

# Βασικά στοιχεία μετασχηματιστών

## 1. Εισαγωγικά

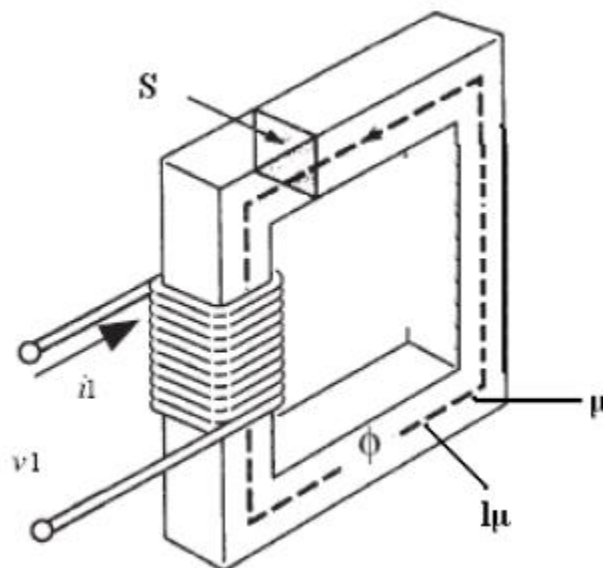
Οι μετασχηματιστές (transformers) είναι ηλεκτρικές διατάξεις, οι οποίες μετασχηματίζουν (ανυψώνουν ή υποβιβάζουν) την τάση και το ρεύμα. Ο μετασχηματιστής στην πιο απλή μορφή του αποτελείται από δύο τυλίγματα ηλεκτρικά απομονωμένα μεταξύ τους. Τα τυλίγματα αυτά έχουν μαγνητική σύζευξη, με αποτέλεσμα η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής σε ένα από τα δύο τυλίγματα το οποίο τροφοδοτείται με τάση, να επάγει ηλεκτρερρετική δύναμη στο άλλο τύλιγμα.

Είδη μετασχηματιστών ανάλογα με:

- τον αριθμό φάσεων
  - ✓ μονοφασικοί
  - ✓ τριφασικοί
- την ισχύ
  - ✓ ισχύος
  - ✓ μέτρησης
  - ✓ δοκιμών
- τον τρόπο ψύξης
  - ✓ ξηρού τύπου
  - ✓ ελαίου
- τον χώρο εγκατάστασης
  - ✓ υπαίθρου
  - ✓ κλειστού χώρου
- ειδικοί μετασχηματιστές
  - ✓ μετασχηματιστές 1:1
  - ✓ ηλεκτρικής έλξης
  - ✓ αυτομετασχηματιστές
  - ✓ ηλεκτροσυγκολλήσεων
- τη χρήση τους στο σύστημα ηλεκτροδότησης
  - ✓ μονάδος ή ανυψώσεως: Συνδέονται στην έξοδο των γεννητριών και ανυψώνουν την τάση ώστε να οδηγηθεί στη γραμμή μεταφοράς.
  - ✓ υποσταθμών ή υποβιβασμού: Συνδέονται στο τέλος των γραμμών μεταφοράς και υποβιβάζουν την τάση στα επίπεδα διανομής.
  - ✓ διανομής: Υποβιβάζουν την τάση στα επίπεδα χρησιμοποίησης.
- τον τύπο του πυρήνα
  - ✓ τύπου πυρήνα: Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται γύρω από τις δύο πλευρές (σκέλη) ενός ορθογώνιου πυρήνα.
  - ✓ τύπου κελύφους ή μανδύα: Σε αυτού του τύπου τους μετασχηματιστές τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται στο μεσαίο σκέλος και η ροή κλείνει κύκλωμα από τα ακριανά σκέλη και το ζύγωμα. Ο πυρήνας περιβάλλει τα τυλίγματα.

## 2. Μαγνητικά κυκλώματα

Στο Σχήμα 1 φαίνεται ένα απλό μαγνητικό κύκλωμα, το οποίο αποτελείται από τον πυρήνα και το πηνίο. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό και χαρακτηρίζεται από τη διατομή  $S$ , το μέσο μήκος  $l_{\mu}$  και τη μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$ . Η συμπεριφορά της διαπερατότητας του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα φαίνεται από την καμπύλη μαγνήτισης  $B=f(H)$  του Σχήματος 2, η οποία είναι μη γραμμική. Τα βασικά μεγέθη μαγνητικού πεδίου συνοψίζονται στον Πίνακα 1.



Σχήμα 1: Απλό μαγνητικό κύκλωμα

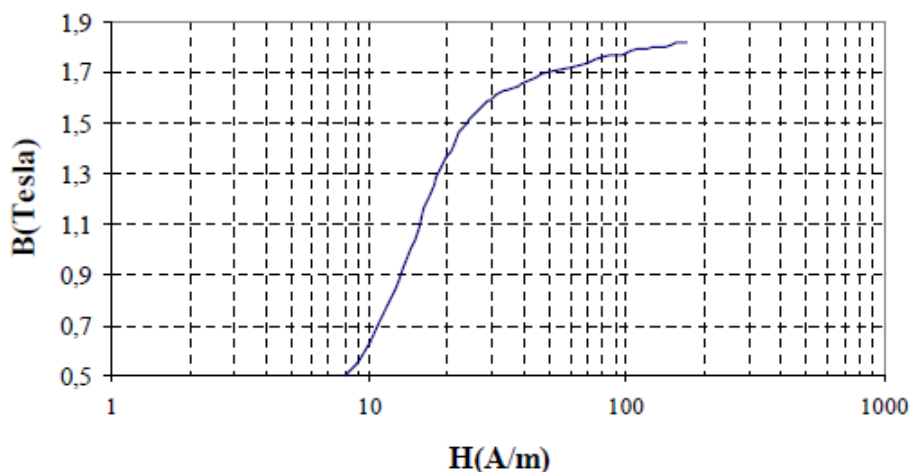
Πίνακας 1: Βασικά μεγέθη μαγνητικού πεδίου

Όνομα	Σύμβολο	Μονάδες
Ένταση μαγνητικού πεδίου	$H$	(Aτ/ m)
Μαγνητική επαγωγή	$B$	(T)
Μαγνητική ροή	$\Phi$	(wb)
Μαγνητική διαπερατότητα υλικού	$\mu$	(H/m)
Σχετική μαγνητική διαπερατότητα	$\mu_r$	αδιάστατο μέγεθος
Μαγνητική διαπερατότητα του κενού	$\mu_0$	(H/m)

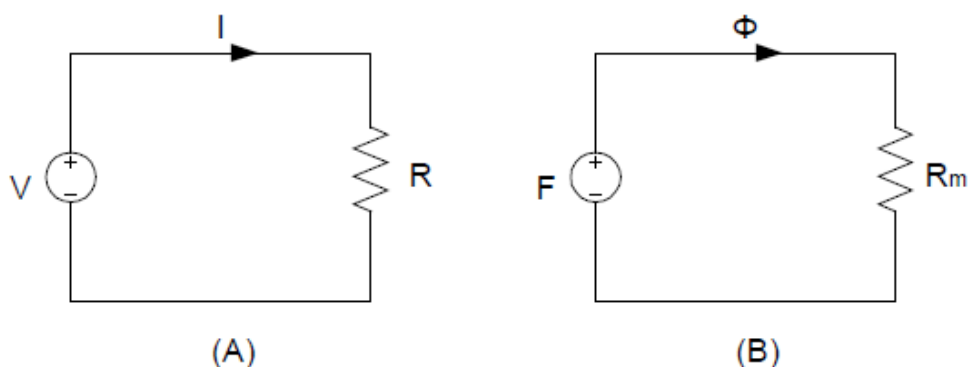
Στην αρχή μια μικρή αύξηση της έντασης του πεδίου  $H$  προκαλεί μεγάλη αύξηση της μαγνητικής επαγωγής  $B$ . Η περιοχή αυτή ονομάζεται ακόρεστη. Μετά από ένα συγκεκριμένο σημείο η επιπλέον αύξηση του πεδίου  $H$  προκαλεί σχετικά μικρότερη αύξηση μαγνητικής επαγωγής  $B$ . Αυτή η περιοχή είναι η περιοχή μετάβασης από την ακόρεστη στην κορεσμένη περιοχή και ονομάζεται γόνατο κορεσμού. Κορεσμένη περιοχή είναι η περιοχή όπου η καμπύλη τείνει να γίνει οριζόντια .

Η χρήση σιδηρομαγνητικών υλικών στους μετασχηματιστές παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι για συγκεκριμένη ένταση πεδίου  $H$  στο εσωτερικό τους παράγεται πολλαπλάσια

μαγνητική ροή από αυτή που θα παράγονταν στον αέρα. Το πηνίο είναι τυλιγμένο γύρω από τον πυρήνα και αποτελείται από  $N$  σπείρες μονωμένες ηλεκτρικά μεταξύ τους και ως προς τον πυρήνα. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μαγνητικού κυκλώματος του Σχ. 2 φαίνεται στο Σχ. 3 και χρησιμοποιείται για την απλοποίηση της πολύπλοκης ανάλυσης και σχεδίασης μαγνητικών κυκλωμάτων.



Σχήμα 2: Καμπύλη μαγνήτισης

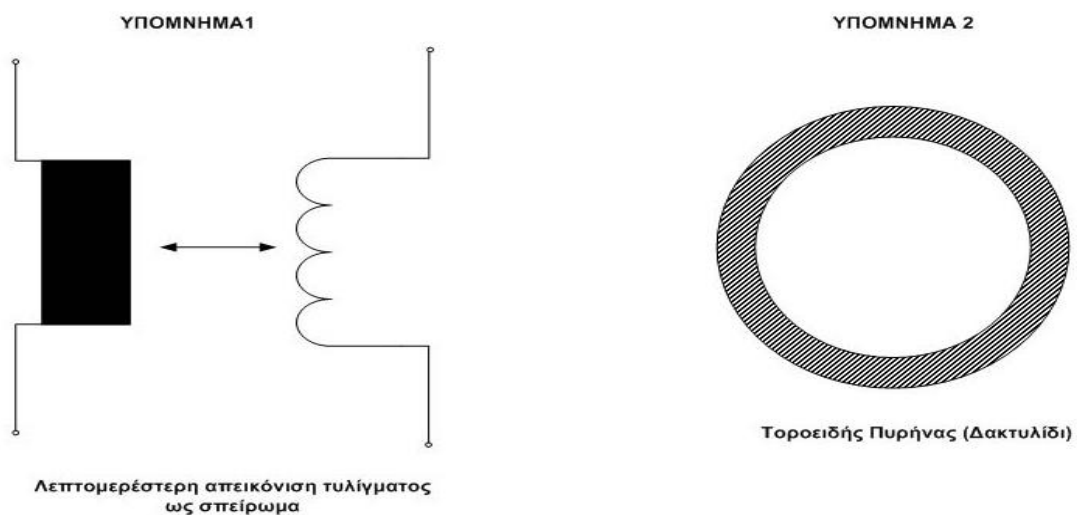
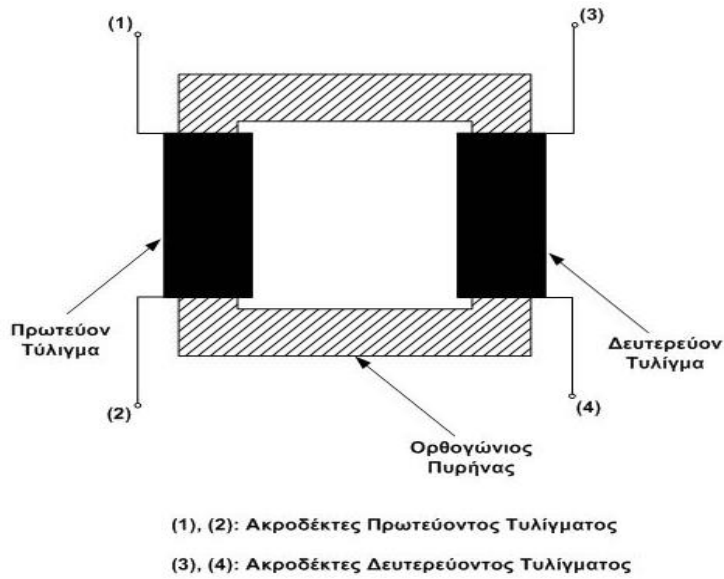


Σχήμα 3: Αντιστοιχία ηλεκτρικού (A) και μαγνητικού (B) κυκλώματος

### 3. Βασική Μορφή των Μονοφασικών μετασχηματιστών

Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η βασική μορφή των μονοφασικών μετασχηματιστών. Τα βασικά τμήματα από τα οποία αποτελούνται είναι τα εξής:

- Ο πυρήνας. Αποτελεί το κύριο τμήμα του μετασχηματιστή και μπορεί να έχει διάφορες μορφές. Οι συνηθέστερες είναι ο ορθογώνιος (UI) και ο τορσοειδής (δακτυλοειδής) τύπος. Ο πυρήνας διαρρέεται από τη μαγνητική ροή του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος, αποτελεί δηλαδή το μαγνητικό κύκλωμα του μετασχηματιστή. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το υλικό του μπορεί να είναι σίδηρος ή φερριτής ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας.



Σχήμα 4: Ο μονοφασικός μετασχηματιστής

- Πρωτεύον Τύλιγμα. Πρόκειται για ένα σωληνοειδή αγωγό (σύρμα) ο οποίος τυλίγεται γύρω από ένα τμήμα του πυρήνα, σχηματίζοντας έναν αριθμό σπειρών. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα πηνίο (πρωτεύον πηνίο) το οποίο παρουσιάζει συντελεστή αυτεπαγωγής ο οποίος δίδεται από τη σχέση:

$$L_1 = \mu_0 \mu_r \frac{N_1^2 A_e}{w_e}$$

$L_1$ , ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πρωτεύοντος τυλίγματος (πηνίου).

$\mu_r$ , η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του πυρήνα, όταν ο πυρήνας είναι συμπαγής και δεν παρουσιάζει κάποιο μικρό κενό διάστημα αέρος (διάκενο). Το διάκενο χρησιμοποιείται στην περίπτωση που η μαγνητική ροή του πρωτεύοντος

πηνίου δεν αναιρείται από τη ροή λόγω επαγωγής του δευτερεύοντος τυλίγματος. Αυτό συμβαίνει στα απλά πηνία και σε μετασχηματιστή όπου τα δύο τυλίγματα διαρρέονται από ρεύμα σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το μήκος του διακένου καθορίζει την τιμή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας της διάταξης. Βέβαια, στους συνήθεις μετασχηματιστές σιδήρου αυτό είναι σπάνια περίπτωση και γι' αυτό δεν θα συμπεριληφθεί σε αυτό το σύγγραμμα.

$N_1$ , ο αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος τυλίγματος.

$A_c$ , το εμβαδόν της επιφάνειας της διατομής του πυρήνα. Εάν η επιφάνεια δεν έχει απλή διατομή, τότε χρησιμοποιείται μία ισοδύναμη έκφραση αυτής (μέση τιμή). Για τους συνήθεις τύπους πυρήνων υπάρχουν τεχνικά φυλλάδια το οποία δίνουν την τιμή του  $A_c$ .

$w_c$ , το μήκος της διαδρομής των μαγνητικών γραμμών εντός του πυρήνα. Επειδή οι μαγνητικές γραμμές διαρρέουν όλη την επιφάνεια της διατομής του πυρήνα, ως μήκος διαδρομής λαμβάνεται μία ισοδύναμη μέση τιμή. Η τιμή αυτή μπορεί να βρεθεί στα τεχνικά φυλλάδια για τους συνήθεις τύπους πυρήνων.

Όταν στο πρωτεύον εφαρμόζεται μία εναλλασσόμενη τάση (τάση πρωτεύοντος), τότε αυτό συμπεριφέρεται ως μία επαγωγική εμπέδηση και διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Έτσι, σύμφωνα με το νόμο του διαρρεύματος, δημιουργείται στον πυρήνα ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο από το διάρρευμα του πρωτεύοντος τυλίγματος. Το συνολικό διάρρευμα προκύπτει φυσικά από το άθροισμα των ρευμάτων όλων των σπειρών του πρωτεύοντος τυλίγματος. Το πεδίο αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο πυρήνας να διαρρέεται από μαγνητική ροή εναλλασσόμενης μορφής (όπως και το πεδίο), την οποία και ονομάζουμε ( $\Phi_1$ ).

- Δευτερέον Τύλιγμα. Το δευτερέον τύλιγμα αποτελείται επίσης από ένα σωληνοειδή αγωγό ο οποίος είναι τυλιγμένος στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Λόγω της χρήσης του ίδιου πυρήνα με αυτόν του πρωτεύοντος τυλίγματος, τα δύο πηνία είναι μαγνητικά συζευγμένα, δηλαδή η μαγνητική ροή που τα διαρρέει είναι η ίδια και ισούται με τη συνιστάμενη ροή που ρέει στον πυρήνα. Από τον ηλεκτρομαγνητισμό προκύπτει ότι ο συντελεστής αυτεπαγωγής του δευτερεύοντος δίδεται από τη σχέση:

$$L_2 = \frac{L_1}{n^2},$$

$$n = \frac{N_1}{N_2}$$

$L_2$ , ο συντελεστής αυτεπαγωγής του δευτερεύοντος τυλίγματος (πηνίου).

$n$ , ο λόγος του αριθμού των σπειρών.

$N_1, N_2$ , α αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή, αντίστοιχα.

Είναι εμφανές, ότι οι σπείρες του δευτερεύοντος διαρρέονται από την εναλλασσόμενη μαγνητική ροή του πρωτεύοντος ( $\Phi_1$ ). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής, το δευτερέον τύλιγμα να «αντιδράσει» αναπτύσσοντας μία τάση εξ επαγωγής. Η τάση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη ροή ρεύματος στις σπείρες του δευτερεύοντος, το οποίο τροφοδοτεί το φορτίο που είναι συνδεδεμένο στους

ακροδέκτες του δευτερεύοντος. Έτσι, δημιουργείται στον πυρήνα του Μ/Τ μία δεύτερη συνιστώσα μαγνητικής ροής ( $\Phi_2$ ), λόγω του δευτερεύοντος τυλίγματος. Σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής, η δεύτερη αυτή συνιστώσα αντισταθμίζει την αρχική ροή  $\Phi_1$ . Έτσι, η συνισταμένη μαγνητική ροή που ρέει στον πυρήνα του Μ/Τ είναι:

$$\Phi_{ολ} = \Phi_1 + \Phi_2 \cong 0$$

Η τάση που αναπτύσσεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή μπορεί να υπολογισθεί εύκολα, με εφαρμογή του νόμου της επαγωγής. Έτσι, η τάση αυτή είναι επίσης εναλλασσόμενη και με την ίδια συχνότητα που έχει η τάση στο πρωτεύον τύλιγμα. Η σχέση που συνδέει τις ενεργές τιμές των δύο τάσεων και των δύο ρευμάτων σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή (με μηδενικές απώλειες ενεργού ισχύος) είναι:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1 = \frac{1}{n} U_1 \\ \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow I_2 = n I_1 \\ u_1(t) = \sqrt{2} U_1 \sin \omega t, \quad u_2(t) = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \\ i_1(t) = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \Delta\phi), \quad i_2(t) = \sqrt{2} I_2 \sin(\omega t + \Delta\phi) \end{array} \right.$$

Παρατηρούμε πως η ενεργός τιμή της τάσης του δευτερεύοντος τυλίγματος εξαρτάται από το λόγο των σπειρών. Γι' αυτό, ο λόγος σπειρών αναφέρεται σαν λόγος μετασχηματισμού στους μονοφασικούς μετασχηματιστές.

Γενικά για τους μετασχηματιστές θα πρέπει να έχουμε πάντα υπόψη μας τις εξής παρατηρήσεις:

- α. Οι μετασχηματιστές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το μετασχηματισμό συνεχών τάσεων, διότι σε αυτή την περίπτωση η μαγνητική ροή που σχηματίζεται στον πυρήνα έχει συνεχή μορφή. Έτσι, δεν μπορεί να δημιουργηθεί τάση στο δευτερεύον τύλιγμα, αφού ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής είναι μηδενικός.
- β. Επίσης, πιθανή τροφοδότηση ενός τυλίγματος μετασχηματιστές με συνεχή τάση έχει ως αποτέλεσμα να βραχυκυκλώσει το τύλιγμα αυτό και να δημιουργηθεί υπέρρρευμα, διότι η αντίσταση του τυλίγματος στο συνεχές ρεύμα είναι πολύ μικρή (αφού πρόκειται κυρίως για μία επαγωγική εμπέδηση).
- γ. Συνήθως οι όροι πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα δεν έχουν και τόσο πρακτική σημασία, αφού οι ρόλοι των δύο τυλιγμάτων μπορούν κάλλιστα να εναλλαχθούν. Έτσι, συνήθως χρησιμοποιούνται οι όροι τύλιγμα υψηλής τάσης και τύλιγμα χαμηλής τάσης. Πρωτεύον τύλιγμα είναι το τύλιγμα που συνδέεται με την κύρια πηγή τροφοδοσίας, ενώ δευτερεύον αυτό που συνδέεται με το φορτίο.
- δ. Στους μετασχηματιστές μπορούν να εφαρμοσθούν γενικά και μη ημιτονοειδείς εναλλασσόμενες τάσεις. Η εφαρμογή αυτή συναντάται ευρύτατα στα ηλεκτρονικά

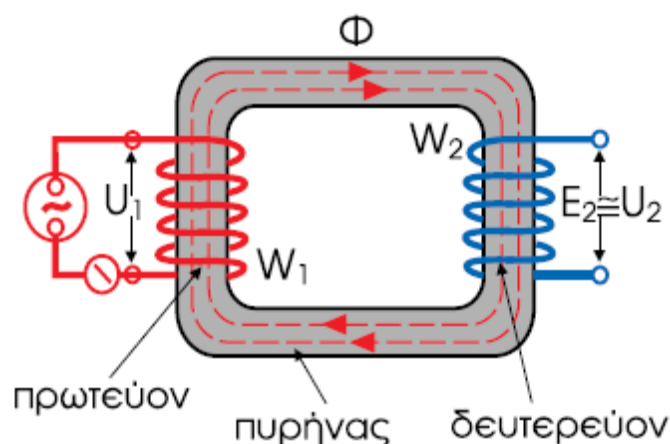
κυκλώματα και ιδίως στα ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η λειτουργία των χρησιμοποιούμενων μετασχηματιστών και οι επαγόμενες τάσεις υπολογίζονται επίσης από το νόμο της επαγωγής, με τη βοήθεια όμως, του μετασχηματισμού Fourier και του θεωρήματος της Επαλληλίας.

#### 4. Ιδανικός μετασχηματιστής (μονοφασικό)

Στην περίπτωση του ιδανικού μετασχηματιστή λαμβάνονται οι εξής απλοποιητικές παραδοχές:

- Οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων αμελούνται
- Οι μαγνητικές ροές από σκέδαση αμελούνται
- Η μαγνητική διαπερατότητα του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος θεωρείται άπειρη, με αποτέλεσμα το ρεύμα μαγνήτισης που απαιτείται για την εγκατάσταση της μαγνητικής ροής στον πυρήνα να είναι μηδενικό.
- Οι απώλειες πυρήνα θεωρούνται αμελητέες.

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται ένας μονοφασικός μετασχηματιστής σε λειτουργία χωρίς φορτίο. Η εναλλασσόμενη τάση  $U_1$  στο πρωτεύον προκαλεί μια εναλλασσόμενη ένταση ρεύματος, η οποία δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο με εναλλασσόμενη μαγνητική ροή  $\Phi$ . Η μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή  $\Phi$  κλείνει κύκλωμα μέσα από τον πυρήνα και διαπερνά τις σπείρες του δευτερεύοντος. Έτσι, κάθε σε σπείρα του δευτερεύοντος αναπτύσσεται μία ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) εξ επαγωγής.



Σχήμα 5: Δομή μονοφασικού μετασχηματιστή

Η τάση που αναπτύσσεται στο δευτερεύον είναι:

$$e_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

Ο λόγος μετασχηματισμού δίνεται από τη σχέση:



$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

όπου  $N_1, N_2$  ο αριθμός σπειρών πρωτεύοντος και δευτερεύοντος,

$U_1, U_2$  οι τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος,

$I_1, I_2$  τα ρεύματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

## 5. Περιγραφή λειτουργίας πραγματικού μετασχηματιστή (μονοφασικού) – Ισοδύναμο κύκλωμα

Η ακρίβεια οποιουδήποτε μοντέλου του πραγματικού μετασχηματιστή εξαρτάται πάντα από το αν στην ανάπτυξή του λαμβάνονται υπ' όψιν όλα σχεδόν τα είδη των απωλειών κατά τη λειτουργία του. Οι πιο βασικές από αυτές τις απώλειες είναι οι ακόλουθες:

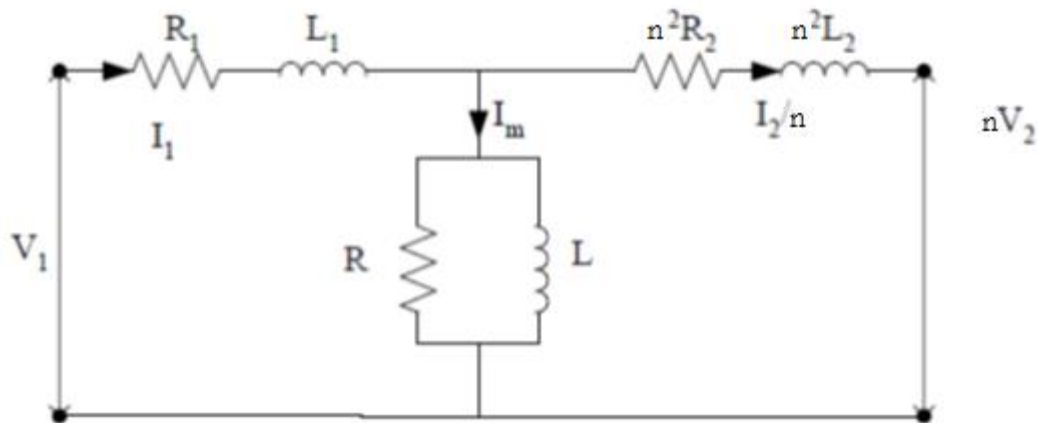
- Απώλειες Χαλκού ( $I^2R$ ). Πρόκειται για τις θερμικές απώλειες στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος στα τυλίγματά του
- Απώλειες εξ' αιτίας των δινορευμάτων. Είναι οι θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετασχηματιστή.
- Απώλειες υστέρησης. Αυτές έχουν να κάνουν με την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων στο εσωτερικό του πυρήνα η οποία συμβαίνει σε κάθε ημιπερίοδο της τάσης εισόδου. Η μεταβολή τους με το χρόνο είναι μια πολύπλοκη μη γραμμική συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στο μετασχηματιστή.
- Ροή σιέδασης. Πρόκειται για τις μαγνητικές ροές, οι οποίες ξεφεύγουν από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει. Αυτές οι ροές παράγουν τις αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων του πυρήνα που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή.

Από την ανάλυση των απωλειών αυτών προκύπτουν και οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή. Έτσι, οι απώλειες χαλκού που είναι θερμικές απώλειες είναι πολύ εύκολο να ενσωματωθούν στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή απλά με την προσθήκη δύο αντιστάσεων: της  $R_1$  που αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος και της  $R_2$  που αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος.

Σχετικά με τις ροές σιέδασης, εξαιτίας του γεγονότος ότι το μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής των ροών σιέδασης είναι στον αέρα, υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της απαιτούμενης μαγνητηγερευτικής δύναμης και της αντίστοιχης μαγνητικής ροής, η οποία σε κάθε τύλιγμα εκφράζεται μέσω μιας σταθερής αυτεπαγωγής σιέδασης  $L_1$  και  $L_2$ , αντίστοιχα. Δηλαδή, σε αντίθεση με τη μη γραμμικότητα του σιδηρομαγνητικού υλικού, η μαγνητική ροή σιέδασης είναι σχεδόν ανάλογη του ρεύματος που την παράγει.

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 τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή τάσης. Τέλος το ρεύμα απωλειών του πυρήνα (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 τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή τάσης.





Σχήμα 6: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή

Μία βασική δυσκολία που έχει να αντιμετωπίσει το ισοδύναμο κύκλωμα, είναι η μαγνητική ζεύξη πρωτεύοντος – δευτερεύοντος τυλίγματος, διότι είναι δύσκολη η εφαρμογή του 1<sup>ου</sup> Κανόνα του Kirchhoff (δεν υπάρχει κάποιος κόμβος). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η έννοια του ανηγμένου μεγέθους: οποιοδήποτε μέγεθος του δευτερεύοντος τυλίγματος μπορεί να «μεταφερθεί» στο πρωτεόν τυλίγμα, με τιμή ίση με αυτή που «φαίνεται» από το πρωτεόν τυλίγμα. Για παράδειγμα, σε ένα Μ/Τ με λόγο μετασχηματισμού (n) η ενεργός τιμή της τάσης του δευτερεύοντος «φαίνεται» από το πρωτεόν ίση με:

$$V'_{2rms} = nV_{2rms}$$

όπου το τονισμένο μέγεθος είναι η ανηγμένη τιμή του πραγματικού μεγέθους.

Αντίστοιχα, για τις αντιστάσεις και τις αυτεπαγωγές ισχύει:

$$R'_2 = n^2 \cdot R_2$$

$$L'_2 = n^2 \cdot L_2$$

$$I_2 = I_2/n$$