

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
Αριθμός 1332**

**ΤΙΤΛΟΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ  
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:  
ΚΟΥΡΚΟΥΤΙΑΔΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ  
ΓΡΙΒΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:  
ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ ΙΟΥΝΙΟΣ 2013**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η εξαγωγή των στοιχείων του ισοδυνάμου κυκλώματος τριφασικού μετασχηματιστή (ΜΣ). Για το σκοπό αυτό διεξήχθησαν πειράματα ανοικτού κυκλώματος (εν κενώ λειτουργία) και πειράματα βραχυκύκλωσης σε τέσσερις τριφασικούς μετασχηματιστές που βρίσκονται στο εργαστήριο των Ηλεκτρικών Μηχανών του τμήματος Ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ Πατρών.

Με το πείραμα βραχυκύκλωσης εξάγονται τα οριζόντια στοιχεία του ισοδυνάμου κυκλώματος. Με το πείραμα ανοικτού κυκλώματος εξάγονται τα κάθετα στοιχεία του ισοδυνάμου κυκλώματος, δηλαδή η αντίδραση  $X_M$  και η αντίσταση  $R_C$ .

Αξίζει να σημειωθεί πως τα παραπάνω πειράματα είναι δυνατόν να διεξαχθούν και από την πλευρά του δευτερεύοντος αν αυτό είναι βολικότερο από πλευράς επιπέδου τάσεως. Στην περίπτωση αυτή οι τιμές των στοιχείων που υπολογίζονται αναφέρονται στη πλευρά του δευτερεύοντος και όχι στην πλευρά του πρωτεύοντος.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η εξαγωγή των στοιχείων του ισοδυνάμου κυκλώματος τριφασικού μετασχηματιστή (ΜΣ). Για το σκοπό αυτό διεξήχθησαν πειράματα ανοικτού κυκλώματος (εν κενώ λειτουργία) και πειράματα βραχυκύκλωσης σε τέσσερις τριφασικούς μετασχηματιστές που βρίσκονται στο εργαστήριο των Ηλεκτρικών Μηχανών του τμήματος Ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ Πατρών.

Με το πείραμα βραχυκύκλωσης εξάγονται τα οριζόντια στοιχεία του ισοδυνάμου κυκλώματος, δηλαδή η ισοδύναμη ωμική αντίσταση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος κυκλώματος,  $R_{eq}$  καθώς και η ισοδύναμη αυτεπαγωγή  $X_{eq}$  η οποία αντιστοιχεί στις ροές διαρροής πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Κατά τη διαδικασία του πειράματος βραχυκύκλωσης, τα άκρα του δευτερεύοντος κυκλώματος βραχυκυκλώνονται παρεμβάλλοντας ένα αμπερόμετρο, ενώ στο πρωτεύον εφαρμόζεται τάση με αρκετά χαμηλή τιμή μέχρι η ένδειξη του αμπερομέτρου να γίνει ίση με την ονομαστική ένταση δευτερεύοντος. Κατόπιν μετρούνται η τάση, το ρεύμα και η ισχύς εισόδου.

Με το πείραμα ανοικτού κυκλώματος εξάγονται τα κάθετα στοιχεία του ισοδυνάμου κυκλώματος, δηλαδή η αντίδραση  $X_M$  και η αντίσταση  $R_C$ . Η αντίδραση  $X_M$  είναι ανάλογη με το ρεύμα μαγνήτισης του μετασχηματιστή που προκύπτει με βάση της τάση που εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή (στην ακόρεστη περιοχή λειτουργίας). Η αντίσταση  $R_C$  είναι ανάλογη του ρεύματος απωλειών του πυρήνα του μετασχηματιστή. Κατά το πείραμα ανοικτού κυκλώματος στο δευτερεύον του ΜΣ δεν συνδέεται κανένα φορτίο, ενώ στο πρωτεύον του εφαρμόζεται τάση με τιμή ίση με την ονομαστική τάση εισόδου. Και σε αυτό το πείραμα μετρούνται η τάση, το ρεύμα και η ισχύς εισόδου.

Αξίζει να σημειωθεί πως τα παραπάνω πειράματα είναι δυνατόν να διεξαχθούν και από την πλευρά του δευτερεύοντος αν αυτό είναι βολικότερο από πλευράς επιπέδου τάσεως. Στην περίπτωση αυτή οι τιμές των στοιχείων που υπολογίζονται αναφέρονται στη πλευρά του δευτερεύοντος και όχι στην πλευρά του πρωτεύοντος.

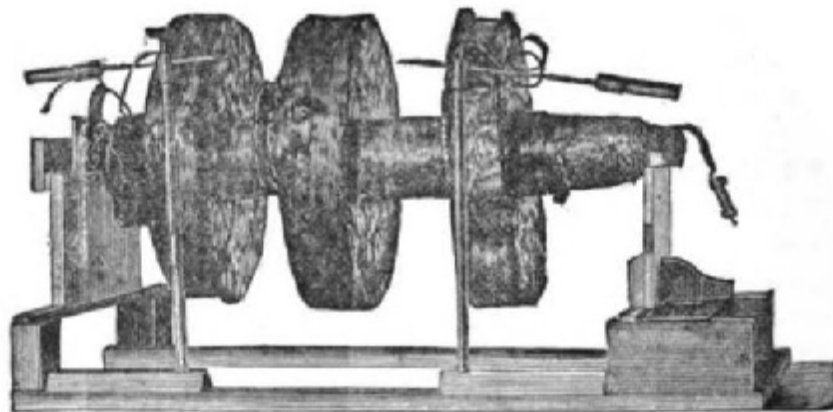
## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	ii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1_ Ηλεκτρομαγνητισμός – Γενικές Αρχές .....	4
1.1 Νόμος των ΒΙΟΤ-SAVART .....	4
1.2 Το μαγνητικό πεδίο .....	5
1.3 Μεγέθη του Μαγνητικού Πεδίου .....	7
1.4 Μαγνητική Αντίσταση – Μαγνητικό Κύκλωμα .....	9
1.5 Καμπύλη Μαγνήτισης .....	10
1.6 Βρόχος Υστέρησης .....	12
1.7 Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή .....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2_ Περιγραφή και αρχή λειτουργίας του Μετασχηματιστή .....	16
2.1 Γενικές αρχές λειτουργίας .....	16
2.2 Ο σιδηροπυρήνας του μετασχηματιστή - κατασκευαστικά χαρακτηριστικά .....	17
2.3 Είδη Μετασχηματιστών .....	18
2.3.1 Μετασχηματιστές τροφοδοσίας .....	18
2.3.1.1 Χρήση μετασχηματιστών τροφοδοσίας .....	19
2.3.2 Μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων .....	20
2.3.3 Αυτομετασχηματιστές .....	20
2.3.4 Μετασχηματιστές ρεύματος .....	20
2.3.5 Μετασχηματιστές υψηλής τάσης .....	21
2.4 Ο ιδανικός Μετασχηματιστής .....	21
2.4.1 Ο ιδανικός μετασχηματιστής εν κενώ .....	22
2.4.2 Ο ιδανικός Μετασχηματιστής υπό φορτίο .....	26
2.5 Ισοδύναμο Πραγματικού Μονοφασικού Μετασχηματιστή για τη μόνιμη Κατάσταση .....	27
2.6 Ροή Σκέδασης .....	28
2.7 Απώλειες Χαλκού .....	28
2.8 Απώλειες υστέρησης .....	29
2.9 Απώλειες Δινορευμάτων .....	30
2.10 Μαγνητικό κύκλωμα πυρήνα μονοφασικού μετασχηματιστή .....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3_ Τριφασικός Μετασχηματιστής .....	35
3.1 Συνδεσμολογίες .....	35
3.2 Τριφασικοί μετασχηματιστές που περιλαμβάνουν μόνο δύο μετασχηματιστές .....	42
3.3 Αστέρας .....	42
3.4 Τρίγωνο .....	43
3.5 Τεθλασμένος αστέρας .....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4_ Πειραματική Διαδικασία – Μετρήσεις .....	44
4.1 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας .....	44
4.1.1 Πείραμα Ανοικτού Κυκλώματος .....	44
4.1.2 Πείραμα Βραχυκύκλωσης .....	44
4.2 Μετρήσεις και Εξαγωγή Ισοδύναμου Κυκλώματος του 1 <sup>ου</sup> Μετασχηματιστή .....	45
4.2.1 Πείραμα Ανοικτού Κυκλώματος .....	46
4.2.2 Πείραμα Βραχυκύκλωσης .....	47
4.3 Μετρήσεις και Εξαγωγή Ισοδύναμου Κυκλώματος του 2 <sup>ου</sup> Μετασχηματιστή (EDUTECH) .....	48
4.3.1 Πείραμα Ανοικτού Κυκλώματος .....	49
4.3.2 Πείραμα Βραχυκύκλωσης .....	50

4.5 Μετρήσεις και Εξαγωγή Ισοδύναμου Κυκλώματος του 3 <sup>ου</sup> Μετασχηματιστή (ATELCO) .....	51
4.4.1 Πείραμα Ανοικτού Κυκλώματος .....	52
4.4.2 Πείραμα Βραχυκύκλωσης.....	53
4.5 Μετρήσεις και Εξαγωγή Ισοδύναμου Κυκλώματος του 4 <sup>ου</sup> Μετασχηματιστή .....	54
4.5.1 Πείραμα Ανοικτού Κυκλώματος .....	55
4.5.2 Πείραμα Βραχυκύκλωσης.....	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	58

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή διατυπώθηκε το 1831 από τον Μάικλ Φαραντέι, αν και την χρησιμοποίησε μόνο για επίδειξη των αρχών της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, χωρίς να προβλέψει την πρακτική της σημασία. Ο πρώτος μετασχηματιστής σε ευρεία χρήση ήταν το πηνίο επαγωγής, το οποίο εφηύρε ο Ιρλανδός κληρικός Νίκολας Κάλαν το 1836. Ήταν ένας από τους πρώτους που κατάλαβαν την αρχή πως όσο περισσότερες περιελίξεις έχει το τυλίγμα ενός μετασχηματιστή, τόσο μεγαλύτερη ηλεκτρεγερτική δύναμη παράγει. Τα πηνία επαγωγής δημιουργήθηκαν από τις προσπάθειες των επιστημόνων για παροχή υψηλότερων τάσεων από μπαταρίες. Δεν τροφοδοτούνταν από εναλλασσόμενο ρεύμα, αλλά από συνεχές, προερχόμενο από μπαταρίες, το οποίο διακόπτονταν από ένα δονούμενο διακοπτικό μηχανισμό. Μεταξύ 1830-1870 οι προσπάθειες για δημιουργία καλύτερων επαγωγικών πηνίων, κυρίως με τη μέθοδο της συνεχούς δοκιμής και λάθους (trial and error), αποκάλυψαν σταδιακά τις βασικές αρχές της λειτουργίας του μετασχηματιστή. Αποδοτικοί σχεδιασμοί δεν ανακαλύφθηκαν παρά μετά το 1880, όμως μέσα σε λιγότερο από μια δεκαετία, ο μετασχηματιστής αποδείχτηκε ουσιώδης στην επικράτηση των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος έναντι αυτών του συνεχούς, θέση την οποία κρατούν μέχρι και σήμερα.



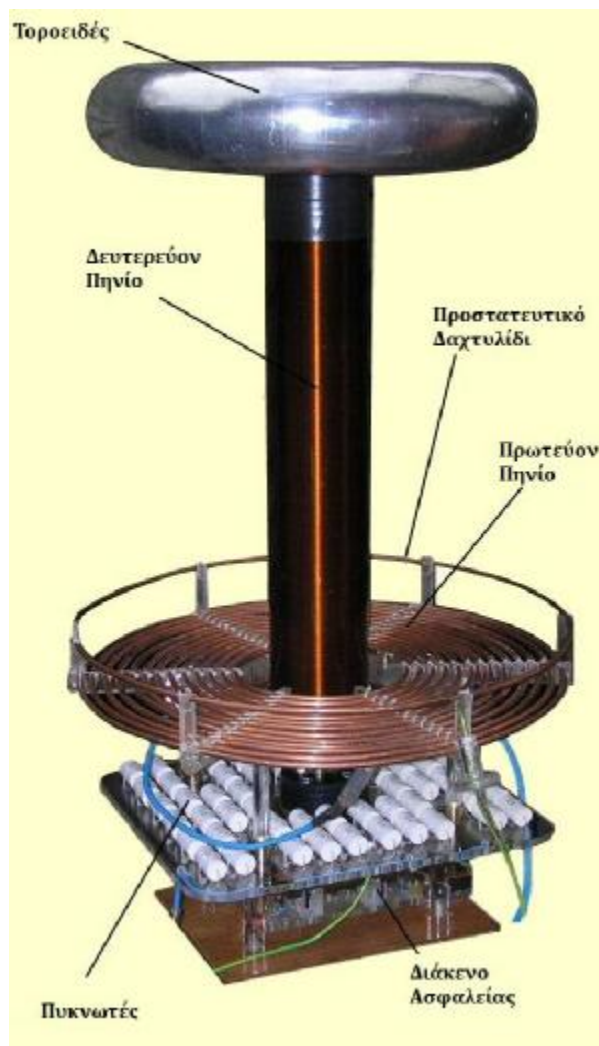
**Εικόνα 1:** Το πηνίο του Κάλαν, 1836 <sup>[1]</sup>

Ο Ρώσος μηχανικός Πάβελ Γιαμπλότσκοφ εφηύρε το 1876 ένα σύστημα φωτισμού, βασισμένο σε ένα σύνολο από πηνία επαγωγής, όπου τα πρωτεύοντα τυλίγματα ήταν συνδεδεμένα σε πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ τα δευτερεύοντα μπορούσαν να συνδεθούν σε αρκετά "κεριά Γιαμπλότσκοφ" (είδος ηλεκτρικού λαμπτήρα τόξου). Στην πατέντα ισχυριζόταν ότι το σύστημα μπορούσε να "παρέχει ανεξάρτητα ισχύ σε διάφορους λαμπτήρες, με διαφορετική ισχύ φωτεινότητας, από μία πηγή ηλεκτρικής ισχύος". Προφανώς, το πηνίο επαγωγής σε αυτό το σύστημα λειτουργούσε ως μετασχηματιστής.

Οι Λουσιέν Γκολάρ και Τζον Ντίξον Γκιμπς επέδειξαν πρώτοι το 1882 στο Λονδίνο μια συσκευή με ανοιχτό πυρήνα σιδήρου που αποκαλούσαν "δευτερεύουσα γεννήτρια", ιδέα που πούλησαν στη συνέχεια στην αμερικανική εταιρεία Westinghouse. Την ίδια συσκευή επέδειξαν και το 1884 στο Τορίνο, όπου υιοθετήθηκε για ένα ηλεκτρικό σύστημα φωτισμού.

Οι Ούγγροι μηχανικοί Κάρολι Ζιπερνόφσκι, Όττο Μπλάθι και Μίσα Ντέρι, από την εταιρεία Γκαντζ στην Βουδαπέστη δημιούργησαν το αποδοτικό μοντέλο κλειστού πυρήνα "ZBD" το 1885, βασισμένοι σε ένα σχέδιο των Γκολάρ και Γκιμπς.

Ένας φυσικός της Westinghouse, ο Ουίλλιαμ Στάνλεϊ, δημιούργησε την πρώτη εμπορική υλοποίηση μετασχηματιστή το 1885, μετά την αγορά από τον Τζορτζ Ουέστινγκχαους των πατεντών των Γκολάρ και Γκιμπς. Ο πυρήνας ήταν κατασκευασμένος από πλάκες σιδήρου σχήματος "E", οι οποίες έμπαιναν η μία μέσα στην άλλη. Αυτό το σχέδιο χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1886. Η αίτηση ευρεσιτεχνίας έκανε για πρώτη φορά αναφορά στη λέξη "μετασχηματιστής". Ο Ρώσος μηχανικός Μικαΐλ Ντόλιβο-Ντομπροβόλσκι ανέπτυξε τον πρώτο τριφασικό μετασχηματιστή το 1889.



**Εικόνα 2:** Το πηνίο Tesla<sup>[2]</sup>

Το 1891 ο Νίκολα Τέσλα εφηύρε το πηνίο Τέσλα, έναν μετασχηματιστή συντονισμού με πυρήνα αέρα, για την παραγωγή πολύ υψηλών τάσεων σε υψηλές συχνότητες. Μετασχηματιστές ακουστών συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκαν για τα πρώτα πειράματα της ανάπτυξης του τηλεφώνου. Παρότι νέες τεχνολογίες έχουν καταστήσει τους μετασχηματιστές ξεπερασμένους για ορισμένες ηλεκτρονικές εφαρμογές, μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται ακόμα σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές. Οι μετασχηματιστές είναι

επίσης βασικοί στην μετάδοση ρευμάτων υψηλής τάσης, τεχνική που κάνει οικονομικά βιώσιμη τη μετάδοση ηλεκτρικής ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις.

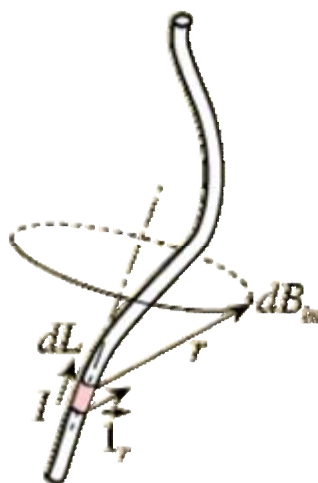


# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Ηλεκτρομαγνητισμός – Γενικές Αρχές

### 1.1 Νόμος των BIOT-SAVART

Βασιζόμενοι στις πειραματικές τους μετρήσεις, οι Biot και Savart κατέληξαν σ' έναν εμπειρικό νόμο που εκφράζει το μαγνητικό πεδίο συναρτήσει του ρεύματος στο οποίο οφείλεται η δημιουργία του πεδίου αυτού. Ο νόμος των Biot-Savart ορίζει ότι εάν ένας αγωγός διαρρέεται από σταθερό ρεύμα  $I$ , τότε ένα στοιχειώδες τμήμα του σύρματος αυτού δημιουργεί σε ένα σημείο  $P$ , που βρίσκεται σε ορισμένη απόσταση από το σύρμα, ένα στοιχειώδες μαγνητικό πεδίο  $dB$  (Εικόνα 1) που έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:



Εικόνα 3: Μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ρεύμα  $I$  σε στοιχειώδες τμήμα  $dL$ .<sup>[3]</sup>

- Το διάνυσμα  $dB$  είναι κάθετο στο διάνυσμα  $dL$  (που έχει την κατεύθυνση του ρεύματος), καθώς και στο μοναδιαίο διάνυσμα  $r$  που κατευθύνεται από το στοιχειώδες τμήμα  $dL$  προς το σημείο  $P$ .
- Το μέτρο του  $dB$  είναι αντιστρόφως ανάλογο προς το  $r$ , όπου  $r$  είναι η απόσταση του τμήματος  $dL$  από το σημείο  $P$ .
- Το μέτρο του  $dB$  είναι ανάλογο προς το ρεύμα  $I$  και προς το μήκος  $dL$  του στοιχείου.
- Το μέτρο του  $dB$  είναι ανάλογο προς το  $\sin\theta$ , όπου  $\theta$  είναι η γωνία που περιέχεται ανάμεσα στα διανύσματα  $dL$  και  $r$ .

Επομένως ο νόμος των Biot και Savart δίνεται από την σχέση:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dL \times \hat{r}}{r^2}$$

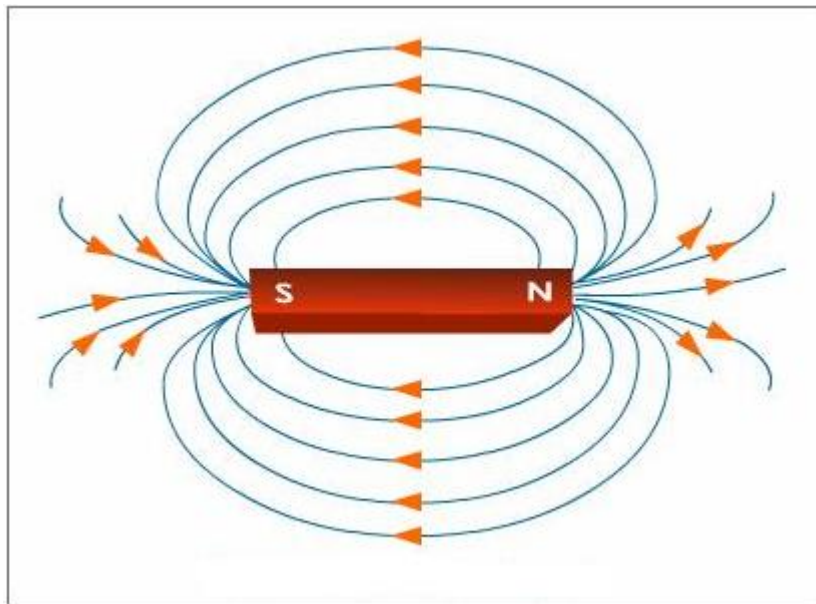
όπου  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (Wb/A m) η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Το ολικό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται σ' ένα σημείο από ένα ρεύμα που ρέει μέσα σε έναν αγωγό πεπερασμένου μήκους, υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα της σχέσης πάνω σε ολόκληρο τον αγωγό, δηλαδή

$$dB = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \cdot \int \frac{dL \times \hat{r}}{r^2}$$

## 1.2 Το μαγνητικό πεδίο

Όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου είναι η κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων. Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι αυτό που παράγει το μαγνητικό πεδίο. Αντίστοιχα, το μαγνητικό πεδίο των μόνιμων μαγνητών οφείλεται στις κινήσεις των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα του ατόμου και τον άξονά τους. Αυτές οι κινήσεις των ηλεκτρονίων ισοδυναμούν με στοιχειώδη ηλεκτρικά ρεύματα, τα οποία αναπτύσσουν στοιχειώδη μαγνητικά πεδία. Έτσι, κάθε άτομο οποιουδήποτε υλικού παράγει κάποιο μαγνητικό πεδίο και είναι ένας στοιχειώδης μαγνήτης με βόρειο και νότιο πόλο.

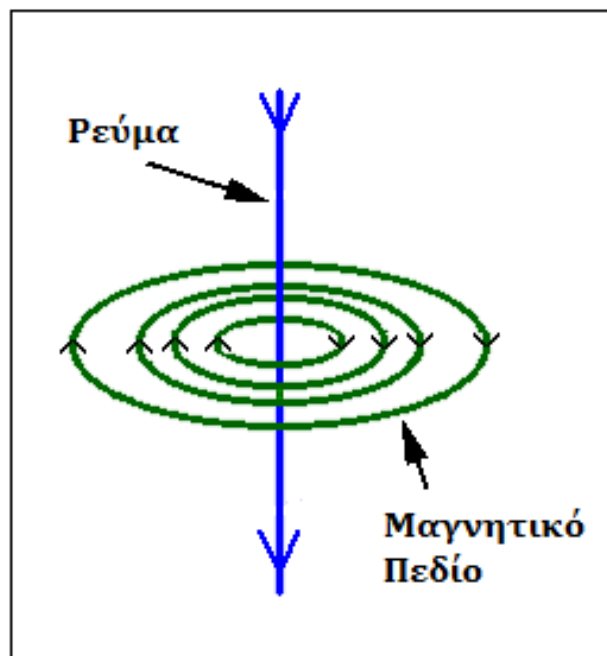


**Εικόνα 4:** Το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη σε σχήμα ράβδου.<sup>[4]</sup>

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, από τα οποία κατασκευάζονται οι μαγνήτες, τα μαγνητικά πεδία των ατόμων του υλικού είναι προσανατολισμένα μέσα σε πολύ μικρές περιοχές του υλικού. Αυτές οι περιοχές ονομάζονται περιοχές *Weiss* και κάθε μια αποτελεί ένα μικροσκοπικό μαγνήτη. Όταν οι περιοχές *Weiss* του σιδηρομαγνητικού υλικού είναι προσανατολισμένες στην ίδια διεύθυνση, το υλικό έχει τα χαρακτηριστικά ενός μαγνήτη. Αν οι περιοχές *Weiss* είναι τυχαία προσανατολισμένες, τότε το υλικό δεν παρουσιάζει μακροσκοπικά μαγνητικό πεδίο και εμφανίζεται αμαγνήτιστο. Ένας ρευματοφόρος αγωγός ή ένας μαγνήτης δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, δηλαδή ένα χώρο γύρω του στον οποίο ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις. Η μορφή του μαγνητικού πεδίου παριστάνεται με τις μαγνητικές ή δυναμικές γραμμές.

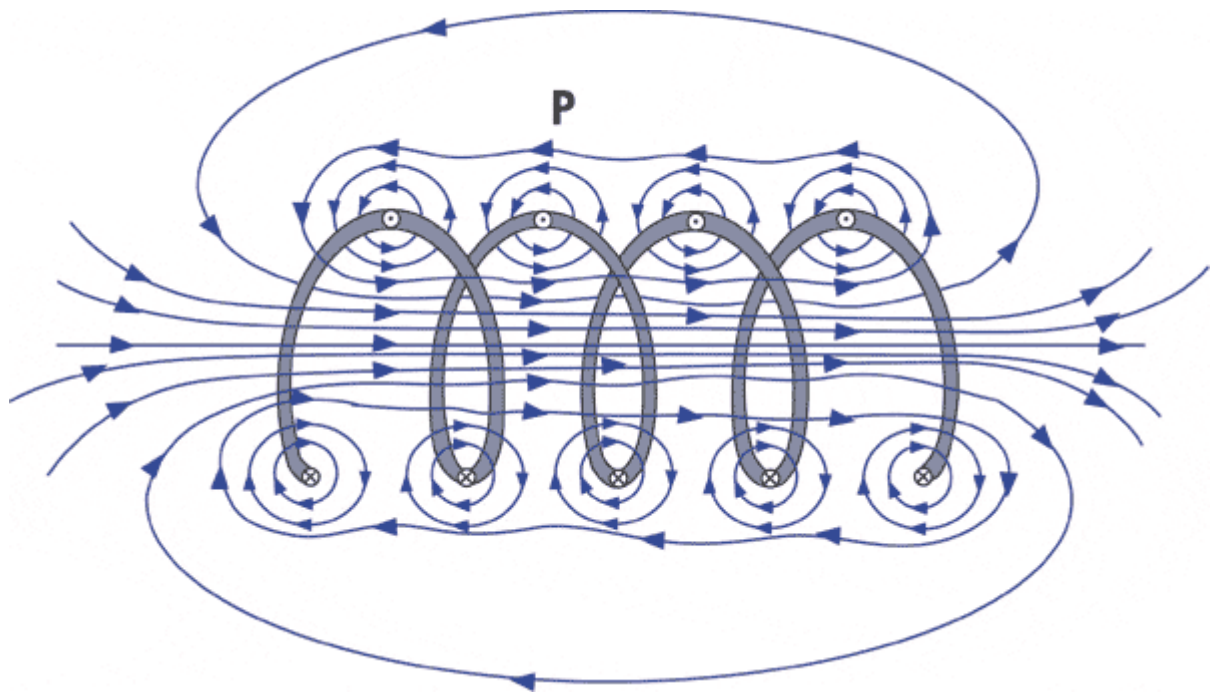
Στην εικόνα 4 φαίνεται η μορφή του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από ένα μαγνήτη σε σχήμα ράβδου. Οι μαγνητικές γραμμές είναι κλειστές καμπύλες. Έχουν φορά από το βόρειο προς το νότιο πόλο του μαγνήτη και συνεχίζονται και στο εσωτερικό του μαγνήτη, με φορά από το νότιο προς το βόρειο πόλο, σχηματίζοντας κλειστές διαδρομές. Οι δυναμικές γραμμές, εκτός από τη φορά και τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούνται ακόμη στην παράσταση του μέτρου του (ένταση). Όσο πυκνότερες είναι οι μαγνητικές γραμμές, τόσο ισχυρότερο είναι το μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο, είναι ισχυρότερο κοντά στους πόλους.

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η μορφή του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται από ένα ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό. Οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου είναι ομόκεντροι κύκλοι με κέντρο τον αγωγό, είναι κάθετες ως προς τον αγωγό, ενώ η φορά τους εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος στον αγωγό. Αν η φορά του ρεύματος αντιστραφεί, τότε θα αντιστραφεί και η φορά των δυναμικών γραμμών.



**Εικόνα 5:** Το μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού.<sup>[5]</sup>

Το μαγνητικό πεδίο ενός πηνίου με μεγάλο μήκος σε σχέση με τη διάμετρό του, εικονίζεται στην εικόνα 6. Παρατηρούμε ότι η μορφή του πεδίου είναι όμοια μ' εκείνη του ραβδόμορφου μαγνήτη. Το πεδίο στο εσωτερικό του πηνίου είναι ομοιόμορφο, δηλαδή οι μαγνητικές γραμμές είναι παράλληλες μεταξύ τους και ο αριθμός τους είναι σταθερός. Οι μαγνητικές γραμμές εξέρχονται από το ένα άκρο του πηνίου, το οποίο είναι ο βόρειος πόλος του. Το άκρο του πηνίου όπου εισέρχονται οι μαγνητικές γραμμές είναι ο νότιος πόλος. Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου υφίσταται, όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η ροή του ρεύματος.



Εικόνα 6: Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου μεγάλου μήκους.<sup>[6]</sup>

### 1.3 Μεγέθη του Μαγνητικού Πεδίου

Θεωρούμε ένα πηνίο με  $N$  σπείρες, το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα με ένταση  $I$ . Το πηνίο είναι τυλιγμένο γύρω από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο αποτελεί τον πυρήνα της Εικόνας 7. Στην περίπτωση αυτή, το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται από το πηνίο περιορίζεται σχεδόν αποκλειστικά στο εσωτερικό του πυρήνα. Ο νόμος του Ampere ορίζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα, σύμφωνα με τη σχέση:

$$H \cdot l = N \cdot I$$

Στη σχέση με  $H$  συμβολίζεται το μέτρο ενός διανυσματικού μεγέθους, το οποίο ονομάζεται ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$ . Η διεύθυνση και η φορά της  $H$  ταυτίζονται με τη διεύθυνση και τη φορά των μαγνητικών γραμμών. Το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα, από την σχέση (), είναι:

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

Ο αριθμητής στην σχέση ονομάζεται *μαγνητεγερτική δύναμη*  $F$ . Μονάδα μέτρησης της μαγνητεγερτικής δύναμης (ΜΕΔ) είναι οι αμπεροστροφές [At]. Η μαγνητεγερτική δύναμη είναι αντίστοιχη της ηλεκτρεγερτικής δύναμης στον ηλεκτρισμό. Όπως η ηλεκτρεγερτική δύναμη προκαλεί την κυκλοφορία του ηλεκτρικού ρεύματος, έτσι και η ΜΕΔ είναι η αιτία για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου με ένταση  $H$ . Μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι οι At/m. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου εκφράζει το έργο του καταβάλλει το ηλεκτρικό ρεύμα  $I$  για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα. Η “ισχύς” του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από το υλικό

κατασκευής του πυρήνα και εκφράζεται από το διανυσματικό μέγεθος της *μαγνητικής επαγωγής*  $B$ . Η μαγνητική επαγωγή συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου με τη σχέση:

$$B = m \cdot H$$

Στην σχέση, με  $\mu$  συμβολίζεται η *μαγνητική διαπερατότητα* του υλικού κατασκευής του πυρήνα. Η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών εκφράζεται ως προς αυτή του κενού. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού  $\mu_0$ , είναι σταθερή και ίση με  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (Wb/A} \cdot \text{m)}$ .

Η μαγνητική διαπερατότητα οποιουδήποτε υλικού  $\mu$ , συνδέεται μ' εκείνη του κενού μέσω της *σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας*  $\mu_r$ .

$$m = \mu_r \cdot \mu_0$$

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής είναι το *Tesla* [T].

Η μαγνητική επαγωγή εκφράζει τον αριθμό των μαγνητικών γραμμών που περνούν κάθετα από μια επιφάνεια  $1\text{m}^2$ . Ο ολικός αριθμός των μαγνητικών γραμμών που περνά από μια επιφάνεια  $S$ , εκφράζεται από το μέγεθος της *μαγνητικής ροής*  $\Phi$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Phi = \int B \cdot dS$$

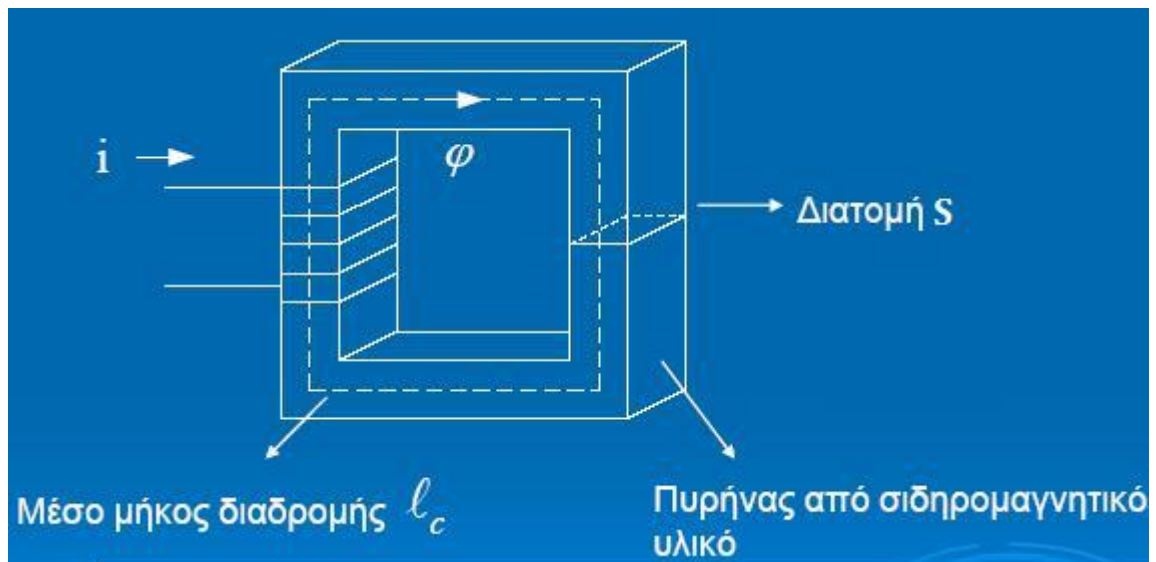
Αν το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής είναι σταθερό σ' όλη την επιφάνεια  $S$  και το διάνυσμά της είναι κάθετο στην επιφάνεια, η σχέση απλοποιείται στην παρακάτω μορφή:

$$\Phi = B \cdot S$$

Η σχέση ισχύει στη διάταξη της Εικόνας 7. Επομένως, η μαγνητική ροή που προκαλεί το ρεύμα  $I$  στον πυρήνα με διατομή  $S$  και μέσο μήκος  $\ell$ , είναι ίση με

$$\Phi = m \cdot \frac{N \cdot I \cdot S}{\ell}$$

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής είναι το  $\text{Wb}$  ή ισοδύναμα το  $\text{Vs}$ .



Εικόνα 7: Πηνίο με πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό<sup>[7]</sup>

#### 1.4 Μαγνητική Αντίσταση – Μαγνητικό Κύκλωμα

Στην Εικόνα 5, όταν το πηνίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα με ένταση  $I$ , δημιουργείται στον πυρήνα ένα μαγνητικό πεδίο με μαγνητική ροή  $\Phi$  και την εικονιζόμενη φορά. Την φορά της ροής μπορούμε να τη βρούμε με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, ο αντίχειρας του δεξιού μας χεριού δείχνει προς την κατεύθυνση του ρεύματος, ενώ τα υπόλοιπα δάχτυλα υποθέτοντας ότι έχουν τυλίξει το πηνίο, δείχνουν την φορά της ροής  $\Phi$ . Το μέτρο της μαγνητικής ροής από την σχέση γράφεται στη μορφή

$$\Phi = m \cdot \frac{NI}{\left( \frac{1}{\mu S} \right)}$$

Ο παρονομαστής στην σχέση εξαρτάται αποκλειστικά από τις διαστάσεις και το υλικό του πυρήνα και ονομάζεται *μαγνητική αντίσταση*  $R_m$ . Επομένως, η μαγνητική αντίσταση είναι ίση με:

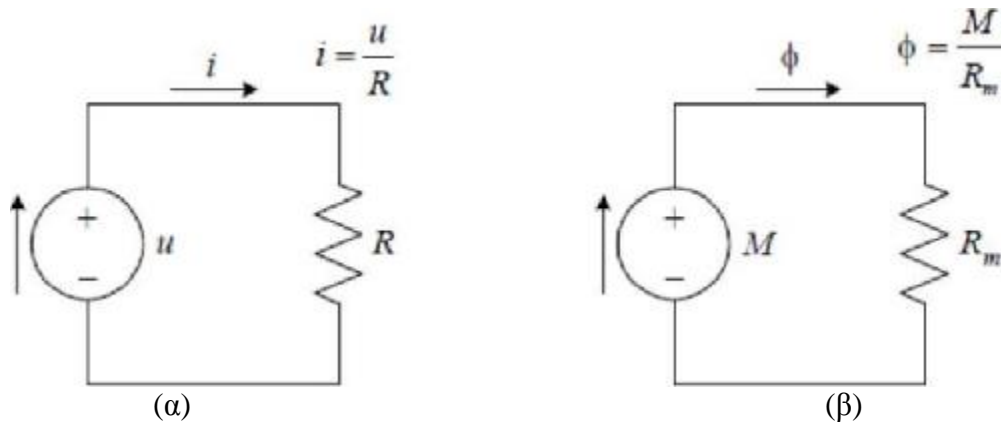
$$R_m = \frac{1}{\mu S}$$

και η μαγνητική ροή εκφράζεται από τη σχέση

$$\Phi = m \cdot \frac{NI}{R_m}$$

Από την σχέση προκύπτει ότι η διάταξη της Εικόνας 7 αντιστοιχεί σ' ένα ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα, το οποίο περιγράφεται από σχέσεις ανάλογες μ' εκείνες των ηλεκτρικών

κυκλωμάτων. Στο ηλεκτρικό κύκλωμα της Εικόνας 8α, η τάση της πηγής ή αλλιώς η ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής  $u$ , προκαλεί τη ροή ενός ρεύματος  $i$  μέσω της αντίστασης  $R$ . Η ροή του ρεύματος είναι το αποτέλεσμα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης και η μεταξύ τους σχέση ορίζεται από το νόμο του Ohm  $I = \frac{V}{R}$



**Εικόνα 8:** (α) Ηλεκτρικό κύκλωμα, (β) Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του πηνίου με πυρήνα

Στην Εικόνα 8β εικονίζεται το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του πηνίου με σιδηροπυρήνα της Εικόνας 7. Η μαγνητική ροή  $\Phi$  θεωρείται ως ένα μαγνητικό ρεύμα, το οποίο ρέει στον πυρήνα υπερνικώντας τη μαγνητική του αντίσταση  $R_m$ . Η μαγνητική ροή προκαλείται από τη μαγνητεγερτική δύναμη, η οποία είναι αντίστοιχη της ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Επομένως, η σχέση αποτελεί το νόμο του Ohm στα μαγνητικά κυκλώματα. Στα ηλεκτρικά κυκλώματα ορίζεται η αγωγιμότητα ως το αντίστροφο της ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίστοιχα, στα μαγνητικά κυκλώματα ορίζεται η *μαγνητική αγωγιμότητα*, ως το αντίστροφο της μαγνητικής αντίστασης.

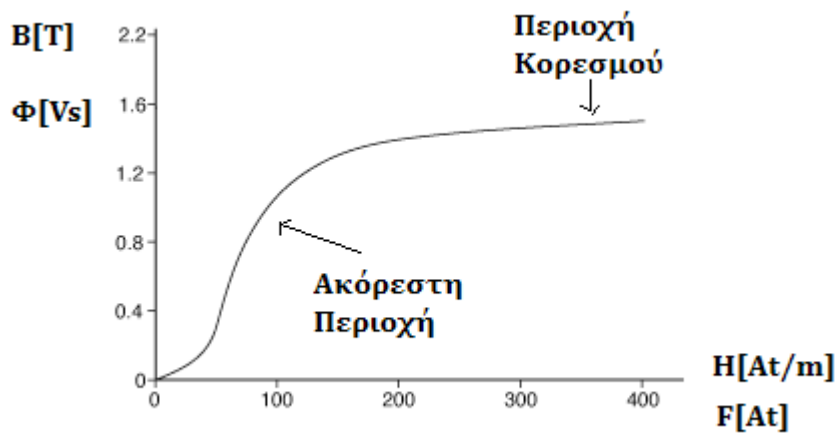
## 1.5 Καμπύλη Μαγνήτισης

Τα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη μαγνητική τους συμπεριφορά: σε *διαμαγνητικά*, *παραμαγνητικά* και *σιδηρομαγνητικά*. Τα διαμαγνητικά υλικά έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα ελάχιστα μικρότερη της μονάδος. Η μαγνητική διαπερατότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι ελάχιστα μεγαλύτερη της μονάδος. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν σχετική μαγνητική διαπερατότητα πολύ μεγαλύτερη της μονάδος. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών έχουν  $\mu_r$  στην περιοχή από 2000 έως 6000. Επομένως, για ορισμένη μαγνητεγερτική δύναμη, η μαγνητική ροή που αναπτύσσεται σ' ένα σιδηρομαγνητικό υλικό είναι πολλαπλάσια της ροής που παράγεται στον αέρα. Επειδή η τάση που παράγει μια γεννήτρια ή αντίστοιχα η ροπή που αναπτύσσει ένας κινητήρας εξαρτώνται από το μέγεθος της μαγνητικής ροής, οι ηλεκτρικές μηχανές κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικά υλικά με υψηλό  $\mu_r$ .

Στην Εικόνα 7 έχουμε θεωρήσει ότι η μαγνητική ροή είναι συγκεντρωμένη στον πυρήνα, επειδή η μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του αέρα.

Επομένως, η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα είναι πολύ μικρότερη της αντίστασης του αέρα. Η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είναι περίπου ίση μ' εκείνη του κενού ( $\mu_{\text{air}} \sim 1$ ). Βέβαια, ένα πολύ μικρό τμήμα της ροής δεν ρέει στον πυρήνα, αλλά κυκλοφορεί μέσω του αέρα. Αυτή η ροή ονομάζεται ροή σκέδασης  $\Phi_{\sigma}$ .

Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή. Εξαρτάται έντονα από το μέγεθος της μαγνητικής ροής. Για να διευκρινίσουμε τη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας θεωρούμε ότι, ο πυρήνας της Εικόνας 7 είναι αρχικά απομαγνητισμένος και ότι μεταβάλλουμε το συνεχές ρεύμα στο πηνίο από το μηδέν μέχρι μια μέγιστη τιμή. Αν σχεδιάσουμε σ' ένα διάγραμμα τη μεταβολή της παραγόμενης στον πυρήνα μαγνητικής ροής  $\Phi$ , ως προς την επιβαλλόμενη μαγνητεγερτική δύναμη  $F=NI$ , προκύπτει η καμπύλη της Εικόνας 9. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται καμπύλη μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού.



**Εικόνα 9:** Τυπική καμπύλη μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών υλικών.<sup>[8]</sup>

Από την καμπύλη μαγνήτισης παρατηρούμε ότι η μαγνητική ροή αυξάνει αρχικά αργά με το ρεύμα. Κατόπιν, έχουμε μια σχεδόν γραμμική μεταβολή της ροής. Στη συνέχεια η μεταβολή της μαγνητικής ροής ως προς τη μαγνητεγερτική δύναμη περιορίζεται σταδιακά και τελικά πέρα από κάποια τιμή της μαγνητεγερτικής δύναμης η ροή παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Η περιοχή όπου η καμπύλη τείνει να γίνει οριζόντια ονομάζεται περιοχή κορεσμού. Στην περιοχή κορεσμού η μαγνητική ροή έχει φθάσει τη μέγιστη τιμή της και μεταβάλλεται ελάχιστα με την επιβαλλόμενη μαγνητεγερτική δύναμη. Η γραμμική περιοχή της καμπύλης ονομάζεται ακόρεστη περιοχή. Στην ακόρεστη περιοχή η ροή μεταβάλλεται γραμμικά με τη μαγνητεγερτική δύναμη. Η περιοχή μετάβασης από τη γραμμική περιοχή στην περιοχή κορεσμού, ονομάζεται *γόνατο* της καμπύλης. Οι μετασχηματιστές επιθυμούμε να λειτουργούν στη γραμμική περιοχή, πράγμα το οποίο μπορεί να επιτευχθεί ρυθμίζοντας κάποια κατασκευαστικά στοιχεία (διατομή πυρήνα για παράδειγμα).

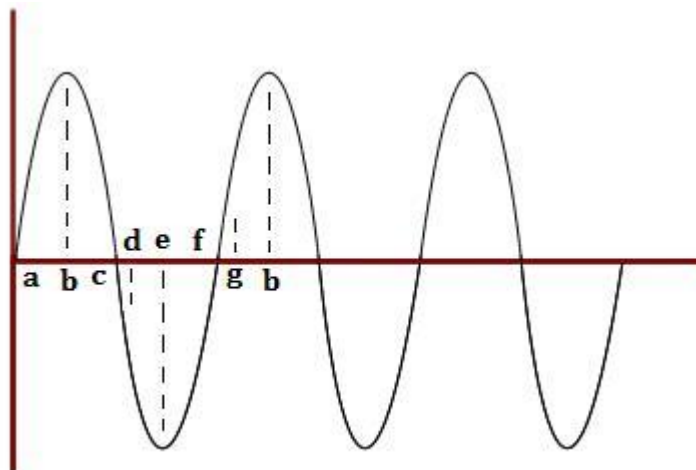
Η καμπύλη της Εικόνας 9 απεικονίζει τη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας ανάλογα με την ένταση του πεδίου. Η κλίση της καμπύλης ορίζει τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού σε κάθε τιμή της έντασης του πεδίου. Είναι φανερό ότι, η μαγνητική διαπερατότητα λαμβάνει πολύ μικρές τιμές όταν ο πυρήνας λειτουργεί με ισχυρό κορεσμό, γεγονός το οποίο



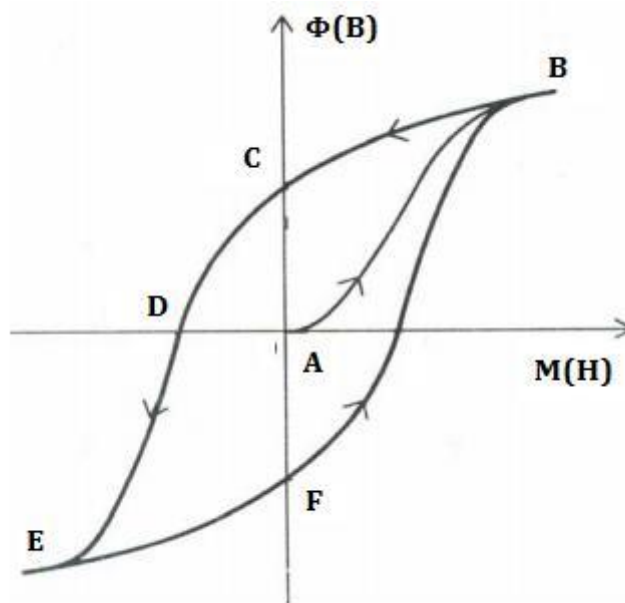
προσπαθούμε να περιορίσουμε.

## 1.6 Βρόχος Υστέρησης

Στην Εικόνα 7 θεωρούμε ότι ο πυρήνας είναι αρχικά απομαγνητισμένος και ότι το πηνίο τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα (Εικόνα 10). Όταν το ρεύμα μεταβάλλεται στην περιοχή  $ab$ , λαμβάνουμε την καμπύλη μαγνήτισης του υλικού  $AB$ . Καθώς το ρεύμα μειώνεται, στο τμήμα  $bc$ , η μαγνητική ροή δεν ακολουθεί την καμπύλη μαγνήτισης. Η μεταβολή της ροής  $BC$ , είναι διαφορετική από εκείνη κατά την αύξηση του ρεύματος  $ab$ . Στο τμήμα  $bc$  του ρεύματος, ο πυρήνας απομαγνητίζεται. Στο σημείο  $c$ , όπου το ρεύμα και η μαγνητεγερτική δύναμη μηδενίζονται, η μαγνητική ροή δεν είναι μηδέν αλλά έχει μια τιμή  $C$ . Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μαγνητική υστέρηση. Η μαγνητική ροή στο σημείο  $C$  ονομάζεται παραμένουσα ροή. Το μέγεθος της παραμένουσας ροής εξαρτάται από το είδος του σιδηρομαγνητικού υλικού. Στα υλικά κατασκευής των ηλεκτρικών μηχανών ο παραμένον μαγνητισμός είναι 2-3% της ονομαστικής τιμής. Αντίθετα, στην κατασκευή των τεχνητών μόνιμων μαγνητών χρησιμοποιούνται σιδηρομαγνητικά υλικά, με υψηλό παραμένον μαγνητισμό.



**Εικόνα 10:** Εναλλασσόμενο ρεύμα στο πηνίο της Εικόνας 7



**Εικόνα 11:** Τυπικός βρόχος υστέρησης του πυρήνα.

Για να απομαγνητίσουμε τον πυρήνα, δηλαδή για το μηδενισμό της ροής, πρέπει να αντιστραφεί η πολικότητα του ρεύματος, άρα και της μαγνητεγερτικής δύναμης. Η μαγνητεγερτική δύναμη που απομαγνητίζει τον πυρήνα D και η οποία αντιστοιχεί στο ρεύμα d, ονομάζεται απομαγνητίζουσα δύναμη.

Ο πυρήνας μαγνητίζεται κατά την αντίθετη φορά καθώς το ρεύμα αυξάνεται σε αρνητικές τιμές, μέχρι την τιμή E, η οποία αντιστοιχεί στην περιοχή κορεσμού. Το σημείο E είναι συμμετρικό ως προς το B. Το ρεύμα μειώνεται προς το μηδέν στο τμήμα ef και μαζί του ελαττώνεται η μαγνητική ροή. Η παραμένουσα αρνητική μαγνητική ροή F μηδενίζεται, όταν το ρεύμα λάβει τη θετική τιμή g. Στο σημείο b του ρεύματος, η ροή έχει λάβει ξανά τη μέγιστη θετική τιμή της B. Έτσι ολοκληρώνεται ο βρόχος υστέρησης του πυρήνα, καμπύλη BCDEFGB.

Ο κορεσμός των σιδηρομαγνητικών υλικών οφείλεται στον πλήρη προσανατολισμό των περιοχών Weiss, όταν η μαγνητεγερτική δύναμη έχει υψηλή τιμή. Οι αρχικά τυχαία προσανατολισμένες περιοχές Weiss του υλικού, έχουν την τάση να ακολουθούν τη διεύθυνση και τη φορά του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Αυτός είναι ο λόγος που τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν πολύ μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Όταν όλες οι περιοχές Weiss προσανατολιστούν στο επιβαλλόμενο πεδίο, κάθε παραπέρα αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης προκαλεί μια ασήμαντη αύξηση της ροής, όση θα είχαμε στον αέρα (κορεσμός).

Με την απομάκρυνση της επιβαλλόμενης μαγνητεγερτικής δύναμης, οι περιοχές Weiss δεν ξαναπαίρνουν τις αρχικές τυχαίες κατευθύνσεις τους. Έτσι, το υλικό παραμένει μαγνητισμένο, δηλαδή γίνεται μόνιμος μαγνήτης. Για την πλήρη απομαγνήτιση του υλικού πρέπει να εφαρμοστεί μια μαγνητεγερτική δύναμη με την αντίθετη φορά. Επομένως, πρέπει να προσφερθεί στο υλικό ενέργεια για την απομαγνήτιση του, όπως έγινε και κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης. Όσο μεγαλύτερη είναι η παραμένουσα ροή, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που απαιτείται για την απομαγνήτιση του υλικού (συνεκτική δύναμη). Η ενέργεια της απομαγνήτισης, εκτός από τη μαγνητεγερτική δύναμη, μπορεί να έχει τη μορφή

θερμότητας ή μηχανικού χτυπήματος.

Η απαίτηση παροχής ενέργειας στα σιδηρομαγνητικά υλικά για την απομαγνήτισή τους, προκαλεί τις απώλειες υστέρησης. Οι απώλειες υστέρησης ενός υλικού εξαρτώνται από το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης. Όσο μικρότερο είναι το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης, δηλαδή όσο μικρότερες είναι οι τιμές της παραμένουσας ροής και της συνεκτικής δύναμης, τόσο μικρότερες είναι οι απώλειες υστέρησης.

Οι απώλειες υστέρησης μαζί με τις απώλειες εξαιτίας των δινορευμάτων, προκαλούν τη θέρμανση του πυρήνα. Οι απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων ονομάζονται μαζί απώλειες σιδήρου ή πυρήνα.

## 1.7 Ηλεκτρομαγνητική Επαγωγή

Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής ανακαλύφθηκε και διατυπώθηκε μαθηματικά από τον Faraday το 1831. Στο φαινόμενο αυτό στηρίζεται η λειτουργία όλων των ηλεκτρικών μηχανών. Σύμφωνα με το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, ή νόμο του Faraday, όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από ένα πλαίσιο, επάγεται στα άκρα του πλαισίου μια ηλεκτρεγερτική δύναμη, η οποία είναι ανάλογη με την ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Στην σχέση,  $N$  είναι ο αριθμός των σπειρών του πλαισίου (πηνίου) και  $\Phi$  η μαγνητική ροή που διέρχεται απ' αυτές. Στην ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών και των μετασχηματιστών, η σχέση γράφεται στη μορφή:

$$e = -\frac{dI}{dt}$$

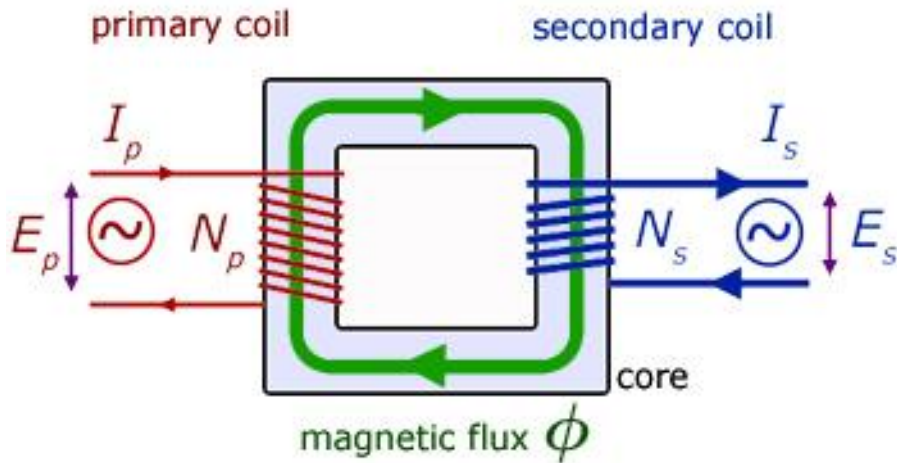
όπου,  $I$  είναι η *πεπλεγμένη ροή*. Η πεπλεγμένη ροή ορίζεται από τη σχέση:

$$I = N \cdot \Phi$$

όταν η ίδια ροή διέρχεται από όλες τις σπείρες του πλαισίου, ή από τη σχέση:

$$I = \sum_{j=1}^N \Phi_j$$

όταν η ροή σε κάθε σπείρα είναι διαφορετική.



Εικόνα 12: Αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή<sup>[9]</sup>

Το αρνητικό πρόσημο στις σχέσεις της ηλεκτρεγερτικής δύναμης οφείλεται στο νόμο του Lenz, σύμφωνα με τον οποίο, η πολικότητα της επαγόμενης τάσης στο πλαίσιο είναι τέτοια ώστε, εάν τα άκρα του πλαισίου τροφοδοτούν ένα φορτίο το ρεύμα που θα κυκλοφορήσει θα παράγει ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο να αντιτίθεται στο αίτιο που το προκάλεσε. Το ρεύμα στο πλαίσιο ονομάζεται επαγωγικό ρεύμα. Ο προσδιορισμός της φοράς του επαγωγικού ρεύματος γίνεται φανερός από τη διάταξη της Εικόνας 12, η οποία είναι ένας μετασχηματιστής.

Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή  $N_1$  διαρρέεται από το ρεύμα  $i_1$  και προκαλεί τη ροή  $\Phi_1$  στον πυρήνα. Η ροή  $\Phi_1$  διέρχεται από τις σπείρες του δευτερεύοντος τυλίγματος  $N_2$ , με αποτέλεσμα την ανάπτυξη της τάσης από επαγωγή  $e_2$ . Όταν το δευτερεύον τύλιγμα είναι κλειστό, μέσω της αντίστασης φορτίου  $K$ , το επαγωγικό ρεύμα  $i_2$  έχει τη σημειωμένη φορά. Το ρεύμα  $i_2$  προκαλεί τη μαγνητική ροή  $\Phi_2$ , με φορά αντίθετη της  $\Phi_1$ , η οποία το προκάλεσε.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Περιγραφή και αρχή λειτουργίας του Μετασχηματιστή

#### 2.1 Γενικές αρχές λειτουργίας

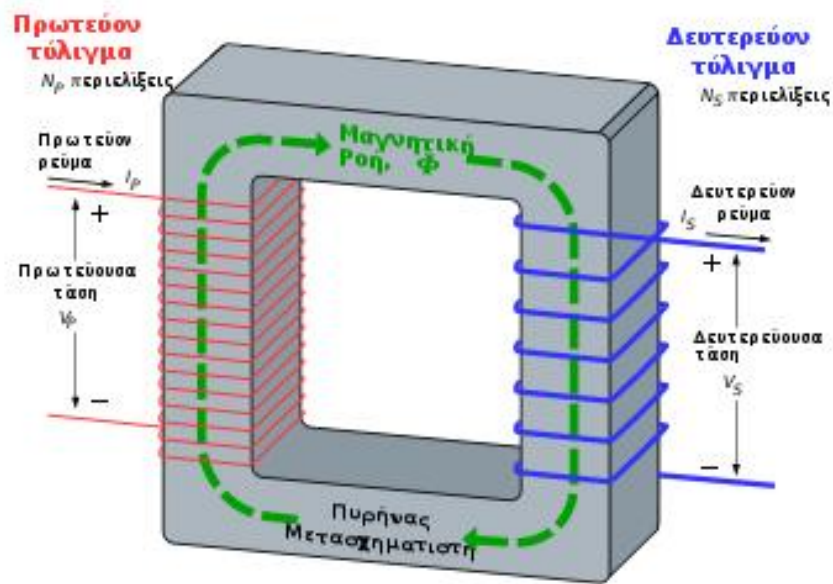
Ο μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική μηχανή η οποία μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτρικών αγωγών μεταξύ δύο επαγωγικά συζευγμένων ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Οι μετασχηματιστές είναι μία από τις πιο αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές, με κάποιες μεγάλες μονάδες να αποδίδουν έως και το 99.75% της ισχύος εισόδου τους στην έξοδό τους. Οι μετασχηματιστές κατασκευάζονται σε ευρεία γκάμα μεγεθών, που κυμαίνονται από μέγεθος νυχιού (όπως αυτοί που βρίσκονται μέσα σε ένα μικρόφωνο) έως τεράστιες μονάδες με βάρος εκατοντάδων τόνων που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση του εθνικού δικτύου ηλεκτροδότησης.

Η αρχή λειτουργίας τους είναι απλή: Ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα στο πρώτο κύκλωμα (το "πρωτεύον") δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει μεταβαλλόμενη τάση στο δεύτερο κύκλωμα (το "δευτερεύον"). Αν ένας ηλεκτρικός καταναλωτής είναι συνδεδεμένος στο δευτερεύον κύκλωμα, τότε θα υπάρξει ροή ηλεκτρικού φορτίου στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή. Αυτό το φορτίο θα μεταφέρει ενέργεια από το πρωτεύον κύκλωμα, στον καταναλωτή που είναι συνδεδεμένος στο δευτερεύον κύκλωμα. Η επαγόμενη τάση  $V_S$  (s:secondary) στο δευτερεύον ενός ιδανικού μετασχηματιστή, είναι ανάλογη της τάσης  $V_P$  (p:primary) στο πρωτεύον κατά ένα συντελεστή ίσο με το λόγο του αριθμού  $N$  των περιελίξεων του σύρματος στα αντίστοιχα τυλίγματα: 
$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P}$$

Με κατάλληλη επιλογή του αριθμού των περιελίξεων, ένας μετασχηματιστής επιτρέπει την ανύψωση μιας εναλλασσόμενης τάσης (αν  $N_S > N_P$ ) ή τον υποβιβασμό της (αν  $N_S < N_P$ ).

Η λειτουργία του μετασχηματιστή βασίζεται σε δύο αρχές:

- § πρώτον, ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα διερχόμενο από αγωγό μπορεί να παράγει μαγνητικό πεδίο (ηλεκτρομαγνητισμός) και,
- § δεύτερον, ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε επαφή με ένα τυλιγμένο σύρμα ("τύλιγμα"), επάγει διαφορά δυναμικού στα άκρα του τυλίγματος (ηλεκτρομαγνητική επαγωγή). Μεταβάλλοντας το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα, αλλάζει η ένταση του μαγνητικού του πεδίου. Εφόσον το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εκτείνεται και στο δευτερεύον τύλιγμα, επάγεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του δευτερεύοντος.



**Εικόνα 13:** Ένας ιδανικός μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης με επισημασμένη την μαγνητική ροή στον πυρήνα του<sup>[10]</sup>

Στην Εικόνα 13 φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα μετασχηματιστή. Ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από το πρωτεύον τυλίγμα δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο. Τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τυλίγμα περιελίσσονται γύρω από ένα μαγνητικό πυρήνα πολύ υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, π.χ. από σίδηρο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι όσο το δυνατόν περισσότερες γραμμές του μαγνητικού πεδίου που παράγει το πρωτεύον τυλίγμα, βρίσκονται εντός του πυρήνα και περνούν τόσο από το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τυλίγμα.

## 2.2 Ο σιδηροπυρήνας του μετασχηματιστή - κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Οι απώλειες ενός σιδηροπυρήνα περιορίζονται με την επιλογή κατάλληλου υλικού το οποίο έχει κύκλο υστέρησης με μικρό εμβαδόν. Πρέπει επίσης να έχουν μεγάλη ειδική αντίσταση  $\rho$  για τον περιορισμό των δινορευμάτων. Οι απώλειες αυτές περιορίζονται κατασκευάζοντας τον πυρήνα από λεπτά πυριτιούχα ελάσματα, πάχους 0,3 - 0,5 cm ή από μίγμα σκόνης σιδήρου με μονωτικό υλικό που είναι μονωμένα από την μία όψη τους.

Ο πυρήνας του μετασχηματιστή μπορεί να είναι είτε τύπος μανδύα, είτε τύπος πυρήνα. Ο τύπος μανδύα συνηθίζεται σε μετασχηματιστές πολύ μεγάλης ισχύος. Τα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγονται στο κεντρικό στέλεχος αυτού, η δε όλη περιέλιξη προφυλάσσεται από δύο απέναντι στελέχη.

Στους μετασχηματιστές με τύπο πυρήνα τα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος κατανέμονται ομοιόμορφα στα δύο ακραία στελέχη και χρησιμοποιούνται συνήθως σαν μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων. Οι περιελίξεις διαιρούνται εξίσου στα δύο σκέλη του πυρήνα και στον καθένα περιελίσσεται το μισό κάθε πηνίου. Η περιέλιξη χαμηλής τάσης μπαίνει κοντά στον πυρήνα και η περιέλιξη υψηλής τάσης εξωτερικά της περιέλιξης χαμηλής τάσης, για να μειωθούν οι απαιτήσεις μόνωσης.

Οι συνδέσεις ενός σιδηροπυρήνα γίνονται με συνδετήρες ή βίδες. Οι καλές συνδέσεις περιορίζουν τον μαγνητικό θόρυβο.

Η διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή εξαρτάται περισσότερο από τις μονώσεις του και από τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται. Τα μονωτικά υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι το εμποτισμένο χαρτί, η μίκα και ειδικό λάδι.

Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή γίνονται συνήθως με σύρμα κυκλικής διατομής, μονωμένο με ειδικό μονωτικό υλικό. Συνήθως στην περιέλιξη τα κενά που δημιουργούνται κατά το τυλίγμα γεμίζονται από ειδικό σκληρυντικό βερνίκι.

## 2.3 Είδη Μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- α) μετασχηματιστές τροφοδοσίας,
- β) μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων,
- γ) μετασχηματιστές ρεύματος,
- δ) αυτομετασχηματιστές, και
- ε) μετασχηματιστές υψηλής τάσης.

### 2.3.1 Μετασχηματιστές τροφοδοσίας

Οι μετασχηματιστές τροφοδοσίας είναι διατάξεις οι οποίες παίρνουν την ηλεκτρική ενέργεια από μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος και την αποδίδουν στην έξοδό τους μεταβάλλοντας του βασικούς παράγοντες που είναι η τάση και το ρεύμα. Ένας απλός μετασχηματιστής τροφοδοσίας αποτελείται από δύο πηνία το πρωτεύον και το δευτερεύον τα οποία βρίσκονται σε μαγνητική ζεύξη μεταξύ τους, με την βοήθεια σιδηροπυρήνα. Επειδή ο σιδηροπυρήνας είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και διαρρέεται από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, αναπτύσσονται σε αυτόν επαγωγικά ρεύματα (ρεύματα Φουκώ), τα οποία προκαλούν την θερμότητά του. Η θέρμανση αυτή σημαίνει απώλεια ενέργειας και θα πρέπει αυτή η ενέργεια που χάνεται να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Αν θεωρήσουμε έναν μετασχηματιστή χωρίς απώλειες (ιδανικός μετασχηματιστής), τότε το ρεύμα που κυκλοφορεί στο πρωτεύον αναπτύσσει στο δευτερεύον μια ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E_2$ . Αν  $E_1$  είναι η τάση του

πρωτεύοντος τότε οι μεταβολές της κοινής ροής θα είναι ανάλογες προς τον αριθμό στροφών  $n_1$  και  $n_2$  του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου.

Δηλαδή θα ισχύει η σχέση:  $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$

Ο λόγος  $N_1/N_2$  ονομάζεται λόγος μετασχηματισμού.

Άρα λοιπόν αν  $N_1 > N_2$ , τότε θα έχουμε  $E_1 > E_2$ . Με άλλα λόγια ο μετασχηματιστής θα είναι μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης. Αν η  $E_2 > E_1$ , τότε ο μετασχηματιστής ονομάζεται μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης.

Το βάθος απόδοσης του μετασχηματιστή εκφράζει τις απώλειες ενέργειας ενός μετασχηματιστή τροφοδοσίας και δίνεται από την σχέση:  $n = \frac{P_2}{P_1}$

όπου  $P_1$  είναι η ισχύς εισόδου του μετασχηματιστή και  $P_2$  η ισχύς εξόδου του. Σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή θα έχουμε  $\eta=1$  που σημαίνει ότι η ισχύς εξόδου είναι ίση με την ισχύ εξόδου. Κάτι τέτοιο πρακτικά δεν συμβαίνει λόγω των απωλειών του μετασχηματιστή που θα αναφερθούμε παρακάτω.

Αν  $P_1=P_2$  τότε  $E_1 I_1 = E_2 I_2$  οπότε  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{E_2}{E_1}$ . Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα στο δευτερεύον ανυψώνεται, όταν η τάση στο δευτερεύον υποβιβάζεται και αντίστροφα.

Ο λόγος  $E_1/I_1$  εκφράζει την σύνθετη αντίσταση  $Z_1$  του πρωτεύοντος οπότε θα έχουμε:

$$Z_1 = \frac{E_1}{I_1} = \left( \frac{E_1}{I_2} \right) \cdot \left( \frac{I_2}{I_1} \right) = \left( \frac{E_2}{I_2} \right) \cdot \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot Z_2$$

Αυτό σημαίνει ότι η επαγωγική ή ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος μπορεί να αναχθεί στο πρωτεύον με πολλαπλασιασμό επί το τετράγωνο του λόγου μετασχηματισμού.

### 2.3.1.1 Χρήση μετασχηματιστών τροφοδοσίας

Οι μετασχηματιστές τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα τροφοδοτικών σε ηλεκτρονικές συσκευές, οι οποίοι υποβιβάζουν την υψηλή τάση του δικτύου σε χαμηλές τάσεις για τα κυκλώματα των συσκευών. Παράλληλα παρέχουν γαλβανική απομόνωση των κυκλωμάτων των συσκευών για προστασία από κινδύνους ηλεκτροπληξίας.

Πολλοί μετασχηματιστές χρησιμοποιούν περισσότερες από μία εξόδους για διάφορες τάσεις και ρεύματα σε ηλεκτρονικές συσκευές ενώ σε κυκλώματα παλμοτροφοδοτικών οι μετασχηματιστές είναι κατασκευασμένοι για υψηλότερες συχνότητες από τα 50Hz, με



εντελώς διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά από τους απλούς μετασχηματιστές των 50 - 60 Hz.

### **2.3.2 Μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων**

Οι μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για να λειτουργούν σωστά σε όλο το ακουστικό φάσμα από 16Hz έως 16KHz. Χρησιμοποιούνται συνήθως ως μετασχηματιστές εξόδου σε ενισχυτές τάξης A μεγάλης ισχύος, ενώ σε πολύ μικρές ισχύς μπορούμε να συναντήσουμε μικρούς μετασχηματιστές σε ραδιόφωνα με ενισχυτή push pull για προσαρμογή της χαμηλής αντίστασης του μεγαφώνου. Η κατασκευή ενός μετασχηματιστή ήχου είναι ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς λαμβάνονται πολλοί παράγοντες, όπως όρια συχνοτήτων, παρασιτικές χωρητικότητες, μαγνητικές διαφυγές, κτλ.

### **2.3.3 Αυτομετασχηματιστές**

Οι αυτομετασχηματιστές αποτελούνται από ένα πηνίο με σιδηροπυρήνα, το οποίο διαθέτει μία ή περισσότερες λήψεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τάση που λαμβάνεται ανάμεσα σε μία λήψη και ένα κοινό σημείο να είναι μικρότερη από την τάση εισόδου. Έτσι πετυχαίνουμε υποβιβασμό τάσης. Για ανύψωση τάσης κάνουμε την αντίστροφη διαδικασία, τροφοδοτούμε τον αυτομετασχηματιστή από το τύλιγμα λήψης και ένα κοινό σημείο και παίρνουμε μεγαλύτερη τάση στα δύο άκρα του.

Αν η λήψη του αυτομετασχηματιστή είναι μεταβλητή, τότε θα παίρνουμε διάφορες τάσεις στην έξοδό του. Το πλεονέκτημα που έχει αυτός ο μετασχηματιστής είναι ότι είναι φτηνότερος σε κόστος διότι διαθέτει μόνο ένα τύλιγμα άρα λιγότερος χαλκός, καθώς επίσης και λιγότερο σιδηρομαγνητικό υλικό.

Επίσης ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματά του είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης που έχει. Η χρήση του όμως είναι πάρα πολύ περιορισμένη διότι δεν παρέχει γαλβανική απομόνωση και υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης της φάσης στην έξοδό του. Το μεγάλο αυτό μειονέκτημα που έχει καθιστά την χρήση του σε πολύ ειδικές εφαρμογές.

### **2.3.4 Μετασχηματιστές ρεύματος**

Οι μετασχηματιστές ρεύματος αποτελούνται από δύο πηνία, το πρωτεύον και το δευτερεύον και έναν σιδηροπυρήνα, όπως και οι μετασχηματιστές τάσης. Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι οι μετασχηματιστές ρεύματος έχουν λίγες σπείρες στο πρωτεύον τους και το χάλκινο σύρμα που χρησιμοποιείται είναι πολύ χοντρό. Το δευτερεύον πηνίο τους έχει περισσότερες σπείρες και το σύρμα που χρησιμοποιείται είναι ψιλότερης διατομής. Στο δευτερεύον πηνίο συνδέεται ένα αμπερόμετρο σαν φορτίο για την μέτρηση του ρεύματος.

Η χρήση των μετασχηματιστών ρεύματος είναι στα αμπερόμετρα καθώς με αυτόν των τρόπο αυξάνεται η ευαισθησία τους.

### **2.3.5 Μετασχηματιστές υψηλής τάσης**

Οι μετασχηματιστές υψηλής τάσης είναι μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται στους δέκτες τηλεοράσεως για την τροφοδότηση των πηνίων απόκλισης του καθοδικού σωλήνα. Η κατασκευή αυτών των μετασχηματιστών έχει διαφορές καθώς απαιτούνται μονώσεις υψηλής ποιότητας και συμπαγής πυρήνας. Ο πυρήνας στους μετασχηματιστές υψηλής τάσης αποτελείται από δύο κομμάτια φερρίτη σχήματος Π.

Στο ένα σκέλος του πυρήνα περιεχόνονται το πρωτεύον και δύο άλλα δευτερεύοντα πηνία, ενώ στο άλλο σκέλος του περιελίσσεται το δευτερεύον, δηλαδή το τύλιγμα υψηλής τάσης.

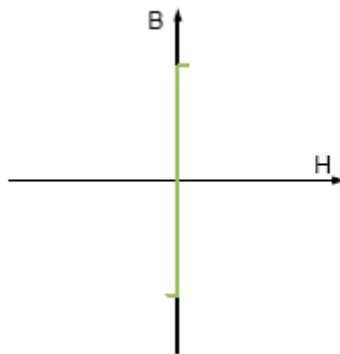
Κατά την περιέλιξη του δευτερεύοντος παρεμβάλλονται μεταξύ των στρωμάτων φύλλα από πλαστική ταινία μεγάλης μόνωσης και η όλη περιέλιξη γίνεται συμπαγής χωρίς να υπάρχουν κενά. Μετά τοποθετείται σε φούρνο με θερμοκρασία από 200 έως 300C° και ψήνεται. Τέλος εμποτίζεται σε πολυεστέρα και τοποθετείται μέσα σε θήκη από πολυκαρβονικό υλικό. Στην τελική μορφή του καλύπτεται ξανά με πολυεστέρα.

Η υπερυψηλή τάση που φτάνει τα 16KV επιτυγχάνεται με την βοήθεια διόδων (καταρράκτης), που στους σύγχρονους μετασχηματιστές υψηλής τάσης περιέχεται και το κύκλωμα του καταρράκτη.

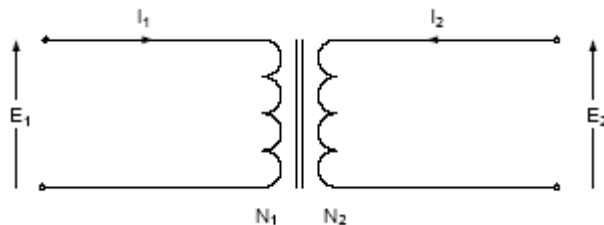
## **2.4 Ο ιδανικός Μετασχηματιστής**

Ιδανικός ονομάζεται ο μετασχηματιστής ο οποίος δεν παρουσιάζει απώλειες κατά τη μεταφορά της ισχύος από το πρωτεύον τύλιγμα στο δευτερεύον. Αυτό σημαίνει ότι ο πυρήνας έχει άπειρη μαγνητική διαπερατότητα  $\mu=\infty$ , άρα όλη η ροή περνά μέσα απ' αυτόν. Δεν εμφανίζει απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων, η άεργη ισχύς που απαιτείται για τη μαγνήτιση του πυρήνα είναι μηδέν. Οι ωμικές αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  καθώς και οι αντιστάσεις σκέδασης  $X_{\sigma 1}$ ,  $X_{\sigma 2}$  των τυλιγμάτων του είναι μηδέν. Η καμπύλη μαγνήτισης ενός ιδανικού Μετασχηματιστή φαίνεται στην Εικόνα 14 ενώ το ισοδύναμο κύκλωμά του στην Εικόνα 15. Η λειτουργία του στηρίζεται στο νόμο του Faraday:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{s} \Rightarrow e = -N \frac{d\Phi}{dt} = \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$



**Εικόνα 14:** Καμπύλη μαγνήτισης ιδανικού μετασχηματιστή

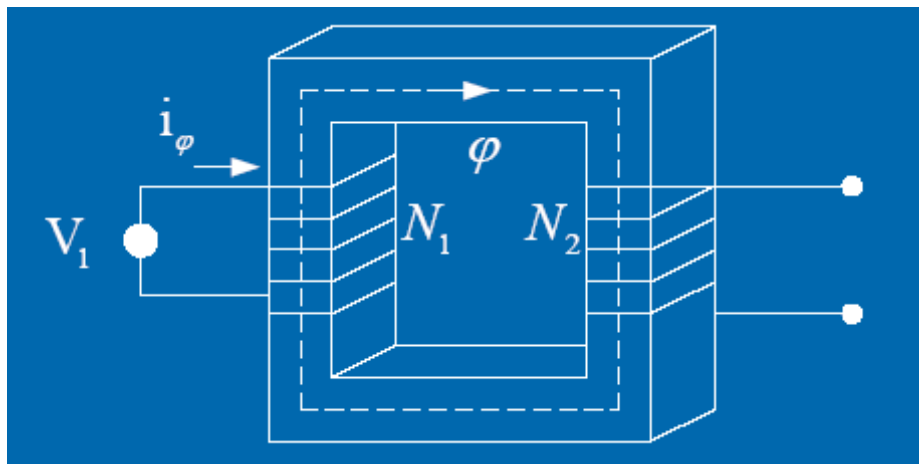


**Εικόνα 15:** Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού μετασχηματιστή

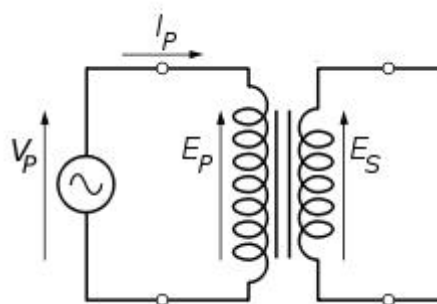
#### 2.4.1 Ο ιδανικός μετασχηματιστής εν κενώ

Κατά την «εν κενώ λειτουργία» του μετασχηματιστή το πρωτεύον τύλιγμα του τροφοδοτείται με μια ημιτονοειδή πηγή τάσης και το δευτερεύον τύλιγμα του παραμένει ανοιχτό ( $I_2=0$ ). Στην Εικόνα 16 φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα της εν κενώ λειτουργίας του μονοφασικού μετασχηματιστή, ενώ στην Εικόνα 17 δείχνεται το αντίστοιχο

ισοδύναμο κύκλωμα.



**Εικόνα 16:**Κυκλωματικό διάγραμμα της εν κενώ λειτουργίας του μονοφασικού μετασχηματιστή<sup>[7]</sup>



**Εικόνα 17:**Ισοδύναμο κύκλωμα της εν κενώ λειτουργίας του μονοφασικού μετασχηματιστή<sup>[11]</sup>

Η ημιτονοειδής τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του πρωτεύοντος τυλίγματος  $u_1 = V_{1,max} \cdot \sin \omega t$  προκαλεί την ροή ενός ημιτονοειδούς ρεύματος μέσα στο πρωτεύον τυλίγμα το οποίο, όπως συμβαίνει μέσα σε ένα καθαρά επαγωγικό κύκλωμα, καθυστερεί σε φάση της τάσεως που το προκαλεί κατά  $90^\circ$ . Η μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) του πρωτεύοντος τυλίγματος  $F_1 = N_1 \cdot i_1$ , προκαλεί την ροή μιας ημιτονοειδούς μαγνητικής ροής  $\Phi$  μέσα στον πυρήνα, σύμφωνα με την σχέση:  $N_1 \cdot i_1 = R_m \cdot \Phi_m$  όπου  $R_m$  η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα του μετασχηματιστή.

Η χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή μέσα στον πυρήνα, όπως προκύπτει από τον νόμο της επαγωγής του Faraday, επάγει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ)  $e_1$ , στο πρωτεύον τυλίγμα, που δίνεται από τη σχέση:  $e_1 = \frac{d\lambda}{dt}$

όπου  $\lambda$  είναι η συνολική πεπλεγμένη ροή που διαπερνά το πρωτεύον τυλίγμα και είναι ίση με το άθροισμα των ροών που διέρχονται από την καθεμιά σπείρα του εν λόγω τυλίγματος, δηλαδή:  $I = \sum_{i=1}^{N_1} \Phi_i$

Η συνολική πεπλεγμένη ροή του πρωτεύοντος τυλίγματος δεν είναι απλά ίση με  $N_1 \Phi$ , γιατί η ροή που διέρχεται από την κάθε μια σπείρα του τυλίγματος δεν είναι η ίδια για όλες τις σπείρες, αλλά διαφέρει ανάλογα με την θέση της καθεμιάς στον πυρήνα. Από αυτό το σημείο και έπειτα θα θεωρούμε στους υπολογισμούς μας ότι όλες οι σπείρες του τυλίγματος διαπερνώνται από το ίδιο ποσό μαγνητικής ροής, το οποίο αντιστοιχεί στην μέση τιμή της μαγνητικής ροής που δίνεται από την σχέση  $\Phi = \frac{I}{N_1}$ .

Επομένως η επαγόμενη τάση  $e_1$  στο πρωτεύον τυλίγμα όπως δίνεται από την σχέση γίνεται:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

Επειδή οι απώλειες ισχύος κατά την λειτουργία του ιδανικού μετασχηματιστή θεωρούνται μηδενικές, από τον νόμο των τάσεων του Kirchhoff προκύπτει ότι η επαγόμενη στο πρωτεύον τυλίγμα ΗΕΔ  $e_1$ , σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα από την ώρα που θα κλείσει ο διακόπτης S, πρέπει να είναι ίση με την τάση της πηγής που εφαρμόζεται στο πρωτεύον τυλίγμα  $u_1$ . Υποθέτοντας ότι η τάση της πηγής είναι  $u_1 = V_{1,\max} \cos \omega t$ , τότε ισχύει:

$$e_1 = u_1 \Rightarrow N_1 \frac{d\Phi}{dt} = V_{1,\max} \cdot \cos \omega t$$

και λύνοντας ως προς την μαγνητική  $\Phi$  προκύπτει:

$$j(t) = \frac{V_{1,\max}}{N_1} \int_0^t \cos(\omega t) dt + \Phi(0) = \frac{V_{1,\max}}{\omega \cdot N_1} \sin(\omega t) + j(0)$$

όπου  $\Phi(0)$  είναι μια σταθερά που προκύπτει από το ολοκλήρωμα και η οποία λαμβάνει υπ' όψιν τυχόν ποσό αρχικής μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα, τη στιγμή που εφαρμόζεται η πηγή τάσης στην είσοδο του μετασχηματιστή. Για απλούστευση των υπολογισμών μας, θα θεωρήσουμε ότι την στιγμή που εφαρμόζεται η πηγή τάσης, η τιμή της μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα είναι μηδέν, δηλαδή  $\Phi(0) = 0$ . Επιπλέον, αντικαθιστώντας την μέγιστη τιμή της τάσεως  $V_1$  με  $V_{1,\max} = \sqrt{2}V_{1,rms}$  και την συχνότητα

$$\omega = 2\pi f \text{ στην σχέση προκύπτει: } \Phi = \frac{\sqrt{2}V_{1,rms}}{2\pi f N_1} \sin(\omega t)$$

Επομένως η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής που δημιουργείται μέσα στον πυρήνα είναι:

$$\Phi_{\max} = \frac{V_{1,rms}}{4,44 N_1 f}$$

Από την σχέση είναι φανερό ότι η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα, εξαρτάται από την ενεργό τιμή της τάσεως της πηγής, από τον αριθμό των σπειρών του πρωτεύοντος τυλίγματος, από την συχνότητα λειτουργίας του μετασχηματιστή και είναι ανεξάρτητη από την μαγνητική αντίσταση  $R_m$  του πυρήνα. Ωστόσο η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής, καθορίζει την μέγιστη τιμή του ρεύματος του πρωτεύοντος τυλίγματος που "απαιτείται" για την παραγωγή της συγκεκριμένης τιμής της μαγνητικής ροής, σύμφωνα με την σχέση:

$$R_m \cdot \Phi_{\max} = i_{1\max} \cdot N_1$$

Το ρεύμα  $i_{1\max}$  είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος που ρέει μέσα στο πρωτεύον τυλίγμα κατά την εν κενώ λειτουργία και λέγεται ρεύμα μαγνήτισης. Η αποστολή του είναι η δημιουργία της μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα με τιμή τέτοια ώστε η ΗΕΔ  $e_1$  που επάγεται στο πρωτεύον τυλίγμα να είναι ίση με την τάση της πηγής  $v_1$ . Εφ' όσον ισχύει  $V_{1rms} = E_{1rms}$ , τότε η  $E_{1rms}$  δίνεται από την σχέση

$$E_{1rms} = 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi_{\max}$$

Η χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή  $\Phi$  όμως διαρρέει και το δευτερεύον τυλίγμα του μετασχηματιστή και επάγει σ' αυτό μια ΗΕΔ  $e_2$ . Εφ' όσον το δευτερεύον τυλίγμα είναι ανοιχτό, η ΗΕΔ  $e_2$  ισούται με την τάση στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος τυλίγματος  $v_2$ . Επομένως η ενεργός τιμή της τάσεως  $v_2$  δίνεται από την σχέση:  $V_{2rms} = E_{2rms} = 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi_{\max}$

Από τις σχέσεις και προκύπτει η σχέση :

$$\frac{V_{1rms}}{V_{2rms}} = \frac{E_{1rms}}{E_{2rms}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

σύμφωνα με την οποία ο λόγος των ΗΕΔ που επάγονται στα δύο τυλίγματα ισούται με τον λόγο του αριθμού των σπειρών των δύο τυλιγμάτων. Ο λόγος αυτός ισούται με τον λόγο μετασχηματισμού των τάσεων των δύο τυλιγμάτων.

Εφ' όσον οι απώλειες ισχύος στον ιδανικό Μ/Σ είναι μηδενικές, η φαινόμενη ισχύς εισόδου στην πλευρά του πρωτεύοντος ισούται με την φαινόμενη ισχύ εξόδου στην πλευρά του δευτερεύοντος, επομένως:

$$S = V_{1rms} \cdot I_{1rms} = V_{2rms} \cdot I_{2rms} \Rightarrow \frac{I_{1rms}}{I_{2rms}} = \frac{V_{2rms}}{V_{1rms}} = \frac{1}{a}$$

Σύμφωνα με την τελευταία σχέση, ο λόγος των ρευμάτων των δύο τυλιγμάτων ισούται με το αντίστροφο του λόγου μετασχηματισμού των τάσεων των δύο τυλιγμάτων.

Οι τελείες που εφαρμόζονται στον ένα από τους δύο ακροδέκτες του καθενός τυλίγματος, υποδηλώνουν κάποιες πληροφορίες που αφορούν τις πολικότητες των τάσεων του μετασχηματιστή. Η σύμβαση που ισχύει σύμφωνα με την τοποθέτηση των τελειών πάνω στους ακροδέκτες είναι η εξής:

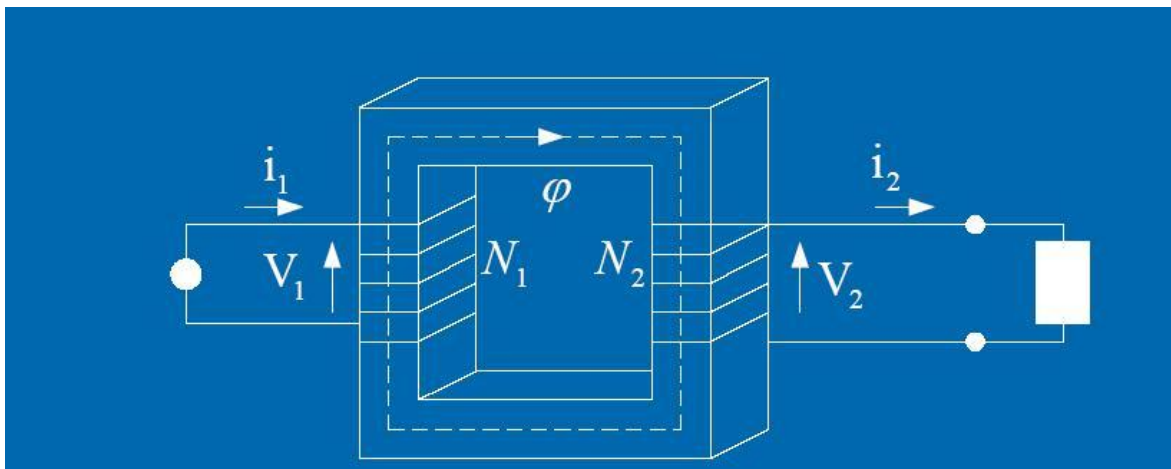
- § Οι πολικότητες των τάσεων στα δύο τυλίγματα του μετασχηματιστή, είναι οι ίδιες σε σχέση με τους σημειωμένους ακροδέκτες τους.
- § Αν το ρεύμα στο πρωτεύον τυλίγμα έχει φορά προς τον σημειωμένο ακροδέκτη του, τότε το ρεύμα στο δευτερεύον τυλίγμα θα έχει φορά προς τον μη σημειωμένο ακροδέκτη του.

Η φυσική σημασία της τοποθέτησης των τελειών είναι ότι ένα ρεύμα που έχει φορά προς τον σημειωμένο ακροδέκτη του τυλίγματος προκαλεί μια θετική μαγνητεγερτική δύναμη, ενώ

ένα ρεύμα που έχει φορά προς τον μη σημειωμένο ακροδέκτη του τυλίγματος προκαλεί μια αρνητική μαγνητεγερτική δύναμη.

## 2.4.2 Ο ιδανικός Μετασχηματιστής υπό φορτίο

Στην Εικόνα 18 βλέπουμε έναν ιδανικό μετασχηματιστή που συνδέεται με ένα φορτίο σύνθετης αντίστασης. Το πρωτεύον τυλίγμα του συνδέεται με την πηγή εναλλασσόμενης τάσης  $V_1$ , ενώ το δευτερεύον συνδέεται με φορτίο  $Z_L = R_L + jX_L$  και σε αυτό κυκλοφορεί ρεύμα  $I_2 = E_2 / Z_L$ . Σύμφωνα με την συνδεσμολογία των τυλιγμάτων, η φορά των ρευμάτων μέσα στα τυλίγματα είναι τέτοια ώστε η μαγνητεγερτική δύναμη του δευτερεύοντος τυλίγματος να είναι αντίθετη από την αντίστοιχη του πρωτεύοντος.



Εικόνα 18:Ιδανικός μετασχηματιστής υπό φορτίο<sup>[7]</sup>

Έτσι η συνολική μαγνητεγερτική δύναμη που προκύπτει και η οποία προκαλεί την δημιουργία της μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα, είναι η διαφορά των μαγνητεγερτικών δυνάμεων των δύο τυλιγμάτων. Επομένως:  $F_{ολ} = \Sigma F = F_1 - F_2 = N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2$  και η προκύπτουσα μαγνητική ροή μέσα στον πυρήνα υπολογίζεται από την σχέση:

Εάν η τάση της πηγής που εφαρμόζεται στην είσοδο παραμένει αμετάβλητη, τότε, για να διατηρηθεί η ισορροπία των τάσεων στην πλευρά του πρωτεύοντος πρέπει και η επαγόμενη ΗΕΔ  $e_1$  να παραμείνει σταθερή. Με άλλα λόγια το αναγκαίο ποσό της μαγνητικής ροής μέσα στον πυρήνα, το οποίο επάγει την συγκεκριμένη τιμή της ΗΕΔ  $e_1$  που ισορροπεί την τάση της πηγής, πρέπει να παραμείνει σταθερό. Επομένως το αναγκαίο ποσό του ρεύματος μαγνητίσεως  $I_m$ , για την δημιουργία της συγκεκριμένης τιμής της μαγνητικής ροής, είναι το ίδιο με αυτό κατά την εν κενώ λειτουργία του Μ/Σ. Άρα:

$$N_1 \cdot I_m = R \cdot \Phi$$

Από τις σχέσεις 2.13 και 2.14 προκύπτει:

$$N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = N_1 \cdot I_m \Rightarrow N_1 \cdot I_1 = N_1 \cdot I_m + N_2 \cdot I_2 \Rightarrow I_1 = I_m + \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = I_m + I_2'$$

Οπότε για να διατηρηθεί η ισορροπία των τάσεων στην πλευρά του πρωτεύοντος πρέπει τα μέτρα των τάσεων αυτών να παραμείνουν τα ίδια όπως ήταν κατά την εν κενώ λειτουργία.

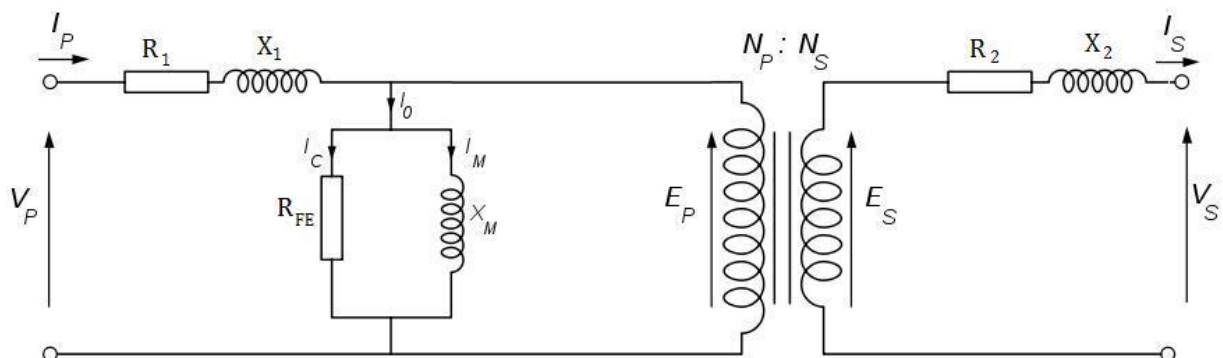
Για αυτόν το λόγο, το ρεύμα του πρωτεύοντος αυξάνεται κατά  $I_2' = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_2$  ώστε να

αντισταθμίζει την μαγνητεγερτική δύναμη του δευτερεύοντος τυλίγματος. Το ποσό του ρεύματος αυτού,  $I_2'$ , καλείται «ρεύμα αντιδράσεως». Καθώς μεταβάλλεται το μέγεθος του φορτίου  $Z_L$ , μεταβάλλεται το ρεύμα του δευτερεύοντος τυλίγματος  $I_2$  και εφ' όσον το ρεύμα μαγνήτισης  $I_m$  παραμένει σταθερό, το ρεύμα αντιδράσεως  $I_2'$  ακολουθεί αυτήν την μεταβολή ώστε να αντισταθμίζει την αντίστοιχη μαγνητεγερτική δύναμη του δευτερεύοντος τυλίγματος και να αποκαθίσταται η ισορροπία των τάσεων.

## 2.5 Ισοδύναμο Πραγματικού Μονοφασικού Μετασχηματιστή για τη μόνιμη Κατάσταση

Κατά την μελέτη του ιδανικού μονοφασικού μετασχηματιστή που προηγήθηκε, έχουν αμεληθεί εντελώς οι απώλειες που λαμβάνουν χώρα κατά την λειτουργία του πραγματικού μετασχηματιστή. Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η λειτουργία του πραγματικού μετασχηματιστή και από τη μελέτη που θα ακολουθήσει θα εξαχθεί το βασικό ισοδύναμο κύκλωμα της λειτουργίας του. Ωστόσο επειδή η μελέτη που ακολουθεί έχει σαν στόχο την εξαγωγή των βασικών αρχών της λειτουργίας του μετασχηματιστή, η χωρητικότητα των τυλιγμάτων θεωρείται αμελητέα προς αποφυγή της πολυπλοκότητας των σχέσεων που θα εξαχθούν. Η υπόθεση αυτή είναι έγκυρη για όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, εκτός των περιπτώσεων εκείνων κατά τις οποίες η συχνότητα λειτουργίας  $f$ , έχει αρκετά υψηλές τιμές. Στις περιπτώσεις αυτές η επίδραση της χωρητικότητας μπορεί να ληφθεί υπ' όψιν με διάφορους προσεγγιστικούς τρόπους.

Στην Εικόνα 19, δείχνεται το κυκλωματικό διάγραμμα ενός μονοφασικού μετασχηματιστή, στο οποίο δείχνονται οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων  $R_1$  και  $R_2$ , οι επαγωγικές αντιστάσεις  $X_{\sigma 1}$  και  $X_{\sigma 2}$  που εκφράζουν τη σκέδαση της μαγνητικής ροής, καθώς και την  $X_m$  η οποία εκφράζει την αμοιβαία μαγνητική ροή  $\Phi_m$ .



Εικόνα 19: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πραγματικού μονοφασικού μετασχηματιστή. <sup>[11]</sup>

Το ρεύμα μαγνήτισης είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή ενώ η κυματομορφή του έπεται της κυματομορφής της τάσης κατά  $90^\circ$ . Έτσι το ρεύμα αυτό αντιστοιχίζεται σε μία αντίδραση  $X_m$  τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή τάσης. Τέλος το ρεύμα απωλειών του πυρήνα  $I_{Fe}$  (απώλειες οφειλόμενες στο φαινόμενο



της υστέρησης και στα δινορεύματα) είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή και η κυματομορφή του είναι σε φάση με την κυματομορφή της τάσης. Έτσι αυτό το ρεύμα είναι δυνατό να παρουσιάζεται με μια αντίσταση  $R_{Fe}$  τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή τάσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά εκείνα τα στοιχεία που οδηγούν στην εξαγωγή αυτού του τύπου ισοδύναμου μοντέλου μετασχηματιστή.

## 2.6 Ροή Σκέδασης

Κατά την εξέταση του ιδανικού μετασχηματιστή θεωρήσαμε ότι όλες οι δυναμικές γραμμές της μαγνητικής ροής βρίσκονταν περιορισμένες μέσα στον υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας πυρήνα. Στην πραγματικότητα όμως μέρος αυτών των γραμμών διαγράφουν διαμέσου του αέρα κλειστούς βρόγχους, διασχίζοντας έτσι εν μέρει τον αέρα και εν μέρει τα αντίστοιχα τυλίγματα. Έτσι προκύπτουν οι «απώλειες σκεδάσεως».

Ορίζεται «μαγνητική ροή σκεδάσεως  $\Phi_{1\sigma}$ » ως το ποσό της συνολικής μαγνητικής ροής του πρωτεύοντος, η οποία διαρρέει εν μέρει το τυλίγμα αυτό και εν μέρει τον αέρα. Εφ' όσον ο δρόμος ροής της μαγνητικής ροής σκεδάσεως δεν περιορίζεται μέσα στον πυρήνα αλλά επεκτείνεται και στον αέρα, συμβολίζουμε την μαγνητική αντίσταση του δρόμου αυτού ως  $X_{1\sigma}$ . Ωστόσο η κατεύθυνση ροής της μαγνητικής ροής σκεδάσεως  $\Phi_{1\sigma}$ , καθορίζεται από την φορά ροής του ρεύματος  $I_1$  μέσα στο πρωτεύον τυλίγμα.

Όμοια ορίζεται και η «μαγνητική ροή σκεδάσεως  $\Phi_{2\sigma}$ » ως το ποσό της συνολικής μαγνητικής ροής του δευτερεύοντος τυλίγματος, που διαρρέει εν μέρει το τυλίγμα αυτό και εν μέρει τον αέρα. Η μαγνητική ροή αυτή προκύπτει από την μαγνητεγερτική δύναμη του δευτερεύοντος τυλίγματος και η κατεύθυνση ροής της προκύπτει από την φορά του ρεύματος  $i_2$  μέσα στο δευτερεύον τυλίγμα. Η μαγνητική αντίσταση του δρόμου ροής της μαγνητικής ροής σκεδάσεως  $\Phi_{2\sigma}$  συμβολίζεται με  $X_{2\sigma}$ .

## 2.7 Απώλειες Χαλκού

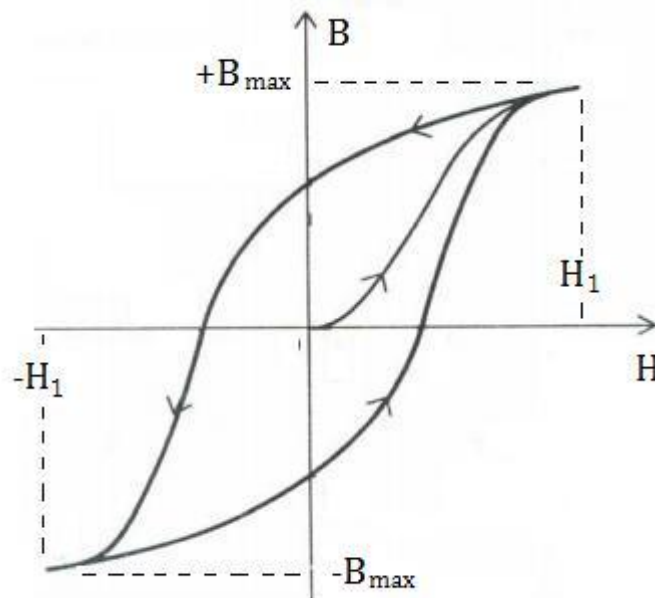
Στους μετασχηματιστές υπάρχουν απώλειες ισχύος που οφείλονται στην αντίσταση των τυλιγμάτων. Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από τα ρεύματα των τυλιγμάτων γι' αυτό και οι αντιστάσεις που τις δικαιολογούν τοποθετούνται σε σειρά στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Οι ωμικές αντιστάσεις αφ' ενός προκαλούν πτώσεις τάσεως και αφ' ετέρου απώλειες ισχύος οι οποίες εκδηλώνεται υπό μορφή θερμότητας (φαινόμενο Joule) και είναι γνωστές ως «απώλειες Cu». Για τον περιορισμό αυτών των ωμικών αντιστάσεων, κατά συνέπεια και των απωλειών Cu, είναι αναγκαία η εκλογή της κατάλληλης διατομής των τυλιγμάτων. Επειδή οι μετασχηματιστές απαιτούν μεγάλα μήκη αγωγού, αυτές οι απώλειες μπορεί να είναι σημαντικός παράγοντας. Αυξάνοντας τη διατομή των τυλιγμάτων, επιτυγχάνουμε μείωση των απωλειών, αλλά με ταυτόχρονη σημαντική αύξηση στο κόστος, το μέγεθος και το βάρος.

Το τύλιγμα υψηλής τάσης παρουσιάζει μεγαλύτερη ωμική αντίσταση από το τύλιγμα χαμηλής τάσης, γιατί αποτελείται από μεγαλύτερο αριθμό σπειρών. Στην πράξη, οι αντιστάσεις των δύο τυλιγμάτων εκλέγονται έτσι ώστε να ισχύει:  $R_1 I_1^2 \approx R_2 I_2^2$ , δηλαδή οι απώλειες Cu στα δύο τυλίγματα να είναι περίπου ίσες.

## 2.8 Απώλειες υστέρησης

Για τιμές της έντασης σταθερού - σε τιμή και κατεύθυνση - μαγνητικού πεδίου  $H$  καταγράφονται οι αντίστοιχες τιμές της μαγνητικής επαγωγής  $B$  του υλικού. Κάνοντας σάρωση των τιμών του  $H$  από μια ελάχιστη αρνητική τιμή  $[-H]$  έως μια μέγιστη θετική τιμή  $[+H]$  τα καταγεγραμμένα σημεία  $[H, B]$  απεικονίζονται στο  $H$ - $B$  επίπεδο. Όταν ενωθούν τα σημεία αυτά σχηματίζεται ένας βρόχος ο οποίος ονομάζεται στατικός βρόχος υστέρησης ή βρόχος υστέρησης ανεξάρτητος από την συχνότητα ή πιο απλά βρόχος υστέρησης,



**Εικόνα 20:** Βρόχος Υστέρησης

Για κάθε ένα κύκλο περιοδικής μεταβολής της έντασης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που επιβάλλεται στον πυρήνα, η ενέργεια που δεσμεύεται μέσα στον πυρήνα καθώς αυξάνεται η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που αποδεσμεύεται από τον πυρήνα προς το υπόλοιπο κύκλωμα όταν η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μειώνεται. Το ποσό αυτό της πυκνότητας ενέργειας που χάνεται καλείται «απώλειες υστέρησης».

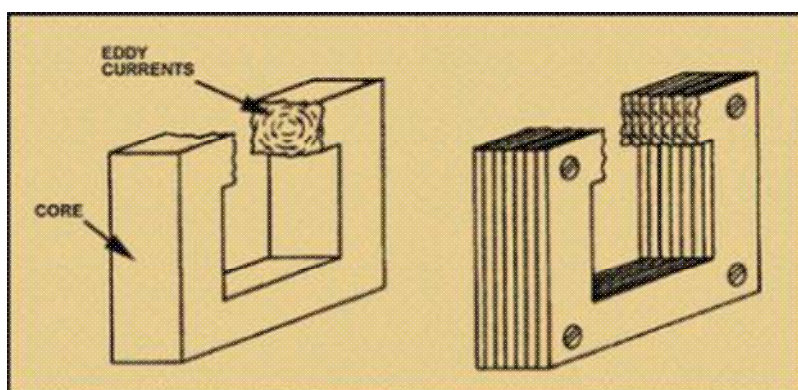
Αυτό το είδος απωλειών μπορεί να μειωθεί μέσα από μια σωστή επιλογή υλικού για τον πυρήνα, διαλέγοντας π.χ. ένα κράμα με χαμηλή υστέρηση, με «λεπτή» δηλαδή καμπύλη υστέρησης B/H, καθώς επίσης και από μια σχεδίαση η οποία **θα** επιτρέπει ένα ελάχιστο όριο ανοχής του πυρήνα στην πυκνότητα της μαγνητικής ροής (μεγάλη περιοχή διατομής).

Η αύξηση της θερμοκρασίας του σιδηρομαγνητικού πυρήνα είναι ανεπιθύμητη, γιατί εξασθενεί τις μαγνητικές του ιδιότητες (μειώνεται η μαγνητική του διαπερατότητα). Ωστόσο όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν ένα όριο θερμοκρασίας, που καλείται θερμοκρασία Curie, πέραν του οποίου αποκτούν παραμαγνητική συμπεριφορά.

## 2.9 Απώλειες Δινορευμάτων

Ίσως οι πιο σημαντικές από τις «απώλειες πυρήνα» είναι οι απώλειες δινορευμάτων, οι οποίες είναι ωμικές και οφείλονται στη διαδρομή επαγόμενων ρευμάτων μέσα από τον πυρήνα σιδήρου. Όπως ήδη γνωρίζουμε από τον νόμο της επαγωγής του Faraday, όταν μια αγωγίμη μάζα βρεθεί μέσα σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο τότε, εξαιτίας της χρονικά μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής που την διαπερνά, επάγεται σ' αυτήν μια ΗΕΔ. Η επαγόμενη αυτή ΗΕΔ αναγκάζει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της αγωγίμης μάζας να κινηθούν σε τυρβώδεις τροχιές, σχηματίζοντας κλειστούς βρόγχους ή δίνες, γι' αυτό και τα ρεύματα αυτά ονομάζονται «δινορεύματα».

Η ροή των δινορευμάτων μέσα στον σιδηρομαγνητικό πυρήνα έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας ανάλογη της ποσότητας  $I^2 R$ , η οποία εκδηλώνεται υπό μορφή θερμότητας μέσα στον σιδηρομαγνητικό πυρήνα (απώλειες Joule) και καλούνται «απώλειες δινορευμάτων». Οι απώλειες δινορευμάτων είναι ανάλογες του γινομένου  $I^2 R$  και εξαρτώνται από την ειδική αγωγιμότητα του υλικού πυρήνα και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυρήνα.

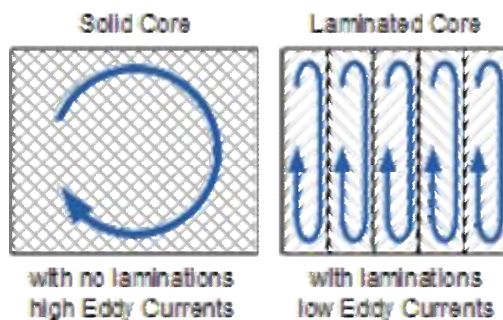


**Εικόνα 21:** Δινορεύματα στον πυρήνα ΜΣ <sup>[12]</sup>

Η αύξηση της θερμοκρασίας του πυρήνα λόγω των απωλειών δινορευμάτων είναι ανεπιθύμητη γιατί προκαλεί αλλοίωση των μαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού του πυρήνα (μείωση της μαγνητικής του διαπερατότητας) και κατά συνέπεια μείωση του βαθμού απόδοσης της ηλεκτρομαγνητικής συσκευής. Μια πολύ γνωστή κατηγορία υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πυρήνων των μετασχηματιστών ονομάζονται φερρίτες τα οποία είναι οξειδία σιδήρου σε κεραμική μορφή (μαγνητικά κεραμικά όπως τα πιάτα κουζίνας).

Συγκριτικά με τα μαγνητικά κράματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μετασχηματιστών, οι φερρίτες παρουσιάζουν μικρότερη μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$ , μικρότερη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B_{max}$  και είναι ακριβότερα. Τα παραπάνω μειονεκτήματα όμως αντισταθμίζονται από το πλεονέκτημα της μειωμένης ειδικής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν, η τιμή της οποίας ουσιαστικά τα καθιστά απαλλαγμένα από δινορεύματα.

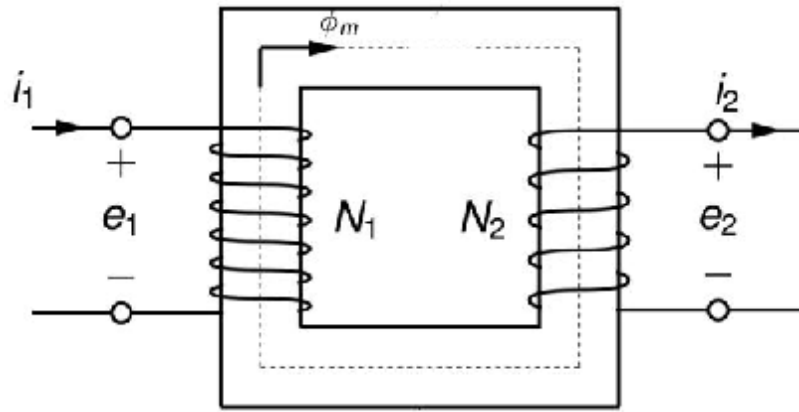
Η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την μείωση των δινορευμάτων είναι η μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του πυρήνα. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την προσθήκη άλλων υλικών στο βασικό σιδηρομαγνητικό υλικό τον σίδηρο, όπως για παράδειγμα σιλκόνιο. Η χρησιμοποίηση όμως ενός κράματος σιδήρου με χαμηλή ειδική αγωγιμότητα δεν μπορεί από μόνη της σαν μέθοδος να μειώσει τα δινορεύματα σε ένα επιθυμητό επίπεδο. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται μια επιπρόσθετη μέθοδος που συνίσταται στον τεμαχισμό του πυρήνα σε πολύ λεπτά φύλλα ή ελάσματα. Ο πυρήνας συναρμολογείται από ένα μεγάλο αριθμό τέτοιων ελασμάτων, τα οποία μονώνονται μεταξύ τους με ένα στρώμα μονωτικού υλικού (π.χ. βερνίκι ή κατάλληλο χαρτί), εμποδίζοντας έτσι την ροή ρεύματος μεταξύ τους. Στις παρακάτω εικόνες παρατηρούνται οι διαφορές των δινορευμάτων ανάμεσα σε έναν συμπαγή και σε έναν με ελάσματα πυρήνα σιδήρου.



**Εικόνα 22:** Ελάττωση Δινορευμάτων με χρήση πολλαπλών ελασμάτων <sup>[13]</sup>

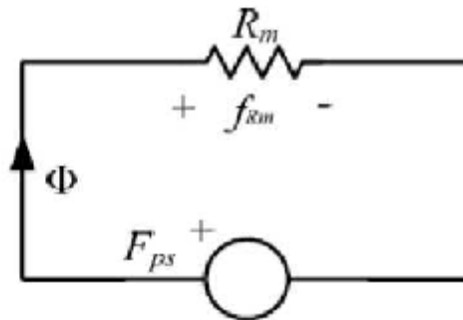
## 2.10 Μαγνητικό κύκλωμα πυρήνα μονοφασικού μετασχηματιστή

Η μεταβολή της μαγνητικής ροής μέσα στον σιδηρομαγνητικό πυρήνα ως προς το χρόνο είναι η αιτία για την δημιουργία τάσεως εξ' επαγωγής στο δευτερεύον τύλιγμα του μονοφασικού μετασχηματιστή.



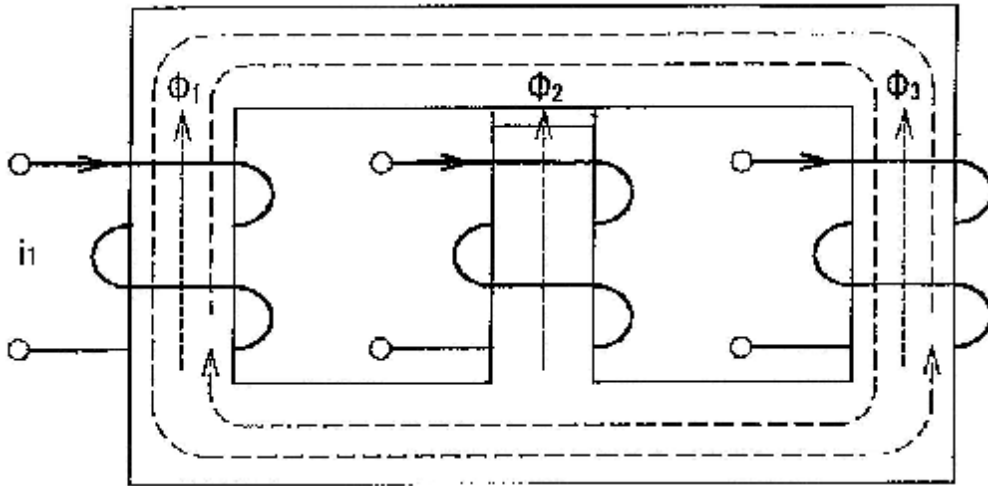
**Εικόνα 23:** Μονοφασικός Μετασχηματιστής

Από το παραπάνω κύκλωμα προκύπτει και το αντίστοιχο μαγνητικό ισοδύναμο του πυρήνα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 24 . Στο κύκλωμα αυτό αναπαρίσταται η μαγνητική ροή  $\Phi$ , η μαγνητική αντίσταση και η συνολική μαγνητεγερτική δύναμη  $f_{Rm}$  η οποία είναι ίση με την διαφορά των μαγνητεγερτικών δυνάμεων των δύο τυλιγμάτων.



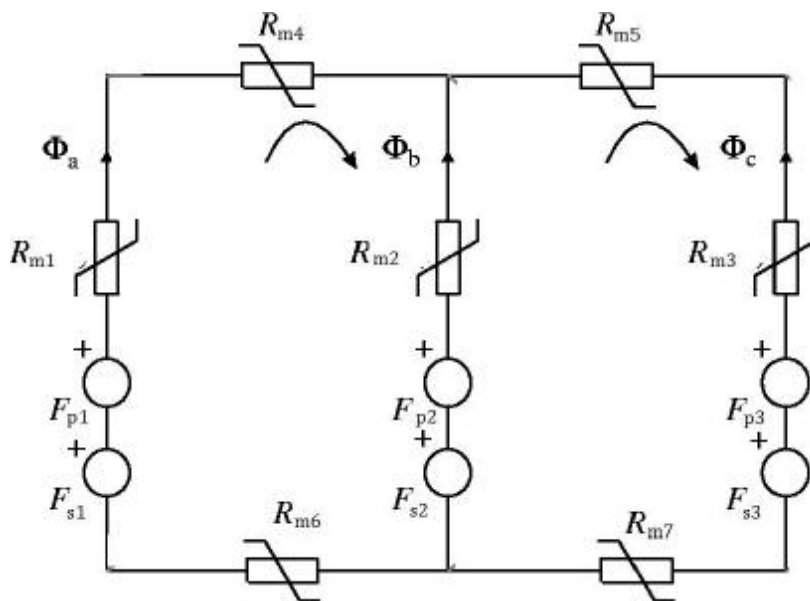
**Εικόνα 24:** Μαγνητικό κύκλωμα πυρήνα τριφασικού μετασχηματιστή

Ο μαγνητικός πυρήνας των τριών σκελών του τριφασικού μετασχηματιστή έχει στη γενική του μορφή επτά τμήματα διαφορετικών διατομών. Οι μαγνητικές ροές των τριών σκελών είναι  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ .



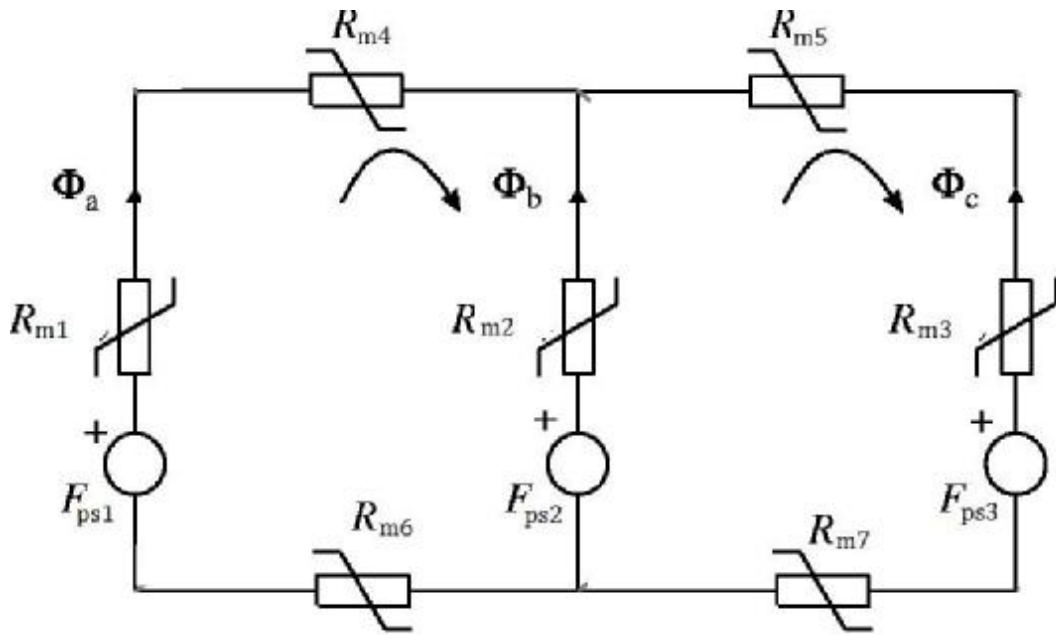
**Εικόνα 25:** Οι μαγνητικές ροές των τριών τμημάτων του πυρήνα του τριφασικού ΜΣ

Στην Εικόνα 26 που ακολουθεί φαίνεται το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του τριφασικού μετασχηματιστή. Οι μαγνητοεγερτικές δυνάμεις  $F_{pj}$  και  $F_{sj}$  οφείλονται στα ρεύματα των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή και υπολογίζονται από τους τύπους  $F_{pj}=N_{pj} \cdot I_{pj}$  και  $F_{sj}=N_{sj} \cdot I_{sj}$



**Εικόνα 26:** Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα τριφασικού μετασχηματιστή

Το παραπάνω κύκλωμα μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω σε αυτό της Εικόνας 27 καθώς οι μαγνητικές δυνάμεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος βρίσκονται εν σειρά για κάθε σκέλος.



**Εικόνα 27:** Απλοποιημένο ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα τριφασικού μετασχηματιστή

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

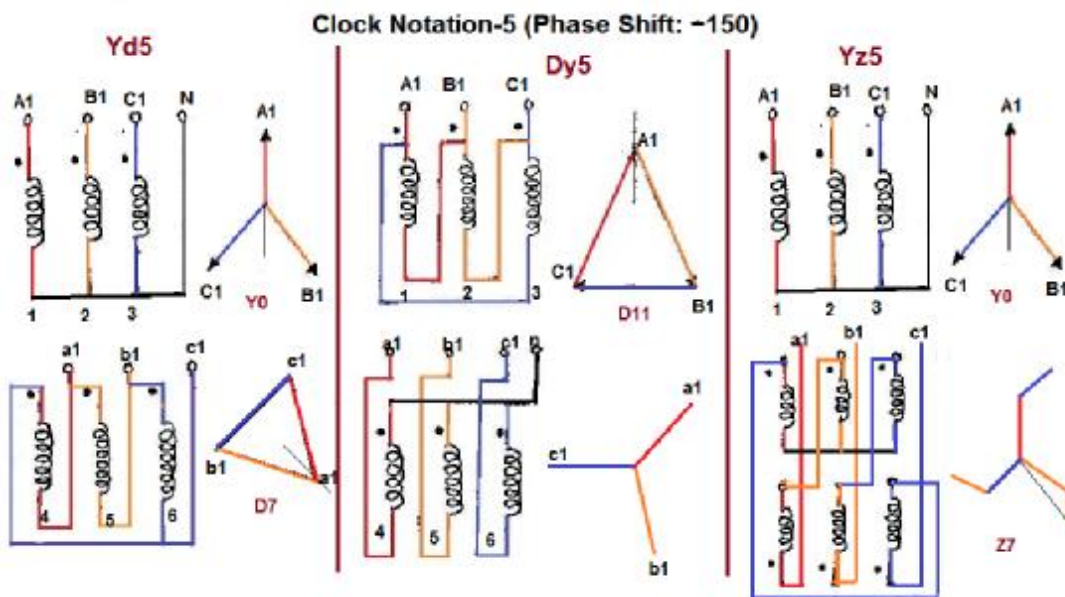
### Τριφασικός Μετασχηματιστής

#### 3.1 Συνδεσμολογίες

Τα τρία πρωτεύοντα και τα τρία δευτερεύοντα του μετασχηματιστή μπορούν να συνδεθούν κατά διάφορους τρόπους και έτσι να προκύψουν διάφορες ομάδες συνδεσμολογίας. Στην πράξη μόνο μερικές από αυτές χρησιμοποιούνται λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Στον Πίνακα που ακολουθεί, αναγράφονται οι συμβολισμοί για τις διάφορες ομάδες συνδεσμολογίας που χρησιμοποιούνται διεθνώς.

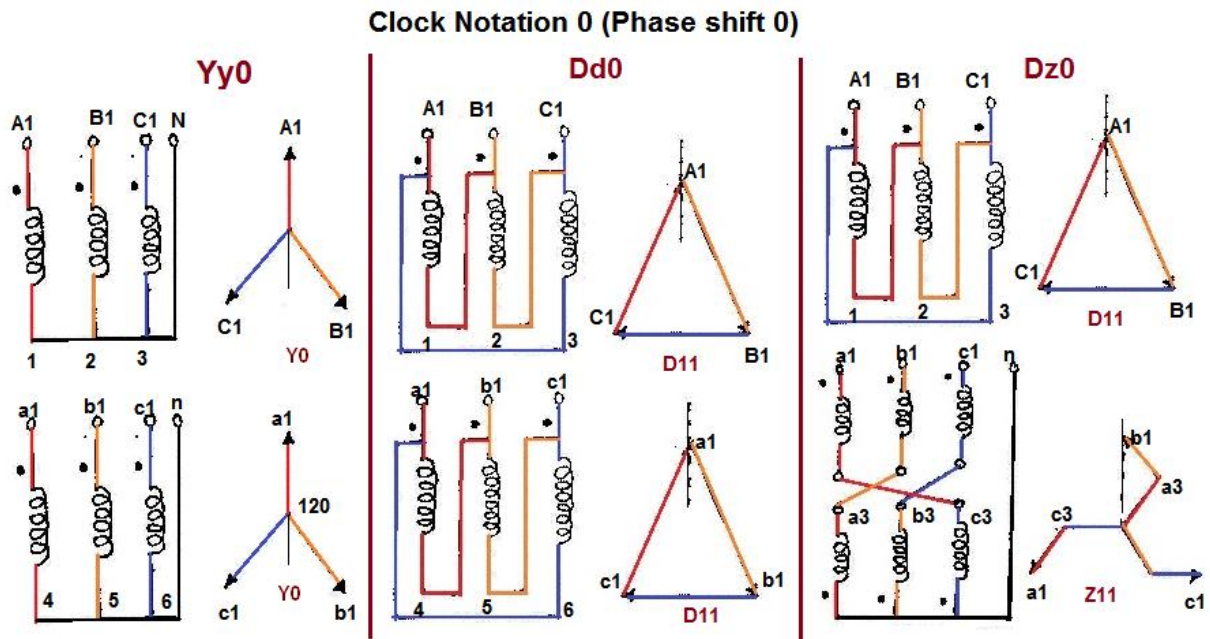
Συνδεσμολογία Τυλίγματος	Υψηλή Τάση	Χαμηλή Τάση
Τρίγωνο	D	<b>d</b>
Αστέρας	Y	Y
Τεθλασμένος αστέρας	Z	<b>Z</b>

Τα κεφαλαία γράμματα αναφέρονται στην υψηλή τάση, ενώ τα μικρά στην χαμηλή. Για ένα πλήρη συμβολισμό γράφουμε πρώτα το κεφαλαίο γράμμα μετά το μικρό και έναν αριθμό, ο οποίος ονομάζεται χαρακτηριστικός αριθμός και είναι ένα πολλαπλάσιο της γωνίας των  $30^\circ$ . Αυτός ο αριθμός επί  $30^\circ$  μας δείχνει κατά πόσες μοίρες το διάνυσμα της χαμηλής τάσης επιπορεύεται του διανύσματος της υψηλής τάσης για την ίδια φάση του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Παραδείγματα συνδεσμολογιών με χαρακτηριστικούς αριθμούς μαζί με τα διανυσματικά τους διαγράμματα φαίνονται στις Εικόνες 28 και 29



**Εικόνα 28:** Συνδεσμολογίες με χαρακτηριστικούς αριθμούς <sup>[15]</sup>



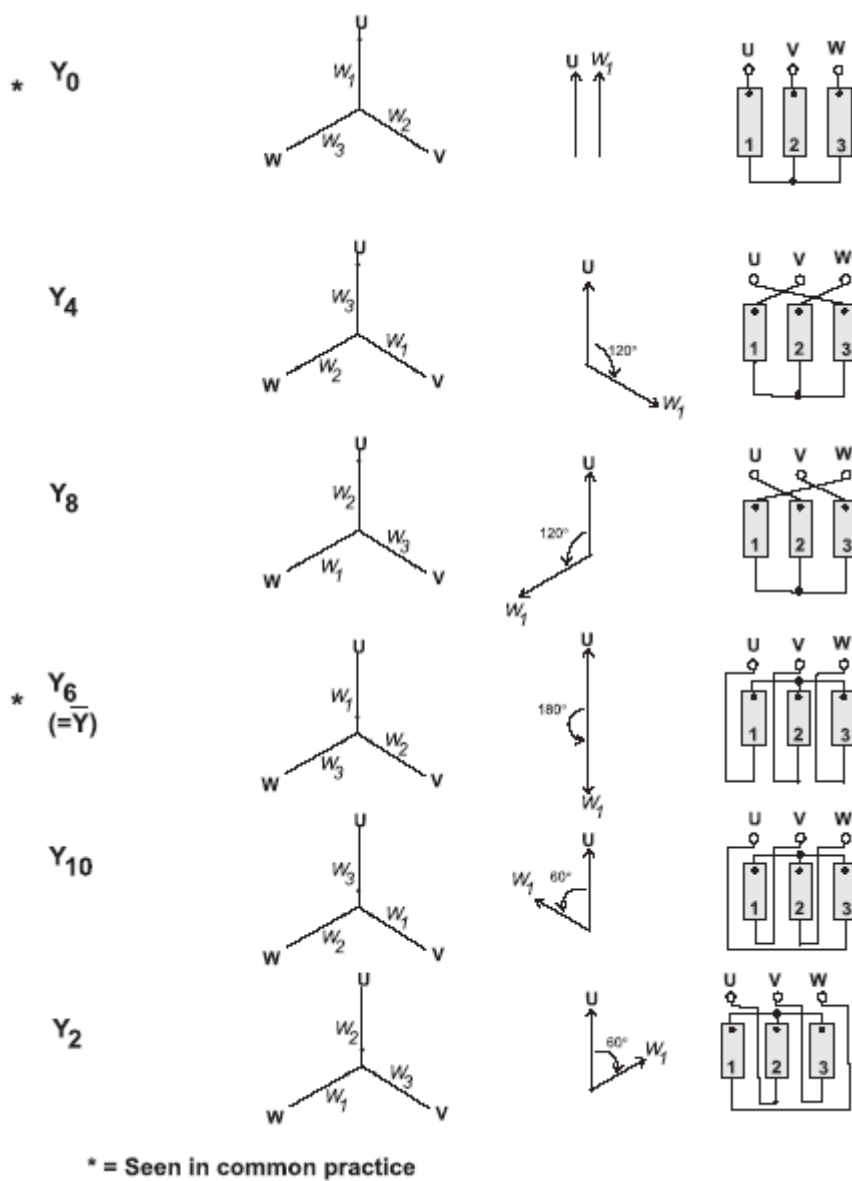


**Εικόνα 29:** Συνδεσμολογίες με χαρακτηριστικούς αριθμούς <sup>[15]</sup>

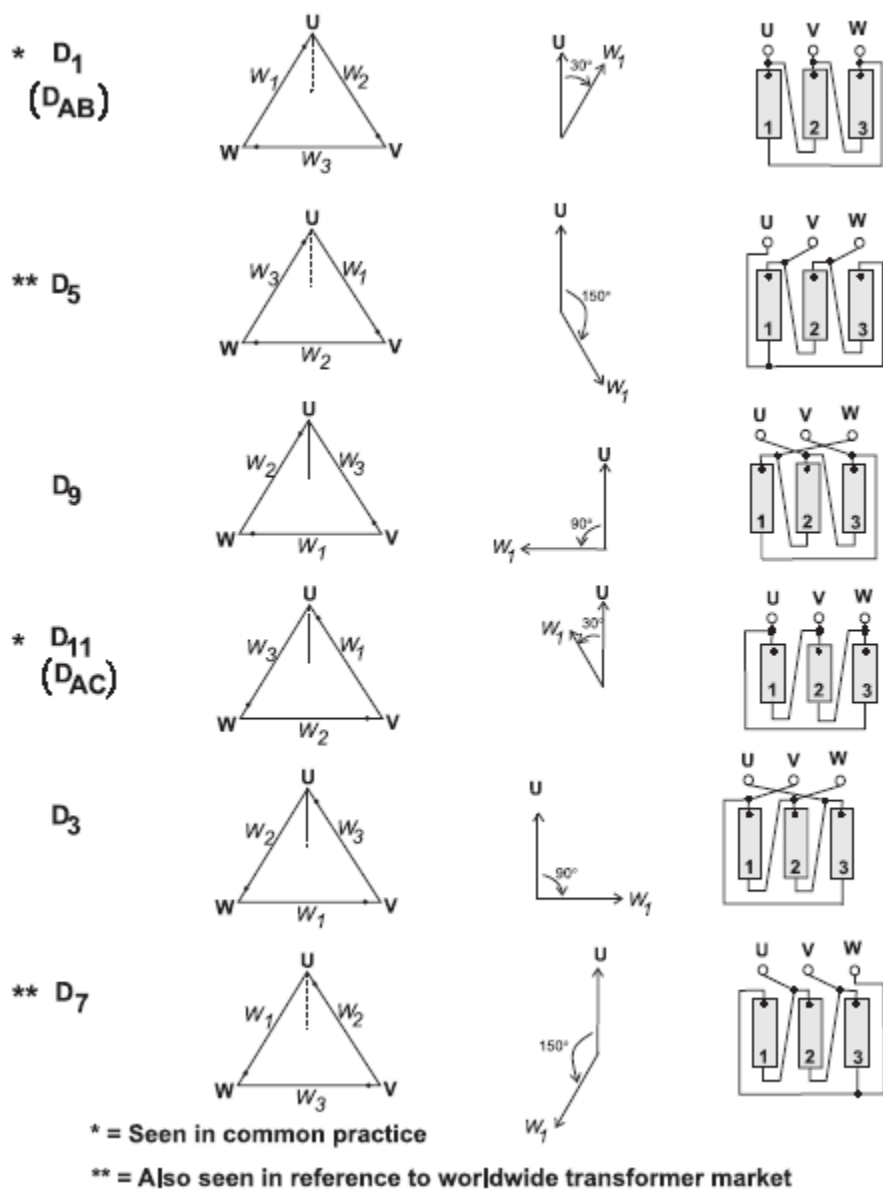
Εφαρμογή συνήθως βρίσκουν οι ομάδες  $Dy0$ ,  $Dy5$ ,  $Yd5$ ,  $Yz5$ . Το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή μπορούν να συνδεθούν κατ' αστέρα ή κατά τρίγωνο.

Στο τύλιγμα χαμηλής τάσης υπάρχει και ένα τρίτο είδος συνδεσμολογίας, αυτό του τεθλασμένου αστέρα ( $Z_{ik}$ - $Z_{ak}$ ). Στον τεθλασμένο αστέρα κάθε φάση του δευτερεύοντος είναι χωρισμένη σε δύο ίσα μέρη και το ένα μέρος συνδέεται σε σειρά με το μισό μιας άλλης φάσης. Το πλεονέκτημα αυτής της συνδεσμολογίας είναι ότι σε μια ασύμμετρη φόρτιση του δευτερεύοντος το ρεύμα κατανέμεται σε δύο φάσεις. Έτσι στην περίπτωση που ένας καταναλωτής συνδέεται μεταξύ ενός ακροδέκτη και του ουδέτερου σημείου το ρεύμα διέρχεται από δύο τυλίγματα (μισά) σε διαφορετικές φάσεις και η ασυμμετρία μειώνεται.

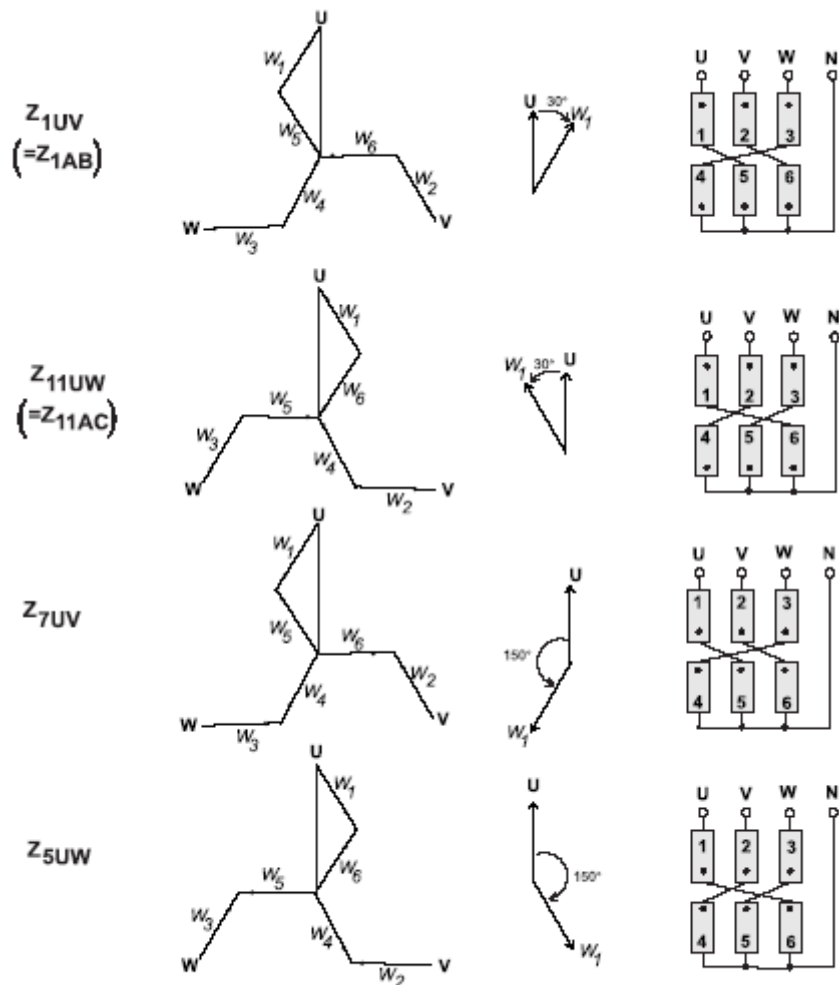
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται όλες οι δυνατές συνδεσμολογίες των τριφασικών μετασχηματιστών



Εικόνα 30: Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών [16]



Εικόνα 31: Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών <sup>[16]</sup>

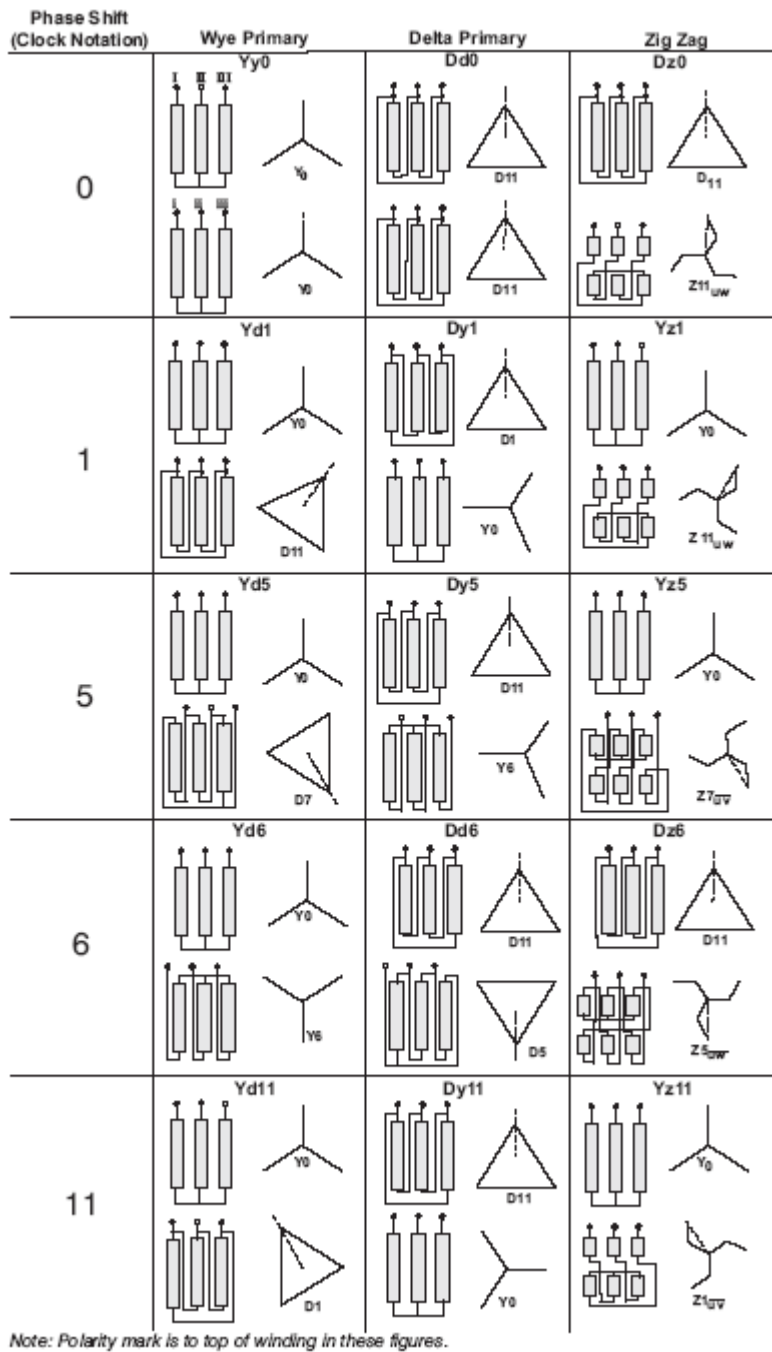


Partial listing of possible configurations:

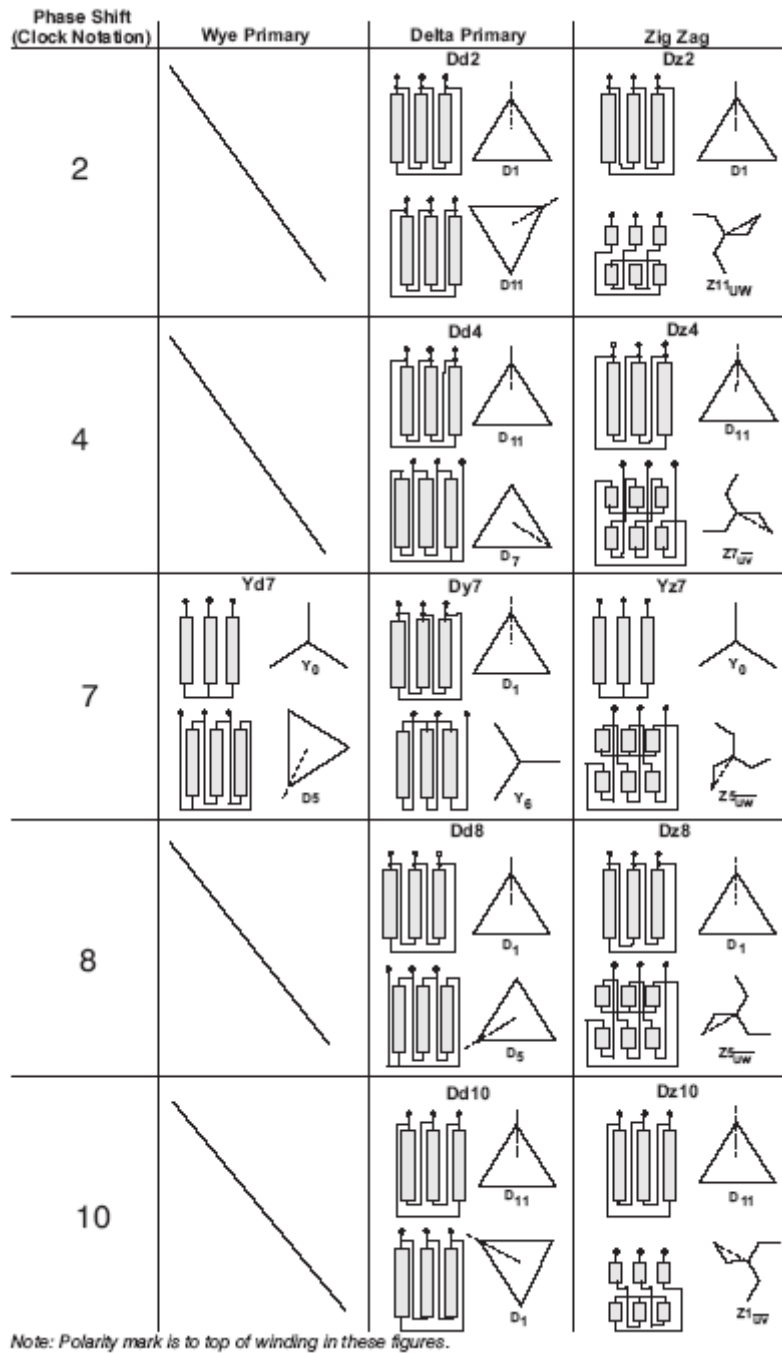
- A 180° reversal of any of these is found by reversing common and HV terminals.
- Phase shifts via swaps of U, V, W not shown.

Εικόνα 32: Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών [16]

Στην Εικόνα 33 ένας αναλυτικός πίνακας όλων των δυνατών συνδεσμολογιών των τριφασικών μετασχηματιστών κατά IEC 60076-1



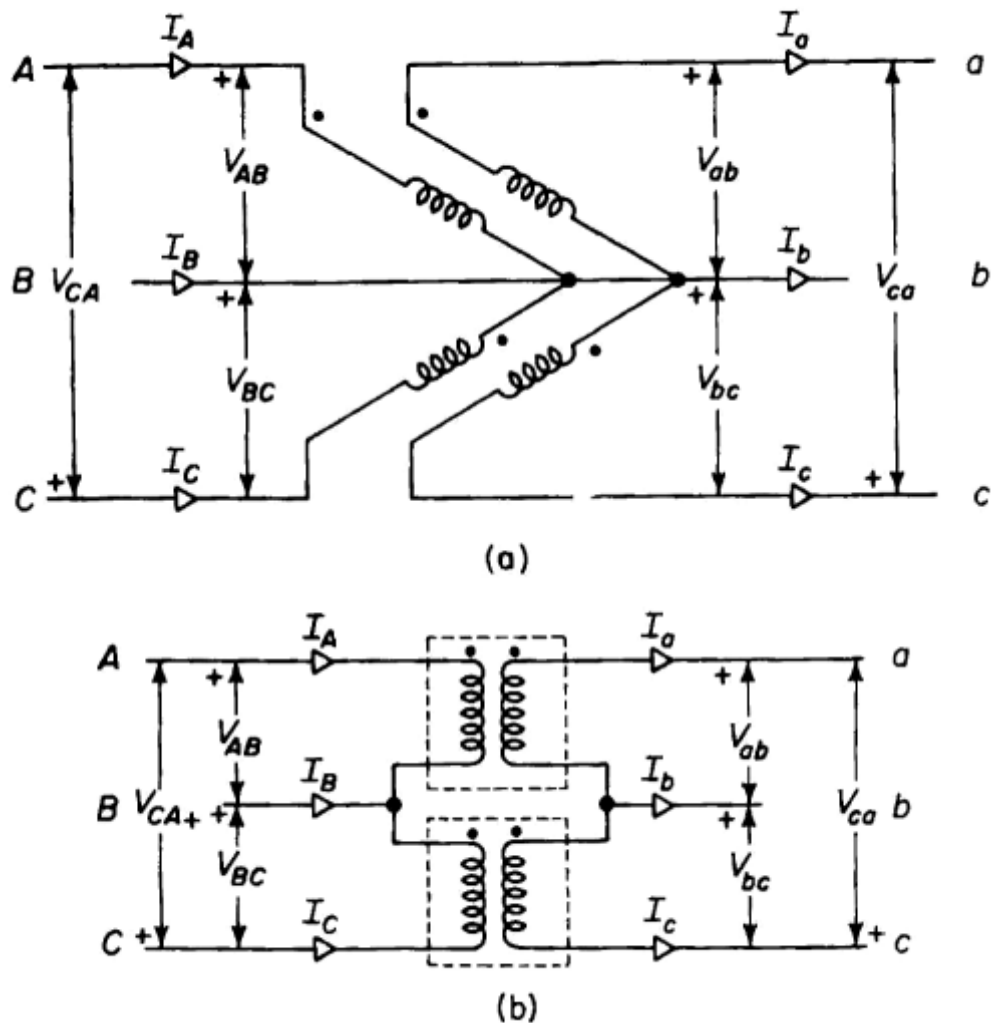
Εικόνα 33: Κοινές συνδεσμολογίες [17]



**Εικόνα 34:**Πρόσθετες Συνδεσμολογίες <sup>[17]</sup>

### 3.2 Τριφασικοί μετασχηματιστές που περιλαμβάνουν μόνο δύο μετασχηματιστές

Η συνδεσμολογία ανοιχτό τρίγωνο (open-delta), επίσης γνωστή και ως σύνδεση V-V, είναι μια τριφασική συνδεσμολογία που χρησιμοποιεί μόνο δύο αντί για τρεις μετασχηματιστές. Η εν λόγω συνδεσμολογία χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές οργάνων μέτρησης για λόγους οικονομίας. Είναι πανομοιότυπη με τη συνδεσμολογία Dd μόνο που έχει δύο μετασχηματιστές



Εικόνα 35: Συνδεσμολογία Dd με δύο μετασχηματιστές <sup>[18]</sup>

### 3.3 Αστέρας

Η σύνδεση των τριών φάσεων σε αστέρα έχει το πλεονέκτημα ότι η φασική τάση είναι μόνο το  $1/\sqrt{3}$  της πολικής, με συνέπεια ο αριθμός των σπειρών ανά φάση να είναι μικρότερος σε σύγκριση με την σύνδεση κατά τρίγωνο, όταν και έχουμε δεδομένη πολική τάση. Αυτό σημαίνει ότι εξοικονομούμε αρκετό μονωτικό υλικό επειδή η τάση μιας φάσης είναι μικρότερη σε σχέση με εκείνης στο τρίγωνο. Συνεπώς, σε πολύ υψηλές τάσεις η

συνδεσμολογία κατά αστέρα είναι η ενδεδειγμένη.

Εκτός αυτού, η εν λόγω συνδεσμολογία μας παρέχει το πλεονέκτημα να έχουμε ένα σημείο μηδενικού δυναμικού με το οποίο μπορούμε να συνδέσουμε τον ουδέτερο αγωγό. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει την μονοφασική φόρτιση.

Στα μειονεκτήματα της συνδεσμολογίας αυτής, συναντάμε την δυσκολία κατασκευής των πυρήνων καθώς επίσης και το κόστος των πηνίων.

### **3.4 Τρίγωνο**

Το κύριο πλεονέκτημα της συνδεσμολογίας αυτής είναι η αποφυγή δημιουργίας ανώτερων αρμονικών σε τάσεις και ροές όταν έχουμε ασύμμετρο φορτίο, διότι λόγω του κανόνα των βρόχων πρέπει το άθροισμα των τριών φασικών τάσεων να είναι μηδέν.

Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται το γεγονός ότι στο τύλιγμα μιας φάσης χρειάζονται περισσότερες σπείρες από ότι στην συνδεσμολογία κατά αστέρα.

### **3.5 Τεθλασμένος αστέρας**

Το κύριο πλεονέκτημα της συνδεσμολογίας αυτής είναι ότι επιτρέπει την μονοφασική φόρτιση στο δευτερεύον. Το πλεονέκτημα αυτό αντισταθμίζεται από την ανάγκη για περισσότερο χαλκό, και κατ' επέκταση αυξημένη οικονομική δαπάνη

Κλείνοντας την παράγραφο αυτή, θα ήταν χρήσιμο να κάνουμε μια αναφορά στις συνδεσμολογίες που βρίσκουν συνήθως εφαρμογή:

- Ο μετασχηματιστής μεταξύ γεννήτριας και γραμμής υψηλής τάσεως είναι σε σύνδεση αστέρα-τρίγωνο.
- Ο μετασχηματιστής μεταξύ δικτύου και δικτύου συνδέεται σε αστέρα-αστέρα με ενδιάμεσο τύλιγμα σε τρίγωνο.
- Ο μετασχηματιστής μεταξύ υψηλής τάσης και καταναλωτή μεγάλης ισχύος συνδέεται σε τρίγωνο-αστέρα. Όταν ο καταναλωτής είναι μικρός χρησιμοποιείται η σύνδεση αστέρας - τεθλασμένος αστέρας.



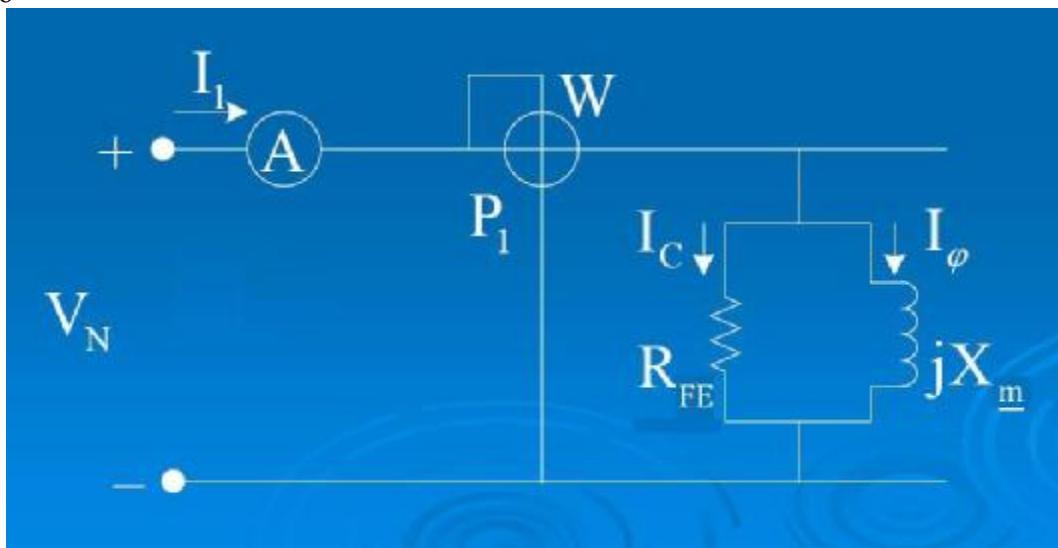
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Πειραματική Διαδικασία – Μετρήσεις

#### 4.1 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας

##### 4.1.1 Πείραμα Ανοικτού Κυκλώματος

Εφαρμογή ονομαστικής τάσης στο πρωτεύον ενώ στο δευτερεύον δεν συνδέεται κανένα φορτίο

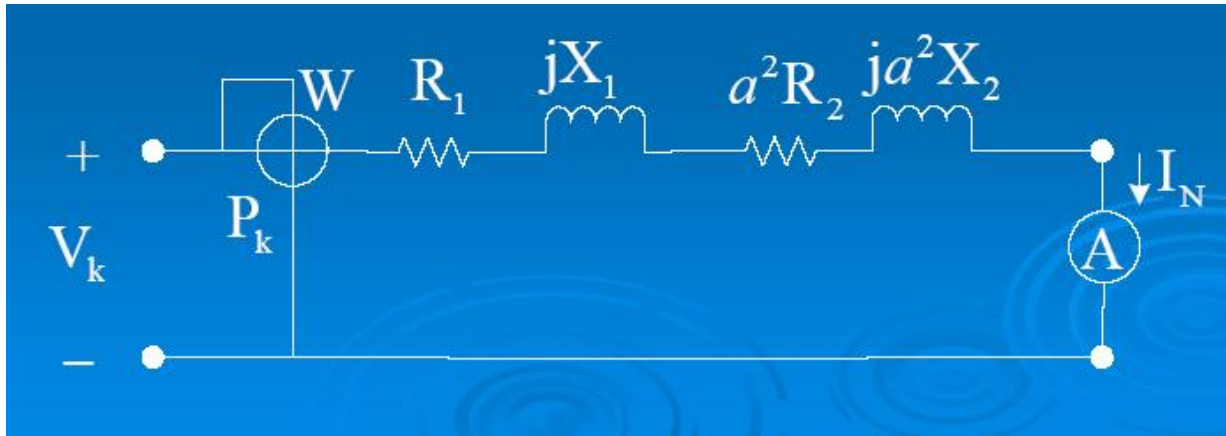


Εικόνα 36: Διάταξη Πειράματος Ανοικτού Κυκλώματος

Για κάθε ένα από τα τυλίγματα των μετασχηματιστών λήφθηκαν μετρήσεις της τάσης πρωτεύοντος, της τάσης δευτερεύοντος, της έντασης πρωτεύοντος και της πραγματικής ισχύος ανοικτού κυκλώματος από την πλευρά του πρωτεύοντος. Το πείραμα ανοικτού κυκλώματος χρησιμοποιείται για να καθοριστούν οι τιμές των ηλεκτρικών στοιχείων του εγκάρσιου κλάδου του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή δηλαδή η αντίσταση  $R_{FE}$  και η αντίδραση  $X_m$

##### 4.1.2 Πείραμα Βραχυκύκλωσης

Τα άκρα άκρα του δευτερεύοντος βραχυκυκλώνονται, ενώ στο πρωτεύον εφαρμόζεται μικρή τάση η οποία ρυθμίζεται έτσι ώστε το ρεύμα του δευτερεύοντος να είναι ίσο με το ονομαστικό.



**Εικόνα 37:** Διάταξη Πειράματος Βραχυκύκλωσης

Για κάθε ένα από τα τυλίγματα των μετασχηματιστών λήφθηκαν μετρήσεις της τάσης πρωτεύοντος, της έντασης πρωτεύοντος, της έντασης δευτερεύοντος και της πραγματικής ισχύος. Το πείραμα βραχυκύκλωσης χρησιμοποιείται για να καθοριστούν οι τιμές των ηλεκτρικών στοιχείων του οριζόντιου κλάδου του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή, δηλαδή η αντίσταση  $R_{eq}=R_1+ a^2R_2$  και  $X_{eq}=jX_1+ja^2X_2$ .

#### 4.2 Μετρήσεις και Εξαγωγή Ισοδύναμου Κυκλώματος του 1<sup>ου</sup> Μετασχηματιστή



**Εικόνα 38:** Ο 1<sup>ος</sup> Μετασχηματιστής

## Στοιχεία 1<sup>ου</sup> μετασχηματιστή

$$U_{1N}=380\text{Volt}$$

$$U_{2N}=230\text{Volt}$$

$$I_{2N}=20\text{A}$$

### 4.2.1 Πείραμα Ανοικτού Κυκλώματος

Μετρήσεις Ανοικτού Κυκλώματος			
	Τύλιγμα Α	Τύλιγμα Β	Τύλιγμα Γ
$V_{10}$	380V	380V	380V
$V_{20}$	216V	224V	222V
$I_{10}$	0,29A	0,275A	0,265A
$P_{10}$	35Watt	35Watt	34Watt

Τύλιγμα Α

$$R_{FE} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{380^2}{35} = 4.125k\Omega$$

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} = 380 \cdot 0.29 = 110.2VA$$

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{110.2^2 - 35^2} \Rightarrow Q_{10} = 104.5VAr$$

$$X_m = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}} = \frac{380^2}{104.5} \Rightarrow X_m = 1.382k\Omega$$

Τύλιγμα Β

$$R_{FE} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{380^2}{35} = 4.125k\Omega$$

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} = 380 \cdot 0.275 = 104.5VA$$

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{104.5^2 - 35^2} \Rightarrow Q_{10} = 98.47VAr$$

$$X_m = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}} = \frac{380^2}{98.47} \Rightarrow X_m = 1466.43k\Omega$$

Τύλιγμα Γ

$$R_{FE} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{380^2}{34} = 4.247k\Omega$$

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} = 380 \cdot 0.265 = 100.7VA$$

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{100.7^2 - 34^2} \Rightarrow Q_{10} = 94.78VAr$$

$$X_m = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}} = \frac{380^2}{94.78} \Rightarrow X_m = 1.523k\Omega$$

#### 4.2.2 Πείραμα Βραχυκύκλωσης

Μετρήσεις Βραχυκύκλωσης			
	Τύλιγμα Α	Τύλιγμα Β	Τύλιγμα Γ
$V_{1sc}$	11V	11,5V	11V
$I_{1sc}$	11,6A	11,5A	11,6A
$I_{2sc}$	20A	20A	20A
$P_{1sc}$	115Watt	110Watt	115Watt

Τύλιγμα Α

$$P_{1sc} = I_{1sc}^2 \cdot R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{P_{1sc}}{I_{1sc}^2} = \frac{115}{11.6^2} \Rightarrow R_{eq} = 0.85\Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{U_{1sc}}{I_{1sc}} = \frac{11}{11.6} \Rightarrow Z_{eq} = 0.95\Omega$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{0.95^2 - 0.85^2} \Rightarrow X_{eq} = 0.424\Omega$$

Τύλιγμα Β

$$P_{1sc} = I_{1sc}^2 \cdot R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{P_{1sc}}{I_{1sc}^2} = \frac{110}{11.5^2} \Rightarrow R_{eq} = 0.83\Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{U_{1sc}}{I_{1sc}} = \frac{11.5}{11.5} \Rightarrow Z_{eq} = 1\Omega$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{1^2 - 0.83^2} \Rightarrow X_{eq} = 0.557\Omega$$

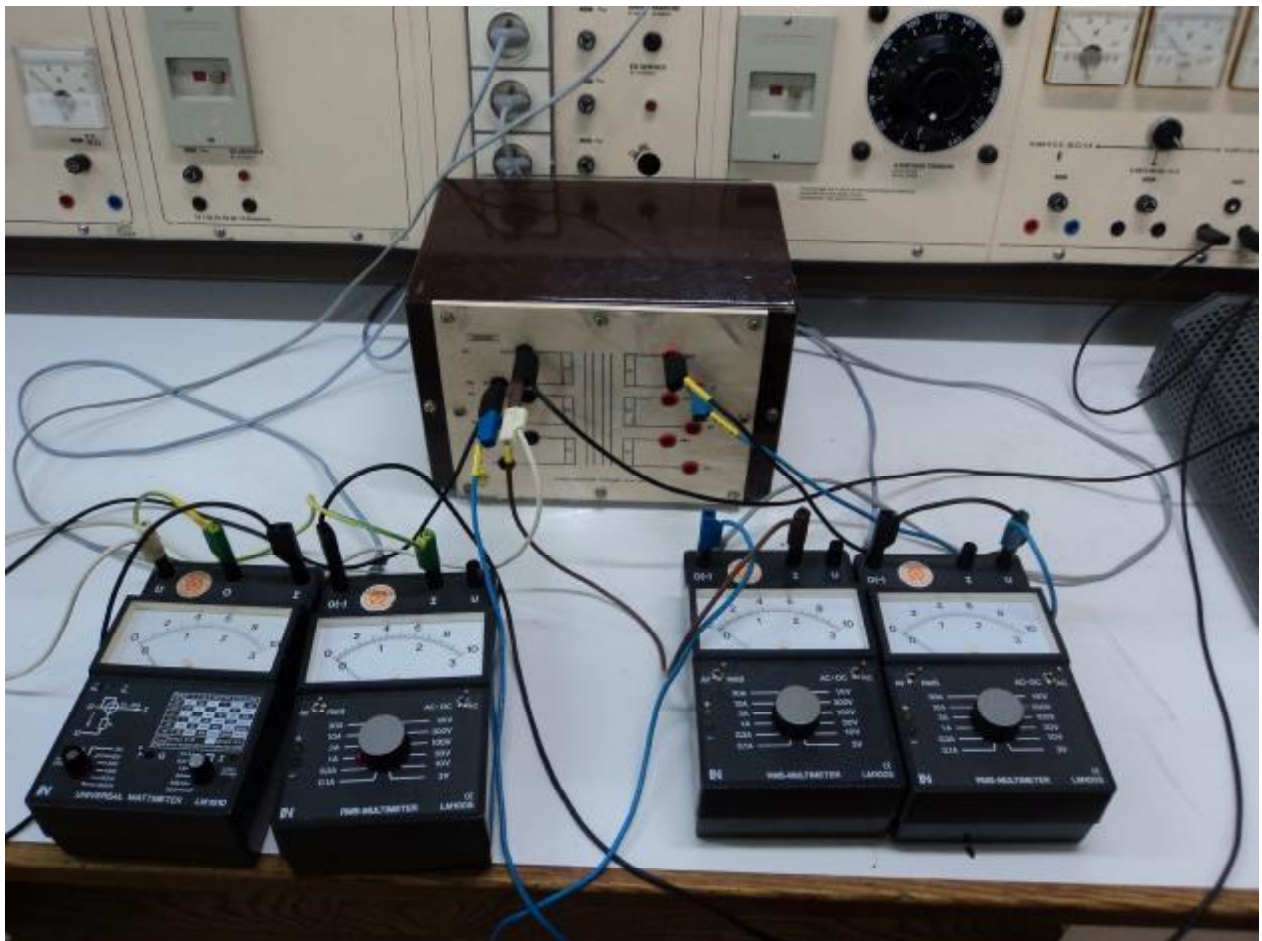
Τύλιγμα Γ

$$P_{1sc} = I_{1sc}^2 \cdot R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{P_{1sc}}{I_{1sc}^2} = \frac{115}{11.6^2} \Rightarrow R_{eq} = 0.854\Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{U_{1sc}}{I_{1sc}} = \frac{11}{11.6} \Rightarrow Z_{eq} = 0.948\Omega$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{0.948^2 - 0.854^2} \Rightarrow X_{eq} = 0.41\Omega$$

### 4.3 Μετρήσεις και Εξαγωγή Ισοδύναμου Κυκλώματος του 2<sup>ου</sup> Μετασχηματιστή(EDUTEC)



Εικόνα 39: Ο 2<sup>ος</sup> Μετασχηματιστής

## Στοιχεία 2<sup>ου</sup> μετασχηματιστή

$$U_{1N}=127\text{Volt}$$

$$U_{2N}=90\text{Volt}$$

$$I_{2N}=3.7\text{A}$$

$$S_{2N}=1000/3=333.3\text{VA}$$

### 4.3.1 Πείραμα Ανοικτού Κυκλώματος

Μετρήσεις Ανοικτού Κυκλώματος			
	Τύλιγμα Α	Τύλιγμα Β	Τύλιγμα Γ
$V_{10}$	127V	127V	127V
$V_{20}$	94V	95V	96V
$I_{10}$	0,31A	0,19A	0,36A
$P_{10}$	14Watt	9Watt	15Watt

Τύλιγμα Α

$$R_{FE} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{127^2}{14} = 1.152\text{k}\Omega$$

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} = 127 \cdot 0.31 = 39.37\text{VA}$$

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{39.37^2 - 14^2} \Rightarrow Q_{10} = 36.8\text{VAr}$$

$$X_m = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}} = \frac{127^2}{36.8} \Rightarrow X_m = 438.3\Omega$$

Τύλιγμα Β

$$R_{FE} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{127^2}{9} = 1.792\text{k}\Omega$$

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} = 127 \cdot 0.19 = 24.13\text{VA}$$

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{24.13^2 - 9^2} \Rightarrow Q_{10} = 22.39\text{VAr}$$

$$X_m = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}} = \frac{127^2}{22.39} \Rightarrow X_m = 720.36\Omega$$

Τύλιγμα Γ

$$R_{FE} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{127^2}{15} = 1.075k\Omega$$

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} = 127 \cdot 0.36 = 45.72VA$$

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{45.72^2 - 15^2} \Rightarrow Q_{10} = 43.2VAr$$

$$X_m = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}} = \frac{127^2}{43.2} \Rightarrow X_m = 373.35\Omega$$

### 4.3.2 Πείραμα Βραχυκύκλωσης

Μετρήσεις Βραχυκύκλωσης			
	Τύλιγμα Α	Τύλιγμα Β	Τύλιγμα Γ
$V_{1sc}$	6.8V	6.6V	6.9V
$I_{1sc}$	2.87A	2.75A	2.85A
$I_{2sc}$	3.7A	3.7A	3.7A
$P_{1sc}$	20Watt	18.5Watt	19Watt

Τύλιγμα Α

$$P_{1sc} = I_{1sc}^2 \cdot R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{P_{1sc}}{I_{1sc}^2} = \frac{20}{2.87^2} \Rightarrow R_{eq} = 2.43\Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{U_{1sc}}{I_{1sc}} = \frac{6.8}{2.87} \Rightarrow Z_{eq} = 2.37\Omega$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{2.37^2 - 2.43^2} \Rightarrow X_{eq} = 1.53\Omega$$

Τύλιγμα Β

$$P_{1sc} = I_{1sc}^2 \cdot R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{P_{1sc}}{I_{1sc}^2} = \frac{18.5}{2.75^2} \Rightarrow R_{eq} = 2.45\Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{U_{1sc}}{I_{1sc}} = \frac{6.6}{2.75} \Rightarrow Z_{eq} = 2.4\Omega$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{2.4^2 - 2.45^2} \Rightarrow X_{eq} = \Omega$$

Τύλιγμα Γ

$$P_{1sc} = I_{1sc}^2 \cdot R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{P_{1sc}}{I_{1sc}^2} = \frac{19}{2.85^2} \Rightarrow R_{eq} = 2.34\Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{U_{1sc}}{I_{1sc}} = \frac{6.9}{2.85} \Rightarrow Z_{eq} = 2.42\Omega$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{2.42^2 - 2.34^2} \Rightarrow X_{eq} = 0.62\Omega$$

#### 4.5 Μετρήσεις και Εξαγωγή Ισοδύναμου Κυκλώματος του 3<sup>ου</sup> Μετασχηματιστή (ATELCO)



Εικόνα 40: Ο 3<sup>ος</sup> Μετασχηματιστής



### Στοιχεία 3<sup>ου</sup> μετασχηματιστή

$$U_{1N}=220\text{Volt}$$

$$U_{2N}=220\text{Volt}$$

$$I_{2N}=4.54\text{A}$$

$$S_{2N}=1000\text{VA ανά φάση}$$

#### 4.4.1 Πείραμα Ανοικτού Κυκλώματος

Μετρήσεις Ανοικτού Κυκλώματος			
	Τύλιγμα Α	Τύλιγμα Β	Τύλιγμα Γ
$V_{10}$	-	220V	220V
$V_{20}$	-	215V	210V
$I_{10}$	-	0,213A	0,38A
$P_{10}$	-	9Watt	22Watt

Τύλιγμα Β

$$R_{FE} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{220^2}{9} = 5.377\text{k}\Omega$$

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} = 220 \cdot 0.213 = 46.86\text{VA}$$

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{46.86^2 - 9^2} \Rightarrow Q_{10} = 45.98\text{VAr}$$

$$X_m = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}} = \frac{220^2}{45.98} \Rightarrow X_m = 1.052\text{k}\Omega$$

Τύλιγμα Γ

$$R_{FE} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{220^2}{22} = 2.2\text{k}\Omega$$

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} = 220 \cdot 0.38 = 83.6\text{VA}$$

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{83.6^2 - 22^2} \Rightarrow Q_{10} = 80.65\text{VAr}$$

$$X_m = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}} = \frac{220^2}{80.65} \Rightarrow X_m = 600\Omega$$

#### 4.4.2 Πείραμα Βραχυκύκλωσης

Μετρήσεις Βραχυκύκλωσης			
	Τύλιγμα Α	Τύλιγμα Β	Τύλιγμα Γ
$V_{1sc}$	-	14V	13.5V
$I_{1sc}$	-	4.5A	4.5A
$I_{2sc}$	-	4.55A	4.55A
$P_{1sc}$	-	32Watt	35Watt

Τύλιγμα Β

$$P_{1sc} = I_{1sc}^2 \cdot R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{P_{1sc}}{I_{1sc}^2} = \frac{32}{4.5^2} \Rightarrow R_{eq} = 1.58\Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{U_{1sc}}{I_{1sc}} = \frac{14}{4.5} \Rightarrow Z_{eq} = 3.1\Omega$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{3.1^2 - 1.58^2} \Rightarrow X_{eq} = 2.66\Omega$$

Τύλιγμα Γ

$$P_{1sc} = I_{1sc}^2 \cdot R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{P_{1sc}}{I_{1sc}^2} = \frac{35}{4.5^2} \Rightarrow R_{eq} = 1.73\Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{U_{1sc}}{I_{1sc}} = \frac{13.5}{4.5} \Rightarrow Z_{eq} = 3\Omega$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{3^2 - 1.73^2} \Rightarrow X_{eq} = 2.45\Omega$$

## 4.5 Μετρήσεις και Εξαγωγή Ισοδύναμου Κυκλώματος του 4<sup>ου</sup> Μετασχηματιστή



Εικόνα 41: Ο 4<sup>ος</sup> Μετασχηματιστής

### Στοιχεία 4<sup>ου</sup> μετασχηματιστή

$$U_{1N}=380\text{Volt}$$

$$U_{2N}=220\text{Volt}$$

$$I_{2N}=4.54\text{A}$$

$$S=1000\text{VA ανά φάση}$$

$$S_{2N}=333.3\text{VA}$$

#### 4.5.1 Πείραμα Ανοικτού Κυκλώματος

	Μετρήσεις Ανοικτού Κυκλώματος		
	Τύλιγμα Α	Τύλιγμα Β	Τύλιγμα Γ
$V_{10}$	380V	380V	380V
$V_{20}$	215V	217V	216V
$I_{10}$	0,135A	0,235A	0,258A
$P_{10}$	35Watt	54Watt	53Watt

Τύλιγμα Α

$$R_{FE} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{380^2}{35} = 4.125k\Omega$$

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} = 380 \cdot 0.135 = 51.3VA$$

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{51.3^2 - 35^2} \Rightarrow Q_{10} = 37.5VAr$$

$$X_m = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}} = \frac{380^2}{37.5} \Rightarrow X_m = 3.85k\Omega$$

Τύλιγμα Β

$$R_{FE} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{380^2}{54} = 2.674k\Omega$$

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} = 380 \cdot 0.235 = 89.3VA$$

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{89.3^2 - 54^2} \Rightarrow Q_{10} = 71.123VAr$$

$$X_m = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}} = \frac{380^2}{71.123} \Rightarrow X_m = 2.030k\Omega$$

Τύλιγμα Γ

$$R_{FE} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} = \frac{380^2}{53} = 2.725k\Omega$$

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} = 380 \cdot 0.258 = 98.04VA$$

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = \sqrt{98.04^2 - 53^2} \Rightarrow Q_{10} = 82.48 \text{VAR}$$

$$X_m = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}} = \frac{380^2}{82.48} \Rightarrow X_m = 1.75 \text{k}\Omega$$

#### 4.5.2 Πείραμα Βραχυκύκλωσης

Μετρήσεις Βραχυκύκλωσης			
	Τύλιγμα Α	Τύλιγμα Β	Τύλιγμα Γ
$V_{1sc}$	9.4V	9.1V	9.4V
$I_{1sc}$	2,65A	2,55A	2.55A
$I_{2sc}$	4.54A	4.5A	4.5A
$P_{1sc}$	25.5Watt	24Watt	24.5Watt

##### Τύλιγμα Α

$$P_{1sc} = I_{1sc}^2 \cdot R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{P_{1sc}}{I_{1sc}^2} = \frac{25.5}{2.65^2} \Rightarrow R_{eq} = 3.63 \Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{U_{1sc}}{I_{1sc}} = \frac{9.4}{2.65} \Rightarrow Z_{eq} = 3.55 \Omega$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{3.55^2 - 3.63^2} \Rightarrow X_{eq} = \Omega$$

##### Τύλιγμα Β

$$P_{1sc} = I_{1sc}^2 \cdot R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{P_{1sc}}{I_{1sc}^2} = \frac{24}{2.55^2} \Rightarrow R_{eq} = 3.69 \Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{U_{1sc}}{I_{1sc}} = \frac{9.1}{2.55} \Rightarrow Z_{eq} = 3.56 \Omega$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{3.56^2 - 3.69^2} \Rightarrow X_{eq} = \Omega$$

##### Τύλιγμα Γ

$$P_{1sc} = I_{1sc}^2 \cdot R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{P_{1sc}}{I_{1sc}^2} = \frac{24.5}{2.55^2} \Rightarrow R_{eq} = 3.77 \Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{U_{1sc}}{I_{1sc}} = \frac{9.4}{2.55} \Rightarrow Z_{eq} = 3.69\Omega$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{2^2 - 2^2} \Rightarrow X_{eq} = 0$$

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Callans\\_1863\\_induction\\_coil\\_.jpg](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Callans_1863_induction_coil_.jpg)
- [2] <http://www.hvtesla.com/>
- [3] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/biosav.html>
- [4] <http://www.tutorvista.com/content/science/science-ii/magnetic-effects-electric-current/mapping-magnetic-lines.php#>
- [5] <http://forum.allaboutcircuits.com/showthread.php?t=73640>
- [6] <http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/CoilField.htm>
- [7] [http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/Parousiasi1.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Parousiasi1.pdf)
- [8] <http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/mu/>
- [9] <http://www.a-levelphysicstutor.com/field-electro-mag-ind-2.php>
- [10] <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%B1%CF%83%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CF%82>
- [11] <http://el.wikipedia.org/wiki/Μετασχηματιστής>
- [12] [http://engrtutor.blogspot.gr/2009/01/how-does-transformer-work\\_9857.html](http://engrtutor.blogspot.gr/2009/01/how-does-transformer-work_9857.html)
- [13] <http://www.electronics-tutorials.ws/transformer/transformer-construction.html>
- [14] [http://staff.ee.sun.ac.za/pjrandewijk/wiki/index.php/M4\\_Circuit\\_Macros\\_-\\_Examples](http://staff.ee.sun.ac.za/pjrandewijk/wiki/index.php/M4_Circuit_Macros_-_Examples)
- [15] <http://electricalnotes.wordpress.com/2012/05/23/vector-group-of-transformer/>

[16] [basler.com/downloads/3phXfmrs.pdf](http://basler.com/downloads/3phXfmrs.pdf)

[17] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60076-1