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα και την ύψωση θερμοκρασίας του μετασχηματιστή έως ένα συγκεκριμένο σταθερό επίπεδο με διαφοροποιήσεις έως και 40° C σε κάποια θερμά σημεία (**hot-spots**) του, όπως αυτό μπορεί να είναι το ανώτερο σημείο της δεξαμενής του λαδιού που έχει

βυθιστεί ο ίδιος, όπου είναι φυσικό το λάδι να έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από ότι στο κατώτατο σημείο όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 3.1.

Έτσι με βάση τους παραπάνω παράγοντες κάθε κλάση μόνωσης επιτρέπει και τις δικές τις θερμοκρασίες λειτουργίας. Συγκεκριμένα για μετασχηματιστές ξηρού τύπου ισχύει ο πίνακας 3.2.

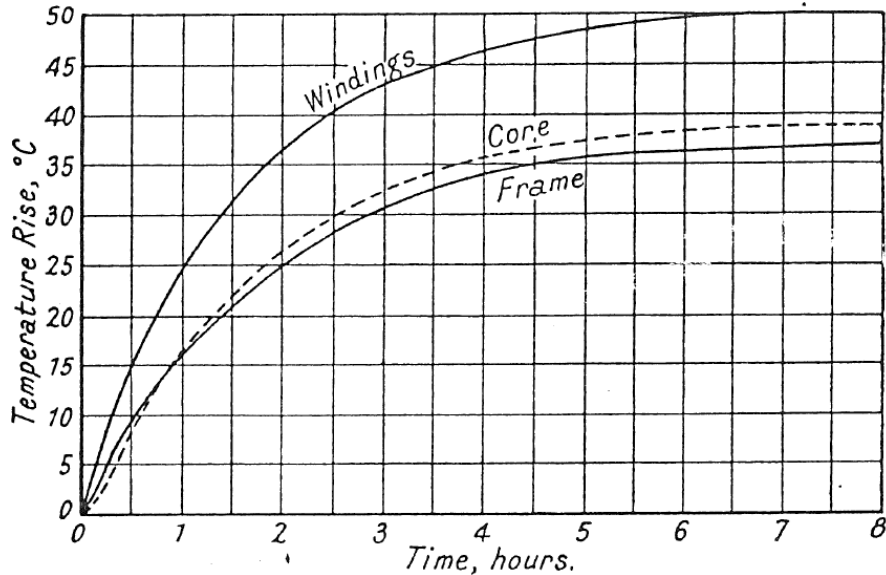
Αναλόγως τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος ένας μετασχηματιστής θα μπορούσε να λειτουργήσει πάνω ή κάτω από το κανονικό όριο λειτουργίας. Για ένα ψυχρό περιβάλλον με θερμοκρασίες, όπως 15° C, ένας μετασχηματιστής θα μπορούσε να λειτουργήσει συνεχόμενα σε ποσοστό φόρτισης ίσο με 110%. Αντίστοιχα όσο πιο υψηλή είναι μια θερμοκρασία, τόσο πιο μικρό θα πρέπει να είναι το ποσοστό φόρτισης για να τηρηθεί ισορροπία στο θερμικό όριο λειτουργίας για την αποφυγή βλαβών και τη μείωση της διάρκειας ζωής του.

Επιτρεπτή θερμοκρασία κλάσης μόνωσης	Όριο μέσης αύξησης θερμοκρασίας τυλιγμάτων με	Μέγιστη θερμοκρασία θερμών σημείων	Υλικά μόνωσης
90 (Y)	60	Έως και 105	Χαρτί χωρίς επίστρωση, μετάξι, βαμβάκι, βουλκανισμένο φυσικό καουτσούκ,
105 (A)	60	Έως και 130	Οργανικά υλικά όπως βαμβάκι, μετάξι, χαρτί και συνθετικές ίνες.
120 (E)	75	Έως και 145	Πολυουρεθάνη, εποξειδικές ρητίνες, τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) κ.α.
130 (B)	80	Έως και 155	Ανόργανα υλικά όπως μαρμαρυγία, ίνες γυαλιού, αμιάντο με κόλλες υψηλής αντοχής σε μεγάλες
155 (F)	100	Έως και 180	Υλικά παρόμοια με της κλάσης 130 που αντέχουν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες.
180 (H)	125	Έως και 205	Ελαστομερής σιλικόνη και υλικά παρόμοια με της κλάσης 130 που αντέχουν σε μεγαλύτερες
200 (N)	135	Έως και 225	Τεφλόν και υλικά παρόμοια με της κλάσης 130 που αντέχουν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες.
220 (R)	150	Έως και 245	Τεφλόν και υλικά παρόμοια με της κλάσης 130 που αντέχουν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες.
240 (S)	-	>240	Πολυαμιδικά σμάλτα (Pyre-ML) ή μεμβράνες πολυαμιδίου (Kapton και Alconex GOLD)
250	-	>250	Τεφλόν και υλικά παρόμοια με της κλάσης 130 που αντέχουν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες.
Συνέχεια κλάσης μονωτικών υλικών με αντοχή μεγαλύτερη της προηγούμενης κλάσης κατά 25° C			
Αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10° C πάνω από τη μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία μπορεί να προκαλέσει μείωση της διάρκειας ζωής της μόνωσης κατά το ήμισυ.			

Πίνακας 3.2: Θερμικά όρια για διαφορετικές κλάσης μονώσεων σε μετασχηματιστή ξηρού τύπου με βάση την δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας της IEC 60076-11. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος θεωρείται ίση έως και 40° C. Επισημαίνεται ότι τα γράμματα στην πρώτη στήλη δίπλα σε κάθε τιμή θερμοκρασίας αφορούν για την παλαιά ονομασία των κλάσεων μόνωσης. [13, σελ. 7/3 §7.1.1 (Μεταφρασμένος)], [49] και [50].

Η ικανότητα του μετασχηματιστή να δεχτεί υπερφορτίσεις βασίζεται κυρίως στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, αλλά και του ποσοστού φόρτισής του πριν την υπερφόρτιση, όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο §2.6.5. Επιπροσθέτως ο τρόπος – ποιότητα της ψύξης, η θερμοχωρητικότητα των υλικών, του λαδιού και η μάζα τους που συνδέεται άμεσα με αυτήν, συνεισφέρουν και αυτά στο επιτρεπτό χρονικό διάστημα, όπως επίσης και τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να δεχθεί κατά τη διαδικασία αυτή. Με την αύξηση της μάζας των υλικών του μετασχηματιστή αυξάνεται η θερμοχωρητικότητα και έτσι η μεταβολή της θερμοκρασίας στο σώμα του καθυστερεί να φανεί, αλλά ταυτόχρονα μπορεί να αντέξει μεγαλύτερα θερμικά ποσά σε σύγκριση με ένα μικρότερης μάζας. Η αύξηση αυτή συμβαίνει με εκθετικό ρυθμό και έχει τη μορφή του σχήματος 3.3.

Ο λόγος απωλειών πυρήνα (απώλειες άνευ φορτίου) και των θερμικών απωλειών τυλιγμάτων (απώλειες πλήρους φορτίου) είναι εξίσου σημαντικός για τον καθορισμό της υπερφόρτισης. Λόγω της φύσεως αυτών των απωλειών, σταθερές και ανάλογες του τετραγώνου της εντάσεως του ρεύματος, άρα και του ποσοστού της φόρτισης του μετασχηματιστή, αντίστοιχα, αλλάζει και το επίπεδο της υπερφόρτισης ώστε να μπορεί ο μετασχηματιστής να ανταπεξέλθει στις απώλειες που προκύπτουν. Έτσι, ένας μετασχηματιστής με λόγο 1/1 θα μπορεί να υποστεί με μεγαλύτερη ευκολία μία υπερφόρτιση σε σχέση με έναν παρόμοιο του που έχει λόγο π.χ. 2,5/1.



Σχήμα 3.3: Καμπύλες αύξησης θερμοκρασίας τυλιγμάτων, πυρήνα και πλαισίου μετασχηματιστή. Στον κάθετο άξονα ορίζεται η θερμοκρασία σε °C και στον οριζόντιο άξονα ο χρόνος σε ώρες. [21, σελ. 245, Fig. 146].

Ως συμπέρασμα θα πρέπει να δοθεί σημασία στο περιβάλλον στο οποίο θα εγκατασταθεί ο μετασχηματιστής, όπως και ο τρόπος λειτουργίας του για τη ρύθμισή του για μία εύρυθμη και μακροχρόνια λειτουργία. Η ένδειξη θερμικού ορίου στις προδιαγραφές θα πρέπει να αποτελεί οδηγό για τη λειτουργία του μετασχηματιστή, αλλά θα πρέπει να μην αποτελεί το μόνο παράγοντα που θα την οριοθετεί. Σε πολλούς μετασχηματιστές προστίθεται θερμομέτρο το οποίο είναι συνδεδεμένο με το σημείο της δεξαμενής στο οποίο το λάδι έχει τη μεγαλύτερη θερμοκρασία ως μία επιπλέον πληροφορία για την επίβλεψη της θερμοκρασίας. Εκτός από το θερμικό όριο κατά την ομαλή λειτουργία υπάρχει και αυτό για την αντοχή σε βραχυκυκλώματα του δικτύου. Λόγω του ότι ένα βραχυκύκλωμα έχει πολύ σύντομη επίδραση στο μετασχηματιστή, η θερμότητα που παράγεται σε αυτό το μικρό χρονικό διάστημα δεν προλαβαίνει να διοχετευτεί στο λάδι, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η θερμοκρασία των τυλιγμάτων. Η θερμοκρασία αυτή δεν πρέπει να υπερβεί τους 250° C και θα πρέπει να διαρκέσει όσο λιγότερο γίνεται για την προστασία της μόνωσής τους. Η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να υπολογισθεί ενδεικτικά με τη σχέση (3.2.1):

$$\theta = a \cdot t \cdot \left[ \frac{2 \cdot T_1 + a \cdot t}{2 \cdot T_1} + \frac{620 \cdot K_d}{2 \cdot T_1 + a \cdot t} \right] \text{ } ^\circ \text{C} \quad (3.2.1)$$

Όπου:

- $t$ : το χρονικό διάστημα του βραχυκυκλώματος σε δευτερόλεπτα [sec].
- $T_1 = \theta_1 + 234.5^\circ \text{C}$  και  $\theta_1$  η αρχική θερμοκρασία σε °C.
- $a = 1,9 \cdot J^2 \cdot T_1 \cdot 10^{-5}$ , όπου  $J$  η πυκνότητα ρεύματος εκφρασμένη σε A/mm<sup>2</sup>.
- $K_d$ : Συντελεστής απωλειών δινορρευμάτων στους 75° C.



### 3.3 Ισχύς και Τάση Εξόδου

#### 3.3.1 Συσχέτιση ενεργειακών μεγεθών και κύριων διαστάσεων μετασχηματιστή

Κατά τη σχεδίαση του μετασχηματιστή για την κατάληξη σε συγκεκριμένη ισχύ εξόδου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ενεργά υλικά, όπως το σιδηρομαγνητικό υλικό, ο χαλκός των τυλιγμάτων και η μόνωση τους, του μετασχηματιστή, όπως και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Με βάση τα χαρακτηριστικά τους θα μπορεί να καθοριστεί και η επαρκής ψύξη αυτών, ώστε τα υλικά αυτά να αντέχουν σε λειτουργία τέτοια, ώστε ο μετασχηματιστής να πληροί την απαιτούμενη ισχύ εξόδου όπως και την απόδοση.

Η σχεδίαση μπορεί να έχει ως βασικό στόχο τη διατήρηση συγκεκριμένης διαστασιολόγησης της δεξαμενής και του τρόπου ψύξης έτσι, ώστε να οδηγηθεί στην απόδοση και την ισχύ που απαιτείται είτε να πραγματοποιηθεί με ανάποδη σειρά, δηλαδή να επιλεγθεί δεδομένη ισχύ – απόδοση και έτσι να καταλήξει ο σχεδιασμός στον ορισμό των διαστάσεων της δεξαμενής και του τρόπου ψύξης. Σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα μπορούν να είναι ικανοποιητικά και να πληρούν τις βασικές απαιτήσεις.

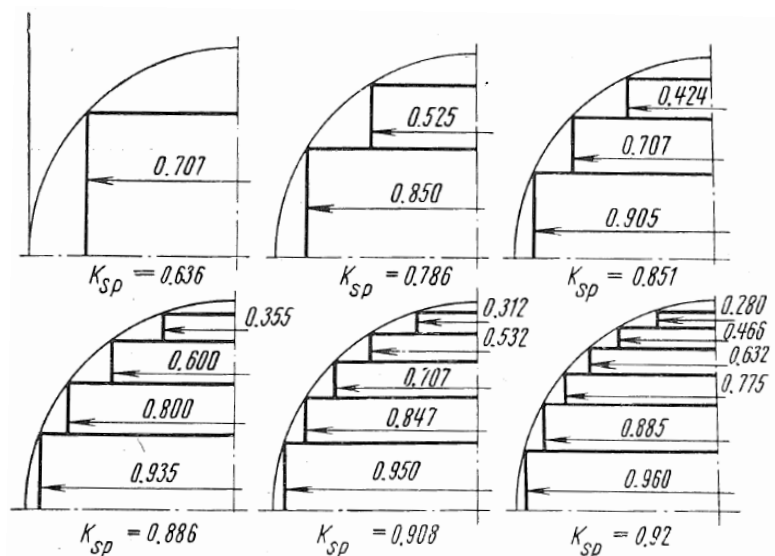
Για την εκκίνηση του σχεδιασμού θα πρέπει να ορισθούν κάποια βασικά μεγέθη, όπως η **καθαρή επιφάνεια - διατομή του κορμού - πυρήνα**  $A_i$ , η καθαρή επιφάνεια του κενού μεταξύ των κορμών του πυρήνα, δηλαδή η **καθαρή επιφάνεια παράθυρου (window)**  $A_w$ , όπως απεικονίζονται στο σχήμα 3.1, η ένταση μαγνητικού πεδίου  $B_m$ , η πυκνότητα ρεύματος  $J$  και ο **συντελεστής πλήρωσης παραθύρου**  $k_w$ , τα οποία καθορίζουν βασικά ενεργειακά μεγέθη του μετασχηματιστή που θα ακολουθήσουν παρακάτω.

Η διατομή του πυρήνα  $A_i$  είναι ανάλογη της διαμέτρου  $d$  των κορμών του πυρήνα και όσο μεγαλύτερη γίνεται η διάμετρος αυτή, αυξάνεται ανάλογα και το μέγεθος του μετασχηματιστή με αποτέλεσμα οι κορμοί, αλλά και τα ζυγώματα του μετασχηματιστή να δημιουργούν μία κυκλική μορφή λόγω της αύξησης των βημάτων των ελασμάτων που τοποθετούνται, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 3.4, όπου  $K_{sp}$  ο **συντελεστής πλήρωσης**, που υποδηλώνει την κάλυψη του τεταρτοκύκλιου από σιδηρομαγνητικό υλικό. Με την αύξηση των βημάτων έρχεται, όμως και το μειονέκτημα της αύξησης του κόστους και της πολυπλοκότητας κατά την κατασκευή.

Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη το πλήθος των φάσεων του πυρήνα, γιατί σε κάθε περίπτωση ο κάθε κορμός θα πρέπει να δεχτεί διαφορετικό πλήθος τυλιγμάτων, με αποτέλεσμα να χρειάζεται ο αντίστοιχος χώρος για αυτά, αλλά και για τα μονωτικά υλικά που τοποθετούνται έπειτα.

Ακολουθούν οι βασικές σχέσεις που συνδυάζουν τα βασικά μεγέθη του μετασχηματιστή με τα ενεργειακά.

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη ανά σπείρα  $E_t$  ή η ολική ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E$  θα είναι ίση με:



Σχήμα 3.4: Αύξηση βημάτων των ελασμάτων ισοδυναμεί σε δημιουργία μίας πιο κυκλικής μορφολογίας καλύπτοντας σε μεγαλύτερο βαθμό το τεταρτοκύκλιο. [39, σελ. 232, Fig. 14.1].

$$E_t = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot A_i \Rightarrow E = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot B_m \cdot A_i \quad (3.3.1)$$

Όπου  $\Phi_m$  Μαγνητική ροή σε Wb,  $f$  η συχνότητα λειτουργίας σε Hz και  $N$  το πλήθος των σπειρών. Για δεδομένη και ίση πυκνότητα ρεύματος  $J$  στο πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα η καλυμμένη περιοχή του παραθύρου από χαλκό  $k_w \cdot A_w$  για ένα τριφασικό μετασχηματιστή τύπου πυρήνα θα είναι ίση με:

$$2 \cdot (A_1 \cdot t_1 + A_2 \cdot t_2) = k_w \cdot A_w \quad (3.3.2)$$

Όπου  $A_1, A_2$  οι επιφάνειες αγωγού στο πρωτεύον και στο δευτερεύον σε  $m^2$  και  $t_1, t_2$  το πλήθος στροφών για το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα αντίστοιχα.

Η ένταση ρεύματος του πρωτεύοντος  $I_1$  θα είναι ίση με:

$$I_1 = A_1 \cdot J = (k_w \cdot A_w \cdot J) / (4 \cdot t_1) \quad (3.3.3)$$

Οι αμπεροστρόφες  $I \cdot t$  του πρωτεύοντος ή του δευτερεύοντος τυλίγματος θα είναι ίσες με:

$$I \cdot t = I_1 \cdot t_1 = I_2 \cdot t_2 = \frac{1}{4} \cdot k_w \cdot A_w \cdot J \quad (3.3.4)$$

Η φαινόμενη ισχύς εξόδου του μετασχηματιστή για φασικές τιμές της τάσης  $V_1$  και της έντασης ρεύματος  $I_1$  θα είναι ίση με:

$$S = 3 \cdot 4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot A_i \cdot \frac{1}{4} \cdot k_w \cdot A_w \cdot J = 3,33 \cdot f \cdot B_m \cdot A_i \cdot A_w \cdot k_w \cdot \delta \quad (3.3.5)$$

Όπου  $B_m$  η μέγιστη ένταση μαγνητικού πεδίου σε  $Wb/m^2$ . Σε περίπτωση που πρόκειται για έναν μονοφασικό μετασχηματιστή τύπου πυρήνα η καλυμμένη περιοχή του παραθύρου από χαλκό  $k_w \cdot A_w$  θα είναι ίση πλέον με:

$$(A_1 \cdot t_1 + A_2 \cdot t_2) = k_w \cdot A_w \quad (3.3.6)$$

Και έτσι ως αποτέλεσμα η φαινόμενη ισχύς εξόδου στην προκειμένη περίπτωση θα είναι ίση με:

$$S = 2,22 \cdot f \cdot B_m \cdot A_i \cdot A_w \cdot k_w \cdot J \quad (3.3.5)$$

### 3.3.2 Παράγοντες οριοθέτησης των μεγεθών μετασχηματιστή

Στον καθορισμό της ισχύος εξόδου θα πρέπει να ληφθεί και ως κύριος παράγοντας η ένταση μαγνητικού πεδίου  $B_m$ , η οποία, αν είναι πολύ υψηλή μπορεί να φτάσει το μετασχηματιστή σε κορεσμό, όπως και την αύξηση των απωλειών πυρήνα. Τυπικές τιμές για την ένταση μαγνητικού πεδίου για ένα μετασχηματιστή ισχύος με συχνότητα λειτουργίας  $f$  στα 50 Hz είναι στα 1,1 – 1,4  $Wb/m^2$ . Οι απώλειες πυρήνα μπορούν να καταπολεμηθούν με την καλύτερη ψύξη, ωστόσο ο κορεσμός του σιδηρομαγνητικού υλικού καθιστά πρόβλημα, το οποίο ακόμα και σήμερα δεν μπορεί να περιοριστεί με κάποια μέθοδο και ως αποτέλεσμα οριοθετείται, το σημείο λειτουργίας του μετασχηματιστή με βάση αυτόν.

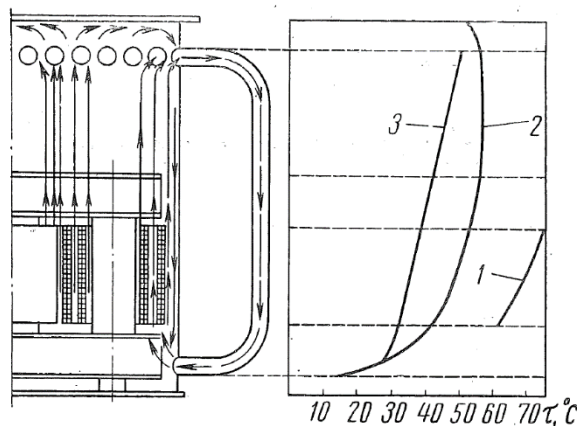
Αναλόγως τη χρήση του μετασχηματιστή, δηλαδή αν αυτός θα λειτουργεί μόνιμα με μικρό φορτίο, δηλαδή σε ένα μετασχηματιστή διανομής, ή σε τακτά χρονικά διαστήματα, δηλαδή σε ένα μετασχηματιστή παροχής ενέργειας, με ένα μεγαλύτερο φορτίο συγκριτικά, καθορίζεται και η ένταση μαγνητικού πεδίου που θα εφαρμοστεί σε αυτόν. Αυτό γίνεται, διότι οι απώλειες πυρήνα σε ένα μετασχηματιστή διανομής πρέπει να ληφθούν υπόψη εφόσον αυτός λειτουργεί συνεχώς με αποτέλεσμα αυτές να είναι εξίσου σημαντικές στο κόστος λειτουργίας του.

Επιπροσθέτως η ποιότητα της ψύξης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και την οριοθέτηση της πυκνότητας έντασης ρεύματος  $j$ . Ο τρόπος τοποθέτησης της **διαμορφωμένο έλασμα αγωγών**

**λαδιού (Oil duct tape)** επιφανειακά των τυλιγμάτων επιφέρει διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με τον προσανατολισμό της, λόγω της μορφολογίας της όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.2. Σε περίπτωση μετασχηματιστή ξηρού μέσα από τα διαμορφωμένα ελάσματα διαπερνά ως μέσο ψύξης ο αέρας και επιτυγχάνεται με τον ίδιο τρόπο η ψύξη του.



Εικόνα 3.2: Διαμορφωμένο έλασμα αγωγών λαδιού που τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια των τυλιγμάτων με σκοπό την ενίσχυση της ψύξης του μετασχηματιστή. [51]



Σχήμα 3.5: Διαδρομή λαδιού σε κλειστό κύκλωμα μέσα στο μετασχηματιστή και απεικόνιση της θερμοκρασίας συναρτήσεως του ύψους όπου 1) θερμοκρασία τυλιγμάτων, 2) θερμοκρασία κελύφους, 3) θερμοκρασία λαδιού. [39, σελ. 157, Fig. 10.3].

Τοποθετώντας την ταινία αυτή κάθετα, δηλαδή με τέτοιο τρόπο όπου τα αυλάκια επιτρέπουν το λάδι να κυκλοφορήσει από το κατώτατο σημείο του μετασχηματιστή στο ανώτατο, επιτυγχάνεται η βέλτιστη ψύξη και αυτό, διότι όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5 το θερμό λάδι φτάνει στο άνω σημείο του κελύφους, όπου, από εκεί καταλήγει στους ανεμιστήρες οι οποίοι το ψύχουν και έπειτα αυτό καταλήγει στο κατώτατο σημείο του κελύφους, όπου θα ακολουθήσει η ίδια διαδικασία που το θερμό λάδι θα ανέβει προς τα επάνω και έτσι μέσω της συναγωγής θα πραγματοποιείται μία καλύτερη απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται στα τυλίγματα. Σε αυτήν την περίπτωση τα τυλίγματα θα μπορούν να απάγουν θερμότητα ίση με  $1.5 \text{ kW}$  ανά  $m^2$  επιφάνειας τους, ενώ σε περίπτωση τοποθέτησης του διαμορφωμένου ελάσματος οριζοντίως η αντίστοιχη ικανότητα απαγωγής θερμότητας των τυλιγμάτων θα είναι ίση με  $500 \text{ W}$  ανά  $m^2$ .

Εν τέλει, με αυτούς τους περιορισμούς τα όρια για την πυκνότητα έντασης ρεύματος  $J$  θα είναι για κάθε τύπο ψύξης τα εξής:

- Για μετασχηματιστές με δεξαμενές και ανεμιστήρες ή αγωγούς εφαρμόζεται πυκνότητα έντασης ρεύματος 2,0 έως και  $3,2 \text{ A/mm}^2$ .
- Για μετασχηματιστές με εξαναγκασμένη ψύξη εφαρμόζεται η τιμή των 5,4 έως και  $6,3 \text{ A/mm}^2$ .

Στους μετασχηματιστές ισχύος εφαρμόζεται ποσοστό φόρτισης μικρότερο από το πλήρες φορτίο. Αυτό γίνεται, διότι συνηθίζεται να υπάρχει λόγος ίσος με  $2/4$  μεταξύ των θερμικών απωλειών και των απωλειών πυρήνα, αλλά οι θερμικές απώλειες είναι ανάλογες του τετραγώνου της εντάσεως ρεύματος, άρα και της πυκνότητας εντάσεως ρεύματος  $j$  και έτσι αυτή έχει μεγάλη βαρύτητα κατά το στάδιο του σχεδιασμού. Όπως ακολουθεί και στην επόμενη παράγραφο θα παρατηρηθεί ότι ο μετασχηματιστής λειτουργεί με την καλύτερη απόδοση όταν υπάρχει ισότητα μεταξύ των δύο απωλειών.



### 3.4 Υπολογισμός Απωλειών

Ορίζοντας ως  $p_i$  τις ειδικές απώλειες πυρήνα και ως  $p_c$  τις ειδικές απώλειες χαλκού σε  $W/kg$  τότε με βάση το συνολικό βάρος του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα  $G_i$  και το συνολικό βάρος του χαλκού των τυλιγμάτων  $G_c$  μπορεί να υπολογιστούν οι ολικές απώλειες του μετασχηματιστή, δηλαδή το άθροισμα των δύο απωλειών  $P_i$  και  $P_c$  αντίστοιχα, κατά τη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο:

$$P_i + P_c = (p_i \cdot G_i + p_c \cdot G_c) \quad (3.4.1)$$

Λόγω της φύσης των απωλειών όπως, έχει προαναφερθεί και στην παράγραφο §2.6.3, οι απώλειες πυρήνα παραμένουν πρακτικά σταθερές για οποιοδήποτε επίπεδο φόρτισης του μετασχηματιστή, ενώ οι απώλειες χαλκού είναι ίσες με το τετράγωνο της έντασης ρεύματος, άρα αντίστοιχα με το τετράγωνο του ποσοστού φόρτισης. Ορίζοντας τη φαινόμενη ισχύ εξόδου ως  $S$ , το ποσοστό της φόρτισης του μετασχηματιστή  $x$  όπου δέχεται τιμές από 0 έως 1 (ή από 0% έως 100%) και την απόδοση του μετασχηματιστή συναρτήσει της φόρτισης  $x$  ως  $\eta_x$  θα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\eta_x = \frac{x \cdot S}{x \cdot S + P_i + x^2 \cdot P_c} \quad (3.4.2)$$

Όπου η τιμή της απόδοσης θα μεγιστοποιείται όταν θα ισχύει  $(d\eta_x/dx) = 0$ , δηλαδή όταν οι απώλειες πυρήνα και οι απώλειες τυλιγμάτων θα είναι ίσες.

Εάν κατά τη λειτουργία του ένας μετασχηματιστής απαιτείται να λειτουργήσει υπό πλήρες φορτίο, αυτό οδηγεί στην ισότητα των δύο απωλειών, αλλά και στη μεγιστοποίηση της απόδοσης όπως αναφέρθηκε. Στην πραγματικότητα, δεν είναι εύκολα πραγματοποιήσιμη αυτή η φόρτιση και έτσι η φόρτιση ρυθμίζεται σε ένα μικρότερο ποσοστό. Κατά συνέπεια αυτό το ποσοστό ορίζει το βάρος των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, ώστε να επιτευχθεί ισότητα μεταξύ των δύο απωλειών.

$$x^2 \cdot P_c = P_i \Leftrightarrow x^2 \cdot p_c \cdot G_c = p_i \cdot G_i \Leftrightarrow G_i/G_c = x^2 \cdot p_c/p_i \quad (3.4.3)$$

Όπου  $G_i/G_c$  ο λόγος – αναλογία των βαρών των ενεργών υλικών (σιδηρομαγνητικού υλικού και χαλκού) για το κριτήριο μεγιστοποίησης της απόδοσης για το συγκεκριμένο ποσοστό φόρτισης.

Εναλλακτική προσέγγιση αποτελεί το κριτήριο ελαχιστοποίησης του κόστους των υλικών του μετασχηματιστή (εξαιρουμένης της πιθανότητας επιπλέον επιβαρύνσεων κατά την κατασκευή).

Ορίζοντας ως  $\gamma_i$  και  $\gamma_c$  το κόστος ανά μονάδα βάρους των ελασμάτων και των μονωμένων τυλιγμάτων, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$G_c \cdot \gamma_c = G_i \cdot \gamma_i \Leftrightarrow G_i/G_c = \gamma_c/\gamma_i \quad (3.4.4)$$

Το κόστος των υλικών μεταβάλλεται συνεχώς με βασικό παράγοντα το κριτήριο ζήτησης – προσφοράς, όπως και άλλους παράγοντες, όμως η παραγωγή ενός εργοστασίου δεν πρέπει να επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από αυτό.

Επιπροσθέτως υπάρχει και το κριτήριο της ελαχιστοποίησης του κόστους λειτουργίας του μετασχηματιστή. Πιο συγκεκριμένα οι παράγοντες είναι το κεφάλαιο που απαιτείται για την αγορά του μετασχηματιστή, την υποτίμηση στο βάθος χρόνου και το κόστος των απωλειών. Λόγω του ότι αυτή η μέθοδος εμπλέκει πολλούς παράγοντες εκ των οποίων το κόστος των απωλειών επιφέρει και πολλές πράξεις για τον υπολογισμό του, πιο συγκεκριμένα αξιοποιώντας την καμπύλη φορτίου, τον συντελεστή φόρτισης κ.α. απαιτείται η χρήση υπολογιστή για την εύρεση ικανοποιητικού αποτελέσματος μέσω αυτής της μεθόδου. Τέλος, θα μπορούσε για ένα πλοίο να υπάρχει συνδυασμός κόστους λειτουργίας και κόστους κατασκευής σε συνολικό κόστος.

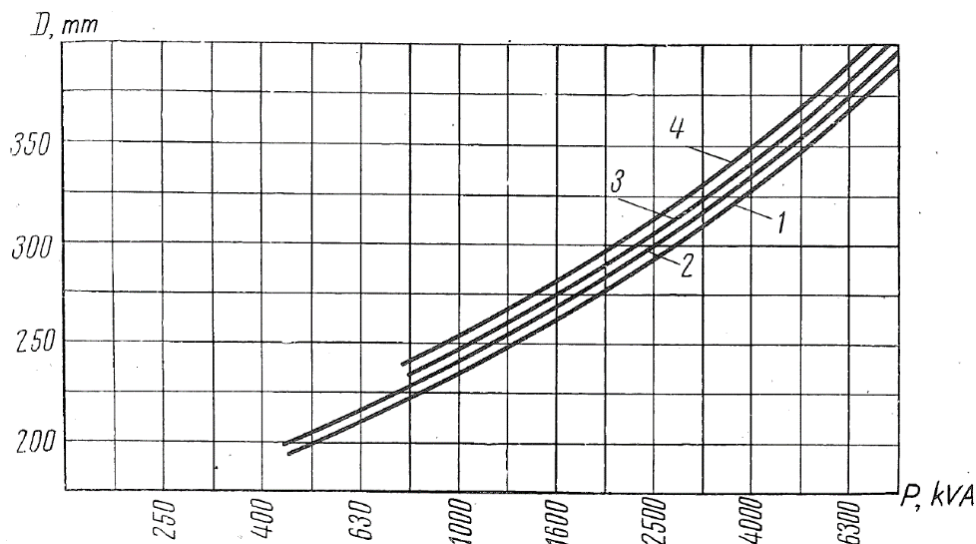
### 3.5 Προκαταρκτική σχεδίαση

#### 3.5.1 Βασικοί παράμετροι

Πριν την τελική ανάλυση και το σχεδιασμό του μετασχηματιστή είναι προτιμότερο ο σχεδιαστής να διεξάγει μία προκαταρκτική σχεδίαση, η οποία χωρίς να αποτελεί το ολοκληρωμένο προϊόν, θα οδηγήσει σε μία αρχική εκτίμηση για το κόστος του μετασχηματιστή, τα απαραίτητα υλικά για την κατασκευή του, όπως και τις ιδιαιτερότητες στη μορφολογία του για την επίτευξη συγκεκριμένων απαιτήσεων. Αναλυτικότερα, κάποιοι βασικοί παράγοντες ακολουθούν παρακάτω:

- Προσδιορισμός των ονομαστικών μεγεθών του μετασχηματιστή, όπου αυτά θα οδηγήσουν στον καθορισμό της μάζας των ενεργών υλικών και των κύριων διαστάσεων του μετασχηματιστή όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.6. Με βάση την απαίτηση του πελάτη ή την ανάγκη για παραγωγή μίας ολόκληρης σειράς μετασχηματιστών ο σχεδιαστής καλείται να επιλέξει κύρια μεγέθη όπως η ισχύς εξόδου, οι τάσεις των δύο τυλιγμάτων, πλήθος φάσεων κλπ. μέσα από ένα πλήθος τυποποιημένων τιμών.

- Εφόσον έχουν επιλεγεί τα παραπάνω, μέσα από υπολογισμούς, όπως αυτούς που προηγήθηκαν στην παράγραφο §3.3 και άλλους, μπορούν να υπολογισθούν οι διαστάσεις, οι οποίες θα είναι εντός των απαιτούμενων ορίων και έτσι θα είναι γνωστή η ποσότητα των ενεργών υλικών, δηλαδή των σιδηρομαγνητικών ελασμάτων και των τυλιγμάτων, όπως επίσης και η τιμή τους.



Σχήμα 3.6: Καμπύλες προσδιορισμού διαμέτρου κορμών πυρήνα του μετασχηματιστή συναρτήσει της ισχύος εξόδου και της τάσης τυλιγμάτων. Μεταξύ των καμπυλών 1 και 2 αντιστοιχεί μετασχηματιστής εύρους τάσεως από 6 έως 10 kV. Μεταξύ των 2 και 3 από 10 έως και 20 kV. Μεταξύ των 3 και 4 από 20 έως και 35 kV. [39, σελ. 43, Fig. 2.3].

- Έτσι, με βάση τα κύρια μεγέθη της μορφολογίας αλλά και των ενεργειακών παραμέτρων του μετασχηματιστή μπορεί να γίνει προσέγγιση των απωλειών, ώστε αυτές να πληρούν τις απαιτήσεις και έτσι να μπορεί να υπολογισθεί και το κόστος λειτουργίας.

- Ως αποτέλεσμα, θα μπορεί να διεξαχθεί και η κατάλληλη διαστασιολόγηση της δεξαμενής ψύξης, του τρόπου ψύξης, ώστε να μπορεί ο μετασχηματιστής να λειτουργεί σε επιτρεπτά όρια θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία του.

- Επιλογή διαφόρων στοιχείων, όπου δεν έχουν τόσο μεγάλη βαρύτητα όπως αυτά που ακολούθησαν παραπάνω, αλλά, αν ληφθούν υπόψη, αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα για την τελική διαμόρφωση, το κόστος, την απόδοση, τη στιβαρότητα και την αξιοπιστία της κατασκευής.

### 3.5.2 Εξάρτηση και αναλογία πολλαπλών παραμέτρων

Κατά τη διεξαγωγή της προκαταρκτικής, αλλά και της τελικής μελέτης, ο σχεδιαστής θα πρέπει να αντιλαμβάνεται τη σχέση και την επιρροή ενός μεγέθους σε κάποιο άλλο, ώστε στο τέλος να μην καταλήξει με κάποιο μέγεθος ή χαρακτηριστικό που θα αντικρούει στους στόχους – απαιτήσεις και συνεπώς όλο το σχέδιο να μην είναι αποτελεσματικό ή οικονομικά εφικτό.

Για τη διατύπωση αυτών των αναλογιών θα πρέπει να ληφθεί ως δεδομένο το γεγονός, ότι μετασχηματιστές διαφορετικών ονομαστικών μεγεθών θα πρέπει να έχουν ανάλογη διαφορά στις γεωμετρικές τους διαστάσεις, όπως έχουν και με τα μεγέθη αυτά. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.3.1), η ένταση μαγνητικού πεδίου  $B_m$  μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, όπως επίσης και η συχνότητα λειτουργίας  $f$ , με αποτέλεσμα η ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E_t$  να είναι ανάλογη της καθαρής επιφάνειας πυρήνα ή διατομής  $A_i$  ή πιο αναλυτικά ανάλογη του τετραγώνου των γραμμικών διαστάσεων  $l$  του πυρήνα:

$$E_t \equiv A_i \equiv l^2 \quad (3.5.1)$$

Η πυκνότητα ρεύματος  $J$  είναι ανάλογη με το λόγο της εντάσεως ρεύματος  $I$  προς τη διατομή του τυλίγματος  $S_c$ . Για δεδομένη πυκνότητα εντάσεως ρεύματος  $J$  προκύπτει ότι η ένταση ρεύματος είναι ανάλογη με τη διατομή του τυλίγματος  $S_c$  ή του τετραγώνου των γραμμικών διαστάσεων  $l$  του τυλίγματος.

$$I \equiv S_c \equiv l^2 \quad (3.5.2)$$

Με τελικό αποτέλεσμα, μέσω των συνδυασμό των σχέσεων (3.5.1) και (3.5.2) η ισχύς εξόδου του μετασχηματιστή να είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη των γραμμικών διαστάσεων:

$$P \equiv E_t \cdot I \equiv l^2 \cdot l^2 \equiv l^4 \quad (3.5.3)$$

Το βάρος των ενεργών υλικών  $G$  είναι ανάλογο του όγκου  $V$  των ίδιων υλικών, εφόσον η πυκνότητα παραμένει σταθερή για δεδομένα υλικά. Αυτό οδηγεί στην αναλογία του βάρους με την τρίτη δύναμη των γραμμικών διαστάσεων  $l$  του μετασχηματιστή και συνδυάζοντας τη σχέση (3.5.3) θα προκύψει:

$$G \equiv V \equiv l^3 \equiv P^{3/4} \quad (3.5.4)$$

Μέσω αυτού, διαπιστώνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς του μετασχηματιστή, η επιβάρυνση στα υλικά δεν αυξάνεται αναλογικά, αλλά με έναν μικρότερο ρυθμό. Αφού ο λόγος  $kg/kVA$  μειώνεται με την αύξηση της ισχύος, συμπερασματικά οι μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος είναι πιο οικονομικοί σε σύγκριση με μικρότερους λόγω της αναλογίας μεταξύ υλικών και ισχύος που προσφέρουν.

Με τη μείωση του λόγου  $kg/kVA$  έρχεται και η μείωση των απωλειών των ενεργών υλικών του πυρήνα, άρα και η μείωση του κόστους λειτουργίας του μετασχηματιστή. Πιο συγκεκριμένα ισχύει:

$$P_i = B_m^2 \cdot G_i \quad (3.5.5)$$

$$P_c = J^2 \cdot G_c \quad (3.5.6)$$

Συνδυάζοντας όλες τις παραπάνω παραμέτρους, όσο αυξάνεται η ισχύς του μετασχηματιστή, τόσο μειώνεται και ο ρυθμός αύξησης του βάρους των ενεργών υλικών και τόσο μειώνονται και περαιτέρω σε αναλογία οι απώλειες κατά τη λειτουργία, με αποτέλεσμα η απόδοση του μετασχηματιστή να αυξάνεται όλο και πιο πολύ.

Με βάση όλα τα προαναφερόμενα, ο μετασχηματιστής που θα προκύψει θα καταλήξει να έχει της παρακάτω ανοχές:

Μετρούμενοι παράμετροι	Ανοχή, σε % των ονομαστικών μεγεθών	Τύπος εφαρμογής
Λόγος μετασχηματισμού	$\pm 0,5$ $\pm 1$	Για όλους τους μετασχηματιστές εκτός αν υπάρχει ειδική απαίτηση Για Μ/Σ με λόγο μετασχηματισμού από 3 και κάτω
Απώλειες άνευ φορτίου	$\pm 15$	Για όλους τους μετασχηματιστές
Απώλειες πλήρους φορτίου	$\pm 10$	Για όλους τους μετασχηματιστές
Συνολικές απώλειες	$\pm 10$	Για όλους τους μετασχηματιστές
Τάση βραχυκύκλωσης	$\pm 10$	Για όλους τους μετασχηματιστές
Ένταση ρεύματος βραχυκύκλωσης	$\pm 30$	Για όλους τους μετασχηματιστές

*Πίνακας 3.3: Ενδεικτικό εύρος ανοχών κατά το σχεδιασμό του μετασχηματιστή. Συχνό φαινόμενο είναι η χρήση της μισής τιμής των ανοχών ώστε σε περίπτωση απρόσμενων αποκλίσεων οι τελικές ανοχές να είναι και πάλι εντός ορίων. [39, σελ. 37, Table 2.3 (Μεταφρασμένος)].*

### 3.6 Διαμόρφωση Πυρήνα

#### 3.6.1 Υπολογισμός διατομής πυρήνα, βημάτων ελασμάτων και συντελεστή πλήρωσης

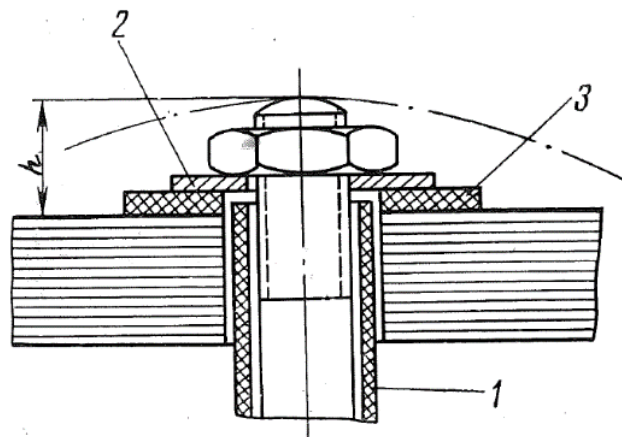
Έχοντας επιλέξει μία αρχική προσεγγιστική τιμή για τη διάμετρο του πυρήνα μέσω του σχήματος 3.6, μαζί το πλήθος των βημάτων, αλλά και το συντελεστή πλήρωσης  $K_{sp}$ , με βάση το σχήμα 3.4, μπορεί να ορισθεί η διατομή του πυρήνα  $A_i$ . Το πλήθος των βημάτων θεωρητικά συμφέρει να έχει μεγάλη τιμή, αλλά, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο §3.3.1, μία πολύ μεγάλη τιμή καθιστά πολύπλοκη και τη διαδικασία της κατασκευής, διότι αυξάνεται το εύρος των διαφορετικών ελασμάτων που απαιτούνται για τη συναρμολόγηση του πυρήνα. Γι' αυτό το λόγο, η διάμετρος του πυρήνα υπολογίζεται με βάση τον πίνακα 3.4.

Έπειτα, θεωρητικά το πλάτος των ελασμάτων μπορεί να υπολογισθεί πολλαπλασιάζοντας τη διάμετρο του πυρήνα με τον αντίστοιχο συντελεστή του κάθε ελάσματος όπως φαίνεται στο σχέδιο 3.4. Στην πραγματικότητα, λόγω της διάθεσης διαφορετικών ελασμάτων με συγκεκριμένες διαστάσεις στο εμπόριο, είναι απαραίτητη η προσαρμογή του σχεδιαστή – κατασκευαστή στη βέλτιστη επιλογή μίας ομάδας διαφορετικών ελασμάτων, που θα έχει ως αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση του συντελεστή πλήρωσης  $K_{sp}$ . Σε περίπτωση που η διάμετρος του πυρήνα ξεπερνά τα 250 mm, θα πρέπει τα ελάσματα να συσφιχθούν μεταξύ τους με κοχλία, ροδέλα και παξιμάδι, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.7. Στο χώρο που θα αξιοποιηθεί από αυτό το σφικτικό μέσο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η μόνωση που θα χρειαστεί να τοποθετηθεί στην τρύπα για την αποφυγή βραχυκύκλωσης των ελασμάτων μέσω του κοχλία, της ροδέλας και του παξιμαδιού.

Διάμετρος πυρήνα D [mm]	Πλήθος βημάτων	Πλήθος αγωγών λαδιού ελασμάτων	Διάμετρος πυρήνα D [mm]	Πλήθος βημάτων	Πλήθος αγωγών λαδιού ελασμάτων
80	4	-	340	8	-
90	5	-	360	8	1
100	6	-	380	8	1
110	6	-	400	10	1
125	6	-	420	10	1
140	6	-	450	13	1
160	6	-	480	13	1
180	6	-	500	13	2
200	6	-	530	14	2
220	7	-	560	14	2
240	7	-	600	15	2
260	7	-	630	15	3
280	7	-	670	15	3
300	7	-	710	15	3
320	8	-	750	15	3

Πίνακας 3.4: Καθορισμός διαμέτρου πυρήνα και αγωγών λαδιού με βάση το πλήθος βημάτων των ελασμάτων. [39, σελ. 231, Table 14.1 (Μεταφρασμένος)].

Λόγω του ότι μόνο οι κορμοί του μετασχηματιστή φέρουν πάνω τους τυλίγματα έτσι ώστε να ενσωματώνονται όσο πιο κοντά γίνεται στα τυλίγματα για την αποφυγή αύξησης της μαγνητικής αντίστασης, τα ζυγώματα αυτού δεν χρειάζεται να έχουν την ίδια γεωμετρική μορφή εφόσον μπορεί να επιτευχθεί η ίδια μαγνητική λειτουργία που απαιτείται από αυτούς έχοντας απλούστερο σχήμα, δηλαδή λιγότερα βήματα ελασμάτων, το οποίο θα φέρει τα ίδια λειτουργικά αποτελέσματα αλλά θα μειώσει και κατά ένα ποσό το ολικό κόστος κατασκευής του πυρήνα. Για μικρούς μετασχηματιστές, τύπου πλαισίου I, τα ζυγώματα μπορεί να έχουν πλήθος βήματος ίσο με 1, δηλαδή να έχουν ορθογώνια μορφή. Όσο μεγαλώνει το μέγεθος του μετασχηματιστή, τόσα παραπάνω βήματα ελασμάτων έχουν τα ζυγώματα του και τόσο πιο πολύ προσεγγίζουν το πλήθος βημάτων ελασμάτων των κορμών του πυρήνα.



Σχήμα 3.7: Σύστημα σύσφιξης ελασμάτων για διάμετρο μεγαλύτερη των 250 mm. Όπου 1) Μονωτικό χαρτί βακελίτη, 2) Ροδέλα και 3) Μονωτικό υλικό για την αποφυγή βραχυκύκλωσης. [39, σελ. 233, Fig 14.2].

Σε περίπτωση που το ζυγώμα είναι ορθογώνιας μορφής ή ενός με βήματος ελασμάτων ίσο με δύο η διάμετρος του ζυγώματος θα πρέπει να αυξηθεί, ώστε η ολική ένταση μαγνητικού πεδίου να είναι ίση η μεγαλύτερη με αυτήν των κορμών για τον περιορισμό των απωλειών δινορρευμάτων. Η αύξηση αυτή είναι ίση με 10% - 15% για ζυγώματα ορθογώνιας μορφής και ίση με περίπου 5% για το ζυγώμα διπλού βήματος. Η αύξηση αυτή προτείνεται ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου τα ελάσματα είναι ψυχρής έλασης και αναλογικά οι απώλειες δινορρευμάτων σε σύγκριση με αυτές των ελασμάτων θερμής έλασης είναι σημαντικά μεγαλύτερες.

### 3.6.2 Υπολογισμός βάρους πυρήνα

Για τον καθορισμό του βάρους του πυρήνα θα πρέπει να είναι γνωστά βασικά μεγέθη του, όπως η διατομή του πυρήνα  $A_i$ , δηλαδή των κορμών του, η διατομή των ζυγωμάτων του πυρήνα  $A_j$  εάν είναι διαφορετική από αυτή των κορμών, το μήκος του μετασχηματιστή  $L$  και η απόσταση  $D$  που πρόκειται για την απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο γειτονικών κορμών σύμφωνα με το σχήμα 3.1.

Οι τιμές  $L$  και  $D$ , υπολογίζονται με βάση τη διάταξη των τυλιγμάτων στο χώρο του παραθύρου του μετασχηματιστή. Η τιμή  $L$  είναι ίση με άθροισμα του μήκους των τυλιγμάτων  $L_{wdg}$  και το μήκος του διάκενου μεταξύ των τυλιγμάτων και των κορμών  $l_{wdg}$  του μετασχηματιστή από την άνω και την κάτω πλευρά, άρα δύο φορές. Το διάκενο  $l_{wdg}$  εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ, τις ονομαστικές τάσεις των τυλιγμάτων οι οποίες καθορίζουν και τα επιτρεπτά όρια τάσης σε περίπτωση υπερτάσεων. Η απόσταση  $D$  είναι ίση με την εξωτερική διάμετρο του τυλίγματος Υ.Τ. συν την απόσταση διακένου που υπάρχει μεταξύ δύο γειτονικών τυλιγμάτων Υ.Τ. αν πρόκειται για κυλινδρική διάταξη. Σε περίπτωση δισκοειδούς διατάξεως τυλιγμάτων υπολογίζεται η μέγιστη εξωτερική διάμετρος των τυλιγμάτων χαμηλής και υψηλής τάσης και προστίθεται και πάλι το διάκενο μεταξύ των γειτονικών τυλιγμάτων των δύο επιμέρους κορμών. Έτσι το συνολικό βάρος των κορμών του πυρήνα  $G_i$  θα είναι ίσο με:

$$G_i = N \cdot \gamma_{st} \cdot A_i \cdot L \cdot 10^3 \text{ kg} \quad (3.6.1)$$

Όπου:

- $N$ : το πλήθος των κορμών του μετασχηματιστή,
- $\gamma_{st}$ : το ειδικό βάρος του σιδηρομαγνητικού υλικού. Όπου για θερμής έλασης είναι ίσο με  $7,55 \text{ kg/dm}^3$  και για ψυχρής έλασης ίσο με  $7,65 \text{ kg/dm}^3$ ,
- $A_i$ : η διατομή του κορμού σε  $\text{cm}^2$ ,
- $L$ : το ύψος του κορμού, δηλαδή το μήκος του πυρήνα σε  $\text{cm}$ .

Η σχέση 3.6.1 ισχύει για μετασχηματιστή με ορθογώνιο κορμό ή κορμό βημάτων, όπου αυτά έχουν τοποθετηθεί εξωτερικά του πυρήνα. Συνιστάται λόγω της περίπλοκης δομής ζυγωμάτων ο υπολογισμός του συνολικού βάρους του ζυγώματος  $G_y$  για μεγάλο πλήθος βημάτων να υπολογίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα. Στο βάρος  $G'_y$  όπου αντιστοιχεί στο βάρος των κυρίων τμημάτων του ζυγώματος και το βάρος  $G''_y$  που αντιστοιχεί στα τμήματα στις γωνίες του πυρήνα. Τα βάρη αυτά για έναν τριφασικό μετασχηματιστή θα είναι ίσα με:

$$G'_y = 4 \cdot \gamma_{st} \cdot A_j \cdot H \cdot 10^{-3} \text{ kg} \quad (3.6.2)$$

$$G''_y = 2 \cdot \gamma_{st} \cdot A_i \cdot l_y \cdot 10^{-3} \text{ kg} \quad (3.6.3)$$

Όπου  $l_y$  είναι το ύψος του ζυγώματος, δηλαδή το πλάτος των ελασμάτων σε  $\text{cm}$ .

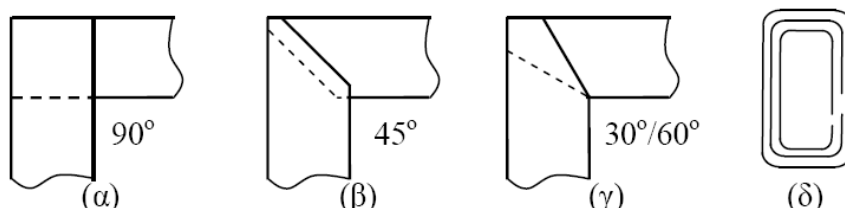
Για ζυγώματα πολλαπλών βημάτων συνιστάται η καταμέτρηση του βάρους των γωνιών ξεχωριστά για κάθε στοίβα μετρώντας πρώτα τον όγκο κάθε στοίβας.

### 3.6.3 Χαρακτηριστικά Σιδηρομαγνητικού υλικού

Όπως έχει προαναφερθεί, τα κράματα σιδήρου που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ελασμάτων, πάχους 0,35 και 0,5 mm, μπορεί να είναι είτε προϊόντα θερμής ή ψυχρής έλασης πλέον όμως προτιμάται κατά την πλειοψηφία των περιπτώσεων προϊόντα ψυχρής και όχι τόσο θερμής. Αυτό συμβαίνει λόγω των καλύτερων μαγνητικών και μηχανικών ιδιοτήτων που προσφέρουν, όπως η αυξημένη μαγνητική επαγωγή στον πυρήνα. Πιο συγκεκριμένα τα ελάσματα θερμής έλασης και πάχους 0,5 mm επέτρεπαν μέγιστη μαγνητική επαγωγή έως και 1,4 – 1,45 T. Πλέον ελάσματα ψυχρής



έλασης και πάχους 0,35 mm επιτρέπουν μέγιστη μαγνητική επαγωγή έως και 1,6 – 1,7 T. Η αύξηση αυτή βοηθάει στην εξοικονόμηση υλικών, αφού τα επιθυμητά αποτελέσματα μπορούν να καλυφθούν με μικρότερη αναλογία υλικού. Βέβαια η αυξημένη επίδοση των ελασμάτων ψυχρής έλασης συνοδεύεται από μία αύξηση κόστους του υλικού, λόγω της πολύπλοκης κατασκευής, του κατά 25% - 35% έναντι της θερμής έλασης. Επιπλέον θετικό χαρακτηριστικό των ελασμάτων ψυχρής έλασης είναι το γεγονός ότι οι απώλειες δινορρευμάτων μειώνονται και η διαπερατότητα αυξάνεται, αν κατά την έλαση προσανατολιστούν οι κόκκοι του υλικού, ώστε να έχουν την ίδια κατεύθυνση με της μαγνητικές γραμμές του. Για αυτό το λόγο προτιμάται στα σημεία αλλαγής διευθύνσεως, δηλαδή από την εναλλαγή μεταξύ ζυγώματος και κορμού, τα ελάσματα να τοποθετούνται υπό γωνία 45°, όπως εμφανίζεται και στο σχήμα 3.8, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται περαιτέρω οι απώλειες των δινορρευμάτων.



Σχήμα 3.8: Τοποθέτηση ελασμάτων κατά την ένωση κορμών και ζυγωμάτων σε στοιβαχτό πυρήνα κατά (α) 90°, (β) 45°, (γ) 30°/60° και (δ) ειδική κατασκευή τυλιχτού πυρήνα. [6, σελ. 9, Σχήμα 2.9].

Το κάθε έλασμα μονώνεται και από τις δύο πλευρές του με μονωτικό βερνίκι μέσω επιχρίσματος ή με λεπτή στρώση εφύλαξης μερικών μm για την επίτευξη μεγάλου συντελεστή πλήρωσης κατά τη στοίβαξή τους στον πυρήνα. Η μόνωση των ελασμάτων μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλαπλά στρώματα αν απαιτείται για την επίτευξη συγκεκριμένων μονωτικών ιδιοτήτων, βέβαια όσο πιο παχύ γίνεται το στρώμα της μόνωσης, τόσο μειώνεται ο συντελεστής πλήρωσης, διότι η ποσότητα του σιδηρομαγνητικού υλικού στο περίγραμμα μειώνεται λόγω της αύξησης της μόνωσης.

Σιδηρομαγνητικό υλικό υπό την μορφή	Τύπος μόνωσης	Συντελεστής πλήρωσης για πάχος ελάσματος [mm]	
		0,5	0,35
Φύλλων	Χωρίς μόνωση	0,97 - 0,98	0,95 - 0,96
	Μονή στρώση βερνικιού	0,95 - 0,96	0,93 - 0,94
	Διπλή στρώση βερνικιού	0,93 - 0,94	0,91 - 0,92
	Τριπλή στρώση βερνικιού	0,91 - 0,92	0,89 - 0,90
Ρολών	Επίστρωση θερμικής αντοχής	-	0,95 - 0,96
	Επίστρωση θερμικής αντοχής και μονή στρώση βερνικιού	-	0,93 - 0,94

Πίνακας 3.5: Συντελεστής πλήρωσης  $K_{sp}$  για διάφορους τύπους μονώσεων όπως επίσης και διαφορετικά πάχη ελασμάτων. [39, σελ. 177, Table 11.1 (Μεταφρασμένος)].

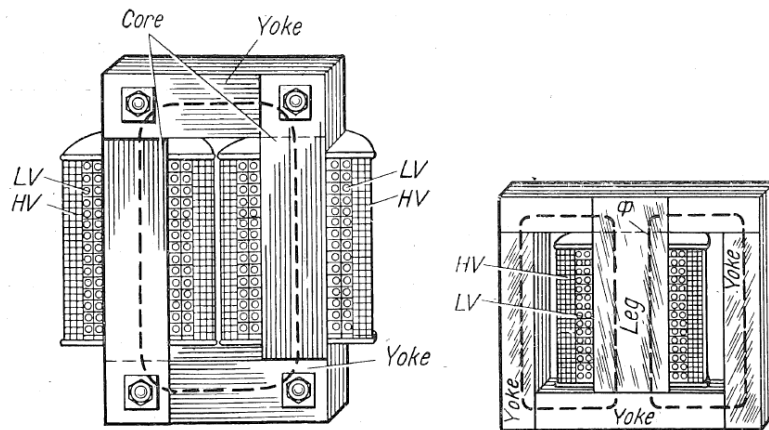
Κατά την επεξεργασία των ελασμάτων απαιτείται χρήση αιχμηρών εργαλείων π.χ. κοπτικά εργαλεία με διαμάντι, για την αποφυγή δημιουργίας γρεζιών που θα μπορούν να αλλοιώσουν τη μόνωση που θα εφαρμοστεί σε αυτά και να προκαλέσουν βραχυκύκλωμα μεταξύ τους και να υπάρξει αύξηση των απωλειών.



### 3.6.4 Τύποι πυρήνων μονοφασικών, τριφασικών μετασχηματιστών και τύποι ενώσεων

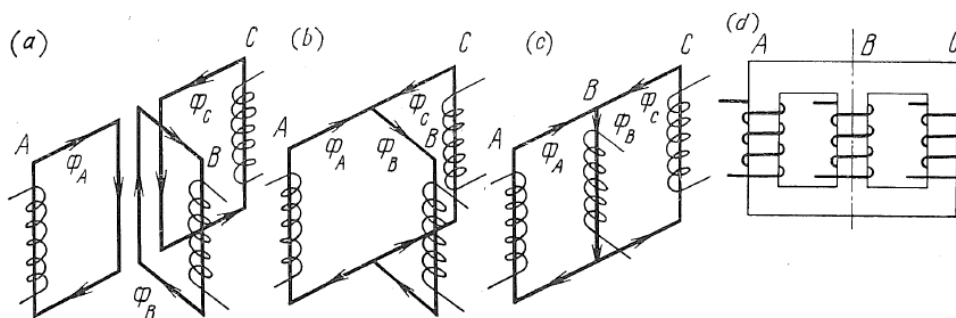
Κατασκευαστικά οι μονοφασικοί μετασχηματιστές κατηγοριοποιούνται στις εξής δύο κατηγορίες:

1. Μετασχηματιστές τύπου **πυρήνα (core type)** ή τυλιχτός τύπος. Σε αυτήν την κατηγορία, για τα δύο τυλίγματα του μετασχηματιστή, Χ.Τ. και Υ.Τ. αντίστοιχα, χωρίζονται κατά το ήμισυ το καθένα και τοποθετούνται μαζί σε κάθε κορμό του μετασχηματιστή. Κατά προτίμηση το τυλίγμα της χαμηλής τάσης είναι αυτό που τυλίγεται γύρο από τον κορμό και το τυλίγμα υψηλής τάσης τυλίγεται γύρο από αυτό της χαμηλής τάσης για λόγους μονωτικής προστασίας αλλά και μαγνητικής διαπερατότητας. Έπειτα στους δύο κορμούς τοποθετούνται από πάνω και από κάτω δυο ζυγώματα τα οποία κλείνουν το μαγνητικό κύκλωμα δημιουργώντας μία ορθογώνια μορφή στον πυρήνα του μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.9: Μονοφασικοί μετασχηματιστές τύπου πυρήνα (αριστερά) και τύπου μανδύα – κελύφους (δεξιά). [39, σελ. 178, Figure 11.2].

2. Μετασχηματιστές τύπου **μανδύα – κελύφους (shell type)**. Πρόκειται για κατασκευή με τρεις κορμούς όπου τα τυλίγματα σε αυτή την περίπτωση εγκαθίστανται στο μεσαίο κορμό και με δύο ζυγώματα κλείνει από πάνω και από κάτω το μαγνητικό κύκλωμα. Λόγω του ότι η μαγνητική ροή διαρρέει από το μεσαίο κορμό και διαχωρίζεται ισάξια στους άλλους δύο, η διατομή του είναι σχεδόν διπλάσια σε σύγκριση με αυτή των δύο άλλων κορμών, αλλά και των ζυγωμάτων.

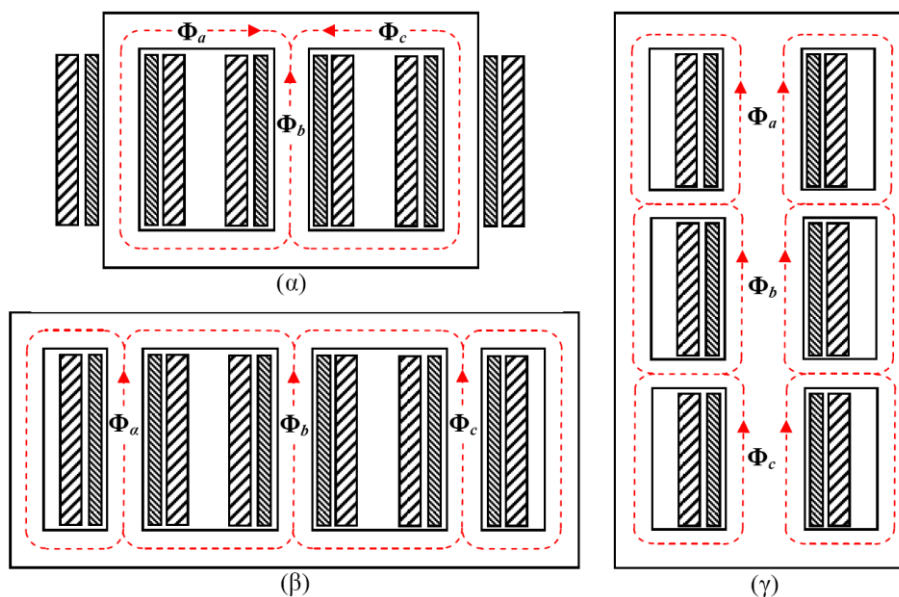


Σχήμα 3.10: Υλοποίηση τριφασικού μετασχηματιστή τύπου πυρήνα από τρεις μονοφασικούς πυρήνες τύπου πυρήνα. [39, σελ. 179, Figure 11.4].

Για τη δημιουργία ενός τριφασικού μετασχηματιστή, μπορούν να αξιοποιηθούν τρεις μονοφασικοί μετασχηματιστές τύπου πυρήνα που μαζί θα συντελέσουν για τη λειτουργία ενός αντίστοιχου τριφασικού. Για την υλοποίηση ενός τριφασικού μετασχηματιστή, δεδομένου ότι ο κάθε ένας από αυτούς φέρει ολόκληρο το τυλίγμα Υ.Τ. και Χ.Τ. μόνο στον έναν κορμό του, ενώ ο άλλος

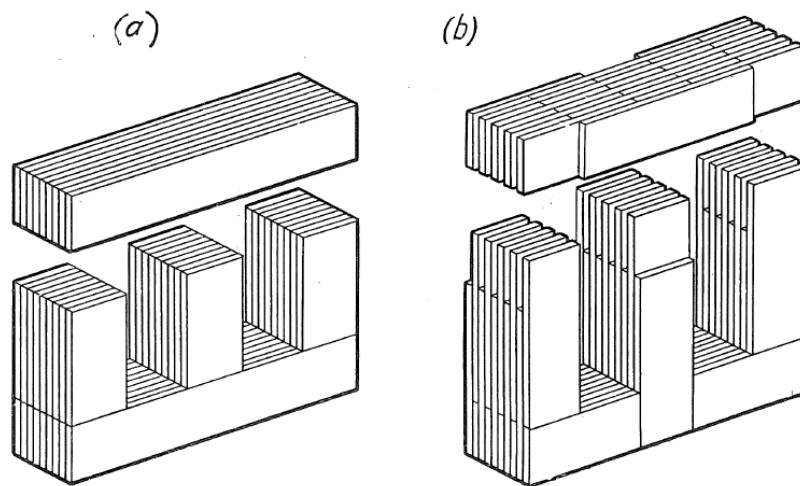
κορμός παραμένει άδειος και τοποθετούνται οι άδαιοι κορμοί όπως εμφανίζεται στο σχήμα 3.10(a). Το φορτίο το οποίο θα εξυπηρετήσει είναι συμμετρικό, άρα και το άθροισμα των μαγνητικών ροών  $\Phi_A, \Phi_B$  και  $\Phi_C$  των τριών άδειων κορμών θα είναι μηδενικό. Έτσι αυτοί οι τρεις άδαιοι κορμοί μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10(b) και να απλοποιηθούν όπως και στο σχήμα 3.10(c). Έτσι η τελική διαμόρφωση του τριφασικού μετασχηματιστή τύπου πυρήνα θα είναι αυτή της μορφής του σχήματος 3.10(d).

Λόγω της μορφολογίας του, ο τριφασικός μετασχηματιστής τύπου πυρήνα έχει μια ανομοιομορφία στις μαγνητικές αντιστάσεις των τριών φάσεων και αυτό διότι η φάση Β, δηλαδή ο ενδιάμεσος κορμός – τύλιγμα διανύει μικρότερη απόσταση για να κλείσει το μαγνητικό κύκλωμα σε σύγκριση με τις φάσεις Α και C. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μαγνητική αντίσταση αυτής της φάσης να είναι 2 – 2,5 φορές μικρότερη από την τιμή των φάσεων Α και C, όπου αυτό συνεπάγεται σε μικρότερες απώλειες πυρήνα στον κορμό Β σε σύγκριση με τις άλλες. Εκτός από τους τριφασικούς μετασχηματιστές τύπου πυρήνα υπάρχουν και τύπου μανδύα – κελύφους όπως αντίστοιχα υπάρχουν και στους μονοφασικούς. Στο σχήμα 3.11(β) και (γ) παρουσιάζονται οι εκδοχές αυτών.



Σχήμα 3.11: Πιθανές εκδοχές τριφασικών μετασχηματιστών τύπου (α) πυρήνα, (β) μανδύα – κελύφους πέντε σκελών, (γ) μανδύα – κελύφους τριών σκελών. [6, σελ. 7, Σχήμα 2.5].

Κατά την ολοκλήρωση της κατασκευής του μετασχηματιστή μπορεί να επιλεχθεί και ο τρόπος ένωσης μεταξύ των κορμών και των ζυγμάτων. Οι δύο πιο συνήθεις μέθοδοι είναι η **θηλυκωτή σύνδεση (interleaved assembly)** κορμού – ζυγώματος, η οποία προτιμάται στις περιπτώσεις μικρών μετασχηματιστών και απεικονίζεται στο σχήμα 3.12(a), και η σύνδεση – σύσφιξη με κοχλία, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως στην παράγραφο §3.6.1 και απεικονίζεται στο σχήμα 3.7, όπου προτιμάται στις περιπτώσεις μεγάλων μετασχηματιστών. Παλαιότερα χρησιμοποιείτο και η αρθρωτή σύνδεση (**butt – joint assembly**), όπου το άνω ζύγωμα τοποθετείται εφαπτομενικά επάνω από τους κορμούς και έτσι γινόταν σύσφιξη μεταξύ αυτών για τη σταθεροποίηση του πυρήνα, αλλά λόγω των τεχνικών προβλημάτων που συνυπάρχουν με αυτή τη σύνδεση αποφεύγεται στις περισσότερες περιπτώσεις η εφαρμογή της. Συγκριτικά η θηλυκωτή σύνδεση απαιτεί λιγότερους σφιγκτήρες, είναι μηχανικά πιο ανθεκτική κατασκευή και η συντήρηση του πυρήνα γίνεται πιο εύκολα συγκριτικά με αυτή της αρθρωτής σύνδεσης.



Σχήμα 3.12: Σύνδεση κορμών και ζυγωμάτων μέσω (α) Αρθρωτής σύνδεσης και (β) Θηλυκωτής σύνδεσης. [39, σελ. 181, Figure 11.6].

### 3.6.5 Υπολογισμός απωλειών κενής λειτουργίας

Οι απώλειες αυτές έχουν αναλυθεί σε θεωρητικό και υπολογιστικό υπόβαθρο στη παράγραφο §2.6.3.2.

## 3.7 Διαμόρφωση τυλιγμάτων

### 3.7.1 Εισαγωγή

Για την υλοποίηση των τυλιγμάτων είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός και η επιλογή κάποιων χαρακτηριστικών, όπου αυτά θα αποφέρουν και τις αντίστοιχες ιδιότητες στα τυλίγματα, όπως τις ηλεκτρικές απώλειες, την αντίστοιχη θερμική συμπεριφορά, τη μηχανική και τη μονωτική αντοχή τους σε βραχυκυκλώματα και σφάλματα του δικτύου, όπως και το συνολικό κόστος κατασκευής. Απαραίτητα για την έναρξη της κατασκευής αυτών είναι οι στρόφες του κάθε τυλίγματος, οι γεωμετρικές διαστάσεις τους, η διατομή των αγωγών, το πλήθος των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού, τα χαρακτηριστικά των μονωτικών μέσων κ.α.

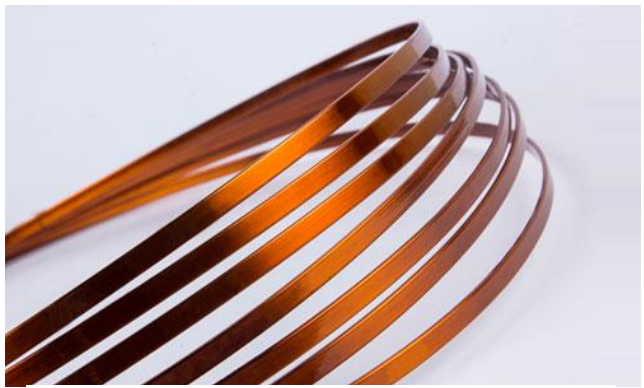
Τα τυλίγματα αποτελούνται από τον αγωγό, το μονωτικό μέσο και άλλα συστήματα προστασίας και σύνδεσης. Ο αγωγός μπορεί να αποτελείται είτε από χαλκό, είτε από αλουμίνιο, με στρογγυλή (σύρμα) ή ορθογώνια (μπάρες) διατομή, όπως απεικονίζεται στις εικόνες 3.3 και 3.4 αντίστοιχα. Οι στρογγυλοί αγωγοί έχουν ως μέγιστοι διάμετρο τα 3 mm με μέγιστη πυκνότητα εντάσεως ρεύματος  $J$  ίση με  $3 A/mm^2$  για ψύξη μέσω λαδιού και  $2 A/mm^2$  για ψύξη μέσω αέρος και για αυτό επιλέγονται σε μετασχηματιστές μικρής ισχύος, ενώ οι ορθογώνιοι αγωγοί έχουν ως μέγιστες διαστάσεις 20 mm στο πλάτος  $b$  και 8 mm στο πάχος  $a$  με μέγιστη πυκνότητα εντάσεως ρεύματος  $J$  ίση με  $4 A/mm^2$  για ψύξη μέσω λαδιού και επιλέγονται σε μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος. Για τους ορθογώνιους αγωγούς η τελική διατομή δεν είναι ίση με αυτή του αποτελέσματος του γινομένου των δύο διαστάσεων  $a$  και  $b$ , διότι στην κατασκευή του τυλίγματος οι γωνίες λειαινούνται με στόχο την αποτροπή της ζημιάς της μονώσεως. Το δε μονωτικό μέσο μπορεί να είναι ένα από αυτά των κατηγοριών μονωτικών μέσων που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2. Τα επιπρόσθετα συστήματα είναι οι ακροδέκτες των τυλιγμάτων, οι ρυθμιστές τάσης για την επίτευξη ενδιάμεση λήψης, όπου είναι σύνηθες η κατασκευή να επιτρέπει μεταβολή ίση με 2,5% ή 5% επί της ονομαστικής τάσης, συστήματα προστασίας κατά των υπερτάσεων και των υπερεντάσεων. Το τελικό τύλιγμα μπορεί να αποτελείται είτε από ένα ενιαίο αγωγό, δηλαδή από ένα πηνίο, είτε από πολλαπλά πηνία – τμήματα αγωγών, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους για τη δημιουργία του. Σημασία επίσης έχει και η φορά

τοποθέτησης του τυλίγματος είτε αυτή είναι δεξιόστροφη, είτε αριστερόστροφη, γιατί ως αποτέλεσμα μεταβάλλεται και η ωριαία ένδειξη φάσης.

Ο στόχος μίας βέλτιστης κατασκευής τυλιγμάτων είναι η αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου στο κενό ανάμεσα στους κορμούς του πυρήνα με βάση τις στροφές του τυλίγματος που απαιτούνται. Ανάλογα με τη διαμόρφωση των τυλιγμάτων μπορούν να επιτευχθούν μειώσεις στις απώλειες λειτουργίας του χαλκού, μείωση του απαιτούμενου χαλκού για την κατασκευή του τυλίγματος, βελτίωση της μηχανικής αντοχής του τυλίγματος, βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς και ψύξης του και επαρκή μονωτική προστασία για τη λειτουργία που προορίζεται να διεξάγει. Βέβαια, μαζί με όλα τα παραπάνω έρχεται σε σύγκρουση και η πολυπλοκότητα της παραγωγής του τυλίγματος που αυξάνει το κόστος και έτσι πρέπει να ληφθεί υπόψη ως σημαντικός παράγοντας για τον κατασκευαστή – σχεδιαστή.



Εικόνα 3.3: Στρογγυλοί αγωγοί [52]

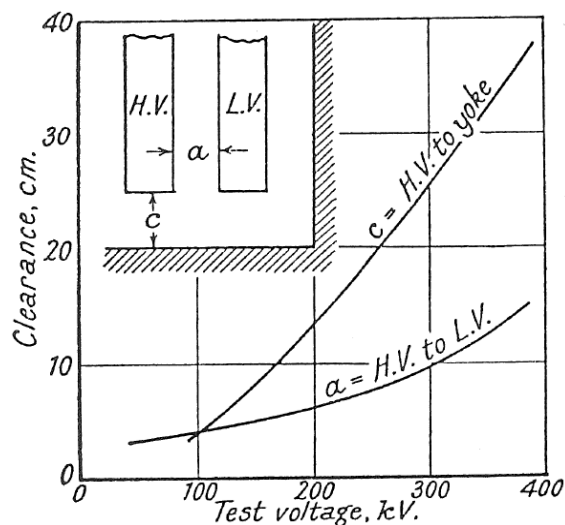


Εικόνα 3.4: Ορθογώνιοι αγωγοί – μπάρες [53]

### 3.7.2 Δομές τυλιγμάτων

#### 3.7.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Κατά την κατασκευή του τυλίγματος πρέπει να οριστούν συγκεκριμένα διάκενα μεταξύ των τυλιγμάτων Υ.Τ. και Χ.Τ. όπως επίσης και μεταξύ του τυλίγματος Υ.Τ και του ζυγώματος του πυρήνα για την αποφυγή διαρροής ρεύματος από το τυλίγμα Υ.Τ. και βραχυκύκλωσης του συστήματος. Αυτά ορίζονται με βάση τη δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής στη μόνωση των τυλιγμάτων. Στο σχήμα 3.13 παρουσιάζονται αυτές οι δύο αποστάσεις συναρτήσει της δοκιμής διηλεκτρικής αντοχής.



Σχήμα 3.13: Διάκενα συναρτήσει της δοκιμής διηλεκτρικής αντοχής όπου (a) τιμή διακένου μεταξύ τυλίγματος Υ.Τ. και Χ.Τ και (c) τιμή διακένου μεταξύ τυλίγματος Υ.Τ. και ζυγώματος πυρήνα. [21, σελ. 144, Figure 97].



Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση των τυλιγμάτων στις διάφορες δομές που μπορούν να αναπτυχθούν όπως και η επεξήγηση της χρήσης και της ιδιαιτερότητας καθεμιάς από αυτές.

### 3.7.2.2 Μονοκόμματα τυλίγματα

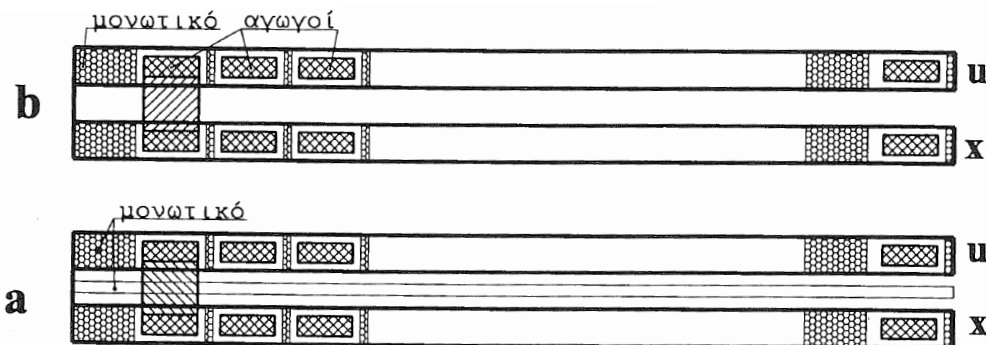
Σε αυτήν την κατηγορία το τύλιγμα αποτελείται από σπείρες τοποθετημένες η μία δίπλα στην άλλη και όλες αυτές μαζί τοποθετούνται πάνω από κάποιες και κάτω από κάποιες άλλες δημιουργώντας αυτή τη δομή, η οποία μπορεί να υλοποιηθεί είτε με επίπεδους – ορθογώνιους αγωγούς, είτε με στρογγυλούς αγωγούς.

#### 1) Μονοκόμματα τυλίγματα επίπεδων αγωγών

Χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές διανομής σε τυλίγματα χαμηλής τάσης και μεσαίων ρευμάτων. Σε περίπτωση μεγάλων επιπέδων τάσεων έως και 30 kV οι στρώσεις πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο και άνω, όπου στους αγωγούς τοποθετείται μονωτικό χαρτί και μεταξύ αυτών πρεσπάν για την περαιτέρω μόνωση. Για αυξημένη ανάγκη ψύξης τοποθετούνται πήχεις πλάτους 10 – 15 mm, με αποτέλεσμα τη δημιουργία καναλιών ενδιάμεσα των στρώσεων για τη ροή του λαδιού και την κάλυψη μεγαλύτερης επιφάνειας των αγωγών. Με την αύξηση των μηκών των τυλιγμάτων απαιτείται και η αντίστοιχη αύξηση του πάχους των καναλιών. Για την πλήρωση των αναγκών σε μεγάλες εντάσεις ρεύματος αυξάνεται το πλήθος των παράλληλων αγωγών ανά σπείρα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το πλάτος της ομάδας (βήμα σπείρας) αυτής, χωρίς όμως αυτό να ξεπερνά τα 40 mm. Επίσης τοποθετούνται σφήνες από πρεσπάν για να μπορεί το τύλιγμα να συσφιχθεί από τις δοκούς συσφίξεων που βρίσκονται στο ύψος των ζυγωμάτων του πυρήνα. Ως αποτέλεσμα αυτής της δομής τυλιγμάτων το ολικό μήκος  $h$  του τυλιγματος θα είναι ίσο με τη σχέση 3.7.1:

$$h = (N + 1) \cdot \beta_{\sigma} + b \quad (3.7.1)$$

Όπου,  $N$  το πλήθος των σπειρών,  $\beta_{\sigma}$  το βήμα σπείρας και  $b$  το μικρό πλάτος της σφήνας που χρησιμοποιείται, αγνοώντας τη γείωση του πάχους μονωτικού λόγω συμπίεσης του τυλιγματος.



Σχήμα 3.14: Μονοκόμματο τύλιγμα επίπεδων αγωγών όπου στην περίπτωση (a) υπάρχει μόνωση μεταξύ των δύο στρώσεων και στην περίπτωση (b) υπάρχει διάυλος. [4, σελ. 30, Σχήμα 24].

Μπορεί να υπολογιστεί στη συνέχεια το μαγνητικό ύψος  $h_m$  του τυλιγματος και εκ μέσω αυτού μπορεί να υπολογιστεί η τάση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή.

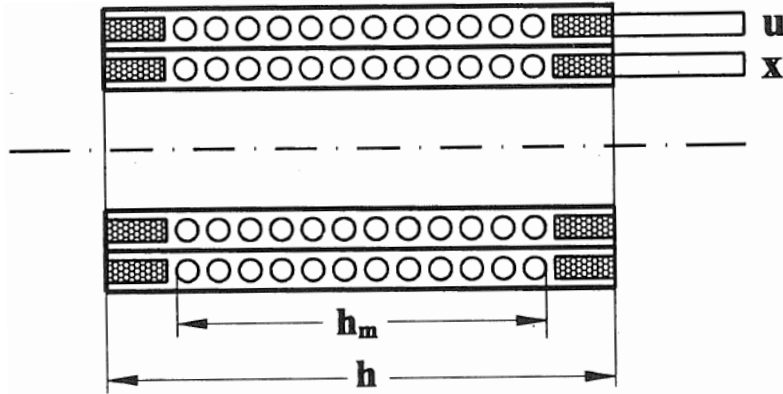
$$h_m = N \cdot \beta_{\sigma} \quad (3.7.2)$$

Πολύ πιθανή πλέον είναι η αντικατάσταση των επίπεδων αγωγών με φύλλα χαλκού ή αλουμινίου. Το πλάτος του κάθε φύλλου ισούται με το μήκος της στήλης του τυλιγματος, ενώ το πάχος έχει εύρος από 0,3 έως 3 mm. Η δομή των φύλλων αυτών προσφέρει βέλτιστη μηχανική αντοχή στις αξονικές δυνάμεις που προκαλούνται από βραχυκυκλώματα, λιγότερες απώλειες δινορρευμάτων λόγω του

μικρού πάχους τους, αλλά ταυτοχρόνως το μειονέκτημα με το μικρό πάχος είναι η μικρή αντοχή στις ακτινικές δυνάμεις.

### 2) Μονοκόμματα τυλίγματα από στρογγυλά σύρματα

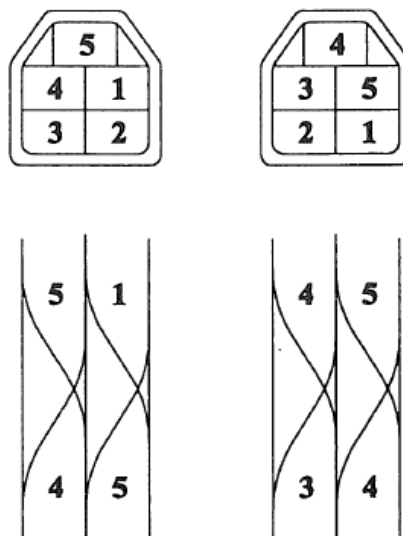
Χρησιμοποιούνται και αυτά με πολλαπλές στρώσεις σε μετασχηματιστές διανομής σε τυλίγματα υψηλής τάσης. Η μόνωση που τοποθετείται μεταξύ των στρώσεων είναι ανάλογη της τάσης ανά στρώση, η οποία είναι ίση με 2 kV/mm κατά την ονομαστική λειτουργία του μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.15: Μονοκόμματο τύλιγμα στρογγυλών αγωγών όπου  $h$  το μήκος του τυλίγματος και  $h_m$  το μαγνητικό ύψος αντίστοιχα. [4, σελ. 33, Σχήμα 29].

### 3) Μονοκόμματα τυλίγματα συνεστραμμένων αγωγών

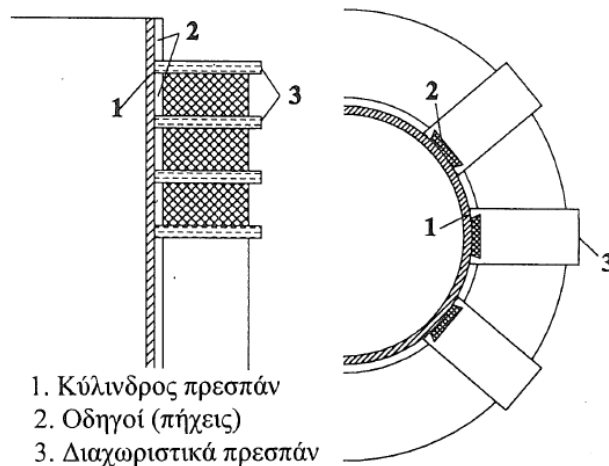
Με την αύξηση του ρεύματος έρχεται και η μεγαλύτερη ανάγκη για τον ισομοιρασμό του. Η δομή αυτή λόγω της τοποθέτησης των αγωγών με τέτοιο τρόπο που συστρέφονται μεταξύ τους δημιουργεί ίσα μήκη μεταξύ των στρώσεων και έτσι επιτυγχάνεται όμοια ηλεκτρική αντίσταση σε όλους τους αγωγούς άρα και όμοια ρεύματα. Η υλοποίηση αυτής της δομής πραγματοποιείται με βοήθεια μηχανής η οποία συστρέφει τους αγωγούς μεταξύ τους, όπως επίσης τους τοποθετεί και την κατάλληλη μόνωση σε δεύτερο στάδιο. Λόγω αυτής της πολυπλοκότητας όμως το κόστος είναι αρκετά υψηλό και έτσι η δομή αυτή χρησιμοποιείται μόνο σε μεγάλους μετασχηματιστές στα τυλίγματα χαμηλής και υψηλής τάσης.



Σχήμα 3.16: Μονοκόμματο τύλιγμα συνεστραμμένων αγωγών. [4, σελ. 34, Σχήμα 30].

### 3.7.2.3 Τυλίγματα μεμονωμένων πηνίων – γαλέτες

Σε περίπτωση όπου το μήκος του τελικού τυλίγματος θα προκύψει να είναι αρκετά μεγάλο, επιλέγονται μεμονωμένα πηνία, τα οποία συνδυάζονται μαζί για να δημιουργηθεί το τυλίγμα και να αποτραπεί η ανάπτυξη μεγάλης τάσης ανά στρώση, με αποτέλεσμα να χρειάζεται μικρότερο πάχος μόνωσης. Επίσης λόγω αυτής της δομής μειώνονται και τα φαινόμενα λυγισμού του τυλίγματος. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στο πρώτο και στο τελευταίο πηνίο που αποτελούν τα άκρα της στήλης και σε αυτά τοποθετείται μονωτικό υλικό διπλού πάχους για μεγαλύτερη αντοχή σε κρουστικές τάσεις. Τοποθετείται επίσης μεταξύ των πηνίων αποστατικό τύπου πρεσπών συγκεκριμένων διαστάσεων ανάλογα με την κατακόρυφη τάση βραχυκύκλωσης και τη μέση διάμετρο της στήλης.

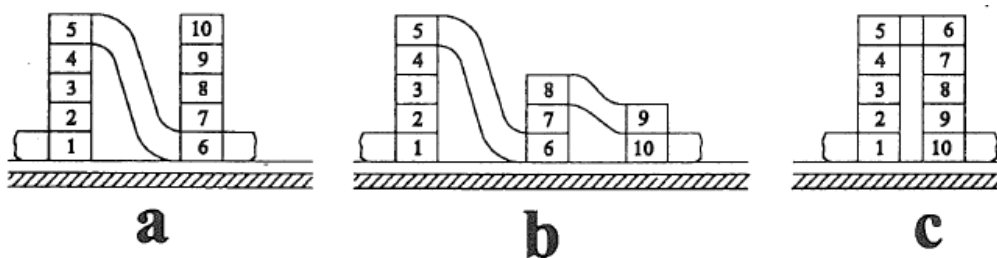


Σχήμα 3.17: Τυλίγμα μεμονωμένων πηνίων. Στα αριστερά απεικονίζεται η πλάγια όψη και στα δεξιά η κάτοψη της στήλης. [4, σελ. 35, Σχήμα 31].

Τα πηνία αυτά μαζί με τις μονώσεις συναρμολογούνται σε έναν μονωτικό κύλινδρο, ο οποίος περιέχει οδηγούς για την τοποθέτησή τους. Ισχύει σε αυτή τη δομή ότι το ύψος της στήλης είναι ίσο με το μαγνητικό ύψος. Για την τελική σύσφιξη τοποθετούνται ξύλινοι δίσκοι στα άκρα της στήλης όπου συσφίγγονται μαζί με τις δοκούς.

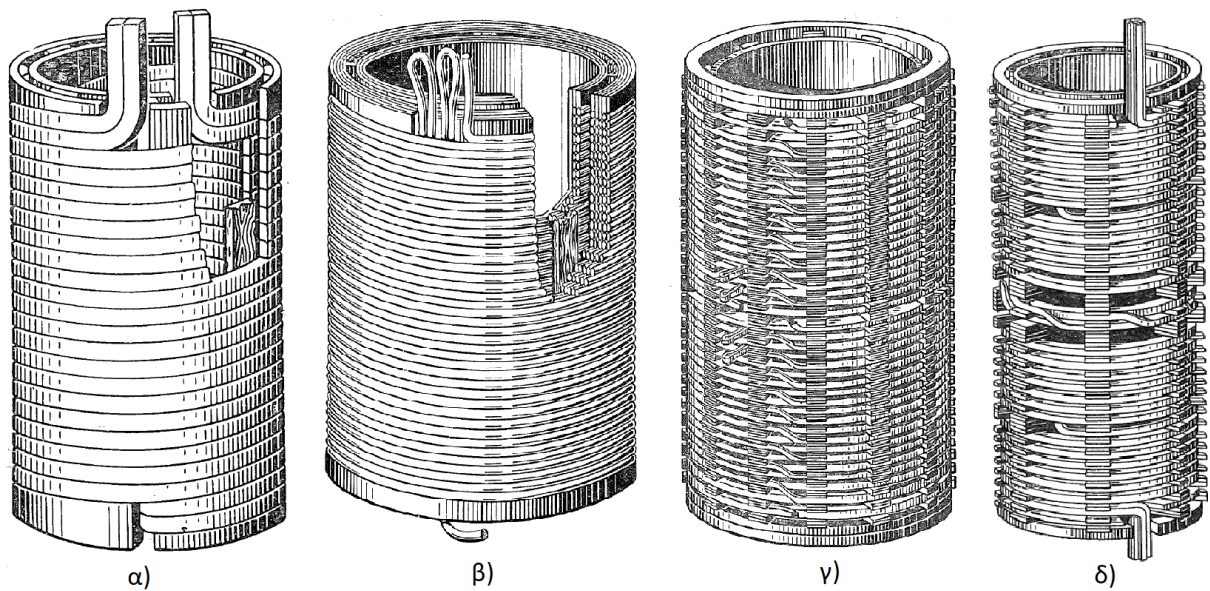
### 3.7.2.4 Τουμπαριστά τυλίγματα

Η δομή αυτή μπορεί να υλοποιηθεί είτε με στρογγυλούς αγωγούς για υψηλές τάσεις και μικρά ρεύματα έτσι ώστε η διατομή των αγωγών να μην ξεπερνούν τα  $7 \text{ mm}^2$ , είτε με επίπεδους αγωγούς σε περίπτωση που τα ρεύματα απαιτούν μεγαλύτερη διατομή του αγωγού. Πρόκειται για πολλαπλούς δίσκους οι οποίοι συνδέονται μεταξύ του είτε σε σειρά, είτε παράλληλα δημιουργώντας έτσι ένα ενιαίο τυλίγμα. Μεταξύ των γειτονικών δίσκων τοποθετούνται μονωτικοί δίσκοι και αποστατικά. Επιλέγεται επίσης για τους δίσκους αναλογία πλάτους – πάχους μεταξύ των τιμών 2:1 – 4:1.



Σχήμα 3.18: Διαδικασία μορφοποίησης τουμπαριστού τυλίγματος [4, σελ. 36, Σχήμα 32].



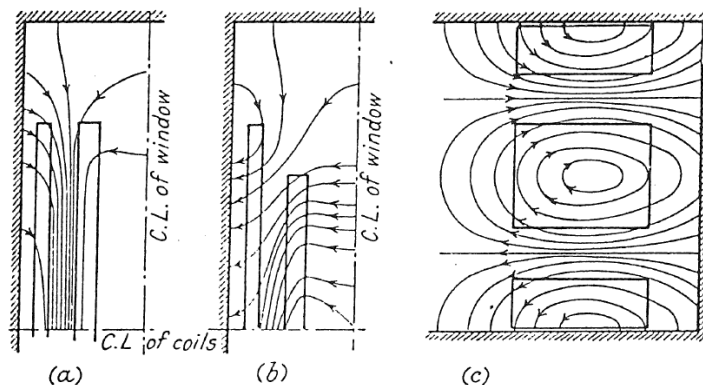


Σχήμα 3.19: Τελικές δομές στηλών για α) Τύλιγμα μονοκόμματων επίπεδων αγωγών δύο στρώσεων [39, σελ. 190, Figure 12.2], β) Τύλιγμα μονοκόμματων στρογγυλών αγωγών δύο στρώσεων [39, σελ. 192, Figure 12.7], γ) Τύλιγμα μεμονωμένων πηνίων [39, σελ. 197, Figure 12.13] και δ) Τύλιγμα μονοκόμματων συνεστραμμένων αγωγών με τρεις συστροφές [39, σελ. 199, Figure 12.18]. Όπως απεικονίζεται στην περίπτωση β) και για γ) η κάθε θηλιά που πραγματοποιεί ο αγωγός πρόκειται και για μία διαφορετική ενδιάμεση λήψη του συνολικού τυλίγματος.

### 3.7.3 Υπολογισμός βασικών παραμέτρων

#### 3.7.3.1 Υπολογισμός αντίδρασης τυλιγμάτων

Ο υπολογισμός της αντίδρασης διαφέρει ανάλογα και με τη δομή των τυλιγμάτων. Παρακάτω αναλύονται οι διαφορετικές περιπτώσεις για τον υπολογισμό αυτών.



Σχήμα 3.20: Μαγνητικές γραμμές κατά την λειτουργία μετασχηματιστή για α) κυλινδρικά τυλίγματα ίσου μήκους β) κυλινδρικά τυλίγματα άνισου μήκους και γ) δισκοειδή τυλίγματα. [21, σελ. 145, Figure 98].

#### 1) Υπολογισμός με κυλινδρικά τυλίγματα ίσου μήκους

Σε αυτήν την περίπτωση, όπως εμφανίζεται και στο σχήμα 3.20α) θα ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τα δύο τυλίγματα του μετασχηματιστή:

Για το πρωτεύον τύλιγμα η επαγωγική αντίδραση  $X_1$  υπολογισμένη σε  $\Omega$  θα είναι ίση με:

$$X_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot N_1^2 \cdot \frac{L_{mt}}{L_c} \cdot \left( \frac{a}{2} + \frac{b_1}{3} \right) \quad (3.7.3)$$

Για το δευτερεύον τυλίγμα η ωμική αντίδραση  $X_2$  θα είναι αντίστοιχα ίση με:

$$X_2 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot N_2^2 \cdot \frac{L_{mt}}{L_c} \cdot \left( \frac{a}{2} + \frac{b_2}{3} \right) \quad (3.7.4)$$

Όπου:

- $f$ : η συχνότητα λειτουργίας σε Hz,
- $\mu_0$ : η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό που είναι ίση με  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ,
- $N_1, N_2$ : οι στροφές του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος αντίστοιχα,
- $L_{mt}$ : το μέσο μήκος των στροφών πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλιγμάτων μαζί,
- $L_c$ : το μήκος του τυλίγματος,
- $a$ : το διάκενο μεταξύ των δύο τυλιγμάτων,
- $b_1, b_2$ : το πλάτος του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος.

Για τον υπολογισμό της συνολικής αντίδρασης γίνεται αναγωγή είτε στο πρωτεύον, είτε στο δευτερεύον. Στην περίπτωση της αναγωγής της αντίδρασης του δευτερεύοντος τυλίγματος στο πρωτεύον ισχύει:

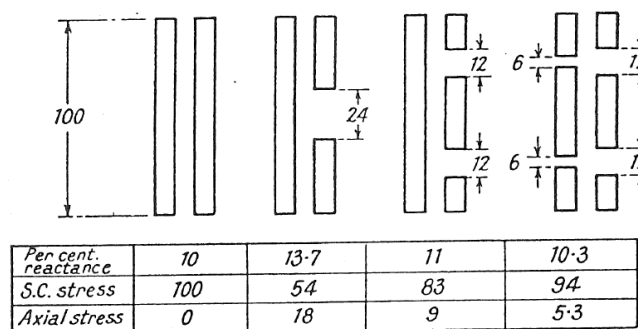
$$X_{eq-p} = X_1 + X'_2 = X_1 + X_2 \cdot \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot N_1^2 \cdot \frac{L_{mt}}{L_c} \cdot \left( a + \frac{b_1 + b_2}{3} \right) \quad (3.7.5)$$

Επίσης οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να αναχθούν και σε ανά μονάδα σχέσεις. Η αντίστοιχη σχέση για την (3.7.3) θα ορίζεται ως:

$$\varepsilon_x = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot I_1 \cdot N_1^2 \cdot L_{mt}}{L_c \cdot V_1} \cdot \left( a + \frac{b_1 + b_2}{3} \right) \quad (3.7.6)$$

## 2) Υπολογισμός με κυλινδρικά τυλίγματα άνισου μήκους

Στην περίπτωση αυτή, ανάλογα και τη δομή των τυλιγμάτων η αντίδραση έχει και το αντίστοιχο ποσοστό σε σύγκριση με αυτής των κυλινδρικών τυλιγμάτων με ίσο μήκος. Παρακάτω ακολουθεί σχήμα που δείχνει τη διαφοροποίηση στο ποσοστό της αντίδρασης, την καταπόνηση σε βραχυκυκλώσεις, όπως και την αξονική καταπόνηση.



Σχήμα 3.21: Αναλογίες για ποσοστό επαγωγικής αντίδρασης (Percent reactance), καταπόνηση βραχυκύκλωσης (S.C. stress) και αξονική καταπόνηση (Axial Stress) διάφορων κυλινδρικών τυλιγμάτων ανόμοιων μηκών σε σύγκριση με αυτών ίσου μήκους. [21, σελ. 148, Figure 101].

## 3) Υπολογισμός με δισκοειδή τυλίγματα

Για τα δισκοειδή τυλίγματα, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.20c) η επαγωγική αντίδραση υπολογίζεται με την σχέση (3.7.7).

$$X_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot 2 \cdot n \cdot (N_{1n}/2)^2 \cdot L_{mt} \cdot \frac{1}{w} \cdot \left( a + \frac{b_1 + b_2}{6} \right) \quad (3.7.7)$$

Και η αντίστοιχη ανά μονάδα σχέση θα είναι ίση με:

$$\varepsilon_x = \frac{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L_{mt} \cdot I_1 \cdot N_1}{w \cdot n \cdot E_t} \cdot \left( a + \frac{b_1 + b_2}{6} \right) \quad (3.7.8)$$

Όπου  $w$  το πλάτος των δισκοειδών τυλιγμάτων,  $n$  το πλήθος των δίσκων του τυλίγματος.

### 3.7.3.2 Υπολογισμός ολικών σπειρών και σπειρών ενδιάμεσων λήψεων

Αξιοποιώντας τη σχέση (3.3.1) και εφαρμόζοντας την αντίστοιχη φασική τάση  $V_\phi$  του τυλίγματος στη σχέση μπορεί μέσω αυτής να υπολογισθεί το πλήθος των σπειρών  $N$  στο κάθε τύλιγμα. Για αυτήν την περίπτωση ισχύει η σχέση (3.7.9) :

$$V_\phi = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot B_{leg} \cdot A_{leg} \cdot 10^{-4} \quad (3.7.9)$$

Όπου:

- $f$ : Συχνότητα λειτουργίας σε Hz,
- $B_{leg}$ : Ένταση μαγνητικού πεδίου του κορμού που είναι τοποθετημένο το τύλιγμα σε T,
- $A_{leg}$ : Διατομή του κορμού που είναι τοποθετημένο το τύλιγμα σε  $cm^2$ .

Έτσι λύνοντας ως προς το πλήθος των στροφών  $N$  και εφαρμόζοντας συχνότητα λειτουργίας  $f$  ίση με 50 Hz η σχέση πλέον έχει την εξής μορφή:

$$N = \frac{V_\phi}{4,44 \cdot 50 \cdot B_{leg} \cdot A_{leg} \cdot 10^{-4}} = \frac{V_\phi \cdot 10^4}{222 \cdot B_{leg} \cdot A_{leg}} \quad (3.7.10)$$

Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο §3.6.3 για ελάσματα ψυχρής έλασης μπορεί να εφαρμοσθεί ένταση μαγνητικού πεδίου έως και 1,7 T. Εφαρμόζοντας την τιμή αυτή και υπολογίζοντας πρώτα το πλήθος των στροφών του τυλίγματος X.T.  $N_{LV}$  η σχέση πλέον είναι όπως ακολουθεί παρακάτω:

$$N_{LV} = \frac{V_\phi \cdot 10^4}{222 \cdot 1,7 \cdot A_{leg}} \quad (3.7.11)$$

Το τελικό αποτέλεσμα στρογγυλοποιείται στον πιο κοντινό ακέραιο αριθμό και μέσω αυτού του αποτελέσματος και του λόγου τάσεων μεταξύ των τυλιγμάτων Y.T. και X.T. υπολογίζεται έπειτα το πλήθος σπειρών του τυλίγματος Y.T.  $N_{HV}$ .

$$N_{HV} = N_{LV} \cdot \frac{(V_{\phi,HV})}{(V_{\phi,LV})} \quad (3.7.12)$$

Έτσι μπορεί να υπολογιστούν οι στροφές  $N_{reg,HV}$  που εμπεριέχονται σε κάθε ενδιάμεση λήψη αν επιλεχθούν ενδιάμεσες λήψεις, οι οποίες μεταβάλλουν την τάση εξόδου κατά το 5% της ονομαστικής τάσης του τυλίγματος της Y.T. ή της X.T. αντίστοιχα. Στην προκειμένη περίπτωση η σχέση (3.7.13) υπολογίζει για το τύλιγμα Y.T.

$$N_{reg,HV} = \pm 0,05 \cdot N_{HV} \quad (3.7.13)$$

### 3.7.3.3 Υπολογισμός βάρους του ενεργού υλικού των τυλιγμάτων

Για την εκτίμηση του κόστους του καθαρού ενεργού υλικού του τυλίγματος χρειάζεται να είναι γνωστή η απαιτούμενη ποσότητα του. Έτσι μέσω της παρακάτω σχέσης μπορεί να βγει μια

ικανοποιητική τιμή για τον υπολογισμό του βάρους του ενεργού υλικού, δηλαδή του χαλκού ή του αλουμινίου:

$$G_{cu/al} = \gamma \cdot V = \gamma \cdot q \cdot N \cdot l_m \cdot 10^{-5} \text{ kg} \quad (3.7.14)$$

Όπου:

- $\gamma$ : το ειδικό βάρος του χαλκού που είναι ίσο με  $8,9 \text{ kg/dm}^3$  ή του αλουμινίου που είναι ίσο με  $2,7 \text{ kg/dm}^3$ ,
- $q$ : η διατομή των αγωγών σε  $\text{mm}^2$ ,
- $N$ : το πλήθος των σπειρών,
- $l_m$ : το μέσο μήκος των σπειρών σε  $\text{cm}$ .

### 3.7.3.4 Υπολογισμός απωλειών χαλκού

#### 1) Ολικές απώλειες χαλκού

Οι ολικές απώλειες χαλκού σε ένα μετασχηματιστή μπορούν να υπολογισθούν με την παρακάτω σχέση:

$$P'_{Cu} = P_{Cu} \cdot (1 + z) + P_{kA} + P_{kD} \quad (3.7.15)$$

Όπου:

- $P'_{Cu}$ : Οι ολικές απώλειες χαλκού,
- $P_{Cu}$ : Οι θερμικές απώλειες χαλκού,
- $z$ : Προσαυξήσεις απωλειών χαλκού λόγω δινορρευμάτων,
- $P_{kA}$ : Πρόσθετες απώλειες που οφείλονται σε διάφορα μεταλλικά μέρη και συμπεριλαμβάνουν τις απώλειες στο δοχείο,
- $P_{kD}$ : Απώλειες στο κάλυμμα του δοχείου του μετασχηματιστή.

#### 2) Θερμικές απώλειες χαλκού

Οι θερμικές απώλειες χαλκού  $P_{Cu}$  που αναφέρθηκαν στην παραπάνω σχέση μπορούν να υπολογιστούν μέσω της διαδικασίας που ακολουθεί παρακάτω:

$$P_{Cu} = I^2 \cdot R = J^2 \cdot q^2 \cdot \rho \cdot \frac{l_{Cu}}{q} \quad (3.7.16)$$

Μετατρέπεται η σχέση του βάρους ως προς τη διατομή του αγωγού:

$$G_{Cu} = q \cdot l_{Cu} \cdot \gamma \Rightarrow q = \frac{G_{Cu}}{l_{Cu} \cdot \gamma} \quad (3.7.17)$$

$$P_{Cu} = J^2 \cdot \rho \cdot \frac{G_{Cu}}{l_{Cu} \cdot \gamma} \cdot l_{Cu} = J^2 \cdot \frac{1}{\kappa \cdot \gamma} \cdot G_{Cu} \quad (3.7.18)$$

$$P_{Cu} = J^2 \cdot \frac{1}{\kappa \cdot \gamma} \cdot G_{Cu} \quad (3.7.19)$$

Όπου:

- $J$ : η πυκνότητα της έντασης ρεύματος στους αγωγούς σε  $\text{A/mm}^2$ ,
- $\rho$ : η ειδική αντίσταση του αγωγού σε  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ,
- $\kappa$ : η ειδική αγωγιμότητα του αγωγού σε  $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ,
- $\gamma$ : το ειδικό βάρος του χαλκού που είναι ίσο με  $8930 \text{ kg/m}^3$  ή του αλουμινίου που είναι ίσο με  $2700 \text{ kg/m}^3$ ,
- $G_{Cu}$ : το βάρος του αγωγού σε  $\text{kg}$ .

- $l_{Cu}$ : Το μήκος του ρευματοφόρου αγωγού των τυλιγμάτων σε  $m$ .

Οι απώλειες αυτές πρέπει να αντιστοιχούν σε αυτές που θα ισχύουν για λειτουργία στους  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  σύμφωνα με το πρότυπο IEC/76-1/1993, κατηγορία A. Έστω ότι ορίζεται ως συντελεστής  $k$  η παρακάτω σχέση που προκύπτει από τη σχέση (3.7.19):

$$k = \frac{10^3}{\kappa \cdot \gamma} \quad (3.7.20)$$

Και το  $\kappa$  θα ισοδυναμεί με:

$$\kappa = \kappa_{20} \cdot \frac{1}{1 + \alpha \cdot (\theta - 20)} \quad (3.7.21)$$

Όπου:

- $\alpha$ : ο συντελεστής θερμοκρασίας χαλκού στους  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ισούται με  $\frac{1}{255\text{ }^{\circ}\text{C}}$  και
- $\theta$ : η θερμοκρασία τυλίγματος σε  $^{\circ}\text{C}$ .

Τότε το  $k$  από τη σχέση (3.7.20) θα είναι πλέον ίσο με:

$$k = \frac{10^3}{\kappa_{20} \cdot \gamma} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - 20)] \quad (3.7.22)$$

Ο συντελεστής  $k$  για χαλκό σε θερμοκρασία  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  είναι ίσος με 2,4.

Με αποτέλεσμα η σχέση (3.7.19) να καταλήγει με την εξής τελική μορφή για θερμοκρασία  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$P_{Cu} = k \cdot J^2 \cdot G \quad (3.7.23)$$

### 3) Απώλειες δινορρευμάτων στους αγωγούς

Από το φαινόμενο των δινορρευμάτων προκαλούνται και επιπλέον δινορρεύματα μέσα στους αγωγούς τα οποία προκαλούν εκτοπίσεις ρευμάτων και αυτό ως αποτέλεσμα περαιτέρω αύξηση θερμοκρασίας του αγωγού σε σχέση με αυτή που δημιουργεί ήδη το ρεύμα που ρέει σε αυτούς. Για αυτό οι απώλειες αυτές διατυπώνονται ως μία μείωση του πάχους του αγωγού. Οι απώλειες αυτές είναι άμεσα συνδεδεμένες με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού και για αυτό υπολογίζονται και ενσωματώνονται μέσα στο συντελεστή  $z$  που αναφέρθηκε στη σχέση (3.7.15). Η σχέση για τον υπολογισμό των απωλειών δινορρευμάτων στους αγωγούς ακολουθεί παρακάτω:

$$z = (0,961 \cdot b_{red})^2 \cdot \frac{m^2 - 0,2}{9} \quad (3.7.25)$$

Όπου το μειωμένο πλάτος του αγωγού λόγω εκτοπίσεως ρεύματος  $b_{red}$  υπολογίζεται σε  $mm$  και είναι ίσος με:

$$b_{red} = b \cdot \sqrt{\frac{m \cdot h}{l_w} \cdot \frac{f}{50} \cdot \frac{\kappa}{46,87}} \quad (3.7.26)$$

Όπου  $h$  το πλάτος του αγωγού,  $b$  το πάχος του αγωγού,  $m$  το πλήθος των στρώσεων,  $l_w$  το ύψος του τυλίγματος,  $f$  η συχνότητα λειτουργίας και  $\kappa$  η ειδική αγωγιμότητα.

### 4) Απώλειες δινορρευμάτων στους εκτός τυλίγματος αγωγούς

Οι απώλειες δινορρευμάτων εκφράζονται μέσω της σχέσης (3.7.27).

$$P_{kA} = \frac{e \cdot k \cdot j^2 \cdot G_{LV}}{N_{LV}} \quad (3.7.27)$$

Όπου:

- $e$ : ο συντελεστής για τον προσδιορισμό των επιπρόσθετων απωλειών από τα μεταλλικά μέρη και τις απώλειες στο δοχείο του μετασχηματιστή,
- $k$ : ο συντελεστής αγωγιμότητας του χαλκού στους 75 °C που είναι ίσο με 2,4,
- $j$ : η πυκνότητα της έντασης ρεύματος στο τύλιγμα χαμηλής τάσεως σε  $A/mm^2$ ,
- $G_{LV}$ : το βάρος του τυλίγματος χαμηλής τάσης,
- $N_{LV}$ : το πλήθος των σπειρών του τυλίγματος χαμηλής τάσης.

Ο συντελεστής  $e$  είναι ανάλογος του ρεύματος που ρέει στο τύλιγμα χαμηλής τάσης και υπολογίζεται από τον πίνακα 3.6.

Ρεύμα χαμηλής τάσεως σε A	Συντελεστής e
30 - 100	1,04
101 - 400	1,05
401 - 700	1,07
701 - 1200	1,09
1201 - 1500	1,12
1501 - 1800	1,15
1801 - 2400	1,20
2401 - 3000	1,26

Πίνακας 3.6: Πίνακας προσδιορισμού συντελεστή  $e$  για τις επιπρόσθετες απώλειες. [4, σελ. 39, Πίνακας 5].

### 5) Απώλειες καλύμματος

Πρόκειται για απώλειες που δημιουργούνται πάνω στους διαπεραστήρες, στους ακροδέκτες στις ράβδους βραχυκύκλωσης και στο κάλυμμα του μετασχηματιστή. Για τον περιορισμό αυτών των απωλειών, μεταξύ των διαπεραστήρων, προστίθεται ειδικός χάλυβας με αντιμαγνητικές ιδιότητες. Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται προσεγγιστικά με τη βοήθεια του πίνακα 3.7.

Μέση απόσταση A σε mm μεταξύ διαπεραστήρων	Ένταση ρεύματος σε A	Απώλειες $P_{LD}$ σε W	
		Χωρίς αντινίτη	Με αντινίτη
	50	0	
	100	20	
	200	50	
150	400	160	
	909		160
	1443		290
165	2390		560

Πίνακας 3.7: Πίνακας εμπειρικού υπολογισμού των απωλειών καλύμματος λόγω ρεύματος διαπεραστήρων. [4, σελ. 40, Πίνακας 6].

## 3.8 Μηχανικές δυνάμεις

### 3.8.1 Εισαγωγή

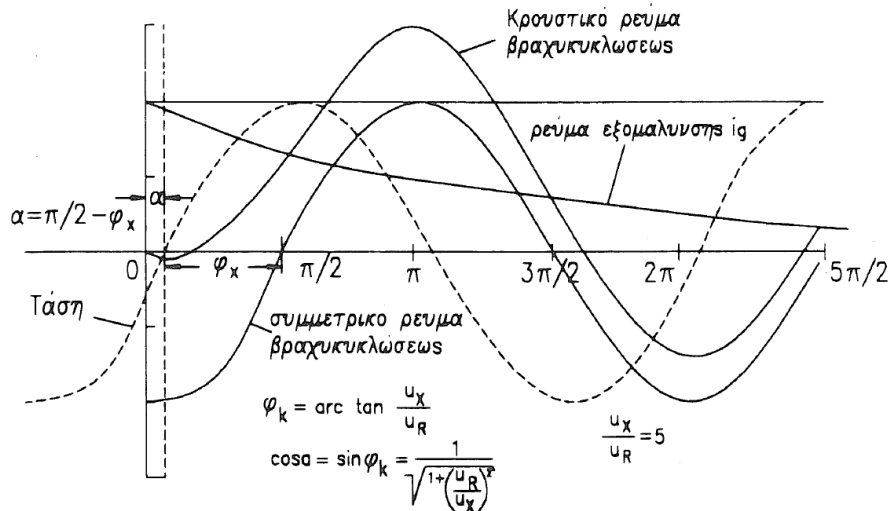
Κατά το φαινόμενο της βραχυκύκλωσης μέσα σε ένα μετασχηματιστή διαρρέεται ένα ρεύμα που μπορεί να είναι για μεγάλους μετασχηματιστές 1,8 φορές μεγαλύτερο από τη μέγιστη τιμή του συμμετρικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως του. Αυτό το ρεύμα ονομάζεται κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης και αναπτύσσεται κατά το μεταβατικό φαινόμενο του κρουστικού



βραχυκυκλώματος. Λόγω του μεγάλου μέτρου του ρεύματος αναπτύσσονται δυνάμεις πολύ μεγαλύτερες από αυτές που υπάρχουν κατά την ομαλή λειτουργία και έτσι ασκούνται μεγάλες καταπονήσεις στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, όπως και στις στηρίξεις τους.

### 3.8.2 Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης

Το φαινόμενο του κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης γίνεται δυσμενές στην περίπτωση που πραγματοποιηθεί όταν η τάση είναι μηδενική, άρα υπάρχει και η μέγιστη τιμή μαγνητικής ροής στο μετασχηματιστή εκείνη τη στιγμή.



Σχήμα 3.22: Μορφολογία κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης. [4, σελ. 61, Σχήμα 50].

Στην περίπτωση τριφασικού μετασχηματιστή προκαλούνται κυρίως καταπονήσεις στη φάση στην οποία πραγματοποιείται το βραχυκύκλωμα, αλλά και μικρότερη στις άλλες δύο φάσεις. Για τον υπολογισμό του κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης χρησιμοποιείται ένα παρόμοιο φαινόμενο όπως αυτό ενός στραγγαλιστικού πηνίου με στοιχεία R και L. Πιο συγκεκριμένα για αυτό το κύκλωμα θα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$R \cdot i = L \cdot \frac{di}{dt} = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \quad (3.8.1)$$

Λύνοντας τη σχέση (3.8.1) που πρόκειται για μια διαφορική εξίσωση προκύπτει ως αποτέλεσμα η σχέση του αποσβενούμενου κρουστικού ρεύματος  $i_k$  όπως απεικονίζεται στη σχέση (3.8.2):

$$i_k = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \left( e^{-\frac{R}{L}t} - \cos(\omega \cdot t) \right) \quad (3.8.2)$$

Όπου αυτό το ρεύμα αποτελείται από δύο μέρη, το συνεχές αποσβενούμενο μέρος και το εναλλασσόμενο μέρος. Πιο συγκεκριμένα το συνεχές αποσβενούμενο μέρος του ρεύματος βραχυκυκλώματος ή αλλιώς το **ρεύμα εξομάλυνσης  $i_g$**  ορίζεται ως:

$$i_g = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \quad (3.8.3)$$

Ορίζοντας ως περίοδο  $T = L/R$ , έτσι προκύπτει ότι  $T = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{u_x}{u_r}$  όπου  $u_r$  και  $u_x$  το ποσοστιαίο ενεργό και το επαγωγικό μέρος της τάσης βραχυκύκλωσης. Ως αποτέλεσμα, το ρεύμα εξομάλυνσης  $i_g$  είναι πλέον ίσο με:

$$i_g = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot e^{-\frac{t}{T}} = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot e^{-\frac{t}{\left(\frac{1}{\omega} \frac{u_x}{u_r}\right)}} \quad (3.8.4)$$

Αναλύοντας το χρόνο  $t$  σε  $n$  ημιπεριόδους του βραχυκυκλώματος ισχύει:

$$t = \frac{\pi \cdot n}{\omega} \quad (3.8.5)$$

Έτσι συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.8.4) και (3.8.5) προκύπτει η χρονική μεταβολή του συνεχούς ρεύματος βραχυκύκλωσης:

$$i_g = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot e^{-\frac{\pi \cdot n}{\omega} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \frac{u_x}{u_r}} \Leftrightarrow \sqrt{2} \cdot I_k \cdot e^{-\pi \cdot n \cdot \frac{u_r}{u_x}} \quad (3.8.6)$$

Σύμφωνα με την περίπτωση του σχήματος 3.22 το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή για πρώτη φορά στην πρώτη ημιπερίοδο, δηλαδή για  $n = 1$ , άρα στην προκειμένη περίπτωση η τιμή του κρουστικού ρεύματος θα είναι ίση με:

$$i_k = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \left(1 + e^{-\pi \cdot \frac{u_r}{u_x}}\right) \quad (3.8.7)$$

Η παραπάνω σχέση είναι αποδεκτή λόγω της μεγάλης και ικανοποιητικής προσέγγισης στην πραγματική τιμή του μέγιστου κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης, κυρίως σε μεγάλους μετασχηματιστές, το οποίο λαμβάνει χώρα όταν το βραχυκύκλωμα πραγματοποιηθεί όταν η τάση βρίσκεται υπό γωνία  $\alpha$  όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.22. Για τον υπολογισμό αυτής της τιμής χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση των σχέσεων που προηγήθηκαν για την εφαρμογή σωστής γωνίας και ως αποτέλεσμα την εύρεση της αντίστοιχης τιμής.

### 3.8.3 Αναπτυσσόμενες δυνάμεις βραχυκυκλώσεως – μηχανικές καταπονήσεις

Όπως αναφέρθηκε λόγω της ροής μεγάλου ρεύματος μέσα στους αγωγούς άρα και των αντίστοιχων ροών σκεδάσεως αναπτύσσονται αντίστοιχα μεγάλες δυνάμεις, οι οποίες είναι ανάλογες των δύο αυτών μεγεθών. Εφόσον όμως και οι ροές σκεδάσεως είναι ανάλογες της έντασης ρεύματος, τελικά οι δυνάμεις αυτές θα είναι ανάλογες του τετραγώνου της εντάσεως του ρεύματος. Οι τιμές των δυνάμεων αυτών μπορούν να γίνουν έως και 600 φορές μεγαλύτερες από αυτές κατά την ονομαστική λειτουργία.

Οι δυνάμεις αυτές που αναπτύσσονται και καταπονούν τα τυλίγματα και τις στηρίξεις τους χωρίζονται σε αξονικές και ακτινικές. Απαιτείται τοποθέτηση των στηριγμάτων σε τέτοια απόσταση ώστε η καμπτική τάση που αποτελείται από τη ροπή κάμψεως μεταξύ δύο στηριγμάτων και τη ροπή στρέψεως των αγωγών/φύλλου να μην υπερβαίνει την επιτρεπόμενη τάση, όπου στην περίπτωση του αγωγού είναι ίση με  $80 \text{ N/mm}^2$ .

#### 3.8.3.1 Ακτινικές δυνάμεις

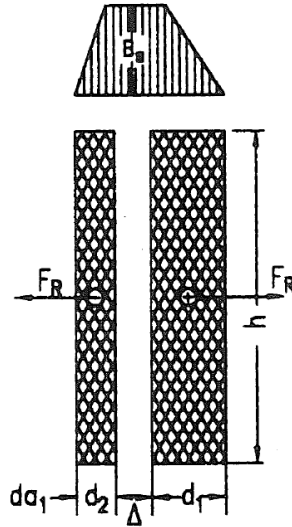
Κατά την ανάπτυξη αυτών των δυνάμεων προκαλείται κάμψη, εφελκυσμός και θλίψη στη διεύθυνση της περιφέρειας των τυλιγμάτων. Λόγω της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής και της εντάσεως του ρεύματος στα τυλίγματα προκύπτουν μεταξύ των δύο τυλιγμάτων οριζόντιες δυνάμεις, οι οποίες έχουν ίδιο μέτρο, αλλά είναι αντίθετες μεταξύ τους. Η ακτινική δύναμη, μετρούμενη σε Pascal, θα είναι με βάση το νόμο του Biot – Savart ισοδύναμη με αυτή της σχέσης (3.8.8).

$$F_R = I_k \cdot N \cdot \frac{B_\sigma}{2} \cdot U_m \cdot \frac{1}{9,81} \quad (3.8.8)$$

Όπου:

- $I_k$ : το πλάτος του κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης,

- $N$ : το πλήθος των σπειρών του τυλίγματος,
- $B_\sigma$ : το πλάτος της επαγωγής σκεδάσεως,
- $U_m$ : η μέση περιφέρεια του τυλίγματος.



Σχήμα 3.23: Αναπαράσταση ακτινικών δυνάμεων στα κυλινδρικά τυλίγματα ενός μετασχηματιστή, όπου  $F_R$  οι ακτινικές δυνάμεις,  $h$  το ύψος των τυλιγμάτων,  $\Delta$  το διάκενο μεταξύ των τυλιγμάτων και  $d_1$  και  $d_2$  το πλάτος των τυλιγμάτων αντίστοιχα. [4, σελ. 64, Σχήμα 51].

Για τον υπολογισμό της ακτινικής δύναμης σε κάθε τύλιγμα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$F_R = 2 \cdot \pi^2 \cdot \left( \frac{\sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_k \cdot N}{u_k} \right)^2 \cdot \frac{d_{\sigma v}}{h_m} \cdot 10^{-6} \quad (3.8.9)$$

Όπου:

- $d_{a1}$ : η εσωτερική διάμετρος του τυλίγματος χαμηλής τάσης,
- $d_{\sigma v}$ : η μέση ισοδύναμη διάμετρος των τυλιγμάτων που είναι ίση με  $d_{\sigma v} = d_{a1} + \frac{d_1 + d_2 + \Delta}{2}$  σε mm,
- $h_m$ : το μέσο μαγνητικό ύψος των τυλιγμάτων που είναι ίσο με  $h_m = (h_{m1} + h_{m2})/2$  σε mm,
- $u_k$ : η τάση βραχυκύκλωσης,
- $\kappa$ : ο συντελεστής κρούσης, ο οποίος ορίζεται ως:

$$\kappa = 1 + \frac{e^{-\frac{u_r}{u_x} \left( \frac{\pi}{2} + \arctan \frac{u_x}{u_r} \right)}}{\sqrt{1 + (u_r/u_x)^2}} \approx 1 + e^{-\pi \frac{u_r}{u_x}} \quad (3.8.10)$$

Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.23 το εσωτερικό τύλιγμα θα καταπονείται σε πίεση, ενώ το εξωτερικό σε εφελκυσμό λόγω των αντίθετων ακτινικών δυνάμεων.

Για τον υπολογισμό της μέσης μηχανικής καταπόνησης  $\sigma_v$  σε  $N/mm^2$  των αγωγών του κάθε τυλίγματος με διατομή αγωγού ίση με  $q_{cu}$  ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\sigma_v = \frac{F_{Rv} \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot N \cdot q_{cu}} \quad (3.8.11)$$

Ενδεικτικές τιμές για ηλεκτρολυτικό χαλκό μηχανικής ροής υλικού  $200 N/mm^2$  (E-cuF20) που επιλέγεται συχνά για την κατασκευή των περιελίξεων έχει επιτρεπόμενη μέση καταπόνηση αγωγού

σε συχνά βραχυκυκλώματα  $\sigma_{\varepsilon\pi}$  για θλιπτική και καμπτική καταπόνηση ίση με  $80 \text{ N/mm}^2$  και για εφελκυστική καταπόνηση ίση με  $100 \text{ N/mm}^2$ .

### 3.8.3.2 Αξονικές δυνάμεις

Κατά την ανάπτυξη αυτών των δυνάμεων προκαλείται θλίψη στις μονώσεις των αγωγών και στα αξονικά αποστατικά, κάμψη και θλίψη στα τυλίγματα με δυσμενή αποτέλεσμα το λυγισμό τους όπως επίσης και κάμψη, εφελκυσμό και θλίψη στις δοκούς και στους κοχλίες σύσφιξης. Ιδιαίτερη έμφαση για αυτό το λόγο δίνεται στο τύλιγμα χαμηλής τάσης για τη σωστή στήριξη των τυλιγμάτων στον πυρήνα λόγω αυτών των δυνάμεων, αφού το ρεύμα σε αυτό το τύλιγμα είναι μεγαλύτερο.

Η συνολική αξονική δύναμη που προκαλεί τις παραπάνω φθορές απαρτίζεται από τη θλιπτική δύναμη, τη διατμητική δύναμη λόγω πιθανής ασυμμετρίας των τυλιγμάτων και τη συμμετρική διατμητική δύναμη ή δύναμη οπής.

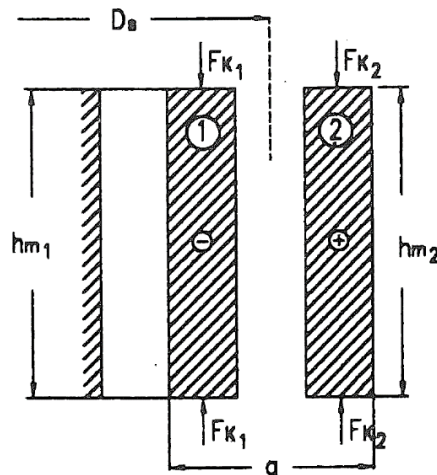
#### 1) Θλιπτική δύναμη

Η δύναμη αυτή που αναπτύσσεται είναι κάθετη προς την ακτινική δύναμη που αναλύθηκε προηγουμένως και ασκεί πίεση στα τυλίγματα, με αποτέλεσμα να σμικρύνει το ύψος του διαύλου σκεδάσεως. Η ολική θλιπτική δύναμη  $F_K$  διαχωρίζεται στις επιμέρους θλιπτικές δυνάμεις  $F_{K_1}$  και  $F_{K_2}$  που εφαρμόζονται στο πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα αντίστοιχα, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.24.

Η ολική θλιπτική δύναμη  $F_K$  υπολογίζεται με βάση τη σχέση (3.8.12) και είναι ίση με:

$$F_K = \frac{1}{2} \cdot I_k^2 \cdot \frac{dL_\sigma}{dh_m} \quad (3.8.12)$$

Όπου  $L_\sigma$  η αυτεπαγωγή.



Σχήμα 3.24: Αναπαράσταση αξονικών θλιπτικών δυνάμεων στα τυλίγματα του μετασχηματιστή όπου  $F_{K_1}$  και  $F_{K_2}$  οι θλιπτικές δυνάμεις στο πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα αντίστοιχα,  $h_{m_1}$  και  $h_{m_2}$  τα αντίστοιχα μήκη των τυλιγμάτων και  $a$  το άθροισμα των πλατών των τυλιγμάτων συν το διάκενο μεταξύ τους. [4, σελ. 66, Σχήμα 52].

Με περαιτέρω ανάλυση η σχέση (3.8.12) παίρνει την παρακάτω μορφή που ακολουθεί:

$$F_K = 2 \cdot \pi^2 \cdot \left( \frac{\sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_N \cdot N}{u_k} \right)^2 \cdot \frac{\Delta' \cdot (d_{a1} + \Delta')}{h_m^2} \cdot K_R^2 \quad (3.8.13)$$

Όπου  $d_{a1}$  το πλάτος του τυλίγματος χαμηλής τάσης και  $K_R$  ο συντελεστής διόρθωσης Rogowski ο οποίος είναι ίσος με:

$$K_R = 1 - \frac{a}{\pi \cdot h} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi \cdot h}{a}}\right) \quad (3.8.14)$$

Όπου  $a$  το άθροισμα των πλατών των δύο τυλιγμάτων συν την απόσταση του διαύλου που υπάρχει μεταξύ τους. Επίσης το  $\Delta'$  πρόκειται για μία διαμορφωμένη τιμή του δίαυλου – διάκενου μεταξύ των δύο τυλιγμάτων που ορίζεται ως:

$$\Delta' = \frac{b_1}{3} + \Delta + \frac{b_2}{3} \quad (3.8.15)$$

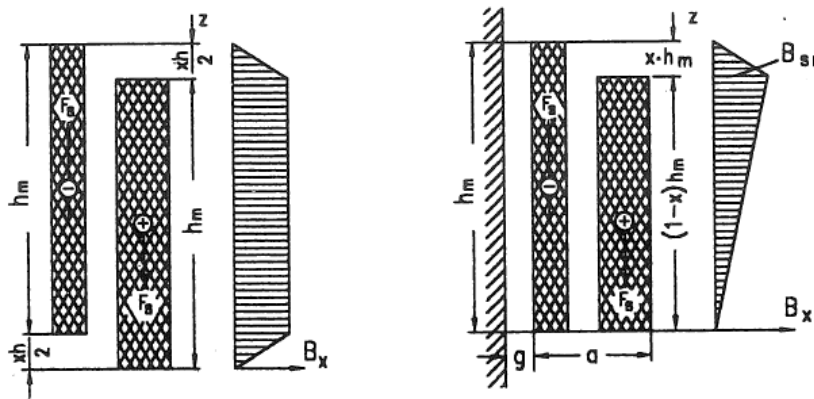
Σε περίπτωση που το μήκος του τυλίγματος χαμηλής τάσης είναι μεγαλύτερο από αυτό της υψηλής, τότε η ολική θλιπτική δύναμη διαχωρίζεται στη μέση και κατανέμεται μεταξύ αυτών που ασκούνται στο κάθε τύλιγμα.

## 2) Δυνάμεις ασυμμετρίας

Όταν υπάρχει ασυμμετρία στα τυλίγματα, τότε εμφανίζονται και οι αντίστοιχες δυνάμεις ασυμμετρίας. Στην πραγματικότητα, πάντα θα υπάρχει μία μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο τυλιγμάτων, άρα ως αποτέλεσμα θα υπάρχει ασυμμετρία. Η διαφορά του μήκους των δύο τυλιγμάτων είναι το πιο σύνηθες φαινόμενο ασυμμετρίας, αλλά υπάρχει και το φαινόμενο της μετατόπισης των δύο ίσων τυλιγμάτων όπου αυτό οδηγεί και σε πιο δυσμενή αποτελέσματα.

Η δύναμη αυτή που αναπτύσσεται σε αυτά τα σημεία ασυμμετρίας θα είναι ίση με:

$$F_V = 2 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_N \cdot N}{u_k}\right)^2 \cdot \frac{x \cdot (d_{a1} + \Delta')}{l_\sigma} \cdot K_R^2 \quad (3.8.16)$$



Σχήμα 3.25: Περίπτωση αμφίπλευρης (αριστερό σχήμα) και μονόπλευρης μετατόπισης (δεξιό σχήμα) τυλιγμάτων. [4, σελ. 67, Σχήμα 53].

Όπου  $l_\sigma$  το μήκος των μαγνητικών γραμμών που θα είναι ίσο με:

$$l_\sigma = 2 \cdot \frac{h}{\pi} + d_v + d_{a1} - 2 \cdot d_s \quad (3.8.17)$$

Όπου  $d_v$  η εξωτερική διάμετρος του τυλίγματος υψηλής τάσης και  $d_s$  η διάμετρος της περιμέτρου του πυρήνα. Επίσης  $x$  το ποσοστό μείωσης του μαγνητικού ύψους που είναι ίσο με:

$$x = \frac{\Delta h}{h} \quad (3.8.18)$$

Στην περίπτωση που τα τυλίγματα έχουν μετατοπιστεί κατά την τοποθέτηση λόγω κατασκευής προκύπτει δύναμη η οποία θα είναι ίση με:

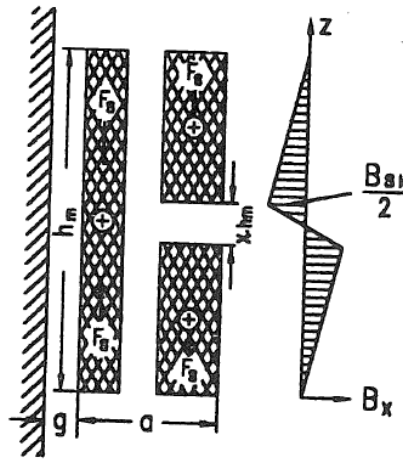
$$F_F = 8 \cdot \pi^2 \cdot \left( \frac{\sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_N \cdot N}{u_k} \right)^2 \cdot \frac{\Delta h_F}{h_m} \cdot \frac{d_\sigma}{l_\sigma} \cdot K_R^2 \quad (3.8.19)$$

Όπου ο λόγος  $\Delta h_F/h_m$  έχει ως συνηθής τιμή 0,5%.

Σε περίπτωση που το τύλιγμα Υ.Τ. διαθέτει μεταγωγέα για ενδιάμεσες λήψεις, για την επιλογή της μέγιστης τάσης αναπτύσσεται συμμετρική διατμητική δύναμη ίση με:

$$F_A = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\Delta N}{N} \cdot \frac{1 - \frac{N_A}{N}}{1 - \frac{\Delta N}{N}} \cdot \left( \frac{\sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_N \cdot N}{u_k} \right)^2 \cdot \frac{d_\sigma}{l_\sigma} \cdot K_R^2 \quad (3.8.20)$$

Όπου  $\Delta N$  το πλήθος των ενεργών σπειρών για την αντίστοιχη επιλογή τάσης και  $N_A$  το πλήθος των σπειρών για τις μέγιστες ρυθμίσεις λήψεως.



Σχήμα 3.26: Δημιουργία συμμετρικής διατμητικής δύναμης ή δύναμης σπής λόγω των ενδιάμεσων λήψεων στο τύλιγμα Υ.Τ. [4, σελ. 68, Σχήμα 54].

### 3.8.3.3 Συνισταμένη αξονική δύναμη

Από το συνδυασμό της θλιπτικής, της διατμητικής λόγω ασυμμετρίας και της δύναμης σπής προκύπτει ως αποτέλεσμα αντίστοιχα και μία συνισταμένη δύναμη σε κάθε τύλιγμα. Για το τύλιγμα Χ.Τ. η συνισταμένη αξονική δύναμη θα είναι ίση με τη σχέση (3.8.21).

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot F_K + F_F + F_V + F_A \quad (3.8.21)$$

Ενώ για το τύλιγμα Υ.Τ. θα ισχύει:

$$\text{Για } |F_A| \leq F_K \rightarrow F_1 = 1/2 \cdot F_K + F_F + F_V \quad (3.8.22)$$

$$\text{Για } |F_A| \geq F_K \rightarrow F_1 = 1/2 \cdot F_K + F_F + F_V + |F_A| \quad (3.8.23)$$

### 3.8.3.4 Δύναμη προσυμπιέσεως

Έπειτα από την κατασκευή τα τυλίγματα, μέσω συγκεκριμένης διαδικασίας, προσυμπιέζονται για να επιτευχθεί σωστή συμπύκνωση και σχηματοποίηση των μονωτικών υλικών πάνω τους. Οι δυνάμεις αυτές είναι ίσες με τις αντίστοιχες συνιστάμενες αξονικές δυνάμεις  $F_1$  και  $F_2$ . Ειδική



εξαίρεση αποτελούν τα μονοκόμματα τυλίγματα στρογγυλών αγωγών. Στην περίπτωση όμως που πρόκειται για μεμονωμένα πηνία στρογγυλών αγωγών, τότε αυτά συμπιέζονται με την παρουσία μονωτικού διαχωριστικού υλικού μεταξύ τους.

### 3.8.3.5 Δύναμη συσφίξεως

Η δύναμη αυτή έχει ως στόχο την επίτευξη της αντοχής των τυλιγμάτων κατά τη βραχυκύκλωση όπως και την αποφυγή της καταστροφής των μονωτικών τους υλικών. Τα τυλίγματα συσφίγγονται στο ενεργό τους μέρος με κατεύθυνση της δύναμης προς τις δοκούς συσφίξεως. Η δύναμη συσφίξεως που εφαρμόζεται θα είναι ίση με:

$$\text{Για } |F_A| \leq 1/2 \cdot F_K \rightarrow P_1 = -1/2 \cdot F_K + F_F + F_V + |F_A| \quad (3.8.24)$$

$$\text{Για } |F_A| \geq 1/2 \cdot F_K \rightarrow P_1 = F_F + F_V \quad (3.8.25)$$

Στην περίπτωση μετασχηματιστών υγρού τύπου που βυθίζονται σε λάδι υπάρχει μία χαλάρωση λόγω της τοποθέτησης μέσα σε αυτό το μέσο. Για την καταπολέμηση αυτής της χαλάρωσης η δύναμη συσφίξεως σε αυτήν την περίπτωση είναι κατά 40% μεγαλύτερη από την υπολογισμένη έτσι ώστε σε περίπτωση βραχυκυκλώματος τα τυλίγματα να μπορούν να ανταπεξέλθουν στη μηχανική καταπόνηση χωρίς την παρουσία κάποιας βλάβης.

## 3.9 Ρεύμα μαγνήτισης

### 3.9.1 Εισαγωγή

Μεγάλη έμφαση δίνεται στο ρεύμα μαγνήτισης και τον υπολογισμό του λόγω των έντονων αρμονικών που εισάγει στο σύστημα και ως αποτέλεσμα την επιρροή που έχει στη συμπεριφορά του μετασχηματιστή. Στην περίπτωση του μονοφασικού μετασχηματιστή η τρίτη αρμονική αποτελεί μία μεγάλη συνιστώσα η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Στην περίπτωση τριφασικών μετασχηματιστών η φύση του διαμορφώνεται αναλόγως με τη συνδεσμολογία του μετασχηματιστή. Το **ρεύμα μαγνήτισης (magnetizing current)  $I_\mu$**  αποτελεί μία καθαρή άεργη συνιστώσα στο ολικό ρεύμα κενής λειτουργίας το οποίο υστερεί από την τάση του πρωτεύοντος κατά  $90^\circ$ , λαμβάνοντας έτσι μέγιστη τιμή κατά το μηδενισμό της τάσης. Για τον υπολογισμό αυτού πρέπει να διεξαχθούν υπολογισμοί με βάση τη λειτουργία εν κενώ του μετασχηματιστή.

### 3.9.2 Ρεύμα κενής λειτουργίας και αρμονικές

Κατά την κενή λειτουργία οι απώλειες χαλκού στο πρωτεύον θεωρούνται αμελητέες λόγω της πολύ μικρής τους φύσης. Γι' αυτό το λόγο το ρεύμα κενής λειτουργίας  $I_0$  αποτελείται από το ρεύμα μαγνήτισης  $I_\mu$  και το ρεύμα που είναι ανάλογο για τις απώλειες σιδήρου - πυρήνα  $I_{Fe}$ .

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{Fe}^2} \quad (3.9.1)$$

Η διεύθυνση του υπολογίζεται με βάση το συντελεστή ισχύος κατά την κενή λειτουργία  $\cos\varphi_0$  που είναι ίσος με:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_{oc}}{V_1 \cdot I_0} \quad (3.9.2)$$

Όπως αναφέρθηκε στους μονοφασικούς μετασχηματιστές όλο το μαγνητικό κύκλωμα διαρρέεται από την ίδια μαγνητική ροή και για αυτό το λόγο προκύπτει ημιτονοειδή μαγνητεγερτική δύναμη και μέσω αυτής προκύπτει το ρεύμα μαγνήτισης. Στην παράγραφο §3.6.4 περιγράφεται η διαφοροποίηση

της μαγνητικής αντίστασης στους μαγνητικούς κλάδους ενός τριφασικού μετασχηματιστή η οποία οδηγεί και σε αντίστοιχη διαφοροποίηση του ρεύματος μαγνήτισης σε κάθε φάση του. Πιο συγκεκριμένα η αυξημένη αντίσταση στους εξωτερικούς κλάδους έχει ως αποτέλεσμα και την μεγαλύτερη τιμή του ρεύματος μαγνήτισης σε σύγκριση με αυτό του μεσαίου κλάδου και ακολούθως μεγαλύτερες αρμονικές στο σύστημα.

Μέσω των μαγνητεγερτικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στους κλάδους μπορεί να υπολογιστεί και ο λόγος  $\kappa$  του μήκους των μαγνητικών γραμμών του εξωτερικού κλάδου ως προς αυτό του μεσαίου κλάδου.

Για τους εξωτερικούς κλάδους η μαγνητεγερτική δύναμη  $\theta_1$  θα είναι ίση με:

$$\theta_1 = I_1 \cdot N_1 = \Phi \cdot R_1 = \Phi \cdot \frac{l_1}{\mu_0 \cdot Q_{Fe}} \quad (3.9.3)$$

Και για το μεσαίο κλάδο η μαγνητεγερτική δύναμη  $\theta$  αντίστοιχα:

$$\theta = I \cdot N = \Phi \cdot R = \Phi \cdot \frac{l}{\mu_0 \cdot Q_{Fe}} \quad (3.9.4)$$

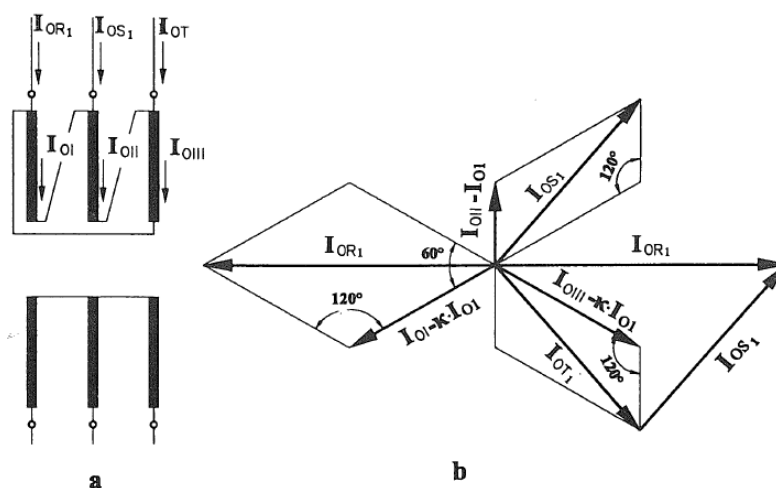
Όπου  $Q_{Fe}$  η διάμετρος του πυρήνα. Διαιρώντας τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει ο λόγος  $\kappa$ .

$$\frac{I_1}{I} = \frac{l_1}{l} \xrightarrow{\kappa=I_1/I} \kappa = \frac{l_1}{l} \quad (3.9.5)$$

Παρακάτω θα αναλυθούν οι διαφοροποιήσεις στις αρμονικές που αναπτύσσονται κατά την υλοποίηση κάθε συνδεσμολογίας των τυλιγμάτων.

### 3.9.2.1 Συνδεσμολογία τριγώνου – αστέρα

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό λόγω της συνδεσμολογίας τριγώνου στο πρωτεύον είναι ότι αυτό προσφέρει την ικανότητα της διαμόρφωσης των ρευμάτων μαγνήτισης των τριών στηλών. Το αλγεβρικό άθροισμα των τριών ρευμάτων των αγωγών τροφοδοτήσεως είναι μηδενικό. Με βάση το σχήμα 3.27 μπορούν να υπολογιστεί η σχέση μεταξύ των βασικών αρμονικών.



Σχήμα 3.27: α) Συνδεσμολογία τριγώνου – αστέρα τριφασικού μετασχηματιστή β) διάγραμμα κατανομής ρευμάτων αντίστοιχης συνδεσμολογίας. [4, σελ. 18, Σχήμα 14].

Για τη σχέση μεταξύ της βασικής αρμονικής του ρεύματος των αγωγών τροφοδότησης  $I_{OR1}$  και η αντίστοιχη βασική αρμονική του φασικού ρεύματος  $I_{OI}$  ισχύει η παρακάτω αναλογία:

$$I_{OR1} = \sqrt{3} \cdot \kappa \cdot I_{O1} \quad (3.9.6)$$

Ενώ για τις τιμές των  $I_{OS1}$  και  $I_{OT1}$  ισχύει:

$$I_{OS1} = I_{OT1} = I_{O1} \cdot \sqrt{1 + \kappa^2 + \kappa} \quad (3.9.7)$$

Αντίστοιχα για την κατανομή της τρίτης αρμονικής των ρευμάτων μαγνήτισης θα ισχύει:

$$I_{OR3} = 0 \quad (3.9.8)$$

$$I_{OS3} = -I_{O3} \cdot (\kappa - 1) \quad (3.9.9)$$

$$I_{OT3} = I_{O3} \cdot (\kappa - 1) \quad (3.9.10)$$

Παρατηρείται ότι τα ρεύματα στις φάσεις S και T έχουν ίδια τιμή με ανάποδα πρόσημα μεταξύ τους. Οι αρμονικές που πολλαπλάσιες του τρία έχουν μειωμένο χαρακτήρα στους αγωγούς τροφοδοτήσεως. Επίσης η τρίτη αρμονική έχει το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό σε αυτήν την περίπτωση ότι δεν εμφανίζεται στο δευτερεύον τύλιγμα.

### 3.9.2.2 Συνδεσμολογία αστέρα – τριγώνου

Η συνδεσμολογία αστέρα στο πρωτεύον τύλιγμα έχει ως βασική απαίτηση για τη λειτουργία της, το σύνολο των ρευμάτων να είναι μηδενικό. Για αυτή τη συνδεσμολογία με βάση το σχήμα 3.28 θα ισχύει:

$$\vec{I}_{OI} + \vec{I}_{OII} + \vec{I}_{OIII} = 3 \cdot \vec{I}_{OZ1} \quad (3.9.11)$$

$$I_{OI} = I_{OIII} = \kappa \cdot I_{OII} \quad (3.9.12)$$

$$I_{OZ1} = \frac{\kappa - 1}{3} \cdot I_{O1} \quad (3.9.13)$$

Για τις τρίτες αρμονικές το τύλιγμα τριγώνου δίνει ίσα μεγέθη και στις τρεις συνιστώσες, ενώ στο τύλιγμα του αστέρα πρέπει, για λόγους συμμετρίας, η συνιστώσα της μεσαίας στήλης να είναι διπλάσια και αντίθετη από αυτή των ακραίων στηλών έτσι, ώστε το σύνολο των ρευμάτων να είναι μηδενικό. Επίσης θα πρέπει το άθροισμα των τρίτων αρμονικών να ισοδυναμούν με τα απαιτούμενα ρεύματα μαγνήτισης που για τους εξωτερικούς κλάδους είναι  $\kappa \cdot I_{O3}$  και για το μεσαίο κλάδο  $I_{O3}$  αντίστοιχα.

$$I_{OR3} + I_{OZ3} = I_{OT3} + I_{OZ3} = \kappa \cdot I_{O3} \quad (3.9.14)$$

$$+I_{OS3} + I_{OZ3} = I_{O3} \quad (3.9.15)$$

$$-I_{OS3} = 2 \cdot I_{OR3} = 2 \cdot I_{OT3} \quad (3.9.16)$$

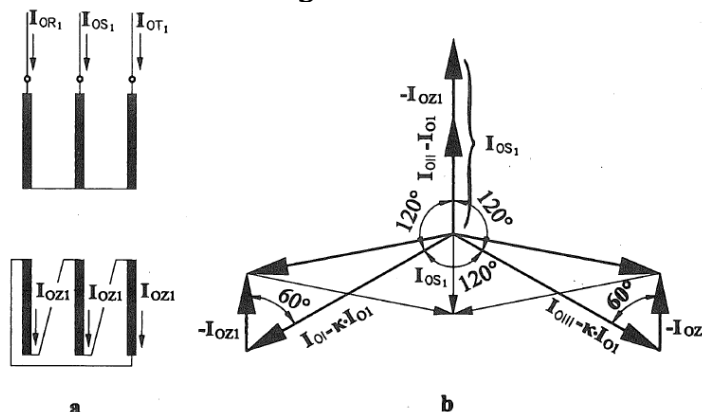
Λύνοντας τις παραπάνω εξισώσεις ως προς τις τρίτες αρμονικές των ρευμάτων των αγωγών τροφοδοτήσεως, θα ισχύει:

$$I_{OR3} = I_{OT3} = \frac{I_{O3}}{3} \cdot (\kappa - 1) \quad (3.9.17)$$

$$I_{0S3} = -2 \cdot \frac{I_{03}}{3} \cdot (\kappa - 1) \quad (3.9.18)$$

Και για την τρίτη αρμονική του ρεύματος εντός του τριγώνου θα ισχύει:

$$I_{0Z3} = \frac{I_{03}}{3} \cdot (2 \cdot \kappa + 1) \quad (3.9.19)$$



Σχήμα 3.28: α) Συνδεσμολογία αστέρα – τριγώνου τριφασικού μετασχηματιστή β) διάγραμμα κατανομής ρευμάτων αντίστοιχης συνδεσμολογίας. [4, σελ. 20, Σχήμα 16].

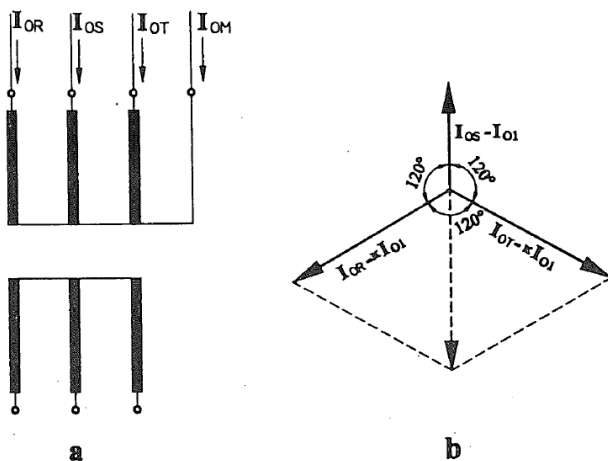
### 3.9.2.3 Συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα με ουδέτερο αγωγό στο πρωτεύον

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση για τα ρεύματα των αγωγών τροφοδοτήσεως θα ισχύει:

$$I_{0R} = I_{0T} = \kappa \cdot I_0 \quad (3.9.20)$$

$$I_{0S} = I_0 \quad (3.9.21)$$

Με την εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff, σε περίπτωση όπου υπάρχει ουδέτερος αγωγός το άθροισμα των ρευμάτων των τριών στηλών θα είναι ίσο με αυτό του ουδέτερου αγωγού. Αντιθέτως, στη περίπτωση που δεν υφίσταται ουδέτερος αγωγός, τότε από το υπολειπόμενο διάρρευμα δημιουργείται μαγνητική ροή σκεδάσεως που κλείνει από ζύγωμα σε ζύγωμα μέσω του αέρα. Σε αυτή τη συνδεσμολογία εμφανίζεται μεγαλύτερη τρίτη αρμονική στον ουδέτερο αγωγό σε σύγκριση με τους αγωγούς των φάσεων.



Σχήμα 3.29: Συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα με ουδέτερο στο πρωτεύον τύλιγμα τριφασικού μετασχηματιστή β) διάγραμμα κατανομής ρευμάτων αντίστοιχης συνδεσμολογίας. [4, σελ. 22, Σχήμα 18].

### 3.9.2.4 Συνδεσμολογία τριών μονοφασικών μετασχηματιστών

Λόγω της ύπαρξης τριών όμοιων μονοφασικών μετασχηματιστών το μήκος των στηλών και στους τρεις μετασχηματιστές θα είναι το ίδιο άρα και ο λόγος των μηκών  $k$  θα είναι ίσο με την μονάδα. Έτσι επιλέγοντας τις σχέσεις από τις προηγούμενες περιπτώσεις και θέτοντας το λόγο  $k$  ίσο με μονάδα, τότε θα ισχύει:

#### 1. Συνδεσμολογία τριγώνου – αστέρα

Για τα ρεύματα των αγωγών τροφοδοτήσεως θα ισχύει:

$$I_{OR} = I_{OS} = I_{OT} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{I_{01}^2 + I_{05}^2 + I_{07}^2 + \dots} \quad (3.9.22)$$

#### 2. Συνδεσμολογία αστέρα - τριγώνου

Για τα ρεύματα στους αγωγούς θα ισχύει:

$$I_{OR} = I_{OS} = I_{OT} = \sqrt{I_{01}^2 + I_{05}^2 + I_{07}^2 + \dots} \quad (3.9.23)$$

Για το ρεύμα κυκλοφορίας στο τρίγωνο θα ισχύει:

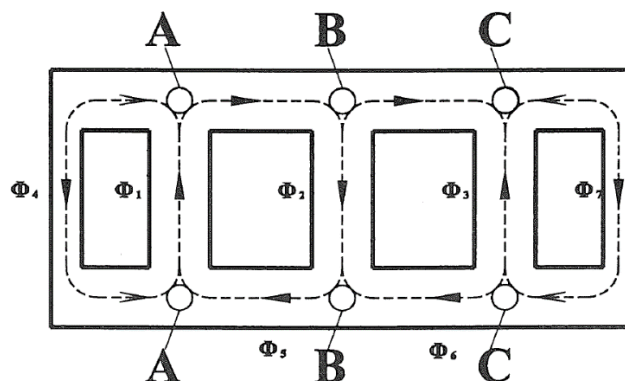
$$I_{OZ} = \sqrt{I_{03}^2 + I_{09}^2 + \dots} \quad (3.9.24)$$

#### 3. Συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα

Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει μεγάλη συμμετοχή της τρίτης και της ένατης αρμονικής στο ρεύμα μαγνήτισης άρα και μεγάλη παραμόρφωση στη μαγνητική ροή και στο ρεύμα. Γι' αυτό το λόγο είναι πολύ δύσκολη η εφαρμογή αυτής της συνδεσμολογίας σε πραγματικές συνθήκες.

### 3.9.2.5 Συνδεσμολογία πεντάστηλου μετασχηματιστή

Σε αυτήν την ειδική περίπτωση λόγω της μειωμένης μαγνητικής αντίστασης του πυρήνα, είναι απαραίτητη η συνδεσμολογία τριγώνου σε ένα από τα δύο τρίγωνα τουλάχιστον για την αποφυγή ανάπτυξης μεγάλης τρίτης αρμονικής στον ουδέτερο αγωγό. Οι μαγνητικές ροές κατανέμονται όπως εμφανίζεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.30: Κατανομή μαγνητικών ροών σε μετασχηματιστή πέντε στηλών. [4, σελ. 24, Σχήμα 19].

Εφαρμόζοντας τον πρώτο νόμο του Kirchhoff για το αντίστοιχο κύκλωμα του σχήματος 3.30 προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\Phi_1 + \Phi_4 = \Phi_5 \quad (3.9.25)$$

$$\Phi_2 + \Phi_5 = \Phi_6 \quad (3.9.26)$$

$$\Phi_3 + \Phi_6 = \Phi_7 \quad (3.9.27)$$

Λόγω της τριφασικής τάσης που εφαρμόζεται σε αυτό το μετασχηματιστή το άθροισμα των εσωτερικών στηλών θα είναι ίσο με μηδέν.

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0 \quad (3.9.28)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν ως τελικό αποτέλεσμα οι παρακάτω σχέσεις:

$$\Phi_4 = \Phi_7 \quad (3.9.29)$$

$$\Phi_1 + \Phi_4 = \Phi_5 \quad (3.9.30)$$

$$\Phi_6 = \Phi_4 - \Phi_3 \quad (3.9.31)$$

## 3.10 Θερμική μελέτη

### 3.10.1 Εισαγωγή

Η θερμική μελέτη ενός μετασχηματιστή εστιάζει στη διατύπωση της συμπεριφοράς των υλικών του, στην αύξηση της θερμοκρασίας τους κατά την εκκίνηση, δηλαδή τη μεταβατική περίοδο, αλλά και στη σταθερή λειτουργία του, δηλαδή όταν τα υλικά έρθουν σε ισορροπία με το περιβάλλον και η θερμοκρασία τους σταματήσει να αυξάνεται. Ένας μετασχηματιστής σχεδιάζεται για να λειτουργεί υπό μία συγκεκριμένη ζώνη θερμοκρασίας έτσι ώστε η επένδυσή του να είναι οικονομικά εφικτή - επικερδή σε σύγκριση με το έργο που διεκπεραιώνει αυτός. Η ζώνη αυτή ορίζεται με πειραματικές μετρήσεις με βάση τους παράγοντες όπως η ποιότητα των υλικών της κατασκευής, το μέγεθός του, το ποσοστό φόρτισης στο οποίο θα λειτουργεί όπως και οι διακυμάνσεις σε αυτό, οι θερμικές απώλειές του και οι περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η μέση θερμοκρασία, η διακύμανσή της κατά τη διάρκεια της ημέρας, εποχής, η υγρασία, η βαρομετρική πίεση, κα. για να προσφέρει μια ικανοποιητική διάρκεια ζωής που κυμαίνεται συνήθως στα 15 – 20 έτη. Οι μετασχηματιστές υγρού τύπου προτείνονται για μεσαίες και μεγάλες κατηγορίες μετασχηματιστών, διότι προσφέρουν αποτελεσματικότερη ψύξη έναντι των μετασχηματιστών ξηρού τύπου.

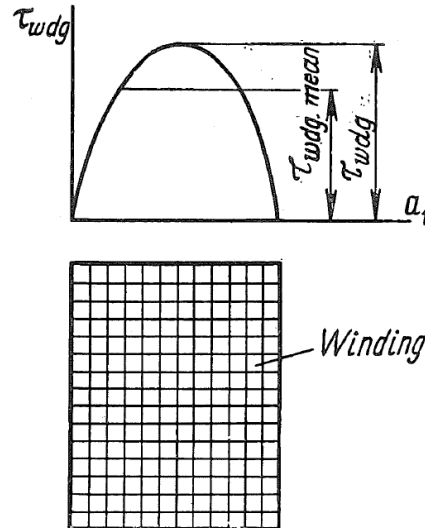
### 3.10.2 Ροή θερμότητας

Η απαγωγή της θερμότητας από το μετασχηματιστή επιτυγχάνεται με τα φαινόμενα της αγωγής, της συναγωγής και της ακτινοβολίας ξεκινώντας εσωτερικά από τον πυρήνα και τα τυλίγματα, τα οποία είναι και τα ενεργά στοιχεία που παράγουν θερμότητα, και καταλήγοντας έξω στον αέρα που περικυκλώνει αυτόν.

Στην περίπτωση του μετασχηματιστή υγρού τύπου η απαγωγή θερμότητας θα μπορούσε να χωριστεί σε πέντε διαφορετικά στάδια, διαφοροποιώντας έτσι τα στοιχεία και τον τρόπο με τον οποίο αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.



Στο 1<sup>ο</sup> στάδιο πραγματοποιείται η μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής από εσωτερικά των τυλιγμάτων και του πυρήνα προς την εξωτερική επιφάνεια τους. Λόγω της δομής του τυλιγματος όπου το κάθε τύλιγμα έχει πολλαπλούς αγωγούς στοιβαγμένους των έναν πάνω στον άλλο δημιουργώντας ένας πλέγμα, η θερμοκρασία των τυλιγμάτων διαφοροποιείται από τις εξωτερικές επιφάνειες ως προς το εσωτερικό τμήμα αυτών. Επειδή υπάρχει αυτή η διακύμανση στη θερμοκρασία του τυλιγματος η μετάδοση θερμότητας δεν θα είναι ιδανική.



Σχήμα 3.31:  
Διαφορά  
θερμοκρασίας  
τυλιγματος  
συναρτήσει της  
ακτινικής  
απόστασης  $a_1$   
από την  
εσωτερική  
διάμετρο του.  
[39, σελ. 155,  
Figure 10.2].

Στο 2<sup>ο</sup> στάδιο πραγματοποιείται η μετάδοση θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια των τυλιγμάτων και του πυρήνα προς το μέσο ψύξης, δηλαδή το λάδι. Σημαντικοί παράγοντες για το ποσό της μετάδοσης θερμότητας είναι η καλυπτόμενη επιφάνεια του τυλιγματος από το λάδι, το μέγεθος των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού και το ιξώδες του λαδιού. Ο υπολογισμός της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας των τυλιγμάτων και του λαδιού υπολογίζεται αναλυτικά με βάση τον τύπο δομής του τυλιγματος. Οι τύποι αυτοί προκύπτουν με βάση τη γενική σχέση υπολογισμού θερμοκρασίας τυλιγματος που ακολουθεί:

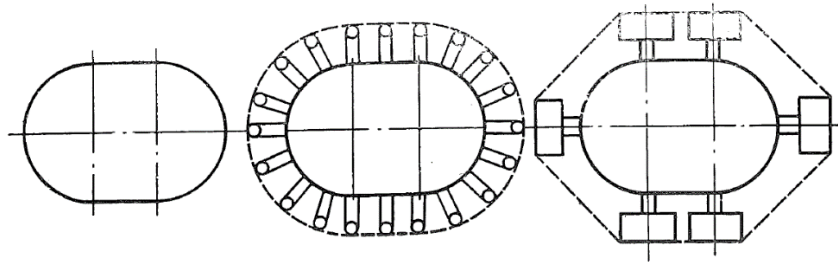
$$T_{wdg} = K_t \cdot q_{wdg}^n \quad (3.10.1)$$

Όπου  $q_{wdg}$  η ροή θερμότητας από την επιφάνεια του τυλιγματος σε  $W/m^2$ ,  $K_t$  και  $n$  σταθερές που ορίζονται μέσω πειραματικών διαδικασιών. Το  $n$  παίρνει τιμές από 0,6 έως 0,7.

Στο 3<sup>ο</sup> στάδιο πραγματοποιείται η μετάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής από το ζεστό λάδι στα τοιχώματα της δεξαμενής του μετασχηματιστή και στις ψυκτικές συσκευές. Το ζεστό λάδι έχει την τάση να ανεβαίνει προς το άνω τμήμα της δεξαμενής όπου εκεί η θερμότητα που έχει αποθηκευτεί σε αυτό αποβάλλεται προς τα τοιχώματα της δεξαμενής με αποτέλεσμα τη ψύξη του και έπειτα τη μετακίνηση του προς τα χαμηλότερα τμήματα της δεξαμενής για την επανάληψη της μετάδοσης θερμότητας με τα τυλίγματα. Εάν υπάρχει σύστημα βεβιασμένης ψύξης τότε το ζεστό λάδι εισέρχεται σε ειδικούς αγωγούς στο άνω τμήμα της δεξαμενής, περνάει μέσα από τις σωληνώσεις στις οποίες ψύχεται από τον αέρα που παρέχουν οι ανεμιστήρες και επιστρέφει με χαμηλότερη θερμοκρασία μέσω της σωλήνωσης στο κάτω τμήμα της δεξαμενής όπου εκεί θα οδηγηθεί στα τυλίγματα για την επανάληψη της μετάδοσης θερμότητας ολοκληρώνοντας έτσι τον κύκλο ψύξης σε αυτό το κλειστό σύστημα όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5.

Στο 4<sup>ο</sup> στάδιο πραγματοποιείται η μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής από την εσωτερική επιφάνεια των τοιχωμάτων της δεξαμενής προς την εξωτερική επιφάνεια και στα ψυκτικά μέσα που βρίσκονται εξωτερικά της δεξαμενής. Επειδή αυτή η θερμοκρασία διαφορά ( $\sim 1^\circ C$ ) είναι πολύ μικρή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα κατά τους υπολογισμούς.

Στο 5<sup>ο</sup> στάδιο πραγματοποιείται η μετάδοση θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια των τοιχωμάτων και των ψυκτικών μέσων προς τον αέρα του περιβάλλοντος μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων της δεξαμενής και των ψυκτικών μέσων, τη γεωμετρία αυτών, τη θερμοκρασία του αέρα όπως επίσης και την κατάσταση των επιφανειών που ακτινοβολούν. Σε περίπτωση η δεξαμενή έχει λεία επιφάνεια και είναι βαμμένη με ειδική μπογιά και δεν παρεμβάλλονται ψυκτικά μέσα ανάμεσα σε αυτή και τον αέρα, τότε το ποσό της συνολικής απαγωγής μέσω ακτινοβολίας μπορεί να φτάσει έως και 55%. Σε περίπτωση που η δεξαμενή είναι σωληνωτή ή περιέχει συνδυασμό ανεμιστήρων και ψυκτρών, τότε το ποσό αυτό πέφτει έως το 15%, διότι η θερμότητα ακτινοβολείται προς το περιβάλλον μέσω της ενεργής επιφάνειας που δημιουργείται από τα πιο εξωτερικά σημεία της δεξαμενής όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.32.



Σχήμα 3.32: Τρεις διαφορετικοί τύποι δεξαμενών μετασχηματιστή υγρού τύπου. Στα αριστερά πρόκειται για μία λεία δεξαμενή χωρίς ψυγεία και ανεμιστήρες. Η ενεργή επιφάνεια είναι ίση με την επιφάνεια της δεξαμενής. Στη μέση πρόκειται για σωληνωτή δεξαμενή, η ενεργή επιφάνεια είναι ίση με την εξωτερική διαγράμμιση της. Στα δεξιά πρόκειται για μία λεία δεξαμενή με συνδυασμό ανεμιστήρων και ψυκτρών. Η ενεργή επιφάνεια καθορίζεται από τη μορφολογία των ανεμιστήρων, όσο πιο πολύ προεξέχουν αυτές από την επιφάνεια της δεξαμενής, τόσο πιο πολύ απέχει και η ενεργή επιφάνεια. [39, σελ. 158, Figure 10.4].

Ενώ για την περίπτωση της συναγωγής, αυτή πραγματοποιείται μέσω της ολικής επιφάνειας της δεξαμενής – ψυκτικών μέσων και έχει ως παράγοντες τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και του υλικού με το οποίο έρχεται σε επαφή, με τη βαρομετρική πίεση και με το ύψος και σχήμα της δεξαμενής.

Για το υπολογιστικό μέρος της θερμικής μελέτης είναι σημαντικός ο ορισμός της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ των τυλιγμάτων και του λαδιού και της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του λαδιού και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

### 3.10.3 Υπολογισμός διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ τυλιγμάτων και λαδιού

Ο υπολογισμός της διαφοράς μεταξύ των δύο στοιχείων, δηλαδή του τυλίγματος και του λαδιού, γίνεται με την παραδοχή του υπολογισμού της μέσης διαφοράς θερμοκρασίας. Από τη στιγμή της εκκίνησης της φόρτισης του μετασχηματιστή χρειάζονται τουλάχιστον 30 λεπτά για να σταθεροποιηθεί η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο στοιχείων.

#### 3.10.3.1 Μονοκόμματα κυλινδρικά τυλίγματα

Στην περίπτωση μονοκόμματων κυλινδρικών τυλιγμάτων η μέση διαφορά θερμοκρασίας θα είναι ίση με:

$$T_{wdg} = 0,159 \cdot q_{wdg}^{0,7} \quad (3.10.2)$$

Όπου η ροή θερμότητας από το τυλίγμα στο λάδι  $q_{wdg}$  θα είναι ίση με:

$$q_{wdg} = P_{Cu}/A_{cool} \quad (3.10.3)$$

Όπου  $P_{cu}$  οι θερμικές απώλειες των τυλιγμάτων σε W και  $A_{cool}$  η ψυχόμενη επιφάνεια του τυλίγματος, δηλαδή αυτή η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το λάδι.

Στην περίπτωση όπου το τύλιγμα X.T. έχει τη μορφή επίπεδων αγωγών διπλής στρώσης (δύο βημάτων), τότε η επιφάνεια  $A_{cool}$  θα υπολογίζεται μέσω της σχέσης (3.10.4).

$$A_{cool} = 3 \times 4 \cdot \pi \cdot D_m \cdot H_{wdg} - 3 \times 3 \cdot c \cdot n \cdot H_{wdg} \quad (3.10.4)$$

Όπου:

- $D_m$ : η μέση διάμετρος του τυλίγματος χαμηλής τάσης σε m,
- $H_{wdg}$ : το μήκος του τυλίγματος σε m,
- $c$ : το πάχος του αποστατικού μεταξύ των δύο στρώσεων σε m,
- $n$ : το πλήθος των τοποθετημένων αποστατικών στην περιφέρεια του τυλίγματος.

Στην περίπτωση που το τύλιγμα Y.T. αποτελείται από στρογγυλούς αγωγούς πολλαπλών στρώσεων η επιφάνεια  $A_{cool}$  θα είναι ίση με:

$$A_{cool} = 3 \cdot \pi \cdot D_{out} \cdot H_{wdg} + 3 \times 2 \cdot D_{duct} \cdot H_{wdg} - 3 \times 2 \cdot c \cdot n \cdot H_{wdg} \quad (3.10.5)$$

Όπου:

- $D_{out}$ : η εξωτερική διάμετρος του τυλίγματος υψηλής τάσης,
- $D_{duct}$ : η μέση διάμετρος του δίαυλου μεταξύ των στρώσεων του τυλίγματος υψηλής τάσης.

Σε περίπτωση που η μόνωση των τυλιγμάτων υπερβαίνει το πάχος  $t$  των 2,5 mm, τότε εισάγεται και διορθωτικός θερμοκρασιακός παράγοντας στο τύλιγμα υψηλής τάσης όπου θα είναι ίσος με:

$$\Delta T_{wdg} = 1,15 \cdot (t - 2,5) \cdot q_{wdg} \times 10^{-3} \quad (3.10.6)$$

### 3.10.3.2 Τυλίγματα μεμονωμένων δισκοειδών πηνίων και τυλίγματα μονοκόμματων συνεστραμμένων αγωγών

Για την περίπτωση αυτών των τυλιγμάτων η διαφορά θερμοκρασίας θα ορίζεται με βάση τους παρακάτω τύπους:

Για το εσωτερικό τμήμα του τυλίγματος ισχύει:

$$T_{wdg} = 0,41 \cdot q_{wdg}^{0,6} \quad (3.10.7)$$

Ενώ για το εξωτερικό τμήμα του τυλίγματος θα ισχύει:

$$T_{wdg} = 0,358 \cdot q_{wdg}^{0,6} \quad (3.10.8)$$

Το εσωτερικό τμήμα του τυλίγματος θα έχει μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας με το λάδι σε σύγκριση με το εξωτερικό τμήμα, λόγω της δυσκολίας της κυκλοφορίας του λαδιού σε εκείνο το σημείο. Η ροή θερμότητας για ένα πηνίο ή μία στροφή των συνεστραμμένων αγωγών σε αυτή την περίπτωση θα ορίζεται ως:

$$q_{wdg} = \frac{K_{cu} \cdot I \cdot N \cdot J \cdot K_{\phi} \cdot K_c}{D} \quad (3.10.9)$$

Όπου:

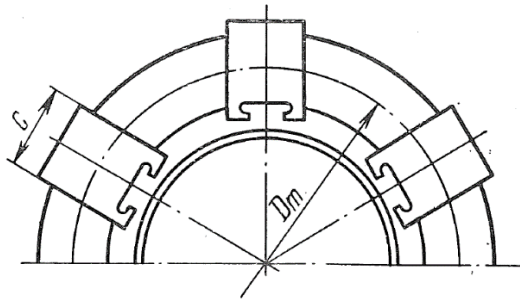
- $K_{cu}$ : ο συντελεστής αντίστασης χαλκού που είναι ίσος με 21,4 για θερμοκρασία 75 °C,

- $I$ : το ρεύμα που ρέει στο πηνίο ή στη συγκεκριμένη στροφή,
- $N$ : το πλήθος των στροφών στο πηνίο,
- $J$ : η πυκνότητα της έντασης του ρεύματος,
- $K_{\phi}$ : ο συντελεστής επιπρόσθετων απωλειών,
- $K_c$ : ο συντελεστής κάλυψης της επιφάνειας του πηνίου.
- $D$ : η περίμετρος της τομής του πυρήνα.

Ο συντελεστής  $K_c$  είναι άμεσα συνδεδεμένος με την κάλυψη του πηνίου από μονωτικά στοιχεία που εμποδίζουν τη ροή του λαδιού στην επιφάνεια του τυλίγματος που καλύπτουν τα ίδια. Πιο συγκεκριμένα ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως:

$$K_c = \frac{\pi \cdot D_m}{\pi \cdot D_m - c \cdot n} \quad (3.10.10)$$

Όπου  $D_m$  η μέση διάμετρος του τυλίγματος – πηνίου,  $c$  το πάχος των αποστατικών, που έχει συνήθη τιμή τα 40 mm, και  $n$  το πλήθος των τοποθετημένων αποστατικών στην περιφέρεια του πηνίου όπως εμφανίζεται και στο σχήμα 3.33.



Σχήμα 3.33: Αποστατικά τοποθετημένα στα πηνία του τυλίγματος με πάχος  $c$  και μέση διάμετρος του πηνίου ίση με  $D_m$ . [39, σελ. 161, Figure 10.6].

Το πλήθος των αποστατικών επιλέγεται να έχει τέτοια τιμή ώστε ο συντελεστής  $K_c$  να προκύπτει ίσος με τιμή από 1,2 έως 1,4.

Στο τελικό αποτέλεσμα θα πρέπει να ληφθούν και δύο διορθωτικοί συντελεστές  $\Delta T_{wdg 1}$  και  $\Delta T_{wdg 2}$ , όπου ο πρώτος εισάγεται για τη διόρθωση, όπως και στην περίπτωση του μονοκόμματος τυλίγματος, του πάχους της μόνωσης και ο δεύτερος για την επιρροή των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού που τοποθετούνται ενδιάμεσα από τα πηνία. Ο πρώτος ορίζεται ως:

$$\Delta T_{wdg 1} = 3,1 \cdot (t - 0,5) \cdot q_{wdg} \quad (3.10.11)$$

Όπου  $t$  το πάχος της μόνωσης. Ο δεύτερος διορθωτικός συντελεστής ορίζεται ως εξής:

$$\Delta T_{wdg 2} = K_{duct} \cdot q_{wdg} \quad (3.10.12)$$

Όπου ο συντελεστής  $K_{duct}$  επιλέγεται με βάση το μέγεθος των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγού λαδιού με βάση τον πίνακα 3.8.

Ακτινικό μέγεθος πηγίου σε mm	K <sub>duct</sub> συναρτήσει του πάχους των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού σε mm					
	4	5	6	7.5	8	10
20	-2,6	-3,7	-4,5	-5,2	-5,2	-5,2
22	-2,4	-3,3	-4,2	-4,9	-5,2	-5,2
24	-2,1	-3	-3,9	-4,8	-4,9	-5,2
26	-1,9	-2,7	-3,6	-4,6	-4,8	-5,2
28	-1,6	-2,4	-3,3	-4,4	-4,6	-5,2
30	-1,4	-2,2	-3,1	-4,2	-4,4	-5,2
32	-1,2	-2,0	-2,8	-4,0	-4,2	-5,0
34	-1,0	-1,8	-2,6	-3,7	-4,1	-4,9
36	-0,7	-1,6	-2,3	-3,5	-3,9	-4,8
38	-0,4	-1,4	-2,2	-3,3	-3,7	-4,6
40	-0,1	-1,2	-2,1	-3,1	-3,5	-4,5
45	*	-0,7	-1,6	-2,7	-3,0	-4,2
50	*	-0,2	-1,2	-2,3	-2,6	-3,9
55	*	0,1	-0,8	-2,0	-2,3	-3,5
60	*	0,4	-0,3	-1,7	-2,0	-3,2
65	*	*	0	-1,3	-1,7	-2,9
70	*	*	*	-1	-1,4	-2,6

\* Μη εφαρμόσιμες σχέσεις για το μέγεθος των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού  
 Σημείωση: Σε περίπτωση ενδιάμεσης τιμής για το ακτινικό μέγεθος πηγίου, τότε επιλέγεται η κοντινότερη  
 μεγαλύτερη τιμή (προς τη θετική κατεύθυνση) του συντελεστή K<sub>duct</sub>

Πίνακας 3.8: Πίνακας εύρεσης τιμής του συντελεστή K<sub>duct</sub> συναρτήσει το ακτινικού μεγέθους του πηγίου και του πάχους των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού. [39, σελ. 161, Table 10.2 (Μεταφρασμένος)].

### 3.10.4 Υπολογισμός διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ λαδιού και περιβάλλοντος

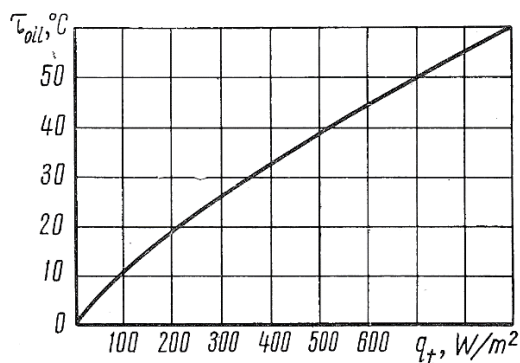
Για τον υπολογισμό αυτής της διαφοράς θερμοκρασίας επιλέγεται ο μέσος όρος της θερμοκρασίας του λαδιού στη δεξαμενή εφόσον η τιμή του διαφοροποιείται για διαφορετικά ύψη. Στην περίπτωση φυσικής ψύξης η διαφορά θερμοκρασίας λαδιού – περιβάλλοντος T<sub>oil</sub> υπολογίζεται με βάση την καμπύλη του σχήματος 3.34, η οποία ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$T_{oil} = 0,262 \cdot q_t^{0.8} \quad (3.10.13)$$

Όπου η ροή θερμότητας q<sub>t</sub> ορίζεται ως:

$$q_t = \frac{P_{oc} + P_{sc}}{A_t} \quad (3.10.14)$$

Όπου P<sub>oc</sub> και P<sub>sc</sub> οι απώλειες ανοικτού κυκλώματος και βραχυκυκλώματος αντίστοιχα και A<sub>t</sub> η ψυχόμενη επιφάνεια της δεξαμενής και των ψυκτικών μέσων.



Σχήμα 3.34: Καμπύλη θερμοκρασιακής διαφοράς λαδιού – περιβάλλοντος συναρτήσει της θερμικής φόρτισης μετασχηματιστή. [39, σελ. 162, Figure 10.7]

Η θερμοκρασιακή διαφορά στο άνω τμήμα της δεξαμενής, όπου έχει και τη μέγιστη τιμή θερμοκρασίας, δεν θα πρέπει να ξεπερνά τους 55- 60 °C αναλόγως τη δομή της δεξαμενής. Περαιτέρω στοιχεία μπορούν να βρεθούν σε εξειδικευμένη βιβλιογραφία [2, §10.5].

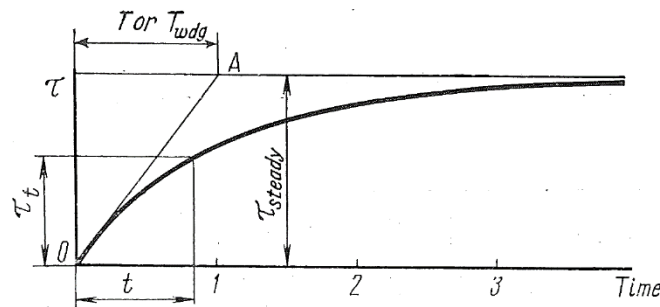
### 3.10.5 Μεταβατικό - παροδικό στάδιο θερμικής φόρτισης μετασχηματιστή

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο §3.10.3 κατά την εκκίνηση της φόρτισης ενός μετασχηματιστή απαιτείται ένα ορισμένο χρονικό διάστημα για να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των τυλιγμάτων και του λαδιού. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μεταβατικό στάδιο θερμικής φόρτισης (**period of transient heating**). Αν θεωρηθούν τα τυλίγματα ως ιδανικοί θερμικοί μονωτές, δηλαδή δεν μεταφέρουν ποσά θερμότητας από τα ίδια στο λάδι, αυτά θα χρειαζόταν ένα ορισμένο χρονικό διάστημα για να φτάσουν στην ορισμένη θερμοκρασιακή διαφορά με το λάδι. Στην ιδανική αυτή περίπτωση αυτός ο χρόνος θα ήταν ίσος με τη χρονική σταθερά  $T$  (για το λάδι του μετασχηματιστή και  $T_{wdg}$  (για τα τυλίγματα του) και θα ακολουθούσε την ευθεία  $OA$  του σχήματος 3.35.

Στην πραγματικότητα όμως, τα τυλίγματα ξεκινούν άμεσα, με την εκκίνηση της φόρτισης, τη μεταφορά θερμικών ποσών στο λάδι. Από το λάδι πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας στη δεξαμενή και από αυτή προς το περιβάλλον, γι' αυτό το λόγο ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για να φτάσουν τα δύο στοιχεία αυτά στην ορισμένη θερμοκρασιακή διαφορά και να ισορροπήσουν είναι μεγαλύτερος, συγκεκριμένα μπορεί να είναι ίσος με 3 έως 4 φορές τη χρονική σταθερά  $T$ . Σε αυτήν την περίπτωση η μορφή της καμπύλης της θερμοκρασιακής διαφοράς συναρτήσει του χρόνου έχει εκθετική μορφή, η οποία θα είναι της μορφής:

$$\tau(t) = \tau_{steady} \cdot (1 - e^{-t/T}) \quad (3.10.15)$$

Όπου  $\tau_{steady}$  η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ τυλιγμάτων και λαδιού, δηλαδή όταν το σύστημα έχει φτάσει σε ισορροπία.



Σχήμα 3.35: Καμπύλη θερμοκρασιακής διαφοράς τυλιγμάτων – λαδιού κατά το μεταβατικό στάδιο. [39, σελ. 172, Figure 10.14].

Στη γενικότερη μορφή η χρονική σταθερά  $T$  του λαδιού του μετασχηματιστή, σε μονάδες ωρών, μπορεί να υπολογιστεί με βάση την παρακάτω σχέση:

$$T = \frac{0,12 \cdot (G_c + G_i + \frac{2}{3} \cdot G_t) + 0,5 \cdot G_{oil}}{P_{oc} + P_{sc}} \cdot \tau_{oil} \quad (3.10.16)$$

Όπου:

- $G_c$ : το βάρος των τυλιγμάτων,
- $G_i$ : το βάρος του πυρήνα,
- $G_t$ : το βάρος της δεξαμενής,
- $G_{oil}$ : το βάρος του λαδιού,
- $\tau_{oil}$ : η θερμοκρασιακή διαφορά λαδιού – περιβάλλοντος.

Ενώ η χρονική σταθερά των τυλιγμάτων  $T_{wdg}$  μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (3.10.17).



$$T_{wdg} = \frac{c_{cu}}{P_{sc}} = \frac{C_{cu} \cdot G_c \cdot \tau_{wdg}}{P_{sc}} \cdot K_{ins} \quad (3.10.17)$$

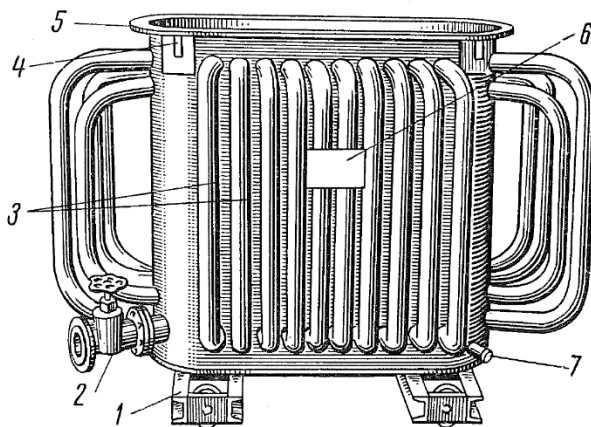
Όπου:

- $c_{cu}$ : η ειδική θερμότητα του χαλκού που είναι ίση με  $6,6 \frac{W \cdot \text{min}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$ ,
- $C_{cu}$ : η συνολική θερμοχωρητικότητα,
- $G_c$ : το βάρος των τυλιγμάτων σε kg και
- $K_{ins}$ : ο συντελεστής μόνωσης ο οποίος παίρνει τιμές από 1,2 έως 1,25.

### 3.11 Δεξαμενή ψύξης

Σημαντικό ρόλο στη ψύξη του μετασχηματιστή για την επίτευξη σταθερής θερμοκρασίας λειτουργίας έχει η δεξαμενή στην οποία τοποθετείται το ενεργό τμήμα του. Με την αύξηση της ισχύος του μετασχηματιστή αυξάνονται και οι θερμικές απώλειες του και έτσι υπάρχει ανάγκη για καλύτερη απαγωγή αυτής της θερμότητας.

Μετασχηματιστές με εγκατεστημένη ισχύ έως και τα 40 kVA μπορούν να λειτουργήσουν με λεία δεξαμενή χωρίς ψυκτικά μέσα (ONAN cooling – Oil Natural Air Natural cooling). Σε περίπτωση αύξησης της ισχύος πέραν του αναφερόμενου ποσού, τότε ο συγκεκριμένος τύπος δεξαμενής δεν είναι αποτελεσματικός για τη σωστή απαγωγή της θερμότητας και έτσι χρησιμοποιούνται σωληνωτές δεξαμενές έως και την ισχύ των 1.6 MVA. Στις σωληνωτές δεξαμενές τοποθετούνται εξωτερικοί αγωγοί, περιμετρικά της δεξαμενής που φτάνουν από το κάτω μέρος της δεξαμενής έως το άνω όπου υπάρχει και το πιο θερμό λάδι, και μέσω συναγωγής αυξάνεται το ποσό της απαγόμενης θερμότητας μέσω συναγωγής. Βέβαια με αυτή τη μορφολογία μειώνεται ταυτόχρονα η ακτινοβολούμενη απαγόμενη θερμότητα, διότι αυτή είναι ανάλογη της ενεργής επιφάνειας όπως φαίνεται και εξηγείται στο σχήμα 3.32. Οι σωλήνες αυτοί μπορούν να τοποθετηθούν έως και σε τέσσερις στρώσεις για να αυξήσουν το φαινόμενο της συναγωγής σε ικανοποιητικά επίπεδα. Περαιτέρω αύξηση των στρώσεων δείχνει πως η βελτίωση στη ψύξη είναι πολύ μικρή και δεν δικαιολογεί το κόστος για την κατασκευή αυτή.



Σχήμα 3.36: Δομή σωληνωτής δεξαμενής μετασχηματιστή ισχύος 250 kVA. Όπου 1) Φορείο μεταφοράς μετασχηματιστή, 2) Βάνα αποστράγγισης λαδιού, 3) Σωληνώσεις δεξαμενής, 4) Γάντζοι ανύψωσης, 5) Άνω πλαίσιο, 6) Πινακίδιο πληροφοριών και 7) Μέσο δειγματοληψίας λαδιού. [39, σελ. 165, Figure 10.9].

Από τα 1,6 MVA έως και τα 10 MVA χρησιμοποιούνται λείες δεξαμενές με ψυκτρες όπως φαίνεται και στην τρίτη περίπτωση του σχήματος 3.32. Για μετασχηματιστές μεγαλύτερης ισχύος από 10 MVA τοποθετούνται επιπρόσθετοι ανεμιστήρες οι οποίοι ψύχουν το τοιχώματα με βεβιασμένη μορφή έναντι της φυσικής από την προηγούμενη περίπτωση (ONAF cooling – Oil Natural Air Forced cooling). Επίσης για περαιτέρω αύξηση της ψυκτικής ικανότητας μπορεί να τοποθετηθεί η αντλία η οποία εξαναγκάζει τη ροή του λαδιού μέσα στη δεξαμενή με μεγαλύτερο ρυθμό (OFAF cooling – Oil Forced Air Forced cooling). Αν η απαίτηση της ψύξης είναι ακόμα

μεγαλύτερη, τότε σε αυτήν την περίπτωση εισάγεται ένα ψυγείο νερού στην ολική εγκατάσταση όπου οι σωλήνες λαδιού εισέρχονται μέσα από αυτό και έτσι η ψύξη γίνεται πιο αποτελεσματική (OFAF cooling – Oil Forced Water Forced cooling).



*Εικόνα 3.5:  
Τριφασικός  
μετασχηματιστής  
280 MVA/400 –  
150 - 30 kV τύπου  
OFAF σε  
ηλεκτρικό  
υποσταθμό του  
Λαυρίου κατά την  
κατασκευή.  
[Προσωπικό  
αρχείο]*

### 3.12 Τελική διαμόρφωση μετασχηματιστή

Σε αυτό το κομμάτι αναλύονται τα τελικά βήματα που ακολουθούν για την τελική συναρμολόγηση και ολοκλήρωση της κατασκευής ενός μετασχηματιστή.

#### 1) Συναρμολόγηση Πυρήνα

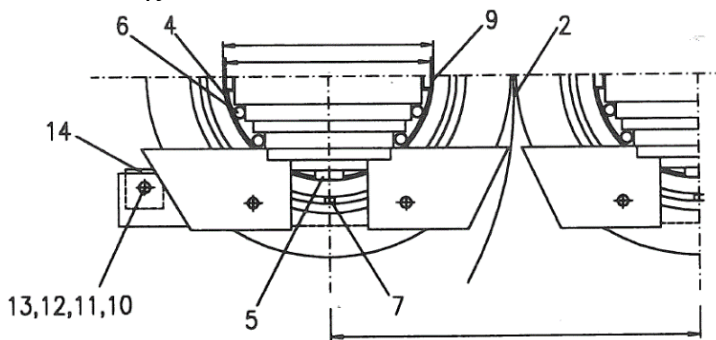
Η διαδικασία αυτή είναι διαφορετική για τη συναρμολόγηση του στοιβαχτού πυρήνα έναντι του τυλιχτού. Για την περίπτωση του στοιβαχτού τα ελάσματα τοποθετούνται σε ειδική τράπεζα – καλούπι για την ταυτόχρονη στοίβαξη και διάπλεξη σε όλες τις στήλες. Στις γωνίες των ζυγωμάτων τοποθετούνται 4 δοκοί συσφίξεως, οι οποίες μπορεί να είναι μεταλλικές, ξύλινες ή συνθετικές. Σκοπός των δοκών είναι η αντοχή στις καμπτικές τάσεις που δημιουργούνται λόγω βραχυκυκλωμάτων, ώστε να παραμένουν τα τυλίγματα σταθερά. Επίσης τοποθετούνται 2 έως 4 ειδικό κοχλίες, παρόμοιοι σαν αυτούς του σχήματος 3.7 αναλόγως την ισχύ του μετασχηματιστή κατακόρυφα στις πλευρές των ζυγωμάτων. Επιλέγεται διάμετρος που θα αναλογεί στην αντοχή των εφελκυστικών δυνάμεων σύσφιξης και των δυνάμεων βραχυκύκλωσης με μία προσαύξηση της τάξης του 40%. Κατά την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης του πυρήνα, όταν τα τυλίγματα είναι έτοιμα για τοποθέτηση, αφαιρούνται τα φύλλα του άνω ζυγώματος για την έκθεση των στηλών για την τοποθέτησή τους.

Στην περίπτωση του τυλιχτού πυρήνα τα φύλλα ίσου πλάτους περιελίσσονται σε ειδικό κυλινδρικό τύμπανο μηχανής, ώστε να φτάσουν στο ορισμένο πλήθος στρώσεων για την επίτευξη της επιθυμητής μαγνητικής επαγωγής. Όταν γίνει αυτό, ο πυρήνας συμπιέζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μορφοποιηθεί σε οβάλ σχήμα, όπως αυτό του σχήματος 3.8(δ) και με ειδικό κοπτικό εργαλείο από διαμάντι κόβεται ο πυρήνας σε συγκεκριμένο σημείο υπό γωνία 45°, ώστε να μπορεί να ανοίξει και να τοποθετηθεί το τύλιγμα εντός αυτού.

#### 2) Τοποθέτηση τυλιγμάτων και συναρμολόγηση στηλών

Πριν την τοποθέτησή τους, τα τυλίγματα εισέρχονται σε ειδικό κλίβανο κενού για την ξήρανσή τους, με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας που υπάρχει εσωτερικά των μονωτικών υλικών.

Επίσης ασκείται κατακόρυφη δύναμη συμπίεσης σε αυτά ίση με αυτή της κατακόρυφης συνιστώσας της δύναμης βραχυκύκλωσης. Τα τυλίγματα από τη στιγμή της περιελίξεως συμπιέζονται για να εξαλείψουν οποιαδήποτε χαλάρωση και για να παραμείνουν συμπιεσμένα έως και την τοποθέτησή τους, ώστε να μην υπάρχουν χαλαρώσεις σε αυτά, εφαρμόζοντας επάνω τους μεταλλικές ή συνθετικές ταινίες, οι οποίες απομακρύνονται όταν τοποθετηθούν εντός των στηλών. Μετά την ολοκλήρωση της τοποθέτησης των τυλιγμάτων επανατοποθετείται το άνω ζύγωμα στη θέση του για το κλείσιμο του πυρήνα και οι δοκοί συσφίξεως. Στη συνέχεια τοποθετούνται οδηγοί συγκεκριμένων σχημάτων, από ξύλο ή πρεσπάν περιμετρικά από τον πυρήνα μεταξύ αυτού και του τυλιγματος. Στα σημεία όπου ο πυρήνας είναι επίπεδος τοποθετούνται ορθογώνιοι οδηγοί (σχήμα 3.37 - ενδείξεις 5,7, και 9), ενώ στα σημεία που δημιουργεί γωνίες λόγω της μεταβολής του πλάτους των ελασμάτων τοποθετούνται στρογγυλοί οδηγοί (σχήμα 3.37 - ένδειξη 6). Αυτοί τοποθετούνται με τέτοια συχνότητα στην περιφέρεια του πυρήνα, ώστε η καμπτική τάση μεταξύ δύο οδηγών να μην υπερβαίνει τα  $80 \text{ kN/mm}^2$ . Επιλέγονται οδηγοί μεγέθους τέτοιου, ώστε να δημιουργείται απόσταση μεταξύ τυλιγματος και πυρήνα που θα αποτρέπουν τη διάσπαση τάσεως μεταξύ των δύο και ταυτοχρόνως θα επιτρέπει τη ροή λαδιού ενδιάμεσα των δύο για αύξηση της ψυκτικής ικανότητας της κατασκευής.

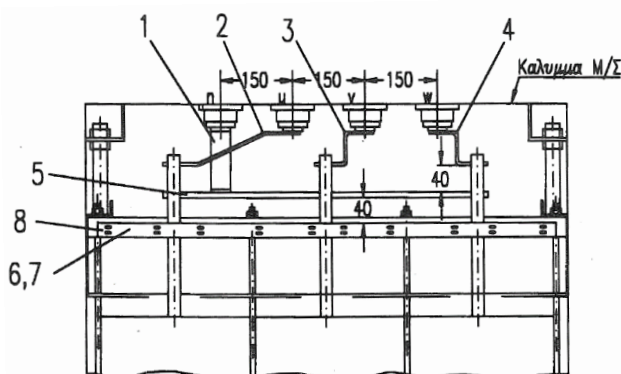


Σχήμα 3.37: Κατακόρυφη όψη στήλης. 2) Διαχωριστικό μονωτικό φύλλο στηλών, 4) Μονωτικός κύλινδρος, 5, 7 και 9) Ορθογώνιοι οδηγοί, 6) Στρογγυλός οδηγός. [4, σελ. 96, Σχήμα 78].

Έπειτα εισάγεται εσωτερικά του τυλιγματος μονωτικός κύλινδρος από πρεσπάν (σχήμα 3.37 – ένδειξη 4) για την προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων κατά την εισαγωγή του στη στήλη του πυρήνα. Επίσης τοποθετείται μεταξύ δύο διαδοχικών στηλών μονωτικό φύλλο (σχήμα 3.37 – ένδειξη 2) για την αποτροπή διάσπασης μεταξύ των δύο διαφορετικών φάσεων.

### 3) Συναρμολόγηση των άκρων των φάσεων του δευτερεύοντος τυλιγματος

Έπειτα την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης των σειρών τα άκρα των φάσεων των τυλιγμάτων συγκολλούνται σε μπάρες χαλκού συγκεκριμένων διαστάσεων για την αντοχή της πυκνότητας ρεύματος που ρέει μέσω των τυλιγμάτων και ώστε να μπορεί να ανοιχθεί κυκλική οπή πάνω σε αυτές για τη σύνδεση των μονωτήρων. Για την επίτευξη συνδεσμολογίας αστέρα τα τρία άκρα των φάσεων συνδέονται μαζί μέσω μίας κοινής οριζόντιας μπάρας χαλκού η οποία είναι συνδεδεμένη με την αντίστοιχη επαφή για το μονωτήρα του ουδετέρου αγωγού. Η αντίστοιχη δομή απεικονίζεται και στο σχήμα 3.38.



Σχήμα 3.38: Συναρμολόγηση των άκρων των φάσεων του δευτερεύοντος τυλιγματος. 1) Σύνδεσμος ουδετέρου, 2,3 και 4) Σύνδεσμοι φάσεων, 5) Μπάρα σύνδεσης φάσεων για δημιουργία αστέρα, 6,7 και 8) Δομή στήριξης αγωγών. [4, σελ. 96, Σχήμα 79].

#### 4) Συναρμολόγηση των άκρων των φάσεων και του μεταγωγέα του πρωτεύοντος τυλίγματος

Σε αυτήν την περίπτωση γίνεται η κατάλληλη ένωση των άκρων των φάσεων του πρωτεύοντος τυλίγματος για να πραγματοποιηθεί η επιθυμητή ένωση, τριγώνου ή αστέρα. Στα σημεία όπου έχουν ενωθεί οι τρεις φάσεις συγκολλούνται αγωγοί, οι οποίοι καταλήγουν στους μονωτήρες υψηλής τάσης. Έπειτα τα άκρα των λήψεων συγκολλούνται και αυτά στις σταθερές επαφές του μεταγωγέα με συγκεκριμένο τρόπο για να προκύψει και το αντίστοιχο βηματικό εύρος τάσης.

#### 5) Τελικά τμήματα συναρμολόγησης μετασχηματιστή

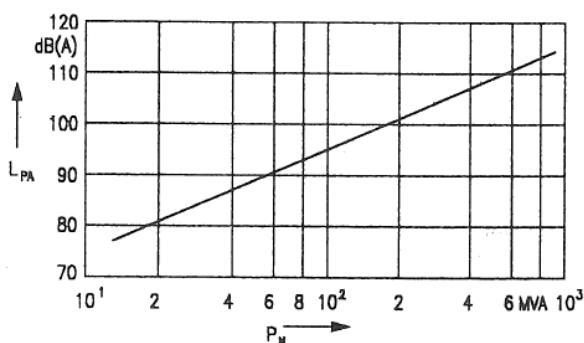
Εφόσον έχει τοποθετηθεί ο πυρήνας εντός του καλύμματος, αυτός συνδέεται μέσω χάλκινου ελάσματος με το κάλυμμα για την επίτευξη γείωσης του μετασχηματιστή ως προς τη γη για τα χωρητικά φορτία του. Έπειτα ο μετασχηματιστής εφοδιάζεται με λάδι με βοήθεια αντλίας. Στη συνέχεια τοποθετούνται όλες οι παρεμφερείς συσκευές, όπως η συσκευή Buchholz, το δοχείο διαστολής κα. για την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης του.

### 3.13 Θόρυβος μετασχηματιστών

Κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή λόγω της μαγνητικής επαγωγής που εφαρμόζεται στο πυρήνα προκαλείται μεταβολή του μήκους των ελασμάτων λόγω της μαγνητοσυστολής. Αυτή η μεταβολή του μήκους, που μπορεί να θεωρηθεί ως μία ταλάντωση προκαλεί θόρυβο. Αυτός ο θόρυβος μεταδίδεται μέσω του λαδιού στο τοίχωμα και από αυτό προς τα έξω. Η στάθμη του θορύβου αυτού είναι ανάλογη του βάρους του πυρήνα, άρα και της ισχύος του μετασχηματιστή. Σημαντικός παράγοντας επίσης είναι η μαγνητική επαγωγή όπου επηρεάζει και αυτή τη στάθμη του ήχου. Η απόλυτη κατανομή της στάθμης του θορύβου στην επιφάνεια του πυρήνα ορίζεται ως στάθμη θορύβου  $L_{pA}$ . Πιο συγκεκριμένα για μαγνητική επαγωγή ίση με 1,75 T τα επίπεδα της στάθμης θορύβου  $L_{pA}$  σε dB συναρτήσει της ισχύος του μετασχηματιστή απεικονίζονται στο σχήμα 3.39.

Παράγοντες για τη μείωση της στάθμης θορύβου  $L_{pA}$  είναι:

- 1) Η εφαρμογή βελτιωμένων τρόπων στοίβαξης και σύσφιξης των ελασμάτων του πυρήνα.
- 2) Η τοποθέτηση του πυρήνα σε τέτοιο σημείο όπου δεν θα εισέρχονται άλλες ταλαντώσεις σε αυτόν από τη γενική κατασκευή.
- 3) Τοποθέτηση ειδικών τοιχωμάτων απόσβεσης θορύβου στη δεξαμενή του μετασχηματιστή.
- 4) Απομακρυσμένη τοποθέτηση των ψυκτικών συσκευών από τη δεξαμενή για την αποφυγή της μεταφοράς των ταλαντώσεων μέσω του πυρήνα σε αυτές.
- 5) Χρήση ελασμάτων υψηλής ποιότητας που αντιστέκονται στην μεταβολή του μήκους τους προκαλώντας μικρότερες ταλαντώσεις άρα και μικρότερη στάθμη θορύβου.



Σχήμα 3.39: Στάθμη θορύβου  $L_{pA}$  σε dB συναρτήσει της ισχύος μετασχηματιστή για μαγνητική επαγωγή 1,75 T. [4, σελ. 147, Σχήμα 106].



### 3.14 Καταπονήσεις από υπερτάσεις και μονώσεις

#### 3.14.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναλυθεί και στην παράγραφο §2.8.4 οι καταπονήσεις στο μετασχηματιστή από υπερτάσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν από φυσικά φαινόμενα, όπως οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις, από σφάλματα του δικτύου, από πιθανό συντονισμό του μετασχηματιστή, από δοκιμές της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης και από χειρισμούς του μετασχηματιστή στο δίκτυο στο οποίο έχει συνδεθεί. Οι υπερτάσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση ζωής των μονωτικών υλικών ή ακόμα και την πλήρη καταστροφή αυτών, άρα και του μετασχηματιστή.

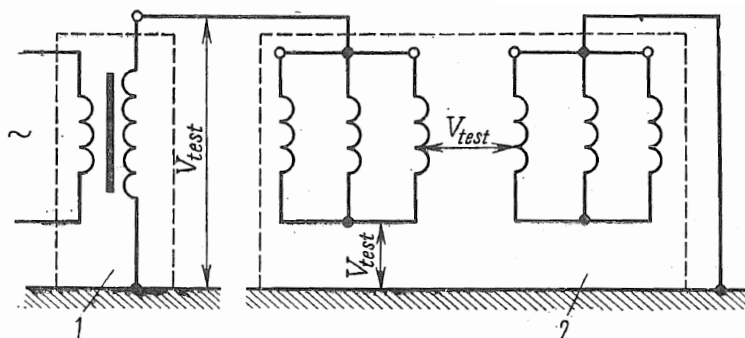
Η μόνωση του μετασχηματιστή μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες, στην εξωτερική και στην εσωτερική. Η εξωτερική αποτελεί τη μόνωση που υπάρχει μεταξύ των τυλιγμάτων, αλλά και μεταξύ τυλίγματος και γης. Η εσωτερική αποτελεί τη μόνωση που υπάρχει εσωτερικά του τυλίγματος και αφορά την απομόνωση των σπειρών για την αποφυγή εσωτερικού βραχυκυκλώματος. Η ονομαστική τάση λειτουργίας και οι υπερτάσεις που μπορούν να προκληθούν λόγω χειρισμών του δικτύου επηρεάζουν την εξωτερική μόνωση, ενώ οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις επηρεάζουν την εσωτερική μόνωση του μετασχηματιστή. Η επιλογή της κατάλληλης μόνωσης είναι πολύ σημαντική για την αντοχή του μετασχηματιστή από υπερτάσεις, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε πρόωρη γήρανση της μόνωσης ή σε δυσμενέστερες περιπτώσεις να προκαλέσουν βραχυκύκλωμα στο μετασχηματιστή, αλλά χωρίς την υπερδιαστασιολόγηση της, με αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση στο κόστος κατασκευής του.

Γι' αυτό το λόγο πραγματοποιούνται κάποιες δοκιμές στο μετασχηματιστή με στόχο τον έλεγχο της αντοχής αυτού σε παρόμοιες δυσμενείς καταστάσεις. Τέτοιες δοκιμές είναι η δοκιμή εφαρμοσμένης διηλεκτρικής αντοχής και η δοκιμή επαγόμενης τάσης.

#### 3.14.2 Δοκιμές αντοχής μόνωσης μετασχηματιστή

##### Δοκιμή εφαρμοσμένης διηλεκτρικής αντοχής

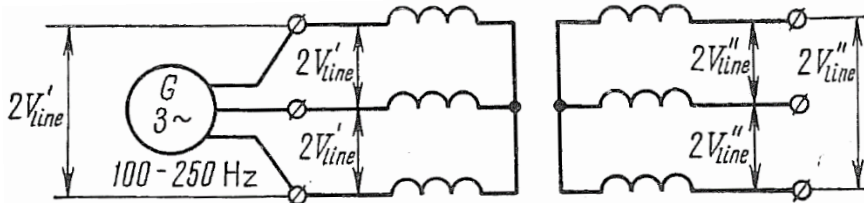
Κατά τη δοκιμή αυτή μέσω ειδικού μετασχηματιστή δοκιμών ο μετασχηματιστής προς δοκιμή τροφοδοτείται στο τύλιγμα προς δοκιμή με την κατάλληλη τάση δοκιμής που είναι μεγαλύτερη από αυτή της ονομαστικής λειτουργίας και τη συχνότητα λειτουργίας που αντιστοιχεί σε αυτό. Το τύλιγμα το οποίο δεν βρίσκεται υπό δοκιμή γειώνεται, όπως επίσης και γειώνονται και άλλα σημεία του μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή. Στο σχήμα 3.40 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία της δοκιμής αυτής. Η τάση που εφαρμόζεται στο μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή αυτή εμφανίζεται στο πίνακα 3.9. Κατά τη δοκιμή αυτή ελέγχεται η επάρκεια της εξωτερικής μόνωσης του μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.40: Διάγραμμα συνδεσμολογίας δοκιμής εφαρμοσμένης διηλεκτρικής αντοχής για τον έλεγχο της εξωτερικής μόνωσης του μετασχηματιστή. 1) ειδικός μετασχηματιστής δοκιμών, 2) μετασχηματιστής υπό δοκιμή.[39, σελ. 208, Figure 13.1].

### Δοκιμή επαγόμενης τάσης

Κατά τη δοκιμή αυτή ο μετασχηματιστής τροφοδοτείται μέσω γεννήτριας με τιμή τάσης διπλάσιας της ονομαστικής. Η αύξηση της τάσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μαγνητικής ροής που μπορεί να φτάσει το μετασχηματιστή σε κορεσμό, γι' αυτό το λόγο αυξάνεται και αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της δοκιμής η συχνότητα λειτουργίας στα 100 έως και 250 Hz για την σωστή ρύθμιση της μαγνητικής ροής. Στο σχήμα 3.41 ακολουθεί η αντίστοιχη συνδεσμολογία της δοκιμής αυτής. Κατά τη δοκιμή αυτή ελέγχεται η επάρκεια της εσωτερικής μόνωσης του μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.41: Διάγραμμα συνδεσμολογίας δοκιμής επαγόμενης τάσης όπου  $V'_{line}$  και  $V''_{line}$  οι ονομαστικές τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τμήματος αντίστοιχα. [39, σελ. 209, Figure 13.2].

Στις δοκιμές αυτές μπορεί να συνεχιστεί η αύξηση της τάσης έως και τη διάσπαση των μονώσεων για τον υπολογισμό του περιθωρίου της διηλεκτρικής αντοχής  $K_{s.m}$ . Το περιθώριο αυτό ορίζεται ως:

$$K_{s.m} = \frac{\text{Τάση διάσπασης μόνωσης}}{\text{Τάση δοκιμής}} \quad (3.14.1)$$

Ονομαστική τάση λειτουργίας [kV]	Τάση δοκιμής		
	Εφαρμοζόμενη τάση διηλεκτρικής αντοχής [kV]	Τιμή κρουστικής τάσης [kV]	
		Πλήρες κύμα	Διακοπτόμενο κύμα
3	18	44	50
6	25	60	70
10	35	80	90
15	45	108	120
20	55	130	150
35	85	200	225
110	200	480	550
150	275	660	760
220	400	950	1090
330	460	1050	1150
500	680	1550	1650

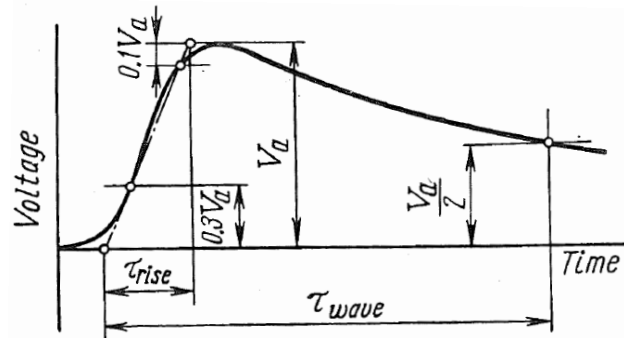
Πίνακας 3.9: Τιμές τάσης για τη δοκιμή εφαρμοσμένης διηλεκτρικής αντοχής και κρουστικής τάσης για πλήθος ονομαστικών τάσεων λειτουργίας. [39, σελ. 208, Table 13.2 (Μεταφρασμένος)].

### 3.14.3 Επίδραση κρουστικών τάσεων στη μόνωση

Τα ηλεκτρικά πλήγματα επηρεάζουν τους μετασχηματιστές κυρίως μέσω των εναέριων γραμμών όπου είναι και το πιθανό σενάριο για χτύπημα της γραμμής από αυτά. Η επίδραση που έχει η κρουστική τάση στους μετασχηματιστές εξαρτάται από τη μορφή της καμπύλης του κύματος που προκαλείται από το ηλεκτρικό πλήγμα, όπως επίσης και το πλάτος της. Πιο συγκεκριμένα, για ένα **πλήρες κύμα (full impulse wave)**, όταν αναφέρεται η μορφή της καμπύλης εννοείται η χρονική



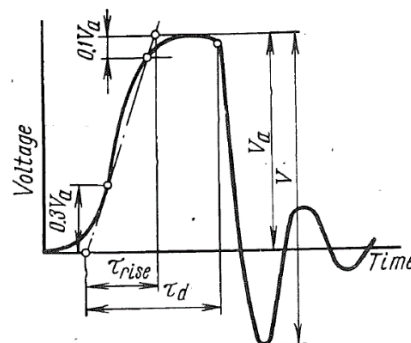
περίοδος ανύψωσης  $\tau_{rise}$  όπου ξεκινά με την αύξηση της τάσης όταν αυτή έχει γραμμική συμπεριφορά και τελειώνει όταν η τιμή της κρουστικής τάσης  $V_a$  γίνεται μέγιστη. Όσο πιο απότομη η κλίση της τόσο πιο δυσμενή και η επίδραση του πλήγματος. Επίσης, σημαντικό παράγοντα αποτελεί και η χρονική περίοδος  $\tau_{wave}$ , της οποίας η έναρξη ταυτίζεται με την  $\tau_{rise}$  και διαρκεί έως τη στιγμή όπου η τιμή της τάσης θα έχει φτάσει να είναι  $V_a/2$  κατά την πτώση της. Στο σχήμα 3.42 απεικονίζεται η μορφολογία ενός πλήρους κύματος της κρουστικής τάσης κατά το ηλεκτρικό πλήγμα.



Σχήμα 3.42: Μορφολογία πλήρους κύματος κρουστικής τάσης. [39, σελ. 210, Figure 13.3].

Για την προστασία των μετασχηματιστών από ηλεκτρικά πλήγματα πραγματοποιείται η **δοκιμή κρουστικής τάσης (Lightning Impulse Test)** η οποία έχει ως στόχο την προσομοίωση ενός κύματος παρόμοιου με ένα που θα προέρχονταν από αληθινό ηλεκτρικό πλήγμα. Λόγω της μεγάλης ποικιλομορφίας των κυμάτων που μπορούν να δημιουργηθούν από ηλεκτρικά πλήγματα, στους μετασχηματιστές εφαρμόζεται η δοκιμή αυτή με πλήρες κύμα, που αναλύθηκε παραπάνω, όπως και με διακοπτόμενο κύμα.

Στη περίπτωση ενός **διακοπτόμενου κύματος (chopped impulse wave)**, αυτό ακολουθεί την ίδια μορφολογία με αυτή του πλήρους κύματος έως τη στιγμή που η κρουστική τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή της και έπειτα αυτή μειώνεται ακαριαία, καταλήγοντας να έχει αρνητική τιμή και να ταλαντώνεται αποσβεστικά. Στο διακοπτόμενο κύμα ορίζεται αντίστοιχα όπως και στο πλήρες κύμα το χρονικό διάστημα ανύψωσης  $\tau_{rise}$  με τον ίδιο τρόπο. Επίσης ορίζεται το χρονικό διάστημα εκφόρτωσης  $\tau_d$  όπου ξεκινά μαζί με το  $\tau_{rise}$  και τελειώνει τη στιγμή που η κρουστική τάση είναι έτοιμη να μειωθεί με πολύ γρήγορο ρυθμό, δηλαδή όταν το κύμα αρχίζει την αποφόρτιση του. Στο σχήμα 3.43 απεικονίζεται η μορφή ενός τέτοιου κύματος.



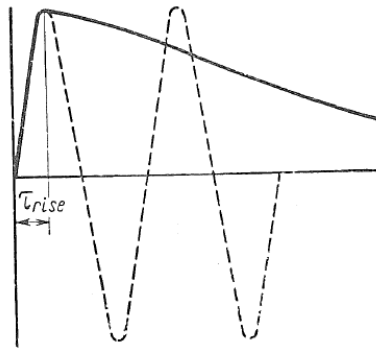
Σχήμα 3.43: Μορφολογία διακοπτόμενου κύματος κρουστικής τάσης. [39, σελ. 211, Figure 13.4].

Κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής αυτής, εφαρμόζεται κάθε ένα από τα δύο κύματα αυτά για τη διαπίστωση της αντοχής του μετασχηματιστή. Οι χρονικές περιόδους  $\tau_{rise}$ ,  $\tau_{wave}$  και  $\tau_d$  έχουν συνήθεις τιμές  $1,5 \pm 0,2 \mu s$ ,  $40 \pm 4 \mu s$  και  $2 - 3 \mu s$  αντίστοιχα κατά τη δοκιμή. Η δοκιμή αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη σωστή επιλογή μονωτικών υλικών και διαστασιολόγηση του μετασχηματιστή, δηλαδή την επιλογή των ελάχιστων αποστάσεων μεταξύ τυλιγμάτων και τυλίγματος χαμηλής τάσης

με πυρήνα, ώστε να προσφέρεται ικανοποιητική ηλεκτρική μόνωση σε αυτόν, χωρίς όμως μεγάλη αύξηση στον όγκο του, άρα και στο κόστος κατασκευής του.

Η ικανότητα της εσωτερικής ηλεκτρικής μόνωσης του μετασχηματιστή εξαρτάται επίσης και από την κατανομή της κρουστικής τάσης σε αυτή. Σε περίπτωση όπου η κρουστική τάση δεν μεταβάλλεται γραμμικά από την αρχή του τυλίγματος έως το τέλος του, τότε η ικανότητα της εσωτερικής μόνωσης είναι χειρότερη από αυτήν της περίπτωσης όπου η κρουστική τάση μεταβάλλεται γραμμικά συναρτήσει του μήκους του τυλίγματος. Αυτό το φαινόμενο συναντάται κυρίως στα κυλινδρικά μονοκόμματα τυλίγματα όπου το μήκος του τυλίγματος είναι μεγάλο.

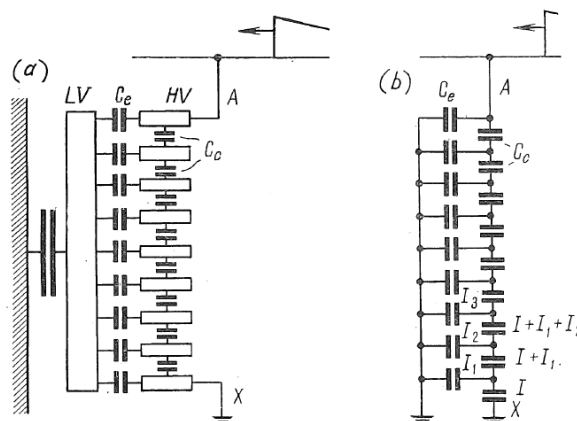
Λόγω της μεγάλης αύξησης της κρουστικής τάσης σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα  $\tau_{rise}$ , θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι το κύμα αυτό είναι υψίσυχο, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.44, και ότι το πλάτος του καθορίζεται από κάποιο χωρητικό στοιχείο εφόσον η αντίδραση ενός χωρητικού στοιχείου μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας ( $X_C = 1/\omega \cdot C$ ).



Σχήμα 3.44: Απεικόνιση της έναυσης της κρουστικής τάσης ως υψίσυχο σήμα. [39, σελ. 212, Figure 13.5].

Έτσι, λόγω της μορφολογίας του κυλινδρικού μονοκόμματος τυλίγματος, μπορεί να θεωρηθεί ότι κάθε σπείρα του τυλίγματος Υ.Τ. παρουσιάζει χωρητικότητα  $C_c$  με τη κάθε γειτονική της σπείρα και χωρητικότητα  $C_e$  μεταξύ της ίδιας και της γης, ενώ το τύλιγμα Χ.Τ. μπορεί να θεωρηθεί γειωμένο – αμελητέο λόγω της μικρής απόστασης του ίδιου με τον κορμό του πυρήνα.

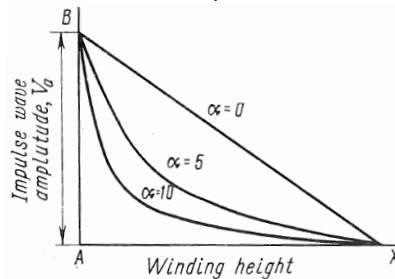
Λόγω του ότι η κρουστική τάση προέρχεται από το ηλεκτρικό πλήγμα το οποίο μπορεί να χτυπήσει σε μία εναέρια γραμμή, το τύλιγμα Υ.Τ. του μετασχηματιστή δέχεται τη μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης στο ύψος – σε σημείο που συνδέεται με τη γραμμή του δικτύου. Γι' αυτό το λόγο το ρεύμα στις σπείρες κοντά στη σύνδεση θα είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με το ρεύμα των σπειρών που βρίσκονται κοντά στη γείωση, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.45, και γι' αυτό το λόγο το τύλιγμα θα δεχτεί ανομοιόμορφη καταπόνηση ως προς το ύψος του.



Σχήμα 3.45: Χωρητικότητες και επιπρόσθετα ρεύματα στο μονοκόμματο κυλινδρικό τύλιγμα Υ.Τ. κατά την κρουστική τάση. [39, σελ. 213, Figure 13.6].

Ο τρόπος μεταβολής της κρουστικής τάσης συναρτήσει του ύψους του τυλίγματος εξαρτάται από την αναλογία των δύο τύπων χωρητικότητων,  $C_c$  και  $C_e$ , που εμφανίζονται σε αυτό. Με βάση το σχήμα 3.46 απεικονίζεται η διαφορά στον τρόπο μεταβολής της κρουστικής τάσης συναρτήσει του ύψους αναφοράς του τυλίγματος, αναλόγως την τιμή που έχει ο συντελεστής  $a$  όπου αυτός ορίζεται ως:

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_e}{C_c}} \quad (3.14.2)$$



Σχήμα 3.46: Διαφοροποίηση τρόπου μεταβολής κρουστικής τάσης για διαφορετικές τιμές του συντελεστή  $a$ . Όπου για συντελεστή  $a$  ίσο με μηδέν επικρατεί γραμμική μεταβολή. [39, σελ. 214, Figure 13.7].

Όσο πιο γραμμική συμπεριφορά έχει η μεταβολή της κρουστικής τάσης, τόσο πιο εύκολος είναι και ο υπολογισμός για τις απαιτήσεις των μονώσεων των σπειρών. Λόγω της μεγάλης τιμής στην αρχή του τυλίγματος, δηλαδή στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο, οι πρώτες σπείρες να ενισχύονται με επιπρόσθετη μόνωση. Βέβαια ο ακριβής καθορισμός του συντελεστή  $a$  δεν υφίσταται, διότι το τύλιγμα δεν παρουσιάζει τέλεια ομοιομορφία από σπείρα σε σπείρα, και έτσι αυτός υπολογίζεται προσεγγιστικά με άλλες μεθόδους.

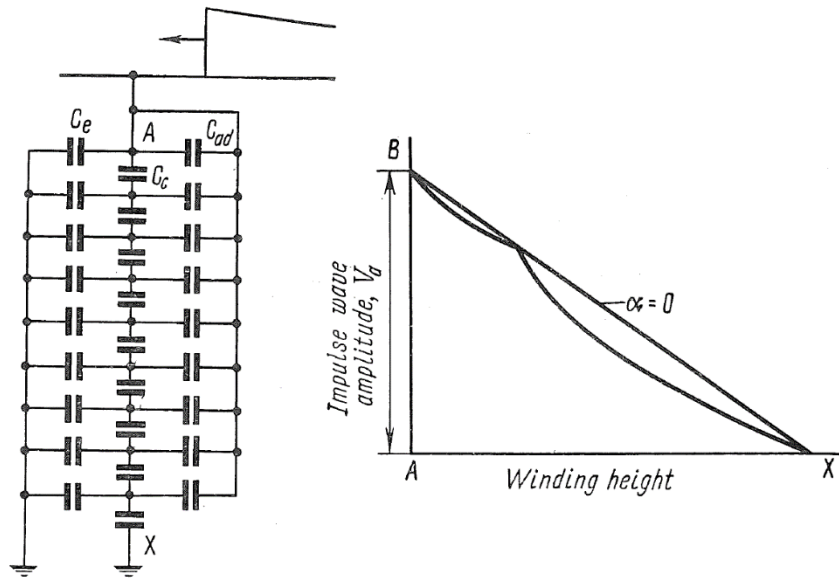
### 3.14.4 Μέσα ηλεκτρικής μόνωσης μετασχηματιστών

Με βάση τις παραπάνω δοκιμές που αναλύθηκαν, αλλά και τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε δοκιμαστικά μοντέλα μετασχηματιστών από τους κατασκευαστές βγαίνει το πόρισμα για το επίπεδο προστασίας αυτών από πιθανές υπερτάσεις.

Για την ενίσχυση της εξωτερικής μόνωσης μπορούν να τοποθετηθούν ειδικά μέσα προστασίας κατά των ηλεκτρικών πληγμάτων, όπως σπινθηριστές και σε εναέριες γραμμές τοποθετείται ειδικός γειωμένος αγωγός πάνω από τους αγωγούς μεταφοράς, ο οποίος τοποθετείται εκεί για να δέχεται αυτός το κεραυνικό πλήγμα και να περιορίζει την επίδραση αυτού στις γραμμές μεταφοράς, άρα και στο μετασχηματιστή που μπορεί να βρίσκεται σε κοντινή απόσταση.

Για την ενίσχυση της εσωτερικής μόνωσης η τοποθέτηση επιπρόσθετης μόνωσης στα πρώτα τυλίγματα όπως αναφέρθηκε αποτελεί μία λύση εφικτή για μετασχηματιστές με επίπεδο τάση έως και τα 35 kV. Για μετασχηματιστές μεγαλύτερων επιπέδων απαιτούνται και επιπρόσθετα μέσα, διότι η επιπρόσθετη μόνωση δεν παρέχει εφικτή προστασία. Ένα μέσο από αυτά είναι και η **χωρητική εξουδετέρωση (capacitive neutralization)** της χωρητικότητας  $C_e$  στο τύλιγμα Υ.Τ. όπου σε αυτό τροποποιούνται οι αποστάσεις των πρώτων σπειρών για τη δημιουργία χωρητικότητας  $C_{ad}$  σε αυτές, η οποία είναι έπειτα υπεύθυνη για την εξουδετέρωση της χωρητικότητας σπείρας προς γη  $C_e$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.47, με αποτέλεσμα την εξομάλυνση της καμπύλης της κρουστικής τάσης συναρτήσει του ύψους του τυλίγματος. Μέσω της χωρητικής εξουδετέρωσης μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη εξομάλυνση της καμπύλης, αλλά δεν μπορεί να επιτευχθεί στη πραγματικότητα πλήρης ευθυγράμμιση της μεταβολής της κρουστικής τάσης λόγω ανομοιομορφίας του τυλίγματος. Βέβαια ένα μικρό ποσό εξομάλυνσης στο σημείο όπου υπάρχει και η μεγαλύτερη κλίση, με βάση το σχήμα

3.46, μπορεί να μειώσει σε μεγάλο βαθμό τις καταπονήσεις του τυλίγματος σε εκείνο τη σημείο, άρα και τα μέτρα προστασίας που απαιτούνται για αυτό.

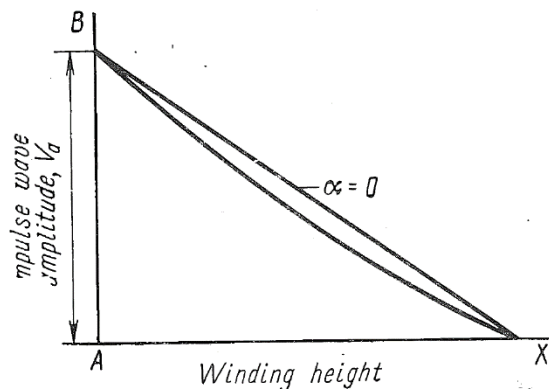


Σχήμα 3.47: (Αριστερά) Διάγραμμα τυλίγματος Υ.Τ. με επιπρόσθετες χωρητικότητες  $C_{add}$  για τη χωρητική εξουδετέρωση της χωρητικότητας  $C_e$ . (Δεξιά) Καμπύλη μεταβολής κρουστικής τάσης για το αντίστοιχο διάγραμμα. [39, σελ. 217, Figure 13.8, 13.9].

Εκτός από την εξουδετέρωση της χωρητικότητας  $C_e$  υπάρχει και η μέθοδος για την αύξηση της χωρητικότητας  $C_c$ , η οποία υπάρχει μεταξύ των σπειρών, με στόχο τη μείωση του συντελεστή  $a$ . Σε αυτήν την περίπτωση τοποθετείται μεταξύ των σπειρών ειδικό υλικό, το οποίο προσθέτει μία επιπλέον χωρητικότητα  $C_{c1}$ , η οποία συναθροίζεται με τη χωρητικότητα  $C_c$  με αποτέλεσμα ο συντελεστής  $a$  να ορίζεται πλέον ως:

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_e}{C_c + C_{c1}}} \quad (3.14.3)$$

Με τη μείωση του συντελεστή  $a$  υπάρχει και μείωση του ρυθμού μεταβολής της κρουστικής τάσης, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.48.



Σχήμα 3.48: Καμπύλη μεταβολής κρουστικής τάσης συναρτήσει του ύψους τυλίγματος με την προσθήκη χωρητικών υλικών ενδιάμεσα των πρώτων σπειρών του τυλίγματος. [39, σελ. 220, Figure 13.14].

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η αύξηση του μήκους του τυλίγματος σε αισθητό βαθμό άρα και του συνολικού όγκου του μετασχηματιστή.

Για περαιτέρω ενίσχυση της εσωτερικής και της εξωτερικής μόνωσης αυξάνονται συγκεκριμένα διάκενα μεταξύ των τυλιγμάτων, μεταξύ των σπειρών ή και μεταξύ τυλίγματος – πυρήνα του μετασχηματιστή αναλόγως και τα χαρακτηριστικά του, όπως η δομή των τυλιγμάτων, το επίπεδο τάσης λειτουργίας κα. Οι ακριβείς τιμές αυτές αναφέρονται σε εξειδικευμένη βιβλιογραφία [2, §13.9].

### 3.15 Απαιτήσεις εξαρτημάτων μετασχηματιστών

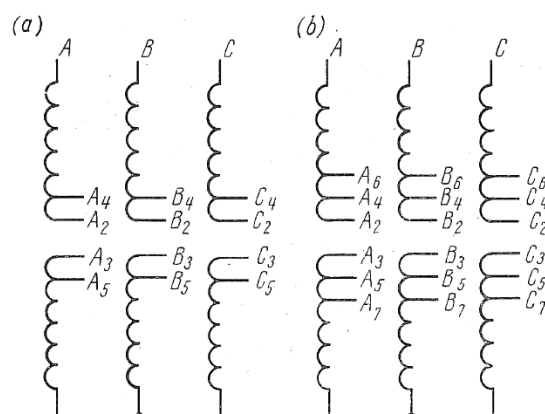
#### 3.15.1 Εισαγωγή

Κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή εντός ενός δικτύου είναι πολύ πιθανή η μεταβολή του φορτίου που εφαρμόζεται σε αυτό, με αποτέλεσμα την ανάγκη ρύθμισης του μετασχηματιστή για την ομαλή λειτουργία με το νέο φορτίο. Η αλλαγή αυτή μπορεί να γίνει είτε με βηματική μεταβολή της τάσης υπό ή χωρίς φορτίο. Για μετασχηματιστές επιπέδου ισχύος έως 1 MVA και τάσης 35 kV επιλέγεται πιο συχνά το σύστημα βηματικής μεταβολής τάσης χωρίς φορτίο για τη διατήρηση χαμηλού κόστους κατασκευής, διότι στην περίπτωση του **συστήματος βηματικής μεταβολής υπό φορτίου (On load tap changer)** το συνολικό κόστος του μετασχηματιστή θα αυξανόταν 2 – 2,5 φορές. Βέβαια, το κάθε ένα από τα δύο συστήματα επιλέγεται για διαφορετικούς σκοπούς και χρήσεις.

#### 3.15.2 Σύστημα βηματικής μεταβολής τάσης χωρίς φορτίο

Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος είναι η ανάγκη του μετασχηματιστή να αποφορτιστεί εντελώς πριν την οποιαδήποτε μεταβολή της τάσης για την αποφυγή της βραχυκύκλωσης των σπειρών των τυλιγμάτων και με αποτέλεσμα βλάβη σε αυτόν. Η αποφόρτιση του μετασχηματιστή προκαλεί μεγάλα χρονικά διαστήματα στο δίκτυο χωρίς τροφοδότηση, κάτι που αποτελεί μεγάλο μειονέκτημα σε δίκτυα με απαίτηση συνεχούς κάλυψης, όπως ένα δίκτυο διανομής μίας πόλεως. Υπάρχουν δύο διαφορετικές δομές για την υλοποίηση του συστήματος αυτού.

Στη πρώτη περίπτωση στο τύλιγμα υπάρχει ένα κενό στο μέσο του μήκους του και από εκεί ανά τακτά τμήματα ορίζονται οι επαφές, στο άνω και στο κάτω τμήμα του τυλίγματος, μέσω των οποίων συνδέονται τα δύο τμήματα μεταξύ τους για τον αποκλεισμό/ενσωμάτωση ενός τμήματος του συνολικού τυλίγματος και ως αποτέλεσμα τη μείωση/αύξηση της τάσης που παράγεται σε αυτό.



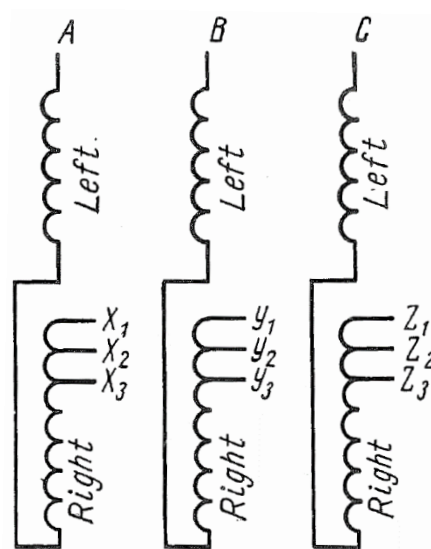
Σχήμα 3.49: Σύστημα βηματικής μεταβολής τάσης χωρίς φορτίο με διαχωρισμό του τυλίγματος σε άνω και κάτω τμήμα. (α) Δομή με τέσσερις επαφές, (β) δομή με 6 επαφές για περαιτέρω μεταβολή της τάσης. [39, σελ. 134, Figure 9.1].

Στην περίπτωση της δομής του σχήματος 3.49(b) οι τιμές οι οποίες προκύπτουν από τις πιθανές συνδέσεις απεικονίζονται στον πίνακα

Θέση διακόπτη	Βηματική μεταβολή τάσης	Συνδεδεμένες επαφές στη φάση C
I	5%	C <sub>2</sub> - C <sub>3</sub>
II	2,5%	C <sub>3</sub> - C <sub>4</sub>
III	Ονομαστική τιμή	C <sub>4</sub> - C <sub>5</sub>
IV	-2,50%	C <sub>5</sub> - C <sub>6</sub>
V	-5%	C <sub>6</sub> - C <sub>7</sub>

Πίνακας 3.10: Πλήθος βηματικών μεταβολών για τη δομή του σχήματος 3.49(b). [39, σελ. 135, Table 9.2 (Μεταφρασμένος)].

Στη δεύτερη περίπτωση για τριφασικό μετασχηματιστή όπου το τύλιγμα είναι συνδεδεμένο σε αστέρα, δημιουργούνται τρεις επαφές σε κάθε τύλιγμα, και αυτές επιλέγονται σαν τριπλέτες στο ίδιο μήκος και συνδέονται σε επαφή που δημιουργείται στον ουδέτερο κόμβο του αστέρα. Πιο συγκεκριμένα αυτή η δομή απεικονίζεται στο σχήμα 3.50 και στον πίνακα 3.11 ακολουθούν οι τιμές της τάσης, οι οποίες επικρατούν για την επιλογή κάθε τριπλέτας από τις διαθέσιμες επαφές.



Σχήμα 3.50: Σύστημα βηματικής μεταβολής τάσης χωρίς φορτίο με επαφές των τυλιγμάτων που συνδέονται με τον ουδέτερο κόμβο του αστέρα του τυλιγματος. [39, σελ. 135, Figure 9.2].

Θέση διακόπτη	Βηματική μεταβολή τάσης	Επαφές
I	5%	X <sub>1</sub> - Y <sub>1</sub> - Z <sub>1</sub>
II	Ονομαστική τιμή	X <sub>2</sub> - Y <sub>2</sub> - Z <sub>2</sub>
III	-5%	X <sub>3</sub> - Y <sub>3</sub> - Z <sub>3</sub>

Πίνακας 3.11: Πιθανές τιμές βηματικής μεταβολής τάσης για την επιλογή κάθε τριπλέτας επαφών του σχήματος 3.50. [39, σελ. 136, Table 9.3 (Μεταφρασμένος)].

### 3.15.3 Σύστημα βηματικής μεταβολής τάσης υπό φορτίο

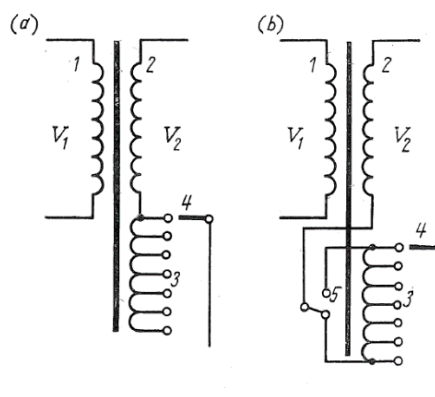
Στην περίπτωση μεγάλων δικτύων παροχής ενέργειας ή και σε περιπτώσεις δικτύων με ειδικές ανάγκες όπου η συνεχόμενη παροχή ενέργειας χωρίς διακοπές είναι σημαντική επιλέγεται το σύστημα βηματικής μεταβολής τάσης υπό φορτίο. Εκτός από την ικανότητα μεταβολής της τάσης χωρίς διακοπή ενέργειας, το πλήθος των βημάτων είναι μεγαλύτερο, παρέχοντας μεγαλύτερο εύρος τάσεων λειτουργίας του δικτύου.



Ονομαστική ισχύς [kVA]	Τάση λειτουργίας [kV]	Πλήθος βημάτων και ποσοστό βηματικής μεταβολής
63 - 630	6 και 10	$\pm 6 \times 1,67\%$
100 - 630	20 και 35	$\pm 6 \times 1,67\%$
1000 - 6300	6 και 10	$\pm 8 \times 1,25\%$
1000 - 6300	20 και 35	$\pm 6 \times 1,5\%$
10000 - 63000	35	$\pm 8 \times 1,5\%$

Πίνακας 3.12: Πιθανές τιμές βημάτων και ποσοστών βηματικής μεταβολής τάσης για διάφορες ονομαστικές ισχύς και τάσης λειτουργίας. [39, σελ. 134, Table 9.1 (Μεταφρασμένος)].

Βέβαια η πολυπλοκότητα του συστήματος αυτού αυξάνει ταυτοχρόνως και το κόστος κατασκευής του μετασχηματιστή, κάτι το οποίο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Το σύστημα αυτό περιέχει επαφές συνήθως στο τύλιγμα Υ.Τ, στις οποίες τοποθετείται ένας αναστροφέας ο οποίος είναι υπεύθυνος για την εναλλαγή των επαφών σε αυτόν κατά τη λειτουργία, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της τάσης.



Σχήμα 3.51: Σύστημα βηματικής μεταβολής υπό φορτίο όπου (3) οι επαφές του τυλίγματος Υ.Τ και (4) ο εναλλάκτης βήματος. (α) Δομή χωρίς αναστροφέα, (β) Δομή που περιέχει αναστροφέα. [39, σελ. 137, Figure 9.3].

### 3.16 Ειδικοί μετασχηματιστές

#### 3.16.1 Αυτομετασχηματιστής

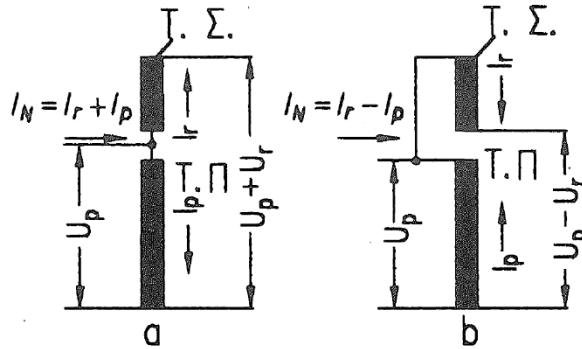
Ένας αυτομετασχηματιστής αποτελείται από ένα ενιαίο τύλιγμα όπου αυτό έχει δημιουργηθεί από τη σύνδεση των τυλιγμάτων Υ.Τ. και Χ.Τ. σε σειρά. Το τύλιγμα αυτό διαχωρίζεται στο παράλληλο τύλιγμα και στο τύλιγμα σειράς. Το παράλληλο τύλιγμα αποτελεί το κοινό κομμάτι και έχει ρεύμα ίσο με τη διαφορά των δύο ρευμάτων, ενώ το τύλιγμα σειράς διαρρέεται από την πλήρη ονομαστική τιμή της έντασης ρεύματος. Λόγω αυτής της ιδιαιτερότητας υπάρχει μείωση στα υλικά κατασκευής του με αποτέλεσμα το κόστος κατασκευής του να είναι χαμηλότερο, ιδίως όταν ο λόγος μετασχηματισμού είναι πολύ κοντά στη μονάδα, σε σύγκριση με το κόστος ενός μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων. Επειδή όμως υπάρχει η γαλβανική σύνδεση των δύο τυλιγμάτων των διαφορετικών επιπέδων τάσης δεν υπάρχει απομόνωση μεταξύ τους και για αυτό το λόγο τα δύο επίπεδα τάσης δεν πρέπει να έχουν μεγάλη διαφορά μεταξύ τους, συγκεκριμένα συνιστάται διαφορά έως και 25% εκτός από τις περιπτώσεις μεταβίβασης της τάσης σε επίπεδα υψηλής τάσης (150 – 400 kV).

Ο λόγος μετασχηματισμού ενός αυτομετασχηματιστή ορίζεται όπως και σε έναν απλό μετασχηματιστή, δηλαδή ισχύει η σχέση (2.3.11). Στην περίπτωση που τα τυλίγματα είναι ομόρροπα η ένταση του ρεύματος θα είναι ίση με:

$$\hat{I}_N = \hat{I}_r + \hat{I}_p \quad (3.16.1)$$

Ενώ στην περίπτωση όπου τα τυλίγματα είναι αντίρροπα θα ισχύει:

$$\hat{I}_N = \hat{I}_r - \hat{I}_p \quad (3.16.2)$$



Σχήμα 3.52: Διαγράμματα μονοφασικών αυτομετασχηματιστών με ομόρροπα τυλίγματα (αριστερά) και αντίρροπα τυλίγματα (δεξιά). Τ.Σ: Τύλιγμα Σειράς, Τ.Π: Παράλληλο τύλιγμα. [4, σελ. 157, Σχήμα 117].

Οι ισχύες των δύο τμημάτων, δηλαδή του παράλληλου και του σε σειρά τυλίγματος θα ορίζονται όπως απεικονίζεται παρακάτω:

$$P_p = V_p \cdot I_p \quad (3.16.3)$$

$$P_r = V_r \cdot I_r \quad (3.16.4)$$

Όπου  $V_p, I_p$  η τάση και η ένταση ρεύματος του παράλληλου τυλίγματος, ενώ  $V_r, I_r$  τα αντίστοιχα μεγέθη στο τύλιγμα σειράς. Εφόσον ισχύει ότι  $V_r \cdot I_r = V_p \cdot I_p$  τότε προκύπτει ότι οι δύο ισχύες,  $P_p$  και  $P_r$ , είναι ίσες μεταξύ τους.

Λόγω της δομής του τυλίγματος προκύπτει και η διερχόμενη ισχύς  $P_{dn}$  που ορίζεται ως η αντίστοιχη ισχύς ενός κανονικού μετασχηματιστή και προκύπτει από τη μαγνητική σύμπλεξη χωρίς γαλβανική σύνδεση των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, όπως επίσης και η ισχύς κατασκευής ή αλλιώς η ιδιοισχύς  $P_e$  που ορίζεται ως η ονομαστική ισχύ που προκύπτει έπειτα του διαχωρισμού του παράλληλου και σειράς τυλίγματος. Ως αποτέλεσμα, θα ισχύει:

$$P_{dn} = (V_p \pm V_r) \cdot I_r = V_p \cdot (I_r \pm I_p) \quad (3.16.5)$$

$$P_e = V_r \cdot I_r = V_p \cdot I_p \quad (3.16.6)$$

Και από τις σχέσεις (3.16.5) και (3.16.6) προκύπτει η συσχέτιση μεταξύ των δύο ισχύων:

$$P_{dn} = P_e \cdot \left( \frac{V_p}{V_r} \pm 1 \right) \Leftrightarrow P_e = P_{dn} \cdot \frac{V_r}{V_p \pm V_r} \quad (3.16.7)$$

Για τον υπολογισμό του βάρους, αλλά και των απωλειών ενός αυτομετασχηματιστή εφαρμόζονται οι παρακάτω σχέσεις που ακολουθούν, όπου μέσω των τιμών ενός κανονικού μετασχηματιστή προκύπτουν αυτές του αυτομετασχηματιστή.

$$G_A \approx G_M \cdot \left( \frac{V_r}{V_p \pm V_r} \right)^{0,6} \quad (3.16.8)$$

$$V_A \approx V_M \cdot \left( \frac{V_r}{V_p \pm V_r} \right)^{0,6} \quad (3.16.9)$$

Όπου  $G_A$  και  $G_M$  το βάρος ενός αυτομετασχηματιστή και ενός κανονικού μετασχηματιστή αντίστοιχα και  $V_A$  και  $V_M$  αντίστοιχα οι απώλειες.

Η τάση βραχυκύκλωσης υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$u_k = \frac{V_r}{V_p \pm V_r} \cdot u'_k \quad (3.16.10)$$

Ως  $u'_k$  ορίζεται η τάση βραχυκύκλωσης για κανονικό μετασχηματιστή με την ίδια διερχόμενη ισχύ με αυτή του αυτομετασχηματιστή. Επίσης μπορούν να υπολογιστούν ξεχωριστά το ενεργό  $u_r$  και το επαγωγικό  $u_x$  μέρος της τάσης βραχυκύκλωσης από τους παρακάτω τύπους:

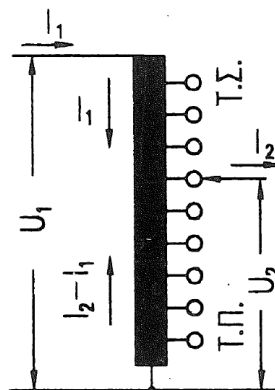
$$u_r = \frac{P_{cu}}{P_{dn}} \cdot 100\% \quad (3.16.11)$$

$$u_x = \frac{V_r}{V_p \pm V_r} \cdot u'_x \quad (3.16.12)$$

$$u_k = \sqrt{u_r^2 + u_x^2} \quad (3.16.13)$$

Στην περίπτωση ομόρροπων τυλιγμάτων, δηλαδή τυλιγμάτων περιελιγμένων με την ίδια φορά, οι σχέσεις (3.16.5), (3.16.7), (3.16.8), (3.16.9), (3.16.10) και (3.16.12) εφαρμόζεται το άθροισμα (+), ενώ στη περίπτωση αντίρροπων τυλιγμάτων εφαρμόζεται η διαφορά (-) αντίστοιχα.

Ο αυτομετασχηματιστής μπορεί να τροποποιηθεί, ώστε να εξυπηρετεί και διαφορετικούς σκοπούς. Μία από τις πιο συνήθεις περιπτώσεις είναι αυτή του διαιρέτη τάσης όταν ο αυτομετασχηματιστής περιέχει πολλές ενδιάμεσες λήψεις ώστε να υπάρχει μεγάλο εύρος επιλογών τάσης. Το τύλιγμα του αυτομετασχηματιστή έχει όμοια διατομή σε όλο το μήκος του.



Σχήμα 3.53: Αυτομετασχηματιστής ως διαιρέτης τάσης. [4, σελ. 159, Σχήμα 119].

Μέσω των ενδιάμεσων λήψεων όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.53 μπορεί να ληφθεί τάση από μηδέν έως και ίση με τη τάση  $V_1$ . Η διερχόμενη ισχύς  $P_d$  σε αυτή τη περίπτωση ορίζεται ως:

$$P_d = V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \quad (3.16.14)$$

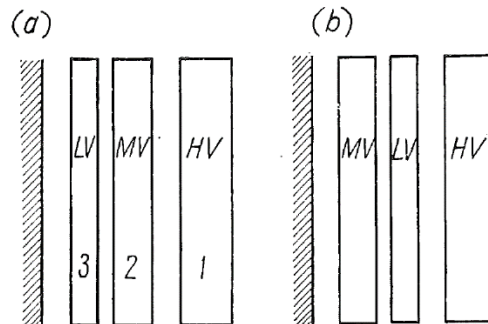
και μεγιστοποιείται όταν εφαρμόζεται τάση ίση με  $V_2$  και ρεύμα ίσο με  $I_1$ , ενώ η ιδιοισχύς θα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της στη μεσαία λήψη.

### 3.16.2 Μετασχηματιστής με τρία τυλίγματα

Ειδική δομή σε μετασχηματιστές αποτελεί αυτή των τριών τυλιγμάτων, όπου αυτά έχουν χαμηλή μέση και υψηλή τάση. Χρησιμοποιούνται σε κομβικά σημεία στο δίκτυο, όπως σε σταθμούς

παραγωγής, είτε σε υποσταθμούς όπου η απαίτηση για ανύψωση της τάσης σε επίπεδο μεταφοράς χρειάζεται, αλλά ταυτοχρόνως είναι απαραίτητη και η τροφοδότηση κοντινών μεγάλων φορτίων.

Η δομή αυτή αποτελεί λύση, η οποία είναι πιο οικονομική από αυτή δύο διαφορετικών κανονικών μετασχηματιστών για την επίτευξη των δύο διαφορετικών επιπέδων τάσης. Βασική προϋπόθεση στη δομή αυτή είναι ότι το τύλιγμα Υ.Τ. βρίσκεται πάντα εξωτερικά του τυλίγματος Χ.Τ. και Μ.Τ., ενώ το καθένα από αυτά τα δύο μπορεί να είναι πιο κοντά στον κορμό του πυρήνα.



Σχήμα 3.54: Πιθανές τοποθετήσεις των τριών τυλιγμάτων όπου στα αριστερά βρίσκεται ο κορμός του πυρήνα. [39, σελ. 114, Figure 8.7].

Ο λόγος μετασχηματισμού ορίζεται ξεχωριστά για κάθε περίπτωση ζεύγος τυλιγμάτων. Πιο συγκεκριμένα ορίζονται ως:

$$V_1/V_2 = \alpha_{12} \quad (3.16.15)$$

$$V_1/V_3 = \alpha_{13} \quad (3.16.16)$$

$$V_2/V_3 = \alpha_{23} \quad (3.16.17)$$

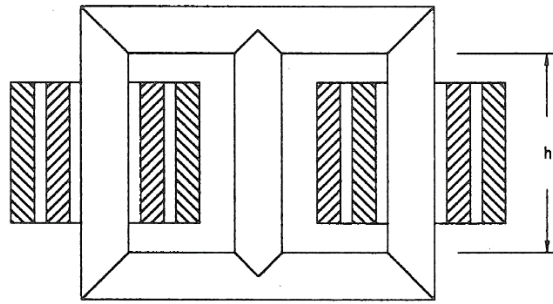
Το πρωτεύον τύλιγμα επίσης θα πρέπει να έχει ίση ισχύ με το άθροισμα του δευτερεύοντος και του τριτεύοντος τυλίγματος. Οι μετασχηματιστές αυτοί μπορούν να λειτουργούν είτε σε πλήρη φόρτιση και στα τρία τυλίγματα, είτε με μερική φόρτιση στο ένα ή στα δύο από τα τρία τυλίγματα. Για κάθε πιθανό συνδυασμό φορτίσεων ορίζεται και μία κατηγορία, οι κατηγορίες αυτές εμφανίζονται στον πίνακα (3.13).

Κατηγορία	Φόρτιση Τυλίγματος %		
	Υ.Τ	Μ.Τ	Χ.Τ
1	100	100	100
2	100	100	67
3	100	67	100
4	100	67	67

Πίνακας 3.13: Κατηγορίες φόρτισης τυλιγμάτων μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων. [39, σελ. 113, Table 8.1 (Μεταφρασμένος)].

### 3.16.3 Τριμονοφασικοί μετασχηματιστές

Όταν υπάρχει ανάγκη για την τροφοδότηση μονοφασικών φορτίων, αλλά είναι σημαντική η αποφυγή της ασύμμετρης φόρτισης του δικτύου χρησιμοποιούνται τριμονοφασικοί μετασχηματιστές. Η ιδιαιτερότητα αυτού του τύπου βρίσκεται στους κορμούς του πυρήνα, όπου μόνο οι δύο ακραίοι κορμοί περιέχουν τύλιγμα ενώ ο μεσαίος παραμένει κενός. Επίσης τα δύο τυλίγματα έχουν διαφορετική φορά περιέλιξης μεταξύ τους, δηλαδή το ένα έχει αριστερόστροφη φορά, ενώ το άλλο δεξιόστροφη.



Σχήμα 3.55: Δομή πυρήνα – τυλιγμάτων τριμοφασικού μετασχηματιστή. [4, σελ. 165, Σχήμα 128].

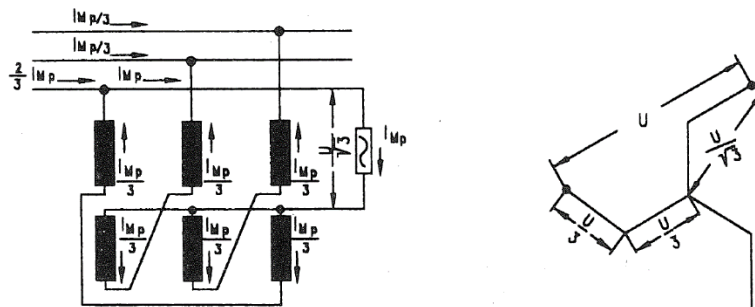
Λόγω αυτής της ανομοιομορφίας το ρεύμα που ρέει στη μεσαία φάση  $I_V$  από τη μεριά της τροφοδότησης είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα  $I_U$  των ακραίων – τυλιγμένων φάσεων .

$$I_V = \sqrt{3} \cdot I_U \quad (3.16.18)$$

Έτσι υπάρχει και η αντίστοιχη διαφοροποίηση στη μαγνητική ροή των τριών κορμών του πυρήνα. Με αποτέλεσμα κατά τον υπολογισμό των απωλειών σιδήρου να υπάρχει διαφορά μεταξύ των απωλειών ακραίων και μεσαίου κορμού.

### 3.16.4 Μετασχηματιστής ουδετερώσεως – κόμβου

Όταν υπάρχει ανάγκη για ουδέτερο κόμβο σε ένα δίκτυο αυτός μπορεί να δημιουργηθεί τεχνητά με ένα μετασχηματιστή. Στη περίπτωση αυτή η δομή αυτή του μετασχηματιστή έχει ομοιότητες με αυτή του αυτομετασχηματιστή τεθλασμένου αστέρα και ως αποτέλεσμα το ρεύμα του ουδετέρου  $I_{Mp}$  κατανέμεται ισομερώς και σε κάθε φάση.



Σχήμα 3.56: Μετασχηματιστής ουδετερώσεως. [4, σελ. 168, Σχήμα 131].

Η ισχύς του ορίζεται με βάση τη παρακάτω σχέση.

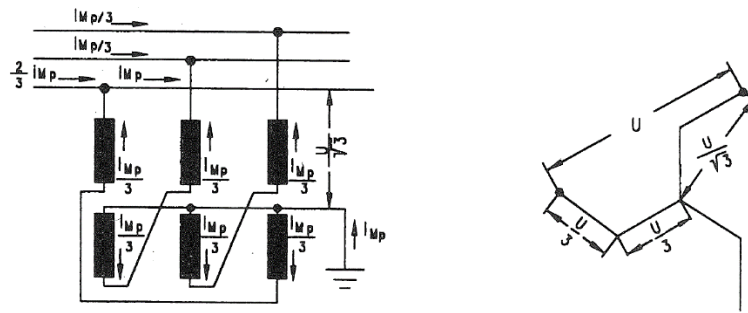
$$P = 3 \cdot \frac{U}{3} \cdot \frac{I_{Mp}}{3} = \frac{U \cdot I_{Mp}}{3} \quad (3.16.19)$$

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος ενός αγωγού του συστήματος με τον ουδέτερο κόμβο δημιουργεί μονοφασικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως  $I_{kMp}$  ίσο με:

$$\frac{I_{kMp}}{3} \cdot Z_0 = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (3.16.20)$$

### 3.16.5 Μετασχηματιστής γειώσεως

Παρόμοια λογική με το μετασχηματιστή ουδετερώσεως αποτελεί και ο μετασχηματιστής γειώσεως όπου χρησιμοποιείται για τη δημιουργία τεχνητής γειώσεως στην προκειμένη περίπτωση. Έχει παρόμοια δομή με αυτή του μετασχηματιστή ουδετερώσεως με την ιδιαιτερότητα ότι υπολογίζεται για μεγάλη ομοπολική αντίσταση.



Σχήμα 3.57: Μετασχηματιστής γειώσεως. [4, σελ. 169, Σχήμα 132].

Επίσης ως επιπρόσθετη χρήση, μπορεί να παρέχει αντιστάθμιση χωρητικών ρευμάτων. Εκτός από την παραπάνω συνδεσμολογία για τη δημιουργία γείωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένας κανονικός μετασχηματιστής συνδεσμολογίας αστέρα – τρίγωνο έπειτα από συγκεκριμένες τροποποιήσεις στην εγκατάσταση του.

### 3.17 Συμπεράσματα

Τελικά η χρησιμότητα ενός μετασχηματιστή μπορεί να διαφέρει σε μεγάλο βαθμό αναλόγως και τις ανάγκες που προκύπτουν. Ζητήματα όπως το κόστος κατασκευής, το κόστος λειτουργίας, ο όγκος της κατασκευής, η εξοικονόμηση υλικών ή βέλτιστη λειτουργία, κα. μπορούν να συντελέσουν σε τέτοιο βαθμό που το τελικό αποτέλεσμα να είναι αρκετά διαφορετικό από τα πρώιμα σχέδια του σχεδιαστή – κατασκευαστή – πελάτη. Ειδικές προδιαγραφές μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό παράγοντα για την αλλαγή του τελικού προϊόντος ή και να φέρουν αλλαγές που σε απλές περιπτώσεις δεν θα ήταν αναγκαίες.

Ιδιαιτερότητες όπως η αντοχή σε υγρασία, αλμυρότητα στον αέρα, σωστή ψύξη σε κλειστό χώρο ή ακόμα και ικανοποιητική εξοικονόμηση στον όγκο μπορεί να είναι κάποια από τα πιο συνήθη κριτήρια για την επιλογή ενός μετασχηματιστή για την τοποθέτηση του εντός ενός πλοίου όπου οι συνθήκες είναι διαφορετικές και κάποιοι παράγοντες περιορισμένοι, όπως όγκος ή χώρος, δυνατότητα λειτουργίας με διαφορετικές κλίσεις.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΚΛΑΣΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

### 4.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός σχεδιασμού είναι η δημιουργία ενός μοντέλου έτσι ώστε το συνολικό κόστος να ελαχιστοποιηθεί διατηρώντας ταυτοχρόνως όλα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά και μεγέθη του μετασχηματιστή. Πιο συγκεκριμένα είναι επιθυμητή η μείωση των υλικών που χρησιμοποιούνται προς μείωση του κόστους κατασκευής και ανακύκλωση τους καθώς και για τη μείωση του κόστους εργασίας.

Παρόλο που ο κύριος στόχος είναι η μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής είναι σημαντικό το τελικό προϊόν να μπορεί να λειτουργεί ομαλά, να έχει ικανοποιητικές αντοχές σε μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές καταπονήσεις, να μπορεί να αντέχει σε περιπτώσεις βραχυκυκλώσεων ή και άλλων σεναρίων όπως π.χ. σε υπερτάσεις, υπερεντάσεις κλπ. Το χρονικό διάστημα της ζωής του μετασχηματιστή επίσης είναι σημαντικό, καθώς αυτός αποτελεί μια επένδυση, η οποία θα πρέπει να αποφέρει κέρδος/επιθυμητά αποτελέσματα στον καταναλωτή.

Μεγάλη έμφαση πρέπει να δίνεται στη σωστή επιλογή υλικών, αλλά χωρίς την υπερδιαστασιολόγηση, η οποία θα οδηγήσει σε ανεπιθύμητη και μη ωφέλιμη αύξηση του κόστους, έτσι ώστε ο μετασχηματιστής να έχει ένα ικανοποιητικό επίπεδο ποιότητας κατασκευής και να τηρεί επιπρόσθετες επιθυμίες που μπορεί να υπάρχουν σε ειδικές περιπτώσεις. Η εύκολη και αποτελεσματική συντήρηση του μετασχηματιστή θα πρέπει να αποτελεί σημαντικό κριτήριο διότι αυτό ως αποτέλεσμα μπορεί να έχει τη μείωση του κόστους εργασίας.

### 4.2 Πρόβλημα βελτιστοποίησης

#### 4.2.1 Εισαγωγή

Κατά το σχεδιασμό ο κύριος στόχος με τη μέθοδο της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση ή η μεγιστοποίηση ενός μεγέθους του μετασχηματιστή. Αυτό το μέγεθος συνήθως είναι το κόστος κατασκευής του μετασχηματιστή όταν αυτός προορίζεται για εμπορική – βιομηχανική χρήση όπου σε αυτές τις περιπτώσεις ο πελάτης δίνει έμφαση στο αρχικό κεφάλαιο που θα χρησιμοποιήσει και όχι τόσο στα πάγια έξοδα που προκύπτουν μέσω των απωλειών του μετασχηματιστή. Στην περίπτωση μετασχηματιστών σε ηλεκτρικά δίκτυα και παρεμφερείς περιπτώσεις δίνεται έμφαση στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας, όπου σε αυτό εμπεριέχεται το αρχικό κεφάλαιο αγοράς, οι απώλειες του μετασχηματιστή όπως και το κόστος απομάκρυνσης. Επιλέγοντας το βασικό κριτήριο για το σχεδιασμό του μετασχηματιστή μπορεί να δημιουργηθεί μέσω αυτού μία αντικειμενική συνάρτηση, η οποία τηρώντας κάποιους περιορισμούς, θα οδηγεί στα επιθυμητά αποτελέσματα.

#### 4.2.2 Αντικειμενικές συναρτήσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες πιθανές αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται συχνά για το σχεδιασμό του μετασχηματιστή με διαφορετικό τρόπο και ως αποτέλεσμα οι μετασχηματιστές που θα προκύψουν από δύο διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις θα έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά.

1) Ελαχιστοποίηση της μάζας των ενεργών υλικών

Με αυτήν την αντικειμενική συνάρτηση ο κύριος στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της **μάζας των ενεργών υλικών (Active part mass - APM)** στο τελικό προϊόν. Η αντικειμενική συνάρτηση αυτή ορίζεται όπως ακολουθεί παρακάτω:

$$\min APM = \min \sum_{i=1}^3 w_i \quad (4.2.1)$$

Όπου  $w_1$  η συνολική μάζα, σε  $kg$ , του τυλίγματος Χ.Τ,  $w_2$  η συνολική μάζα του τυλίγματος Υ.Τ. και  $w_3$  η συνολική μάζα του σιδηρομαγνητικού υλικού που χρησιμοποιείται στον πυρήνα.

2) Ελαχιστοποίηση του κόστους των ενεργών υλικών

Η αντικειμενική συνάρτηση αυτή είναι παρόμοια της προηγούμενη με τη διαφορά ότι εισάγεται και ο λόγος τιμής – μάζας των υλικών για τον υπολογισμού και την ελαχιστοποίηση του **κόστους των ενεργών υλικών (Active part cost - APC)**.

$$\min APC = \min \sum_{i=1}^3 uc_i \cdot w_i \quad (4.2.2)$$

Όπου  $w_1, w_2$  και  $w_3$  όπως και στην προηγούμενη περίπτωση η μάζα, σε  $kg$ , των τυλιγμάτων Χ.Τ, Υ.Τ. και του σιδηρομαγνητικού υλικού αντίστοιχα. Οι συντελεστές  $uc_1, uc_2$  και  $uc_3$  είναι αντίστοιχο το ειδικό κόστος των αντίστοιχων υλικών σε €/kg.

3) Ελαχιστοποίηση του κόστους των κύριων υλικών

Όπως και στη δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση έτσι και εδώ υπολογίζεται και ελαχιστοποιείται το κόστους υλικών, μόνο που σε αυτή τη περίπτωση εκτός από τα ενεργά υλικά, δηλαδή τα τυλίγματα και το σιδηρομαγνητικό υλικό προστίθενται και παραπάνω υλικά τα οποία αποτελούν σημαντικό οικονομικό παράγοντα. Έτσι προκύπτει η αντικειμενική συνάρτηση του **κόστους των κύριων υλικών (Cost of main materials - CMM)**.

$$\min CMM = \min \sum_{i=1}^8 uc_i \cdot w_i \quad (4.2.3)$$

Όπου  $w_4$  και  $uc_4$  η μάζα και το ειδικό κόστος του μονωτικού χαρτιού – υλικού, τα  $w_5$  και  $uc_5$  η μάζα και το ειδικό κόστους των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού, τα  $w_6$  και  $uc_6$  η μάζα και το ειδικό κόστους του λαδιού δεξαμενής, τα  $w_7$  και  $uc_7$  η μάζα και το ειδικό κόστος των μεταλλικών φύλλων και τα  $w_8$  και  $uc_8$  η μάζα και το ειδικό κόστος των αυλακωμένων πάνελ της δεξαμενής.

4) Ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής

Σε αυτήν την περίπτωση κύριος στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του **κόστους κατασκευής (Cost of transformer manufacturing - CTM)**.

$$\min CTM = \min [CMM + CRM + C_{Lab}] \quad (4.2.4)$$

Όπου CMM το κόστους των κύριων υλικών που αντιστοιχεί με αυτό της τρίτης αντικειμενικής συνάρτησης, CRM το κόστους των υπόλοιπων υλικών που δεν εμπεριέχονται στο συντελεστή CMM και  $C_{lab}$  το κόστος εργασίας.

### 5) Ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους κατοχής

Το ολικό κόστος κατοχής (Total owning cost – TOC) εμπεριέχει το αρχικό κεφάλαιο αγοράς του μετασχηματιστή όπως επίσης και το κόστος λειτουργίας που προκύπτει από τις απώλειες του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.

$$\min TOC = \min[BP + A \cdot NLL + B \cdot LL] \quad (4.2.5)$$

Όπου  $A$  είναι το κόστος των απωλειών εν κενώ και  $B$  το κόστος των απωλειών λόγω φορτίου, σε €/W, το  $NLL$  είναι οι απώλειες εν κενώ, δηλαδή οι απώλειες πυρήνα – δινορρευματών ενώ το  $LL$  είναι οι απώλειες λόγω φορτίου, δηλαδή οι απώλειες χαλκού, σε W, και  $BP$  είναι το κόστος αγοράς ή η τιμή προσφοράς του μετασχηματιστή, σε €, και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$BP = \frac{CTM}{1 - SM} = \frac{CMM + CRM + C_{Lab}}{1 - SM} \quad (4.2.6)$$

Όπου  $CTM$  το κόστος κατασκευής,  $SM$  το περιθώριο κέρδους πωλήσεων, σε ποσοστό %,  $CMM$  το κόστος των κύριων υλικών και  $C_{Lab}$  το κόστος εργασίας.

### 6) Μεγιστοποίηση της ονομαστικής ισχύος

Σε αυτήν την περίπτωση η αντικειμενική συνάρτηση έχει την εξής μορφή:

$$\max S_n \quad (4.2.7)$$

## 4.2.3 Περιορισμοί

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή η αντικειμενική συνάρτηση θα πρέπει να τηρεί κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι έχουν το ρόλο της προστασίας του τελικού προϊόντος από σφάλματα κατά τη λειτουργία, την τήρηση βασικών κανόνων, ώστε το τελικό προϊόν να είναι πρακτικά λειτουργικό όπως επίσης και την αποφυγή της υπερδιαστασιοποίησης του. Οι βασικοί περιορισμοί που εφαρμόζονται ακολουθούν παρακάτω, βέβαια σε ειδικές περιπτώσεις ανάλογα με τον προορισμό και την ανάγκη χρήσης του μετασχηματιστή ή με τις ανάγκες του πελάτη – αγοραστή μπορούν να εισαχθούν και νέοι ειδικότεροι περιορισμοί.

#### 1) Περιορισμός επαγόμενης τάσης – έντασης μαγνητικού πεδίου

Ο περιορισμός αυτός θέτει το όριο στην τάση του δευτερεύοντος  $V_2$  που μπορεί να αναπτυχθεί με βάση τη μέγιστη ένταση μαγνητικού πεδίου  $FD_{max}$ :

$$V_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot FD_{max} \cdot CSF \cdot D \cdot 2 \cdot E_u \quad (4.2.8)$$

Όπου  $f$  η συχνότητα λειτουργίας,  $N_2$  το πλήθος των σπειρών στο δευτερεύον τυλίγμα,  $CSF$  ο συντελεστής στοίβαξης των σιδηρομαγνητικών ελασμάτων του πυρήνα (Core Stacking factor),  $D$  το πλάτος των κορμών του πυρήνα και  $E_u$  το πάχος των κορμών του πυρήνα. Η παράμετρος  $CSF \cdot D \cdot 2 \cdot E_u$  εκφράζει την ενεργό διατομή της μαγνητικής ροής σε ένα μετασχηματιστή κελύφους.

#### 2) Περιορισμός λόγου στροφών τυλίγματος

Ο λόγος των στροφών των δύο τυλιγμάτων θα πρέπει να ίσος με το λόγο των τάσεων που αναπτύσσονται στα δύο τυλίγματα αντίστοιχα:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.2.9)$$

Όπου  $V_1$  και  $V_2$  οι φασικές τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος αντίστοιχα ενώ  $N_1$  και  $N_2$  το πλήθος των σπειρών στο πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα αντίστοιχα.

3) Περιορισμός απωλειών εν κενώ

Οι απώλειες εν κενώ του τελικού μετασχηματιστή  $NLL$  θα πρέπει να είναι μικρότερες από μία ορισμένη τιμή  $NLL_{max}$ :

$$NLL < NLL_{max} \quad (4.2.10)$$

4) Περιορισμός απωλειών χαλκού

Οι απώλειες χαλκού του τελικού μετασχηματιστή  $LL$  θα πρέπει να είναι μικρότερες από μία ορισμένη τιμή  $LL_{max}$ :

$$LL < LL_{max} \quad (4.2.11)$$

5) Περιορισμός συνολικών απωλειών

Οι συνολικές απώλειες υπό φορτίο του τελικού μετασχηματιστή  $TTL$  θα πρέπει να είναι μικρότερες από μία ορισμένη τιμή  $TTL_{max}$ :

$$TTL < TTL_{max} \quad (4.2.12)$$

Όπου οι συνολικές απώλειες  $TTL$  αποτελούνται από το άθροισμα των απωλειών εν κενώ  $NLL$  και των απωλειών χαλκού  $LL$ .

6) Περιορισμός τάσης βραχυκύκλωσης

Η τάση βραχυκύκλωσης  $u_k$  του τελικού μετασχηματιστή θα πρέπει να είναι εντός συγκεκριμένων ελάχιστων και μέγιστων ορίων:

$$u_{k,min} < u_k < u_{k,max} \quad (4.2.13)$$

7) Περιορισμός έντασης μαγνητικού πεδίου

Η μέγιστη ένταση μαγνητικού πεδίου  $FD_{max}$  που προκύπτει κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή θα πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή που προκαλεί κορεσμό στο μετασχηματιστή και είναι ίση με  $FD_{sat}$ :

$$FD_{max} < FD_{sat} \quad (4.2.14)$$

8) Περιορισμός μετάδοσης θερμότητας

Τα ποσά θερμότητας  $TTL$  που παράγονται λόγω των συνολικών απωλειών του μετασχηματιστή κατά τη λειτουργία του πρέπει να μην ξεπερνούν τα ποσά θερμότητας  $TH_{CCR}$  που μπορούν να απάγουν τα ψυκτικά μέσα αυτού:

$$TTL < TH_{CCR} \quad (4.2.15)$$

9) Περιορισμός αύξησης θερμοκρασίας

Η αύξηση της θερμοκρασίας  $\Delta T$  ή αλλιώς η διαφορά θερμοκρασίας του μετασχηματιστή με το περιβάλλον, που προκύπτει λόγω των απωλειών που υπάρχουν κατά τη λειτουργία του, δεν πρέπει να υπερβαίνουν ένα ανώτερο όριο  $\Delta T_{max}$ :

$$\Delta T < \Delta T_{max} \quad (4.2.16)$$

#### 10) Περιορισμός απόδοσης

Η απόδοση  $\eta$  που θα έχει ο μετασχηματιστής δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από μία ορισμένη τιμή  $\eta_{min}$ :

$$\eta > \eta_{min} \quad (4.2.17)$$

#### 11) Περιορισμός ρεύματος εν κενώ

Το ρεύμα σε λειτουργία εν κενώ  $i_\varphi$  θα πρέπει να είναι μικρότερο από μία ορισμένη τιμή  $i_{\varphi,max}$ :

$$i_\varphi < i_{\varphi,max} \quad (4.2.18)$$

#### 12) Περιορισμός διακύμανσης τάσης

Η διακύμανση τάσης  $\Delta V$  δεν θα πρέπει να υπερβαίνει μία ορισμένη μέγιστη τιμή  $\Delta V_{max}$ :

$$\Delta V < \Delta V_{max} \quad (4.2.19)$$

#### 13) Περιορισμός αντοχής επαγόμενης τάσης

Το πάχος της μόνωσης που εφαρμόζεται στα τυλίγματα Υ.Τ. και Χ.Τ. θα πρέπει να έχει τέτοια μονωτική ιδιότητα ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις που εφαρμόζονται στα δύο τυλίγματα,  $Induced_{LV}$  και  $Induced_{HV}$  για τα τυλίγματα Χ.Τ. και Υ.Τ. αντίστοιχα, να μην ξεπερνούν την τιμή της τάσης  $Induced_{LV,max}$  και  $Induced_{HV,max}$  που αντιστοιχεί στην ανάλογη τιμή διάσπασης της μόνωσης:

$$Induced_{LV} < Induced_{LV,max} \quad (4.2.20)$$

$$Induced_{HV} < Induced_{HV,max} \quad (4.2.21)$$

#### 14) Περιορισμός αντοχής κρουστικής τάσης

Το πάχος της μόνωσης που εφαρμόζεται στα τυλίγματα Υ.Τ. και Χ.Τ. θα πρέπει να έχει τέτοια μονωτική ιδιότητα ώστε οι αναπτυσσόμενες κρουστικές τάσεις που εφαρμόζονται στα δύο τυλίγματα,  $Impulse_{LV}$  και  $Impulse_{HV}$  για τα τυλίγματα Χ.Τ. και Υ.Τ. αντίστοιχα, να μην ξεπερνούν την τιμή της κρουστικής τάσης  $Impulse_{LV,max}$  και  $Impulse_{HV,max}$  που αντιστοιχεί στην ανάλογη τιμή διάσπασης της μόνωσης.

$$Impulse_{LV} < Impulse_{LV,max} \quad (4.2.22)$$

$$Impulse_{HV} < Impulse_{HV,max} \quad (4.2.23)$$

#### 15) Περιορισμός διαστάσεων δεξαμενής

Το μήκος  $TL$ , το πλάτος  $TW$  και το ύψος  $TH$  της δεξαμενής πρέπει να έχουν τιμές μικρότερες από τα δεδομένα μέγιστα όρια της κάθε μίας παραμέτρου  $TL_{max}$ ,  $TW_{max}$  και  $TH_{max}$  αντίστοιχα.

$$TL < TL_{max} \quad (4.2.24)$$

$$TW < TW_{max} \quad (4.2.25)$$

$$TH < TH_{max} \quad (4.2.26)$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση για το πρόβλημα της βελτιστοποίησης θα γίνει χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης ελαχιστοποίησης ολικού κόστους κατοχής (TOC) με την προσθήκη του κόστους απομάκρυνσης στο ολικό κόστος κατοχής.

Το **κόστος απομάκρυνσης** ορίζεται ως ένα καθορισμένο και σταθερό ποσό που θα πληρωθεί εξ ολοκλήρου σε μία δόση για την υπηρεσία απόσυρσης όταν ο μετασχηματιστής πάψει να εξυπηρετεί το σύστημα. Το κόστος αυτό αυξομειώνεται ανάλογα με τον τύπο και την ποσότητα του λαδιού, τη μάζα, τις διαστάσεις του, τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στον εκάστοτε μετασχηματιστή, τα οποία προκαλούν δυσκολία στη μετακίνηση και απόσυρση του μετασχηματιστή, όπως επίσης και στην περίπτωση των λαδιών τη σωστή απομάκρυνσή τους για την προστασία του περιβάλλοντος.

Το καθορισμένο αυτό ποσό θα πρέπει να αναχθεί από τη μελλοντική – τελική αξία στην παρούσα αξία ώστε να είναι εφικτή η εισαγωγή αυτής της τιμής στην αντικειμενική συνάρτηση. Η παρούσα αξία *PV* (Present Value) ορίζεται ως εξής:

$$PV = \frac{FV}{(1+i)^t} \quad (4.2.27)$$

Όπου *FV* η μελλοντική – τελική αξία (Future Value), *i* το επιτόκιο και *t* το χρονικό διάστημα (π.χ. ένα έτος, μία δεκαετία κα.). Ο συντελεστής  $(1+i)^t$  μπορεί να ορισθεί και ως συντελεστής προεξόφλησης (discount factor).

Άρα αξιοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση της σχέσης (4.2.5) και εισάγοντας μέσα τον όρο του κόστους απομάκρυνσης  $C_{KA}$  η αντικειμενική συνάρτηση που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την περίπτωση θα είναι:

$$minTOC = \min[BP + A \cdot NLL + B \cdot LL + C_{KA}] \quad (4.2.28)$$

Και θα υπόκειται στους περιορισμούς των σχέσεων (4.2.8) έως (4.2.26).

## 4.3 Μεθοδολογία

### 4.3.1 Εισαγωγή – παράμετροι σχεδιασμού

Μέσω της μεθόδου που ακολουθεί μπορούν να προσδιορισθούν τα χαρακτηριστικά ενός μετασχηματιστή και να βελτιστοποιηθεί αυτός ως προς το τελικό κόστος κατοχής. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να λειτουργεί για έναν τριφασικό μετασχηματιστή διανομής, υγρού τύπου με τυλιχτού πυρήνα τύπου μανδύα.

Για τον πλήρη υπολογισμό των χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή θα χρειαστεί να προσδιορισθούν κάποιες παράμετροι, οι οποίες είναι αναγκαίες κατά τη διαδικασία των υπολογισμών. Οι παράμετροι αυτοί χωρίζονται σε κατηγορίες αναλόγως τη χρήση τους και ακολουθούν στους παρακάτω πίνακες:

#	Συμβολισμός	Μονάδα Μέτρησης	Περιγραφή
1	$area_{HV}$	$mm^2$	Διατομή τυλίγματος Υ.Τ.
2	$area_{LV}$	$mm^2$	Διατομή τυλίγματος Χ.Τ.
3	$d_{HV}$	$mm$	Διάμετρος αγωγού τυλίγματος Υ.Τ. χωρίς τη μόνωση $\Delta d$
4	$d_{LV}$	$mm$	Διάμετρος αγωγού τυλίγματος Χ.Τ. χωρίς τη μόνωση $\Delta d$
5	$HVCM$	–	Τύπος υλικού του αγωγού τυλίγματος Υ.Τ.
6	$LVCM$	–	Τύπος υλικού του αγωγού τυλίγματος Χ.Τ.
7	$t_{HV}$	$mm$	Πάχος του αγωγού τυλίγματος Υ.Τ.
8	$t_{LV}$	$mm$	Πάχος του αγωγού τυλίγματος Χ.Τ.
9	$Type_{HV}$	–	Τύπος αγωγού τυλίγματος Υ.Τ.



10	$Type_{LV}$	–	Τύπος αγωγού τυλίγματος Χ.Τ.
11	$w_{HV}$	$mm$	Πλάτος του αγωγού τυλίγματος Υ.Τ.
12	$w_{LV}$	$mm$	Πλάτος του αγωγού τυλίγματος Χ.Τ.
13	$\Delta d_{HV}$	$mm$	Πάχος μόνωσης του αγωγού τυλίγματος Υ.Τ.
14	$\Delta d_{LV}$	$mm$	Πάχος μόνωσης του αγωγού τυλίγματος Χ.Τ.

Πίνακας 4.1: Παράμετροι υπολογισμού διατομών των αγωγών του μετασχηματιστή. [17, σελ. 73, Table 2.11 (Μεταφρασμένος)].

#	Συμβολισμός	Μονάδα Μέτρησης	Περιγραφή
1	$f$	$Hz$	Συχνότητα Λειτουργίας
2	$HVCC$	–	Συνδεσμολογία τυλίγματος Υ.Τ.
3	$LVCC$	–	Συνδεσμολογία τυλίγματος Χ.Τ.
4	$S_n$	$kVA$	Ονομαστική ισχύς
5	$V_{HV,1}^l$	$V$	Πρωτεύουσα ονομαστική τάση τυλίγματος Υ.Τ.
6	$V_{HV,2}^l$	$V$	Δευτερεύουσα ονομαστική τάση τυλίγματος Υ.Τ. (Αν υπάρχει).
7	$V_{LV}^l$	$V$	Ονομαστική τάση τυλίγματος Χ.Τ.

Πίνακας 4.2: Παράμετροι περιγραφής μετασχηματιστή. [17, σελ. 69, Table 2.6 (Μεταφρασμένος)].

#	Συμβολισμός	Μονάδα Μέτρησης	Περιγραφή
1	$BIL_{HV}$	$kV$	Βασικό επίπεδο μόνωσης τυλίγματος Υ.Τ.
2	$BIL_{LV}$	$kV$	Βασικό επίπεδο μόνωσης τυλίγματος Χ.Τ.
3	$CSF$	–	Συντελεστής στοίβαξης ελασμάτων
4	$g_{CP}$	$kg/m^2$	Μάζα ανά μονάδα επιφάνειας μεταλλικών τμημάτων δεξαμενής
5	$g_{DS}$	$kg/m^3$	Πυκνότητα μάζας διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού
6	$g_{HV}$	$kg/m^3$	Πυκνότητα μάζας τυλίγματος Υ.Τ.
7	$g_{LV}$	$kg/m^3$	Πυκνότητα μάζας τυλίγματος Χ.Τ.
8	$g_{MM}$	$kg/m^3$	Πυκνότητα μάζας του σιδηρομαγνητικού υλικού
9	$g_o$	$kg/m^3$	Πυκνότητα μάζας λαδιού
10	$LDSP_{HV}$	–	Συντελεστής πλήρωσης στρώσεων τυλίγματος Υ.Τ.
11	$LDSP_{LV}$	–	Συντελεστής πλήρωσης στρώσεων τυλίγματος Χ.Τ.
12	$t_{a,max}$	$^{\circ}C$	Μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος
13	$TDSP_{HV}$	–	Συντελεστής πλήρωσης στρωφών τυλίγματος Υ.Τ.
14	$TDSP_{LV}$	–	Συντελεστής πλήρωσης στρωφών τυλίγματος Χ.Τ.
15	$t_{o,max}$	$^{\circ}C$	Μέγιστη θερμοκρασία λαδιού
16	$t_{w,max}$	$^{\circ}C$	Μέγιστη θερμοκρασία τυλιγμάτων
17	$\rho_{HV}$	$\Omega \cdot mm^2/m$	Ειδική αντίσταση τυλίγματος Υ.Τ.
18	$\rho_{LV}$	$\Omega \cdot mm^2/m$	Ειδική αντίσταση τυλίγματος Χ.Τ.

Πίνακας 4.3: Ειδικοί παράμετροι μετασχηματιστή. [17, σελ. 69, Table 2.7 (Μεταφρασμένος)].

#	Συμβολισμός	Μονάδα Μέτρησης	Περιγραφή
1	$EdL_{HV}$	$W$	Απώλειες δινορρευμάτων τυλίγματος Υ.Τ.
2	$EdL_{LV}$	$W$	Απώλειες δινορρευμάτων τυλίγματος Χ.Τ.
3	$LL_g$	$W$	Εγγυημένες απώλειες χαλκού
4	$NLL_g$	$W$	Εγγυημένες απώλειες λειτουργίας εν κενώ
5	$Taps_{HV,max}$	%	Ανώτερο όριο ενδιάμεσης λήψης τυλίγματος Υ.Τ.
6	$Taps_{HV,min}$	%	Κατώτερο όριο ενδιάμεσης λήψης τυλίγματος Υ.Τ.
7	$U_{k,g}$	%	Εγγυημένη τάση βραχυκύκλωσης

Πίνακας 4.4: Προκαθορισμένοι παράμετροι μετασχηματιστή. [17, σελ. 70, Table 2.8 (Μεταφρασμένος)].

#	Συμβολισμός	Μονάδα Μέτρησης	Περιγραφή
1	$A$	$€/W$	Κόστος ανά μονάδα απωλειών λειτουργίας εν κενώ
2	$B$	$€/W$	Κόστος ανά μονάδα απωλειών χαλκού
3	$C_{lab}$	€	Κόστος εργασίας
4	$CRM$	€	Κόστος υπόλοιπων υλικών
5	$SM$	%	Περιθώριο κέρδους πωλήσεων
6	$uc_1$	$€/kg$	Κόστος ανά μονάδα μάζας για το τύλιγμα Χ.Τ.
7	$uc_2$	$€/kg$	Κόστος ανά μονάδα μάζας για το τύλιγμα Υ.Τ.
8	$uc_3$	$€/kg$	Κόστος ανά μονάδα μάζας για το σιδηρομαγνητικό υλικό
9	$uc_4$	$€/kg$	Κόστος ανά μονάδα μάζας για τα μονωτικά υλικά
10	$uc_5$	$€/kg$	Κόστος ανά μονάδα μάζας για τα διαμορφωμένα ελάσματα αγωγών λαδιού
11	$uc_6$	$€/kg$	Κόστος ανά μονάδα μάζας για το λάδι δεξαμενής
12	$uc_7$	$€/kg$	Κόστος ανά μονάδα μάζας για τα μεταλλικά φύλλα
13	$uc_8$	$€/kg$	Κόστος ανά μονάδα μάζας για τα αυλακωμένα πάνελ

Πίνακας 4.5: Παράμετροι κόστους μετασχηματιστή. [17, σελ. 71, Table 2.9 (Μεταφρασμένος)].

#	Συμβολισμός	Μονάδα Μέτρησης	Περιγραφή
1	$cs_{HV}$	–	Πλήθος επαναλήψεων για τον υπολογισμό της διατομής του αγωγού τυλίγματος Υ.Τ.
2	$cs_{LV}$	–	Πλήθος επαναλήψεων για τον υπολογισμό της διατομής του αγωγού τυλίγματος Χ.Τ.
3	$D$	$mm$	Πλάτος κορμού του πυρήνα
4	$FD_{max}$	$T$	Ένταση μαγνητικού πεδίου
5	$G$	$mm$	Ύψος παραθύρου του πυρήνα
6	$n_D$	–	Πλήθος επαναλήψεων για το πλάτος κορμού του πυρήνα
7	$n_{FD}$	–	Πλήθος επαναλήψεων για την ένταση μαγνητικού πεδίου
8	$n_G$	–	Πλήθος επαναλήψεων για το ύψος παραθύρου του πυρήνα

9	$n_{LV}$	–	Πλήθος επαναλήψεων για τον αριθμό στροφών του τυλίγματος Χ.Τ.
10	$SNLL_{TF}$	$W/kg$	Ειδικές απώλειες λειτουργίας εν κενώ
11	$turns_{LV}$	–	Αριθμός στροφών του τυλίγματος Χ.Τ.

Πίνακας 4.6: Παράμετροι σχεδιασμού μετασχηματιστή. [17, σελ. 73, Table 2.12 (Μεταφρασμένος)].

#	Συμβολισμός	Μονάδα Μέτρησης	Περιγραφή
1	$CCEE$	$mm$	Απόσταση μεταξύ πηνίου και πυρήνα
2	$D_{HV-c}$	$mm$	Απόσταση μεταξύ τυλίγματος Υ.Τ. και πυρήνα
3	$D_{LV-c}$	$mm$	Απόσταση μεταξύ τυλίγματος Χ.Τ. και πυρήνα
4	$D_{panel}$	$mm$	Πλάτος των αυλακωμένων πάνελ
5	$Ducts_{HV}$	–	Πλήθος διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο τύλιγμα Υ.Τ.
6	$Ducts_{LV}$	–	Πλήθος διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο τύλιγμα Χ.Τ.
7	$D_w$	$mm$	Πλάτος διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού
8	$DWPG_{HV}$	$mm$	Πλάτος διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού συν το διάκενο στο τύλιγμα Υ.Τ.
9	$DWPG_{LV}$	$mm$	Πλάτος διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού συν το διάκενο στο τύλιγμα Χ.Τ.
10	$HCP$	$mm$	Ύψος των αυλακωμένων πάνελ
11	$I_{HV-HV}$	$mm$	Πάχος μόνωσης εξωτερικά του τυλίγματος Υ.Τ.
12	$I_{HV-LV}$	$mm$	Πάχος μόνωσης μεταξύ των τυλιγμάτων Υ.Τ. και Χ.Τ.
13	$I_{LV-c}$	$mm$	Πάχος μόνωσης μεταξύ του τυλίγματος Χ.Τ. και του πυρήνα
14	$K$	$mm$	Απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών πυρήνων
15	$Pitch$	$mm$	Πλάτος αυλακιών στα πάνελ
16	$T_{DS}$	$mm$	Πάχος των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού χωρίς τη μόνωση
17	$TE$	$mm$	Ανοχές και τυχόν επιμηκύνσεις του πηνίου
18	$TI_{HV}$	$mm$	Πάχος μόνωσης των ενδιάμεσων λήψεων του τυλίγματος Υ.Τ.
19	$TLL_{HV}$	$mm$	Συνολικό πάχος ακροδεκτών τυλίγματος Υ.Τ.
20	$TLL_{LV}$	$mm$	Συνολικό πάχος ακροδεκτών τυλίγματος Χ.Τ.
21	$V_{CT}$	$l$	Όγκος λαδιού στη δεξαμενή
22	$BLD_{HV}$	$mm$	Πάχος τυλίγματος Υ.Τ.
23	$BLD_{LV}$	$mm$	Πάχος τυλίγματος Χ.Τ.
24	$BP$	€	Τιμή προσφοράς μετασχηματιστή
25	$CM$	€	Κόστος των υλικών του μετασχηματιστή
26	$CMM$	€	Κόστος των κύριων υλικών του μετασχηματιστή
27	$CPA$	$m^2$	Επιφάνεια των αυλακωμένων πάνελ
28	$VPT$	$V$	Τάση ανά στροφή
29	$CTM$	€	Κόστος κατασκευής μετασχηματιστή
30	$D3$	$mm$	Εξωτερική διάμετρος πηνίου έπειτα το μονωτικό χαρτί σύμφωνα με το σχήμα 4.7

31	$D7$	$mm$	Εξωτερική διάμετρος πηνίου έπειτα το τύλιγμα Χ.Τ. συμπεριλαμβανομένων των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού σύμφωνα με το σχήμα 4.7
32	$D9$	$mm$	Εξωτερική διάμετρος πηνίου έπειτα την μόνωση μεταξύ τυλίγματος Υ.Τ. και Χ.Τ. σύμφωνα με το σχήμα 4.7
33	$D13$	$mm$	Εξωτερική διάμετρος πηνίου έπειτα το τύλιγμα Υ.Τ. συμπεριλαμβανομένων των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού σύμφωνα με το σχήμα 4.7
34	$E_u$	$mm$	Πάχος του στηρίγματος του πυρήνα
35	$F1$	$mm$	Πλάτος παραθύρου του μικρού πυρήνα
36	$F2$	$mm$	Πλάτος παραθύρου του μεγάλου πυρήνα
37	$HCP$	$mm$	Ύψος των αυλακωμένων πάνελ
38	$I_{HVL}$	$mm$	Μόνωση μεταξύ των στρώσεων του τυλίγματος Υ.Τ.
39	$I_{LVL}$	$mm$	Μόνωση μεταξύ των στρώσεων του τυλίγματος Χ.Τ.
40	$Impulse_{max}$	$kV$	Μέγιστη επίπεδο αντοχής κρουστικής τάσης του μονωτικού χαρτιού
41	$Induced_{max}$	$kV$	Μέγιστη επίπεδο αντοχής επαγόμενης τάσης του μονωτικού χαρτιού
42	$I_{LV}^P$	$A$	Ένταση ρεύματος φάσης του τυλίγματος Χ.Τ.
43	$IR$	$\%$	Ωμικό μέρος της τάσης βραχυκύκλωσης
44	$IX$	$\%$	Επαγωγικό μέρος της τάσης βραχυκύκλωσης
45	$K$	$mm$	Απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών πυρήνων
46	$Layers_{HV}$	-	Πλήθος των στρώσεων του τυλίγματος Υ.Τ.
47	$Layers_{LV}$	-	Πλήθος των στρώσεων του τυλίγματος Χ.Τ.
48	$LG_{HV}$	$mm$	Διάσταση των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού
49	$LL_{HV,1}$	$W$	Απώλειες χαλκού του τυλίγματος Υ.Τ. κατά τη λειτουργία σε τάση $V_{HV,1}^I$
50	$LL_{HV,2}$	$W$	Απώλειες χαλκού του τυλίγματος Υ.Τ. κατά τη λειτουργία με την ελάχιστη τάση
51	$LL_{LV}$	$W$	Απώλειες χαλκού του τυλίγματος Χ.Τ.
52	$ML$	$mm$	Μήκος του καλουπιού του πηνίου.
53	$MS$	$\text{€}$	Περιθώριο κέρδους στη πώληση του μετασχηματιστή
54	$MT_{HV}$	$mm$	Μέσο μήκος των στροφών του τυλίγματος Υ.Τ.
55	$MT_{LV}$	$mm$	Μέσο μήκος των στροφών του τυλίγματος Χ.Τ.
56	$MW$	$mm$	Πλάτος του καλουπιού του πηνίου.
57	$NCP$	-	Συνολικό πλήθος των αυλακωμένων πάνελ
58	$NLL$	$W$	Απώλειες μετασχηματιστή εν κενώ
59	$OH$	$mm$	Ύψος του λαδιού της δεξαμενής
60	$Pitch$	$mm$	Απόσταση μεταξύ γειτονικών αυλακωμένων πάνελ
61	$TAOR$	$^{\circ}C$	Μέση αύξηση θερμοκρασίας των λαδιών του μετασχηματιστή
62	$TD_{HV}$	$mm$	Πλάτος των στρώσεων του τυλίγματος Υ.Τ.
63	$TD_{LV}$	$mm$	Πλάτος των στρώσεων του τυλίγματος Χ.Τ.

64	$TH$	$mm$	Ύψος δεξαμενής μετασχηματιστή
65	$TL$	$mm$	Μήκος δεξαμενής μετασχηματιστή
66	$TW$	$mm$	Πλάτος δεξαμενής μετασχηματιστή
67	$TLC$	$mm$	Συνολικό μήκος πηνίου
68	$TOC$	€	Συνολικό κόστος κατοχής μετασχηματιστή
69	$Turns_{HV,max}$	-	Μέγιστο πλήθος στροφών του τυλίγματος Υ.Τ.
70	$Turns_{Main}_{HV}$	-	Πλήθος στροφών στο τύλιγμα Υ.Τ. κατά τη λειτουργία σε τάση $V_{HV,1}^l$
71	$TurnWidth_{HV}$	$mm$	Πλάτος των αγωγών του τυλίγματος Υ.Τ. συμπεριλαμβανομένης της μόνωσης
72	$TurnWidth_{LV}$	$mm$	Πλάτος των αγωγών του τυλίγματος Χ.Τ. συμπεριλαμβανομένης της μόνωσης
73	$U_k$	%	Τάση βραχυκύκλωσης
74	$V_{CT}$	$l$	Όγκος του λαδιού
75	$V_{LV}^p$	$V$	Φασική τάση τυλίγματος Χ.Τ.
76	$CPC$	$W/m^2$	Συντελεστής αυλακωμένων πάνελ

Πίνακας 4.7: Λοιπές παράμετροι μετασχηματιστή. [17, σελ. 72, Table 2.10 (Μεταφρασμένος)].

### 4.3.2 Αλγόριθμος

Η συγκεκριμένη μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό του μετασχηματιστή κατατάσσεται στην κατηγορία των ευρετικών μεθοδολογιών και αυτό διότι κατά τη διεξαγωγή της δίνονται πολλαπλές τιμές στις παραμέτρους σχεδιασμού, ώστε να παράγει ένα μεγάλο πλήθος εφικτών λύσεων που θα τηρούν όλους τους περιορισμούς και από αυτές θα επιλεγεί αυτή με το μικρότερο κόστος κατοχής με βάση τη σχέση (4.2.28).

Ενσωματώνοντας τις παραμέτρους που περιέχουν οι πίνακες 4.1 έως και 4.7 μπορεί να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός του μετασχηματιστή. Οι παράμετροι, οι οποίοι μεταβάλλονται κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού για την παραγωγή πολλαπλών εφικτών λύσεων, είναι οι παρακάτω:

1. Το πλήθος των στροφών στο τύλιγμα Χ.Τ.,  $turns_{LV}$ ,
2. Το πλάτους κορμού του πυρήνα,  $D$ ,
3. Η ένταση μαγνητικού πεδίου,  $FD_{max}$ ,
4. Το ύψος του παραθύρου του πυρήνα,  $G$
5. Η διατομή του αγωγού του τυλίγματος Χ.Τ.,  $area_{LV}$  και
6. Η διατομή του αγωγού του τυλίγματος Υ.Τ.,  $area_{HV}$ .

Το πλήθος των επαναλήψεων που θα διεξαχθούν κατά το σχεδιασμό είναι ανάλογο του γινόμενου του πλήθους των τιμών της κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα οι συνολικές επαναλήψεις  $n_{loops}$  θα είναι ίσες με το γινόμενο  $n_{LV} \cdot n_d \cdot n_{FD} \cdot n_G \cdot CS_{LV} \cdot CS_{HV}$ .

Η παραπάνω μέθοδος απεικονίζεται σε μορφή αλγόριθμου παρακάτω.

Για  $i = 1$  έως  $n_{LV}$

Για  $j = 1$  έως  $n_D$

Για  $k = 1$  έως  $n_{FD}$

Για  $l = 1$  έως  $n_G$

Υπολόγισε την τάση ανά στροφή και το πάχος στηρίγματος του πυρήνα με βάση την παράγραφο 4.3.3.

Για  $m = 1$  έως  $CS_{LV}$

Για  $n = 1$  έως  $CS_{HV}$

Υπολόγισε το πάχος της μόνωσης με βάση την παράγραφο 4.3.4.

Εάν ένας από τους περιορισμούς (4.2.20), (4.2.21), (4.2.22) και (4.2.23) παραβιάζεται, τότε η λύση απορρίπτεται και εκτελείται η επόμενη επανάληψη.

Υπολόγισε τις διαστάσεις τυλιγμάτων και πυρήνα με βάση την παράγραφο 4.3.5.

Υπολόγισε τη μάζα του πυρήνα και τις απώλειες λειτουργίας υπό κενό φορτίο με βάση την παράγραφο 4.3.6

Εάν ο περιορισμός (4.2.10) παραβιάζεται, τότε η λύση απορρίπτεται και εκτελείται η επόμενη επανάληψη.

Υπολόγισε το επαγωγικό μέρος της τάσης βραχυκύκλωσης με βάση την παράγραφο 4.3.7.

Υπολόγισε τις απώλειες χαλκού με βάση την παράγραφο 4.3.8.

Εάν ο περιορισμός (4.2.11) παραβιάζεται, τότε η λύση απορρίπτεται και εκτελείται η επόμενη επανάληψη.

Εάν ο περιορισμός (4.2.12) παραβιάζεται, τότε η λύση απορρίπτεται και εκτελείται η επόμενη επανάληψη.

Υπολόγισε την τάση βραχυκύκλωσης με βάση την παράγραφο 4.3.9.

Εάν ο περιορισμός (4.2.13) παραβιάζεται, τότε η λύση απορρίπτεται και εκτελείται η επόμενη επανάληψη.

Υπολόγισε το μήκος των τυλιγμάτων με βάση την παράγραφο 4.3.10.

Υπολόγισε τις διαστάσεις της δεξαμενής με βάση την παράγραφο 4.3.11.

Εάν ένας από τους περιορισμούς (4.2.24), (4.2.25) και (4.2.26) παραβιάζεται, τότε η λύση απορρίπτεται και εκτελείται η επόμενη επανάληψη.

Υπολόγισε την ανύψωση θερμοκρασίας των τυλιγμάτων και του λαδιού με βάση την παράγραφο 4.3.12.

Εάν ο περιορισμός (4.2.16) παραβιάζεται, τότε η λύση απορρίπτεται και εκτελείται η επόμενη επανάληψη.

Υπολόγισε την απαγωγή θερμότητας με βάση την παράγραφο 4.3.13.

Εάν ένας από τους περιορισμούς (4.2.15) παραβιάζεται, τότε η λύση απορρίπτεται και εκτελείται η επόμενη επανάληψη.

Υπολόγισε τη μάζα των μονωτικών υλικών με βάση την παράγραφο 4.3.14.

Υπολόγισε τη μάζα των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού με βάση την παράγραφο 4.3.15.

Υπολόγισε τη μάζα του λαδιού δεξαμενής με βάση την παράγραφο 4.3.16.

Υπολόγισε τη μάζα των μεταλλικών φύλλων με βάση την παράγραφο 4.3.17.

Υπολόγισε τη μάζα των αυλακωμένων πάνελ με βάση την παράγραφο 4.3.18.

Υπολόγισε το κόστος των κύριων υλικών του μετασχηματιστή με βάση την παράγραφο 4.3.19.

Υπολόγισε το κόστος κατοχής του μετασχηματιστή με βάση την παράγραφο 4.3.20.



### 4.3.3 Υπολογισμός τάσης ανά στροφή τυλίγματος και πάχος στηρίγματος του πυρήνα

Η τάση ανά στροφή (Volts per turn – VPT) υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$VPT = \frac{V_{LV}^p}{turns_{LV}} \quad (4.3.1)$$

Όπου  $V_{LV}^p$  η φασική τάση του τυλίγματος Χ.Τ. και  $turns_{LV}$  το πλήθος των στροφών σε αυτό. Η τάση ανά στροφή είναι επίσης ίση και με τη σχέση που ακολουθεί παρακάτω.

$$VPT = \frac{E}{N} \quad (4.3.2)$$

Όπου  $E$  η επαγόμενη τάση του τυλίγματος και  $N$  το πλήθος των στροφών του τυλίγματος. Μέσω της σχέσης (2.3.7) και (2.3.10) ορίζεται η μέγιστη μαγνητική ροή  $\Phi_{max}$  στο πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα, αντίστοιχα η μέγιστη μαγνητική ροή μπορεί να υπολογισθεί με βάση την παρακάτω σχέση:

$$\Phi_{max} = FD_{max} \cdot A_{eff} \quad (4.3.3)$$

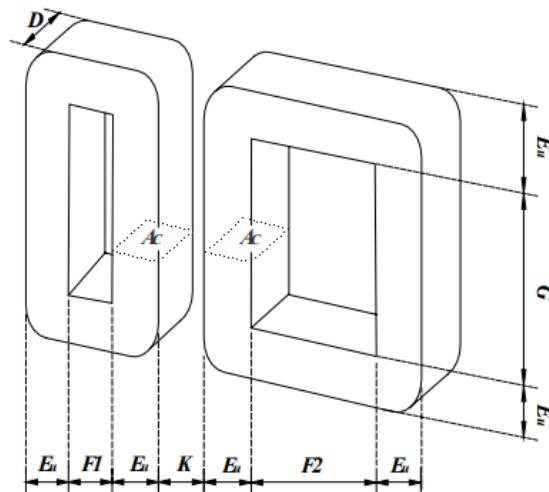
Όπου  $FD_{max}$  η μέγιστη ένταση μαγνητική πεδίου και  $A_{eff}$  η διατομή του στηρίγματος του πυρήνα. Με βάση το σχέδιο 4.1 η διατομή  $A_{eff}$  θα είναι ίση με:

$$A_{eff} = CSF \cdot 2 \cdot A_C = CSF \cdot 2 \cdot (D \cdot E_u) \quad (4.3.4)$$

Όπου  $CSF$  ο συντελεστής στοίβαξης των ελασμάτων του πυρήνα,  $A_C$ ,  $D$  και  $E_u$  η διατομή, το πλάτος και το πάχος του στηρίγματος του κορμού του πυρήνα αντίστοιχα.

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.3.7), (4.3.2) και (4.3.4) μπορεί να υπολογισθεί το πάχος του στηρίγματος του πυρήνα  $E_u$  στην περίπτωση συνδεσμολογίας αστέρα ή τριγώνου του τυλίγματος Χ.Τ.

$$\begin{aligned} \Phi_{max} &= \frac{VPT}{4,44 \cdot f} \Rightarrow FD_{max} \cdot A_{eff} = \frac{VPT}{4,44 \cdot f} \Rightarrow FD_{max} \cdot CSF \cdot 2 \cdot D \cdot E_u \\ &= \frac{VPT}{4,44 \cdot f} \Rightarrow E_u = \frac{VPT}{8,88 \cdot CSF \cdot D \cdot FD_{max} \cdot f} \end{aligned} \quad (4.3.5)$$



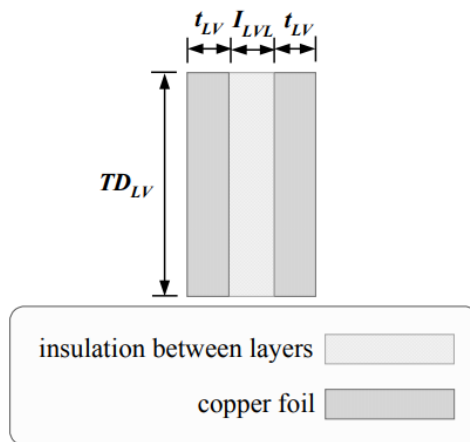
Σχήμα 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μικρού και του μεγάλου πυρήνα ενός μετασχηματιστή. [17, σελ. 75, Figure 2.3].

Ενώ στην περίπτωση συνδεσμολογίας ζιγκ – ζαγκ στο τύλιγμα Χ.Τ. η αντίστοιχη σχέση θα έχει την εξής τελική μορφή:

$$E_u = \frac{VPT}{8,88 \cdot CSF \cdot D \cdot FD_{max} \cdot f} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$$

#### 4.3.4 Υπολογισμός του πάχους μόνωσης μεταξύ των στρώσεων των αγωγών των τυλιγμάτων

Για τον υπολογισμό του πάχους της μόνωσης που τοποθετείται μεταξύ των στρώσεων για τα τυλίγματα Χ.Τ. και Υ.Τ. χρησιμοποιούνται πίνακες που εμπεριέχουν τιμές πάχους μόνωσης για το αντίστοιχο πάχος του αγωγού του τυλιγματος. Μία τέτοια εμπειρική περίπτωση είναι και αυτή όπου το τύλιγμα Χ.Τ. τάσης αποτελείται από φύλλα χαλκού πάχους  $t_{LV}$  από 0,4 έως 1 mm, τότε η αντίστοιχη μόνωση μεταξύ των στρώσεων  $I_{LVL}$  θα είναι ίση με 0,28 mm. Σε περίπτωση διαφορετικού πάχους η τιμή του πάχους μόνωσης μεταξύ των στρώσεων ορίζεται με βάση τον πίνακα 4.8.



Σχήμα 4.2: Μόνωση μεταξύ στρώσεων τυλιγματος Χ.Τ. με αγωγούς αποτελούμενος από χάλκινα φύλλα, όπου η λευκή επιφάνεια είναι η μόνωση μεταξύ των δύο στρώσεων και οι σκιασμένες επιφάνειες είναι δύο διαδοχικές στρώσεις του τυλιγματος. [17, σελ. 77, Figure 2.4].

Αντίστοιχα για το τύλιγμα Υ.Τ. ισχύει η εμπειρική σχέση όπου όταν οι αγωγοί είναι στρογγυλοί και κυκλικής μορφής και με διάμετρο  $d_{HV}$  μικρότερη των 2 mm, τότε η μόνωση μεταξύ των στρώσεων  $I_{HVL}$  θα είναι ίση με 0,28 mm, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.

#### 4.3.5 Υπολογισμός διαστάσεων τυλιγμάτων και πυρήνα

Επειδή το τύλιγμα Χ.Τ. είναι φτιαγμένο από χάλκινα φύλλα, κάθε στρώση του τυλιγματος Χ.Τ.  $Layers_{LV}$  θα περιέχει και μία στροφή  $TurnsMain_{LV}$ , άρα θα ισχύει ότι:

$$Layers_{LV} = TurnsMain_{LV} \quad (4.3.6)$$

Με βάση το σχήμα 4.4 μπορεί να υπολογισθεί το ύψος  $TD_{LV}$  του τυλιγματος Χ.Τ. με βάση την παρακάτω σχέση:

$$TD_{LV} = G - 2 \cdot CCEE - 2 \cdot D_{LV-C} \quad (4.3.7)$$

Όπου  $G$  το ύψος του παραθύρου του πυρήνα και τα  $CCEE$  και  $D_{LV-C}$  αποτελούν μαζί το κενό μεταξύ τυλιγματος Χ.Τ. και πυρήνα. Οι δύο αυτές αποστάσεις πολλαπλασιάζονται με το δύο στη σχέση, γιατί τα κενά αυτά υπάρχουν και από την άνω αλλά και από την κάτω πλευρά με βάση το σχήμα 4.4.

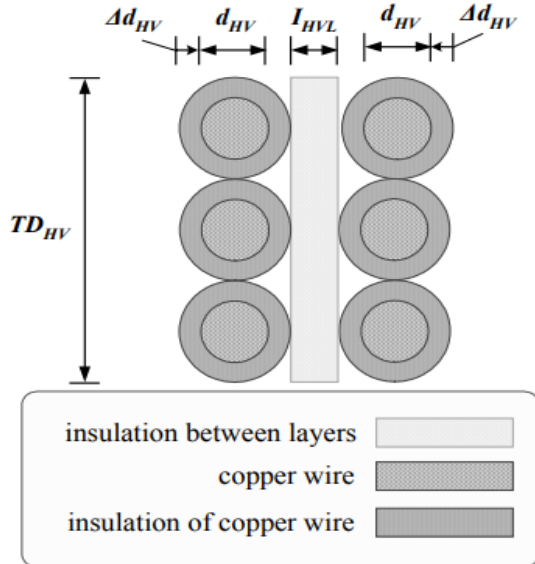
Το τύλιγμα αποτελείται από πολλαπλές στρώσεις, όπου η κάθε μία αποτελείται από μια στροφή, συγκεκριμένα ένα φύλλο, άρα το πλάτος της στρώσης θα είναι ίσο με το ύψος του τυλιγματος Χ.Τ.

$$TurnWidth_{LV} = TD_{LV} \quad (4.3.8)$$

Το πάχος του τυλίγματος Χ.Τ.  $BLD_{LV}$  θα ορίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$BLD_{LV} = (t_{LV} + I_{LV}) \cdot \frac{Layers_{LV}}{LDSP_{LV}} \quad (4.3.9)$$

Όπου  $LDSP_{LV}$  ο συντελεστής πλήρωσης στρώσεων του τυλίγματος Χ.Τ.



Σχήμα 4.3: Μόνωση μεταξύ στρώσεων τυλίγματος Υ.Τ. με στρογγυλούς χάλκινους αγωγούς. Όπου η λευκή επιφάνεια είναι η μόνωση μεταξύ των δύο στρώσεων η γκριζα επιφάνεια είναι οι στρογγυλοί αγωγοί και η σκούρα επιφάνεια είναι η εξωτερική μόνωση του αγωγού. [17, σελ. 77, Figure 2.5].

Μέσω του σχήματος 4.4 μπορεί οπτικά να υπολογισθεί το συνολικό πάχος  $SPLD_{LV}$  του τυλίγματος Χ.Τ..

$$SPLD_{LV} = BLD_{LV} + I_{LV-C} + I_{HV-LV} \quad (4.3.10)$$

Όπου  $I_{LV-C}$  και  $I_{HV-LV}$  το πάχος των μονώσεων μεταξύ τυλίγματος Χ.Τ. και πυρήνα και τυλίγματος Χ.Τ. και Υ.Τ. αντίστοιχα.

Σε περίπτωση που το τύλιγμα Υ.Τ. περιέχει ενδιάμεσες λήψεις, τότε θα πρέπει να υπολογιστεί η μέγιστη τάση λειτουργίας για να μπορεί να υπολογισθεί έπειτα το συνολικό πλήθος των στροφών που απαιτούνται για την επίτευξη αυτής της τάσης. Πιο συγκεκριμένα η μέγιστη τάση του τυλίγματος Υ.Τ. θα είναι ίση με:

$$V_{HV,max}^p = V_{HV}^p \cdot (1 + Taps_{HV,max}) \quad (4.3.11)$$

Οι αντίστοιχες στροφές που απαιτούνται για την παραπάνω τάση υπολογίζονται στην παρακάτω σχέση:

$$Turns_{HV,max} = \frac{V_{HV,max}^p}{V_{PT}^p} \quad (4.3.12)$$

Ενώ για την ονομαστική τιμή τάσης του τυλίγματος Υ.Τ. οι αντίστοιχες στροφές που θα απαιτούνται θα είναι ίσες με:

$$Turns_{Main_{HV}} = Turns_{HV,max} \cdot \frac{V_{HV}^p}{V_{HV,max}^p} \quad (4.3.13)$$

Με βάση το σχήμα 4.4 το ύψος  $TD_{HV}$  του τυλίγματος Χ.Τ. θα είναι ίσο με:

$$TD_{HV} = G - 2 \cdot CCEE - 2 \cdot D_{HV-C} \quad (4.3.14)$$

Το πλάτος  $TurnWidth_{HV}$  της στρώσης των αγωγών του τυλίγματος Υ.Τ. μαζί με τη μόνωση θα είναι ίσο με:

$$TurnWidth_{HV} = d_{HV} + \Delta d_{HV} \quad (4.3.15)$$

Οι στροφές ανά στρώση για το τύλιγμα Υ.Τ. θα είναι ίσες με:

$$TurnsPerLayer_{HV} = \left( \frac{TD_{HV}}{TurnWidth_{HV}} - 1 \right) \cdot TDSP_{HV} \quad (4.3.16)$$

Σε περίπτωση που ο μετασχηματιστής έχει και δεύτερο επίπεδο τάσης στο τύλιγμα Υ.Τ., το οποίο προκύπτει από το βασικό επίπεδο τάσης διαιρούμενο από έναν ακέραιο αριθμό  $X$ , τότε το τύλιγμα αποτελείται από  $X$  τμήματα – πηνία, με το δεύτερο επίπεδο τάσης, τα οποία όταν συνδεθούν σε σειρά, αθροίζοντας την τάση του καθενός προκύπτει το βασικό επίπεδο τάσης. Άρα μπορεί να υπολογιστεί το πλήθος των στροφών  $TurnsPerLayer_{HV,sub-coil}$  σε κάθε πηνίο, αν διαιρεθεί το συνολικό πλήθος των στροφών με το πλήθος των πηνίων  $X$  που αποτελούν ολόκληρο το τύλιγμα.

$$TurnsPerLayer_{HV,sub-coil} = \frac{TurnsPerLayer_{HV}}{X} \quad (4.3.17)$$

Σε περίπτωση που το αποτέλεσμα είναι δεκαδικός αριθμός αυτό, στρογγυλοποιείται προς τα κάτω και έτσι έπειτα υπολογίζεται ξανά το συνολικό πλήθος στροφών του τυλίγματος Υ.Τ.

$$TurnsPerLayer_{HV} = TurnsPerLayer_{HV,sub-coil} \cdot X \quad (4.3.18)$$

Έπειτα μπορεί να υπολογιστεί το πλήθος των στρώσεων  $Layers_{HV}$  στο τύλιγμα της Υ.Τ.

$$Layers_{HV} = \frac{Turns_{HV,max}}{TurnsPerLayer_{HV}} \quad (4.3.19)$$

Όπως και το πλήθος των στροφών έτσι και το πλήθος των στρώσεων στρογγυλοποιείται στον πιο άνω κοντινό ακέραιο.

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί το πάχος  $BLD_{HV}$  του τυλίγματος Υ.Τ. με βάση τη σχέση:

$$BLD_{HV} = (TurnWidth_{HV} + I_{HVL}) \cdot \frac{Layers_{HV}}{LDSP_{HV}} + TI_{HV} \quad (4.3.20)$$

Όπου  $I_{HVL}$  το πάχος της μόνωσης των αγωγών του τυλίγματος Υ.Τ.

Το συνολικό πάχος  $SPLD_{HV}$  του τυλίγματος Υ.Τ. θα περιλαμβάνει και την εξωτερική μόνωση  $I_{HV-HV}$  αυτού.

$$SPLD_{HV} = BLD_{HV} + I_{HV-HV} \quad (4.3.21)$$

Με γνωστά τα συνολικά πάχη των τυλιγμάτων μπορεί να υπολογισθεί το πλάτος του παραθύρου  $F1$  του μικρού πυρήνα.

$$F1 = SPLD_{HV} + SPLD_{LV} \quad (4.3.22)$$

Το αποτέλεσμα που προκύπτει πρέπει να στρογγυλοποιηθεί στον κοντινότερο ακέραιο αριθμό.

Αντίστοιχα το πλάτος  $F2$  του μεγάλου πυρήνα θα είναι το διπλάσιο του πλάτους του μικρού πυρήνα.

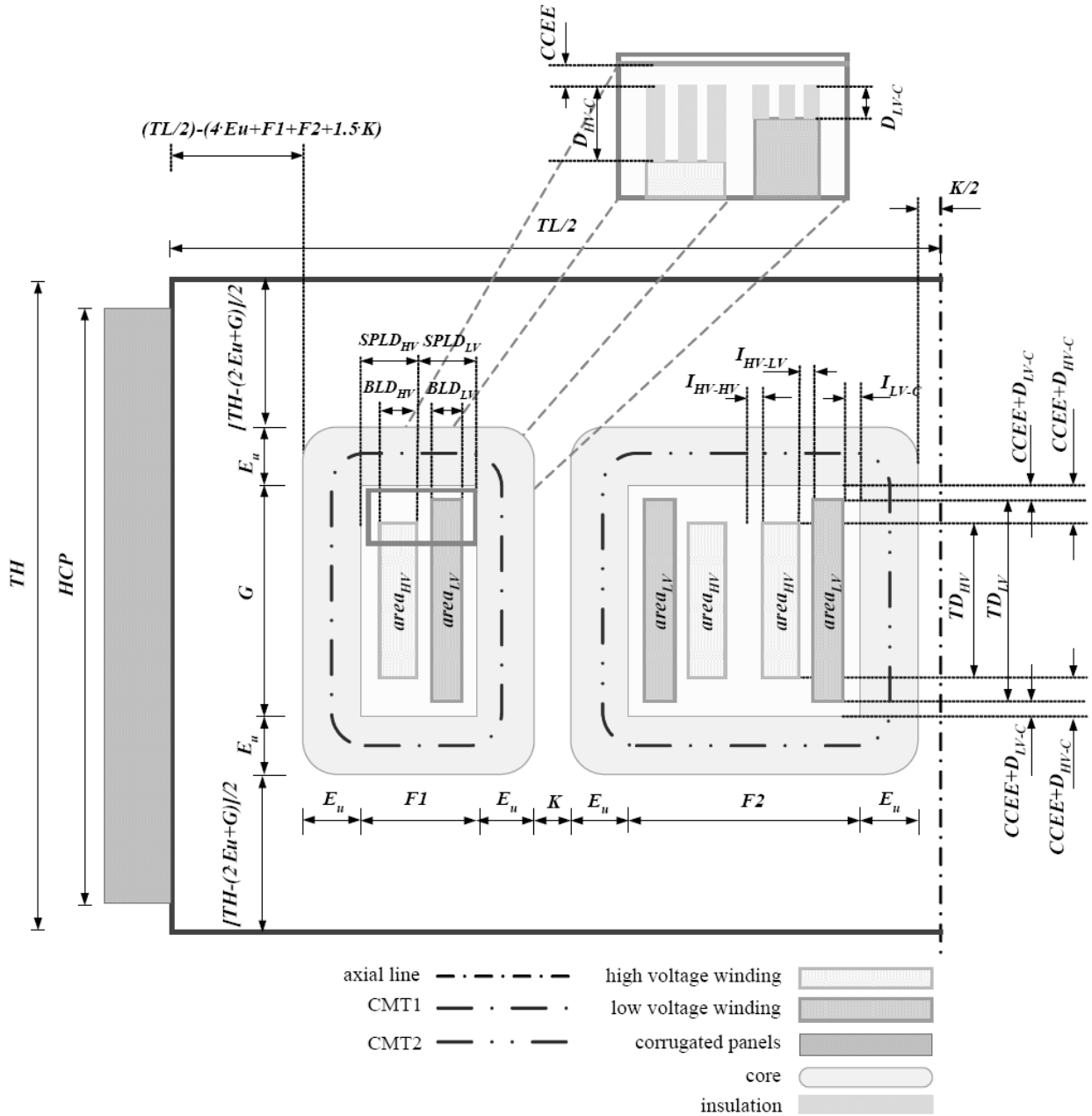
$$F2 = 2 \cdot F1 \quad (4.3.23)$$

Στη συνέχεια πρέπει να υπολογιστεί η επαγόμενη και κρουστική τάση των τυλιγμάτων Υ.Τ και Χ.Τ.

Πιο συγκεκριμένα για τον υπολογισμό της επαγόμενης τάσης  $Induced_{LV}$  στο τύλιγμα Χ.Τ. θα ισχύει:

$$Induced_{LV} = VPT \cdot 2 \cdot TurnsPerLayer_{LV} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \quad (4.3.24)$$

Όπου ο πρώτος πολλαπλασιαστής που είναι ίσος με 2, εισέρχεται λόγω της διαφοράς δυναμικού της αρχικής σπείρας μίας στρώσης από την τελευταία της επόμενης, ενώ ο δεύτερος πολλαπλασιαστής που είναι ίσος με 2 εισέρχεται γιατί η επαγόμενη τάση είναι διπλάσια της ονομαστικής.



Σχήμα 4.4: Γεωμετρικές διαστάσεις εμφανιζόμενες σε τομή του μετασχηματιστή. [17, σελ. 80, Figure 2.6].

Για τον υπολογισμό της κρουστικής τάσης  $Impulse_{LV}$  στο τύλιγμα Χ.Τ θα ισχύει:

$$Impulse_{LV} = \frac{2 \cdot BIL_{LV} \cdot TurnsPerLayer_{LV}}{turns_{LV} \cdot \frac{V_{LV}^p}{V_{LV}^p}} \quad (4.3.25)$$

Όπου  $BIL_{LV}$ , σε  $kV$ , η βασική στάθμη μόνωσης του τυλίγματος Χ.Τ.,  $turns_{LV}$  το πλήθος των σπειρών του τυλίγματος Χ.Τ.,  $V_{LV,min tap}^p$  η ελάχιστη φασική τάση του τυλίγματος Χ.Τ. και  $V_{LV}^p$  η ονομαστική φασική τάση του τυλίγματος Χ.Τ. Στην περίπτωση που η ελάχιστη φασική τάση του τυλίγματος Χ.Τ. είναι ίση με την ονομαστική ο λόγος  $V_{LV,min tap}^p/V_{LV}^p$  θα είναι ίσος με την μονάδα.

Αντίστοιχα για το τύλιγμα Υ.Τ για την επαγόμενη τάση  $Induced_{HV}$  θα ισχύει:

$$Induced_{HV} = VPT \cdot 2 \cdot TurnsPerLayer_{HV} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \quad (4.3.26)$$

Όπου ο πρώτος πολλαπλασιαστής που είναι ίσος με 2, εισέρχεται λόγω της διαφοράς δυναμικού της αρχικής σπείρας μίας στρώσης από την τελευταία της επόμενης, ενώ ο δεύτερος πολλαπλασιαστής που είναι ίσος με 2 εισέρχεται γιατί η επαγόμενη τάση είναι διπλάσια της ονομαστικής.

Ενώ για τη κρουστική τάση  $Impulse_{HV}$  θα ισχύει:

$$Impulse_{HV} = \frac{2 \cdot BIL_{HV} \cdot TurnsPerLayer_{HV}}{turns_{HV} \cdot \frac{V_{HV,min tap}^p}{V_{HV}^p}} \quad (4.3.27)$$

Όπου  $BIL_{HV}$ , σε  $kV$ , η βασική στάθμη μόνωσης του τυλίγματος Χ.Τ.,  $turns_{HV}$  το πλήθος των σπειρών του τυλίγματος Χ.Τ.,  $V_{HV,min tap}^p$  η ελάχιστη φασική τάση του τυλίγματος Χ.Τ. και  $V_{HV}^p$  η ονομαστική φασική τάση του τυλίγματος Χ.Τ.

Με βάση τον πίνακα 4.8 επιλέγεται το πάχος μόνωσης για τα τυλίγματα Χ.Τ. και Υ.Τ. Εάν μετά την επιλογή μίας μόνωσης για τα τυλίγματα Χ.Τ. και Υ.Τ. θα ισχύει ότι  $Induced > Induced_{max}$  και  $Impulse > Impulse_{max}$ , τότε η επιλογή της μόνωσης είναι σωστή. Στην περίπτωση που δεν ισχύει αυτό τότε επιλέγεται η επόμενη μεγαλύτερη στρώση μόνωσης και να ελεγχθούν πάλι οι περιορισμοί των σχέσεων (4.2.20), (4.2.21), (4.2.22) και (4.2.23).

Μόνωση (mm)	Μέγιστη επαγόμενη τάση (Kv)	Μέγιστη κρουστική τάση (Kv)
0.28	6	23.5
0.41	7.5	31.5
0.56	9.5	36
0.68	11	40
0.80	12.5	50

Πίνακας 4.8: Επιλογή μονωτικού πάχους με βάση τη μέγιστη επαγόμενη τάση και μέγιστη κρουστική τάση. [41, σελ. 72 Πίνακας 3.10]

#### 4.3.6 Υπολογισμός μάζας πυρήνα και απωλειών λειτουργίας εν κενώ

Για τον καθορισμό των απωλειών λειτουργίας εν κενώ θα πρέπει να υπολογισθεί πρώτα η συνολική μάζα του πυρήνα/των πυρήνων που αποτελούν ένα μετασχηματιστή. Για τον υπολογισμό της μάζας είναι απαραίτητη η γνώση κάποιων γεωμετρικών παραμέτρων του κάθε μετασχηματιστή που αποτελεί μέρος της συνολικής κατασκευής.

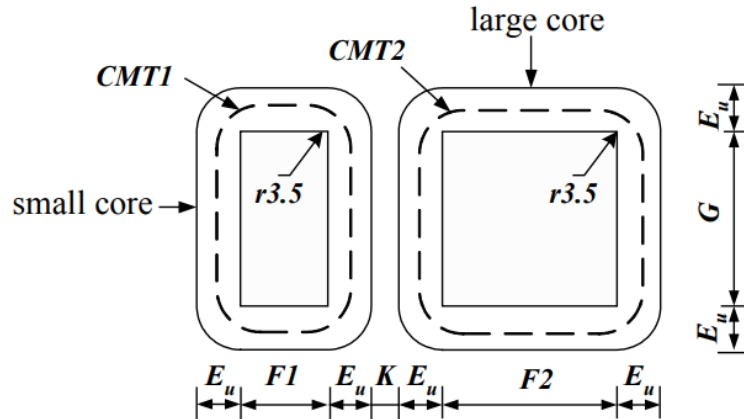
Αρχικά υπολογίζεται το μέσο μήκος της κάθε στροφής του κάθε πυρήνα (Core Mean Turn – CMT). Στην περίπτωση του μικρού πυρήνα του σχήματος 4.1 και 4.5 θα ισχύει:

$$CMT1 = 2 \cdot (F1 + G) + 2 \cdot \pi \cdot \left[ \frac{E_u}{2} + 3,5 \right] - 8 \cdot 3,5 \quad (4.3.28)$$



Ενώ στη περίπτωση του μεγάλου πυρήνα θα ισχύει:

$$CMT2 = 2 \cdot (F2 + G) + 2 \cdot \pi \cdot \left[ \frac{E_u}{2} + 3,5 \right] - 8 \cdot 3,5 \quad (4.3.29)$$



Σχήμα 4.5: Μορφολογικοί παράμετροι μικρού και μεγάλου πυρήνα. [17, σελ. 85, Figure 2.7].

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογισθεί η μάζα του κάθε πυρήνα μέσω των σχέσεων που ακολουθούν. Για την περίπτωση της μάζας του μικρού πυρήνα (Small Core Weight – SCW) ισχύει:

$$SCW = CMT1 \cdot D \cdot E_u \cdot CSF \cdot g_{MM} \quad (4.3.30)$$

Ενώ για τη μάζα του μεγάλου πυρήνα (Large Core Weight – LCW) θα ισχύει:

$$LCW = CMT2 \cdot D \cdot E_u \cdot CSF \cdot g_{MM} \quad (4.3.31)$$

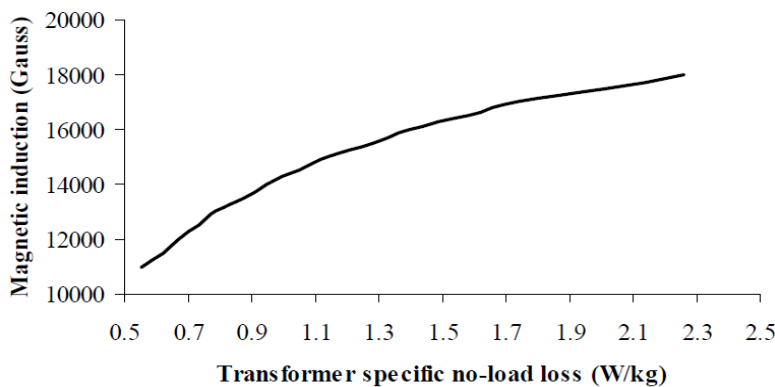
Στην περίπτωση μετασχηματιστή τύπου μανδύα, αυτός αποτελείται από δύο μικρούς τυλιχτούς πυρήνες και δύο μεγάλους τυλιχτούς πυρήνες σαν αυτούς του σχήματος 4.5. Για αυτό το λόγο η συνολική μάζα του σιδηρομαγνητικού υλικού  $w_3$  σε αυτήν την περίπτωση θα είναι ίσο με:

$$w_3 = 2 \cdot (SCW + LCW) \quad (4.3.32)$$

Εφόσον είναι γνωστή η συνολική μάζα του σιδηρομαγνητικού υλικού  $w_3$ , μπορούν πλέον να ορισθούν και οι απώλειες λειτουργίας εν κενώ  $NLL$  οι οποίες θα είναι ίσες με:

$$NLL = w_3 \cdot SNLL_{TF} \quad (4.3.33)$$

Όπου  $SNLL_{TF}$  οι ειδικές απώλειες λειτουργίας εν κενώ ανά μονάδα μάζας, η οποία προκύπτει από την καμπύλη του σχήματος 4.6.



Σχήμα 4.6. Καμπύλη ορισμού ειδικών απωλειών λειτουργίας εν κενώ συναρτήσει της έντασης μαγνητικού πεδίου όπου  $1 T = 10000 Gauss$ . [17, σελ. 85, Figure 2.7].

### 4.3.7 Υπολογισμός του επαγωγικού μέρους της τάσης βραχυκύκλωσης

Για τον υπολογισμό αυτού του μεγέθους απαιτούνται να είναι γνωστές κάποιες γεωμετρικές παράμετροι, οι οποίες απεικονίζονται στα σχήματα 4.7 και 4.8.

Οι αποστάσεις  $ML$  και  $MW$  αποτελούν το μήκος και το πλάτος των πηνίων του τυλίγματος και υπολογίζονται με βάση τις σχέσεις που ακολουθούν.

$$ML = D + 2 \cdot CCEE \quad (4.3.34)$$

$$MW = 2 \cdot E_u + K \quad (4.3.35)$$

Ως αποτέλεσμα μπορεί να υπολογισθεί η ισοδύναμη διάμετρος  $DMC$  των πηνίων από την παρακάτω εμπειρική σχέση που ακολουθεί, όπου οι αποστάσεις  $ML$  και  $MW$  εισάγονται σε mm.

$$DMC = \frac{2 \cdot (ML + MW) - 10,992 \text{ mm}}{2} \quad (4.3.36)$$

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογισθεί η ισοδύναμη εξωτερική διάμετρος  $D3$  του τυλίγματος Χ.Τ., η οποία συμπεριλαμβάνει και το πάχος του μονωτικού χαρτιού πάχους  $I_{LV-c}$  1,5 mm.

$$D3 = DMC + 2 \cdot I_{LV-c} \quad (4.3.37)$$

Το αντίστοιχο εμβαδόν της διαμέτρου  $D3$  δίνεται από τη σχέση:

$$A3 = \frac{\pi \cdot D3^2}{4} \quad (4.3.38)$$

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η ισοδύναμη εξωτερική διάμετρος  $D5$  του τυλίγματος Χ.Τ. με βάση τη παρακάτω σχέση:

$$D5 = D3 + 2 \cdot BLD_{LV} \quad (4.3.39)$$

Το αντίστοιχο εμβαδόν της διαμέτρου  $D5$  δίνεται από τη σχέση:

$$A5 = \frac{\pi \cdot D5^2}{4} \quad (4.3.40)$$

Το μήκος  $LG_{LV}$  των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγού λαδιού του τυλίγματος Χ.Τ. θα είναι ίσο με το πλάτος των πηνίων.

$$LG_{LV} = MW \quad (4.3.41)$$

Έπειτα μπορεί να υπολογιστεί η ψυκτική επιφάνεια  $A6$  των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγού λαδιού του τυλίγματος Χ.Τ. ως εξής:

$$A6 = Ducts_{LV} \cdot d_{ducts_{LV}} \cdot LG_{LV} \cdot 2 \quad (4.3.42)$$

Όπου  $Ducts_{LV}$  το πλήθος των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγού λαδιού του τυλίγματος Χ.Τ.,  $d_{ducts_{LV}}$  το πλάτος τους αντίστοιχα και το 2 υπάρχει μέσα στη σχέση, διότι υπάρχουν διαμορφωμένα ελάσματα και από τις δύο πλευρές του τυλίγματος.

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της συνολικής επιφάνειας  $A7$  του τυλίγματος Χ.Τ. μαζί με την επιφάνεια ψύξης των διαμορφωμένων ελασμάτων.

$$A7 = A5 + A6 \quad (4.3.43)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η διάμετρος  $D9$  που περιέχει μέσα και το πάχος της μόνωσης μεταξύ των τυλιγμάτων Χ.Τ. και Υ.Τ.

$$D9 = D7 + 2 \cdot I_{HV-LV} = \sqrt{\frac{4 \cdot A7}{\pi}} + 2 \cdot I_{HV-LV} \quad (4.3.44)$$

Όπου η επιφάνεια της διαμέτρου  $D9$  είναι ίση με:

$$A9 = \frac{\pi \cdot D9^2}{4} \quad (4.3.45)$$

Έπειτα υπολογίζεται η εξωτερική διάμετρος  $D11$  του τυλίγματος Υ.Τ.

$$D11 = D9 + 2 \cdot BLD_{HV} \quad (4.3.46)$$

Όπου  $BLD_{HV}$  το πάχος του τυλίγματος Υ.Τ. και η επιφάνεια της διαμέτρου  $D11$  είναι ίση με:

$$A11 = \frac{\pi \cdot D11^2}{4} \quad (4.3.47)$$

Το μήκος  $LG_{HV}$  των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγού λαδιού του τυλίγματος Υ.Τ. θα είναι ίσο με:

$$LG_{HV} = LG_{LV} + 2 \cdot BLD_{LV} + 2 \cdot I_{HV-LV} \quad (4.3.48)$$

Αντίστοιχα η ψυκτική επιφάνεια  $A12$  των διαμορφωμένων ελασμάτων του τυλίγματος Υ.Τ. θα είναι ίση με:

$$A12 = Ducts_{HV} \cdot d_{ducts_{HV}} \cdot LG_{HV} \cdot 2 \quad (4.3.49)$$

Όπου  $Ducts_{HV}$  το πλήθος των διαμορφωμένων ελασμάτων του τυλίγματος Υ.Τ.,  $d_{ducts_{HV}}$  το πλάτος τους αντίστοιχα και το 2 εμπεριέχεται στη σχέση, διότι υπάρχουν διαμορφωμένα ελάσματα και από τις δύο πλευρές του τυλίγματος.

Η συνολική επιφάνεια  $A13$  του τυλίγματος Υ.Τ. μαζί με τη ψυκτική επιφάνεια των διαμορφωμένων ελασμάτων του θα είναι ίση με:

$$A13 = A11 + A12 \quad (4.3.50)$$

Όπου η αντίστοιχη επιφάνεια είναι ίση με:

$$A13 = \frac{\pi \cdot D13^2}{4} \quad (4.3.51)$$

Ως αποτέλεσμα μπορεί να υπολογισθεί ο συντελεστής  $k_L$  ο οποίος θα είναι ίσος με:

$$k_L = \frac{-2 \cdot \sqrt{A3} + \sqrt{A7} + \sqrt{A9}}{3,54 \cdot TD_{LV}} = \frac{-2 \cdot \sqrt{\frac{(\pi \cdot D3)^2}{4}} + \sqrt{A7} + \sqrt{\frac{(\pi \cdot D9)^2}{4}}}{3,54 \cdot TD_{LV}} \quad (4.3.52)$$

Όπου  $TD_{LV}$  πρόκειται για το ύψος του τυλίγματος Χ.Τ με βάση το σχήμα 4.2.

Με το συντελεστή  $k_L$  μπορεί να υπολογιστεί η μεταβλητή  $L17$  όπως ακολουθεί παρακάτω:

$$L17 = (k_L^2 + k_L + 1) \cdot TD_{LV} \quad (4.3.53)$$

Επίσης υπολογίζεται με αντίστοιχο τρόπο ο συντελεστής  $k_P$ .

$$k_P = \frac{2 \cdot \sqrt{A13} - \sqrt{A7} - \sqrt{A9}}{3,54 \cdot TD_{HV}} = \frac{2 \cdot \sqrt{A13} - \sqrt{A7} - \sqrt{\frac{(\pi \cdot D9)^2}{4}}}{3,54 \cdot TD_{HV}} \quad (4.3.54)$$

Όπου  $TD_{HV}$  πρόκειται για το ύψος του τυλίγματος Υ.Τ, με βάση το σχήμα 4.3, και με βάση το συντελεστή αυτόν υπολογίζεται η μεταβλητή  $L21$ :

$$L21 = (k_p^2 + k_p + 1) \cdot TD_{HV} \quad (4.3.55)$$

Στη συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός της μεταβλητής  $LH23$ .

$$LH23 = L17 + L21 \quad (4.3.56)$$

Έπειτα ορίζεται η επαγωγή  $L25$  με βάση την παρακάτω σχέση:

$$L25 = \frac{(A5 - A3) \cdot 0,396}{L17} \cdot \mu_0 \quad (4.3.57)$$

Επίσης ορίζεται και η επαγωγή  $L26$  με βάση την παρακάτω σχέση:

$$L26 = \frac{(A11 - A9) \cdot 0,396}{L21} \cdot \mu_0 \quad (4.3.58)$$

Η επαγωγή  $L27$  υπολογίζεται επίσης με αντίστοιχο τρόπο:

$$L27 = \frac{(A9 - A7) \cdot 2}{LH23} \cdot \mu_0 \quad (4.3.59)$$

Η επαγωγή  $L28$  υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση αντίστοιχα:

$$L28 = \frac{A6 \cdot FN(Ducts_{LV})}{L17} \cdot \mu_0 \quad (4.3.60)$$

Όπου η τιμή  $FN(Ducts_{LV})$  προσδιορίζεται μέσα από τον πίνακα 4.9 και διαφέρει για κάθε διαφορετική τιμή του πλήθους των διαμορφωμένων ελασμάτων.

Η επαγωγή  $L29$  υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση αντίστοιχα:

$$L29 = \frac{A12 \cdot FN(Ducts_{HV})}{L21} \cdot \mu_0 \quad (4.3.61)$$

Όπου η τιμή  $FN(Ducts_{HV})$  προσδιορίζεται μέσα από πίνακα 4.9 και διαφέρει για κάθε διαφορετική τιμή του πλήθους των διαμορφωμένων ελασμάτων.

Ducts	FN
1	0.250
2	0.280
3	0.292
4	0.300
5	0.306
6	0.310
7	0.313
8	0.315
9	0.317
10	0.318
11	0.319
>11	0.320

Πίνακας 4.9: Πίνακας τιμών της συνάρτησης  $FN(Ducts_{HV})$ . [41, σελ. 80 Πίνακας 3.9]

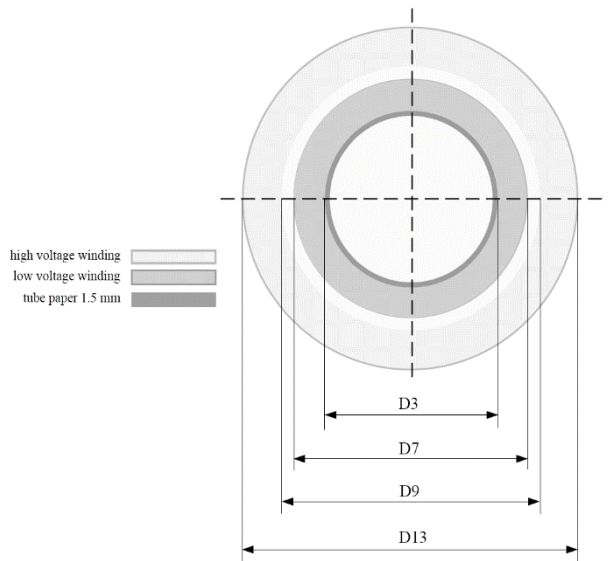
Ως αποτέλεσμα θα μπορεί να υπολογιστεί η συνολική επαγωγή  $L_{tot}$  με βάση την παρακάτω σχέση:

$$L_{tot} = L_{25} + L_{26} + L_{27} + L_{28} + L_{29} \quad (4.3.62)$$

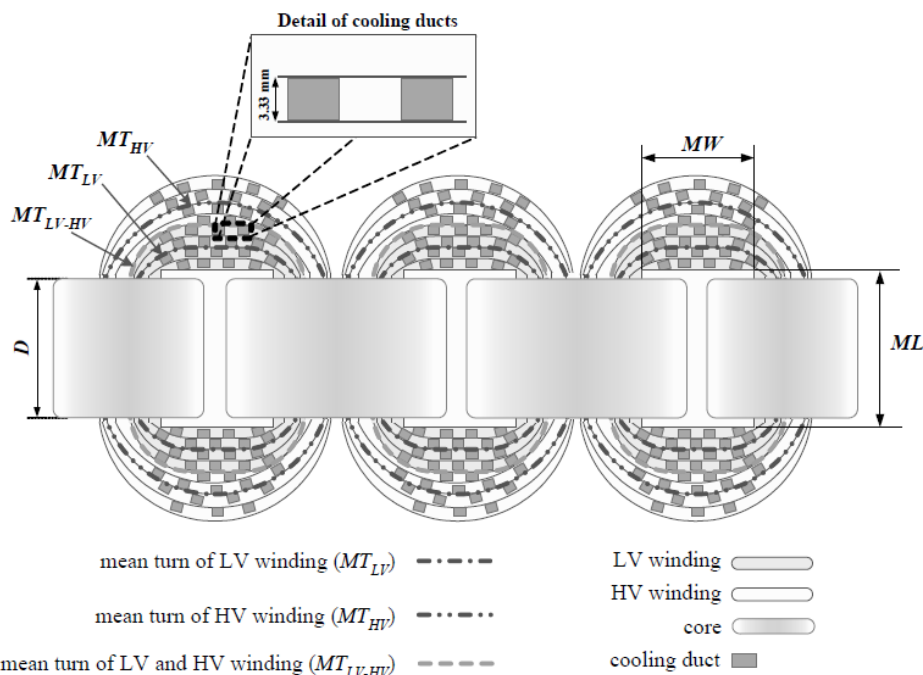
Τελικά θα μπορεί να υπολογιστεί το επαγωγικό μέρος της τάσης βραχυκύκλωσης  $IX$  με την σχέση που ακολουθεί:

$$IX = \frac{I_{LV}^p \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot turns_{LV}^2 \cdot L_{tot}}{V_{LV}^p} \quad (4.3.63)$$

Όπου  $V_{LV}^p$  και  $I_{LV}^p$  η φασική τιμή της τάσης και του ρεύματος του τυλίγματος Χ.Τ. και  $turns_{LV}$  το πλήθος των σπειρών στο τύλιγμα Χ.Τ.



Σχήμα 4.7: Διάμετροι τυλιγμάτων, όπου η σκούρα περιοχή είναι μονωτικό χαρτί πάχους 1,5 mm, η γκριζα περιοχή είναι το τύλιγμα Χ.Τ. και η λευκή επιφάνεια είναι το τύλιγμα Υ.Τ. [17, σελ. 88, Figure 2.9].



Σχήμα 4.8: Γεωμετρικές παράμετροι των τυλιγμάτων. [17, σελ. 89, Figure 2.10].

### 4.3.8 Υπολογισμός των απωλειών χαλκού

Με τις διαμέτρους  $D3$  και  $D7$  του σχήματος 4.7 μπορεί να υπολογιστεί το μέσο μήκος των στροφών του τυλίγματος Χ.Τ.  $MT_{LV}$  με την παρακάτω σχέση:

$$MT_{LV} = \left( \frac{D3 + D7}{2} \right) \cdot \pi \quad (4.3.64)$$

Έχοντας υπολογίσει το μέσο μήκος μπορεί να υπολογιστεί αντίστοιχα το συνολικό μήκος του τυλίγματος Χ.Τ.  $CL_{LV}$ .

$$CL_{LV} = MT_{LV} \cdot Layers_{LV} \cdot 3 \quad (4.3.65)$$

Στην περίπτωση που απαιτείται το μήκος ανά φάση τότε αφαιρείται από την παραπάνω σχέση το 3 που πολλαπλασιάζεται με τις υπόλοιπες παραμέτρους. Στη συνέχεια με βάση το πλάτος της στρώσης του τυλίγματος Υ.Τ.  $TurnWidth_{LV}$  και το πάχος του χάλκινου φύλλου της στρώσης  $t_{LV}$  μπορεί να υπολογιστεί η διατομή του τυλίγματος Χ.Τ.  $area_{LV}$ .

$$area_{LV} = TurnWidth_{LV} \cdot t_{LV} \quad (4.3.66)$$

Έχοντας υπολογίσει τις παραπάνω παραμέτρους μπορεί να υπολογιστεί η συνολική ωμική αντίσταση του τυλίγματος Χ.Τ.  $R_{LV}$ .

$$R_{LV} = \frac{\rho_{LV} \cdot \frac{CL_{LV}}{3}}{area_{LV}} \quad (4.3.67)$$

Ως αποτέλεσμα είναι δυνατός πλέον ο υπολογισμός των απωλειών λειτουργίας υπό φορτίο στο τύλιγμα Χ.Τ.  $LL_{LV}$  με βάση την παρακάτω σχέση:

$$LL_{LV} = 3 \cdot R_{LV} \cdot (I_{LV}^p)^2 \cdot 1,04 \quad (4.3.68)$$

Όπου 1,04 συντελεστής διόρθωσης προσαύξησης απωλειών λόγω της χαλαρότητας του τυλίγματος Χ.Τ. Με αντίστοιχο τρόπο υπολογίζονται και οι παράμετροι για το τύλιγμα Υ.Τ. Πιο συγκεκριμένα για το μέσο μήκος στροφής  $MT_{HV}$  του τυλίγματος Υ.Τ., με βάση το σχήμα 4.7, θα ισχύει:

$$MT_{HV} = \left( \frac{D9 + D13}{2} \right) \cdot \pi \quad (4.3.69)$$

Το συνολικό μήκος  $CL_{HV}$  του τυλίγματος Υ.Τ. θα είναι ίσο με:

$$CL_{HV} = MT_{HV} \cdot TurnsMain_{HV} \cdot 3 \quad (4.3.70)$$

Και η διατομή του κυκλικού αγωγού του τυλίγματος Υ.Τ. θα υπολογίζεται ως εξής:

$$area_{HV} = \frac{\pi \cdot d_{HV}^2}{4} \quad (4.3.71)$$

Έπειτα υπολογίζεται η συνολική ωμική αντίσταση του τυλίγματος Υ.Τ.  $R_{HV}$ .

$$R_{HV} = \frac{\rho_{HV} \cdot \frac{CL_{HV}}{3}}{area_{HV}} \quad (4.3.72)$$

Στη συνέχεια οι απώλειες λειτουργίας υπό φορτίο για το τύλιγμα Υ.Τ.  $LL_{HV}$ .

$$LL_{HV} = 3 \cdot R_{HV} \cdot (I_{HV}^p)^2 \cdot 1,06 \quad (4.3.73)$$



Όπου 1,06 συντελεστής διόρθωσης προσαύξησης απωλειών λόγω της χαλαρότητας του τυλίγματος Υ.Τ. Έτσι μπορούν να οριστούν οι συνολικές απώλειες λειτουργίας υπό φορτίο του μετασχηματιστή  $LL_1$  για τη δεδομένη τάση του τυλίγματος Υ.Τ.

$$LL_1 = LL_{LV} + LL_{HV} + EdL_{LV} + EdL_{HV} \quad (4.3.74)$$

Όπου  $EdL_{LV}$  και  $EdL_{HV}$  οι απώλειες δινορρευσμάτων των τυλιγμάτων Χ.Τ. και Υ.Τ. αντίστοιχα. Οι παραπάνω απώλειες της σχέσης (4.3.74) αποτελούν τις μέγιστες απώλειες λειτουργίας κατά την ονομαστική φόρτιση. Επειδή είναι πολύ σύνηθες να υπάρχουν ενδιάμεσες λήψεις στο τύλιγμα Υ.Τ., θα πρέπει να υπολογιστούν και οι ελάχιστες απώλειες λειτουργίας υπό φορτίου, όπου αυτές θα υπολογίζονται με βάση τη μικρότερη τιμή τάσης που μπορεί να λειτουργήσει ο μετασχηματιστής με βάση τις ενδιάμεσες λήψεις.

Στην περίπτωση όπου το τύλιγμα Υ.Τ. έχει και δεύτερο επίπεδο τάσης λειτουργίας  $V_{HV,2}$ , μικρότερο από το πρώτο, ο υπολογισμός των ελάχιστων απωλειών λειτουργίας υπό φορτίο θα πρέπει να γίνει με βάση το αντίστοιχο μήκος του τυλίγματος που είναι ενεργό κατά τη διάρκεια αυτή. Συνήθως το δεύτερο επίπεδο τάσης λειτουργίας επιλέγεται είτε στα 1/2 ή στα 1/3 της τιμής του βασικού επιπέδου λειτουργίας, ώστε τα επιμέρους τμήματα, 2 και 3 στις προκειμένες περιπτώσεις, του τυλίγματος να συνδεθούν παράλληλα, ώστε να υπάρχει μεγάλη ένταση ρεύματος. Η ελάχιστη τάση λειτουργίας στο δεύτερο επίπεδο τάσης  $V_{2,min}^p$  μπορεί να υπολογιστεί με βάση την παρακάτω σχέση:

$$V_{HV,2 min}^p = V_{HV,2}^p \cdot (1 - Taps_{HV,min}) \quad (4.3.75)$$

Όπου  $V_{HV,2}^p$  το δεύτερο επίπεδο φασικής τάσης λειτουργίας και  $Taps_{HV,min}$  το ποσοστό της μείωσης της τάσης στη μικρότερη επιλογή ενδιάμεσης λήψης.

Οι αντίστοιχες στροφές που θα είναι ενεργές κατά τη λειτουργία της ελάχιστης τάσης  $Turns_{HV,2 min}$  του δεύτερου επιπέδου θα υπολογίζονται με βάση τη σχέση που ακολουθεί:

$$Turns_{HV,2 min} = Turns_{Main_{HV}} \cdot \frac{V_{HV,2 min}^p}{V_{HV}^p} \quad (4.3.76)$$

Όπου  $Turns_{Main_{HV}}$  οι συνολικές στροφές του τυλίγματος Υ.Τ. και  $V_{HV}^p$  η τιμή της τάσης του βασικού επιπέδου του τυλίγματος Υ.Τ.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το συνολικό μήκος του τυλίγματος που χρησιμοποιείται σε αυτή τη περίπτωση.

$$CL_{HV,2 min} = MT_{HV} \cdot Turns_{HV,2 min} \cdot 3 \quad (4.3.77)$$

Έπειτα υπολογίζεται η συνολική αντίσταση για το δεδομένο μήκος του τυλίγματος που χρησιμοποιείται.

$$R_{HV,2 min} = \frac{\rho_{HV} \cdot \frac{CL_{HV,2}}{3}}{area_{HV}} \quad (4.3.78)$$

Και έτσι υπολογίζονται οι απώλειες λειτουργίας υπό φορτίο για το δεδομένο μήκος του τυλίγματος.

$$LL_{HV,2 min} = X \cdot 3 \cdot R_{HV,2 min} \cdot (I_{HV,2 min}^p)^2 \cdot 1,06 \quad (4.3.79)$$

Όπου  $I_{HV,2 min}^p$  η ένταση ρεύματος που διαρρέει το τύλιγμα για τη δεδομένη τάση – μήκος τυλίγματος και 1,06 συντελεστής διόρθωσης. Η σταθερά  $X$  θα παίρνει την τιμή των τμημάτων που έχει

διαχωριστεί το τύλιγμα. Π.χ. στην περίπτωση όπου η τάση του δεύτερου επιπέδου είναι ίση με το 1/3 της τάσης του βασικού επιπέδου, τότε το τύλιγμα Υ.Τ. έχει χωρισθεί σε 3 τμήματα τα οποία έχουν συνδεθεί παράλληλα, έτσι ως αποτέλεσμα η σταθερά  $X$  θα έχει τιμή 3 στη προκείμενη περίπτωση.

Ως αποτέλεσμα μπορεί να υπολογισθούν οι συνολικές ελάχιστες απώλειες λειτουργίας υπό φορτίο για το τύλιγμα Υ.Τ.  $LL_2$  με βάση την παρακάτω σχέση:

$$LL_2 = LL_{LV} + LL_{HV,2\ min} + EdL_{LV} + EdL_{HV} \quad (4.3.80)$$

Επιπροσθέτως υπολογίζεται η μάζα  $w_1$  του τυλίγματος Χ.Τ. και η μάζα  $w_2$  του τυλίγματος Υ.Τ. με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$w_1 = CL_{LV} * area_{LV} * g_{LV} * 1.05 \quad (4.3.81)$$

$$w_2 = CL_{HV} * (1 + Taps_{HV,max}) * area_{HV} * g_{HV} * 1.08 \quad (4.3.82)$$

Όπου  $Taps_{HV,max}$  το επιτρεπόμενο ποσοστό αύξησης της πρωτεύουσας τάσης.

#### 4.3.9 Υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσης

Το ωμικό μέρος της τάσης βραχυκύκλωσης  $IR$  ορίζεται με βάση των παρακάτω τύπο:

$$IR = LL_1/S_n \quad (4.3.83)$$

Όπου  $LL_1$  οι απώλειες λειτουργίας υπό φορτίο στο τύλιγμα Υ.Τ. για δεδομένη τάση γραμμής ίση με  $V_{HV,1}^l$ . Με γνωστό το ωμικό και το επαγωγικό μέρος της, η τάση βραχυκύκλωσης  $U_k$  υπολογίζεται με τον παρακάτω τρόπο:

$$U_k = \sqrt{IR^2 + IX^2} \quad (4.3.84)$$

#### 4.3.10 Υπολογισμός του μήκους τυλιγμάτων

Το συνολικό πάχος των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγού λαδιού  $TCD$  ορίζεται ως:

$$TCD = 2 \cdot Ducts_{LV} \cdot d_{ducts_{LV}} + 2 \cdot Ducts_{HV} \cdot d_{ducts_{HV}} \quad (4.3.85)$$

Όπου  $Ducts_{LV}$  και  $Ducts_{HV}$  το πλήθος των διαμορφωμένων ελασμάτων για το τύλιγμα Χ.Τ. και Υ.Τ. αντίστοιχα, ενώ  $d_{ducts_{LV}}$  και  $d_{ducts_{HV}}$  τα πλάτη τους αντίστοιχα.

Η επικάλυψη  $OLI_{LV}$  του μονωτικού χαρτιού  $I_{LV-C}$  μαζί με τη μόνωση της στρώσης του τυλίγματος Χ.Τ. θα είναι ίση με:

$$OLI_{LV} = I_{LV-C} + I_{LVL} \quad (4.3.86)$$

Για τη μόνωση του τυλίγματος Υ.Τ. θα ισχύει:

$$OLI_{HV} = Layers_{HV} \cdot I_{HVL} \quad (4.3.87)$$

Και ως αποτέλεσμα το συνολικό μήκος  $TLC$  του πηνίου θα είναι ίσο με:

$$TLC = ML + 2 \cdot F1 + TCD + TLT_{LV} + TLT_{HV} + OLI_{LV} + OLI_{HV} + TE \quad (4.3.88)$$

Όπου  $ML$  το πλάτος του κενού που βρίσκεται εσωτερικά του τυλίγματος, με βάση το σχήμα 4.7,  $TLT_{LV}$  και  $TLT_{HV}$  το συνολικό πάχος των ακροδεκτών των τυλιγμάτων Χ.Τ. και Υ.Τ. τάσης αντίστοιχα και  $TE$  ανοχές και τυχόν επιμηκύνσεις του πηνίου με βάση τον πίνακα 4.7.

#### 4.3.11 Υπολογισμός διαστάσεων δεξαμενής

Με βάση το σχήμα 4.5 μπορούν να υπολογιστούν οι διαστάσεις της δεξαμενής. Πιο συγκεκριμένα το μήκος  $TL$  της δεξαμενής θα είναι ίσο με:

$$TL = 2 \cdot (4 \cdot E_u + 3 \cdot F1 + K) + K + 108 \text{ mm} \quad (4.3.89)$$

Το πλάτος  $TW$  της δεξαμενής θα είναι ίσο με:

$$TW = TLC + 38 \text{ mm} \quad (4.3.90)$$

Και το ελάχιστο ύψος  $TH_{min}$  της δεξαμενής θα είναι ίσο με:

$$TH_{min} = G + 2 \cdot E_u + 235 \text{ mm} \quad (4.3.91)$$

Το τελικό ύψος της δεξαμενής επιλέγεται με βάση τις υπόλοιπες κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες που φέρει ο μετασχηματιστής που μπορεί να απαιτούν επιπλέον χώρο άρα και αύξηση του ύψους της δεξαμενής από αυτό που υπολογίσθηκε στην παραπάνω σχέση.

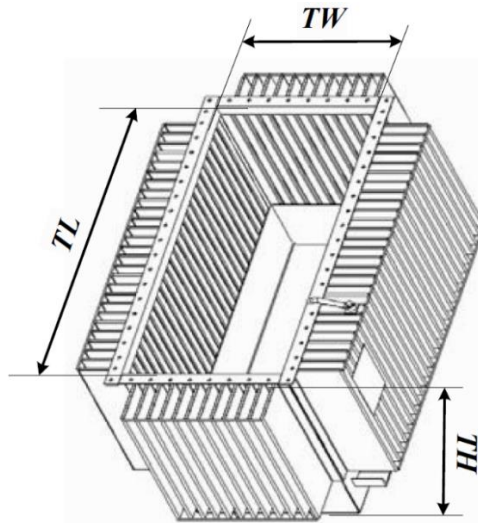
#### 4.3.12 Υπολογισμός ανύψωσης θερμοκρασίας των τυλιγμάτων και του λαδιού

Αρχικά υπολογίζεται η επιφάνεια των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού για το τύλιγμα Χ.Τ.

$$DuctArea_{LV} = Ducts_{LV} \cdot 2 \cdot 2 \cdot MW \cdot TD_{LV} \quad (4.3.92)$$

Έπειτα υπολογίζεται η επιφάνεια των διαμορφωμένων ελασμάτων στο κενό του τυλιγματος Χ.Τ.

$$GapDuctArea_{LV} = D7 \cdot \pi \cdot TD_{LV} \quad (4.3.93)$$



Σχήμα 4.9: Διαστάσεις δεξαμενής μετασχηματιστή [17, σελ. 101, Figure 2.11].

Η συνολική επιφάνεια των διαμορφωμένων αποτελείται από το άθροισμα των δύο παραπάνω επιφανειών.

$$TotalDuctArea_{LV} = DuctArea_{LV} + GapDuctArea_{LV} \quad (4.3.94)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι απώλειες  $CoilLoss_{LV}$  της κάθε φάσης για το τύλιγμα Χ.Τ.

$$CoilLoss_{LV} = \frac{LL_{LV} + EdL_{LV}}{3} \quad (4.3.95)$$

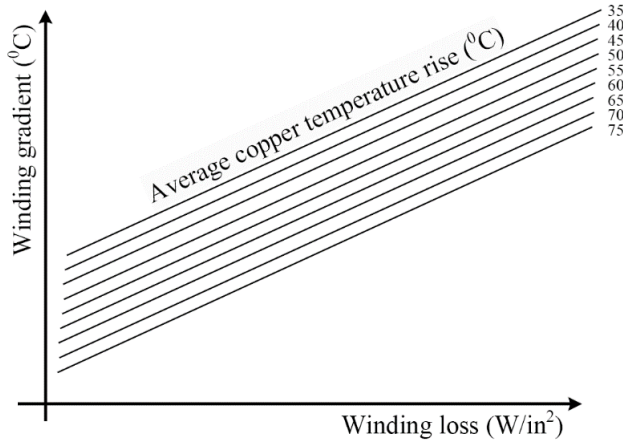
Ως αποτέλεσμα μπορεί να υπολογισθούν οι απώλειες  $LPS_{LV}$  ανά μονάδα επιφάνειας των διαμορφωμένων ελασμάτων για το τύλιγμα Χ.Τ:

$$LPS_{LV} = \frac{CoilLoss_{LV}}{TotalDuctArea_{LV}} \quad (4.3.96)$$

Η μέση αύξηση θερμοκρασίας του χαλκού  $ACR$  θα είναι ίση με:

$$ACR = t_{w,max} - t_{a,max} \quad (4.3.97)$$

Έπειτα μέσα από κατάλληλες καμπύλες με βάση τη μέση αύξηση θερμοκρασίας του χαλκού  $ACR$  και τις απώλειες ανά μονάδα επιφάνειας των διαμορφωμένων ελασμάτων του τυλίγματος Χ.Τ. μπορεί να ορισθεί η κλίση  $Gra_{LV}$  του τυλίγματος Χ.Τ. σε βαθμούς Κελσίου ( $^{\circ}C$ ).



Σχήμα 4.10:  
Διάγραμμα ορισμού  
καμπυλών *gradient*  
συναρτήσεως της μέσης  
ανύψωσης  
θερμοκρασίας του  
χαλκού [17, σελ. 103,  
Figure 2.12].

Η μέση κλίση  $AvGra_{LV}$  μεταξύ του λαδιού και του τυλίγματος Χ.Τ. θα είναι ίση με:

$$AvGra_{LV} = 2,09 \cdot Gra_{LV} \quad (4.3.98)$$

Με αντίστοιχη διαδικασία του τυλίγματος Χ.Τ. μπορεί να υπολογισθεί και η μέση κλίση του τυλίγματος Υ.Τ. Συνοπτικά οι αντίστοιχες σχέσεις ακολουθούν παρακάτω:

$$DuctArea_{HV} = Ducts_{HV} \cdot 2 \cdot 2 \cdot LG_{HV} \cdot TD_{HV} \quad (4.3.99)$$

$$GapDuctArea_{HV} = D7 \cdot \pi \cdot TD_{HV} \quad (4.3.100)$$

$$TotalDuctArea_{HV} = DuctArea_{HV} + GapDuctArea_{HV} \quad (4.3.101)$$

$$CoilLoss_{HV} = \frac{LL_{HV,2} + EdL_{HV}}{3} \quad (4.3.102)$$

$$LPS_{HV} = \frac{CoilLoss_{HV}}{TotalDuctArea_{HV}} \quad (4.3.103)$$

Μέσα από διαγράμματα καμπυλών όπως και στη περίπτωση του τυλίγματος Χ.Τ. έτσι και στο τυλίγμα Υ.Τ. ορίζεται η κλίση  $Gra_{HV}$  αυτού σε βαθμούς Κελσίου ( $^{\circ}C$ ).

$$AvGra_{HV} = 2,09 \cdot Gra_{HV} \quad (4.3.104)$$

Έτσι ως αποτέλεσμα η μέγιστη κλίση του μετασχηματιστή θα είναι ίση με όποια κλίση των δύο τυλιγμάτων είναι μεγαλύτερη:

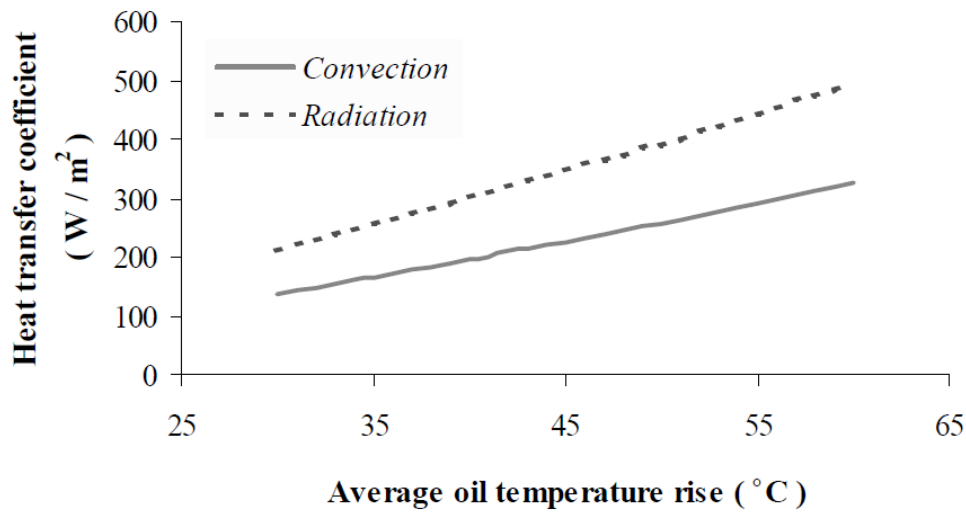
$$MaxGra = \max(AvGra_{LV}, AvGra_{HV}) \quad (4.3.105)$$

Και η μέση αύξηση θερμοκρασίας του λαδιού  $AOR$  θα υπολογίζεται με βάση τη παρακάτω σχέση:

$$AOR = ACR - MaxGra \quad (4.3.106)$$

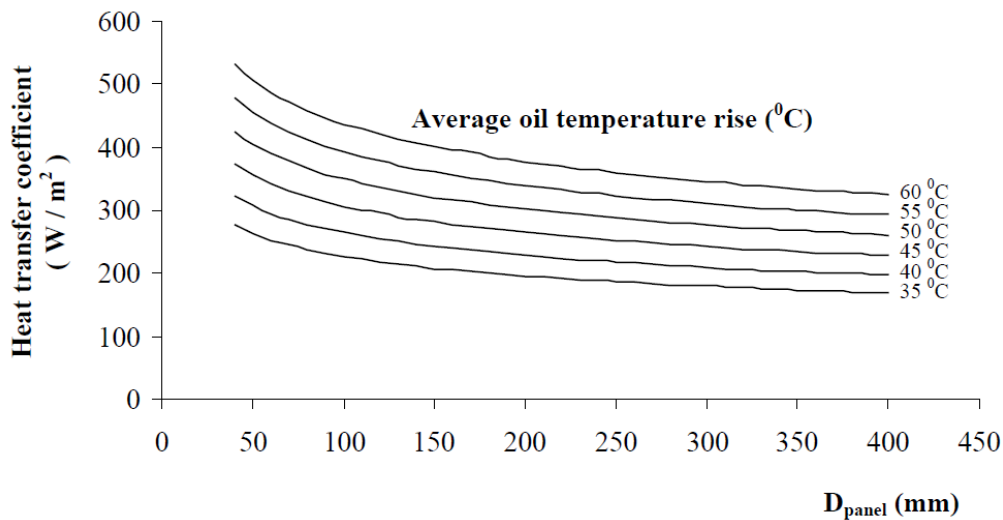
### 4.3.13 Υπολογισμός απαγωγής θερμότητας

Με βάση τη μέση αύξηση θερμοκρασίας του λαδιού *AOR* μέσω του σχήματος 4.11 μπορούν να υπολογισθούν οι συντελεστές *TCC* και *TRC* που είναι οι συντελεστές απαγωγής θερμότητας της δεξαμενής μέσω συναγωγής και μέσω ακτινοβολίας αντίστοιχα.



Σχήμα 4.11: Καμπύλη εύρεσης συντελεστή απαγωγής θερμότητας δεξαμενής μέσω συναγωγής *TCC* και ακτινοβολίας *TRC* συναρτήσει της μέσης αύξησης θερμοκρασίας του λαδιού. [17, σελ. 106, Figure 2.13].

Επιπροσθέτως με τη μέση αύξηση θερμοκρασίας του λαδιού *AOR* και την ορισμένη τιμή του πλάτους  $D_{panel}$  των αυλακωμένων πάνελ μέσω του σχήματος 4.12 υπολογίζεται ο συντελεστής απαγωγής θερμότητας δεξαμενής *CPC* μέσω των αυλακωμένων πάνελ.



Σχήμα 4.12: Καμπύλη εύρεσης συντελεστή απαγωγής θερμότητας δεξαμενής μέσω των αυλακωμένων πάνελ *CPC* συναρτήσει του πλάτους  $D_{panel}$  των αυλακωμένων πάνελ. [17, σελ. 107, Figure 2.14].

Η επιφάνεια συναγωγής της δεξαμενής *TCA* θα είναι ίση με:

$$TCA = 2 \cdot (TL + TW) \cdot TH + 2 \cdot TL \cdot TW \quad (4.3.107)$$

Το ποσό απαγωγής θερμότητας μέσω συναγωγής *TCL* από τη δεξαμενή θα είναι ίση με:

$$TCL = TCA \cdot TCC \quad (4.3.108)$$

Η επιφάνεια ακτινοβολίας της δεξαμενής *TRA* θα είναι ίση με:

$$TRA = [2 \cdot (TL + TW) + 4 \cdot D_{panel} \cdot \sqrt{2}] \cdot OH \quad (4.3.109)$$

Όπου  $OH$  το ύψος του λαδιού στη δεξαμενή όπου θα είναι ίσο με το ελάχιστο ύψος της δεξαμενής  $TH_{min}$  της σχέσης (4.3.91).

Το ποσό απαγωγής θερμότητας μέσω ακτινοβολίας  $TRL$  από τη δεξαμενή θα είναι ίση με:

$$TRL = TRA \cdot TRC \quad (4.3.110)$$

Η δεξαμενή του μετασχηματιστή περιέχει εξωτερικά αυλακωμένα πάνελ και στις 4 πλευρές για την καλύτερη ψύξη του. Το πλήθος των αυλακωμένων πάνελ στις πλευρές κατά μήκος της δεξαμενής υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση που δίνει ως αποτέλεσμα ακέραιο αριθμό:

$$NCPTL = \text{int} \left[ \frac{TL - 60 \text{ mm}}{\text{Pitch}} \right] + 1 \quad (4.3.111)$$

Ενώ για τις πλευρές κατά πλάτος της δεξαμενής ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$NCPTW = \text{int} \left[ \frac{TW - 60 \text{ mm}}{\text{Pitch}} \right] + 1 \quad (4.3.112)$$

Οι αριθμοί που υπολογίζονται μέσα στην αγκύλη στρογγυλοποιούνται στον πιο κάτω κοντινό ακέραιο.

Ως αποτέλεσμα το συνολικό πλήθος των αυλακωμένων πάνελ μπορεί να υπολογισθεί με την παρακάτω σχέση:

$$NCP = 2 \cdot (NCPTL + NCPTW) \quad (4.3.113)$$

Η αντίστοιχη συνολική επιφάνεια των αυλακωμένων πάνελ θα υπολογίζεται με βάση τη σχέση που ακολουθεί:

$$CPA = 2 \cdot D_{panel} \cdot HCP \cdot NCP \quad (4.3.114)$$

Τα ποσά θερμότητας  $CPL$  που απάγονται μέσω των αυλακωμένων πάνελ θα είναι ίσα με:

$$CPL = CPA \cdot CPC \quad (4.3.115)$$

Όπου  $CPC$  ο συντελεστής απαγωγής θερμότητας της δεξαμενής μέσω των αυλακωμένων πάνελ που προκύπτει από το σχήμα 4.12.

Τελικά, το συνολικό ποσό θερμότητας που μπορεί να απελευθερώσει ο μετασχηματιστής θα είναι ίσο με το άθροισμα των απαγόμενων ποσών που μπορεί να διοχετεύσει η δεξαμενή προς το περιβάλλον.

$$TLR_{TT} = TCL + TRL + CPL \quad (4.3.116)$$

Οι συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή  $TTL_2$  όταν αυτός λειτουργεί στο δεύτερο επίπεδο τάσης θα είναι ίσες με:

$$TTL_2 = NLL + LL_2 \quad (4.3.117)$$

Ο μετασχηματιστής θα μπορεί να λειτουργεί κανονικά στην περίπτωση που οι συνολικές απώλειες  $TTL_2$  είναι μικρότερες από το μέγιστο ποσό απαγωγής θερμότητας  $TLR_{TT}$  της δεξαμενής.

$$TLR_{TT} > \max(TTL_1, TTL_2) \quad (4.3.118)$$



#### 4.3.14 Υπολογισμός της μάζας των μονωτικών υλικών

Παρακάτω υπολογίζονται αρχικά οι επιφάνειες των αντίστοιχων μονωτικών υλικών που αφορούν το τύλιγμα Χ.Τ. Η επιφάνεια του μονωτικού χαρτιού  $S_{LV,TP}$  εσωτερικά του τυλίγματος Χ.Τ. θα είναι ίση με.

$$S_{LV,TP} = MW \cdot (G - 2 \cdot CCEE) + D3 \cdot \pi \cdot (G - 2 \cdot CCEE) \quad (4.3.119)$$

Η επιφάνεια της επιφανειακής μόνωσης του τυλίγματος Χ.Τ. υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$S_{LV,LI} = MT_{LV} \cdot (G - 2 \cdot CCEE) \cdot Layers_{LV} \quad (4.3.120)$$

Η επιφάνεια της μόνωσης των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού για το τύλιγμα Χ.Τ. θα υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$S_{LV,EDI} = MW \cdot (G - 2 \cdot CCEE) \cdot Ducts_{LV} \cdot 2 \quad (4.3.121)$$

Η μονωτική επιφάνεια των περιμετρικών διαμορφωμένων ελασμάτων για το τύλιγμα Χ.Τ. θα ορίζεται όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

$$S_{LV,PDI} = D7 \cdot \pi \cdot (G - 2 \cdot CCEE) \quad (4.3.122)$$

Στην προκειμένη περίπτωση τοποθετούνται και δύο επιπλέον μονωτικά χαρτιά. Η αντίστοιχη επιφάνεια των δύο χαρτιών αυτών θα είναι ίση με:

$$S_{LV,EPI} = 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot D13 \cdot [(G - 2 \cdot CCEE) + 1,8 \cdot BLD_{HV}] \quad (4.3.123)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το πλήθος των μονωτικών χαρτιών που χρησιμοποιούνται για τη μόνωση διάκενου μεταξύ των δύο τυλιγμάτων:

$$NPGI = \frac{I_{HV-LV} - d_{ducts_{LV}} - X'_{PLV} \cdot X_{LV}}{I_{HVL}} \quad (4.3.124)$$

Όπου  $X_{LV}$  το πάχος των πρόσθετων  $X'_{PLV}$  μονωτικών χαρτιών των οποίων η επιφάνεια υπολογίζεται στη σχέση (4.3.123) και  $d_{ducts_{LV}}$  είναι το πάχος συμπεριλαμβανομένης της μόνωσης των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο τύλιγμα Χ.Τ.

Η επιφάνεια της μόνωσης κενού  $S_{LV,GI}$  θα είναι ίση με:

$$S_{LV,GI} = D7 \cdot \pi \cdot (G - 2 \cdot CCEE) \cdot NPGI \quad (4.3.125)$$

Αντίστοιχα για το τύλιγμα Υ.Τ. ακολουθούν παρακάτω οι σχέσεις που υπολογίζουν τις επιφάνειες των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτό. Αρχικά υπολογίζεται η επιφάνεια  $S_{HV,LI}$  της μόνωσης που τοποθετείται πάνω στους αγωγούς του τυλίγματος Υ.Τ. όπως και στην περίπτωση του τυλίγματος Χ.Τ.

$$S_{HV,LI} = MT_{HV} \cdot [(G - 2 \cdot CCEE) + 4 \cdot 19] \cdot Layers_{HV} \cdot 1,25 \quad (4.3.126)$$

Στη συνέχεια η μονωτική επιφάνεια των διαμορφωμένων ελασμάτων στο τύλιγμα Υ.Τ. υπολογίζονται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$S_{HV,EDI} = LG_{HV} \cdot (G - 2 \cdot CCEE) \cdot Ducts_{HV} \cdot 2 \quad (4.3.127)$$

Αντίστοιχα υπολογίζεται και η μονωτική επιφάνεια των περιμετρικών διαμορφωμένων ελασμάτων του τυλίγματος Υ.Τ. με βάση την παρακάτω σχέση:

$$S_{HV,PDI} = D13 \cdot \pi \cdot (G - 2 \cdot CCEE) \cdot Ducts_{HV} \cdot 2 \quad (4.3.128)$$

Επιπλέον μονωτικά χαρτιά τοποθετούνται μεταξύ των πηνίων του τυλίγματος Υ.Τ. Η αντίστοιχη μονωτική επιφάνεια αυτών υπολογίζεται παρακάτω:

$$S_{HV,sub} = MT_{HV} \cdot (G - 2 \cdot CCEE) \cdot X_{PHV} \quad (4.3.129)$$

Όπου  $X_{PHV}$  το πλήθος των μονωτικών χαρτιών.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το πλήθος των μονωτικών χαρτιών που χρησιμοποιούνται για τη μόνωση διακένου του τυλίγματος Υ.Τ. ως προς τον πυρήνα:

$$NPEGI = \frac{I_{HV-HV} - d_{ducts_{HV}} - X'_{PHV} \cdot X_{HV}}{I_{HVL}} \quad (4.3.130)$$

Όπου  $X_{HV}$  το πάχος των πρόσθετων  $X'_{PHV}$  μονωτικών χαρτιών της σχέσης (4.3.125) και  $d_{ducts_{HV}}$  είναι το πάχος συμπεριλαμβανομένης της μόνωσης των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού του τυλίγματος Υ.Τ.

Η επιφάνεια των μονωτικών χαρτιών για τη μόνωση του διακένου του Υ.Τ. θα υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$S_{HV,GI} = D13 \cdot \pi \cdot (G - 2 \cdot CCEE) \cdot NPEGI \quad (4.3.131)$$

Η επιφάνεια των μονωτικών χαρτιών  $I_{HV,IBP}$  θα υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$S_{HV,IBP} = MT_{HV} \cdot X'' \cdot Layers_{HV} \quad (4.3.132)$$

Όπου  $X''$  το πλάτος της επιφάνειας που καλύπτουν τα μονωτικά χαρτιά  $I_{HV,IBP}$ .

Γνωρίζοντας τις επιφάνειες όλων των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται στα τυλίγματα του πυρήνα, μπορεί να υπολογιστεί η μάζα των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιείται σε κάθε σημείο με βάση την παρακάτω σχέση.

$$WIM = 3 \cdot 1,1 \cdot g_{IN} \cdot A_Y \quad (4.3.133)$$

Όπου το 3 τοποθετείται λόγω του ότι ο μετασχηματιστής είναι τριφασικός άρα υπολογίζεται η μάζα και για τις τρεις φάσεις, το 1,1 αποτελεί συντελεστή διόρθωσης, το  $g_{IN}$  είναι ο συντελεστής μάζας ανά μονάδα επιφάνειας [ $kg/m^2$ ] του υλικού, ο οποίος εξαρτάται από το πάχος του μονωτικού υλικού και δίνεται σε πίνακες ή από τον ίδιο τον κατασκευαστή του μονωτικού υλικού και  $A_Y$  η συνολική επιφάνεια του συγκεκριμένου μονωτικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε. Ως αποτέλεσμα η συνολική μάζα  $w_4$  των μονωτικών υλικών θα προκύπτει με βάση το πλήθος και την επιφάνεια των επιμέρους διαφορετικών μονωτικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

$$w_4 = WIM_1 + WIM_2 + WIM_3 + WIM_4 + \dots \quad (4.3.134)$$

#### 4.3.15 Υπολογισμός της μάζας των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού

Για τον υπολογισμό της μάζας προηγείται ο υπολογισμός του πλήθους των διαμορφωμένων ελασμάτων που έχουν τοποθετηθεί στο μετασχηματιστή. Αρχικά υπολογίζεται το πλήθος  $N_1$  των διαμορφωμένων ελασμάτων για το τύλιγμα Χ.Τ.

$$N_1 = \frac{MW}{DWPG_{LV}} \cdot Ducts_{LV} \cdot 2 \quad (4.3.135)$$

Στη συνέχεια το πλήθος  $N_2$  των περιμετρικών διαμορφωμένων ελασμάτων για το τύλιγμα Χ.Τ. είναι ίσο με:

$$N_2 = \frac{\pi \cdot D7}{DWPG_{LV}} \quad (4.3.136)$$

Έπειτα το πλήθος  $N_3$  των διαμορφωμένων ελασμάτων στο τύλιγμα Υ.Τ. είναι ίσο με:

$$N_3 = \frac{(MW + 2 \cdot BLD_{LV})}{DWP G_{HV}} \cdot Ducts_{HV} \cdot 2 \quad (4.3.137)$$

Όπως και το πλήθος  $N_4$  των περιμετρικών διαμορφωμένων ελασμάτων στο τύλιγμα Υ.Τ. είναι ίσο με:

$$N_4 = \frac{\pi \cdot D13}{DWP G_{HV}} \quad (4.3.138)$$

Ως αποτέλεσμα μπορεί να υπολογισθεί η συνολική μάζα  $w_5$  των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού του μετασχηματιστή:

$$w_5 = 3 \cdot 1,1 \cdot g_{DS} \cdot [(N_1 + N_2 + N_3 + N_4) \cdot (G - 2 \cdot CCEE) \cdot D_w \cdot T_{DS}] \quad (4.3.139)$$

#### 4.3.16 Υπολογισμός της μάζας του λαδιού

Για τον καθορισμό της μάζας του λαδιού πρέπει πρώτα να ορισθούν οι όγκοι των παραμέτρων οι οποίοι επηρεάζουν την τελική τιμή αυτού. Αρχικά υπολογίζεται ο όγκος  $V_{CP}$  των αυλακωμένων πάνελ:

$$V_{CP} = 8 \cdot HCP \cdot D_{panel} \cdot NCP \quad (4.3.140)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο όγκος των τυλιγμάτων Υ.Τ και Χ.Τ. με βάση τη σχέση που ακολουθεί:

$$V_{Wd} = \frac{w_1 + w_2}{g_{LV}} \quad (4.3.141)$$

Επίσης απαιτείται ο υπολογισμός του όγκου  $V_{MM}$  που καταλαμβάνει ο πυρήνας – το σιδηρομαγνητικό υλικό εντός της δεξαμενής. Για τον υπολογισμό αυτόν θα ισχύει:

$$V_{MM} = \frac{w_3}{g_{MM}} \quad (4.3.142)$$

Ο συνολικός όγκος  $V_T$  της δεξαμενής θα είναι ίσος με:

$$V_T = TL \cdot TW \cdot OH \quad (4.3.143)$$

Ως αποτέλεσμα αφαιρώντας από το συνολικό όγκο της δεξαμενής τα στοιχεία τα οποία καταλαμβάνουν όγκο, όπως τα τυλίγματα και ο πυρήνας, και προσθέτοντας αυτά που προσθέτουν επιπλέον όγκο, όπως τα αυλακωμένα πάνελ, μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος  $V_O$  που μπορεί να αξιοποιηθεί για την πλήρωση της δεξαμενής με λάδι.

$$V_O = V_T + V_{CT} + V_{CP} - V_{Wd} - V_{MM} \quad (4.3.144)$$

Όπου  $V_{CT}$  ο όγκος του δοχείου διαστολής.

Γνωρίζοντας τον όγκο του λαδιού μπορεί να υπολογισθεί με την παρακάτω σχέση η τελική μάζα του λαδιού που θα γεμίσει τη δεξαμενή του μετασχηματιστή:

$$w_6 = 0,95 \cdot g_O \cdot V_O \quad (4.3.145)$$

#### 4.3.17 Υπολογισμός της μάζας των μεταλλικών φύλλων

Τα μεταλλικά φύλλα αξιοποιούνται για την κατασκευή της δεξαμενής, του δοχείου λαδιού όπως και του πλαισίου στήριξης των ενεργών τμημάτων του μετασχηματιστή. Για τον ακριβή υπολογισμό

της μάζας  $w_7$  απαιτείται η ολοκλήρωση του σχεδίου του μετασχηματιστή. Στην περίπτωση που υπάρχει η ανάγκη του καθορισμού αυτού του μεγέθους τότε χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις οι οποίες προσεγγίζουν σε έναν ικανοποιητικό βαθμό το τελικό αποτέλεσμα και έτσι η συνολική μάζα των μεταλλικών φύλλων  $w_7$  ορίζεται αρχικά με βάση αυτές τις σχέσεις.

#### 4.3.18 Υπολογισμός της μάζας των αυλακωμένων πάνελ δεξαμενής

Η συνολική μάζα των αυλακωμένων πάνελ της δεξαμενής υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$w_8 = g_{CP} \cdot CPA \quad (4.3.146)$$

#### 4.3.19 Υπολογισμός του κόστους των κύριων υλικών

Για τον υπολογισμό του κόστους των κύριων υλικών υπολογίζεται ξεχωριστά το κάθε υλικό και προσθέτοντας αυτά μεταξύ τους προκύπτει το αντίστοιχο κόστος.

Αρχικά υπολογίζεται το κόστος  $C_1$  του τυλίγματος Χ.Τ.:

$$C_1 = uc_1 \cdot w_1 \quad (4.3.147)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το κόστος  $C_2$  του τυλίγματος Υ.Τ.:

$$C_2 = uc_2 \cdot w_2 \quad (4.3.148)$$

Έπειτα υπολογίζεται το κόστος  $C_3$  του σιδηρομαγνητικού υλικού:

$$C_3 = uc_3 \cdot w_3 \quad (4.3.149)$$

Ακολουθεί ο υπολογισμός του κόστους  $C_4$  των μονωτικών υλικών:

$$C_4 = uc_4 \cdot w_4 \quad (4.3.150)$$

Επιπροσθέτως το κόστος  $C_5$  των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού:

$$C_5 = uc_5 \cdot w_5 \quad (4.3.151)$$

Το κόστος  $C_6$  του λαδιού της δεξαμενής:

$$C_6 = uc_6 \cdot w_6 \quad (4.3.152)$$

Το κόστος  $C_7$  των μεταλλικών φύλλων:

$$C_7 = uc_7 \cdot w_7 \quad (4.3.153)$$

Και τελικά το κόστος  $C_8$  των αυλακωμένων πάνελ της δεξαμενής:

$$C_8 = uc_8 \cdot w_8 \quad (4.3.154)$$

Ως αποτέλεσμα το άθροισμα όλων των παραπάνω δίνει το κόστος των κύριων υλικών  $CMM$  του μετασχηματιστή.

$$CMM = \sum_{i=1}^8 C_i \Rightarrow CMM = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8 \quad (4.3.155)$$

#### 4.3.20 Υπολογισμός του κόστους κατοχής

Αρχικά υπολογίζεται το κόστος των υλικών  $CM$  του μετασχηματιστή με βάση την παρακάτω σχέση:

$$CM = CMM + CRM \quad (4.3.156)$$

Όπου  $CRM$  το κόστος των υπόλοιπων υλικών.

Έπειτα μπορεί να υπολογιστεί το κόστος κατασκευής  $CTM$  του με βάση την παρακάτω σχέση:

$$CTM = CM + C_{Lab} \quad (4.3.157)$$

Η τιμή προσφοράς  $BP$  υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$BP = \frac{CTM}{1 - SM} \quad (4.3.158)$$

Όπου το περιθώριο κέρδους πωλήσεων υπολογίζεται με τη σχέση που ακολουθεί:

$$SM = BP - CTM \quad (4.3.159)$$

Τελικά το συνολικό κόστος κατοχής του μετασηματιστή μαζί με το κόστος απομάκρυνσης θα είναι ίσο με:

$$TOC = BP + A \cdot NLL + B \cdot LL + C_{KA} \quad (4.3.160)$$

#### 4.4 Συμπεράσματα

Με βάση τις αντικειμενικές συναρτήσεις που αναλύθηκαν παραπάνω μπορεί κανείς να επιλέξει την κατάλληλη που θα οδηγήσει στην εστίαση της προσοχής της μελέτης σε συγκεκριμένους στόχους. Οι περιορισμοί επίσης έχουν μεγάλη βαρύτητα στην ολοκλήρωση του τελικού προϊόντος. Διότι μέσω αυτών μπορεί κανείς να οδηγήσει τη μελέτη σε συγκεκριμένη κατεύθυνση και να έχει ως αποτέλεσμα συγκεκριμένες επιθυμητές ιδιότητες ή την αποφυγή τυχόντων ανεπιθύμητων ιδιοτήτων στο προϊόν.

Όσες περισσότερες επαναλήψεις μπορούν να πραγματοποιηθούν και όσο αυξάνονται οι παράμετροι στις οποίες οι τιμές τους μεταβάλλονται, τόσο το μεγαλύτερο το πλήθος των εφικτών λύσεων και αντίστοιχα τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα εύρεσης εφικτής λύσης με μεγαλύτερη ή μικρότερη τιμή, αναλόγως τι σκοπεύει κανείς με τη μελέτη, στην αντικειμενική συνάρτηση.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

### 5.1 Εισαγωγή – εφαρμογή για μετασχηματιστή λαδιού για λιμενική εγκατάσταση

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσεται πρόγραμμα, το οποίο ακολουθεί τα βήματα και τη λογική της κλασικής σχεδίασης μετασχηματιστή που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4. Πιο συγκεκριμένα το συγκεκριμένο πρόγραμμα λειτουργεί για τον υπολογισμό των βασικών μεγεθών ενός τριφασικού μετασχηματιστή λαδιού, την κοστολόγηση του, τον έλεγχο των περιορισμών που έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 4 όπως και επίσης την ταξινόμηση των εφικτών λύσεων σε πίνακα με αύξουσα σειρά στην τιμή κατοχής του μετασχηματιστή.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα εύρος τιμών στην ονομαστική ισχύ που ξεκινά από τα 25 kVA και φτάνει έως και τα 1600 kVA. Εκτός από την επιλογή της ονομαστικής τιμής, τροποποιώντας συγκεκριμένες παραμέτρους εντός του κώδικα μπορεί κανείς να επιλέξει:

- το επίπεδο τάσης του τυλίγματος Χ.Τ.,
- το πρωτεύον και δευτερεύον επίπεδο τάσης του τυλίγματος Υ.Τ.,
- το υλικό του αγωγού του τυλίγματος Χ.Τ. και Υ.Τ., το οποίο μπορεί να είναι είτε χαλκός, είτε αλουμίνιο,
- τη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων Χ.Τ. και Υ.Τ. σε συνδεσμολογία αστέρα, τρίγωνου ή ζιγκ – ζαγκ,
- τον τύπο των αγωγών για τα τυλίγματα Χ.Τ. και Υ.Τ. μεταξύ των στρογγυλών αγωγών, ορθογώνιων αγωγών και φύλλων,
- τη συχνότητα λειτουργίας του μετασχηματιστή,
- την ύπαρξη ή μη ύπαρξη δοχείου διαστολής,
- τις μέγιστες επιτρεπόμενες διαστάσεις τις δεξαμενής του μετασχηματιστή,
- τα χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή,
- το επιτόκιο και
- το μέγιστο διαφορικό θερμοκρασίας των τυλιγμάτων Χ.Τ. και Υ.Τ.
- τις μέγιστες επιτρεπόμενες απώλειες λειτουργίας εν κενώ
- τις μέγιστες επιτρεπόμενες απώλειες χαλκού

Σημαντικό στοιχείο στην ανάπτυξη του κώδικα αποτελεί η παροχή πολλαπλών σχολιασμών σε πολλά σημεία του κώδικα για την επεξήγηση της λειτουργίας του κάθε βήματος για τη διευκόλυνση στην κατανόηση του ακόμα και από χρήστες – προγραμματιστές χωρίς τις γνώσεις ηλεκτρολογίας - μετασχηματιστών.

### 5.2 Χαρακτηριστικά και ανάπτυξη κώδικα MATLAB

Εντός του προγράμματος αρχικά ορίζονται όλες οι απαραίτητες παράμετροι, είτε αυτές είναι προκαθορισμένες, σταθερές, εξαρτημένες από άλλες παραμέτρους είτε πρόκειται για τις παραμέτρους βελτιστοποίησης του μετασχηματιστή.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο §5.1 στις πρώτες γραμμές του κώδικα παρουσιάζονται οι **προκαθορισμένες παράμετροι** του μετασχηματιστή, οι οποίες μπορούν να τροποποιηθούν από το



χρήστη εντός επιτρεπτών ορίων, να επιλεχθούν από ένα εύρος τιμών ή να είναι ελεύθερες στην επιλογή τους.

Στη συνέχεια ορίζονται οι **σταθερές παράμετροι**, οι οποίες παραμένουν ίδιες καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του προγράμματος – κώδικα. Πιο αναλυτικά στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι οικονομικές σταθερές, συντελεστές υλικών, συντελεστές πυκνότητας μάζας, βάρους ανά μονάδα επιφάνειας, πίνακες με τιμές για διάφορους συντελεστές που διαφοροποιούνται αναλόγως τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή κλπ.

Έπειτα ορίζονται οι **παράμετροι βελτιστοποίησης** του μετασχηματιστή, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ συγκεκριμένων τιμών και προσδιορίζονται με βάση τη βελτιστοποίηση της συνάρτησης κόστους μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιείται από ένα μεγάλο πλήθος επαναλήψεων, έχουν το ρόλο οριοθέτησης στις τιμές που μπορούν να λάβουν συγκεκριμένες μεταβλητές του μετασχηματιστή, όπως επίσης και το πλήθος των επαναλήψεων που πραγματοποιούνται για την εύρεση εφικτών λύσεων.

Στο τελευταίο σκέλος πριν την έναρξη των υπολογισμών ορίζονται οι **εξαρτημένες μεταβλητές**, οι οποίες ορίζονται με βάση συγκεκριμένες σχέσεις που συνδέονται με όλες τις προηγούμενες παραμέτρους που έχουν ήδη ορισθεί.

Στη συνέχεια το πρόγραμμα ακολουθεί τη δομή της αντίστοιχης κλασικής μεθόδου σχεδιασμού μετασχηματιστή που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται όλοι υπολογισμοί εντός των επαναλήψεων FOR ανάλογα με το πλήθος των παραμέτρων βελτιστοποίησης. Για κάθε επανάληψη που ικανοποιεί όλους του περιορισμούς αποθηκεύονται η κάθε μεταβλητή ενδιαφέροντος στον αντίστοιχο πίνακα αποτελεσμάτων, διαστάσεων  $1 \times n$ , όπου  $n$  οι συνολικές επαναλήψεις του προγράμματος. Όλοι οι πίνακες των αποτελεσμάτων των μεταβλητών ενδιαφέροντος τροποποιούνται σε ανεστραμμένους πίνακες διαστάσεων  $n \times 1$  ώστε να μπορούν να ενσωματωθούν όλοι μαζί σε έναν τελικό πίνακα (Table) που θα παρουσιάζει για κάθε εφικτή λύση τις αντίστοιχες μεταβλητές ενδιαφέροντος με τις αντίστοιχες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την επανάληψη. Ο πίνακας αυτός ταξινομείται έπειτα με βάση το ολικό κόστος κατοχής με αύξουσα σειρά ώστε να είναι εύκολη η απεικόνιση της φθηνότερης εφικτής λύσης, η οποία αποτελεί και τη βέλτιστη λύση για την περίπτωση των συγκεκριμένων δεδομένων.

Ο ανεπτυγμένος κώδικας εμπεριέχεται σε παράρτημα στο τέλος της διπλωματικής εργασίας.

### 5.3 Προσομοίωση ενδεικτικού μετασχηματιστή

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιούνται τρία διαφορετικά παραδείγματα για διαφορετικές προκαθορισμένες τιμές με επιτόκιο 3% και 25 χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή σε όλα τα παραδείγματα και εμφανίζονται τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του κώδικα.

1<sup>ο</sup> παράδειγμα – Μ/Σ ισχύος 1600 kVA, 20 kV/400 V, 50 Hz, τρίγωνο – αστέρα, με στρογγυλούς αγωγούς στο τύλιγμα Χ.Τ. και στρογγυλούς αγωγούς στο τύλιγμα Υ.Τ. για λιμάνι.

Στην περίπτωση αυτή οι υπόλοιπες προκαθορισμένες τιμές έχουν τις ακόλουθες τιμές:

- $HVCC = 2$  (Συνδεσμολογία τριγώνου στο τύλιγμα Υ.Τ.)
- $LVCC = 1$  (Συνδεσμολογία αστέρα στο τύλιγμα Χ.Τ.)
- $Type_{HV} = 2$  (Στρογγυλοί αγωγοί στο τύλιγμα Υ.Τ.)
- $Type_{LV} = 2$  (Στρογγυλοί αγωγοί στο τύλιγμα Χ.Τ.)
- $HVCM = 1$  (Αγωγοί από χαλκό στο τύλιγμα Υ.Τ.)
- $LVCM = 1$  (Αγωγοί από χαλκό στο τύλιγμα Χ.Τ.)

- $V_{CTi} = 1$  (Με δοχείο διαστολής)

Επίσης οι παράμετροι βελτιστοποίησης για το συγκεκριμένο παράδειγμα είχαν τις παρακάτω τιμές:

- $Turns_{LV}$ : από 5 έως 28 με βήμα ίσο με 3,
- $D$ : από 180 mm έως 580 mm με βήμα ίσο με 100 mm,
- $FD$ : από 1,2 T έως 1,85 T με βήμα ίσο με 0,05 T,
- $G$ : από 280 mm έως 440 mm με βήμα ίσο με 40 mm,
- $d_{HV}$ : από 0,5 mm έως 5 mm με βήμα ίσο με 1,125 mm,
- $d_{LV}$ : από 0,5 mm έως 5 mm με βήμα ίσο με 1,125 mm.

Οι 20 πιο οικονομικές εφικτές λύσεις που προκύπτουν ακολουθούν παρακάτω:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	turns_LV_result	D_result	FD_result	G_result	area_LV_result	area_HV_result	NLL_result	LL_1_result	U_k_result	TOC_result
1	12	280	1.8500	440	19.6350	6.1575	1.9996e+03	4.3722e+04	0.0658	1.2879e+05
2	9	280	1.8000	320	19.6350	8.8141	2.2311e+03	4.1813e+04	0.0657	1.3184e+05
3	9	280	1.7500	360	19.6350	11.9459	2.2263e+03	4.0088e+04	0.0632	1.3259e+05
4	9	280	1.7000	360	19.6350	11.9459	2.0912e+03	4.0627e+04	0.0642	1.3266e+05
5	9	280	1.7500	360	19.6350	8.8141	2.1755e+03	4.2188e+04	0.0588	1.3289e+05
6	9	280	1.6500	360	19.6350	11.9459	1.9774e+03	4.1164e+04	0.0652	1.3300e+05
7	9	280	1.8500	320	19.6350	8.8141	2.4354e+03	4.1387e+04	0.0649	1.3300e+05
8	9	280	1.7000	360	19.6350	8.8141	2.0440e+03	4.2756e+04	0.0597	1.3302e+05
9	9	280	1.6500	360	19.6350	8.8141	1.9331e+03	4.3323e+04	0.0606	1.3337e+05
10	9	380	1.7000	360	19.6350	11.9459	1.9315e+03	4.2616e+04	0.0649	1.3353e+05
11	9	280	1.8000	360	19.6350	11.9459	2.4122e+03	3.9685e+04	0.0625	1.3355e+05
12	9	380	1.6500	360	19.6350	11.9459	1.8241e+03	4.3021e+04	0.0657	1.3360e+05
13	9	380	1.7500	360	19.6350	11.9459	2.0589e+03	4.2210e+04	0.0642	1.3373e+05
14	9	280	1.8000	360	19.6350	8.8141	2.3568e+03	4.1762e+04	0.0581	1.3376e+05
15	9	380	1.7000	360	19.6350	8.8141	1.8842e+03	4.4832e+04	0.0602	1.3393e+05
16	9	280	1.6000	360	19.6350	8.8141	1.8384e+03	4.3889e+04	0.0616	1.3394e+05
17	9	280	1.7500	320	19.6350	6.1575	2.0010e+03	4.5658e+04	0.0609	1.3397e+05
18	9	380	1.8500	320	19.6350	8.8141	2.2255e+03	4.3742e+04	0.0660	1.3400e+05
19	9	380	1.6500	360	19.6350	8.8141	1.7797e+03	4.5260e+04	0.0609	1.3404e+05
20	9	380	1.7500	360	19.6350	8.8141	2.0080e+03	4.4405e+04	0.0595	1.3405e+05

Οι 20 πιο ακριβές εφικτές λύσεις που προκύπτουν ακολουθούν παρακάτω:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	turns_LV_result	D_result	FD_result	G_result	area_LV_result	area_HV_result	NLL_result	LL_1_result	U_k_result	TOC_result
1	5	280	1.8500	440	15.9043	1.0387	5.8552e+03	1.0153e+05	0.0644	2.9169e+05
2	5	280	1.8000	440	15.9043	1.0387	5.4002e+03	1.0314e+05	0.0654	2.9035e+05
3	5	280	1.8500	440	9.6211	3.9761	5.9023e+03	9.8416e+04	0.0626	2.8836e+05
4	5	280	1.8500	400	15.9043	1.0387	5.5642e+03	1.0153e+05	0.0646	2.8700e+05
5	5	280	1.8000	440	9.6211	3.9761	5.4431e+03	1.0000e+05	0.0637	2.8696e+05
6	5	280	1.7000	440	9.6211	3.9761	4.7350e+03	1.0317e+05	0.0657	2.8670e+05
7	5	280	1.7500	440	9.6211	3.9761	5.0589e+03	1.0158e+05	0.0647	2.8648e+05
8	5	280	1.8000	400	15.9043	1.0387	5.1349e+03	1.0314e+05	0.0656	2.8593e+05
9	5	280	1.5500	400	9.6211	19.6350	4.1588e+03	9.7864e+04	0.0651	2.8496e+05
10	5	280	1.8500	440	9.6211	19.6350	6.2488e+03	8.8379e+04	0.0581	2.8486e+05
11	5	280	1.8500	400	9.6211	3.9761	5.6451e+03	9.8464e+04	0.0631	2.8441e+05
12	5	380	1.3500	440	9.6211	19.6350	3.3764e+03	1.0040e+05	0.0659	2.8392e+05
13	5	280	1.6500	440	9.6211	19.6350	4.7415e+03	9.4310e+04	0.0621	2.8345e+05
14	5	280	1.8000	400	9.6211	3.9761	5.2086e+03	1.0005e+05	0.0641	2.8324e+05
15	5	280	1.5500	400	9.6211	15.5528	4.1314e+03	9.8622e+04	0.0652	2.8323e+05
16	5	280	1.8000	440	9.6211	19.6350	5.7590e+03	8.9804e+04	0.0591	2.8299e+05
17	5	280	1.7500	400	9.6211	3.9761	4.8435e+03	1.0163e+05	0.0651	2.8293e+05
18	5	280	1.6000	400	9.6211	19.6350	4.3450e+03	9.6205e+04	0.0639	2.8256e+05
19	5	280	1.8500	440	9.6211	6.1575	5.9602e+03	9.3966e+04	0.0601	2.8244e+05
20	5	280	1.8500	360	15.9043	1.0387	5.2732e+03	1.0153e+05	0.0649	2.8231e+05

Από το παραπάνω παράδειγμα μπορούν να σημειωθούν τα παραπάνω εξής σημαντικά στοιχεία:

- η πιο οικονομική εφικτή λύση έχει τιμή κόστους κατοχής ίση με 128790 €,
- η πιο ακριβή εφικτή λύση έχει τιμή κόστους κατοχής ίση με 291690 €,
- η μέση τιμή κόστους κατοχής για τις εφικτές λύσεις είναι ίση με 201942 €,
- η μείωση της τιμής σε ποσοστό μεταξύ της πιο οικονομικής και της πιο ακριβής είναι ίση με 55,85 %.
- η μείωση της τιμής σε ποσοστό μεταξύ της πιο οικονομικής και της μέσης τιμής είναι ίση με 36,13 %.
- Το σύνολο των λύσεων, που προκύπτει από το πλήθος των επαναλήψεων για όλες τις παραμέτρους βελτιστοποίησης, είναι ίσο με 350000 εκ των οποίων οι 7600 είναι εφικτές λύσεις. Έτσι το ποσοστό επιτυχία είναι ίσο με 2,17 %.

2<sup>ο</sup> παράδειγμα – Μ/Σ ισχύος 25 kVA, 440 V/220 V, 60 Hz, τρίγωνο – τρίγωνο, με φύλλα στο τύλιγμα Χ.Τ. και στρογγυλούς αγωγούς στο τύλιγμα Υ.Τ. για πλοίο πολεμικού ναυτικού για τροφοδοσία φωτισμού, μπριζών κλπ. χωρίς δοχείο διαστολής.

Στην περίπτωση αυτή οι υπόλοιπες προκαθορισμένες τιμές έχουν τις ακόλουθες τιμές:

- $HVCC = 2$  (Συνδεσμολογία τριγώνου στο τύλιγμα Υ.Τ.)
- $LVCC = 2$  (Συνδεσμολογία τριγώνου στο τύλιγμα Χ.Τ.)
- $Type_{HV} = 2$  (Στρογγυλοί αγωγοί στο τύλιγμα Υ.Τ.)
- $Type_{LV} = 1$  (Φύλλα στο τύλιγμα Χ.Τ.)
- $HVCM = 1$  (Αγωγοί από χαλκό στο τύλιγμα Υ.Τ.)
- $LVCM = 1$  (Αγωγοί από χαλκό στο τύλιγμα Χ.Τ.)
- $V_{CTi} = 0$  (Χωρίς δοχείο διαστολής)

Επίσης οι παράμετροι βελτιστοποίησης για το συγκεκριμένο παράδειγμα είχαν τις παρακάτω τιμές:

- $Turns_{LV}$ : από 10 έως 50 με βήμα ίσο με 4,
- $D$ : από 180 mm έως 580 mm με βήμα ίσο με 100 mm,
- $FD$ : από 1,2 T έως 1,85 T με βήμα ίσο με 0,05 T,
- $G$ : από 110 mm έως 190 mm με βήμα ίσο με 16 mm,
- $d_{HV}$ : από 0,5 mm έως 5 mm με βήμα ίσο με 1,125 mm,
- $t_{LV}$ : από 1 mm έως 5 mm με βήμα ίσο με 1 mm.

Οι 20 πιο οικονομικές εφικτές λύσεις που προκύπτουν ακολουθούν παρακάτω:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	turns_LV_result	D_result	FD_result	G_result	area_LV_result	area_HV_result	NLL_result	LL_1_result	U_k_result	TOC_result
1	23	380	1.3500	110	92	2.2698	150.3635	882.4252	0.0367	1.6764e+04
2	23	380	1.4000	110	92	2.2698	157.5639	878.9230	0.0365	1.6775e+04
3	23	380	1.4500	110	92	2.2698	164.7865	875.4183	0.0364	1.6787e+04
4	23	380	1.5500	110	92	2.2698	179.7747	868.4017	0.0361	1.6795e+04
5	25	380	1.5500	110	92	2.2698	164.7953	944.6165	0.0397	1.6799e+04
6	23	380	1.5000	110	92	2.2698	172.1168	871.9113	0.0362	1.6801e+04
7	25	380	1.6000	110	92	2.2698	171.9895	940.7959	0.0396	1.6811e+04
8	25	380	1.4000	110	92	2.2698	145.6808	956.0620	0.0402	1.6818e+04
9	25	380	1.3500	110	92	2.2698	139.3745	959.8718	0.0404	1.6818e+04
10	25	380	1.4500	110	92	2.2698	151.9505	952.2495	0.0401	1.6818e+04
11	25	380	1.5000	110	92	2.2698	158.2572	948.4343	0.0399	1.6819e+04
12	25	380	1.6500	110	92	2.2698	180.1740	936.9725	0.0394	1.6836e+04
13	25	380	1.7000	110	92	2.2698	189.7212	933.1464	0.0392	1.6878e+04
14	25	280	1.2000	110	92	2.2698	136.8507	859.9926	0.0363	1.6885e+04
15	23	380	1.2500	110	92	2.2698	139.7018	892.9178	0.0371	1.6887e+04
16	23	380	1.3000	110	92	2.2698	147.7735	889.4226	0.0370	1.6907e+04
17	25	380	1.2500	110	92	2.2698	130.3679	971.2859	0.0409	1.6964e+04
18	25	380	1.3000	110	92	2.2698	137.6082	967.4837	0.0407	1.6973e+04
19	23	380	1.2000	110	92	2.2698	135.8724	899.9013	0.0374	1.6994e+04
20	21	480	1.5500	110	92	2.2698	180.9709	912.6665	0.0376	1.7052e+04

Οι 20 πιο ακριβές εφικτές λύσεις που προκύπτουν ακολουθούν παρακάτω:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	turns_LV_result	D_result	FD_result	G_result	area_LV_result	area_HV_result	NLL_result	LL_1_result	U_k_result	TOC_result
1	7	180	1.2000	190	860	1.0387	1.3498e+03	916.4081	0.0367	5.5955e+04
2	7	180	1.2000	190	784.3200	1.0387	1.3400e+03	909.8971	0.0364	5.4977e+04
3	7	180	1.2000	170	760	1.0387	1.3115e+03	916.6650	0.0367	5.4129e+04
4	7	180	1.2000	190	706.9200	1.0387	1.3301e+03	903.2808	0.0362	5.4007e+04
5	7	180	1.2000	170	693.1200	1.0387	1.3017e+03	910.1777	0.0364	5.3225e+04
6	7	180	1.2000	170	624.7200	1.0387	1.2918e+03	903.5908	0.0362	5.2331e+04
7	7	180	1.2000	150	660	1.0387	1.2731e+03	916.9997	0.0367	5.2302e+04
8	7	180	1.2000	150	601.9200	1.0387	1.2634e+03	910.5433	0.0365	5.1473e+04
9	7	180	1.2000	150	542.5200	1.0387	1.2534e+03	903.9947	0.0362	5.0655e+04
10	7	180	1.2000	130	560	1.0387	1.2348e+03	917.4540	0.0367	5.0476e+04
11	7	180	1.2000	130	510.7200	1.0387	1.2251e+03	911.0394	0.0365	4.9722e+04
12	7	180	1.2000	130	460.3200	1.0387	1.2151e+03	904.5429	0.0362	4.8980e+04
13	7	180	1.2000	110	460	1.0387	1.1958e+03	917.8614	0.0368	4.8621e+04
14	7	180	1.2000	110	419.5200	1.0387	1.1860e+03	911.5068	0.0365	4.7941e+04
15	7	180	1.2000	110	378.1200	1.0387	1.1761e+03	905.0850	0.0363	4.7275e+04
16	7	180	1.2000	110	337.6400	1.0387	1.1663e+03	898.9078	0.0360	4.6602e+04
17	25	580	1.8500	190	860	3.9761	513.0353	897.6280	0.0412	4.5677e+04
18	9	180	1.2000	190	860	1.0387	927.8341	1.0362e+03	0.0415	4.5640e+04
19	25	580	1.8000	190	860	3.9761	454.5759	897.6280	0.0412	4.4991e+04
20	25	580	1.7500	190	860	3.9761	433.2307	899.6504	0.0413	4.4952e+04

Από το παραπάνω παράδειγμα μπορούν να σημειωθούν τα παραπάνω εξής σημαντικά στοιχεία:

- η πιο οικονομική εφικτή λύση έχει τιμή κόστους κατοχής ίση με 16764 €,
- η πιο ακριβή εφικτή λύση έχει τιμή κόστους κατοχής ίση με 55955 €,
- η μέση τιμή κόστους κατοχής για τις εφικτές λύσεις είναι ίση με 27418 €,
- η μείωση της τιμής σε ποσοστό μεταξύ της πιο οικονομικής και της πιο ακριβής είναι ίση με 70,04%.
- η μείωση της τιμής σε ποσοστό μεταξύ της πιο οικονομικής και της μέσης τιμής είναι ίση με 38,86 %.
- Το σύνολο των λύσεων, που προκύπτει από το πλήθος των επαναλήψεων για όλες τις παραμέτρους βελτιστοποίησης, είναι ίσο με 350000 εκ των οποίων οι 8991 είναι εφικτές λύσεις. Έτσι το ποσοστό επιτυχία είναι ίσο με 2,57 %.

3<sup>ο</sup> παράδειγμα – Μ/Σ ισχύος 25 kVA, 440 V/220 V, 60 Hz, τρίγωνο – τρίγωνο, με φύλλα στο τύλιγμα Χ.Τ. και ορθογώνιους αγωγούς στο τύλιγμα Υ.Τ. για πλοίο πολεμικού ναυτικού για τροφοδοσία φωτισμού, μπριζών κλπ. χωρίς δοχείο διαστολής.

Στην περίπτωση αυτή οι υπόλοιπες προκαθορισμένες τιμές έχουν τις ακόλουθες τιμές:

- $HVCC = 2$  (Συνδεσμολογία τριγώνου στο τύλιγμα Υ.Τ.)
- $LVCC = 2$  (Συνδεσμολογία τριγώνου στο τύλιγμα Χ.Τ.)
- $Type_{HV} = 3$  (Ορθογώνιοι αγωγοί στο τύλιγμα Υ.Τ.)
- $Type_{LV} = 1$  (Φύλλα στο τύλιγμα Χ.Τ.)
- $HVCM = 1$  (Αγωγοί από χαλκό στο τύλιγμα Υ.Τ.)
- $LVCM = 1$  (Αγωγοί από χαλκό στο τύλιγμα Χ.Τ.)
- $V_{CTi} = 0$  (Χωρίς δοχείο διαστολής)

Επίσης οι παράμετροι βελτιστοποίησης για το συγκεκριμένο παράδειγμα είχαν τις παρακάτω τιμές:

- $Turns_{LV}$ : από 10 έως 50 με βήμα ίσο με 4,
- $D$ : από 180 mm έως 580 mm με βήμα ίσο με 100 mm,
- $FD$ : από 1,2 T έως 1,85 T με βήμα ίσο με 0,05 T,
- $G$ : από 110 mm έως 190 mm με βήμα ίσο με 16 mm,
- $d_{HV}$ : από 0,1 mm έως 2 mm με βήμα ίσο με 0,475 mm,
- $t_{LV}$ : από 1 mm έως 5 mm με βήμα ίσο με 1 mm.

Οι 20 πιο οικονομικές εφικτές λύσεις που προκύπτουν από αυτές τις παραμέτρους ακολουθούν παρακάτω:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	turns_LV_result	D_result	FD_result	G_result	area_LV_result	area_HV_result	NLL_result	LL_1_result	U_k_result	TOC_result
1	25	380	1.5000	110	92	2.2698	156.1115	945.1961	0.0396	1.6727e+04
2	25	380	1.5500	110	92	2.2698	162.5450	941.3777	0.0394	1.6731e+04
3	25	380	1.6000	110	92	2.2698	169.6241	937.5567	0.0393	1.6743e+04
4	25	380	1.4500	110	92	2.2698	149.9049	949.0117	0.0398	1.6751e+04
5	25	380	1.4000	110	92	2.2698	143.7332	952.8246	0.0399	1.6752e+04
6	25	380	1.3500	110	92	2.2698	137.5242	956.6349	0.0401	1.6752e+04
7	25	380	1.6500	110	92	2.2698	177.6782	933.7328	0.0391	1.6767e+04
8	23	380	1.3500	110	92	2.2698	150.3543	882.4116	0.0367	1.6769e+04
9	23	380	1.4000	110	92	2.2698	157.5542	878.9094	0.0365	1.6780e+04
10	23	380	1.4500	110	92	2.2698	164.7762	875.4048	0.0364	1.6792e+04
11	25	280	1.2000	110	92	2.2698	135.2355	856.7990	0.0361	1.6793e+04
12	23	380	1.5500	110	92	2.2698	179.7634	868.3882	0.0361	1.6800e+04
13	23	380	1.5000	110	92	2.2698	172.1060	871.8977	0.0362	1.6806e+04
14	25	380	1.7000	110	92	2.2698	187.0739	929.9062	0.0389	1.6807e+04
15	25	380	1.3000	110	92	2.2698	135.8063	964.2477	0.0404	1.6881e+04
16	23	380	1.2500	110	92	2.2698	139.6934	892.9042	0.0371	1.6892e+04
17	25	380	1.2500	110	92	2.2698	128.6724	968.0503	0.0406	1.6897e+04
18	23	380	1.3000	110	92	2.2698	147.7646	889.4090	0.0370	1.6912e+04
19	23	380	1.2000	110	92	2.2698	135.8643	899.8878	0.0374	1.6999e+04
20	25	380	1.2000	110	92	2.2698	125.6577	975.6479	0.0409	1.7014e+04

Οι 20 πιο ακριβές εφικτές λύσεις που προκύπτουν από αυτές τις παραμέτρους ακολουθούν παρακάτω:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	turns_LV_result	D_result	FD_result	G_result	area_LV_result	area_HV_result	NLL_result	LL_1_result	U_k_result	TOC_result
1	7	180	1.2000	190	860	1.0387	1.3481e+03	915.8537	0.0367	5.5878e+04
2	7	180	1.2000	190	784.3200	1.0387	1.3384e+03	909.3428	0.0364	5.4900e+04
3	7	180	1.2000	170	760	1.0387	1.3098e+03	916.1106	0.0367	5.4053e+04
4	7	180	1.2000	190	706.9200	1.0387	1.3284e+03	902.7266	0.0361	5.3931e+04
5	7	180	1.2000	170	693.1200	1.0387	1.3001e+03	909.6234	0.0364	5.3149e+04
6	7	180	1.2000	170	624.7200	1.0387	1.2901e+03	903.0366	0.0361	5.2256e+04
7	7	180	1.2000	150	660	1.0387	1.2704e+03	916.0782	0.0367	5.2178e+04
8	7	180	1.2000	150	601.9200	1.0387	1.2607e+03	909.6219	0.0364	5.1349e+04
9	7	180	1.2000	150	542.5200	1.0387	1.2507e+03	903.0735	0.0362	5.0532e+04
10	7	180	1.2000	130	560	1.0387	1.2321e+03	916.5325	0.0367	5.0355e+04
11	7	180	1.2000	130	510.7200	1.0387	1.2223e+03	910.1180	0.0364	4.9601e+04
12	7	180	1.2000	130	460.3200	1.0387	1.2124e+03	903.6217	0.0362	4.8860e+04
13	7	180	1.2000	110	460	1.0387	1.1928e+03	916.8661	0.0367	4.8487e+04
14	7	180	1.2000	110	419.5200	1.0387	1.1831e+03	910.5117	0.0365	4.7808e+04
15	7	180	1.2000	110	378.1200	1.0387	1.1731e+03	904.0901	0.0362	4.7142e+04
16	25	580	1.8500	190	860	3.9761	510.7379	896.4035	0.0410	4.5610e+04
17	9	180	1.2000	190	860	1.0387	925.7140	1.0350e+03	0.0414	4.5533e+04
18	25	580	1.8000	190	860	3.9761	452.5403	896.4035	0.0410	4.4927e+04
19	25	580	1.7500	190	860	3.9761	431.2975	898.4260	0.0411	4.4889e+04
20	9	180	1.2500	190	860	1.0387	950.7314	1.0108e+03	0.0405	4.4672e+04

Από το παραπάνω παράδειγμα μπορούν να σημειωθούν τα παραπάνω εξής σημαντικά στοιχεία:

- η πιο οικονομική εφικτή λύση έχει τιμή κόστους κατοχής ίση με 16727 €,
- η πιο ακριβή εφικτή λύση έχει τιμή κόστους κατοχής ίση με 55878 €,
- η μέση τιμή κόστους κατοχής για τις εφικτές λύσεις είναι ίση με 27362 €,
- η μείωση της τιμής σε ποσοστό μεταξύ της πιο οικονομικής και της πιο ακριβής είναι ίση με 70,07%.
- η μείωση της τιμής σε ποσοστό μεταξύ της πιο οικονομικής και της μέσης τιμής είναι ίση με 38,87 %.
- Το σύνολο των λύσεων, που προκύπτει από το πλήθος των επαναλήψεων για όλες τις παραμέτρους βελτιστοποίησης, είναι ίσο με 350000 εκ των οποίων οι 8928 είναι εφικτές λύσεις. Έτσι το ποσοστό επιτυχία είναι ίσο με 2,55 %.



## 5.4 Σημεία ενδιαφέροντος

Κατά την ανάπτυξη του κώδικα υπήρχαν πολλαπλά σημεία, τα οποία χρειάστηκαν επιπλέον χρόνο για το σωστό ορισμό και την ορθή λειτουργία τους. Μερικά από αυτά ακολουθούν παρακάτω:

- Ο καθορισμός των σωστών υπολογισμών για κάθε μία από τις περιπτώσεις αγωγών των τυλιγμάτων. Πιο συγκεκριμένα, στο σημείο του υπολογισμού των διαστάσεων του τυλίγματος και του πυρήνα, αναλόγως την περίπτωση, δηλαδή για περίπτωση στρογγυλού, ορθογώνιου αγωγού ή φύλλων, θα έπρεπε να ορισθούν διαφορετικές παράμετροι οι οποίοι ως αποτέλεσμα άλλαζαν και τις πράξεις των τύπων που ακολουθούσαν σε αυτήν την ενότητα αλλά και σε επόμενο σημεία κατά την εκτέλεση του κώδικα.
- Ο ορισμός απαγωγής θερμότητας δεξαμενής μέσω των αυλακωμένων πάνελ *CPC*. Σε αυτήν την περίπτωση έχοντας μόνο τιμές που ανταποκρίνονται σε θερμοκρασίες που ξεκινάνε από τους 35°C και φτάνουν έως και τους 60°C με βήμα ανά 5°C, για κάθε ενδιάμεση τιμή από τις ήδη γνωστές θα έπρεπε να υπολογισθεί ο συντελεστής *CPC* μέσω προσεγγιστικής μεθόδου. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν τα βάρη των δύο ενδιάμεσων τιμών για τον καθορισμό της τιμής για την άγνωστη θερμοκρασία.
- Η αναστροφή των πινάκων με τα αποτελέσματα. Στο τέλος κάθε επανάληψης αποθηκεύονταν η κάθε μία από τις σημαντικές παραμέτρους σε αντίστοιχο πίνακα. Για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η ενσωμάτωση αυτών των αποθηκευμένων αποτελεσμάτων σε πίνακα μορφής Table έπρεπε να γίνει αναστροφή στους πίνακες, ώστε οι αποθηκευμένες τιμές να αποθηκεύονται κάθε μία και σε διαφορετική σειρά αντί για στήλη. Ως αποτέλεσμα όλοι οι πίνακες των τιμών μπορούν να ενσωματωθούν στον τελικό πίνακα προς παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

## 5.5 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της ανάπτυξης του παραπάνω κώδικα μπορεί κανείς να αντιληφθεί την πολυπλοκότητα και το μεγάλο εύρος των διαφορετικών παραμέτρων που μπορούν να συμβάλλουν στην ανάπτυξη ενός λογισμικού ή ακόμα και στη διαδικασία σχεδιασμού ενός μετασχηματιστή σε πραγματικά πλαίσια. Μέσω αυτού του κώδικα μπορεί κανείς να καταλάβει τη σημασία συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή κατά τη μελέτη του και την επιρροή που έχουν αυτά σε άλλα χαρακτηριστικά. Επίσης μόλις με μερικά παραδείγματα θα μπορεί κανείς, να συνδέσει την αναλογία μεταξύ της ισχύος και του κόστους ενός μετασχηματιστή ή ακόμα και την απαίτηση των υλικών που χρειάζονται για την κατασκευή ενός μετασχηματιστή, σε ικανοποιητικό βαθμό.

Στα πλεονεκτήματα αυτού του κώδικα υπάγεται και η επεκτασιμότητα του. Η δομή του κώδικα βοηθάει με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να εισαχθούν περαιτέρω παράμετροι και να δημιουργηθούν περισσότερες επιλογές προς το χρήστη για την επίτευξη πιο συγκεκριμένων αποτελεσμάτων και να βελτιωθεί επιπρόσθετα η ποιότητα αυτών σε σύγκριση με πραγματικές αντίστοιχες περιπτώσεις.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

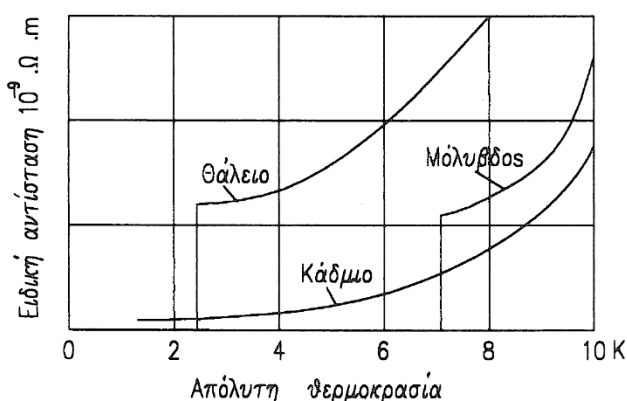
### 6.1 Μετασχηματιστές νέας τεχνολογίας

#### 6.1.1 Μετασχηματιστής με πυρήνα άμορφου σιδήρου

Η ιδιαιτερότητα αυτών των μετασχηματιστών βρίσκεται στην κρυσταλλική δομή του πυρήνα. Το μέταλλο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του πυρήνα χρησιμοποιείται σε ρευστή μορφή και χύνεται μέσω μίας σχισμής σε ένα ψυγμένο κινούμενο υπόστρωμα. Με αυτήν τη διαδικασία επιτυγχάνεται η κρυσταλλική δομή, η οποία οδηγεί σε σημαντικές μειώσεις των απωλειών του πυρήνα, μείωση του ρεύματος μαγνήτισης, αλλά αντίστοιχα το κόστος κατασκευής είναι κατά 80% υψηλότερο από αυτό ενός συμβατικού μετασχηματιστή. Επιπρόσθετη ιδιαιτερότητα αποτελεί το γεγονός ότι λόγω της διεργασίας μορφοποίησης του πυρήνα, αυτός προκύπτει με οβάλ σχήμα και έτσι υπάρχει και η ανάγκη των τυλιγμάτων να έχουν και αυτά οβάλ μορφολογία. Στα αρνητικά δε είναι η αντοχή του υλικού σε μηχανικές καταπονήσεις, αφού λόγω της δομής ο πυρήνας είναι πιο εύθραυστος σε σύγκριση με ένα συμβατικό. Η στάθμη θορύβου, παρόλο τις μειωμένες απώλειες, παραμένει ίδια με αυτή του συμβατικού.

#### 6.1.2 Υπεραγώγιμοι Μετασχηματιστές

Οι μετασχηματιστές αυτοί μέσω της υπεραγώγιμης ιδιότητας συγκεκριμένων στοιχείων, όπως ο ψευδάργυρος, ο κασσίτερος, το κάδμιο, ο υδράργυρος, το αλουμίνιο, το θάλλιο, το ουράνιο, το τιτάνιο, ο μόλυβδος, το θόριο, το βανάδιο, το νιόβιο, το ταντάλιο, το ρουθένιο και το όσμιο ή κραμάτων, όπως το οξειδίο του υτρίου βαρίου χαλκού (YBCO) και το οξειδίο βισμούθιου στροντίου ασβεστίου χαλκού (BSCCO). Όταν στα προαναφερόμενα στοιχεία ή κράματα μειωθεί η θερμοκρασία σε πολύ μεγάλο βαθμό ( $-180^{\circ}\text{C}$  έως  $-240^{\circ}\text{C}$ ) επικρατεί μια διαφοροποίηση στη συμπεριφορά τους, όπου η ειδική αντίσταση γίνεται πάρα πολύ μικρή και σε αυτό το σημείο μπορεί να θεωρηθεί πως βρίσκονται σε υπεραγωγιμότητα. Πιο συγκεκριμένα το σημείο αυτό στο οποίο παύουν να παρουσιάζουν αντίσταση και γίνονται υπεραγώγιμα ονομάζεται σημείο άλματος όπου αυτό έχει και διαφορετική θερμοκρασία αναφοράς για κάθε ένα από τα στοιχεία/κράματα.



Σχήμα 6.1: Σημείο άλματος από κανονική σε υπεραγώγιμη κατάσταση για το θάλλιο, το μόλυβδο και το κάδμιο [4, σελ. 179, Σχήμα 141].

Από το σημείο άλματος και κάτω, δηλαδή για χαμηλότερη θερμοκρασία, η ροή του ρεύματος προκύπτει χωρίς να αναπτύσσεται τάση στα άκρα του αγωγού, κάτι που ισοδυναμεί με το μηδενισμό της αντίστασης του. Επίσης σημαντικό είναι το γεγονός ότι το μαγνητικό πεδίο που μπορεί να εμφανίζουν σε κανονικές καταστάσεις, στην περίπτωση της υπεραγωγιμότητας παύει να υπάρχει.

Η επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας γίνεται μέσω εξατμίσεως υγρού υδρογόνου ή αζώτου σε μειωμένη πίεση. Η χρήση των υπεραγωγίων υλικών οδηγεί σε μείωση των απωλειών λειτουργίας, μείωση του όγκου της κατασκευής λόγω μικρότερης διατομής αγωγών, εξοικονόμηση υλικού, άρα και μείωση κόστους, λόγω της μικρότερης διατομής και περιβαλλοντικά φιλικότερη ψύξη, εφόσον χρησιμοποιείται υγρό άζωτο ως ψυκτικό και διηλεκτρικό μέσο σε σύγκριση με το συμβατικό ψυκτικό λάδι, το οποίο αποθηκεύεται κατά την απόσυρση με ειδικό τρόπο για την αποφυγή πιθανής μόλυνσης του περιβάλλοντος.

## 6.2 Τελικά συμπεράσματα

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η επεξήγηση της λειτουργίας των μετασχηματιστών, η ανάλυση των πολλαπλών χαρακτηριστικών που καθιστούν και διαφορετικές κατηγορίες μετασχηματιστών, η ανάδειξη της χρησιμότητας αυτών σε πολλαπλές περιπτώσεις όπως τη χρήση τους σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας όπως αυτών των πλοίων, την ενσωμάτωσή τους σε συστήματα για τη χρήση τους ως προστατευτικά μέσα για το χρήστη αλλά και για το φορτίο, τη σύνδεση δύο ή περισσότερων ηλεκτρικών δικτύων με διαφορετικά επίπεδα τάσεις κλπ.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μία συνοπτική εισαγωγή (1<sup>ο</sup> κεφάλαιο) στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και συστήματα πρόωσης πλοίων για την κατανόηση της λειτουργίας τους, τις διαφορετικές υλοποιήσεις τους, τις αντίστοιχες απαιτήσεις και χαρακτηριστικά τους και την ανάγκη για την ενσωμάτωση των μετασχηματιστών εντός αυτών. Η ανάγκη αυτή προκύπτει λόγω των ιδιοτήτων των συστημάτων που εμπεριέχονται εντός των πλοίων όπου οι μετασχηματιστές ενσωματώνονται για τη σύνδεση μεταξύ των γεννητριών και των συστημάτων με διαφορετικά επίπεδα τάσεις λειτουργίας. Τα επίπεδα των συστημάτων – φορτίων μπορεί να είναι είτε Υ.Τ., είτε Μ.Τ., είτε Χ.Τ. , είτε ακόμα και για συνεχές ρεύμα όπου σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται και συστήματα ανόρθωσης της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή. Εκτός από το κομμάτι της παροχής ενέργειας, πολλαπλή μετασχηματιστές τοποθετούνται επίσης για την αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, την ύπαρξη εφεδρείας σε περίπτωση βλάβης κάποιου μετασχηματιστή. Η σωστή επιλογή και τοποθέτηση μετασχηματιστών σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να συμβάλλει στη μείωση βάρους όταν αυτό αποτελεί σημαντικό παράγοντα όπως στην περίπτωση των πλοίων, στη μείωση κόστους λειτουργίας του δικτύου, στη προστασία ευαίσθητων συσκευών κ.α.

Ωστόσο για τη σωστή επιλογή ενός μετασχηματιστή θα πρέπει να έχουν κατανοηθεί οι αρχές λειτουργίας του (2<sup>ο</sup> κεφάλαιο), να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά αυτού, όπως τα βασικά δομικά στοιχεία, τις γεωμετρικές διαστάσεις τους και τη λειτουργία τους, η συμπεριφορά και η αντοχές του σε μεταβατικά φαινόμενα, σε σφάλματα αλλά και σε ομαλή λειτουργία. Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες όπως επίσης τους διαφορετικούς τύπους μετασχηματιστών, τις συνδεσμολογίες που αναπτύσσονται στα τυλίγματα αυτών για τη δημιουργία ειδικών δομών αλλά και τις πειραματικές διαδικασίες για τον προσδιορισμό πολλών σημαντικών μεγεθών τους, μπορεί να γίνει κατανοητή η λογική που ακολουθείται για την επιλογή ενός ή πολλαπλών συγκεκριμένων μετασχηματιστών για την εφαρμογή τους σε ένα δίκτυο.

Βέβαια για την αναλυτική λειτουργία και τους αριθμητικούς υπολογισμούς που απαιτούνται για την υλοποίηση ενός πραγματικού μετασχηματιστή πρέπει να αναλυθεί όλο το σκεπτικό του σχεδιασμού – κατασκευής (3<sup>ο</sup> κεφάλαιο) του μαζί με τις προδιαγραφές που απαιτούνται. Αυτό για να ολοκληρωθεί όμως πρέπει να αναλύει σε βάθος όλες τις απαιτήσεις του μετασχηματιστή, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, την επιλογή των υλικών για τα τυλίγματα, των πυρήνα, τα μονωτικά υλικά, το λάδι, τα μεταλλικά στοιχεία της δεξαμενής κ.α.

Σε καμία περίπτωση όμως δεν μπορεί να ακολουθήσει αυτή η διαδικασία χωρίς να είναι ήδη γνωστή η χρήση του προβλεπόμενου μετασχηματιστή και οι ιδιαιτερότητες του περιβάλλοντος στο οποίο θα εγκατασταθεί. Παράγοντες όπως η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος, η υγρασία, η μέγιστη επιτρεπτή στάθμη θορύβου, το υψόμετρο εγκατάστασης, τα καιρικά φαινόμενα, η ανάγκη για συχνή υπερφόρτιση, η εγκατάσταση του σε σημείο με εύφλεκτα υλικά ή σε μέρος με αλμυρότητα στον αέρα, η ύπαρξη επαρκούς αερισμού, συγκεκριμένες απαιτήσεις ψύξης κ.α. καθορίζουν εξαρχής τη δομή και τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή ώστε αυτός να καθιστά μία εφικτή οικονομική λύση.

Για να μπορεί όμως ο κάθε μετασχηματιστής να θεωρηθεί ικανοποιητικός για να αρχίσει η παραγωγή απαιτείται η βελτιστοποίηση του, καθώς τα πρώτα αποτελέσματα από υπολογισμούς μπορεί να ικανοποιούν κάθε απαίτηση και κάθε προδιαγραφή αλλά το οικονομικό κόστος να είναι υψηλό και να έχει περιθώρια βελτίωσης στα μεγέθη ενδιαφέροντος του. Έτσι, επιλέγεται μία μέθοδος βελτιστοποίησης (4<sup>ο</sup> κεφάλαιο) που θα προσφέρει ένα αποτέλεσμα που θα είναι κατάλληλο για το σκοπό του μετασχηματιστή και ταυτοχρόνως θα βελτιστοποιεί τις παραμέτρους που είναι πιο σημαντικές.

Για την κατανόηση της βαρύτητας του κομματιού της βελτιστοποίησης αναπτύχθηκε ο κώδικας (5<sup>ο</sup> κεφάλαιο) και εφαρμόστηκε σε διαφορετικά παραδείγματα με ένα μεγάλο πλήθος επαναλήψεων για την εμφάνιση πολλαπλών αποτελεσμάτων για την καλύτερη σύγκριση. Ως αποτέλεσμα το εύρος των τιμών που λαμβάνει η αντικειμενική είναι πολύ μεγάλο και με σαφήνεια αναδεικνύεται η ανάγκη για τη χρήση μίας τέτοιας μεθόδου για την κατάληξη σε ένα βέλτιστο αποτέλεσμα αφού η τιμή της βέλτιστης λύσης μπορεί να έχει διαφορά του μεγέθους έως και 20% – 30% από την τιμή του μέσου όρου. Βέβαια, αυτός ο κώδικας αποτελεί ένα εργαλείο για τη διαμόρφωση μίας αρχικής ιδέας για τις ικανότητες της βελτιστοποίησης και προσέγγισης της αναλογίας μεταξύ εγκατεστημένης ισχύος και κόστους κατοχής ενός μετασχηματιστή σε μορφωτικό επίπεδο.

Τελικά συμπεραίνεται πως η σχεδίαση και η βελτιστοποίηση ενός μετασχηματιστή είναι ένα πολύπλοκο και πολυπαραγοντικό σύστημα εφόσον εφαρμόζοντας μόλις μερικούς περιορισμούς και μερικές παραμέτρους βελτιστοποίησης από το σύνολο των πιθανών λύσεων προκύπτει ένα μικρό ποσοστό εφικτών λύσεων. Η πρόσθεση περισσότερων περιορισμών – παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη ακρίβεια για το αποτέλεσμα αλλά ταυτοχρόνως οι εφικτές λύσεις θα είναι ακόμα λιγότερες σε πλήθος λόγω της αλληλεξάρτησης τους.

### 6.3 Περιοχές για περαιτέρω έρευνα

Όσον αφορά στην ανάπτυξη του θεωρητικού – κατασκευαστικού υπόβαθρου της διπλωματικής:

- η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου για την αναλυτική θερμική μελέτη των μετασχηματιστών με βάση των τύπο τυλιγμάτων αυτού,
- η αναζήτηση για τη χρήση νέων μονωτικών υλικών σε μεγαλύτερες θερμοκρασίας όπως επίσης και μονωτικών με βασική στάθμη μόνωσης για αντοχή σε επίπεδα υπερυψηλής τάσης (400 kV),
- η περαιτέρω επεξήγηση των δυνάμεων σύσφιξης στη βάση του μετασχηματιστή για τη μηχανική αντοχή του κατά των βραχυκυκλωμάτων και των μηχανικών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια αυτή,
- η ανάπτυξη και επεξήγηση των μετασχηματιστών ξηρού τύπου, μονοφασικών μετασχηματιστών και ειδικών τύπων μετασχηματιστών σε αντίστοιχο βαθμό.

Για τον ανωτέρω κώδικα που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 5:

- η επέκταση των επιτρεπτών τιμών για την ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή έως και σε πολλά MVA,

- η πρόσθεση πινάκων για την αντοχή των μονωτικών σε επίπεδα υπερυψηλής τάσης και ως αποτέλεσμα η επέκταση των επιτρεπτών τιμών στα επίπεδα τάσης του τυλίγματος Υ.Τ.,
- η εισαγωγή πολλαπλών και συγκεκριμένων σιδηρομαγνητικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μετασχηματιστών μαζί με τις συγκεκριμένες απώλειες ανά μονάδα μάζας για την αύξηση της ακρίβειας κατά τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα άρα και των τελικών αποτελεσμάτων,
- η επιλογή σχεδίασης μεταξύ ξηρού – υγρού τύπου, μεταξύ μονοφασικού – τριφασικού μετασχηματιστή, η ύπαρξη ή μη ενδιάμεσων λήψεων στο τύλιγμα Χ.Τ.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## Έντυπη βιβλιογραφία

- [1] H.K. Woud, D. Stapersma: “Design of propulsion and electric power generation systems”, Publications IMAREST, 1η έκδοση 2002, επαντύπωση 2008.
- [2] ABB: “System project guide for passenger vessels”, 2011.
- [3] Ιωάννης Προυσαλίδης: «ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΠΛΟΙΑ ΚΑΙ ΠΛΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ», Εκδόσεις Συμμετρία, 2012.
- [4] Π. Ραϊτσιο: «Μελέτη μετασχηματιστών», ΤΕΕ, Αθήνα 2000.
- [5] Π. Ραϊτσιο: «Μετρήσεις και ειδικές λειτουργίες μετασχηματιστών», ΤΕΕ, Αθήνα 2002.
- [6] Ι.Κ. Χατζηλάου, Γ.Ι. Τσεκούρας: «Θεωρία και πράξη ηλεκτρικών μηχανών – Κεφάλαιο 2: Μετασχηματιστές», Σημειώσεις για μάθημα ηλεκτρικών μηχανών, Σ.Ν.Δ., 2010.
- [7] Β.Κ. Παπαδιάς: «Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος Ι, Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας», Αθήνα 1985.
- [8] Β.Κ. Παπαδιάς: «Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος ΙΙ, Ασύμμετρες και μεταβατικές καταστάσεις», Αθήνα 1985.
- [9] ABB, “Switchgear Manual”, 10th edition.
- [10] NAVY TRAINING COURSE – BUREAU OF NAVAL PERSONNEL: “ELECTRICIAN’S MATE 1 & C”.
- [11] Dennis Hall – WITHERBY 2nd edition: “PRACTICAL MARINE ELECTRICAL KNOWLEDGE”.
- [12] Krause, Wasynczuk, Sudoff: “ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINERY AND DRIVE SYSTEMS”, IEEE Press.
- [13] M.A Laughton, D.F. Warne: "Electrical Engineer's Reference Book - Sixteenth Edition", 2013.
- [14] IEEE Standard 45 “IEEE Recommended practice for electric installation on shipboard”, 1998.
- [15] Ηρακλής Χάρχαρος: «ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑ ΠΛΟΙΟΥ», Εκδόσεις Σταυριδάκη.
- [16] Ι. Π. Ιωαννίδης, Χ.Α. Φραγκόπουλος, Ι. Προυσαλίδης: «Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου – Συμπληρωματικά βοηθήματα και Ασκήσεις», Ε.Μ.Π. Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα 2006.
- [17] Pavlos S. Georgilakis: “Spotlight on modern transformer design”, Springer, 2009.
- [18] Α.Γ. Βλάχος: «Ηλεκτρικές μηχανές – Τόμος Α», Αθήνα 2016, Ευγενίδειο Ίδρυμα.
- [19] Α.Γ. Βλάχος: «Ηλεκτρικές μηχανές – Τόμος Β», Αθήνα 2016, Ευγενίδειο Ίδρυμα.
- [20] Γ. Τσεκούρας: «Εισαγωγή στις ηλεκτρικές μηχανές», Πειραιάς, 2016, ΣΝΔ.
- [21] M.G. Say: “The performance and design of alternating current machines”, Εκδόσεις Sir Isaac Pitman & sons, LTD., London, 3rd edition, 1958.
- [22] R. Feinberg: “MODERN POWER TRANSFORMER PRACTICE” Εκδόσεις The Macmillan Press Ltd 1979.
- [23] M.J. Heathcote “THE J&P TRANSFORMER BOOK” Newnes.
- [24] Mohammed M. Islam: “Handbook to IEEE 45TM: A Guide to Electrical Installations”, IEEE 2004.
- [25] E.Lowdon: “Practical Transformer Design Handbook”.
- [26] Ζώης : «Μετασχηματιστές ισχύος», Αθήνα 1974.
- [27] Αντωνόπουλος: «Μετασχηματιστές μονοφασικοί», Αθήνα.
- [28] Ρουμπής: «Ασκήσεις ηλεκτρικών μηχανών».
- [29] Σερβετάς: «Μετασχηματισταί», Αθήνα 1980.
- [30] Τσακίρης: «Μετασχηματισταί».
- [31] Th. Wildi: “Electrical Machines, Drives and Power Systems”, Prentice Hall, 2002.
- [32] Ι. Τεγόπουλος: «Ηλεκτρικές μηχανές- β τόμος», Εκδόσεις συμμετρία.
- [33] Ι. Τεγόπουλος: «Ηλεκτρικές μηχανές- α τόμος», Εκδόσεις συμμετρία.
- [34] Ε. Πρωτονοτάριος, Κ. Βουρνάς: «Ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές», Εκδόσεις Συμμετρία.
- [35] Στ.Τουλόγλου, Β.Στεργίου: «Ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος», Εκδόσεις Ίων.

- [36] Ch.I.Hubert: «Ηλεκτρικές μηχανές», Εκδόσεις Ίων.
- [37] Αν. Δημητριάδη: «Τεχνολογία περιελίξεων», Εκδόσεις Ευγενιδείου.
- [38] Chapman: «Ηλεκτρικές μηχανές», Εκδόσεις Τζιόλα.
- [39] A. Dymkov: “Transformer design”, Mir Publishers, 1975.
- [40] Κ. Ε. Σαββάκης: «Τεχνολογία Υλικών» 3<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Ίων, 2010.
- [41] Διπλωματική Εργασία: «Ανάπτυξη Μεθοδολογίας και Λογισμικού για τη Σχεδίαση Μετασχηματιστών Ισχύος με Ελάχιστο Αριθμό Παραμέτρων Εισόδου» του Λίτσου Εριών, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σεπτέμβριος 2015.

## **Ιστότοποι**

- [42] <https://www.worldmaritimeaffairs.com/ship-propeller-types-and-characters-part-1/>
- [43] <https://www.automationforum.in/t/electrical-transformers-pre-commissioning-checks/3685>
- [44] <https://www.electriceasy.com/2014/06/buchholz-relay-construction-working.html>
- [45] <https://globecore.com/es/cooling-of-transformer.html>
- [46] <http://www.mosizolyator.ru/print/press-centre/news/2017/training-video-on-bushings-installation-at-power-facilities.htm>
- [47] [https://www.usbr.gov/power/data/fist/fist1\\_5/vol1-5.pdf](https://www.usbr.gov/power/data/fist/fist1_5/vol1-5.pdf)
- [48] <https://www.techimaging.com/applications/infrared-thermal-imaging-applications>
- [49] <https://www.se.com/eg/en/faqs/FA335946/>
- [50] <https://ekeindia.com/learning-tutorials-hvac-instrumentation-automation/electrical-motor-insulation-class/>
- [51] <https://www.finvacon.com/category/winding/>
- [52] <https://www.eis-inc.com/magnet-wire/p-ph15-rhtaihpcht>
- [53] <http://www.sheraenergy.com/copper-enamel-magnet-round-rectangular-wire.html>



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

### ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

```
%% Προκαθορισμένες μεταβλητές - Επιλεγμένες από το χρήστη
V_LVBASE = 220; % Επίπεδο τάσης στο τύλιγμα X.T. [V]
V_HV1BASE = 440/1000; % Επίπεδο τάσης στο τύλιγμα Y.T. [kV]
V_HV2BASE = V_HV1BASE/3; % Επίπεδο τάσης στην ενδιάμεση λήψη στο τύλιγμα Y.T.
[kV]

S_N = 25; % Ονομαστική ισχύς [kVA]
% Επιτρεπτές τιμές: 25, 30, 50, 63, 75, 100, 150, 200, 250,
% 300, 350, 400, 500, 630, 700, 750, 800, 900, 1000, 1200,
% 1250, 1500, 1600

HVCC = 2; % Συνδεσμολογία στο τύλιγμα Y.T.
LVCC = 2; % Συνδεσμολογία στο τύλιγμα X.T.
% Για συνδεσμολογία αστέρα τιμή (1)
% Για συνδεσμολογία τρίγωνο τιμή (2)
% Για συνδεσμολογία ζιγκ - ζαγκ αστέρα τιμή (3)

Type_HV = 2; % Τύπος αγωγού τυλίγματος Y.T.
Type_LV = 1; % Τύπος αγωγού τυλίγματος X.T.
% Για χάλκινα φύλλα τιμή (1)
% Για στρογγυλούς αγωγούς τιμή (2)
% Για ορθογώνιο αγωγό τιμή (3)

HVCM = 1; % Υλικό αγωγού τυλίγματος Y.T.
LVCM = 1; % Υλικό αγωγού τυλίγματος X.T.
% Για αγωγό από χαλκό τιμή (1)
% Για αγωγό από αλουμίνιο τιμή (2)

f = 60; % Συχνότητα λειτουργίας [Hz]

V_CT_i = 0 ; % Επιλογή δοχείου διαστολής.
% Για ύπαρξη τιμή ίση με 1
% Για μη ύπαρξη τιμή ίση με 0

years = 25; % Χρόνια λειτουργίας μετασχηματιστή [έτη]
interest = 0.03; % Επιτόκιο

TL_max = 10000; % Όριο μήκους δεξαμενής
TW_max = 5000; % Όριο πλάτους δεξαμενής
TH_max = 1500; % Όριο ύψους δεξαμενής

Gra_LV_max = 10; % Μέγιστο διαφορικό θερμοκρασία τυλίγματος X.T.
Gra_HV_max = 10; % Μέγιστο διαφορικό θερμοκρασία τυλίγματος Y.T.

NLL_max = 1000000; % Μέγιστες επιτρεπόμενες απώλειες λειτουργίας εν κενώ [W]
LL_max = 1000000; % Μέγιστες επιτρεπόμενες απώλειες χαλκού [W]

%% Σταθερές τιμές
uc_1 = 10.53; % Κόστος ανά μονάδα μάζας για το τύλιγμα X.T. [€/kg]
uc_2 = 10.53; % Κόστος ανά μονάδα μάζας για το τύλιγμα Y.T. [€/kg]
uc_3 = 5.27; % Κόστος ανά μονάδα μάζας για το σιδηρομαγνητικό υλικό [€/kg]
uc_4 = 6.77; % Κόστος ανά μονάδα μάζας για τα μονωτικά υλικά [€/kg]
uc_5 = 7.52; % Κόστος ανά μονάδα μάζας για τα διαμορφωμένα ελάσματα αγωγών
λαδιού [€/kg]
```

```

uc_6 = 1.51;      % Κόστος ανά μονάδα μάζας για το λάδι δεξαμενής. [€/kg]
uc_7 = 0.9;      % Κόστος ανά μονάδα μάζας για τα μεταλλικά φύλλα δεξαμενής.
[€/kg]
uc_8 = 1.05;     % Κόστος ανά μονάδα μάζας για τα αυλακωμένα πάνελ [€/kg]
A = 11.74;      % Κόστος ανά μονάδα απωλειών λειτουργίας εν κενώ [€/W]
B = 1.83;       % Κόστος ανά μονάδα απωλειών χαλκού [€/W]
C_Lab = 3981;   % Κόστος Εργασίας [€]
CRM = 1084;     % Κόστος υπόλοιπων υλικών [€]
SM = 0.35;      % Περιθώριο κέρδους πωλήσεων
C_KA_f = 2000;  % Κόστος απομάκρυνσης σε μελλοντική αξία (Future Value) [€]

g_IN_15 = 1.95; % Βάρος ανά μονάδα επιφάνειας μονωτικού υλικού πάχους 1.5
mm [kg/m^2]
g_IN_041 = 0.37; % Βάρος ανά μονάδα επιφάνειας μονωτικού υλικού πάχους 0.41
mm [kg/m^2]
g_IN_028 = 0.26; % Βάρος ανά μονάδα επιφάνειας μονωτικού υλικού πάχους 0.28
mm [kg/m^2]
g_IN_015 = 0.13; % Βάρος ανά μονάδα επιφάνειας μονωτικού υλικού πάχους 0.15
mm [kg/m^2]
m_0 = (4 * pi * 10^(-7)); % Σταθερά μαγνητικής διαπερατότητας στο κενό
g_DS = 1.25;     % Πυκνότητα μάζας διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού
[kg/m^3]
g_MM = 7650;    % Πυκνότητα μάζας του σιδηρομαγνητικού υλικού [kg/m^3]
g_O = 870;      % Πυκνότητα μάζας λαδιού [kg/m^3]
g_CP = 9.87;    % Βάρος ανα μονάδα επιφάνειας μεταλλικών τμημάτων δεξαμενής
[kg/m^2]
V_CT = 25;      % Όγκος δοχείου διαστολής [l]
CSF = 0.965;   % Συντελεστής στοίβαξης ελασμάτων [-]
K = 9;         % Ανοχές και επιμήκυνση πηνίου [mm]
CCEE = 3;      % Απόσταση μεταξύ πηνίου και πυρήνα [mm]
t_w_max = 105; % Μέγιστη θερμοκρασία τυλιγμάτων [°C]
t_a_max = 45;  % Μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος [°C]
t_o_max = 100; % Μέγιστη θερμοκρασία λαδιού [°C]
Taps_LV_min = 0; % Ανώτερο όριο ενδιάμεσης λήψης τυλίγματος Y.T.
Taps_LV_max = 0; % Κατώτερο όριο ενδιάμεσης λήψης τυλίγματος Y.T.
Taps_HV_min = 0.05; % Ανώτερο όριο ενδιάμεσης λήψης τυλίγματος Y.T.
Taps_HV_max = 0.05; % Κατώτερο όριο ενδιάμεσης λήψης τυλίγματος Y.T.
T_DS = 3;      % Πάχος των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού χωρίς τη
μόνωση [mm]
d_ducts_LV = 3.33; % Πλάτος διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο τύλιγμα
X.T [mm]
d_ducts_HV = 3.33; % Πλάτος διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο τύλιγμα
X.T [mm]
Pitch = 40;     % Πλάτος αυλακιών στο πάνελ [mm]
HCP = 780;     % Ύψος των αυλακωμένων πάνελ [mm]
Ducts_LV = 10; % Πλήθος διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο τύλιγμα
X.T. [-]
Ducts_HV = 12; % Πλήθος διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο τύλιγμα
Y.T. [-]
Strap_ratio_LV = 4; % Λόγος πλάτους και πάχους ορθογώνιου αγωγού για το
τύλιγμα X.T. (Πλάτος/Πάχος) [-]
Strap_ratio_HV = 4; % Λόγος πλάτους και πάχους ορθογώνιου αγωγού για το
τύλιγμα Y.T. (Πλάτος/Πάχος) [-]
I_VL = [0.28, 0.41, 0.56, 0.68, 0.8]; % Πίνακας τιμών του πάχους μόνωσης
αγωγών [mm]
Induced_max = [6, 7.5, 9.5, 11, 12.5]; % Πίνακας αντοχής επαγόμενης τάσης με
βάση το πάχος μόνωσης αγωγού [kV]
Impulse_max = [23.5, 31.5, 36, 40, 50]; % Πίνακας αντοχής κρουστικής τάσης με
βάση το πάχος μόνωσης αγωγού [kV]
SNLL_TF_Array = [0.637, 0.649, 0.661, 0.673, 0.685, 0.698, 0.711, 0.723,
0.736, 0.749, 0.763, 0.776, 0.790, 0.803, 0.817, 0.831, 0.845, 0.859, 0.873,
0.888, 0.902, 0.917, 0.932, 0.947, 0.962, 0.978, 0.994, 1.010, 1.026, 1.043,
1.060, 1.077, 1.094, 1.112, 1.131, 1.150, 1.169, 1.189, 1.209, 1.230, 1.252,
1.274, 1.297, 1.320, 1.345, 1.370, 1.396, 1.422, 1.450, 1.479, 1.509, 1.539,

```

```

1.571, 1.605, 1.639, 1.675, 1.712, 1.750, 1.790, 1.831, 1.874, 1.919, 1.965,
2.013, 2.063, 2.115]; % Πίνακας ειδικών απωλειών λειτουργίας εν κενώ [W/kg]
BIL_Voltage_Array = [1100, 3600, 7200, 12000, 17500, 24000]; % Πίνακας
τιμών βασικών στάθμεων μόνωσης [V]
BIL_Array = [10, 40, 60, 75, 95, 125, 170]; %|
[kV]
BIL_Distance_Array = [40, 75, 125, 170]; %|
[kV]
Distance_Array = [6, 14, 19, 48]; %|Πίνακες διάκενων με βάση το
βασικό επίπεδο μόνωσης [mm]
BIL_Distance_Array2 = [10, 40, 75, 125, 170]; %|
[kV]
Distance_Array2 = [1.5, 4.5, 5, 6.9, 10.65]; %|
[mm]
S_N_Array = [25, 30, 50, 63, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 630,
700, 750, 800, 900, 1000, 1200, 1250, 1500, 1600]; % Πίνακας ονομαστικών
φαινομένων ισχύων [KVA]
TotEddy_Array = [8, 10, 20, 25, 35, 55, 85, 140, 180, 210, 300, 380, 550, 665,
730, 775, 875, 1085, 1300, 1690, 1790, 2300, 2440]; % Πίνακας συνολικών
απωλειών δινορρευμάτων [W]
FN_Ducts_Array = [0.25, 0.28, 0.292, 0.3, 0.306, 0.31, 0.313, 0.315, 0.317,
0.318, 0.319, 0.32]; % Πίνακας τιμών για τις μεταβλητές FN_Ducts_LV και
FN_Ducts_HV [-]
AOR_Array = [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45,
46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60]; % Πίνακας τιμών
μέσης αύξησης θερμοκρασίας λαδιού [°C]
TCC_Array = [136.432, 142.636, 148.837, 155.039, 161.241, 165.892, 172.093,
178.295, 182.946, 189.148, 195.349, 201.551, 209.303, 212.404, 220.156,
224.807, 232.559, 238.760, 244.962, 251.163, 257.365, 263.567, 271.318,
277.520, 285.272, 291.474, 297.675, 305.427, 311.628, 319.381, 325.582]; %
Πίνακας τιμών συντελεστών απαγωγής θερμότητας δεξαμενής μέσω συναγωγής [W/m^2]
TRC_Array = [210.853, 220.156, 227.908, 237.210, 244.962, 255.815, 263.567,
272.869, 282.171, 291.474, 300.776, 308.528, 319.381, 328.683, 337.985,
345.737, 356.690, 364.342, 372.094, 384.497, 390.699, 401.552, 412.404,
421.707, 432.559, 443.412, 454.265, 465.118, 474.420, 485.273, 496.125]; %
Πίνακας τιμών συντελεστών απαγωγής θερμότητας δεξαμενής μέσω ακτινοβολίας
[W/m^2]
D_Panel_Array = [40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160,
170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270, 280, 290, 300, 310,
320, 330, 340, 350, 360, 370, 380, 390, 400]; % Πίνακας τιμών για του πλάτους
των αυλακωμένων πάνελ της δεξαμενής [mm]
CPC_35_Array = [276, 264, 253, 245, 238, 232, 227, 223, 219, 215, 212, 208,
206, 203, 201, 198, 196, 194, 192, 190, 189, 187, 186, 184, 182, 181, 180,
179, 177, 176, 175, 174, 173, 172, 171, 170, 169]; % Πίνακας τιμών συντελεστή
απαγωγής θερμότητας μέσω των αυλακωμένων πάνελ για μέση ανύψωση θερμοκρασίας
λαδιού 35°C [W/m^2]
CPC_40_Array = [322, 308, 295, 286, 278, 271, 265, 260, 255, 251, 247, 243,
240, 237, 234, 231, 229, 227, 224, 222, 220, 218, 217, 214, 213, 211, 210,
208, 207, 205, 204, 203, 202, 201, 200, 199, 198]; % Πίνακας τιμών συντελεστή
απαγωγής θερμότητας μέσω των αυλακωμένων πάνελ για μέση ανύψωση θερμοκρασίας
λαδιού 40°C [W/m^2]
CPC_45_Array = [373, 356, 342, 332, 322, 314, 307, 301, 296, 290, 286, 282,
278, 275, 271, 268, 265, 262, 260, 257, 255, 253, 251, 248, 246, 245, 243,
241, 239, 238, 237, 235, 233, 232, 231, 230, 229]; % Πίνακας τιμών συντελεστή
απαγωγής θερμότητας μέσω των αυλακωμένων πάνελ για μέση ανύψωση θερμοκρασίας
λαδιού 45°C [W/m^2]
CPC_50_Array = [425, 406, 390, 378, 367, 358, 350, 343, 337, 331, 326, 321,
317, 313, 309, 305, 302, 299, 296, 293, 291, 288, 286, 283, 281, 279, 277,
275, 273, 271, 270, 268, 266, 265, 263, 262, 261]; % Πίνακας τιμών συντελεστή
απαγωγής θερμότητας μέσω των αυλακωμένων πάνελ για μέση ανύψωση θερμοκρασίας
λαδιού 50°C [W/m^2]
CPC_55_Array = [477, 456, 438, 425, 412, 402, 393, 385, 379, 372, 366, 361,
356, 352, 347, 343, 339, 336, 333, 329, 327, 324, 321, 318, 316, 313, 311,
309, 307, 304, 303, 301, 299, 298, 295, 294, 293]; % Πίνακας τιμών συντελεστή

```

```

απαγωγής θερμότητας μέσω των αυλακωμένων πάνελ για μέση ανύψωση θερμοκρασίας
λαδιού 55°C [W/m^2]
CPC_60_Array = [531, 507, 487, 472, 459, 447, 437, 429, 421, 414, 407, 401,
396, 352, 386, 381, 377, 374, 370, 366, 364, 360, 357, 354, 351, 349, 346,
344, 341, 339, 337, 335, 332, 331, 329, 327, 325]; % Πίνακας τιμών συντελεστή
απαγωγής θερμότητας μέσω των αυλακωμένων πάνελ για μέση ανύψωση θερμοκρασίας
λαδιού 60°C [W/m^2]
Result = 1; % Δείκτης επανάληψης - λύσης
%% Μεταβλητές βελτιστοποίησης και δείκτες επαναλήψεων

min_turns_LV = 5; % Κατώτερο όριο τιμής
max_turns_LV = 25; % Ανώτερο όριο τιμής
i_turns_LV = 10; % Πλήθος επαναλήψεων για διαφορετικές τιμές
% της μεταβλητής βελτιστοποίησης turns_LV

min_D = 180; % Κατώτερο όριο τιμής
max_D = 580; % Ανώτερο όριο τιμής
i_D = 5; % Πλήθος επαναλήψεων για διαφορετικές τιμές
% της μεταβλητής βελτιστοποίησης D

min_FD = 1.2; % Κατώτερο όριο τιμής
max_FD = 1.85; % Ανώτερο όριο τιμής
i_FD = 14; % Πλήθος επαναλήψεων για διαφορετικές τιμές
% της μεταβλητής βελτιστοποίησης FD

i_G = 5; % Πλήθος επαναλήψεων για διαφορετικές τιμές
% της μεταβλητής βελτιστοποίησης G

% Αριθμός στροφών του τυλίγματος X.T.
if i_turns_LV == 1 % Καθορισμός του βήματος για τις στροφές του τυλίγματος
X.T.
    turns_LV_step = 0;
else
    turns_LV_step = ((max_turns_LV - min_turns_LV)/(i_turns_LV - 1));
end
% Πλάτος κορμού του πυρήνα [mm]
if i_D == 1 % Καθορισμός του βήματος για το πλάτος κορμού του πυρήνα
    D_step = 0;
else
    D_step = ((max_D - min_D)/(i_D - 1));
end
% Ένταση μαγνητικού πεδίου [T]
if i_FD == 1 % Καθορισμός του βήματος για την ένταση μαγνητικού πεδίου
    FD_step = 0;
else
    FD_step = ((max_FD - min_FD)/(i_FD - 1));
end
% Ύψος παραθύρου του πυρήνα [mm]
if S_N <= 150 % Καθορισμός του βήματος για το ύψος παραθύρου του πυρήνα
    min_G = 110; % Κατώτερο όριο τιμής
    max_G = 190; % Ανώτερο όριο τιμής
elseif S_N > 160 && S_N <= 250
    min_G = 180; % Κατώτερο όριο τιμής
    max_G = 320; % Ανώτερο όριο τιμής
elseif S_N > 250 && S_N <= 630
    min_G = 210; % Κατώτερο όριο τιμής
    max_G = 350; % Ανώτερο όριο τιμής
elseif S_N > 630 && S_N <= 1000
    min_G = 250; % Κατώτερο όριο τιμής
    max_G = 380; % Ανώτερο όριο τιμής
elseif S_N > 1000 && S_N <= 2000
    min_G = 280; % Κατώτερο όριο τιμής
    max_G = 440; % Ανώτερο όριο τιμής

```

```

end

if i_G == 1
    G_step = 0;
else
    G_step = ((max_G - min_G)/(i_G - 1));
end

%Διατομή του αγωγού X.T.
cs_LV = 10;          % Πλήθος επαναλήψεων για διαφορετικές τιμές
                    % της μεταβλητής βελτιστοποίησης area_LV

% Καθορισμός του βήματος για τη διατομή των αγωγών του τυλίγματος X.T.
if Type_LV == 1 % Για την περίπτωση φύλλων στο τύλιγμα X.T.
    min_t_LV = 1; % Κατώτερο όριο πάχους φύλλου τυλίγματος X.T. [mm]
    max_t_LV = 5; % Ανώτερο όριο πάχους φύλλου τυλίγματος X.T. [mm]
    if cs_LV == 1
        cs_LV_step = 0;
    else
        cs_LV_step = ((max_t_LV - min_t_LV)/(cs_LV - 1));
    end
elseif Type_LV == 2 % Για την περίπτωση στρογγυλών αγωγών στο τύλιγμα X.T.
    min_d_LV = 0.5; % Ορισμός ελάχιστης διαμέτρου αγωγού τυλίγματος X.T. [mm]
    max_d_LV = 5; % Ορισμός μέγιστης διαμέτρου αγωγού τυλίγματος X.T. [mm]
    if cs_LV == 1
        cs_LV_step = 0;
    else
        cs_LV_step = ((max_d_LV - min_d_LV)/(cs_LV - 1));
    end
elseif Type_LV == 3 % Για την περίπτωση ορθογώνιων αγωγών στο τύλιγμα X.T.
    min_d_LV = 0.5; % Ορισμός ελάχιστης διαμέτρου αγωγού τυλίγματος X.T. [mm]
    max_d_LV = 5; % Ορισμός μέγιστης διαμέτρου αγωγού τυλίγματος X.T. [mm]
    if cs_LV == 1
        cs_LV_step = 0;
    else
        cs_LV_step = ((max_d_LV - min_d_LV)/(cs_LV - 1));
    end
end

%Διατομή του αγωγού Y.T.
cs_HV = 10;          % Πλήθος επαναλήψεων για διαφορετικές τιμές στη διάμετρο του
                    % αγωγού του τυλίγματος Y.T.
                    % της μεταβλητής βελτιστοποίησης area_HV

% Καθορισμός του βήματος για τη διατομή των αγωγών του τυλίγματος Y.T.
if Type_HV == 1 % Για την περίπτωση φύλλων στο τύλιγμα Y.T.
    min_t_HV = 0.1; % Κατώτερο όριο πάχους φύλλου τυλίγματος Y.T. [mm]
    max_t_HV = 5; % Ανώτερο όριο πάχους φύλλου τυλίγματος Y.T. [mm]
    if cs_HV == 1
        cs_HV_step = 0;
    else
        cs_HV_step = ((max_t_HV - min_t_HV)/(cs_HV - 1));
    end
elseif Type_HV == 2 % Για την περίπτωση στρογγυλών αγωγών στο τύλιγμα Y.T.
    min_d_HV = 0.05; % Ορισμός ελάχιστης διαμέτρου αγωγού τυλίγματος Y.T. [mm]
    max_d_HV = 5; % Ορισμός μέγιστης διαμέτρου αγωγού τυλίγματος Y.T. [mm]
    if cs_HV == 1
        cs_HV_step = 0;
    else
        cs_HV_step = ((max_d_HV - min_d_HV)/(cs_HV - 1));
    end
elseif Type_HV == 3 % Για την περίπτωση ορθογώνιων αγωγών στο τύλιγμα Y.T.
    min_d_HV = 0.05; % Ορισμός ελάχιστης διαμέτρου αγωγού τυλίγματος Y.T. [mm]

```

```

max_d_HV = 5;      % Ορισμός μέγιστης διαμέτρου αγωγού τυλίγματος Υ.Τ. [mm]
if cs_HV == 1
    cs_HV_step = 0;
else
    cs_HV_step = ((max_d_HV - min_d_HV)/(cs_HV - 1));
end
end

%% Εξαρτημένες μεταβλητές

% Υπολογισμός φασικών - πολικών τάσεων για περίπτωση τριγώνου, αστέρα ή ζιγκ
ζαγκ.
if LVCC == 1 || LVCC == 3      % Περίπτωση αστέρα ή ζιγκ ζαγκ στο τύλιγμα
X.T.
    V_L_LV = V_LVBASE;        % Υπολογισμός πολικής τάσης για το τύλιγμα
X.T. [V]
    V_P_LV = V_LVBASE/sqrt(3); % Υπολογισμός φασικής τάσης για το τύλιγμα
X.T. [V]
elseif LVCC == 2              % Περίπτωση τριγώνου στο τύλιγμα X.T.
    V_L_LV = V_LVBASE;        % Υπολογισμός πολικής τάσης για το τύλιγμα
X.T. [V]
    V_P_LV = V_LVBASE;        % Υπολογισμός φασικής τάσης για το τύλιγμα
X.T. [V]
else
    disp('Λάθος επιλογή συνδεσμολογίας στο τύλιγμα X.T. Επιτρεπτές τιμές 1 -
Αστέρας, 2 - Τρίγωνο, 3 - Ζιγκ ζαγκ.')
    disp('Σημείο return: Εξαρτημένες μεταβλητές - Υπολογισμός φασικών -
πολικών τάσεων τυλίγματος X.T.')
```

return

```

end

I_P_LV = (S_N * 10^(3))/(3 * V_P_LV); % Υπολογισμός εντάσεως ρεύματος στη
φάση του τυλίγματος X.T. [A]

if HVCC == 1 || HVCC == 3      % Περίπτωση αστέρα ή ζιγκ ζαγκ στο τύλιγμα
Y.T.
    V_L_HV1 = V_HV1BASE;      % Υπολογισμός πολικής τάσης για το πρωτεύον
επίπεδο τάσης του τυλίγματος Y.T. [V]
    V_P_HV1 = V_HV1BASE/sqrt(3); % Υπολογισμός φασικής τάσης για το πρωτεύον
επίπεδο τάσης του τυλίγματος Y.T. [V]
    V_L_HV2 = V_HV2BASE;      % Υπολογισμός πολικής τάσης για το δευτερεύον
επίπεδο του τυλίγματος Y.T. [V]
    V_P_HV2 = V_HV2BASE/sqrt(3); % Υπολογισμός φασικής τάσης για το δευτερεύον
επίπεδο του τυλίγματος Y.T. [V]
elseif HVCC == 2              % Περίπτωση τριγώνου στο τύλιγμα Y.T.
    V_L_HV1 = V_HV1BASE;      % Υπολογισμός πολικής τάσης για το πρωτεύον
επίπεδο τάσης του τυλίγματος Y.T. [V]
    V_P_HV1 = V_HV1BASE;      % Υπολογισμός φασικής τάσης για το πρωτεύον
επίπεδο τάσης του τυλίγματος Y.T. [V]
    V_L_HV2 = V_HV2BASE;      % Υπολογισμός πολικής τάσης για το δευτερεύον
επίπεδο του τυλίγματος Y.T. [V]
    V_P_HV2 = V_HV2BASE;      % Υπολογισμός φασικής τάσης για το δευτερεύον
επίπεδο του τυλίγματος Y.T. [V]
else
    dosp('Λάθος επιλογή συνδεσμολογίας στο τύλιγμα Y.T. Επιτρεπτές τιμές 1 -
Αστέρας, 2 - Τρίγωνο, 3 - Ζιγκ ζαγκ.')
    disp('Σημείο return: Εξαρτημένες μεταβλητές - Υπολογισμός φασικών -
πολικών τάσεων τυλίγματος Y.T.')
```

return

```

end

% Υπολογισμός βασικής στάθμης μόνωσης τυλίγματος Υ.Τ. (BIL_LV)
for i = 1:numel(BIL_Voltage Array)
```



```

if i >= 1 && i <= 5
    if V_LVBASE <= BIL_Voltage_Array(i)
        BIL_LV = BIL_Array(i); % [kV]
        break
    end
end

if i == 6
    if V_LVBASE > BIL_Voltage_Array(i-1)
        BIL_LV = BIL_Array(i);
        break
    end
end
end

% Υπολογισμός βασικής στάθμης μόνωσης τυλίγματος X.T. (BIL_HV)
for i = 1:numel(BIL_Voltage_Array)
    if i >= 1 && i <= 5
        if V_HV1BASE*1000 <= BIL_Voltage_Array(i)
            BIL_HV = BIL_Array(i); % [kV]
            break
        end
    end

    if i == 6
        if V_HV1BASE*1000 > BIL_Voltage_Array(i-1)
            BIL_HV = BIL_Array(i); % [kV]
            break
        end
    end
end

% Υπολογισμός απόστασης μεταξύ πυρήνα και τυλιγμάτων X.T. και Y.T. (D_(LV-C))
και (D_(HV-C))
for i = 1:numel(BIL_Distance_Array)
    if BIL_LV <= BIL_Distance_Array(i)
        D_LVC = Distance_Array(i); % [mm]
        break
    end
end

for i = 1:numel(BIL_Distance_Array)
    if BIL_HV <= BIL_Distance_Array(i)
        D_HVC = Distance_Array(i); % [mm]
        break
    end
end

% Υπολογισμός μόνωσης μεταξύ πυρήνα και τυλιγμάτων I_(LV-C),
% I_(HV-C), I_(HV-HV) και I_(HV-LV)
for i = 1:numel(BIL_Distance_Array2)
    if BIL_LV <= BIL_Distance_Array2(i)
        I_LVC = Distance_Array2(i); % [mm]
        break
    end
end

for i = 1:numel(BIL_Distance_Array2)
    if BIL_HV <= BIL_Distance_Array2(i)
        I_HVC = Distance_Array2(i); % [mm]
        I_HVHV = Distance_Array2(i); % [mm]
    end
end

```

```

        I_HVLV = Distance_Array2(i); % [mm]
        break
    end
end
% Υπολογισμός ανοχών και τυχούσες επιμηκύνσεις του πηνίου
if S_N >= 500
    TE = 40;
else
    TE = 25;
end
% Υπολογισμός πάχους μόνωσης των ενδιάμεσων λήψεων του τυλίγματος X.T.
if Taps_HV_min > 0 || Taps_HV_max > 0
    TI_LV = 1.4; % [mm]
else
    TI_LV = 0; % [mm]
end
% Υπολογισμός πάχους μόνωσης των ενδιάμεσων λήψεων του τυλίγματος Y.T.
if Taps_HV_min > 0 || Taps_HV_max > 0
    TI_HV = 1.4; % [mm]
else
    TI_HV = 0; % [mm]
end
% Υπολογισμός του πλάτους των καναλιών.
if S_N <= 160
    D_w = 10; % [mm]
else
    D_w = 15; % [mm]
end
% Υπολογισμός πλάτους καναλιών μαζί με το διάκενο για το τύλιγμα X.T.
if S_N <= 160
    DWPG_LV = 20; % [mm]
else
    DWPG_LV = 25; % [mm]
end
% Υπολογισμός πλάτους καναλιών μαζί με το διάκενο για το τύλιγμα Y.T.
if S_N <= 160
    DWPG_HV = 30; % [mm]
else
    DWPG_HV = 35; % [mm]
end
% Υπολογισμός τάσεως βραχυκύκλωσης
if S_N > 630
    U_k_g = 0.06; % [-]
else
    U_k_g = 0.04; % [-]
end
% Υπολογισμός συντελεστών τυλιγμάτων Y.T και X.T.
if Type_HV == 1 % Στην περίπτωση χάλκινων φύλλων στο τύλιγμα Y.T.
    TDSP_HV = 1; % [-]
    LDSP_HV = 1/1.1; % [-]
elseif Type_HV == 2 || Type_HV == 3 % Στην περίπτωση στρογγυλών ή ορθογώνιων
αγωγών στο τύλιγμα Y.T.
    TDSP_HV = 0.98; % [-]
    LDSP_HV = 1; % [-]
else
    disp('Λάθος επιλογή τύπου αγωγού στο τύλιγμα Y.T. Επιτρεπτές τιμές: 1 -
φύλλα, 2 - στρογγυλοί αγωγού και 3 - ορθογώνιοι αγωγοί.')
    disp('Σημείο return: Υπολογισμός συντελεστών τυλίγματος Y.T')
    return
end

if Type_LV == 1 % Στην περίπτωση χάλκινων φύλλων στο τύλιγμα X.T.
    TDSP_LV = 1; % [-]
    LDSP_LV = 1/1.1; % [-]
end

```

```

elseif Type_LV == 2 || Type_LV == 3 % Στην περίπτωση στρογγυλών ή ορθογώνιων
αγωγών στο τύλιγμα X.T.
    TDSP_LV = 0.98; % [-]
    LDSP_LV = 1; % [-]
else
    disp('Λάθος επιλογή τύπου αγωγού στο τύλιγμα Y.T. Επιτρεπτές τιμές: 1 -
φύλλα, 2 - στρογγυλοί αγωγού και 3 - ορθογώνιοι αγωγοί.')
    disp('Σημείο return: Υπολογισμός συντελεστών τυλίγματος X.T.')
    return
end
% Υπολογισμός ειδική αντίστασης και πυκνότητας μάζας τυλιγμάτων Y.T και X.T.
if HVCM == 1 % Στην περίπτωση χάλκινου αγωγού για το τύλιγμα Y.T.
    g_HV = 8856; % [kg/m^3]
    sr_HV = 0.020968; % [Ω*mm^2]/m
else % Στην περίπτωση αλουμινένιου αγωγού για το τύλιγμα
Y.T.
    g_HV = 2701; % [kg/m^3]
    sr_HV = 0.03433; % [Ω*mm^2]/m
end

if LVCM == 1 % Στην περίπτωση χάλκινου αγωγού για το τύλιγμα X.T.
    g_LV = 8856; % [kg/m^3]
    sr_LV = 0.020968; % [Ω*mm^2]/m
else % Στην περίπτωση αλουμινένιου αγωγού για το τύλιγμα
X.T.
    g_LV = 2701; % [kg/m^3]
    sr_LV = 0.03433; % [Ω*mm^2]/m
end

% Υπολογισμός των συνολικών απωλειών δινορρευμάτων (TotEddy), των
% εγγυημένων απωλειών λειτουργίας εν κενώ (NLL_max) και των εγγυημένων
απωλειών χαλκού (LL_max)
for i = 1:numel(S_N_Array)
    if S_N == S_N_Array(i)
        TotEddy = TotEddy_Array(i);
        break
    elseif i == 23 && TotEddy ~= TotEddy_Array(i)
        disp('Επιλέξτε μίας από τις ακόλουθες τιμές για ονομαστική ισχύ: 25,
30, 50, 63, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 630, 700, 750, 800,
900, 1000, 1200, 1250, 1500 ή 1600.')
        disp('Σημείο Return: Υπολογισμός των συνολικών απωλειών δινορρευμάτων
(TotEddy).')
        return
    end
end

EdL_LV = 0.6 * TotEddy; % Απώλειες δινορρευμάτων στο τύλιγμα X.T. [W]
EdL_HV = 0.4 * TotEddy; % Απώλειες δινορρευμάτων στο τύλιγμα Y.T. [W]

for i_turns_LV_ptr = 1:i_turns_LV % Επανάληψη FOR για τις στροφές του
τυλίγματος X.T.
    turns_LV = round(min_turns_LV + turns_LV_step * (i_turns_LV_ptr - 1));
    for i_D_ptr = 1:i_D % Επανάληψη FOR για το πλάτος του κορμού του
πυρήνα
        D = round(min_D + D_step * (i_D_ptr - 1));
        for i_FD_ptr = 1:i_FD % Επανάληψη FOR για την ένταση μαγνητικού
πεδίου
            FD = round(min_FD + FD_step * (i_FD_ptr - 1), 2);
            for i_G_ptr = 1:i_G % Επανάληψη FOR για το ύψος παραθύρου του
πυρήνα
                G = round(min_G + G_step * (i_G_ptr - 1));
            end
        end
    end
end

```

```

%% §4.3.3 Υπολογισμός τάσης ανά στροφή τυλίγματος και πάχος στηρίγματος του
πυρήνα

    if LVCC == 1 || LVCC == 2 % Στη περίπτωση συνδεσμολογίας
αστέρα ή τριγώνου στο τύλιγμα X.T.
        VPT = V_P_LV/turns_LV; % Τάση ανά στροφή τυλίγματος
[V/Turn]
        E_u = round(10^(3)*(VPT/(8.88 * CSF * D * FD * f * 10^(-
3))))); %Πάχος στηρίγματος του πυρήνα [mm]
        elseif LVCC == 3 % Στη περίπτωση συνδεσμολογίας ζιγκ ζαγκ στο
τύλιγμα X.T.
            VPT = (V_P_LV/turns_LV) * (2/sqrt(3)); % Τάση ανά στροφή
τυλίγματος [V/Turn]
            E_u = round(10^(3)*((VPT)/(8.88 * CSF * D * FD * f * 10^(-
3)))) * (2/sqrt(3)); % Πάχος στηρίγματος του πυρήνα [mm]
            else
                disp('Λάθος επιλογή συνδεσμολογίας στο τύλιγμα Y.T.
Επιτρεπτές τιμές 1 - Αστέρας, 2 - Τρίγωνο, 3 - Ζιγκ ζαγκ.')
                disp('Σημείο Return: 4.3.3.')
                return
            end

        for i_cs_LV_ptr = 1:cs_LV % Επανάληψη για το πλήθος των
διαφορετικών τιμών στη διατομή του αγωγού του τυλίγματος X.T.
            if Type_LV == 1
                t_LV = round(min_t_LV + cs_LV_step * (i_cs_LV_ptr -
1),2); % [mm]
            elseif Type_LV == 2 || Type_LV == 3
                d_LV = round(min_d_LV + cs_LV_step * (i_cs_LV_ptr -
1),2); % [mm]
            end

            for i_cs_HV_ptr = 1:cs_HV % Επανάληψη για το πλήθος των
διαφορετικών τιμών στη διατομή του αγωγού του τυλίγματος Y.T.
                if Type_HV == 1
                    t_HV = round(min_t_HV + cs_HV_step * (i_cs_HV_ptr
- 1),2); % [mm]
                elseif Type_HV == 2 || Type_HV == 3
                    d_HV = round(min_d_HV + cs_HV_step * (i_cs_HV_ptr
- 1),2); % [mm]
                end

%% §4.3.4 Υπολογισμός του πάχους μόνωσης μεταξύ των στρώσεων των αγωγών των
τυλιγμάτων

%Υπολογίζεται στην παράγραφο §4.3.5.

%% §4.3.5 Υπολογισμός διαστάσεων τυλιγμάτων και πυρήνα
% Τύλιγμα X.T
TurnsMain_LV = turns_LV; % Υπολογισμός κύριων στροφών
για το τύλιγμα X.T. [-]
TD_LV = G - 2 * CCEE - 2 * D_LVC; % Υπολογισμός του
ύψους του τυλίγματος X.T. [mm]

        for i = 1:numel(I_VL) % Υπολογισμός του πάχους
μόνωσης μεταξύ των στρώσεων των αγωγών των τυλίγματος X.T.
            I_LVL = I_VL(i);

            if Type_LV == 1 %Για φύλλα
                TurnWidth_LV = TD_LV; % Υπολογισμός του
πλάτους της στροφής του τυλίγματος X.T. [mm]

```

```

TurnsPerLayer_LV = 1; % Υπολογισμός στροφών
ανά στρώση στο τύλιγμα X.T. [-]
Layers_LV =
ceil(TurnsMain_LV/TurnsPerLayer_LV); % Υπολογισμός πλήθους στρώσεων στο
τύλιγμα X.T. [-]
BLD_LV = (t_LV + I_LVL) *
((Layers_LV)/(LDSP_LV)); % Υπολογισμός συνολικού πάχους τυλίγματος X.T χωρίς
τις εξωτερικές μονώσεις [mm]

elseif Type_LV == 2 %Για στρογγυλούς αγωγούς
if d_LV <= 0.06
%
Dd_LV = I_LVL * (0.0191667 * d_LV -
1.66667 * 10^(-4)) * 0.92; %
elseif d_LV > 0.06 && d_LV <= 0.2
%
Dd_LV = I_LVL * (0.097619 * d_LV + 5.47619
* 10^(-3)) * 0.92; %
elseif d_LV > 0.2 && d_LV <= 1
%
Dd_LV = I_LVL * (0.0375 * d_LV + 0.0185) *
0.92; % Υπολογισμός μόνωσης στρογγυλού αγωγού του τυλίγματος
X.T.
elseif d_LV > 1 && d_LV <= 2.5
%
Dd_LV = I_LVL * (0.01177788 * d_LV +
0.039222) * 0.92; %
elseif d_LV > 2.5
%
Dd_LV = I_LVL * (0.0075556 * d_LV +
0.0497778) * 0.92; %
end
TurnWidth_LV = d_LV + Dd_LV; % Υπολογισμός του
πλάτους της στροφής του τυλίγματος X.T. [mm]
TurnsPerLayer_LV = ((TD_LV/TurnWidth_LV) - 1)
* TDSP_LV; % Υπολογισμός στροφών ανά στρώση στο τύλιγμα X.T. [-]
Layers_LV =
ceil(TurnsMain_LV/TurnsPerLayer_LV); % Υπολογισμός πλήθους στρώσεων στο
τύλιγμα X.T. [-]
BLD_LV = (TurnWidth_LV + I_LVL) *
(Layers_LV/LDSP_LV) + TI_LV; % Υπολογισμός συνολικού πάχους τυλίγματος X.T
χωρίς τις εξωτερικές μονώσεις [mm]
elseif Type_LV == 3 %Για ορθογώνιους αγωγούς
DW_LV = (I_LVL + 1) / 20; % Υπολογισμός
μόνωσης ορθογώνιου αγωγού [mm]
Strap_thickness_LV =
sqrt(d_LV/Strap_ratio_LV); % Υπολογισμός πάχους ορθογώνιου αγωγού [mm]
Strap_width_LV = Strap_ratio_LV *
Strap_thickness_LV; % Υπολογισμός πλάτους ορθογώνιου αγωγού [mm]
TurnWidth_LV = Strap_width_LV + DW_LV; %
Υπολογισμός του πλάτους της στροφής του τυλίγματος X.T. [mm]
TurnThick_LV = Strap_thickness_LV + DW_LV; %
Υπολογισμός του πάχους της στροφής του τυλίγματος X.T. [mm]
TurnsPerLayer_LV = ((TD_LV/TurnWidth_LV) - 1)
* TDSP_LV; % Υπολογισμός στροφών ανά στρώση στο τύλιγμα X.T. [-]
Layers_LV =
ceil(TurnsMain_LV/TurnsPerLayer_LV); % Υπολογισμός πλήθους στρώσεων στο
τύλιγμα X.T. [-]
BLD_LV = (TurnThick_LV + I_LVL) *
((Layers_LV/LDSP_LV) + TI_LV); % Συνολικό πάχος τυλίγματος X.T χωρίς τις
εξωτερικές μονώσεις [mm]
end

```

```

        Induced_LV = VPT * 2 * TurnsPerLayer_LV * 2 * 10^(-
3); % Υπολογισμός επαγόμενης τάσης στο τύλιγμα X.T. [kV]
        Impulse_LV = (2 * BIL_LV *
TurnsPerLayer_LV)/turns_LV; % Υπολογισμός κρουστικής τάσης στο
τύλιγμα X.T. [kV]

        Induced_LV_max = Induced_max(i);
        Impulse_LV_max = Impulse_max(i);
        if Induced_LV < Induced_LV_max && Impulse_LV <
Impulse_LV_max % Περιορισμός αντοχής επαγόμενης και κρουστικής τάσης στο
τύλιγμα X.T.
                break
        end
    end

    SPLD_LV = BLD_LV + I_LVC + I_HVLV; % Υπολογισμός
συνολικού πάχους τυλίγματος X.T [mm]

    % Τύλιγμα Y.T
    V_P_HV1_max = V_P_HV1 * (1 + Taps_HV_max); %
Υπολογισμός μέγιστης φασικής τάσης στο τύλιγμα Y.T. για το πρωτεύον επίπεδο
τάσης [V]
    V_P_HV1_min = V_P_HV1 * (1 - Taps_HV_min); %
Υπολογισμός ελάχιστης φασικής τάσης στο τύλιγμα Y.T. για το πρωτεύον επίπεδο
τάσης [V]
    Turns_HV1_max = round(V_P_HV1_max * 1000)/(VPT); %
Υπολογισμός στροφών στο τύλιγμα Y.T. για δεδομένη τάση V_P_HV1_max [-]
    TurnsMain_HV = Turns_HV1_max *
(V_P_HV1)/(V_P_HV1_max); % Υπολογισμός συνολικών στροφών στο τύλιγμα Y.T. [-]
    TD_HV = G - 2 * CCEE - 2 * D_HVC; % Υπολογισμός του
ύψους του τυλίγματος X.T. [mm]
    X = V_HV1BASE/V_HV2BASE; % Καθορισμός πλήθους πηνίων
στο τύλιγμα

    for y = 1:numel(I_VL) % Υπολογισμός του πάχους μόνωσης
μεταξύ των στρώσεων των αγωγών των τυλίγματος Y.T.
        I_HVL = I_VL(y);

        if Type_HV == 1 % Για φύλλα
            TurnWidth_HV = TD_HV; % Υπολογισμός του πλάτους
της στροφής του τυλίγματος Y.T. [mm]
            TurnsPerLayer_HV = 1; % Υπολογισμός στροφών ανά
στρώση στο τύλιγμα Y.T. [-]
            TurnsPerLayer_HVsubcoil = 1; % Υπολογισμός στροφών
ανά στρώση στο υποπηνίο του τυλίγματος Y.T. [-]
            Layers_HV = TurnsMain_HV/TurnsPerLayer_HV; %
Υπολογισμός πλήθους στρώσεων στο τύλιγμα Y.T. [-]
            BLD_HV = (t_HV + I_HVL) * ((Layers_HV)/(LDSP_HV));
% Συνολικό πάχος τυλίγματος Y.T χωρίς τις εξωτερικές μονώσεις [mm]
            elseif Type_HV == 2 % Για στρογγυλούς αγωγούς
                if d_HV <= 0.06
                    %
                    Dd_HV = I_HVL * (0.0191667 * d_HV - 1.66667 *
10^(-4)) * 0.92; %
                    elseif d_HV > 0.06 && d_HV <= 0.2
                    %
                    Dd_HV = I_HVL * (0.097619 * d_HV + 5.47619 *
10^(-3)) * 0.92; %
                    elseif d_HV > 0.2 && d_HV <= 1
                    % Υπολογισμός μόνωσης στρογγυλού αγωγού του τυλίγματος Y.T.
                    Dd_HV = I_HVL * (0.0375 * d_HV + 0.0185) *
0.92; %

```



```

elseif d_HV > 1 && d_HV <= 2.5
%
Dd_HV = I_HVL * (0.01177788 * d_HV + 0.039222)
* 0.92; %
elseif d_HV > 2.5
%
Dd_HV = I_HVL * (0.0075556 * d_HV + 0.0497778)
* 0.92; %
end
TurnWidth_HV = d_HV + Dd_HV; % Υπολογισμός του
πλάτους της στροφής του τυλίγματος Y.T. [mm]
TurnsPerLayer_HV = ((TD_HV/TurnWidth_HV) - 1) *
TDSP_HV; % Υπολογισμός στροφών ανά στρώση στο τύλιγμα Y.T. [-]
TurnsPerLayer_HVsubcoil =
round((TurnsPerLayer_HV)/(X)); % Υπολογισμός στροφών ανά στρώση στο υποπηνίο
του τυλίγματος Y.T. [-]
TurnsPerLayer_HV = TurnsPerLayer_HVsubcoil * X; %
Υπολογισμός στροφών ανά στρώση στο τύλιγμα Y.T. [-]
Layers_HV = ceil(Turns_HV1_max /
TurnsPerLayer_HV); % Υπολογισμός πλήθους στρώσεων στο τύλιγμα Y.T. [-]
BLD_HV = (TurnWidth_HV + I_HVL) *
(Layers_HV/LDSP_HV) + TI_HV; % Συνολικό πάχος τυλίγματος Y.T χωρίς τις
εξωτερικές μονώσεις [mm]
elseif Type_HV == 3 % Για ορθογώνιους αγωγούς
DW_HV = (I_HVL + 1) / 20; % Πάχος μόνωσης
ορθογώνιου αγωγού [mm]
Strap_thickness_HV = sqrt(d_HV/Strap_ratio_HV); %
Υπολογισμός πάχους ορθογώνιου αγωγού [mm]
Strap_width_HV = Strap_ratio_HV *
Strap_thickness_HV; % Υπολογισμός πλάτους ορθογώνιου αγωγού [mm]
TurnWidth_HV = Strap_width_HV + DW_HV; %
Υπολογισμός του πλάτους της στροφής του τυλίγματος X.T. [mm]
TurnThick_HV = Strap_thickness_HV + DW_HV; %
Υπολογισμός του πάχους της στροφής του τυλίγματος X.T. [mm]
TurnsPerLayer_HV = ((TD_HV/TurnWidth_HV) - 1) *
TDSP_HV; % Υπολογισμός στροφών ανά στρώση στο τύλιγμα Y.T. [-]
TurnsPerLayer_HVsubcoil =
round((TurnsPerLayer_HV)/(X)); % Υπολογισμός στροφών ανά στρώση στο υποπηνίο
του τυλίγματος Y.T. [-]
TurnsPerLayer_HV = TurnsPerLayer_HVsubcoil * X; %
Υπολογισμός στροφών ανά στρώση στο τύλιγμα Y.T. [-]
Layers_HV = ceil(Turns_HV1_max /
TurnsPerLayer_HV); % Υπολογισμός πλήθους στρώσεων στο τύλιγμα Y.T. [-]
BLD_HV = (TurnThick_HV + I_HVL) *
((Layers_HV/LDSP_HV) + TI_HV); % Συνολικό πάχος τυλίγματος Y.T χωρίς τις
εξωτερικές μονώσεις [mm]
end

Induced_HV = VPT * 2 * TurnsPerLayer_HV * 2 * 10^(-3);
Impulse_HV = ((2 * BIL_HV *
TurnsPerLayer_HV)/(TurnsMain_HV * V_P_HV1_min)/TurnsPerLayer_HV);

Induced_HV_max = Induced_max(y); % Υπολογισμός
επαγόμενης τάσης στο τύλιγμα Y.T. [kV]
Impulse_HV_max = Impulse_max(y); % Υπολογισμός
κρουστικής τάσης στο τύλιγμα Y.T. [kV]
if Induced_HV < Induced_HV_max && Impulse_HV <
Impulse_HV_max % Περιορισμός αντοχής επαγόμενης και κρουστικής τάσης στο
τύλιγμα Y.T.
break
end
end
end

```

```

SPLD_HV = BLD_HV + I_HVHV; % Υπολογισμός συνολικού
πάχους τυλίγματος X.T [mm]
F1 = SPLD_LV + SPLD_HV; % Υπολογισμός του πλάτους
παραθύρου του μικρού πυρήνα [mm]
F2 = 2 * F1; % Υπολογισμός του πλάτους παραθύρου του
μεγάλου πυρήνα [mm]

%% §4.3.6 Υπολογισμός μάζας πυρήνα και απωλειών λειτουργίας εν κενώ

CMT1 = 2 * (F1 + G) + 2 * pi * ((E_u/2) + 3.5) - 8 *
3.5; % Υπολογισμός του μέσου μήκους της καθε στροφής του μικρού πυρήνα [mm]
CMT2 = 2 * (F2 + G) + 2 * pi * ((E_u/2) + 3.5) - 8 *
3.5; % Υπολογισμός του μέσου μήκους της καθε στροφής του μεγάλου πυρήνα [mm]
SCW = 10^(-9) * CMT1 * D * E_u * CSF * g_MM; %
Υπολογισμός της μάζας του μικρού πυρήνα [kg]
LCW = 10^(-9) * CMT2 * D * E_u * CSF * g_MM; %
Υπολογισμός της μάζας του μεγάλου πυρήνα [kg]
w_3 = 2 * (SCW + LCW); % Υπολογισμός της μάζας του
σιδηρομαγνητικού υλικού [kg]

% Ορισμός συντελεστή απαγωγής θερμότητας δεξαμενής
μέσω των αυλακωμένων πάνελ [W/m^2]
for i = 1:numel(SNLL_TF_Array)
    if FD == min_FD + 0.01 * (i-1);
        SNLL_TF = SNLL_TF_Array(i);
        break
    end
end
%SNLL_TF = SNLL_TF_Array(i_FD_ptr); % Ορίζεται
ανάλογα από την FD τιμή
NLL = w_3 * SNLL_TF; % Υπολογισμός των απωλειών
λειτουργίας εν κενώ του μετασχηματιστή [W]

if NLL > 1.15 * NLL_max % Περιορισμός απωλειών εν
κενώ
    continue
end

%% §4.3.7 Υπολογισμός του επαγωγικού μέρους της τάσης βραχυκύκλωσης

ML = D + 2 * CCEE; % Υπολογισμός του μήκους πηνίου
[mm]
MW = 2 * E_u + K; % Υπολογισμός του πλάτους πηνίου
[mm]
DMC = (2 * (ML + MW) - 10.992)/2; % Υπολογισμός
ισοδύναμης διαμέτρου των πηνίων [mm]
D3 = DMC + 2 * I_LVC; % Υπολογισμός ισοδύναμης
εξωτερικής διαμέτρου D3 του τυλίγματος X.T. [mm]
A3 = (pi * (D3)^2)/4; % Υπολογισμός αντίστοιχου
εμβαδού A3 της διαμέτρου D3 [mm^2]
D5 = D3 + 2 * BLD_LV; % Υπολογισμός ισοδύναμης
εξωτερικής διαμέτρου D5 του τυλίγματος X.T. [mm]
A5 = (pi * (D5)^2)/4; % Υπολογισμός αντίστοιχου
εμβαδού A3 της διαμέτρου D5 [mm^2]
LG_LV = MW; % Υπολογισμός του μήκους των διαμορφωμένων
ελασμάτων αγωγών λαδιού του τυλίγματος X.T. [mm]
A6 = Ducts_LV * d_ducts_LV * LG_LV * 2; % Υπολογισμός
της ψυκτικής επιφάνειας των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού του
τυλίγματος X.T. [mm^2]
A7 = A5 + A6; % Υπολογισμός της επιφάνειας A7 του
τυλίγματος X.T. [mm^2]
D7 = 2 * sqrt(A7/pi); % Υπολογισμός της αντίστοιχης
διαμέτρου D7 του εμβαδού A7 [mm]

```

```

D9 = D7 + 2 * I_HVLV; % Υπολογισμός της διαμέτρου D9
[mm]
A9 = (pi * (D9)^2)/4; % Υπολογισμός του αντίστοιχου
εμβαδού A9 της διαμέτρου D9 [mm^2]
D11 = D9 + 2 * BLD_HV; % Υπολογισμός εξωτερικής
διαμέτρου D11 [mm]
A11 = (pi * (D11)^2)/4; % Υπολογισμός του αντίστοιχου
εμβαδού A11 της διαμέτρου D11 [mm^2]
LG_HV = LG_LV + 2 * BLD_LV + 2 * I_HVLV; % Υπολογισμός
του μήκους των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού του τυλίγματος Y.T. [mm]
A12 = Ducts_HV * d_ducts_HV * LG_HV * 2; % Υπολογισμός
της ψυκτικής επιφάνειας των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού του
τυλίγματος Y.T. [mm^2]
A13 = A11 + A12; % Υπολογισμός της επιφάνειας A13
[mm^2]
D13 = 2 * sqrt(A13/pi); % Υπολογισμός της αντίστοιχης
διαμέτρου D13 του εμβαδού A13 [mm]
k_L = (-2 * sqrt(A3) + sqrt(A7) + sqrt(A9))/(3.54 *
TD_LV); % Υπολογισμός συντελεστή k_L [-]
L17 = ((k_L)^2 + k_L + 1) * TD_LV; % Υπολογισμός
μεταβλητής L17 [mm]
k_P = (2 * sqrt(A13) - sqrt(A7) - sqrt(A9))/(3.54 *
TD_HV); % Υπολογισμός συντελεστή k_P [-]
L21 = ((k_P)^2 + k_P + 1) * TD_HV; % Υπολογισμός
μεταβλητής L21 [mm]
LH23 = L17 + L21; % Υπολογισμός της μεταβλητής LH23
[mm]
L25 = ((A5 - A3) * 10^(-6) * 0.396)/(L17 * 10^(-3)) *
m_0; % Υπολογισμός της επαγωγής L25 [H]
L26 = ((A11 - A9) * 10^(-6) * 0.396)/(L21 * 10^(-3)) *
m_0; % Υπολογισμός της επαγωγής L26 [H]
L27 = ((A9 - A7) * 10^(-6) * 2)/(LH23 * 10^(-3)) *
m_0; % Υπολογισμός της επαγωγής L27 [H]
FN_Ducts_LV = 0;
for i = 1:numel(FN_Ducts_Array) % Ορισμός της σταθεράς
FN_Ducts_LV για τα διαμορφωμένα ελάσματα αγωγών λαδιού του τυλίγματος X.T.
if Ducts_LV >= 11
FN_Ducts_LV = FN_Ducts_Array(12);
elseif Ducts_LV == i
FN_Ducts_LV = FN_Ducts_Array(i);
elseif i == 12 && FN_Ducts_LV == 0
disp('Πρέπει να επιλεγθεί ακέραια θετική τιμή
στην τιμή FN_Ducts_LV')
disp('Σημείο return: 4.3.7')
return
end
end
L28 = ((A6 * 10^(-6) * FN_Ducts_LV)/(L17 * 10^(-3))) *
m_0; % Υπολογισμός της επαγωγής L28 [H]
FN_Ducts_HV = 0;
for i = 1:numel(FN_Ducts_Array) % Ορισμός της σταθεράς
FN_Ducts_LV για τα διαμορφωμένα ελάσματα αγωγών λαδιού του τυλίγματος Y.T.
if Ducts_HV >= 11
FN_Ducts_HV = FN_Ducts_Array(12);
elseif Ducts_HV == i
FN_Ducts_HV = FN_Ducts_Array(i);
elseif i == 12 && FN_Ducts_HV == 0
disp('Πρέπει να επιλεγθεί ακέραια θετική τιμή
στην τιμή FN_Ducts_HV')
disp('Σημείο return: 4.3.7')
return
end
end
end

```

```

L29 = ((A12 * 10^(-6) * FN_Ducts_HV)/(L21 * 10^(-3))) *
m_0; % Υπολογισμός της επαγωγής L29 [H]
L_tot = L25 + L26 + L27 + L28 + L29; % Υπολογισμός της
συνολικής επαγωγής L_tot [H]
IX = (I_P_LV * 2 * pi * f * (turns_LV)^2 *
L_tot)/V_P_LV; % Υπολογισμός του επαγωγικού μέρους της τάσης βραχυκυκλώσεως [-
]

%% §4.3.8 Υπολογισμός των απωλειών χαλκού

MT_LV = ((D3 + D7)/2)*pi; % Υπολογισμός του μέσο
μήκους των στροφών του τυλίγματος X.T. [mm]
CL_LV = MT_LV * 10^(-3) * Layers_LV * 3; % Υπολογισμός
του συνολικού μήκους του τυλίγματος X.T. [m]

% Υπολογισμός διατομής αγωγού τυλίγματος X.T.
if Type_LV == 1 % Στην περίπτωση φύλλου
    area_LV = TurnWidth_LV * t_LV;
elseif Type_LV == 2 || Type_LV == 3 % Στην περίπτωση
στρογγυλού ή ορθογώνιου αγωγού
    area_LV = (pi * (d_LV)^2)/4;
end

R_LV = (sr_LV * (CL_LV/3))/area_LV; % Υπολογισμός
ωμικής αντίστασης του τυλίγματος Y.T. [Ω]
LL_LV = 3 * R_LV * (I_P_LV)^2 * 1.04; % Υπολογισμός
απωλειών χαλκού του τυλίγματος Y.T. [W]
MT_HV = ((D9 + D13)/2) * pi; % Υπολογισμός του μέσου
μήκους των στροφών του τυλίγματος Y.T. [mm]
CL_HV1 = MT_HV * 10^(-3) * TurnsMain_HV * 3; %
Υπολογισμός του συνολικού μήκους του τυλίγματος Y.T. [m]

% Υπολογισμός διατομής αγωγού τυλίγματος Y.T.
if Type_HV == 1 % Στην περίπτωση φύλλου
    area_HV = TurnWidth_HV * t_HV;
elseif Type_HV == 2 || Type_HV == 3 % Στην περίπτωση
στρογγυλού ή ορθογώνιου αγωγού
    area_HV = (pi * (d_HV)^2)/4;
end

R_HV1 = (sr_HV*(CL_HV1/3))/area_HV; % Υπολογισμός
ωμικής αντίστασης του τυλίγματος Y.T. για το πρωτεύον επίπεδο τάσης [Ω]
I_P_HV1 = (S_N * 10^(3))/(3 * V_P_HV1 * 1000); %
Υπολογισμός έντασης ρεύματος στη φάση του τυλίγματος Y.T. για το πρωτεύον
επίπεδο τάσης [A]
LL_HV = 3 * R_HV1 * (I_P_HV1)^2 * 1.06; % Υπολογισμός
απωλειών χαλκού του τυλίγματος Y.T. για το πρωτεύον επίπεδο τάσης [W]
LL_1 = LL_LV + LL_HV + EdL_LV + EdL_HV; % Συνολικές
απώλειες λειτουργίας υπό φορτίο για το πρωτεύον επίπεδο τάσης στο τύλιγμα Y.T.
[W]
TTL_G = NLL_max + LL_max; % Εγγυημένες συνολικές
απώλειες λειτουργίας του μετασχηματιστή [W]
TTL_1 = NLL + LL_1; % Συνολικές απώλειες λειτουργίας
του μετασχηματιστή [W]

if LL_1 > 1.15 * LL_max || TTL_1 > 1.1 * TTL_G %
Περιορισμός απωλειών χαλκού και συνολικών απωλειών για το πρωτεύον επίπεδο
τάσης του τυλίγματος Y.T.
    continue
end

```

```

V_P_HV_2_min = V_P_HV2 * (1 - Taps_HV_min); %
Υπολογισμός ελάχιστης φασικής τάσης του τυλίγματος Υ.Τ. για το δευτερεύον
επίπεδο τάσης [V]
Turns_HV_2_min = TurnsMain_HV *
(V_P_HV_2_min/V_P_HV1); % Υπολογισμός στροφών που αναλογούν στην τάση
V_P_HV_2_min [-]
CL_HV_2_min = MT_HV * 10^(-3) * Turns_HV_2_min * 3; %
Υπολογισμός του συνολικού μήκους του τυλίγματος Υ.Τ. με δεδομένη τάση
V_P_HV_2_min [m]
R_HV_2_min = (sr_HV * ((CL_HV_2_min)/3))/area_HV; %
Υπολογισμός ωμικής αντίστασης του τυλίγματος Υ.Τ. με δεδομένη τάση
V_P_HV_2_min [Ω]
I_P_HV2 = (S_N * 10^(3))/(3 * V_P_HV2 * 1000); %
Υπολογισμός έντασης ρεύματος στη φάση του τυλίγματος Υ.Τ. για το δευτερεύον
επίπεδο τάσης [A]
I_P_HV2_min = I_P_HV2/3; % Υπολογισμός ελάχιστης
έντασης ρεύματος στη φάση του τυλίγματος Υ.Τ. για δεδομένη τάση V_P_HV_2_min
[A]
LL_HV_2_min = X * 3 * R_HV_2_min * (I_P_HV2_min)^2 *
1.06; % Υπολογισμός απωλειών χαλκού του τυλίγματος Υ.Τ. για δεδομένη τάση
V_P_HV_2_min [W]
LL_2 = LL_LV + LL_HV_2_min + EdL_LV + EdL_HV; %
Συνολικές απώλειες λειτουργίας υπό φορτίο για το δευτερεύον επίπεδο τάση στο
τύλιγμα Υ.Τ [W]
TTL_2 = NLL + LL_2; % [W]

if LL_2 > 1.15 * LL_max || TTL_2 > 1.1 * TTL_G %
Περιορισμός απωλειών χαλκού και συνολικών απωλειών για το δευτερεύον επίπεδο
τάσης του τυλίγματος Υ.Τ.
    continue
end

w_1 = CL_LV * area_LV * g_LV * 1.05 * 10^(-6); %
Υπολογισμός της μάζας του τυλίγματος Χ.Τ. [kg]
w_2 = CL_HV1 * (1 + Taps_HV_max) * area_HV * g_HV *
1.08 * 10^(-6); % Υπολογισμός της μάζας του τυλίγματος Υ.Τ. [kg]

%% §4.3.9 Υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσης

IR = (LL_1/(S_N * 10^(3))); % Υπολογισμός του ωμικού
μέρους της τάσης βραχυκύκλωσης [-]
U_k = sqrt(IR^(2) + IX^(2)); % Υπολογισμός της τάσης
βραχυκύκλωσης [-]

if U_k > 1.1 * U_k_g % Περιορισμός τάσεως
βραχυκύκλωσης
    continue
end

if U_k < 0.9 * U_k_g % Περιορισμός τάσεως
βραχυκύκλωσης
    continue
end

%% §4.3.10 Υπολογισμός του μήκους τυλιγμάτων

TCD = 2 * Ducts_LV * d_ducts_LV + 2 * Ducts_HV *
d_ducts_HV; % Υπολογισμός του συνολικού πάχους των διαμορφωμένων ελασμάτων
αγωγών λαδιού [mm]
OLI_LV = I_LVC + I_LVL; % Υπολογισμός επικάλυψης
μονωτικού χαρτιού I_LVC μαζί με την μόνωση της στρώσης του τυλίγματος Χ.Τ.
[mm]

```

```

OLI_HV = Layers_HV * I_HVL; % Υπολογισμός επικάλυψης
μόνωσης στο τύλιγμα Y.T. [mm]

% Υπολογισμός συνολικού πάχους ακροδεκτών τυλίγματος
X.T.
if Type_LV == 1 % Στην περίπτωση φύλλων
    LeadThick_LV = 1.1 * area_LV * (2 / (2 * E_u *
K)); % Πάχος ακροδεκτών τυλίγματος X.T. [mm]
    if LVCC == 3 % Στην περίπτωση συνδεσμολογίας ζιγκ
- ζαγκ στο τύλιγμα X.T.
        Leads_LV = 4; % Πλήθος ακροδεκτών στο τύλιγμα
X.T. [-]
    else % Στις περιπτώσεις συνδεσμολογίας αστέρα ή
τριγώνου
        Leads_LV = 2; % Πλήθος ακροδεκτών στο τύλιγμα
X.T. [-]
    end
    TLT_LV = Leads_LV * (LeadThick_LV + 2 * 0.8 + 4 *
0.41);
elseif Type_LV == 2 % Στην περίπτωση στρογγυλών αγωγών
    LeadThick_LV = d_LV; % Πάχος ακροδεκτών τυλίγματος
X.T. [mm]
    Leads_LV = 3; % Πλήθος ακροδεκτών στο τύλιγμα X.T.
[-]
    TLT_LV = Leads_LV * (LeadThick_LV + 4 * 0.41); %
Συνολικό πάχος ακροδεκτών τυλίγματος X.T. [mm]
elseif Type_LV == 3 % Στην περίπτωση ορθογώνιων αγωγών
    LeadThick_LV = Strap_thickness_LV; % Πάχος
ακροδεκτών τυλίγματος X.T. [mm]
    Leads_LV = 3; % Πλήθος ακροδεκτών στο τύλιγμα
X.T. [-]
    TLT_LV = Leads_LV * (LeadThick_LV + 4 * 0.41); %
Συνολικό πάχος ακροδεκτών τυλίγματος X.T. [mm]
end

% Υπολογισμός συνολικού πάχους ακροδεκτών τυλίγματος
X.T.
if Type_HV == 1 % Στην περίπτωση φύλλων
    LeadThick_HV = 1.1 * area_HV * (2 / (2 * E_u *
K)); % Συνολικό πάχος ακροδεκτών τυλίγματος Y.T. [mm]
    if HVCC == 3 % Στην περίπτωση συνδεσμολογίας ζιγκ
- ζαγκ στο τύλιγμα Y.T.
        Leads_HV = 4; % Πλήθος ακροδεκτών στο τύλιγμα
X.T. [-]
    else
        Leads_HV = 2; % Πλήθος ακροδεκτών στο τύλιγμα
X.T. [-]
    end
    TLT_HV = Leads_HV * (LeadThick_HV + 2 * 0.8 + 4 *
0.41); % Συνολικό πάχος ακροδεκτών τυλίγματος Y.T. [mm]
elseif Type_HV == 2 % Στην περίπτωση στρογγυλών αγωγών
    LeadThick_HV = d_HV; % Πάχος ακροδεκτών τυλίγματος
Y.T. [mm]
    Leads_HV = 3; % Πλήθος ακροδεκτών στο τύλιγμα Y.T.
[-]
    TLT_HV = Leads_HV * (LeadThick_HV + 4 * 0.41); %
Συνολικό πάχος ακροδεκτών τυλίγματος Y.T. [mm]
elseif Type_HV == 3 % Στην περίπτωση ορθογώνιων αγωγών
    LeadThick_HV = Strap_thickness_HV; % Πάχος
ακροδεκτών τυλίγματος Y.T. [mm]
    Leads_HV = 3; % Πλήθος ακροδεκτών στο τύλιγμα Y.T.
[-]

```

```

        TLT_HV = Leads_HV * (LeadThick_HV + 4 * 0.41); %
Συνολικό πάχος ακροδεκτών τυλίγματος Υ.Τ. [mm]
        end

        TLC = ML + 2 * F1 + TCD + TLT_LV + TLT_HV + OLI_LV +
OLI_HV + TE; % Υπολογισμός συνολικού μήκους πηνίου [mm]

        %% §4.3.11 Υπολογισμός διαστάσεων δεξαμενής

        TL = 2 * (4 * E_u + 3 * F1 + K) + K + 108; %
Υπολογισμός μήκους δεξαμενής [mm]

        if TL > TL_max % Περιορισμός μέγιστων διαστάσεων
δεξαμενής
            continue
        end

        TW = TLC + 38; % Υπολογισμός πλάτους δεξαμενής [mm]

        if TW > TW_max % Περιορισμός μέγιστων διαστάσεων
δεξαμενής
            continue
        end

        TH_min = G + 2 * E_u + 350; % Υπολογισμός ύψους
δεξαμενής [mm]
        TH = round((TH_min + 235)); % Προσθήκη ανοχών στο ύψος
της δεξαμενής για εσωτερικό εξοπλισμό [mm]

        if TH > TH_max % Περιορισμός μέγιστων διαστάσεων
δεξαμενής
            continue
        end

        OH = TH; % Ορισμός ύψους λαδιού [mm]

        %% §4.3.12 Υπολογισμός ανύψωσης θερμοκρασίας των τυλιγμάτων και του λαδιού

        DuctArea_LV = Ducts_LV * 2 * 2 * MW * TD_LV; %
Υπολογισμός επιφάνειας διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού για το τύλιγμα
Χ.Τ. [mm^2]
        GapDuctArea_LV = D7 * pi * TD_LV; % Υπολογισμός
επιφάνειας διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο κενό για το τύλιγμα Χ.Τ.
[mm^2]
        TotalDuctArea_LV = DuctArea_LV + GapDuctArea_LV; %
Υπολογισμός συνολικής επιφάνειας διαμορφωμένων αγωγών λαδιού για το τύλιγμα
Χ.Τ. [mm^2]
        CoilLoss_LV = (LL_LV + EdL_LV)/3; % Υπολογισμός
θερμικών απωλειών τυλίγματος Χ.Τ. για κάθε φάση [W]
        LPS_LV = CoilLoss_LV/TotalDuctArea_LV; % Υπολογισμός
θερμικών απωλειών ανά μονάδα επιφάνειας των διαμορφωμένων ελασμάτων για το
τύλιγμα Χ.Τ. [W/mm^2]
        ACR = t_w_max - t_a_max; % Υπολογισμός μέσης αύξησης
θερμοκρασίας χαλκού [°C]
        Gra_LV = 10 * LPS_LV + 0.9; % Υπολογισμός διαφορικού
θερμοκρασίας τυλίγματος Χ.Τ. [°C]
        AvGra_LV = 2.09 * Gra_LV; % Υπολογισμός μέσου
διαφορικού θερμοκρασίας τυλίγματος Χ.Τ. [°C]

        if AvGra_LV > Gra_LV_max % Περιορισμός αύξησης
θερμοκρασίας

```



```

        continue
    end

    DuctArea_HV = Ducts_HV * 2 * 2 * LG_HV * TD_HV; %
    Υπολογισμός επιφάνειας διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού για το τύλιγμα
    Υ.Τ. [mm^2]

    GapDuctArea_HV = D7 * pi * TD_HV; % Υπολογισμός
    επιφάνειας διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο κενό για το τύλιγμα Υ.Τ.
    [mm^2]

    TotalDuctArea_HV = DuctArea_HV + GapDuctArea_HV; %
    Υπολογισμός συνολικής επιφάνειας διαμορφωμένων αγωγών λαδιού για το τύλιγμα
    Υ.Τ. [mm^2]

    CoilLoss_HV = (LL_HV_2_min + EdL_HV)/3; % Υπολογισμός
    θερμικών απωλειών τυλίγματος Υ.Τ. για κάθε φάση [W]
    LPS_HV = CoilLoss_HV/TotalDuctArea_HV; % Υπολογισμός
    θερμικών απωλειών ανά μονάδα επιφάνειας των διαμορφωμένων ελασμάτων για το
    τύλιγμα Χ.Τ. [W/mm^2]

    Gra_HV = 10 * LPS_HV + 0.9; % Υπολογισμός διαφορικού
    θερμοκρασίας τυλίγματος Υ.Τ. [°C]
    AvGra_HV = 2.09 * Gra_HV; % Υπολογισμός μέσου
    διαφορικού θερμοκρασίας τυλίγματος Υ.Τ. [°C]

    if AvGra_HV > Gra_HV_max % Περιορισμός αύξησης
    θερμοκρασίας

        continue
    end

    AOR = round(ACR - max(AvGra_LV, AvGra_HV)); %
    Υπολογισμός μέσης αύξησης θερμοκρασίας του λαδιού [°C]

%% §4.3.13 Υπολογισμός απαγωγής θερμότητας

    TCA = (2 * (TL + TW) * TH + 2 * TL * TW) * 10^(-6); %
    Υπολογισμός ψυκτικής επιφάνειας της δεξαμενής μέσω συναγωγής [m^2]

    for i = 1:numel(AOR_Array)
        if AOR == AOR_Array(i)
            TCC = TCC_Array(i); % Καθορισμός συντελεστή
            απαγωγής θερμότητας της δεξαμενής μέσω συναγωγής [W/m^2]
            TRC = TRC_Array(i); % Καθορισμός συντελεστή
            απαγωγής θερμότητας της δεξαμενής μέσω ακτινοβολίας [W/m^2]
        elseif AOR > AOR_Array(i)
            TCC = TCC_Array(numel(TCC_Array)); %
            Καθορισμός συντελεστή απαγωγής θερμότητας της δεξαμενής μέσω συναγωγής [W/m^2]
            TRC = TRC_Array(numel(TRC_Array)); %
            Καθορισμός συντελεστή απαγωγής θερμότητας της δεξαμενής μέσω ακτινοβολίας
            [W/m^2]
        end
    end

    for i_D_Panel = 1:numel(D_Panel_Array) % Χρήση
    πολλαπλών τιμών D_Panel έτσι ώστε να ικανοποιείται ο περιορισμός: TLRTT <
    max(TTL_1, TTL_2)

        D_Panel = D_Panel_Array(i);

        TCL = TCA * TCC; % Υπολογισμός απαγωγής θερμότητας
        από την δεξαμενή του μετασχηματιστή μέσω συναγωγής [W]
        TRA = ((2 * (TL + TW) + 4 * D_Panel * sqrt(2)) *
        OH) * 10^(-6); % Υπολογισμός ψυκτικής επιφάνειας της δεξαμενής μέσω
        ακτινοβολίας [m^2]

        TRL = TRA * TRC; % Υπολογισμός απαγωγής θερμότητας
        από τη δεξαμενή του μετασχηματιστή μέσω ακτινοβολίας [W]

```

```

NCPTL = round((TL - 60)/Pitch) + 1; % Υπολογισμός
πλήθους αυλακωμένων πάνελ στην κατά μήκος πλευρά της δεξαμενής του
μετασχηματιστή [-]
NCPTW = round((TW - 60)/Pitch) + 1; % Υπολογισμός
πλήθους αυλακωμένων πάνελ στην κατά πλάτος πλευρά της δεξαμενής του
μετασχηματιστή [-]
NCP = 2 * (NCPTL + NCPTW); % Υπολογισμός συνολικού
πλήθους αυλακωμένων πάνελ [-]
CPA = (2 * D_Panel * HCP * NCP) * 10^(-6); %
Υπολογισμός ψυκτικής επιφάνειας αυλακωμένων πάνελ. [m^2]

% Ορισμός συντελεστή απαγωγής θερμότητας δεξαμενής
μέσω των αυλακωμένων πάνελ [W/m^2]
if AOR == 35
    for y = 1:numel(D_Panel_Array)
        if D_Panel == D_Panel_Array(y)
            CPC = CPC_35_Array(y);
            break
        end
    end
elseif AOR == 40
    for y = 1:numel(D_Panel_Array)
        if D_Panel == D_Panel_Array(y)
            CPC = CPC_40_Array(y);
            break
        end
    end
elseif AOR == 45
    for y = 1:numel(D_Panel_Array)
        if D_Panel == D_Panel_Array(y)
            CPC = CPC_45_Array(y);
            break
        end
    end
elseif AOR == 50
    for y = 1:numel(D_Panel_Array)
        if D_Panel == D_Panel_Array(y)
            CPC = CPC_50_Array(y);
            break
        end
    end
elseif AOR == 55
    for y = 1:numel(D_Panel_Array)
        if D_Panel == D_Panel_Array(y)
            CPC = CPC_55_Array(y);
            break
        end
    end
elseif AOR == 60 || AOR > 60
    for y = 1:numel(D_Panel_Array)
        if D_Panel == D_Panel_Array(y)
            CPC = CPC_60_Array(y);
            break
        end
    end
elseif AOR > 35 && AOR < 40 % Σε αυτή την
περίπτωση και τις παρακάτω υπολογίζεται η ενδιάμεση τιμή με γραμμική
παρεμβολή.
    for y = 1:numel(D_Panel_Array)
        if D_Panel == D_Panel_Array(y)
            CPC = (CPC_35_Array(y) * 0.2 * (40 -
AOR)) + (CPC_40_Array(y) * (1 - 0.2 * (40 - AOR)));
            break
        end
    end

```

```

        end
        elseif AOR > 40 && AOR < 45
            for y = 1:numel(D_Panel_Array)
                if D_Panel == D_Panel_Array(y)
                    CPC = (CPC_40_Array(y) * 0.2 * (45 -
AOR)) + (CPC_45_Array(y) * (1 - 0.2 * (45 - AOR)));
                    break
                end
            end
        elseif AOR > 45 && AOR < 50
            for y = 1:numel(D_Panel_Array)
                if D_Panel == D_Panel_Array(y)
                    CPC = (CPC_45_Array(y) * 0.2 * (50 -
AOR)) + (CPC_50_Array(y) * (1 - 0.2 * (50 - AOR)));
                    break
                end
            end
        elseif AOR > 50 && AOR < 55
            for y = 1:numel(D_Panel_Array)
                if D_Panel == D_Panel_Array(y)
                    CPC = (CPC_50_Array(y) * 0.2 * (55 -
AOR)) + (CPC_55_Array(y) * (1 - 0.2 * (55 - AOR)));
                    break
                end
            end
        elseif AOR > 55 && AOR < 60
            for y = 1:numel(D_Panel_Array)
                if D_Panel == D_Panel_Array(y)
                    CPC = (CPC_55_Array(y) * 0.2 * (60 -
AOR)) + (CPC_60_Array(y) * (1 - 0.2 * (60 - AOR)));
                    break
                end
            end
        end
        end

        CPL = CPA * CPC; % Υπολογισμός απαγωγής θερμότητας
        μέσω των αυλακωμένων πάνελ της δεξαμενής του μετασχηματιστή [W]
        TLRTT = TCL + TRL + CPL; % Επίπεδα θερμότητας που
        μπορεί να απάγει η δεξαμενή του μετασχηματιστή [W]
        TTL_2 = NLL + LL_2; % Συνολικές απώλειες
        μετασχηματιστή κατά την λειτουργία στο πρωτεύον επίπεδο Υ.Τ. [W]
        TTL_1 = NLL + LL_1; % Συνολικές απώλειες
        μετασχηματιστή κατά την λειτουργία στο δευτερεύον επίπεδο Υ.Τ. [W]

        if max(TTL_1, TTL_2) > TLRTT % Περιορισμός
        μετάδοσης θερμότητας
            continue
        end
    end

%% §4.3.14 Υπολογισμός της μάζας των μονωτικών υλικών

    S_LVTP = (MW * (G - 2 * CCEE) + D3 * pi * (G - 2 *
CCEE)) * 10^(-6);
    S_LVLI = (MT_LV * (G - 2 * CCEE) * Layers_LV) * 10^(-
6);
    S_LVEDI = (MW * (G - 2 * CCEE) * Ducts_LV * 2) * 10^(-
6);
    S_LVPDI = (D7 * pi * (G - 2 * CCEE)) * 10^(-6);
    S_LVEPI = (2 * 2 * pi * D13 * ((G - 2 * CCEE) + 1.8 *
BLD_HV)) * 10^(-6);
    NPGI = ceil((I_HVLV - d_ducts_LV - (2 * 0.41))/I_HVL);
    S_LVGI = (D7 * pi * (G - 2 * CCEE) * NPGI) * 10^(-6);

```

```

S_HVLI = (MT_HV * ((G - 2 * CCEE) + 4 * 19) *
Layers_HV * 1.25) * 10^(-6);
S_HVEDI = (LG_HV * (G - 2 * CCEE) * Ducts_HV * 2) *
10^(-6);
S_HVPDI = (D13 * pi * (G - 2 * CCEE) * 10^(-6));
S_HVSub = (MT_HV * (G - 2 * CCEE) * 5) * 10^(-6);
NPEGI = ceil((I_HVHV - d_ducts_HV - 2 * 0.41)/I_HVL);
S_HVGI = (D13 * pi * (G - 2 * CCEE) * NPEGI) * 10^(-
6);
S_HVIBP = (MT_HV * 40 * Layers_HV) * 10^(-6);
WIM_15 = 3 * 1.1 * g_IN_15 * (S_LVTP + S_HVIBP); %
Υπολογισμός μάζας μονωτικών υλικών με πάχος 1.5 mm [kg]
WIM_041 = 3 * 1.1 * g_IN_041 * (S_LVEPI); %
Υπολογισμός μάζας μονωτικών υλικών με πάχος 0.41 mm [kg]
WIM_028 = 3 * 1.1 * g_IN_028 * (S_LVLI + S_LVGI +
S_HVLI + S_HVSub + S_LVGI); % Υπολογισμός μάζας μονωτικών υλικών με πάχος
0.28 mm [kg]
WIM_015 = 3 * 1.1 * g_IN_015 * (S_LVEDI + S_LVPDI +
S_HVEDI + S_HVPDI); % Υπολογισμός μάζας μονωτικών υλικών με πάχος 0.15 mm
[kg]
w_4 = WIM_15 + WIM_041 + WIM_028 + WIM_015; %
Υπολογισμός συνολικής μάζας μονωτικών υλικών [kg]

%% §4.3.15 Υπολογισμός του μάζας των διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού

N_1 = ceil((MW * Ducts_LV * 2)/DWPG_LV); % Υπολογισμός
πλήθους διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο τύλιγμα X.T. [-]
N_2 = ceil((pi*D7)/DWPG_LV); % Υπολογισμός πλήθους
περιμετρικών διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο τύλιγμα X.T. [-]
N_3 = ceil(((MW + 2 * BLD_LV)/DWPG_HV)*Ducts_HV * 2);
% Υπολογισμός πλήθους διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο τύλιγμα Y.T.
[-]
N_4 = ceil((pi * D13)/DWPG_HV) ; % Υπολογισμός πλήθους
περιμετρικών διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού στο τύλιγμα X.T. [-]
w_5 = 10^(-6) * 3 * 1.1 * g_DS * ((N_1 + N_2 + N_3 +
N_4) * (G - 2 * CCEE) * D_w * T_DS); % Υπολογισμός της μάζας των διαμορφωμένων
ελασμάτων αγωγών λαδιού [kg]

%% §4.3.16 Υπολογισμός του μάζας του λαδιού

V_CP = 8 * HCP * D_Panel * NCP * 10^(-6); %
Υπολογισμός όγκου αυλακωμένων πάνελ [Litre]
V_Wd = ((w_1/g_LV) + (w_2/g_HV)) * 1000; %
Υπολογισμός όγκου τυλιγμάτων X.T. και Y.T.[Litre]
V_MM = 1000 * (w_3/g_MM); % Υπολογισμός όγκου
σιδηρομαγνητικού υλικού [Litre]
V_T = TL * TW * OH * 10^(-6); % Υπολογισμός όγκου
δεξαμενής μετασχηματιστή [Litre]
if V_CT_i == 1 % Στην περίπτωση που υπάρχει δοχείο
διαστολής με όγκο V_CT
V_O = (V_T + V_CT + V_CP - V_Wd - V_MM)/1000; %
Υπολογισμός όγκου λαδιού [Litre]
elseif V_CT_i == 0 % Στην περίπτωση που δεν υπάρχει
δοχείο διαστολής
V_O = (V_T + V_CP - V_Wd - V_MM)/1000; %
Υπολογισμός όγκου λαδιού [Litre]
else
fprintf('Επιτρεπτές τιμές στη μεταβλητή: 1 - με
δοχείο διαστολής, 0 - χωρίς δοχείο διαστολής \n')
end
w_6 = 0.95 * g_O * V_O; % Υπολογισμός μάζας λαδιού
μετασχηματιστή [kg]

```

```

%% §4.3.17 Υπολογισμός του μάζας των μεταλλικών φύλλων
w_7 = g_CP * ((2 * (TW/1000 * TL/1000)) + (2 *
(TW/1000 * TH/1000)) + (2 * (TL/1000 * TH/1000))); % [kg]

%% §4.3.18 Υπολογισμός του μάζας των αυλακωμένων πάνελ δεξαμενής
w_8 = g_CP * CPA; % [kg]

%% §4.3.19 Υπολογισμός του κόστους των κύριων υλικών
C_1 = uc_1 * w_1; % Υπολογισμός του κόστους του
τυλίγματος Χ.Τ.
C_2 = uc_2 * w_2; % Υπολογισμός του κόστους του
τυλίγματος Υ.Τ.
C_3 = uc_3 * w_3; % Υπολογισμός του κόστους του
σιδηρομαγνητικού υλικού
C_4 = uc_4 * w_4; % Υπολογισμός του κόστους των
μονωτικών υλικών
C_5 = uc_5 * w_5; % Υπολογισμός του κόστους των
διαμορφωμένων ελασμάτων αγωγών λαδιού
C_6 = uc_6 * w_6; % Υπολογισμός του κόστους του
λαδιού της δεξαμενής
C_7 = uc_7 * w_7; % Υπολογισμός του κόστους των
μεταλλικών φύλλων
C_8 = uc_8 * w_8; % Υπολογισμός του κόστους των
αυλακωμένων πάνελ της δεξαμενής
CMM = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8;
% Υπολογισμός του κόστους των κύριων υλικών

%% §4.3.20 Υπολογισμός του κόστους κατοχής
CM = CMM + CRM; % Υπολογισμός του κόστους των
υλικών [€]
CTM = CM + C_Lab; % Υπολογισμός του κόστους
κατασκευής [€]
BP = CTM / (1 - SM); % Υπολογισμός της τιμής προσφοράς
[€]
MS = BP - CTM; % Υπολογισμός του περιθωρίου
κέρδους [€]
C_KA = (C_KA_f) / (1 + interest)^(years); % Υπολογισμός
του κόστους απομάκρυνσης σε τωρινή αξία [€]
TOC = BP + A * NLL + B * LL_1 + C_KA; % Υπολογισμός
του συνολικού κόστους κατοχής

%% Αποθήκευση - εμφάνιση αποτελεσμάτων
turns_LV_result(Result) = turns_LV;
turns_LV_result = turns_LV_result.';

D_result(Result) = D;
D_result = D_result.';

FD_result(Result) = FD;
FD_result = FD_result.';

G_result(Result) = G;
G_result = G_result.';

area_LV_result(Result) = area_LV;
area_LV_result = area_LV_result.';

```

```

        area_HV_result(Result) = area_HV;
        area_HV_result = area_HV_result.';

        NLL_result(Result) = NLL;
        NLL_result = NLL_result.';

        LL_1_result(Result) = LL_1;
        LL_1_result = LL_1_result.';

        U_k_result(Result) = U_k;
        U_k_result = U_k_result.';

        TOC_result(Result) = TOC;
        TOC_result = TOC_result.';

        Result = Result + 1;

        Results2 = table(turns_LV_result, D_result, FD_result,
G_result, area_LV_result, area_HV_result, NLL_result, LL_1_result, U_k_result,
TOC_result);
        Results = sortrows(Results2,{'TOC_result'},
{'ascend'});
        end
    end
end
end
end
end
end

```