	<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ</b>
	<b>ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ</b>
	<b>ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ</b>

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΜΕ  
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΤΗΣ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ – ΠΗΝΙΑ TESLA**

**ΑΝΔΡΟΥΛΙΔΑΚΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΣΙΔΕΡΑΚΗΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ**

**ΗΡΑΚΛΕΙΟ 16-05-2011**

Μετασχηματιστής Tesla

## Contents

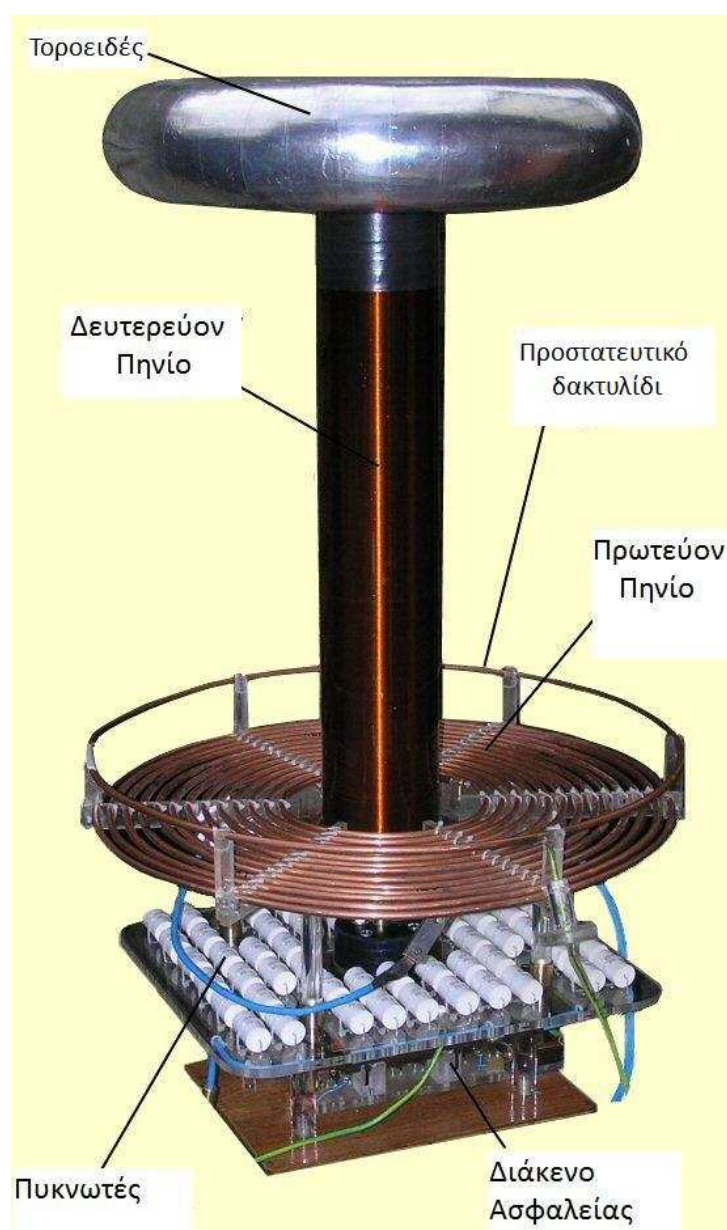
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
1.1 Το Πηνίο Tesla .....	4
1.2 Εφαρμογές Πηνίων Tesla.....	5
2.ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	9
2.1 Μετασχηματιστές με πυρήνα .....	9
2.2 Απώλειες – απόδοση μετασχηματιστών.....	12
2.3 Σιδηρομαγνητικά υλικά μετασχηματιστών.....	14
2.4. Μαγνητική υστέρηση.....	17
2.5 Απώλειες δινορευμάτων.....	19
2.6 Μετασχηματιστές χωρίς πυρήνα .....	20
3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ ΠΗΝΙΟΥ TESLA .....	22
3.1 Κυκλώματα RLC και συντονισμός.....	22
3.1.1 Αυτεπαγωγή.....	22
3.1.2 Ελικοειδής επαγωγή.....	24
3.1.3 Σπειροειδής επαγωγή .....	24
3.1.4 Επίπεδη επαγωγή.....	25
3.1.5 Αμοιβαία επαγωγιμότητα .....	25
3.1.6 Επιδερμικό φαινόμενο σε επαγωγές.....	25
3.1.7 Σκέδαση.....	27
3.1.8 Πυκνωτές.....	27
3.1.9 Πυκνωτές για πηνία Tesla .....	28
3.1.10 Αύξηση της χωρητικότητας και της διηλεκτρικής ανοχής .....	29
3.1.11 Παρασιτικές χωρητικότητες.....	30
3.1.12 Επίδραση της τοροειδούς χωρητικότητας στην συχνότητα συντονισμού .....	32
3.1.13 Μέγιστη χωρητικότητα χρησιμοποίησης στο πρωτεύον κύκλωμα με διάκενο διάσπασης .....	32
3.1.14Τοροειδές.....	33
3.2 Συντονισμός κυκλωμάτων RLC.....	34
3.2.1 Επίδραση του συντονισμού στα εν σειρά RLC κυκλώματα .....	35
3.2.2 Επίδραση του συντονισμού στα εν παραλλήλο RLC κυκλώματα.....	36
3.2.3 Προσδιορισμός συχνότητας συντονισμού δυο συντονισμένων κυκλωμάτων με διάκενο διάσπασης.....	37
3.3 Θεωρητική ανάλυση ενός πηνίου Tesla.....	38
3.3.1 Πρωτεύον τύλιγμα .....	39

3.3.2 Υπολογισμός πρωτεύοντος τυλίγματος .....	41
3.3.3 Δευτερεύον τυλίγμα.....	41
3.3.4 Υπολογισμός δευτερεύοντος τυλίγματος .....	43
3.3.5 Υπολογισμός τοροειδούς .....	46
4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΟΣ ΠΗΝΙΟΥ TESLA.....	46
4.1 Υπολογισμός Ισχύος και μήκος τόξου κατασκευής.....	46
4.2 Υπολογισμός πυκνωτή πρωτεύοντος κυκλώματος κατασκευής .....	46
4.3 Υπολογισμός πρωτεύοντος τυλίγματος κατασκευής.....	47
4.4 Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού πρωτεύοντος κυκλώματος κατασκευής .....	47
4.5 Υπολογισμός δευτερεύοντος τυλίγματος κατασκευής.....	47
4.6 Υπολογισμός αυτό-χωρητικότητας δευτερεύοντος τυλίγματος κατασκευής .....	48
4.7 Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού δευτερεύοντος τυλίγματος κατασκευής .....	48
4.8 Υπολογισμός τοροειδούς κατασκευής.....	48
4.9 Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού δευτερεύοντος κυκλώματος κατασκευής .....	48
4.10 Διάκενο διάσπασης .....	49
4.10.1 Στατικό διάκενο διάσπασης.....	49
4.10.2 Περιστροφικό διάκενο διάσπασης .....	50
4.10.3 Διάκενα ασφαλείας.....	52
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	54
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....	55
Φωτογραφίες κατασκευής πηνίου Tesla .....	55
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....	68
Στοιχεία για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν .....	68
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	70
Βιογραφία του Nicola Tesla.....	70
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ .....	72
Φωτογραφίες Πηνίων Tesla .....	72

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Το Πηνίο Tesla

Ίσως είναι η μόνη από τις εφευρέσεις του Tesla που έχει σήμερα το όνομά του. Πρόκειται για μια συσκευή που παράγει υψηλή τάση σε υψηλή συχνότητα και χρησιμοποιήθηκε από τον Tesla σε διάφορα μεγέθη και παραλλαγές. Το πηνίο Tesla, γνωστό και σαν μετασχηματιστής Tesla, χρησιμοποιείται και σήμερα σε ποικίλες εφαρμογές στη ραδιοφωνία και την τηλεόραση, για δοκιμές μονωτικών υλικών, για εξομίωση και μελέτη κεραυνών και σε πολλές άλλες οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω.



Ολοκληρωμένη μορφή Πηνίου Tesla

## 1.2 Εφαρμογές Πηνίων Tesla

Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα οι βιομηχανίες κατασκεύαζαν μικρού μεγέθους πηνία Tesla για την παραγωγή υψηλής τάσης για εφαρμογές όπως: γεννήτριες ακτινών X και για σύμπληξη προϊόντων μέσω ηλεκτροπληξίας για κτηνιατρικές εφαρμογές.

Στις μέρες μας εφαρμογές με πηνία Tesla χρησιμοποιούνται στις εξής κατηγορίες:

### A) Για δοκιμή μονωτικών υλικών

Τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε συστήματα παροχής ισχύος υψηλής τάσης εκτίθενται σε καταπόνηση υψηλής συχνότητας και τάσης, λόγω εξωτερικών παραγόντων όπως είναι οι κεραυνοί ή λόγω γήρανσης του υλικού. Οι παραδοσιακές δοκιμές των υλικών με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης (HVDC) μπορεί να μην παρουσιάσουν τις πραγματικές επιπτώσεις στο μονωτικό υλικό κατά την διάρκεια της δοκιμής. Πειράματα έχουν δείξει πως πετυχημένες δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση γεννητριών υψηλής τάσης υψηλών συχνοτήτων.



*Μονωμένος αγωγός υψηλής τάσης αντοχής 150.000 V*

Μετασχηματιστές με σιδηρομαγνητικό πυρήνα δεν προτιμούνται για δοκιμές υψηλής τάσης και υψηλής συχνότητας. Στη θέση του σιδήρου πρέπει να χρησιμοποιούν φερρίτη αλλά λόγω του μεγάλου κόστους του δεν χρησιμοποιείται για τις εφαρμογές αυτές. Οι μετασχηματιστές με πυρήνα από φερρίτη είναι μικρής διάστασης αλλά παρόλα αυτά παρουσιάζουν υψηλή χωρητικότητα και παράγουν μη γραμμικά φαινόμενα έχοντας ως αποτέλεσμα την δημιουργία αρμονικών.

Το πηνίο Tesla δεν δημιουργεί μη γραμμικά φαινόμενα διότι δεν έχει πυρήνα μεταξύ των δύο τυλιγμάτων του. Επίσης λόγω του μεγάλου του μεγέθους και της μεγάλης απόστασης μεταξύ των τυλιγμάτων του μειώνεται η χωρητικότητά του, ενώ παράλληλα μας δίνει τη δυνατότητα να ρυθμίζουμε την συχνότητα αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά των πηνίων και την τάση εξόδου ρυθμίζοντας της τάση εισόδου.



Υποβρύχιος μονωμένος αγωγός υψηλής τάσης αντοχής 500.000 V

### B) Για την δοκιμή Μονωτήρων

Είναι δύσκολο να ελέγξουμε την μορφή της παραγόμενης τάσης και τις ταλαντώσεις της συχνότητας ενός πηνίου Tesla, παρόλα αυτά η υψηλή τάση του πηνίου Tesla μοιάζει με τις στιγμιαίες υπερτάσεις που δημιουργούνται σε συστήματα ισχύος. (πχ από διακοπτικές λειτουργίες ή από εκκενώσεις προ τη γη)

Κατασκευαστές κεραμικών μονωτήρων όπως είναι η Sun Electrics και η Electroceramics ακόμα χρησιμοποιούν πηνία Tesla ως μία από τις δοκιμές που τους καταβάλουν για την αντοχή του μονωτήρα στη διάτρηση από υψηλή τάση.



Κεραμικός μονωτήρας σε δοκιμή υψηλής τάσης με πηνίο Tesla

### Γ) Για παραγωγή παλμών υψηλής τάσης

Πηγές παλμών υψηλής τάσης και υψηλής συχνότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, για την μέτρηση μεγεθών με υψηλή ακρίβεια ή για πολύ ισχυρούς παλμούς μικροκυμάτων. (μήκος κύματός που φτάνει τα 3 cm)

Έχουν δημοσιευθεί πολλές αναφορές στη χρήση πηνίων Tesla για την κατασκευή γεννητριών ακτινοβολίας ηλεκτρονίων. Το πλεονέκτημα της γεννήτριας αυτής σε σχέση με την γεννήτρια Marx είναι ο μεγάλος βαθμός επαναλήψεων των λειτουργιών της και το χαμηλό κόστος κατασκευής λόγω του λιγότερου αριθμού πυκνωτών που χρειάζονται για την κατασκευή της.

Επίσης εφαρμογές της χρήσης των πηνίων Tesla έχουν αναφερθεί και σε φορητές συσκευές οδήγησης ακτινοβολίας ηλεκτρονίων αλλά και σε συσκευές παραγωγής ακτινών Χ.

### Δ) Για μελέτες και εξομοίωση κεραυνών

Οι μελέτες πάνω στους φυσικούς κεραυνούς άρχισαν να ξεκινούν έχοντας ως κίνητρο την αποφυγή ατυχημάτων που δημιουργούνταν από κεραυνούς όπως το συμβάν του 1969 κατά την διάρκεια της απογείωσης του Apollo 12 και το 1987 κατά την διάρκεια της απογείωσης του Atlas-Centaur 67.

Οι καθοδικοί κεραυνοί (σύννεφο με γη) έχουν μελετηθεί διεξοδικά αλλά οι κεραυνοί που δημιουργούνται μεταξύ των σύννεφων (σύννεφο με σύννεφο) και μεταξύ σύννεφου και ατμόσφαιρας (σύννεφο με αέρα) είναι πιο δύσκολο να τους κατανοήσουμε και να τους καταγράψουμε. Η παρατήρηση των πεδίων που δημιουργούνται από κεραυνούς μπορούν να μας δώσουν μόνο μια μικρή πληροφορία από ότι συμβαίνει πραγματικά με το φαινόμενο αυτό.

Η αναπαραγωγή της διαδικασίας αυτής και η ταχύτητα του φαινομένου μελετάτε πολύ καλύτερα με κλιμακωτή δημιουργία εργαστηριακών εκκενώσεων. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση πηνίου Tesla το οποίο μπορεί και παράγει ηλεκτρικές εκκενώσεις και ηλεκτρικά πεδία παρόμοια με το φαινόμενο των κεραυνών.

### Ε) Για ασύρματη μεταφορά ενέργειας

Η τροφοδοσία χωρίς καλώδια δεν είναι μια νέα ιδέα στις αρχές των δεκαετιών του 20ου αιώνα προτού να καθιερωθούν τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, ο σέρβος εφευρέτης Nikola Tesla πρόβλεψε έναν κόσμο με ασύρματη τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο υψηλής τάσεως "πηνίων Tesla".

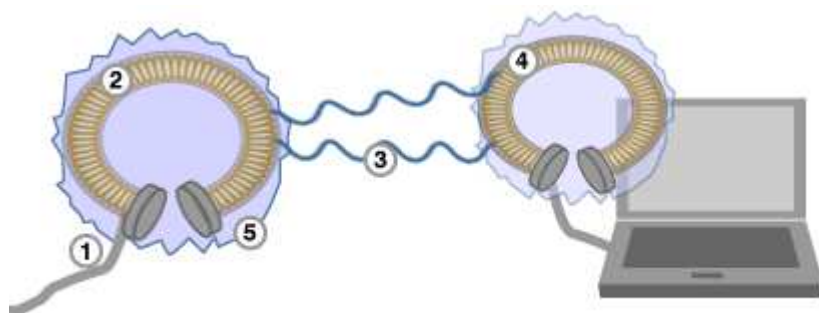
Αν και η πρόβλεψή του δεν βρήκε επιτυχία λόγω των επικίνδυνα μεγάλων σχετικών ηλεκτρικών πεδίων, οι πρόσφατες προτάσεις της ασύρματης μεταφοράς ισχύος που υιοθετούν την ακτινοβολία από μια συσκευή αποστολής σημάτων, έχουν αρχίσει να αναζωπυρώνουν το ενδιαφέρον των επιστημόνων. Δυστυχώς, αυτοί που έχουν στηριχθεί στις συσκευές αποστολής σημάτων που εκπέμπουν προς όλες τις κατευθύνσεις βλέπουν ότι είναι ανεπαρκείς, ενώ εκείνοι που έχουν επιλέξει τις κατευθυνόμενες συσκευές (ομοιοκατευθυνόμενες) αποστολής σημάτων

βλέπουν ότι δεν είναι πρακτικές για τις περισσότερες εφαρμογές, επειδή χρειάζονται μια καθαρή γραμμή οπτικής επαφής μεταξύ της συσκευής αποστολής σημάτων και του δέκτη.

Το 2007, φυσικοί στο Ίδρυμα Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) πρότειναν έναν τρόπο για να αποφύγουν αυτά τα προβλήματα με τη χρησιμοποίηση των μη ακτινοβολούντων 'παροδικών' ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτά τα κύματα παράγονται συνήθως επιπρόσθετα με τα γνωστά σε μας κύματα ακτινοβολίας, που χρησιμοποιούνται στις ασύρματες επικοινωνίες, αλλά αποσβένουν πολύ γρήγορα καθώς διαδίδονται από μια κεραία. Έτσι αν ο δέκτης μπορούσε να συντονιστεί με τη συσκευή αποστολής των σημάτων, το παροδικό αυτό πεδίο θα υποκινούσε τη δημιουργία ενός ρεύματος μεταξύ των δύο συσκευών. Κατ' αυτό τον τρόπο, τα αντικείμενα που δεν θα συντονιζόντουσαν μεταξύ τους ούτε θα διέκοπταν το σήμα ούτε θα απορροφούσαν ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας του πεδίου.

Η ιδέα αυτή έχει μπει σε εφαρμογή. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία αυτή, έχουν δημιουργήσει ένα ζευγάρι χάλκινων κεραιών σε σχήμα δακτυλίου. Τη μία από αυτές τη συνέδεσαν με ηλεκτρική ενέργεια, ενώ την άλλη που με μία λάμπα 60 W που τοποθετήθηκε δύο μέτρα μακριά. Όταν σύνδεσαν ένα εναλλασσόμενο ρεύμα στην πρώτη, παρήγαγε ένα μαγνητικό πεδίο που "συντονίστηκε" με τη δεύτερη, προκαλώντας κατά συνέπεια ένα ρεύμα. Αυτό το ρεύμα, όπως ισχυρίζεται η ομάδα του MIT, άναψε τη λάμπα με μια αποδοτικότητα μετάδοσης 40%, ακριβώς όπως προβλέπει η ως θεωρία τους.

Με λίγα λόγια για την ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής, οι ερευνητές στηρίζονται στο φαινόμενο του συντονισμού κατά το οποίο ένα αντικείμενο ταλαντώνεται όταν δεχθεί ενέργεια μιας ορισμένης συχνότητας.



Παράδειγμα μεταφοράς ασύρματης ενέργειας

- 1) Ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτεί την κεραία, η οποία κατασκευάζεται από χαλκό
- 2) Η κεραία συντονίζεται σε μια συχνότητα περίπου 10MHz, παράγοντας ηλεκτρομαγνητικά κύματα
- 3) Η ενέργεια από την κεραία μεταδίδεται μέχρι 2m
- 4) Η ηλεκτρική ενέργεια έρχεται στην κεραία του lap-top, η οποία πρέπει επίσης να συντονίζεται στα 10MHz. Η ενέργεια χρησιμοποιείται για να επαναφορτίσει τη συσκευή
- 5) Ενέργεια που δεν μεταφέρεται στο lap-top επανέρχεται εκ νέου στην πρώτη κεραία. Άνθρωποι ή άλλα αντικείμενα δεν επηρεάζονται καθώς δεν συντονίζονται στα 10MHz.



## 2.ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

### 2.1 Μετασχηματιστές με πυρήνα

Οι μετασχηματιστές είναι διατάξεις πηνίων, όπου με την ιδιότητα του φαινομένου της αυτεπαγωγής πετυχαίνουμε μετασχηματισμό της εναλλασσόμενης τάσης και ρεύματος από μια πηγή τάσης. Ένας απλός μετασχηματιστής αποτελείται από δύο πηνία, όπου το ένα ονομάζεται πρωτεύον πηνίο και το άλλο δευτερεύον πηνίο. Στο πρωτεύον πηνίο οδηγείται η τάση που θέλουμε να μετασχηματίσουμε και στο δευτερεύον πηνίο λαμβάνουμε την επιθυμητή τάση. Ο σιδηροπυρήνας αποτελεί βασικό στοιχείο του μετασχηματιστή, καθώς αυξάνει την αυτεπαγωγή των πηνίων δημιουργώντας έναν ευκολότερο δρόμο για την μαγνητική ροή (μικρότερη μαγνητική αντίσταση) με αποτέλεσμα την συσσώρευση αυτής στον όγκο του.

Εάν εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση στο πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή, η μεταβολή του ρεύματος έχει σαν συνέπεια την μεταβολή της μαγνητικής ροής στο δευτερεύον τύλιγμα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα άκρα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Η τάση και το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή εξαρτάται από το πάχος του σύρματος των πηνίων, τον αριθμό στροφών των πηνίων και το μέγεθος του σιδηροπυρήνα.

Οι μετασχηματιστές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

**α) μετασχηματιστές ισχύος**

**β) μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων**

**γ) μετασχηματιστές ρεύματος**

**δ) αυτομετασχηματιστές**

**ε) μετασχηματιστές υψηλής τάσης.**

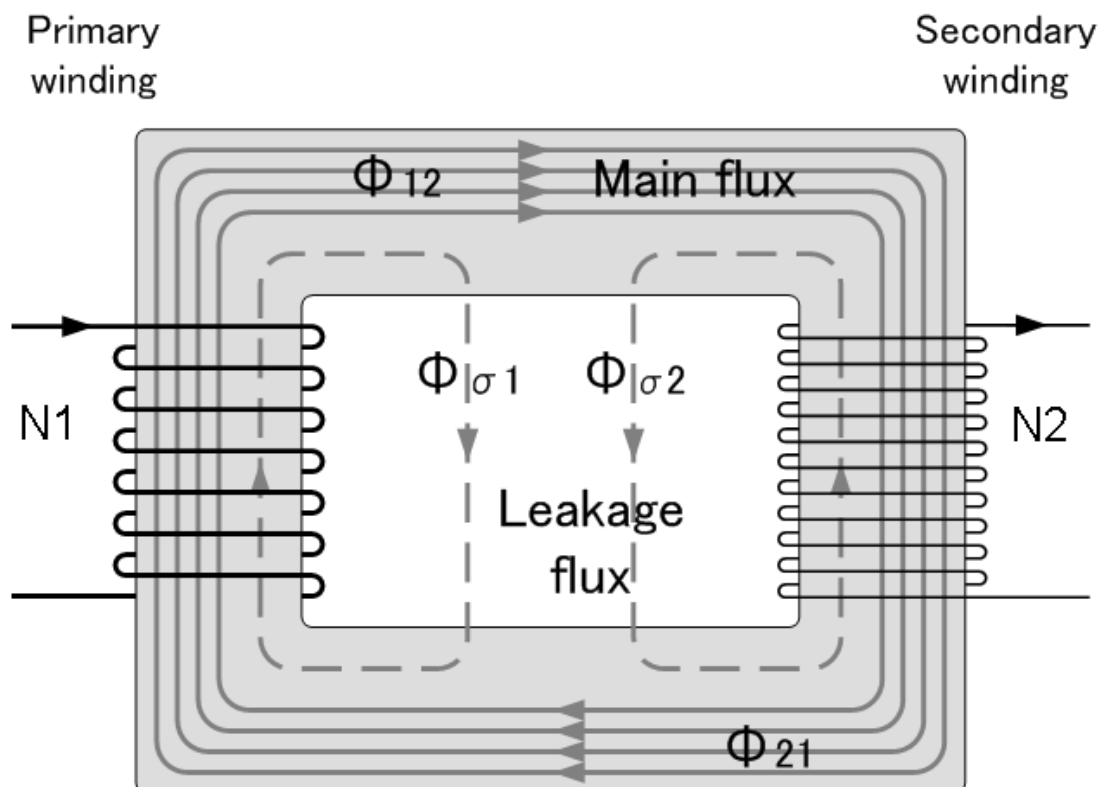
**στ) μετασχηματιστές δοκιμής**

Με τη χρήση του μετασχηματιστή ισχύος εξυπηρετείται κυρίως η μεταφορά και η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από σύγχρονες γεννήτριες γίνεται σε επίπεδα τάσης 15 kV - 20 kV. Επίσης, η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε διαφορετικό επίπεδο τάσης (σε υψηλή τάση 150 kV, ή υπερύψηλη τάση 400 kV, 750 kV) και με αυτό τον τρόπο μειώνονται οι απώλειες θερμότητας κατά την μεταφορά της. Τέλος, η χρησιμοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε επίπεδο κατάλληλο για κάθε καταναλωτική συσκευή (χαμηλή τάση 220 V στην Ευρώπη, ή 120 V στην Αμερική).

Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στις παρά πάνω εφαρμογές έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας: η ίδια ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος  $P_1$  που εισέρχεται στον μετασχηματιστή εξέρχεται από αυτόν  $P_2$ , όμως με διαφορετικό το επίπεδο της τάσης.

Ένας μονοφασικός μετασχηματιστής αποτελείται από δύο (ή περισσότερα) τυλίγματα ηλεκτρικά ανεξάρτητα όμως συνεζευγμένα μέσω ενός αμοιβαίου μαγνητικού πεδίου  $\Phi$  (Σχήμα 2.1.1). Το

τύλιγμα 1 με  $N_1$  ελιγμάτα (σπείρες) ονομάζεται πρωτεύον και το τύλιγμα 2 με  $N_2$  ελιγμάτα ονομάζεται δευτερεύον. Η είσοδος της ηλεκτρικής ισχύος είναι από το πρωτεύον και η έξοδος της είναι από το δευτερεύον.



Σχήμα 2.1.1

Ο λόγος μετασχηματισμού ορίζεται ως ο λόγος των ελιγμάτων του πρωτεύοντος  $N_1$  προς τον αριθμό ελιγμάτων του δευτερεύοντος  $N_2$ :

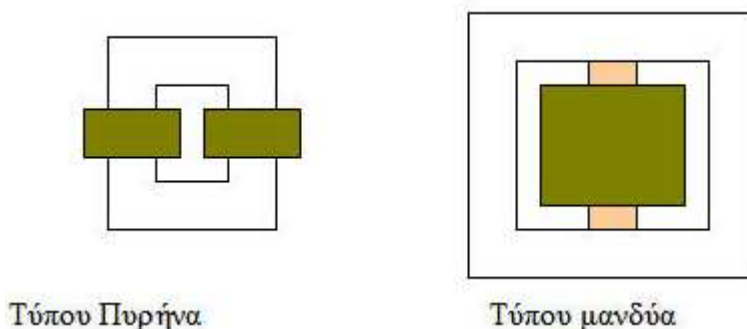
$$A = N_1 / N_2$$

Ο λόγος μετασχηματισμού είναι μικρότερος ή μεγαλύτερος από τη μονάδα ανάλογα με το αν ο μετασχηματιστής υποβιβάζει ή ανυψώνει την τάση. Ως πυρήνας του μετασχηματιστή χρησιμοποιεί σιδηρομαγνητικό υλικό του οποίου η μαγνητική διαπερατότητα είναι πολύ υψηλότερη από του αέρα.

Ο πυρήνας κατασκευάζεται από δέσμη λεπτών ελασμάτων, πάχους 0,3-0,5 mm, ηλεκτρικώς μονωμένα μεταξύ τους με επιφανειακή μόνωση από ειδικό βερνίκι, με σκοπό τη μείωση των δινορρεύματων που επάγονται στο σίδηρο. Με αυτό τον τρόπο μειώνονται και οι σχετικές απώλειες.

Τα μαγνητικά ελάσματα κόβονται σε σχήμα «πι» ή «διπλό πι» ή «γιώτα» και συνδέονται πολλά μαζί, το ένα δίπλα στο άλλο, σχηματίζοντας έτσι τους πυρήνες των μετασχηματιστών.

Τα τυλίγματα κατασκευάζονται από μονωμένους χάλκινους αγωγούς, που τυλίγονται σε πολλές στρώσεις πάνω σε καλούπια και μετά συναρμολογούνται στους κορμούς. Από κατασκευαστική άποψη διακρίνονται: μετασχηματιστές τύπου πυρήνα και μετασχηματιστές τύπου μανδύα. (Σχήμα 2.1.2)



Σχήμα 2.1.2

Τα άκρα των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος καταλήγουν σε ακροδέκτες οι οποίοι στηρίζονται σε μία βάση από βακελίτη. Για κάθε ακροδέκτη χρησιμοποιείται ένα γράμμα ή και αριθμός: οι ακροδέκτες του πρωτεύοντος συμβολίζονται με U-V ή A-B ή H1-H2 οι ακροδέκτες του δευτερεύοντος συμβολίζονται με u ή a-b ή x1-x2.

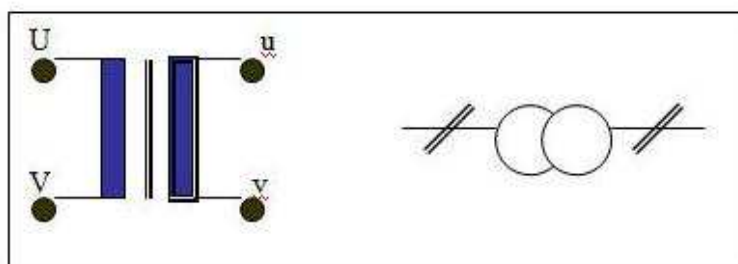
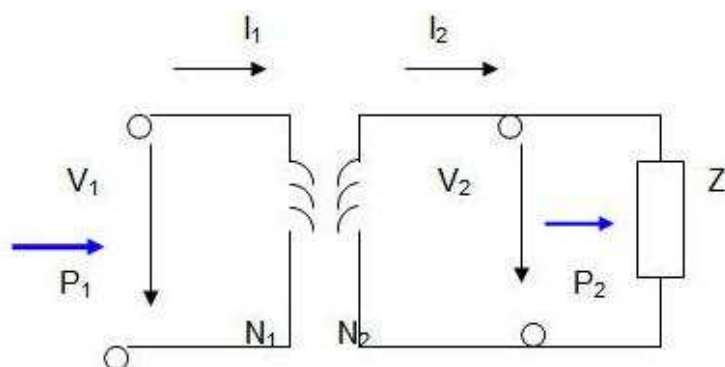
Η συσκευή του Σχήματος 2.1.1 είναι ένας ιδανικός μετασχηματιστής επειδή για αυτήν θεωρείται ότι ισχύουν οι ακόλουθες απλοποιημένες παραδοχές:

- Οι ωμικές αντιστάσεις των δύο τυλιγμάτων, R1 του πρωτεύοντος και R2 του δευτερεύοντος είναι αμελητέες.
- Οι απώλειες θερμότητας (Joule) των δύο τυλιγμάτων αμελούνται.
- Οι απώλειες του πυρήνα λόγω δινορρευμάτων αμελούνται.
- Η μαγνητική ροή  $\Phi$  του πυρήνα εμπλέκει και τα δύο τυλίγματα και αμελείται η ποσότητα μαγνητικής ροής που διαφεύγει στον αέρα.

Η ισότητα της εισερχόμενης P1 και της εξερχόμενης ισχύος P2 του ιδανικού μετασχηματιστή εξηγείται δεδομένου ότι έχουν αμεληθεί όλες οι απώλειες του (οι απώλειες θερμότητας στις ωμικές αντιστάσεις και στον πυρήνα). Ο λόγος των τάσεων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος ισούται με το λόγο μετασχηματισμού και ο λόγος των ρευμάτων ισούται με το αντίστροφο του λόγου μετασχηματισμού:

$$V1/V2=N1/N2=I1/I2=N2/N1=1/a$$

Το ηλεκτρικό κύκλωμα του ιδανικού μετασχηματιστή δίνεται στο Σχήμα 2.1.3. Στο δευτερεύον έχει συνδεθεί το φορτίο Z που τροφοδοτεί ο μετασχηματιστής. Το φορτίο μπορεί να είναι μία ωμική αντίσταση R, ή ένα πηνίο L, ή ένας πυκνωτής C, ή συνδυασμός των τριών στοιχείων αυτών, δηλαδή μια σύνθετη αντίσταση R-L-C.



Σχήμα 2.1.3

Ο πραγματικός μετασχηματιστής:

Έχει ωμικές αντιστάσεις των δύο τυλιγμάτων,  $r_1$  του πρωτεύοντος και  $r_2$  του δευτερεύοντος.

Έχει απώλειες θερμότητας (Joule) των δύο τυλιγμάτων

Έχει απώλειες του πυρήνα λόγω δινορρευμάτων.

## 2.2 Απώλειες – απόδοση μετασχηματιστών

Οι βασικοί τύποι απωλειών των μετασχηματιστών είναι οι απώλειες κενού φορτίου και οι απώλειες φορτίου. Οι απώλειες κενού φορτίου ή απώλειες πυρήνα (no-load losses) προκαλούνται από την υστέρηση και τα δινορρεύματα στον πυρήνα. Οι απώλειες αυτές υφίστανται οποτεδήποτε ο μετασχηματιστής είναι συνδεδεμένος και είναι σταθερές, ανεξάρτητα από το φορτίο.

Οι απώλειες υστέρησης προκαλούνται από την κυκλική μαγνήτιση του σιδηρομαγνητικού υλικού, το οποίο μαγνητίζεται και απομαγνητίζεται με την κυκλική μεταβολή της μαγνητεγερτικής δύναμης. Οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες προς το εμβαδόν του βρόχου υστερήσεως και εξαρτώνται από το υλικό κατασκευής του πυρήνα. Οι πυριτιούχοι χάλυβες έχουν πολύ χαμηλότερη υστέρηση από τους συμβατικούς, ενώ τα άμορφα μέταλλα έχουν ακόμη χαμηλότερη υστέρηση. Οι απώλειες υστέρησης είναι υπεύθυνες για ποσοστό 50% - 70% των απωλειών κενού φορτίου. Οι απώλειες από δινορρεύματα προκαλούνται διότι η εναλλασσόμενη μαγνητική ροή επάγει δινορρεύματα στα ελάσματα του πυρήνα και κατά συνέπεια εκλύεται θερμότητα. Οι απώλειες από δινορρεύματα ευθύνονται περίπου για ποσοστό 30% - 50% των απωλειών κενού φορτίου και με τη μείωσή τους μπορεί να επιτευχθεί η μεγαλύτερη βελτίωση της απόδοσης των μετασχηματιστών. Η μείωση των απωλειών από δινορρεύματα μπορεί να επιτευχθεί με την κατασκευή του πυρήνα από λεπτά ελάσματα, μονωμένα μεταξύ τους με λεπτό στρώμα επιχρίσματος, προκειμένου να

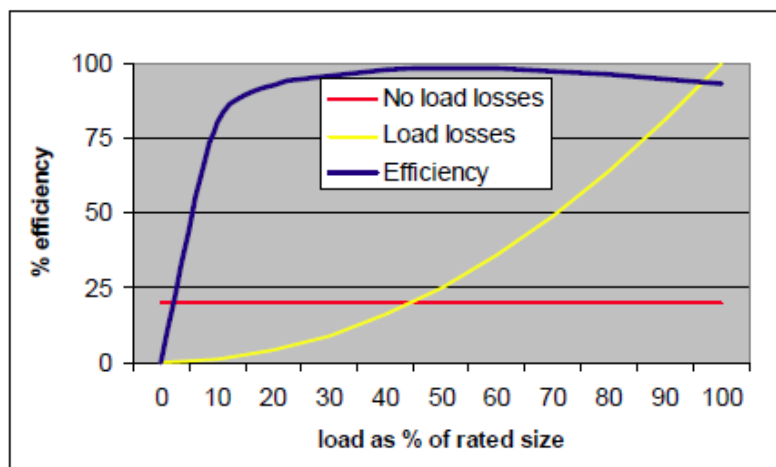
μειωθούν τα δινορρεύματα. Εκτός από τις απώλειες υστέρησης και τις απώλειες από δινορρεύματα υπάρχουν στον πυρήνα και άλλες απώλειες, όπως για παράδειγμα απώλειες διηλεκτρικού, οι οποίες ευθύνονται για ποσοστό λιγότερο από 1% των συνολικών απωλειών πυρήνα.

Οι απώλειες φορτίου ή απώλειες χαλκού (load losses) εκλύονται υπό μορφή θερμότητας στο αγώγιμο υλικό, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα. Αποτελούνται από τις απώλειες θερμότητας που οφείλονται στην αντίσταση των τυλιγμάτων και από τις απώλειες που προκαλούνται από τα δινορρεύματα που επάγονται στους αγωγούς (επιδερμικό φαινόμενο) και τα τμήματα της κατασκευής (διαφεύγουσα απώλεια). Οι απώλειες φορτίου είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος στα τυλίγματα και μπορούν να μειωθούν με αύξηση της διατομής των αγωγών ή με μείωση του μήκους των τυλιγμάτων. Με την κατασκευή των τυλιγμάτων με συνεχή αντιμετάθεση αγωγών (Continuously Transposed Conductor – CTC) επιτυγχάνεται αυξημένη διατομή του αγωγού, ενώ ταυτόχρονα εξομαλύνονται οι διαφορές της μαγνητικής ροής που εμφανίζονται στους συνενωμένους αγωγούς [13, 24].

Στους μετασχηματιστές των οποίων η ψύξη επιτυγχάνεται με βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα υπάρχουν επιπλέον οι απώλειες ψύξης (cooling losses), οι οποίες προκαλούνται από την ενεργειακή κατανάλωση του ανεμιστήρα. Όσο μεγαλύτερες είναι οι υπόλοιπες απώλειες, τόσο περισσότερη ψύξη χρειάζεται, άρα τόσο πιο μεγάλες είναι και οι απώλειες ψύξης. Οι απώλειες ψύξης κατά συνέπεια μπορούν να περιοριστούν λαμβάνοντας διάφορα μέτρα μείωσης των υπολοίπων τύπων απωλειών, προκειμένου η θερμοκρασία λειτουργίας να συγκρατείται σε χαμηλές τιμές [15].

Τέλος, στους μετασχηματιστές προκαλούνται απώλειες εξαιτίας της άεργου ισχύος και των αρμονικών. Η άεργος συνιστώσα του ρεύματος παράγει απώλεια ισχύος, παρά το γεγονός ότι δεν συνεισφέρει στην ωφέλιμη ισχύ του φορτίου. Οι απώλειες είναι ανάλογες του  $1/(\cos\phi)^2$ . Συνεπώς πρέπει να αποφεύγεται ο χαμηλός συντελεστής ισχύος ( $\cos\phi$ ), για να περιορίζονται οι απώλειες λόγω της άεργου ισχύος. Οι απώλειες ισχύος λόγω των δινορρευμάτων είναι ανάλογες του τετραγώνου της συχνότητας. Συνεπώς η ύπαρξη αρμονικών μεγαλύτερων της συχνότητας των 50 Hz, οι οποίες οφείλονται στην ύπαρξη μη γραμμικών φορτίων στο δίκτυο, προκαλεί επιπλέον απώλειες στον πυρήνα και τα τυλίγματα [13].

Οι μετασχηματιστές διανομής είναι πολύ αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές με συντελεστή απόδοσης που φτάνει μέχρι τα επίπεδα του 97,5% με 99,4%. Η απόδοση λειτουργίας τους είναι μικρότερη, διότι δεν λειτουργούν στη μέγιστη απόδοση συνέχεια. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι απώλειες φορτίου, οι απώλειες κενού φορτίου και ο συντελεστής απόδοσης συναρτήσει του επιπέδου φόρτισης για έναν μετασχηματιστή. Το σημείο μέγιστης απόδοσης είναι το σημείο στο οποίο οι απώλειες φορτίου είναι ίσες με τις απώλειες κενού φορτίου και συνήθως βρίσκεται μεταξύ των τιμών φόρτισης 40% και 50% (Σχήμα 2.1)



Σχήμα 2.1: Συντελεστής απόδοσης και απώλειες συναρτήσει του επιπέδου φόρτισης

Το μέγεθος ενός μετασχηματιστή επιδρά στις απώλειές του. Γενικά μεγαλύτερες μονάδες έχουν χαμηλότερες ονομαστικές απώλειες, και, ιδιαίτερα, χαμηλότερες απώλειες φορτίου.

## 2.3 Σιδηρομαγνητικά υλικά μετασχηματιστών

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

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

Τα παραμαγνητικά (υλικά με ασύζευκτα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα των ατόμων τους) με εφαρμογή εξωτερικού πεδίου μαγνητίζονται ασθενώς στην ίδια διεύθυνση και φορά με αυτό. Τα άτομά τους παρουσιάζουν μόνιμη μαγνητική διπολική ροπή, αλλά με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μόνο μικρό ποσοστό αυτών ευθυγραμμίζεται με το πεδίο. Παραδείγματα παραμαγνητικών υλικών είναι το αλουμίνιο (Al) και ο λευκόχρυσος (Pt).

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

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά μπορούν επίσης να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με τις μαγνητικές τους ιδιότητες. Ένας γενικός διαχωρισμός τα κατατάσσει σε σκληρά και μαλακά, με τον

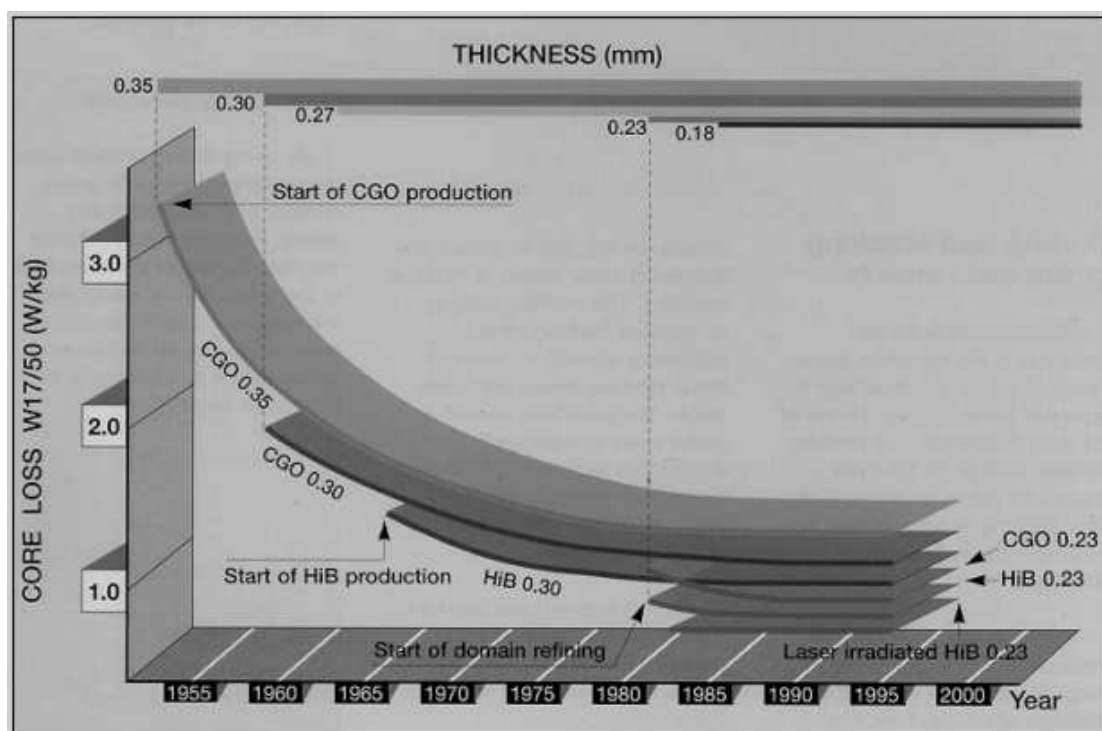
πρώτο χαρακτηρισμό να αναφέρεται σε εκείνα που παρουσιάζουν υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση  $B_r$  (ως ποσοστό της μαγνήτισης κορεσμού) και υψηλή απομαγνητίζουσα δύναμη  $H_c$ , ενώ το αντίθετο ισχύει για τα μαλακά υλικά. Τα σκληρά υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών και σε εφαρμογές στις οποίες η «μνήμη» της ιστορίας μαγνήτισης του υλικού είναι απαραίτητη (μαγνητική εγγραφή), ενώ τα μαλακά σε εφαρμογές στις οποίες απαιτούνται χαμηλές απώλειες υστέρησης (π.χ. μαγνητικά στοιχεία), αφού το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης σε αυτά είναι μικρό. Η βαθύτερη μελέτη των μηχανισμών βάσει των οποίων αλληλεπιδρούν οι στοιχειώδεις μαγνητικές ροπές, τόσο μεταξύ τους όσο και με ένα εξωτερικό πεδίο, οδηγεί στον ορισμό δύο ακόμη κατηγοριών υλικών, που είναι τα σιδηριμαγνητικά και τα αντισιδηρομαγνητικά. Τα σιδηριμαγνητικά υλικά έχουν τις μακροσκοπικές ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών, αλλά γενικά παρουσιάζουν σημαντικά ασθενέστερη μαγνήτιση, ενώ στα αντισιδηρομαγνητικά υλικά η μαγνήτιση που προκαλείται με την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου είναι πρακτικά αμελητέα.

Οι φερρίτες είναι σιδηριμαγνητικά υλικά (οξειδία του σιδήρου) τα οποία άρχισαν να παρασκευάζονται πειραματικά στα τέλη της δεκαετίας του '20, ενώ άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Έχουν το γενικό τύπο  $X\text{-Fe}_2\text{O}_4$ , όπου  $X$  είναι κάποιο ή συνδυασμός σε διάφορες αναλογίες κάποιων από τα ακόλουθα μέταλλα: σίδηρος (Fe), μαγγάνιο (Mn), κοβάλτιο (Co), νικέλιο (Ni), χαλκός (Cu), ψευδάργυρος (Zn), μαγνήσιο (Mg) και κάδμιο (Cd). Οι προσμίξεις που επιλέγονται κάθε φορά δίνουν και το όνομά τους στο φερρίτη. Έτσι, για παράδειγμα, μπορούμε να πούμε ότι οι σπουδαιότεροι από απόψεως πρακτικών εφαρμογών είναι οι φερρίτες μαγγανίου – ψευδαργύρου (Mn-Zn) και οι φερρίτες νικελίου – ψευδαργύρου (Ni-Zn). Αν και έχουν παρασκευαστεί και σκληροί φερρίτες, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στους μαλακούς, οι οποίοι έχουν γενικά μικρότερη μαγνήτιση κορεσμού από τον απλό σίδηρο, διαθέτουν όμως σειρά άλλων πλεονεκτημάτων. Ως τέτοια μπορούμε να αναφέρουμε τις μικρές τιμές για τα  $B_r$  και  $H_c$  (και άρα το μικρό εμβαδόν βρόχου υστέρησης), την υψηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα και τη χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα μέχρι κάποιου ορίου συχνότητας (διαφορετικό για κάθε υλικό), που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τον περιορισμό των απωλειών λόγω δινορρευμάτων. Ο λόγος για τον οποίο αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα στους φερρίτες με αύξηση της συχνότητας σχετίζεται με το γεγονός ότι ένα μακροσκοπικό δείγμα του υλικού αποτελείται από μικροσκοπικούς κόκκους (κρυσταλλίτες), οι οποίοι διαχωρίζονται μεταξύ τους με ένα λεπτό μονωτικό στρώμα πολύ μεγάλης αντίστασης. Η μεταξύ τους χωρητικότητα ουσιαστικά βραχυκυκλώνει το μονωτικό στρώμα στις υψηλές συχνότητες κι έτσι τότε, η ειδική αντίσταση του δείγματος παίρνει περίπου την τιμή της ειδικής αντίστασης ενός κρυσταλλίτη. Τυπικές τιμές γι' αυτήν είναι τα  $0.001\Omega\text{m}$  για τους φερρίτες Mn-Zn και τα  $30\Omega\text{m}$  για τους φερρίτες Ni-Zn [35], [133]. Η συχνότητα για την οποία αρχίζει να γίνεται σημαντική η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι διαφορετική για κάθε τύπο φερρίτη και μπορεί να είναι από λίγες δεκάδες kHz ή λίγες εκατοντάδες kHz (στις περισσότερες περιπτώσεις) ή και μεγαλύτερη, ιδίως για πιο καινούργια υλικά.

Οι φερρίτες Ni-Zn έχουν  $\mu_i < 1000$  (η τιμή της  $\mu_i$  είναι ενδεικτική και γενικά διαφέρει αρκετά από την τιμή της  $= \Delta B / \Delta H$   $0 \mu / \mu \alpha$  (amplitude permeability) που συχνά χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς για τις διάφορες εφαρμογές), υψηλή ειδική αντίσταση και μέτρια θερμοκρασιακή σταθερότητα (η  $\mu_r$  γενικά μειώνεται με τη θερμοκρασία). Προτιμούνται κυρίως σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές (μικρή ισχύς, υψηλή επαγωγή, μεγάλο εύρος συχνοτήτων) για συχνότητες από 0.5 έως 100MHz. Οι φερρίτες Mn-Zn έχουν  $\mu_i$  από 1000 ως 5000 και ειδική αντίσταση μικρότερη από αυτή των Ni-Zn, η οποία μάλιστα μειώνεται σημαντικά σε συχνότητες αρκετά χαμηλότερες απ' ό,τι στους φερρίτες Ni-Zn. Επίσης, παρουσιάζουν γενικά μικρότερη  $B_{sat}$  από τους φερρίτες Ni-Zn [35], [133]. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές συχνοτήτων από 1kHz ως 2MHz, όπως είναι για παράδειγμα τα μαγνητικά στοιχεία σε μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος.

Εναλλακτικές επιλογές, πέραν των φερριτών, αποτελούν τα άμορφα μέταλλα (κατεργάζονται σε υαλώδη φάση) και κράματα κονιορτοποιημένου σιδήρου, τα οποία έχουν αμηλότερο κόστος, μεγαλύτερη *Bsat*, αλλά γενικά παρουσιάζουν περισσότερες απώλειες συγκριτικά με τους φερρίτες.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες μείωσης των απωλειών κενού φορτίου ή απωλειών πυρήνα, οι οποίες ευθύνονται ακόμη για περισσότερο από τα δύο τρίτα των συνολικών απωλειών των μετασχηματιστών. Ο τύπος του σιδηρομαγνητικού υλικού ή αλλιώς ο τύπος του χάλυβα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα καθορίζει το μέγεθος των απωλειών πυρήνα. Για αυτόν το λόγο τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πυρήνα των μετασχηματιστών σταδιακά βελτιωμένοι χάλυβες, με χαμηλότερες απώλειες πυρήνα, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για μετασχηματιστές διανομής ή μεγαλύτερους μετασχηματιστές. Η εξέλιξη στους χάλυβες των μετασχηματιστών παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3.1



Σχήμα 2.3.1: Εξέλιξη απωλειών σιδήρου

Το βασικό υλικό κατασκευής ηλεκτρομαγνητικών πυρήνων από το 1900 περίπου ήταν ο πυριτιούχος χάλυβας θερμής έλασης με ποσοστό πυριτίου περίπου 3%. Τα επιμέρους φύλλα χωρίζονταν με μονωτικές στρώσεις συνδυάζοντας χαμηλές απώλειες υστέρησης και υψηλή αντίσταση. Σταδιακά αναπτύχθηκαν η ψυχρή έλαση και άλλες εξελιγμένες τεχνικές μόνωσης.

Τη δεκαετία του '50 άρχισε να χρησιμοποιείται πυριτιούχος χάλυβας με προσανατολισμένους κόκκους (Grain-oriented Steel - CGO). Οι μαγνητικές του ιδιότητες είναι βελτιωμένες χάρη στην εξέλαση και την ανόπτηση, οι οποίες γίνονται έτσι ώστε οι κόκκοι να προσανατολίζονται κατά την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Οι συμβατικοί χάλυβες με προσανατολισμένους κόκκους κατασκευάζονται από πλάκες πυριτιούχου σιδήρου και έχουν στις δύο τους πλευρές επίστρωση ενός λεπτού στρώματος μονωτικού υλικού οξειδίου για τη μείωση των δινορρευμάτων. Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN10707, το οποίο αντανακλά το διεθνές IEC 60404, περιγράφει ένα εύρος



παχών από 0,23 έως 0,50 mm. Οι χάλυβες με προσανατολισμένους κόκκους αποτελούν το πιο διαδεδομένο υλικό για την κατασκευή μετασχηματιστών διανομής στην Ευρώπη και το 1999 καταλάμβαναν το 70% της συνολικής κατανάλωσης χάλυβα [5].

Διάφορες τεχνικές επεξεργασίας και επίστρωσης σε συνδυασμό με μείωση της περιεκτικότητας σε πυρίτιο οδήγησαν στους χάλυβες με προσανατολισμένους κόκκους υψηλής διαπερατότητας (high permeability grain-oriented steels), οι οποίοι άρχισαν να κυκλοφορούν περίπου δέκα χρόνια μετά τους χάλυβες με προσανατολισμένους κόκκους. Κατασκευάζονται με πάχη από 0,23 έως 0,30 mm.

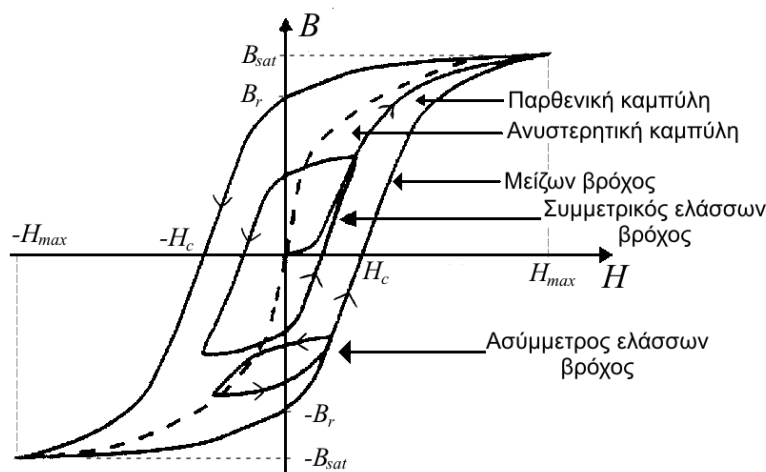
Περαιτέρω μείωση των απωλειών μπορεί να επιτευχθεί με περιορισμό του πεδίου. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά με αναδιαμορφωμένες δομές (Domain refined steels) κατασκευάζονται με διαδικασίες χάραξης με λέιζερ και διατίθενται σε συνήθως με πάχος 0,23 mm.

Οι τεχνικές χάραξης με λέιζερ οδήγησαν σε ελάσματα πολύ μικρού πάχους, 0,2 έως 0,3 mm, ενώ μπορούν να φτάσουν έως και 1 mm, με αποτέλεσμα να μειωθούν σημαντικά οι απώλειες κενού φορτίου [13]. Επίσης τεχνολογικά επιτεύγματα σε άλλους τομείς, όπως την ελασματοποίηση, την επίστρωση και την καθαρότητα των υλικών επέφεραν επιπλέον βελτίωση της απόδοσης του πυρήνα [5].

Τα τελευταία χρόνια κατασκευάζονται μετασχηματιστές διανομής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο. Ο άμορφος σίδηρος είναι εμπορικά διαθέσιμος από τις αρχές της δεκαετίας του '80. Έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μεγάλου αριθμού μετασχηματιστών διανομής στην Ιαπωνία κυρίως και στις ΗΠΑ. Οι μετασχηματιστές διανομής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο καταλαμβάνουν το 5% της παγκόσμιας αγοράς με τρία εκατομμύρια (3.000.000) μονοφασικές και μερικές εκατοντάδες χιλιάδες τριφασικές μονάδες, αλλά η εικόνα αυτή δεν αντανακλάται στην ευρωπαϊκή αγορά, καθώς στην Ευρωπαϊκή Ένωση η χρήση τους παραμένει περιορισμένη [13]. Στην ενότητα 4.3 περιγράφονται αναλυτικά οι μετασχηματιστές άμορφου σιδήρου και η τεχνική κατασκευής τους.

## 2.4. Μαγνητική υστέρηση

Όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό μαγνητίζεται σε μια κατεύθυνση, φθάνει σε κατάσταση ελάχιστης ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι δεν θα επανέλθει πίσω στην μηδενική μαγνήτιση όταν αφαιρεθεί το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Για να οδηγηθεί πίσω στην μηδενική μαγνήτιση θα πρέπει να του επιβληθεί ένα πεδίο με αντίθετη κατεύθυνση. Εάν ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται στο υλικό, η μαγνήτισή του θα καταγράψει έναν βρόχο που ονομάζεται βρόχος υστέρησης. Η μη επαναφορά από την ίδια καμπύλη μαγνήτισης όταν αυξομειώνεται το πεδίο είναι μια ιδιότητα που ονομάζεται υστέρηση και συσχετίζεται με την ύπαρξη των μαγνητικών περιοχών στο υλικό. Μόλις αναπροσανατολιστούν οι περιοχές του υλικού, αφαιρείται κάποια ενέργεια για να επιστρέψουν ξανά στην αρχή. Η υστέρηση προκαλεί διάφορους τύπους φαινομένων: την αλληλεπίδραση μεταξύ των περιοχών, την ανισοτροπία ή την εσωτερική τριβή τύπου αγκύρωσης που προκαλούνται από τις κρυσταλλογραφικές ακαθαρσίες, τις εξαρθρώσεις κλπ. Η επικρατέστερη αιτία διαφέρει ανάλογα με το υλικό που μελετάται.



Σχήμα 2.4.1: Οι καμπύλες που σχετίζονται με το φαινόμενο της υστέρησης σε μακροσκοπική κλίμακα.

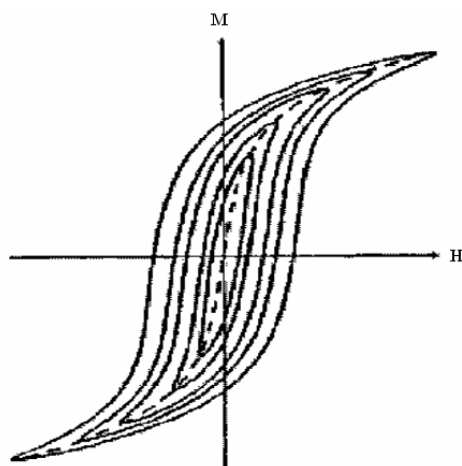
Στο σχήμα 2.4.1 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές μαγνήτισης  $\mathbf{M}(\mathbf{H})$  για ένα τυπικό σιδηρομαγνητικό υλικό. Σε αυτό το σχήμα περιγράφονται μερικές σημαντικές καμπύλες που σχετίζονται με την μαγνητική υστέρηση. Αν φανταστούμε ένα dc μαγνητικό πεδίο να εφαρμόζεται σε ένα αμαγνήτιστο υλικό, η χαρακτηριστική  $\mathbf{M}(\mathbf{H})$  που σχεδιάζεται είναι η καμπύλη αρχικής μαγνήτισης του σχήματος 2.4.1. Θεωρούμε τώρα ότι όταν φθάσει στον κορεσμό το υλικό, το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο αλλάζει την κατεύθυνση και αυξάνεται

έως ότου φθάσει το υλικό ξανά στον κορεσμό, αλλά από την αρνητική πλευρά. Εάν αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται, τότε σχεδιάζεται ο κύριος βρόχος υστέρησης που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4.1 Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο μηχανισμός της υστέρησης είναι γενικός. Αυτό σημαίνει ότι εκτός από τον κύριο βρόχο υστέρησης στις άκρες του οποίου το μαγνητικό υλικό είναι εντελώς κορεσμένο, υπάρχει άπειρος αριθμός άλλων, μικρότερων βρόχων υστέρησης, οι οποίοι βρίσκονται μέσα στον κύριο βρόχο υστέρησης. Αυτοί ονομάζονται ελάσσονες βρόχοι υστέρησης. Ο σχηματισμός ενός ελάσσονος βρόχου υστέρησης παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4.1 Υποθέτουμε ότι ανερχόμαστε τον κύριο βρόχο υστέρησης. Υποθέτουμε επίσης ότι πριν φθάσει στο θετικό σημείο κορεσμού, το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο αλλάζει κατεύθυνση. Τότε η καμπύλη  $\mathbf{M}(\mathbf{H})$  θα αρχίσει να κατεβαίνει με παρόμοιο τρόπο με αυτόν του κύριου βρόχου υστέρησης και στην πραγματικότητα θα φθάσει ασυμπτωτικά τον κύριο βρόχο στο σημείο του αρνητικού κορεσμού. Εάν το εφαρμοζόμενο πεδίο αλλάξει την κατεύθυνση πάλι πριν φθάσει στον πλήρη κορεσμό, τότε η καμπύλη θα αρχίσει να ανέρχεται άλλη μια φορά. Ο ανερχόμενος κλάδος θα περάσει μέσω του πρώτου σημείου αντιστροφής και θα φθάσει ασυμπτωτικά τον ανερχόμενο κλάδο του κύριου βρόχου, εκτός και αν το πεδίο δεν αλλάξει την κατεύθυνση πάλι. Όπως μπορεί να φανεί ήδη, δεν υπάρχει όριο για την τάξη των ελασσόνων βρόχων, αλλά όλοι πρέπει να βρεθούν μέσα στα όρια του κύριου βρόχου υστέρησης.

Ο βρόχος υστέρησης που περιγράφεται παραπάνω είναι ένας μη συμμετρικός ελάσσων βρόχος. Εάν το πρώτο σημείο αντιστροφής βρίσκεται πάνω στην αρχική καμπύλη, τότε είναι επίσης δυνατό να σχηματιστούν συμμετρικοί ελάσσονες βρόχοι. Στο σχήμα 2.4.1 υπάρχει επίσης μια άλλη καμπύλη, που παρουσιάζεται με τη διακεκομμένη γραμμή. Αυτή είναι η **καμπύλη μέσης μαγνήτισης**, η οποία είναι μεγάλης σπουδαιότητας για την μοντελοποίηση των μαγνητικών υλικών. Εξ' ορισμού, η καμπύλη μέσης μαγνήτισης είναι η  $\mathbf{M}(\mathbf{H})$  σχέση που θα λαμβανόταν εάν δεν υπήρχε η επίδραση της υστέρησης στο υλικό. Αυτό σημαίνει ότι κάθε σημείο της καμπύλης μέσης μαγνήτισης αντιστοιχεί στη διαμόρφωση περιοχών που δίνει τη χαμηλότερη πιθανή ενέργεια ή το συνολικό ενεργειακό ελάχιστο για έναν δεδομένο εξωτερικό πεδίο, ενώ τα σημεία της καμπύλης υστέρησης

αντιστοιχούν στις διαμορφώσεις περιοχών όπου η ενέργεια έχει μόνοτοπικά ελάχιστα. Λόγω του ειδικού χαρακτήρα της, η καμπύλη μέσης μαγνήτισης δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Αντ' αυτού, κάθε σημείο της καμπύλης πρέπει να παραχθεί με τρόπο παρόμοιο με τη διαδικασία απομαγνήτισης με την εναπόθεση ενός αργά μεταβαλλόμενου εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας σύμφωνα με ένα σταθερό συνεχές πεδίο.

Μια άλλη προτεινόμενη μεθοδολογία προκύπτει αν εφαρμοστεί μια ομαλή εναλλασσόμενη διέγερση σε διαφορετικά επίπεδα τάσεων. Συνδέοντας όλες τις άκρες των κύριων βρόχων υστέρησης που σχεδιάζονται, σχηματίζεται η καμπύλη μέσης μαγνήτισης (παρουσιάζεται με την διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 2.3. Αυτή η καμπύλη βρίσκεται μόνο στο πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο.



Σχήμα 2.3

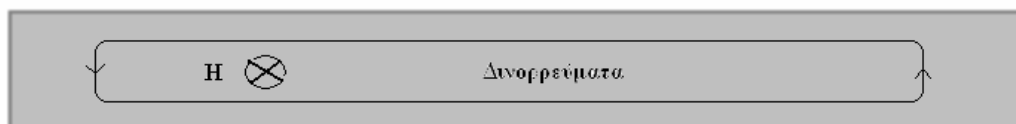
Οι απώλειες ενέργειας λόγω της υστέρησης υπολογίζονται από το εμβαδόν των βρόχων υστέρησης. Ενώ η υστέρηση των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι χρήσιμη για μερικές εφαρμογές (όπως η αντιγραφή ακουστικών ταινιών), δεν είναι επιθυμητή στον μετασχηματισμό ηλεκτρικής ισχύος, δεδομένου ότι προκαλεί απώλειες μέσα στον μαγνητικό πυρήνα των μετασχηματιστών με την μορφή θερμικής ενέργειας. Γι' αυτόν το λόγο, οι κατασκευαστές μετασχηματιστών χρησιμοποιούν τα σιδηρομαγνητικά υλικά με στενούς βρόχους υστέρησης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι απώλειες υστέρησης εξαρτώνται από την ονομαστική τάση και την συχνότητα. Ο κορεσμός και η υστέρηση δεν είναι τα μόνα χαρακτηριστικά που εισάγουν τις μη γραμμικότητες. Υπάρχει επίσης ένα άλλο σημαντικό φαινόμενο όταν ένα αγωγίμο υλικό (τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι επίσης αγωγοί) βρίσκεται υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου μεταβαλλόμενου με τον χρόνο και αυτό είναι τα δινορρεύματα που εξετάζονται παρακάτω.

## 2.5 Απώλειες δινορρευμάτων

Όταν ένα αγωγίμο υλικό βρίσκεται υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου μεταβαλλόμενου με τον χρόνο, τότε σε αυτό επάγονται τάσεις σύμφωνα με το νόμο του Faraday. Οι επαγόμενες τάσεις παράγουν ρεύματα που ρέουν σε κάθετο επίπεδο στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, τα ονομάζουμε δινορρεύματα, τα οποία προκαλούν τις θερμικές απώλειες μέσα στον μαγνητικό πυρήνα των ηλεκτρικών μηχανών. Για τον περιορισμό αυτών των θερμικών απωλειών ο μαγνητικός πυρήνας των μηχανών επαγωγής κατασκευάζεται από πολύ λεπτά ελάσματα από μαγνητικό υλικό,

τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους με κατάλληλα επιστρώματα. Οι απώλειες δινορρευμάτων εξαρτώνται από την συχνότητα και το πάχος της μαγνητικής λαμαρίνας. Το πάχος επιλέγεται μικρότερο από το μισό του βάθους διείσδυσης των δινορρευμάτων  $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$  δηλαδή για συχνότητα 50 Hz και κοινό σιδηρομαγνητικό υλικό το πάχος πρέπει να είναι μικρότερο από 0,5 mm.

### Συμπαγής πυρήνας σιδήρου



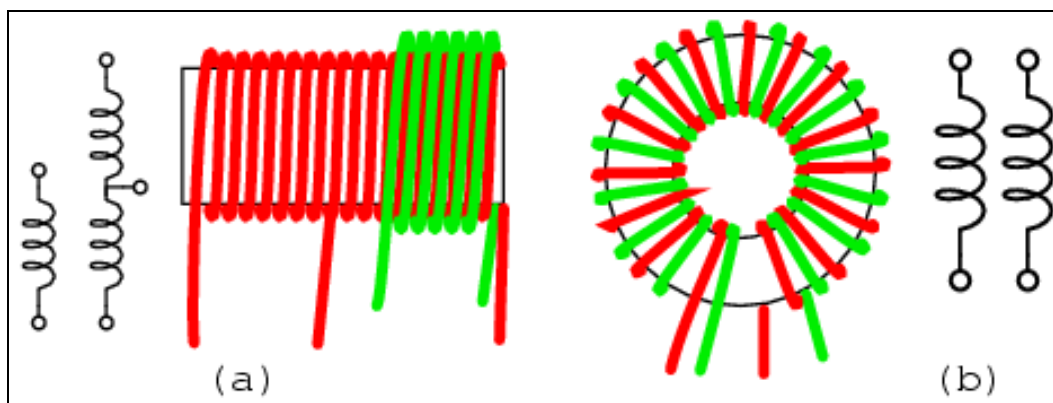
### Πυρήνας σιδήρου από ελάσματα



Σχήμα 2.5: Δινορρεύματα μέσα σε ένα τμήμα μαγνητικού πυρήνα

## 2.6 Μετασχηματιστές χωρίς πυρήνα

Ο μετασχηματιστής χωρίς πυρήνα είναι ένα είδος ειδικού μετασχηματιστή που χρησιμοποιείται σε κυκλώματα ραδιοσυχνοτήτων. Όπως και το όνομά του ο μετασχηματιστής αυτός έχει τα τυλίγματα του τυλιγμένα σε μια μη μαγνητική μορφή, συνήθως σε ένα κοίλο σωλήνα κάποιου υλικού (Σχήμα 2.6). Ο βαθμός της ζεύξης (αμοιβαία επαγωγή) μεταξύ των τυλιγμάτων σε ένα τέτοιο μετασχηματιστή είναι πολλές φορές μικρότερη από εκείνη του ισοδύναμου μετασχηματιστή σιδηροπυρήνα, αλλά τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά ενός σιδηρομαγνητικού πυρήνα (απώλειες ρευμάτων Φουκώ, υστέρηση, κορεσμός, κλπ.) έχουν εξαλειφθεί πλήρως. Στις εφαρμογές με υψηλή συχνότητα οι επιπτώσεις στους μετασχηματιστές με σιδηροπυρήνα είναι πολύ υψηλές.



Σχήμα 2.6

Το εσωτερικό τύλιγμα (Σχήμα 2.6 α) χωρίς το εξωτερικό τύλιγμα θα μπορούσε να αντιστοιχίσει “ανόμοιες” επαγωγές όταν η μόνωση για DC τάση δεν απαιτείται. Όταν η μόνωση απαιτείται, το εξωτερικό τύλιγμα συνδέεται σε σειρά με το εσωτερικό τύλιγμα. Οι μετασχηματιστές χωρίς πυρήνα χρησιμοποιούνται σε ραδιοφωνικές συχνότητες όταν οι απώλειες από σιδηροπυρήνες είναι πολύ υψηλές. Συνήθως ο μετασχηματιστής χωρίς πυρήνα συνδέεται παράλληλα με έναν πυκνωτή για την ρύθμιση της απόκρισης. Το εξωτερικό τύλιγμα συνδέεται σε μια κεραία ραδιοφώνου και τη Γή (για μια εφαρμογή σαν και αυτή). Το δευτερεύον συντονίζεται στην απόκριση με μεταβλητό πυκνωτή. Η έξοδος μπορεί να παρθεί από το σημείο όπου γίνεται ενίσχυση ή η ανίχνευση. Μεγέθους χιλιοστών μετασχηματιστές χωρίς πυρήνα, χρησιμοποιούνται σε δέκτες ραδιοφώνου. Ο μεγαλύτερος ραδιοφωνικός εκπομπός φτάνει να χρησιμοποιεί πηνία του ενός μέτρου. Μη θωρακισμένοι μετασχηματιστές χωρίς πυρήνα κατασκευάζονται και τοποθετούνται σε κατάλληλες γωνίες μεταξύ τους έτσι ώστε να μπορούν να αποτρέπουν τυχαίες ζεύξεις.



Μετασχηματιστής χωρίς πυρήνα

Οι τυχαίες συζεύξεις ελαχιστοποιούνται όταν ο μετασχηματιστής έχει τοτροειδή μορφή. Οι τυροειδές μετασχηματιστές χωρίς πυρήνα έχουν υψηλότερο βαθμό ζεύξης, πιο συγκεκριμένα για τύλιγμα δύο παράλληλων αγωγών (bifilar winding). Αυτά τα τυλίγματα αποτελούνται από ένα ζεύγος ελαφρά συνεστραμμένων καλωδίων. Αυτό συνεπάγεται ένας λόγος μετασχηματισμού 1:1. Τρία ή τέσσερα καλώδια μπορούν να ομαδοποιηθούν για λόγους μετασχηματισμού 1:2 κλπ. Τα τυλίγματα δεν χρειάζεται να είναι δύο παράλληλων αγωγών. Αυτό επιτρέπει έναν αυθαίρετο λόγο μετασχηματισμού. Παρόλα αυτά ο βαθμός της ζεύξης “υποφέρει”. Ο τοροειδής χωρίς πυρήνα μετασχηματιστής είναι σπάνιος εκτός των εφαρμογών υψηλής συχνότητας (VHF). Υλικά πυρήνα εκτός του αέρα όπως σίδηρος, ή φερριτής προτιμούνται στις εφαρμογές με χαμηλή συχνότητα.

## 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ ΠΗΝΙΟΥ TESLA

### 3.1 Κυκλώματα RLC και συντονισμός

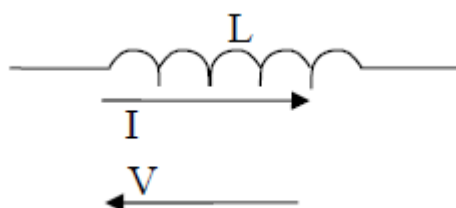
#### 3.1.1 Αυτεπαγωγή

Το πηνίο είναι ένα από τα κύρια εξαρτήματα των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Πρόκειται για ένα συρμάτινο τύλιγμα (Σχήμα 2.2) που έχει την ιδιότητα να αναπτύσσει μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του όταν διαρρέεται από ρεύμα. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του πηνίου όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα δίνεται από την σχέση :

$$B = \mu_0 I \frac{n}{l},$$

όπου  $n$  ο αριθμός των σπειρών του πηνίου,  $l$  το μήκος του πηνίου,  $I$  το ρεύμα που το διαρρέει και  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Οι ιδιότητες των πηνίων και το φαινόμενο της αυτεπαγωγής μελετήθηκαν από τον Αμερικανό φυσικό Τζόζεφ Χένρι το 1823.

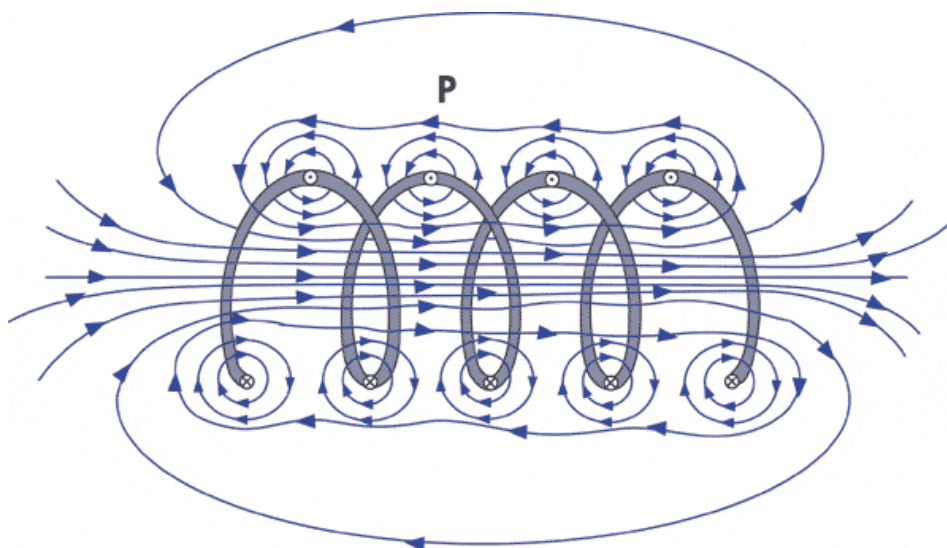
Το πηνίο μπορεί να είναι κενό εσωτερικά ή να περιέχει κάποιον πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό. Χαρακτηριστικό μέγεθος του πηνίου είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής που συμβολίζεται με  $L$  και μετρείται σε Henry προς τιμήν του Αμερικανού φυσικού Joseph Henry που μελέτησε το φαινόμενο της αυτεπαγωγής και τα πηνία.



Σχήμα 2.2 Ηλεκτρικό σύμβολο πηνίου

Το πηνίο χρησιμοποιείται στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές του εκμεταλλεύομενο την ιδιότητα του να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μαγνητική και το αντίθετο. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιείται στις ηλεκτρικές γεννήτριες, στους ηλεκτροκινητήρες, στους μετασχηματιστές, στα εξαρτήματα ρελέ, σε ηλεκτρομαγνήτες, και ακόμα σε χρονοκυκλώματα, σε φίλτρα και σε ταλαντωτές.

Το πηνίο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που εκμεταλλεύονται το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής λόγω της ιδιότητάς του να αναπτύσσει εντονότερη μαγνητική ροή στο εσωτερικό (Σχήμα 2.2.1) του σε σχέση με έναν απλό βρόγχο. Το πηνίο λόγω σχήματος περιλαμβάνει πολλούς βρόγχους σε σειρά με αποτέλεσμα η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του να είναι πολλαπλή σε σχέση με έναν απλό βρόγχο.



Σχήμα 2.2.1 Μαγνητική ροή πηνίου

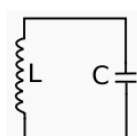
Η χρήση του πηνίου σε χρονοκυκλώματα είναι αποτέλεσμα του κανόνα του Λεντς σύμφωνα με τον οποίο το πηνίο δεν αποκτά ακαριαία μέγιστο ρεύμα όταν συνδεθεί με μία πηγή. Αυτό συμβαίνει γιατί αναπτύσσεται αρχικά τάση από αυτεπαγωγή στα άκρα του, αντίθετη με την φορά της τάσης της πηγής. Αντίστοιχα κατά την εκφόρτιση αναπτύσσει τάση λόγω αυτεπαγωγής και εμποδίζει το ρεύμα του κυκλώματος να μηδενιστεί ακαριαία όταν το κύκλωμα αποσυνδέεται από την πηγή.

Η χρήση του πηνίου ως ηλεκτρονικού φίλτρου οφείλεται στο γεγονός ότι είναι εντελώς αγωγίμο για το συνεχές ρεύμα, ενώ παρουσιάζει σύνθετη αντίσταση στο εναλλασσόμενο που αυξάνει όσο αυξάνεται η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος. Επομένως το πηνίο επιτρέπει την διέλευση των συνεχών ρευμάτων και των ρευμάτων χαμηλών συχνοτήτων αλλά αποκόπτει τα ρεύματα πολύ υψηλών συχνοτήτων.

Το πηνίο επίσης χρησιμοποιείται σε κυκλώματα που παράγουν ημιτονικές κυματομορφές (αρμονικά σήματα) τα οποία είναι γνωστά ως ταλαντωτές και είναι εξαιρετικά χρήσιμα στις εφαρμογές ραδιοεκπομπών. Όταν το πηνίο είναι συνδεδεμένο σε σειρά με έναν φορτισμένο πυκνωτή μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια του πυκνωτή σε μαγνητική ενέργεια στο εσωτερικό του, η οποία μετατρέπεται λόγω αυτεπαγωγής ξανά σε ηλεκτρική του πυκνωτή. Έτσι στο κύκλωμα αυτό δημιουργείται ένα αρμονικό εναλλασσόμενο ρεύμα. Η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος που δημιουργείται δίνεται από την σχέση :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Το κύκλωμα αυτό συνδυασμένο με μία βαθμίδα ενίσχυσης δημιουργεί την διάταξη του ταλαντωτή. (Σχήμα 2.2.2)



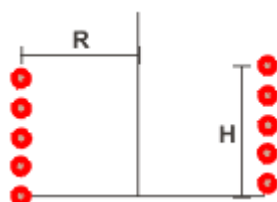
Σχήμα 2.2.2 Κύκλωμα LC

### 3.1.2 Ελικοειδής επαγωγή

Όταν ένα πηνίο είναι τυλιγμένο με ελικοειδές φορά γύρω από ένα κυλινδρικό σχήμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.1.1, ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής δίνεται από τον τύπο :

$$L(\mu h) = \frac{R^2 N^2}{9R + 10H}$$

Όπου : L = η αυτεπαγωγή του πηνίου σε μh  
 R = η ακτίνα του πηνίου ίντσες  
 N = ο αριθμός των σπειρών του πηνίου  
 H = το ύψος του τυλίγματος του πηνίου σε ίντσες



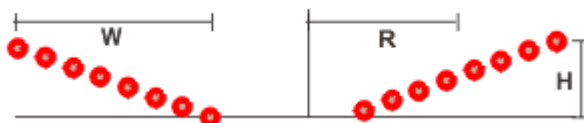
Σχήμα 2.2.1.1

### 3.1.3 Σπειροειδής επαγωγή

Όταν ένα πηνίο είναι τυλιγμένο σε σπειροειδές σχήμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.2.1, ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής δίνεται από τον τύπο :

$$L(\mu h) = \frac{R^2 N^2}{8R + 11W}$$

Όπου : L = η αυτεπαγωγή του πηνίου σε μh  
 R = η ακτίνα του πηνίου ίντσες  
 W = το πλάτος του τυλίγματος σε ίντσες  
 N = ο αριθμός των σπειρών του πηνίου  
 Η γωνία κλίσης του πηνίου πρέπει να είναι πάντα α=45 μοίρες



Σχήμα 2.2.2.1



### 3.1.4 Επίπεδη επαγωγή

Όταν ένα πηνίο είναι τυλιγμένο επίπεδα με την επιφάνεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.1.1, ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής δίνεται από τον τύπο :

$$L(\mu h) = \frac{(RN)^2}{8R + 11H}$$

Όπου : L = η αυτεπαγωγή του πηνίου σε μh

R = η ακτίνα του πηνίου ίντσες

N = ο αριθμός των σπειρών του πηνίου

H = το ύψος του τυλίγματος του πηνίου σε ίντσες



Σχήμα 2.2.3.1

### 3.1.5 Αμοιβαία επαγωγιμότητα

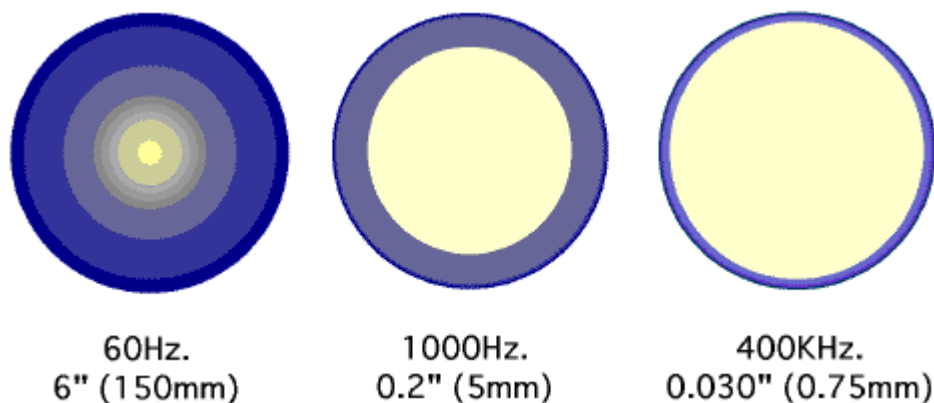
Η κοινή επαγωγιμότητα (M) επηρεάζεται από την εγγύτητα ζεύξης του πρωτεύοντος τυλίγματος στο δευτερεύον και από την γεωμετρία τους. Για παράδειγμα ένα τύλιγμα πρωτεύοντος ελικοειδής μορφής θα έχει υψηλότερη κοινή επαγωγιμότητα από ένα τύλιγμα επίπεδης μορφής για τον ίδιο αριθμό στροφών και διαμέτρου καλωδίου. Καθώς η μαγνητική ροή (B) του πρωτεύοντος επάγει το μαγνητικό πεδίο, η δύναμη του μαγνητικού πεδίου (H) στο δευτερεύον θα έχει υψηλότερη πυκνότητα όσο πλησιάζει το πρωτεύον και όσο πιο κάθετο είναι το πεδίο στο τύλιγμα. Εάν φανταστούμε δύο τυλίγματα ελικοειδούς μορφής να βρίσκονται τυλιγμένα περιμετρικά σε ένα δευτερεύον διαμέτρου 3 ίντσών. Το ένα πρωτεύον έχει εξωτερική διάμετρο 12 ίντσες και το άλλο 6 ίντσες. Το 6 ίντσών πρωτεύον θα έχει μεγαλύτερο (M) και μεγαλύτερο συντελεστή ζεύξης (K) με το δευτερεύον. Καθώς το ύψος του πρωτεύοντος αυξάνεται οι συντελεστές (M) και (K) αυξάνονται.

Καμία ρύθμιση δεν χρειάζεται για τους υπολογισμούς για το διαφορετικής γεωμετρικής μορφής πρωτεύοντος επίπεδης μορφής καθώς οι υπολογισμοί συμφωνούν με τις μετρούμενες τιμές των πηνίων εν λειτουργία. Τα υπολογισμένα (K) και (M) μπορούν να είναι ή θετικά ή αρνητικά στη τιμή.

### 3.1.6 Επιδερμικό φαινόμενο σε επαγωγές

Στις υψηλές συχνότητες λόγω χωρητικότητας και επαγωγής προκαλούνται μεταβολές στη συμπεριφορά ενός αντιστάτη. Η αύξηση της συχνότητας του ρεύματος σε έναν αγωγό αυξάνει συγχρόνως την πυκνότητα του ρεύματος στις περιφερειακές στοιβάδες κοντά στην επιφάνεια του αγωγού (Σχήμα 3.1.6.1 και 3.1.6.2). Αυτό είναι το λεγόμενο επιδερμικό φαινόμενο ,που προκαλείται από τις παραγόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις (emfs) με την δίοδο του

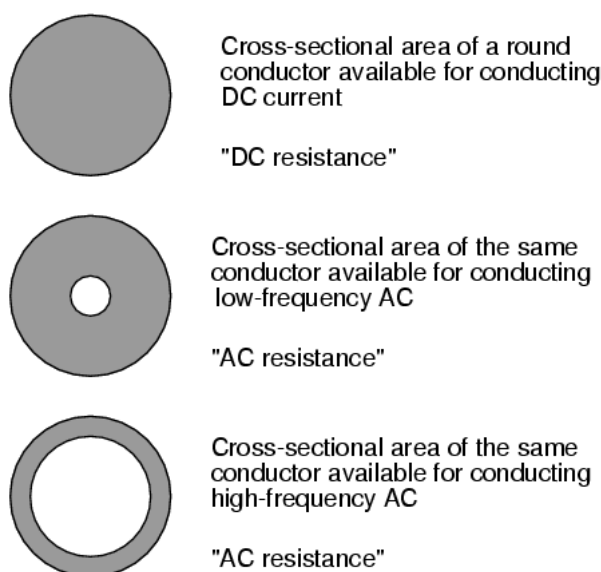
εναλλασσομένου ρεύματος. Οι τελευταίες είναι μεγαλύτερες στο κέντρο από την περιφέρεια και για αυτό τείνουν να αποκαταστήσουν ρεύματα στην περιφέρεια και να μειώσουν την ενεργό διατομή του αγωγού. Για τον παραπάνω λόγο ,στους αντιστάτες περιελίξεως σύρματος ,η ωμική αντίσταση αυξάνει με την αύξηση της συχνότητας του ρεύματος , ενώ αντίθετα στους αντιστάτες άνθρακα ή μεταλλικής ταινίας, όπου δεν εμφανίζεται το επιδερμικό φαινόμενο, η τιμή της αντιστάσεως μειώνεται.



Σχήμα 3.1.6.1

Η πραγματική αντίσταση ενός αγωγού είναι πάντα υψηλότερη στο εναλλασσόμενο ρεύμα απ' ότι στο συνεχές. Η εναλλασσόμενη μαγνητική ροή που δημιουργείται από το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό, αλληλεπιδρά με τον ίδιο τον αγωγό, παράγοντας ένα αντίστροφο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο αντιστέκεται στην διέλευση του ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ρεύμα να μην μπορεί να εκμεταλλευτεί όλη την ωφέλιμη διατομή του αγωγού για την διέλευσή του, αλλά ένα μικρό μόνο μέρος στην εξωτερική επιφάνεια.

Η προκύπτουσα ανομοιόμορφη πυκνότητα ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση της πραγματικής αντίστασης του αγωγού και κατά συνέπεια των απωλειών. Η παρουσία αρμονικών ρεύματος επιδεινώνει το επιδερμικό φαινόμενο. Οι τυπικές απώλειες επιδερμικού φαινομένου σαν ποσοστό της συνολικής απαιτούμενης ισχύος είναι : 2% έως 8%.



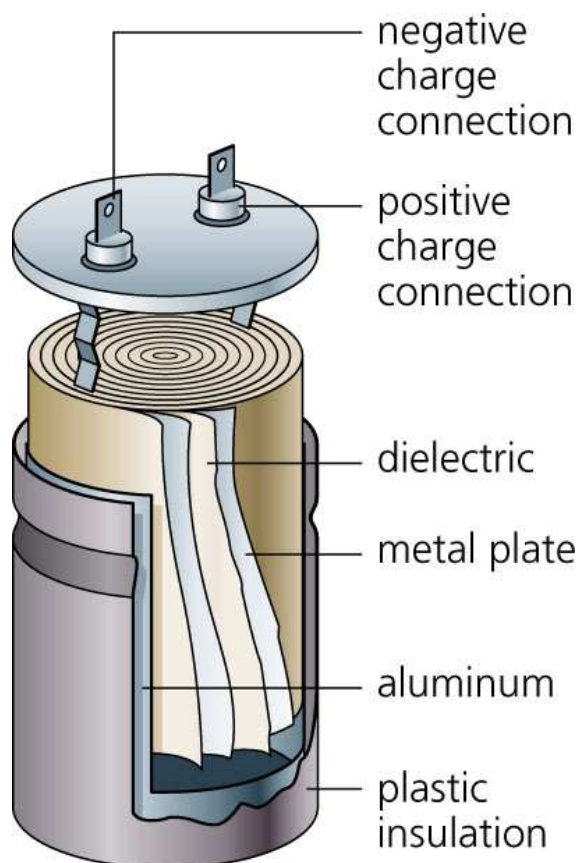
Σχήμα 3.1.6.2

### 3.1.7 Σκέδαση

Η κοινή επαγωγιμότητα είναι ο βαθμός ζεύξης του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου. Η διαρροή επαγωγιμότητας “ενώνει” την ενέργεια του πρωτεύοντος με το δευτερεύον πηνίο. Εφόσον όλη η ενέργεια πρέπει να υπολογιστεί η ενέργεια που δεν μεταφέρεται στο δευτερεύον διαχέεται στη διαρροή επαγωγιμότητας.

### 3.1.8 Πυκνωτές

Πυκνωτής ονομάζεται η διάταξη εκείνη που αποτελείται από δύο αγώγιμες πλάκες οι οποίες χωρίζονται μεταξύ τους από κάποιο μονωτικό υλικό (Σχήμα 3.1.8). Οι αγώγιμες πλάκες ονομάζονται οπλισμοί και το μονωτικό υλικό ονομάζεται διηλεκτρικό. Ο πυκνωτής έχει την ιδιότητα να συγκρατεί στους οπλισμούς του ηλεκτρικό φορτίο, όταν εφαρμοστεί μια τάση στα άκρα του. Η ποσότητα του φορτίου που μπορεί να συγκρατήσει ο πυκνωτής εξαρτάται από την επιφάνεια των οπλισμών του και την απόσταση μεταξύ των οπλισμών.



Σχήμα 3.1.8 (Εσωτερική διάταξη πυκνωτή)

Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια των οπλισμών και όσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ τους, τόσο μεγαλύτερο φορτίο μπορεί να συγκρατήσει. Το είδος του διηλεκτρικού υλικού παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στην συγκράτηση του φορτίου που εκφράζεται με τον όρο χωρητικότητα. Άρα λοιπόν η ικανότητα ενός πυκνωτή να αποθηκεύει ενέργεια ονομάζεται χωρητικότητα. Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή συμβολίζεται με το γράμμα C και μονάδα μέτρησής της είναι το Farad.

Επειδή το Farad (F), είναι μεγάλη χωρητικότητα στους πυκνωτές χρησιμοποιούνται υποδιαίρεσεις του Farad όπως βλέπουμε παρακάτω:

$1F=1000mF$ ,  $1mF=1000\mu F$ ,  $1\mu F=1000nF$ ,  $1nF=1000pF$ .



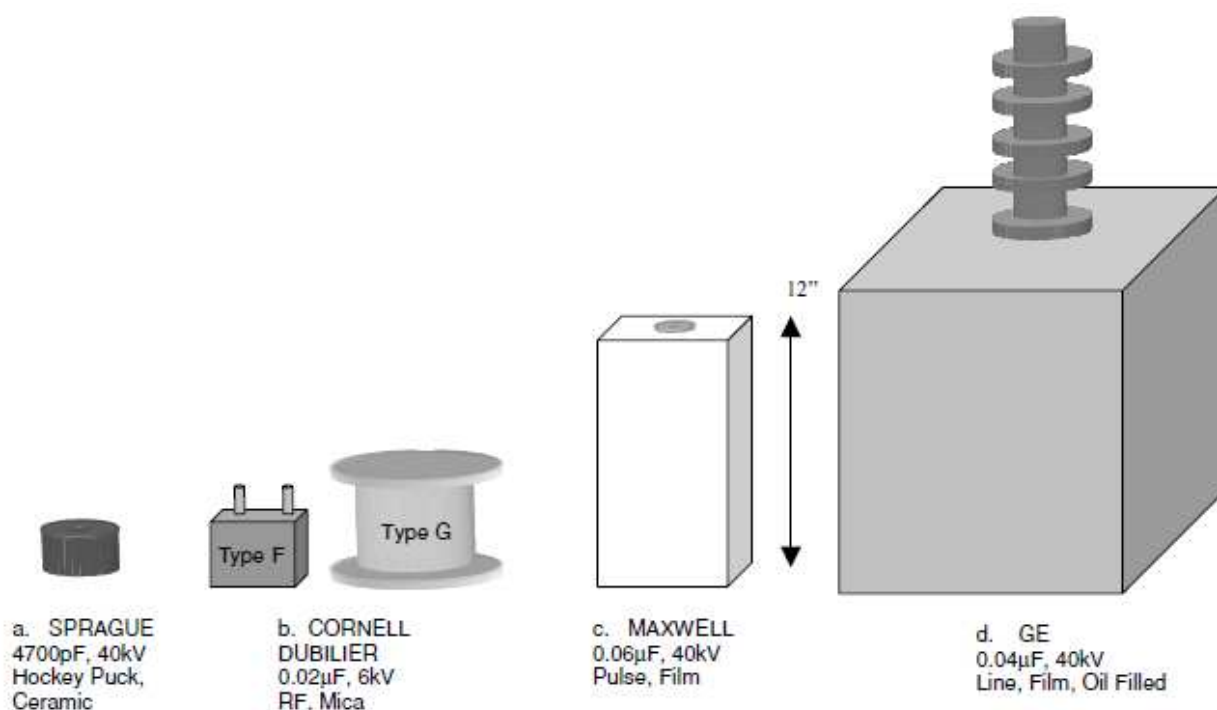
Διάφορα είδη πυκνωτών

### 3.1.9 Πυκνωτές για πηνία Tesla

Υπάρχουν πολλά χαρακτηριστικά που πρέπει να προσδιορίσει κάποιος όταν θέλει να χρησιμοποιήσει ένα πυκνωτή υψηλής τάσης σε πηνία Tesla. Στο εμπόριο υπάρχουν πολλοί νέοι πυκνωτές καινούργιας τεχνολογίας όπως είναι οι

- α) ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές
- β) πλαστικοί πυκνωτές
- γ) κεραμικοί πυκνωτές πολλαπλών στρωμάτων
- δ) μεταβλητοί πυκνωτές
- ε) υπερπυκνωτές
- στ) Varactors
- ζ) πυκνωτές τανταλίου
- η) πυκνωτές φιλμ

Στο παρακάτω σχήμα 3.1.9 παρουσιάζονται μερικοί τύποι πυκνωτών που χρησιμοποιούνται σε πηνία Tesla.

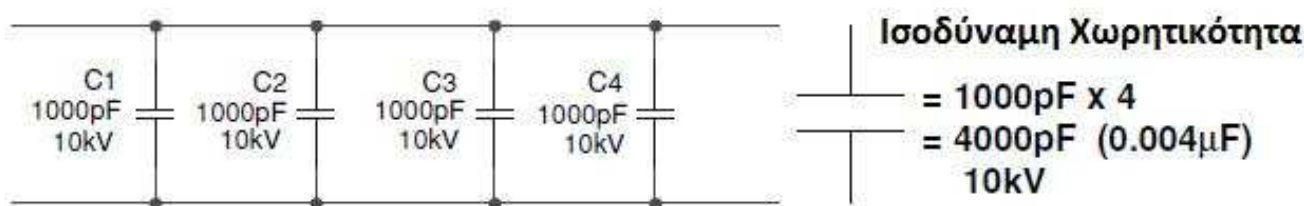


Σχήμα 3.1.9

### 3.1.10 Αύξηση της χωρητικότητας και της διηλεκτρικής ανοχής

Μπορούμε να συνδέσουμε πολλούς πυκνωτές σε σειρά, παράλληλα ακόμα και σε σειρά παράλληλα για να αυξήσουμε την χωρητικότητα και την ανοχή στην τάση

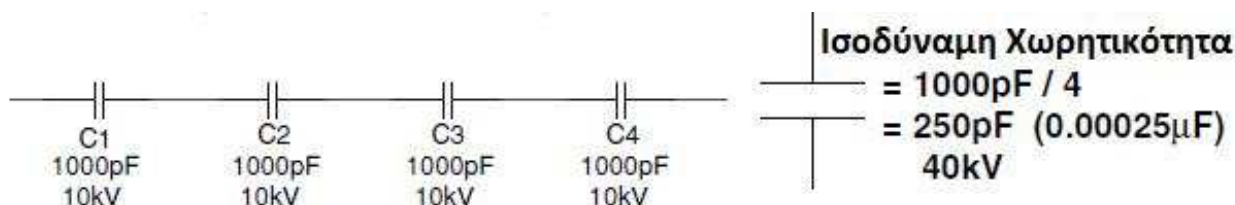
#### α) Αύξηση της χωρητικότητας



$$C_{ολ} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 1000\text{pF} + 1000\text{pF} + 1000\text{pF} + 1000\text{pF} = 4000\text{pF} \text{ ή } 0.004\mu\text{F}$$

Η διηλεκτρική ανοχή παραμένει ίδια στα 10kV

#### β) Αύξηση της ανοχής στην τάση

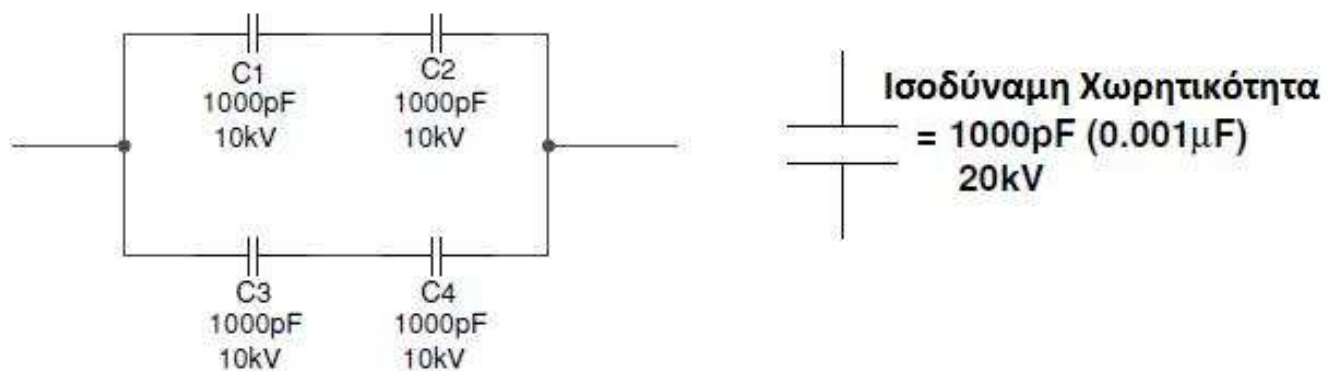


$$C_{ολ} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}} = \frac{1}{\frac{1}{1000pF} + \frac{1}{1000pF} + \frac{1}{1000pF} + \frac{1}{1000pF}}$$

$$= 250pF \text{ ή } 0.00025\mu F$$

Η ανοχή στην τάση προστίθεται και γίνεται 40kV

γ) Αύξηση της χωρητικότητας και της ανοχής στην τάση



$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = 500pF, 20kV$$

$$C_{34} = \frac{1}{\frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}} = 500pF, 20kV$$

$$C_{ολ} = C_{12} + C_{34} = 1000pF, 20kV$$

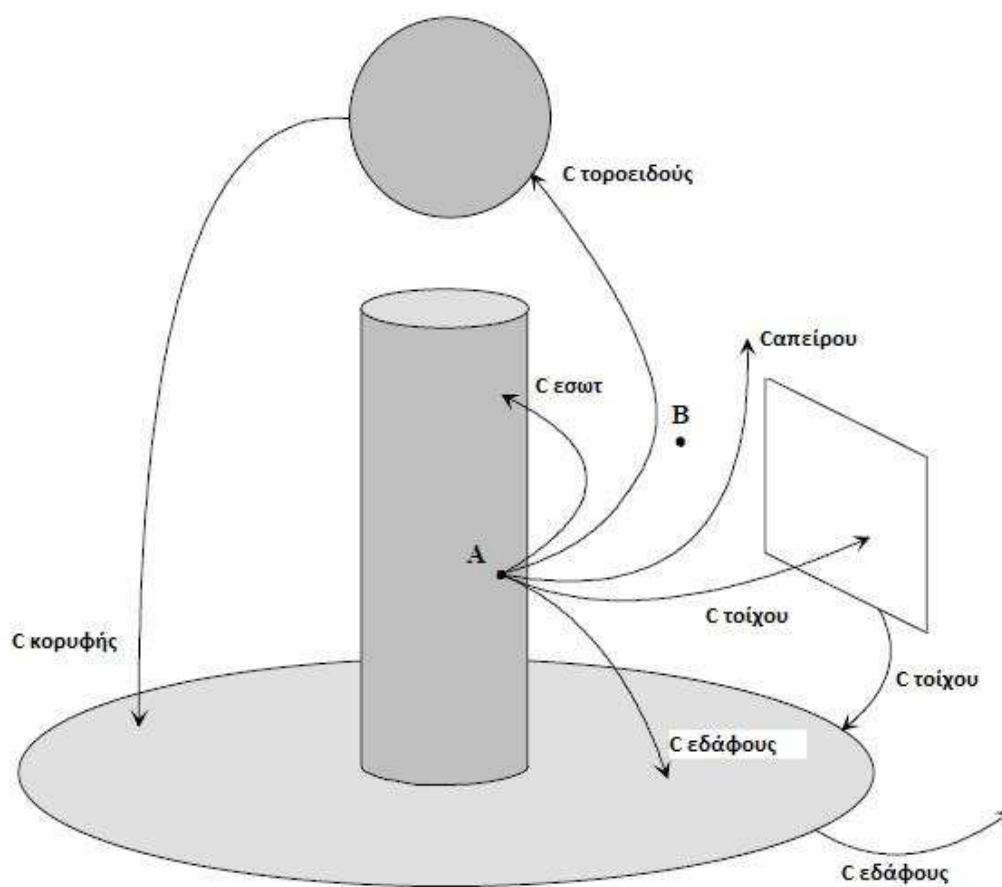
### 3.1.11 Παρασιτικές χωρητικότητες

Πέρα από την καθορισμένη χωρητικότητα που παρουσιάζουν τα πηνία οι πυκνωτές και το τοροειδές της διάταξης, την οποία μπορούμε να την υπολογίσουμε από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στοιχείων, υπάρχει και η παρασιτική χωρητικότητα την οποία είναι δύσκολο να την υπολογίσουμε. (Σχήμα 3.1.11)

Παρασιτική χωρητικότητα μπορεί να δημιουργηθεί :

- α) μεταξύ του τοροειδούς και γης κάτω από το δευτερεύον πηνίο
- β) μεταξύ του τοροειδούς και δευτερεύοντος πηνίου
- γ) πάνω στο δευτερεύον πηνίο

- δ) μεταξύ δευτερεύοντος πηνίου και γης  
 ε) μεταξύ δευτερεύοντος πηνίου και αέρα  
 στ) μεταξύ δευτερεύοντος πηνίου και κάποιου υλικού που βρίσκεται σε κοντινή ακτίνα με την διάταξη



Σχήμα 3.1.11 Είδη παρασιτικής χωρητικότητας

Η παρασιτική χωρητικότητα επηρεάζει αρνητικά την διάταξη αφού αλλάζει την συχνότητα συντονισμού που έχουμε υπολογίσει με αποτέλεσμα το σύστημά μας να χάνει την απόδοσή του.

Κάποιες λύσεις που μπορούμε να προτείνουμε για να μειώσουμε την παρασιτική χωρητικότητα είναι α) να μεγαλώσουμε την απόσταση του τοροειδούς από την γη και κατά συνέπεια από το δευτερεύον πηνίο και β) αντί για τοροειδές μπορούμε να τοποθετήσουμε μια σφαίρα για τερματικό η οποία με το γεωμετρικό σχήμα που έχει μειώνει την παρασιτική χωρητικότητα και αυξάνει το μήκος τόξου διάσπασης.

### 3.1.12 Επίδραση της τοροειδούς χωρητικότητας στην συχνότητα συντονισμού

Αν τοποθετήσουμε μια χωρητικότητα (τοροειδές) στο πάνω μέρος ενός RLC κυκλώματος συντονισμού σε σειρά όπως είναι το δευτερεύον τυλίγμα ενός πηνίου Tesla, η συχνότητα συντονισμού αλλάζει.

Αυτό συμβαίνει γιατί η χωρητικότητα που παρουσιάζει το τοροειδές μαζί με την εσωτερική χωρητικότητα (αυτό-χωρητικότητα) του δευτερεύοντος τυλίγματος δημιουργούν δύο παράλληλες χωρητικότητες. Όταν οι δύο αυτές χωρητικότητες προστεθούν η χωρητικότητα του δευτερεύοντος τυλίγματος αυξάνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται η συχνότητα συντονισμού.

Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της χωρητικότητας του τοροειδούς τόσο πιο μικρή γίνεται η συχνότητα συντονισμού και για να το διορθώσουμε αυτό θα πρέπει να προσθαφαιρέσουμε σπείρες από το πηνίο του πρωτεύοντος τυλίγματος μέχρι η συχνότητα συντονισμού να πάρει την τιμή που έχουμε υπολογίσει.

### 3.1.13 Μέγιστη χωρητικότητα χρησιμοποίησης στο πρωτεύον κύκλωμα με διάκενο διάσπασης

Ο λόγος μετασχηματισμού των Μ/Σ ανύψωσης, τον πρωτεύον τυλίγμα και τα χαρακτηριστικά του διακένου είναι αυτά που καθορίζουν την μέγιστη τιμή του πυκνωτή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά. Ο υπολογισμός της μέγιστης χωρητικότητας χρησιμοποίησης είναι στην ουσία μια βελτιστοποίηση στον σχεδιασμό. Όταν χρησιμοποιείται ένας Μ/Σ περιορισμένου ρεύματος, η rms τιμή του ρεύματος στο πρωτεύον μειώνεται στην ονομαστική τιμή εξόδου Μ/Σ.

Χρησιμοποιώντας έναν πυκνωτή ο οποίος είναι πολύ μικρός δεν θα αξιοποιήσει την μέγιστη ονομαστική έξοδο του ρεύματος και ελαχιστοποιεί την μέγιστη τιμή του ρεύματος στο πρωτεύον. Αυτό σημαίνει επίσης μικρότερες max τιμές ρεύματος και τάσης στο δευτερεύον. Αν χρησιμοποιηθεί ένας πυκνωτής μεγαλύτερης τιμής από την μέγιστη χρησιμοποιούμενη τιμή με ένα Μ/Σ ο οποίος δεν είναι περιορισμένου ρεύματος δεν θα αυξήσει ούτε την τάση στο δευτερεύον ούτε θα ενισχύσει την απόδοση του πηνίου αλλά μπορεί να ρυθμίσει την συχνότητα συντονισμού.

Για τον υπολογισμό για την μέγιστη χωρητικότητα χρησιμοποίησης χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο :

$$C = \frac{1}{BPS} \cdot \frac{I}{V}$$

Όπου :

C= μέγιστη χωρητικότητα χρησιμοποίησης

BPS= (breaks per second) διασπάσει ανά δευτερόλεπτο από το περιστροφικό διάκενο

I= υπολογισμένο ρεύμα πρωτεύοντος

V= τάση εξόδου Μ/Σ ανύψωσης σε kV (rms)



### 3.1.14 Τοροειδές

Το τοροειδές λειτουργεί ως ένας πυκνωτής στο κύκλωμα του δευτερεύοντος κυκλώματος και η μορφή του είναι η προτιμότερη που μπορεί να έχει. Κατά την λειτουργία του πηνίου το τοροειδές φορτίζεται με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο γύρω από την επιφάνειά του.



Σχήμα 3.1.14 Τοροειδές

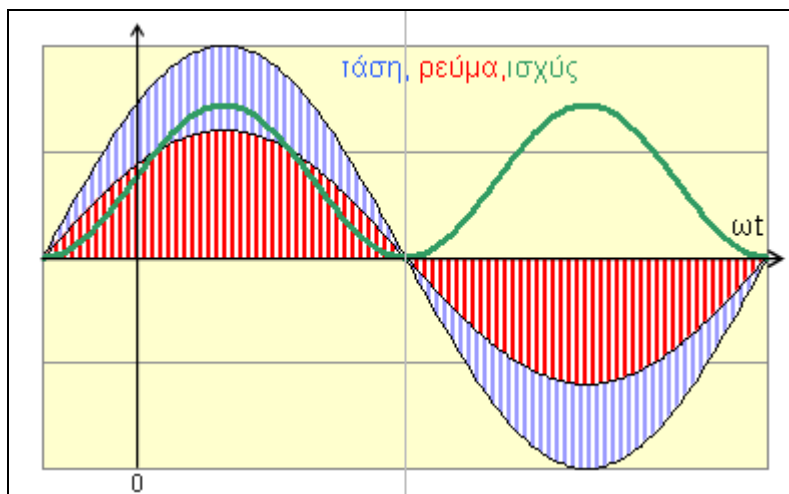
Μία σφαίρα αποκτά καλύτερο ομοιογενές πεδίο γύρω από την επιφάνειά της αλλά αν συμπίεσουμε μια σφαίρα και δημιουργήσουμε ένα τοροειδές (Σχήμα 3.1.14) η ένταση του πεδίου θα αυξηθεί γύρω από τις ακτίνες του τοροειδούς. Όταν η ένταση του πεδίου φτάσει στην μέγιστη τιμή της τότε θα έχουμε την δημιουργία και το ξέσπασμα των τόξων προς τον αέρα. Το όφελος που προκύπτει από την συγκέντρωση των πεδίων γύρω από τις ακτίνες του τοροειδούς είναι ότι βοηθά άμεσα στο ξέσπασμα των τόξων.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος κατασκευής τοροειδούς είναι να τυλίξουμε μια εύκαμπτη αλουμινένια σωλήνα γύρω από ένα κυκλικό κομμάτι αλουμινίου. Στην ουσία ένα τοροειδές μπορεί να κατασκευαστεί από οτιδήποτε έχει ομαλό κυκλικό σχήμα καλυμμένο με αλουμίνιο. Να σημειώσουμε ότι αποφεύγουμε τον ψεκασμό με μεταλλικό χρώμα για το λόγο ότι το χρώμα αυτό δεν περιέχει αρκετό μέταλλο με αποτέλεσμα όταν θέσουμε σε λειτουργία το πηνίο Tesla το τοροειδές να καεί.

Είναι πολύ σημαντικό να τοποθετήσουμε το τοροειδές στο σωστό ύψος πάνω από το δευτερεύον τύλιγμα του πηνίου Tesla. Αν το τοροειδές είναι πολύ ψηλά θα παρατηρήσουμε να δημιουργείτε ένα μπλε φως (φαινομενο corona) στην άκρη του δευτερεύοντος τυλίγματος ενώ μπορεί να ξεσπούν και μερικά τόξα από το ίδιο σημείο. Αν το τοροειδές είναι πολύ χαμηλά τότε υπάρχει ο κίνδυνος τα τόξα να χτυπήσουν το πρωτεύον τύλιγμα και να δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα στη διάταξη.

### 3.2 Συντονισμός κυκλωμάτων RLC

Το φαινόμενο συντονισμός μπορεί απλά να περιγραφεί σαν τη συνθήκη που υπάρχει σε οποιοδήποτε φυσικό σύστημα, όταν μια ημιτονοειδής συνάρτηση εξαναγκασμού σταθερού πλάτους, παράγει απόκριση μέγιστου πλάτους. Εντούτοις, συχνά λέμε ότι συμβαίνει συντονισμός ακόμα και όταν η συνάρτηση εξαναγκασμού δεν είναι ημιτονοειδής. Το σύστημα συντονισμού μπορεί να είναι ηλεκτρικό, μηχανικό, υδραυλικό, ακουστικό ή κάποιας άλλης μορφής.



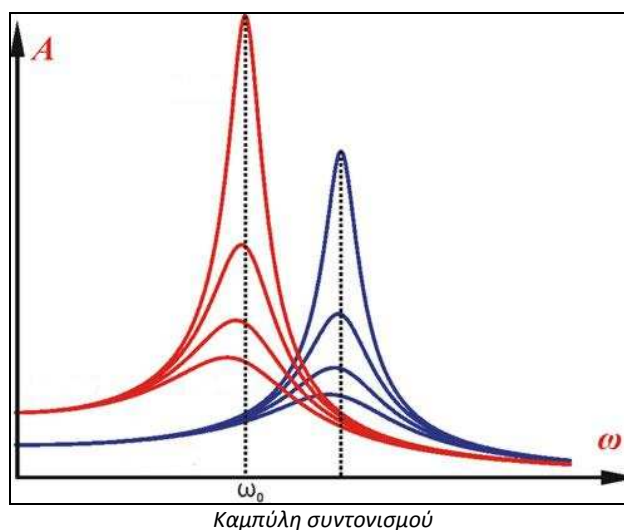
Ημιτονοειδής συναρτήσεις τάσεως, ρεύματος και ισχύος

Ποιό συγκεκριμένα συντονισμός είναι μια ειδική κατάσταση λειτουργίας των παθητικών, αμπίδρομων, γραμμικών κυκλωμάτων που διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Είναι γνωστό ότι η επαγωγική και χωρητική αντίδραση έχουν αντίθετο πρόσημο και ότι οι τιμές των αντιδράσεων αυτών εξαρτώνται από τη συχνότητα  $F$  του δικτύου. Συνεπάγεται λοιπόν ότι το φανταστικό μέρος της  $Z$ , μηδενίζεται σε μια τουλάχιστον τιμή της συχνότητας, όταν δηλαδή  $X_L = X_C$ . Όταν το φανταστικό μέρος της  $Z$  είναι μηδέν, η  $Z$  έχει μόνο πραγματικό μέρος και συμπεριφέρεται σαν μια καθαρή ωμική αντίσταση.

Η συχνότητα αυτή ονομάζεται συχνότητα συντονισμού  $f_0$ , το δε κύκλωμα βρίσκεται σε συντονισμό ή είναι ένα συντονισμένο κύκλωμα. Ένα συντονισμένο κύκλωμα έχει τις εξής ιδιότητες:

- Τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος του κυκλώματος είναι συμφασικά
- Η  $Z$  του κυκλώματος είναι μια καθαρή ωμική αντίσταση
- Ανάλογα με την μορφή του κυκλώματος η  $Z$  ή  $Y$  είναι μέγιστη όταν το  $F = F_0$ .
- Καθώς η συχνότητα αποκλίνει από την  $f_0$  η  $Z$  ή η  $Y$  αυξάνει με γρήγορο ρυθμό.
- Επειδή η  $Z$  ή η  $Y$  είναι μέγιστη στο συντονισμό, προκύπτει ότι και το ρεύμα  $I$  είναι αντίστοιχα μέγιστο ή ελάχιστο.

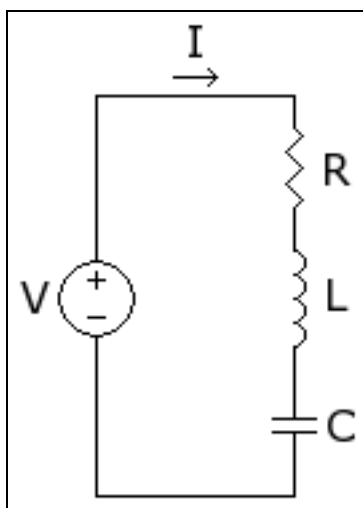
Τέλος η μέση ισχύς του κυκλώματος είναι μέγιστη ή ελάχιστη στο συντονισμό. Η ισχύς αυτή συμβολίζεται με  $P_0$ . Είναι αυτονόητο ότι επειδή το  $Z_0 = R$ , η άεργη ισχύς του κυκλώματος στο συντονισμό είναι μηδέν.



Τα απλά ηλεκτρικά κυκλώματα συντονίζονται σε μία μόνο συχνότητα. Τέτοια κυκλώματα είναι το κύκλωμα RLC σε σειρά και το κύκλωμα RLC εν παράλληλο. Τα κυκλώματα αυτά παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή αποτελούν τη βάση της θεωρίας των φίλτρων. Ειδικότερα, το κύκλωμα RLC εν σειρά είναι ένα απλό φίλτρο διέλευσης, το δε RLC εν παραλλήλο ένα φίλτρο αποκοπής.

### 3.2.1 Επίδραση του συντονισμού στα εν σειρά RLC κυκλώματα

Το ρεύμα στο πηνίο και στον πυκνωτή είναι το ίδιο σε κάθε χρονική στιγμή. Η τάση στα άκρα του πηνίου προηγείται του ρεύματος πάντοτε κατά 90 μοίρες, ή κατά ένα τέταρτο του κύκλου, και η τάση στα άκρα του πυκνωτή υστερεί του ρεύματος πάντοτε κατά 90 μοίρες. Επομένως οι στιγμιαίες τιμές της τάσης στα άκρα του L και του C έχουν πάντοτε διαφορά φάσης 180 μοιρών, ή μισού κύκλου και έχουν αντίθετα πρόσημα σε κάθε χρονική στιγμή. Αν τα πλάτη αυτών των δύο τάσεων είναι ίσα τότε αθροίζονται στο μηδέν σε κάθε χρονική στιγμή και η ολική τάση στα άκρα του συνδυασμού L-C είναι ακριβώς μηδέν. Αυτό συμβαίνει μόνο στη συχνότητα συντονισμού. Οι επιμέρους τάσεις στα άκρα του L και του C μπορεί να είναι μεγαλύτερες από την τάση στα άκρα του R, όταν το επιτρέπουν οι αριθμητικές τιμές των R, L και C. Για συχνότητες κοντά στον συντονισμό οι επιμέρους τάσεις στα άκρα του L και του C μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερες από την τάση της πηγής.



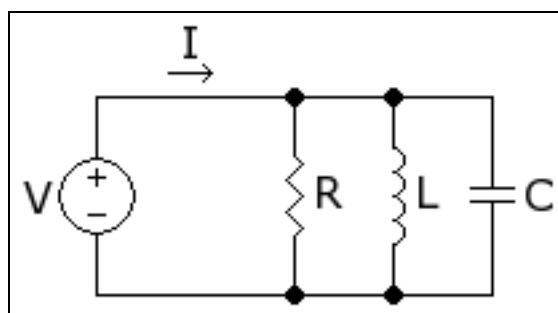
Κύκλωμα RLC σε σειρά

Για συχνότητες χαμηλότερες της συχνότητας συντονισμού, η  $X_C$  είναι μεγαλύτερη από τη  $X_L$ . Η χωρητική άεργη αντίσταση υπερिशύχει, η τάση υστερεί του ρεύματος και η γωνία φάσης  $\phi$  είναι μεταξύ του 0 και του  $-90$ . Για συχνότητες υψηλότερες από αυτές του συντονισμού υπερिशύχει η επαγωγική άεργη αντίσταση, η τάση προηγείται ρεύματος και η γωνία φάσης είναι μεταξύ 0 και  $+90$ .

Αν είμαστε σε θέση να μεταβάλλουμε την επαγωγή  $L$  ή τη χωρητικότητα  $C$  ενός κυκλώματος, μπορούμε να μεταβάλλουμε και την συχνότητα συντονισμού. Με αυτόν τον τρόπο "συντονίζονται" ορισμένοι δέκτες ραδιοφώνου και τηλεοράσεις ώστε να πιάσουν συγκεκριμένους σταθμούς.

### 3.2.2 Επίδραση του συντονισμού στα εν παραλλήλο RLC κυκλώματα

Όταν αντιστάτης, πηνίο και πυκνωτής είναι συνδεδεμένοι παράλληλα, παρουσιάζεται ένα διαφορετικό είδος συντονισμού. Αυτό το κύκλωμα παρουσιάζει συμπεριφορά συντονισμού παρόμοια με αυτή του κυκλώματος RLC εν σειρά που αναλύσαμε παραπάνω, με τους ρόλους όμως της τάσης και του ρεύματος αναστραμμένους. Στην περίπτωση αυτή η στιγμιαία διαφορά δυναμικού είναι ίδια για τα τρία στοιχεία του κυκλώματος και ισούται με την τάση της πηγής, αλλά το ρεύμα στο κάθε στοιχείο του κυκλώματος είναι διαφορετικό.



Κύκλωμα RLC σε σειρά

Το ρεύμα στο πηνίο υστερεί της τάσης κατά  $90$  μοίρες, το ρεύμα στον πυκνωτή προηγείται της τάσης κατά  $90$  μοίρες και η διαφορά φάσης των δύο ρευμάτων είναι  $180$  μοίρες.

### 3.2.3 Προσδιορισμός συχνότητας συντονισμού δυο συντονισμένων κυκλωμάτων με διάκενο διάσπασης.

Ένας συντονισμένος μετασχηματιστής αποτελείται από δύο συντονισμένα RLC κυκλώματα γνωστά ως πρωτεύον και δευτερεύον. Το δευτερεύον κύκλωμα καθορίζει την συχνότητα συντονισμού του πηνίου Tesla. Η μορφή του δευτερεύοντος κυκλώματος είναι ένα RLC κύκλωμα σειράς που διαθέτει αυτεπαγωγή, χωρητικότητα και αντίσταση. Η αντίσταση γενικά αυξάνεται όταν αυξάνεται η συχνότητα συντονισμού εξ' αιτίας της ύπαρξης του επιδερμικού φαινομένου. Εάν χρησιμοποιηθεί η χωρητικότητα του τοροειδούς στην κορυφή του δευτερεύοντος, αυξάνεται η τιμή της τάσης στην οποία γίνεται διάσπαση, αυξάνεται η χωρητικότητα και μειώνεται η συχνότητα συντονισμού στο δευτερεύον τυλίγμα.

Το εν σειρά RLC κύκλωμα καθορίζει την εμπέδηση του δευτερεύοντος η οποία ποικίλει σε ένα επιλεγμένο φάσμα συχνοτήτων. Το δευτερεύον έχει υψηλό Q με αντίστοιχο στενό εύρος ζώνης απόκρισης συχνοτήτων. Η εμπέδηση του δευτερεύοντος έχει χαμηλή τιμή κατά την συχνότητα συντονισμού και αυξάνεται απότομα πάνω και κάτω από το συντονισμό όταν υπάρχει υψηλό Q στο κύκλωμα. Τα αποτελέσματα του υψηλού Q σε μια χαμηλή μείωση και οι ταλαντώσεις που παράγονται στο δευτερεύον διαρκούν περισσότερο σε σχέση με αυτές στο πρωτεύον. Το πρωτεύον κύκλωμα είναι η πηγή της ενέργειας του συντονιζόμενου μετασχηματιστή. Συμπεριφέρεται σαν ένα ξεχωριστό συντονιζόμενο κύκλωμα συνδεδεμένο στο δευτερεύον μέσω μιας αμοιβαίας επαγωγής του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος.

Το πρωτεύον τυλίγμα έχει επίσης αυτεπαγωγή, αυτό-χωρητικότητα και αντίσταση, παρόλα αυτά η αυτό-χωρητικότητα και η αντίσταση του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι αμελητέα εάν έχουμε πολύ μεγαλύτερο πυκνωτή και πολύ μεγαλύτερη αντίσταση διακένου τα οποία υπερिशύουν στο κύκλωμα. Το πρωτεύον κύκλωμα επίσης αποτελεί ένα RLC κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιεί την αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος, τον πυκνωτή και την αντίσταση του διακένου. Η εμπέδηση του πρωτεύοντος RLC κυκλώματος υπερिशύει της αντίστασης του διακένου κατά την διάρκεια του ιονισμού. Η αντίσταση επηρεάζεται από την διακύμανση της τάσης δια μέσου του διακένου, από το υλικό των ηλεκτροδίων, από την απόσταση των ηλεκτροδίων και από την κορυφή του ταλαντευόμενου ρεύματος. Το πρωτεύον έχει χαμηλό Q με ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Τα αποτελέσματα του χαμηλού Q σε μια υψηλή μείωση η οποία γρήγορα μειώνει τις ταλαντώσεις στο πρωτεύον στο όριο απιονισμού του διακένου. Καθώς η μείωση της τιμής αυξάνει, λιγότερα ταλαντευόμενα ρεύματα αναπτύσσονται στο πρωτεύον όταν ο πυκνωτής εκφορτίζει την αποθηκευμένη ενέργεια του. Το πρωτεύον είναι μια αποτελεσματική γεννήτρια ρεύματος μεγάλου εύρους.

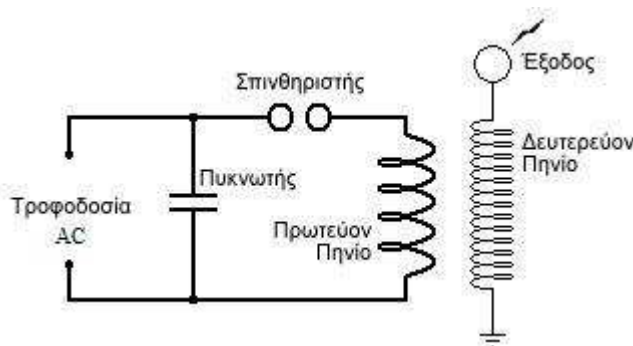
Αρκετό ρεύμα μπορεί να παραχθεί μέσα σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων για να παραχθεί υψηλή τάση στο δευτερεύον παρόλο που οι ταλαντώσεις δεν χρειάζεται να ρυθμιστούν ακριβώς στην συχνότητα συντονισμού του δευτερεύοντος. Παρόλα αυτά ο Tesla ανακάλυψε ότι η αύξηση της τάσης στο δευτερεύον είναι υψηλότερη όταν πρωτεύον και δευτερεύον είναι συντονισμένα στην ίδια συχνότητα. Η σχέση ανάμεσα στο Q και το εύρος είναι:

$$Q = \frac{1}{BW}$$

### 3.3 Θεωρητική ανάλυση ενός πηνίου Tesla

Στη βασική του μορφή, αποτελείται από δύο πηνία, ένα πρωτεύον και ένα δευτερεύον (Σχήμα 1.1.1). Το πρωτεύον πηνίο είναι κατασκευασμένο από λίγες σπείρες αγωγού μεγάλης διατομής και το δευτερεύον από πολλές σπείρες αγωγού μικρής διατομής. Αντίθετα με άλλους μετασχηματιστές, δεν υπάρχει σιδηρομαγνητικός πυρήνας και έτσι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των δύο πηνίων είναι μικρή.

Στο πρωτεύον πηνίο εφαρμόζονται ηλεκτρικοί παλμοί μεγάλης έντασης, μέσω της εκφόρτισης ενός πυκνωτή, που έχει προηγουμένως φορτιστεί σε τάση μερικών kV AC. Η διαδικασία πραγματοποιείται με τη χρήση ενός σπινθηριστή ο οποίος λειτουργεί ως διακόπτης, όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα, που ρυθμίζεται ώστε το διάκενό του να διασπάται μόλις η τάση στα άκρα του πυκνωτή φτάσει σε συγκεκριμένη τιμή.



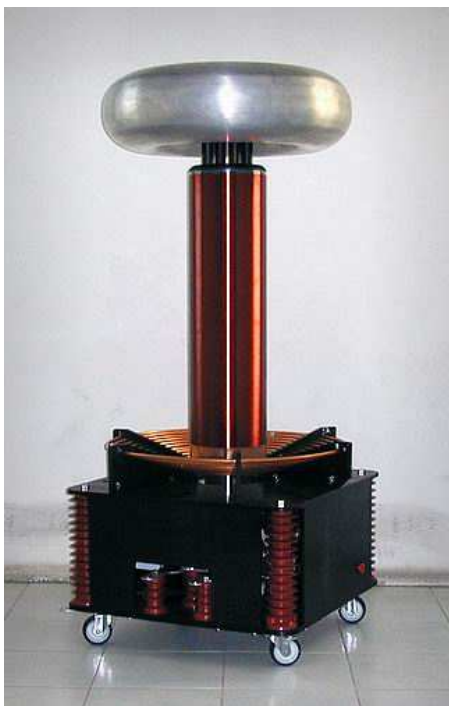
(Σχήμα 1.1.1) Σχηματικό διάγραμμα πηνίου Tesla

Όταν ο σπινθηριστής άγει, ο πυκνωτής και το πρωτεύον πηνίο δημιουργούν ένα κύκλωμα LC, στο οποίο παράγονται ηλεκτρικές ταλαντώσεις σε συγκεκριμένη συχνότητα. Στο δευτερεύον πηνίο, που αποτελεί ένα άλλο κύκλωμα LC, παράγονται επίσης ηλεκτρικές ταλαντώσεις από επαγωγή. Οι συχνότητες ταλάντωσης των δύο πηνίων καθορίζονται από τις κατασκευαστικές παραμέτρους τους. Στα επόμενα κεφάλαια θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στη λειτουργία του κυκλώματος.

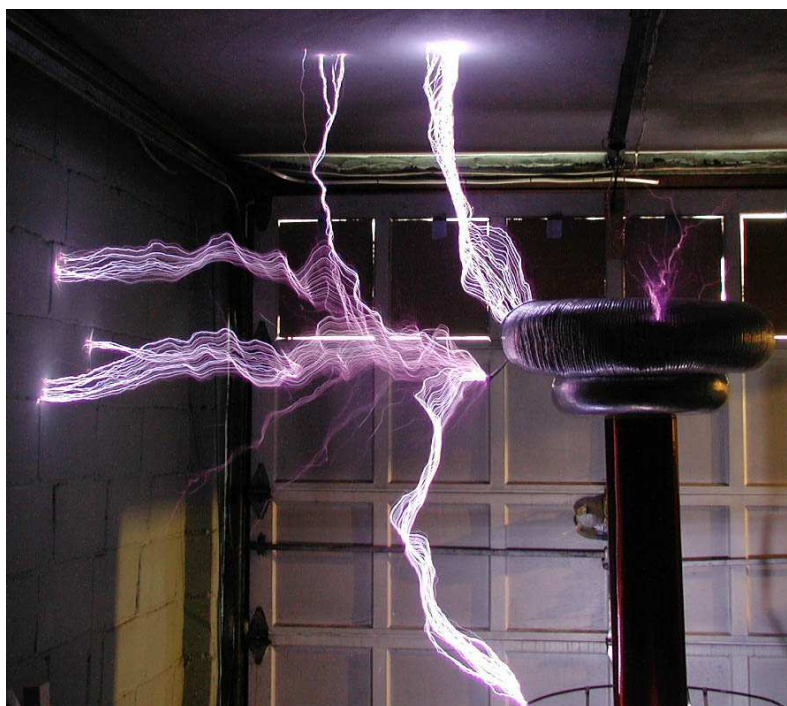
Για τη σωστή λειτουργία του μετασχηματιστή τα δύο κυκλώματα (πρωτεύοντος και δευτερεύοντος) πρέπει να βρίσκονται από μόνα τους και μεταξύ τους σε συντονισμό, δηλαδή οι συχνότητες ταλάντωσης τους να συμπίπτουν. Όταν αυτό συμβεί, τότε το πλάτος της ηλεκτρικής ταλάντωσης στο δευτερεύον πολλαπλασιάζεται και ο μετασχηματιστής παράγει υψηλή τάση στην έξοδό του. Η τάση εξόδου του μετασχηματιστή Tesla μπορεί να φτάσει σε επίπεδα MVolts, ικανή να προκαλέσει εντυπωσιακές ηλεκτρικές εκκενώσεις πολλών μέτρων στο αέρα.

Ο μετασχηματιστής χρησιμοποιήθηκε από τον Tesla για τη παραγωγή και τη μετάδοση ηλεκτρικών ταλαντώσεων με σκοπό τον ασύρματο χειρισμό συσκευών από απόσταση, την ασύρματη επικοινωνία (ραδιοφωνία), καθώς και την ασύρματη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας, στόχους που πραγματοποίησε. Στις αρχές του αιώνα μας, το πηνίο Tesla βρήκε επίσης δημοφιλή χρήση και στην ιατρική. Ο ασθενής υποβαλλόταν σε ρεύματα υψηλής τάσης και υψηλής συχνότητας, που μπορούν να διαπεράσουν ακίνδυνα το ανθρώπινο σώμα και πιστευόταν ότι είχαν

ανακουφιστική και τονωτική επίδραση. Παρόμοιες τεχνικές βρίσκουν εφαρμογή ακόμα και σήμερα όπως είναι η ηλεκτροθεραπεία.



Πηνίο Tesla

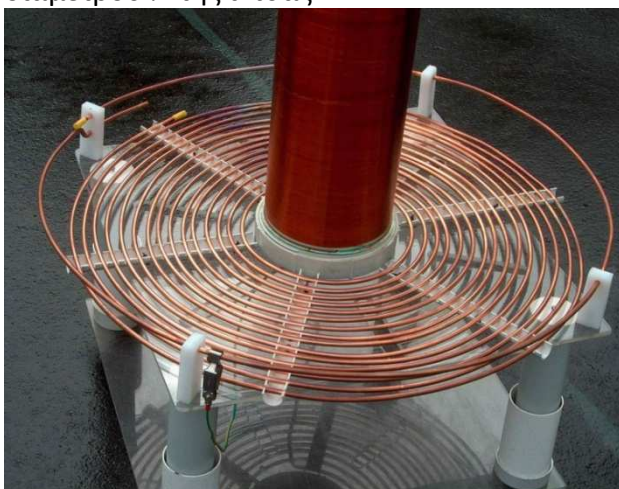


Πηνίο Tesla σε λειτουργία

### 3.3.1 Πρωτεύον τύλιγμα

Ο πρωτεύον τύλιγμα μαζί με τον πυκνωτή και την αντίσταση γραμμής δημιουργούν ένα RLC κύκλωμα σε σειρά. Επίσης είναι υπεύθυνο για την ζεύξη με το δευτερεύον τύλιγμα για την μεταφορά ενέργειας από το πρωτεύον στο δευτερεύον κύκλωμα του πηνίου Tesla.

Συνήθως για να κατασκευάσουμε το πρωτεύον τύλιγμα χρησιμοποιούμε αγωγό χαλκού διαμέτρου  $\frac{1}{4}$  της ίντσας.



Πρωτεύον τύλιγμα επίπεδης μορφής



Πρωτεύον τύλιγμα ελικοειδούς μορφής

Για να αποφύγουμε την δημιουργία τόξων μεταξύ των σπειρών του τυλίγματος η ελάχιστη απόσταση των σπειρών θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το  $\frac{1}{4}$  της ίντσας, ενώ μπορούμε να το τοποθετήσουμε σε βάση κατασκευασμένη από οποιοδήποτε μη αγώγιμο υλικό.

Ο πρωτεύον τυλίγμα έχει συνήθως επίπεδη μορφή, ενώ σε πολλά πηνία Tesla συναντάμε τυλίγματα ελικοειδής και σπειροειδής μορφής. Με την ελικοειδή και σπειροειδή μορφή αυξάνονται οι πιθανότητες το τόξο που παράγει το τοροειδές να χτυπήσει το πρωτεύον τυλίγμα για το λόγο ότι μειώνεται η απόσταση μεταξύ τυλίγματος και τοροειδούς



*Πρωτεύον τυλίγμα σπειροειδούς μορφής*

Όταν το πηνίο Tesla λειτουργεί στην μέγιστη ισχύ του τα τόξα που ξεσπούν από το τοροειδές έχουν ανεξέλεγκτη κατεύθυνση και κυρίως στα πιο αγώγιμα υλικά. Έτσι υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες τα τόξα, ιδίως αν έχουν μεγάλο μήκος, να πέσουν πάνω στον πρωτεύον τυλίγμα με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα. Απαραίτητη λοιπόν, σε μια κατασκευή πηνίου Tesla, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι η τοποθέτηση προστατευτικού δακτυλίου πάνω από το πρωτεύον τυλίγμα γειωμένο σε διαφορετική γείωση από το δευτερεύον τυλίγμα έτσι ώστε το τόξο να πέφτει πρώτα στο δακτύλιο της γείωσης.

Πριν την κατασκευή του πρωτεύοντος τυλίγματος θα πρέπει να γνωρίζουμε τον αριθμό των σπειρών που θα χρειαστούμε για να τελειοποιηθεί το πηνίο, το μήκος των σωληνώσεων ή τα καλώδια που θα χρειαστεί και το μέγεθος της βάσης του τυλίγματος.



### 3.3.2 Υπολογισμός πρωτεύοντος τυλίγματος

Για ένα επίπεδο σπειροειδές πηνίο, η οποία είναι η προτιμώμενη επιλογή, πρέπει να γνωρίζουμε το πλάτος και την απόσταση μεταξύ των αγωγών, τη διάμετρο της εσωτερικής σειράς και τον αριθμό των στροφών για να μπορέσουμε να βρούμε την τιμή της επαγωγής του.

Όταν ένα πηνίο είναι τυλιγμένο επίπεδα με την επιφάνεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.1.1, ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής δίνεται από τον τύπο :

$$L(\mu h) = \frac{(RN)^2}{8R + 11W}$$

Όπου : L = η αυτεπαγωγή του πηνίου σε μh

R = η ακτίνα του πηνίου ίντσες

N = ο αριθμός των σπειρών του πηνίου

W = το πλάτος του τυλίγματος του πηνίου σε ίντσες



*Παράδειγμα:* Έστω ότι η τιμή της επαγωγής του πηνίου είναι 0.019 mH. Η διάμετρος των εσωτερικών σπειρών πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο ίντσες παραπάνω από τη διάμετρο του δευτερεύοντος τυλίγματος, έτσι για δευτερεύον με διάμετρο 6 ίντσες η πρώτη σπείρα θα είναι 8 ίντσες (1 ίντσα κενό δεξιά και αριστερά από την σπείρα). Επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε αγωγό χαλκού 8 χιλιοστών (0,315 ίντσες), με κενό 8 mm (0,315 ίντσες) ανάμεσα από κάθε σπείρα.

Με κενό D1= 8 ίντσες W=0.135 ίντσες , S= 0.135 ίντσες και N=10 παίρνουμε την τιμή L=40.413μH.

Χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές για τις σπείρες (N) τελικά διαπιστώνουμε ότι οι 7 σπείρες μας δίνουν την τιμή L=0.019221mH η οποία τελικά είναι κοντά στην επιθυμητή τιμή μας.

### 3.3.3 Δευτερεύον τύλιγμα

Το δευτερεύον πηνίο βρίσκεται στο κέντρο κάθε πηνίου Tesla. Είναι το ψηλό λεπτό πηνίο ανάμεσα στο πρωτεύον τύλιγμα και το τοροειδές, που αναπτύσσεται πάνω του τάση της τάξης των χιλιάδων ακόμα και εκατομμυρίων βολτ που φυσικά είναι και ο στόχος του πηνίου Tesla (Σχήμα 2.1.5.1).

Λόγω ότι αναπτύσσεται υψηλή τάση και λειτουργεί σε πολύ υψηλές συχνότητες (RF ραδιοσυχνότητες) πρέπει να είναι του σωστού μεγέθους και πολύ καλά μονωμένο.

Η διαρροή υψηλής τάσης μέσα από τη μόνωση μαζί με την διάχυση των ραδιοσυχνότητων ονομάζεται Q του δευτερεύοντος κυκλώματος. Το Q μετράει το πόσες φορές μια ταλάντωση θα περάσει μέσα από το πηνίο πριν αυτή μειωθεί στο ½ της αρχικής της τιμής. Βεβαίως, όσο μεγαλύτερο είναι το Q τόσο λιγότερη ενέργεια θα διαχυθεί από το πηνίο και κατά συνέπεια θα

έχουμε την μέγιστη ενέργεια για την παραγωγή των τόξων. Με την επιλογή καλύτερου διηλεκτρικού αυξάνουμε και την τιμή του Q.



Σχήμα 2.5.1.1 Δευτερεύον πηνίο

#### α) Μορφή Πηνίου

Η μορφή του πηνίου είναι ένας σωλήνας που περιμετρικά του τυλίγεται ο χαλκός. Για να έχουμε την μικρότερη δυνατή διαρροή αντίστασης το, υλικό του σωλήνα πρέπει να είναι πολύ καλό διηλεκτρικό. Τα περισσότερα πλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται για το δευτερεύον πηνίο δεν περιέχουν καθόλου άνθρακα και δεν απορροφούν υγρασία από το περιβάλλον. Η τιμή του συντελεστή διάχυσης των RF μας υποδηλώνει πιο υλικό είναι το προτιμότερο.

Το χαμηλότερο συντελεστή διάχυσης RF των πλαστικών έχει το πολυαιθυλένιο (PE) το οποίο αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή για την κατασκευή ενός δευτερεύοντος πηνίου. Άριστη επιλογή αποτελεί το πολυαιθυλένιο μεγάλου μοριακού βάρους (PE-UHMW) το οποίο βέβαια είναι δυσεύρετο στο εμπόριο.

Το πολυπροπυλένιο έχει και αυτό χαμηλό συντελεστή διάχυσης RF και είναι δομικά ισχυρό ώστε να περιελιχθεί γερά ο χαλκός περιμετρικά του.

Δεύτερη καλύτερη λύση αποτελούν τα ακρυλικά υλικά τα οποία έχουν χαμηλό συντελεστή διάχυσης RF αλλά με μειονέκτημα ότι πρέπει να επιστρωθούν με μονωτικό βερνίκι για να μειωθεί περισσότερο στα επιθυμητά επίπεδα ο συντελεστής διάχυσης. Πλεονέκτημα είναι ότι δεν απορροφούν υγρασία και καθιστούν περιττή οποιαδήποτε διαδικασία ξήρανσης.

Τέλος υπάρχει και το PVC. Είναι τι υλικό που χρησιμοποιείται πιο συχνά όπως οι σωλήνες PVC που χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε αγωγούς ύδρευσης και αποχετευτικών συστημάτων. Παρόλο που το PVC είναι μια καλή επιλογή κατασκευής δευτερεύοντος πηνίου έχει και αυτό τα μειονεκτήματά του. Οι σωλήνες από PVC περιέχουν συχνά άνθρακα που τους κάνουν λιγότερο ευαίσθητους στο υπεριώδες φως κατά την έκθεσή του στον ήλιο. Επομένως οι μαύροι PVC σωλήνες είναι άχρηστοι για τον σκοπό μας, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται λευκοί ή γκρι σωλήνες.

Μόλις επιλεγεί το υλικό του πηνίου και το κατασκευάσουμε στις διαστάσεις που απαιτούνται είναι απαραίτητο να σφραγίσουμε τα δύο άκρα ώστε να αποφευχθούν οι σπινθηρισμοί στο εσωτερικό του πηνίου.

### β) Διαστάσεις του πηνίου

Τα τοιχώματα του σωλήνα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο λεπτά. Αυτό καθιστά την μείωση του συντελεστή διάχυσης των RF αφού όσο το περισσότερο υλικό υπάρχει στα τοιχώματα του σωλήνα τόσες περισσότερες απώλειες υπάρχουν.

Το πηνίο πρέπει να κατασκευαστεί με βάση το λόγο ύψους διαμέτρου με αναλογία μεταξύ τους 1:3 και 1:6. Με μικρό λόγο το πηνίο δίνει την υψηλότερη επαγωγή για το ίδιο μήκος καλωδίου χαλκού, καθώς η μεγαλύτερη επαγωγή είναι αυτή που μας δίνει την υψηλή τάση στην έξοδο όπου και είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις που επιθυμούμε ψηλότερο πηνίο παρά μεγαλύτερη επαγωγή.

Το πηνίο θα πρέπει να είναι μεταξύ 800 και 1200 σπειρών. Αυξάνοντας ή μειώνοντας τις τιμές αυτές παρατηρούμε την μείωση της ενέργειας εξόδου είτε λόγω της αύξησης της αντίστασης είτε λόγω της μείωσης της επαγωγής. Η διατομή των καλωδίων επιλέγεται ανάλογα με τον αριθμό των σπειρών και το μήκος του πηνίου.

Κατά γενικό κανόνα. Όσο μεγαλύτερη ισχύ έχει ένα πηνίο Tesla τόσο μεγαλύτερο τόξο παράγει.



Στροφέιο χαλκού περιέλιξης δευτερεύοντος πηνίου

### 3.3.4 Υπολογισμός δευτερεύοντος τυλίγματος

Για την κατασκευή ενός δευτερεύοντος πηνίου θα πρέπει να γνωρίζουμε τη διάμετρο και το ύψος του πηνίου, την διάμετρο του χάλκινου καλωδίου και τον αριθμό των στροφών για να μπορέσουμε να βρούμε την τιμή της επαγωγής του (Σχήμα 2.1.6.1).

Οι παρακάτω πίνακες μας βοηθούν με αυτά τα δεδομένα:

<b>Power vs Secondary Diameter</b>	
<b>Power Range</b>	<b>Secondary Diameter</b>
<b>Less than 500W</b>	<b>3 to 4 inch</b>

<b>500W to 1500W</b>	<b>4 to 6 inch</b>
<b>1500W to 3kW</b>	<b>6 to 10 inch</b>
<b>3kW and above</b>	<b>10 inch and above</b>

<b>Secondary Coil Form Dimensions</b>		
<b>Form Diameter</b>	<b>Aspect ratio</b>	<b>Coil length</b>
<b>3 inches</b>	<b>6 to 1</b>	<b>18 inches</b>
<b>4 inches</b>	<b>5 to 1</b>	<b>20 inches</b>
<b>6 inches</b>	<b>4 to 1</b>	<b>24 inches</b>
<b>8 inches and above</b>	<b>3-5 to 1</b>	<b>24 inches and above</b>

<b>Copper Wire Data Table</b>			
<b>Diameter (mm)</b>	<b>AWG</b>	<b>Weight per meter (g)</b>	<b>Resistance per meter (ohms)</b>
<b>0.32</b>	<b>28</b>	<b>0.72</b>	<b>0.218</b>
<b>0.36</b>	<b>27</b>	<b>0.86</b>	<b>0.182</b>
<b>0.40</b>	<b>26</b>	<b>1.12</b>	<b>0.140</b>
<b>0.45</b>	<b>25</b>	<b>1.42</b>	<b>0.112</b>
<b>0.51</b>	<b>24</b>	<b>1.75</b>	<b>0.089</b>
<b>0.57</b>	<b>23</b>	<b>2.11</b>	<b>0.074</b>
<b>0.64</b>	<b>22</b>	<b>2.96</b>	<b>0.053</b>
<b>0.72</b>	<b>21</b>	<b>3.44</b>	<b>0.046</b>
<b>0.81</b>	<b>20</b>	<b>4.49</b>	<b>0.035</b>
<b>0.91</b>	<b>19</b>	<b>5.68</b>	<b>0.028</b>
<b>1.02</b>	<b>18</b>	<b>6.99</b>	<b>0.023</b>

Material Properties					
	Dielectric Constant		Dielectric Strength (kV per cm)	Dissipation Factor	
	at			at	
	50Hz	1MHz	50Hz	1MHz	
Air (at STP)	-	1.00	20	-	-
LDPE	2.29	2.28	370	0.15	0.08
PVC	4.8	4.5	270	80	120
PTFE(Teflon)	2.1	2.1	480	0.2	0.2
Polyurethane	-	3.9	100	-	0.002
Glass	-	4.8-10	118	-	130-400
Transformer Oil	-	2.3	30	-	-

Ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής δίνεται από τον τύπο :

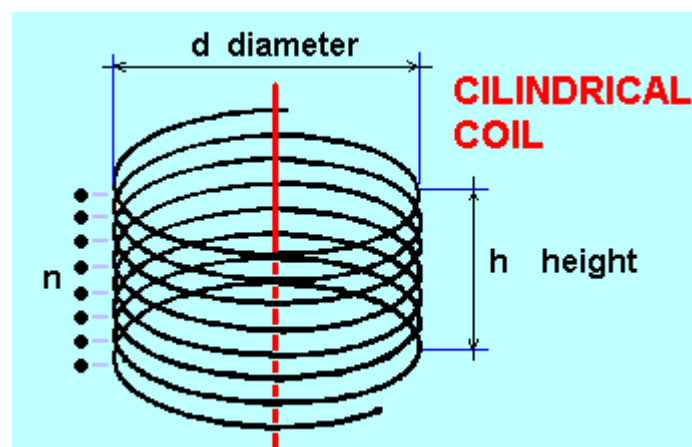
$$L(p) = \frac{R^2 \cdot N^2}{(9R + 10H)}$$

Όπου : L = η αυτεπαγωγή του πηνίου σε μH

R = η ακτίνα του πηνίου ίντσες

N = ο αριθμός των σπειρών του πηνίου

H = το ύψος του τυλίγματος του πηνίου σε ίντσες



### 3.3.5 Υπολογισμός τοροειδούς

Η χωρητικότητα ενός τοροειδούς μπορεί να καθοριστεί από την εισαγωγή των διαστάσεών του στον παρακάτω τύπο :

$$C = \left( 1.28 - \frac{d}{D} \right) \sqrt{2\pi (D - d)}$$

Όπου d = η εσωτερική διάμετρος του τοροειδούς σε ίντσες

D = η εξωτερική διάμετρος του τοροειδούς σε ίντσες

$\pi = 3.141592$

## 4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΟΣ ΠΗΝΙΟΥ TESLA

### 4.1 Υπολογισμός Ισχύος και μήκος τόξου κατασκευής

*Υπολογισμός Ισχύος πηνίου Tesla*

$V_{in} = 10.000 \text{ V}$

$P = V \cdot I = 250 \text{ Watt}$

$I = 25\text{mA}$

*Υπολογισμός Ισχύος πηνίου Tesla*

$$P = \left(\frac{L}{1.7}\right)^2 \quad \text{ή} \quad L = 1.7\sqrt{P}$$

$$L = 1.7\sqrt{250} = 26.8'' \quad \text{ή} \quad 68.27 \text{ cm}$$

### 4.2 Υπολογισμός πυκνωτή πρωτεύοντος κυκλώματος κατασκευής

$V = 10.000 \text{ Volt}$

$I = 25 \text{ mA}$

$F = 50 \text{ Hz}$

$$V = I \cdot Z \rightarrow Z = \frac{V}{I} \rightarrow Z = \frac{10.000}{25 \cdot 10^{-3}} = 400.000\Omega$$

$$C_p = \frac{1}{2\pi f \cdot Z} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 400.000} \rightarrow C_p = 7.96 \cdot 10^{-9} = 7.96\text{nF}$$

### 4.3 Υπολογισμός πρωτεύοντος τυλίγματος κατασκευής

Για την κατασκευή του πρωτεύοντος τυλίγματος χρησιμοποιήσαμε 10m χάλκινη σωλήνα ¼ της ίντσας.

Αριθμός σπειρών (N) = 13

Ακτίνα (R) = 3.7''

Πλάτος (W) = 7.3''

Μέση ακτίνα ( $W_{av}=R+(W/2)$ ) = 7.35''

Υπολογισμός αυτεπαγωγής πρωτεύοντος πηνίου

$$L_p = \frac{W_{av}^2 \cdot N^2}{8W_{av} + 11W} = \frac{7.35^2 \cdot 13^2}{8 \cdot 7.35 + 11 \cdot 7.3} = \frac{54 \cdot 169}{58.8 + 80.3} = 65.6 \mu H$$

### 4.4 Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού πρωτεύοντος κυκλώματος κατασκευής

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p \cdot C_p}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot \sqrt{65.63 \cdot 10^{-6} \cdot 7.96 \cdot 10^{-9}}} = \frac{1}{4.534 \cdot 10^{-5}}$$

$$f_p = 220.52 \text{ kHz}$$

### 4.5 Υπολογισμός δευτερεύοντος τυλίγματος κατασκευής

Για την κατασκευή του δευτερεύοντος τυλίγματος χρησιμοποιήσαμε 100m χαλκό διατομής 0.6mm /AWG #22.

Αριθμός σπειρών (N) = 800

Διάμετρος (D) = 3.54''

Ακτίνα (R) = 1.77''

Μήκος (H) = 19.6''

Υπολογισμός αυτεπαγωγής πρωτεύοντος πηνίου

$$L_s = \frac{R^2 \cdot N^2}{9R + 10H} = \frac{1.77^2 \cdot 800^2}{9 \cdot 1.77 + 10 \cdot 19.6} = 65.6 \mu H$$

## 4.6 Υπολογισμός αυτό-χωρητικότητας δευτερεύοντος τυλίγματος κατασκευής

Υπολογισμός συντελεστή  $k$

$$k = 0.585 - 0.25442 \cdot \left(\frac{H}{D}\right) + 0.15563 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^2 - 0.02777 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^3 + 0.00172 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^4$$

$$k = 0.585 - 1.4 + 4.77 - 4.71 + 1.61 = 0.855$$

Υπολογισμός αυτό-χωρητικότητας

$$C_{self} = k \cdot D = 0.855 \cdot 9 = 7.6 \text{ pF}$$

## 4.7 Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού δευτερεύοντος τυλίγματος κατασκευής

$$f_{self} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s \cdot C_{self}}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot \sqrt{11.8 \cdot 10^{-3} \cdot 7.6 \cdot 10^{-12}}}$$

$$f_p = 531 \text{ kHz}$$

## 4.8 Υπολογισμός τοροειδούς κατασκευής

Υπολογισμός χωρητικότητας τοροειδούς

Διάμετρος (D)=480mm (18.9'')

Εσωτερική διάμετρος (d)=100mm (4'')

$$C_t = \left(1.28 - \frac{d}{D}\right) \cdot \sqrt{2\pi d(D-d)} = \left(1.28 - \frac{4}{18.9}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot 3.14 \cdot 4 \cdot 4.19} =$$

$$= 1.068 \cdot 19.346 = 20.66 \text{ pF}$$

## 4.9 Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού δευτερεύοντος κυκλώματος κατασκευής



Υπολογισμός ολικής χωρητικότητας δευτερεύοντος κυκλώματος

$$C = C_s + C_t = 7.6 + 20.66 = 28.66 \mu\text{F}$$

Υπολογισμός συχνότητας συντονισμού δευτερεύοντος κυκλώματος κατασκευής

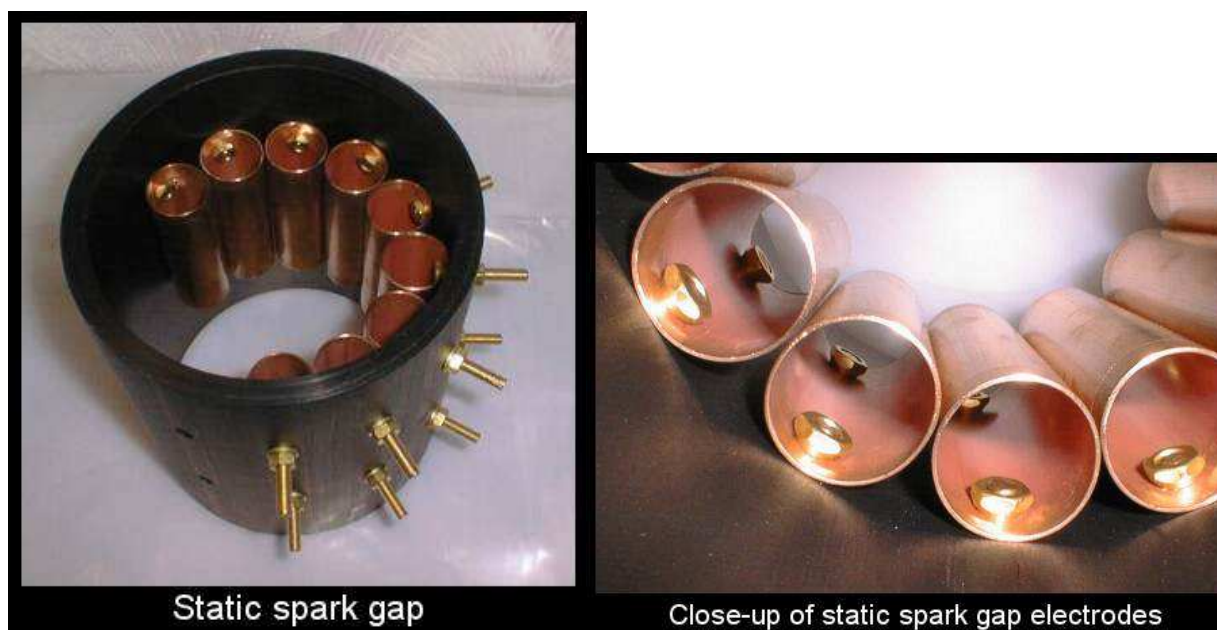
$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s \cdot C}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot \sqrt{11.8 \cdot 10^{-3} \cdot 28.66 \cdot 10^{-12}}}$$

$$f_p = 273.8 \text{ kHz}$$

## 4.10 Διάκενο διάσπασης

### 4.10.1 Στατικό διάκενο διάσπασης

Τα διάκενα διάσπασης είναι διακόπτες υψηλής τάσης οι οποίοι επιτρέπουν την φόρτιση και εκφόρτιση του πυκνωτή. Βελτιώνοντας την απόδοση του διακένου, οι αιχμές ισχύος του πυκνωτή αυξάνονται χωρίς να χρειάζεται περισσότερη τροφοδοσία (Σχήμα 4.10.1.1).



Σχήμα 4.10.1.1 α) Στατικό διάκενο διάσπασης

β) Ηλεκτρόδια διακένου διάσπασης

Καμία συζήτηση δεν μπορεί να γίνει για τα διάκενα διάσπασης χωρίς να διευκρινιστεί ο όρος “quenching”. Το “quenching” αναφέρεται κυρίως στην τεχνική πραγματοποίησης της διάσπασης από ένα διάκενο.

Εφαρμόζοντας υψηλή τάση δημιουργείτε μια ένταση και δυναμικές γραμμές παίρνουν μορφή. Η γεωμετρική μορφή των ηλεκτροδίων καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη μορφή του πεδίου και τη συνισταμένη τάση διάσπασης του διακένου σε κάθε απόσταση. Με άλλα λόγια, ηλεκτρόδια

διαφορετικών σχημάτων μπορούν να διασπασούν σε διαφορετικές τάσεις, ακόμα και με την ίδια απόσταση μεταξύ τους.

Καθώς η τάση διασπά τον αέρα η αντίσταση του διακένου πέφτει. Η διάσπαση ιονίζει τον αέρα ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και το τόξο που ξεκινάει ιονίζει ακόμα και τα ηλεκτρόδια. Το μίγμα αυτών των ιόντων σχηματίζει ένα υψηλής αγωγιμότητας πλάσμα ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Χωρίς αυτό το υπεραγώγιμο κανάλι ανάμεσα στα ηλεκτρόδια η ταλάντωση του πυκνωτή θα ήταν ανύπαρκτη. Το πλάσμα επίσης μειώνει την απόσταση του διακένου. Ένα διάκενο το οποίο έχει εγκλωβίσει ζεστά ιόντα δεν κάνει διάσπαση και αφήνει τον πυκνωτή να επαναφορτίσει μέχρι τον επόμενο παλμό.



*Διαφορετικού είδους στατικό διάκενο διάσπασης*

#### 4.10.2 Περιστροφικό διάκενο διάσπασης

Το περιστροφικό διάκενο είναι ένα μηχανικό διάκενο το οποίο συνήθως αποτελείται από έναν κινούμενο δίσκο με ηλεκτρόδια τοποθετημένα επάνω του. Ο δρομέας περιστρέφεται και τα ηλεκτρόδια κινούνται ανάμεσα σε ένα άλλο ζεύγος σταθερών ηλεκτροδίων. Καθώς ένα κινούμενο ηλεκτρόδιο πλησιάζει ένα σταθερό το διάκενο πραγματοποιεί τη διάσπαση. Στη συνέχεια καθώς απομακρύνονται το τόξο επιμηκύνεται και σταματάει. Το περιστροφικό διάκενο μας προσφέρει τη δυνατότητα να ελέγξουμε τους παλμούς στο πυκνωτή. Ένα σωστά σχεδιασμένο περιστροφικό διάκενο μπορεί να ελέγξει τον ρυθμό των διασπάσεων (bps).

Τα περιστροφικά διάκενα λειτουργούν με δύο τρόπους, σύγχρονα και ασύγχρονα. Ένα σύγχρονο διάκενο περιστρέφεται με μια σταθερή ταχύτητα κατασκευάζεται έτσι ώστε το διάκενο να διασπά σε μια σταθερή σχέση των 50Hz της κυματομορφής της γραμμής τροφοδοσίας, στους πυκνωτές.

Το σημείο πάνω στην κυματομορφή όπου τα διάκενα είναι κοντά μπορεί να αλλάξει περιστρέφοντας το δρομέα της μηχανής ή μετακινώντας τη θέση του δίσκου πάνω στη μηχανή. Αντιστοιχίζοντας προσεκτικά την έξοδο του Μ/Σ τροφοδοσίας με την τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή και θέτοντας το διάκενο σε μια δοκιμαστική λειτουργία είναι πιθανό να έχουμε διασπάσεις μόνο όταν η τάση τροφοδοσίας έχει την μέγιστη τιμή στη συχνότητα των 50Hz.

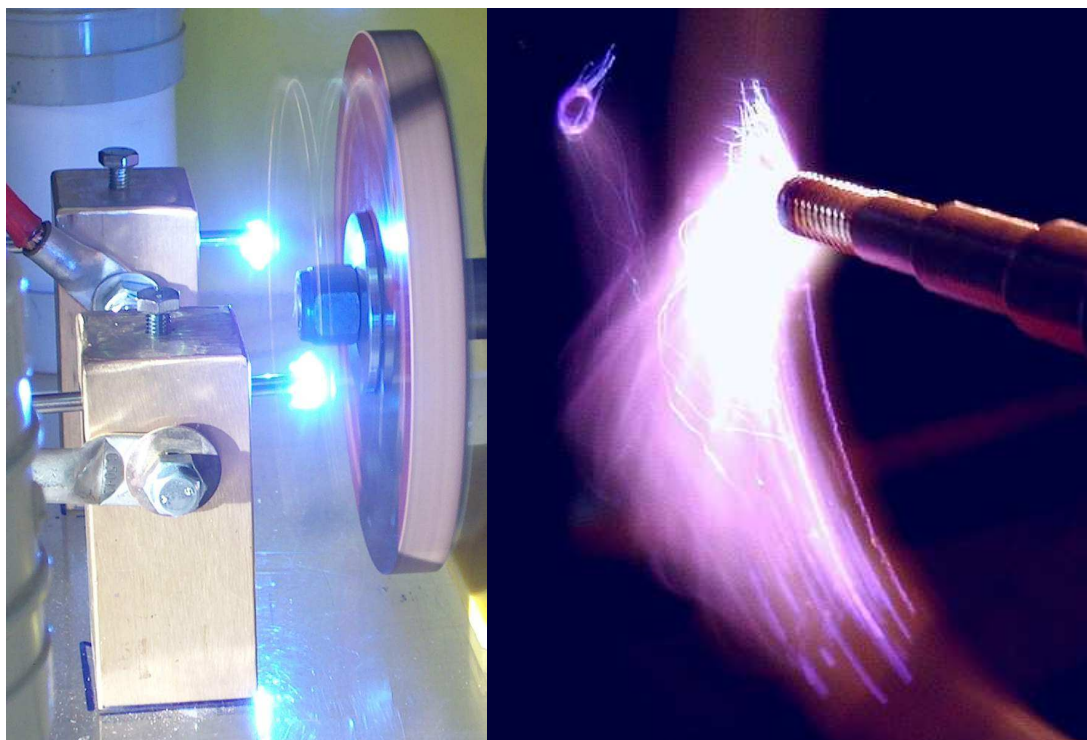


Σχήμα 4.10.2 Περιστροφικό διάκενο διάσπασης

Αυτή η τεχνική επιτρέπει στον πυκνωτή να εκφορτίζεται μόνο κατά τις μέγιστες τιμές της τάσης και καταφέρνει να τον εκφορτίζει τις στιγμές που είναι πλήρως φορτισμένος. Εάν σχεδιαστεί από μηχανικής πλευράς σωστά, το "σύγχρονο διάκενο μπορεί να δώσει τα μεγαλύτερα ηλεκτρομαγνητικά πεδία στον δευτερεύον πηνίο.

Παρόλα αυτά είναι το πιο ακριβό και το πιο δύσκολο στο σχεδιασμό από όλα τα άλλα διάκενα και απαιτεί τον πιο σύγχρονο εξοπλισμό δοκιμών για να εγκατασταθεί.

Τα "ασύγχρονα" διάκενα είναι τα πιο κοινά. Δουλεύουν αρκετά καλά και είναι πολύ πιο εύκολο να λειτουργήσουν. Σταθερής ή μεταβλητής ταχύτητας μηχανές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταβολή της ταχύτητας των διακένων δίνοντας μεγάλα πειραματικά περιθώρια. Ο ρυθμός των διασπάσεων πρέπει να είναι τουλάχιστον 400bps διότι οι διασπάσεις των 450-480bps δίνουν τις καλύτερες εκφορτίσεις. Από τη στιγμή που το διάκενο διασπά πιο γρήγορα από τα 50Hz της κυματομορφής τότε αλλάζει πολικότητα, όπου περισσότερη ισχύς τροφοδοτεί τον πυκνωτή ο οποίος μπορεί να φορτίζει και να εκφορτίζει πιο γρήγορα. Με αυτό το σύστημα διακένου αυξάνεται το σύνολο των διασπάσεων στο δευτερεύον αλλά τα τόξα συνήθως είναι μικρότερα σε μήκος από ότι στα "σύγχρονα" διάκενα.



*Περιστροφικό διάκενο σε λειτουργία*

### 4.10.3 Διάκενα ασφαλείας

Τα διάκενα ασφαλείας είναι στην ουσία ένα στατικό διάκενο διάσπασης με την διαφορά ότι διασπάτε μόνο όταν δημιουργηθεί μία υπέρταση πάνω στον πυκνωτή από μια παροδική τάση. Η λανθασμένη λειτουργία ενός πηνίου Tesla ή η απορύθμιση του μπορεί να προκαλέσει παροδικές υπερτάσεις οι οποίες μπορούν να καταστρέψουν το μετασχηματιστή ανύψωσης, τον πυκνωτή ή και ακόμα να μεταφέρουν στο πρωτεύον του μετασχηματιστή ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI).



*Σχήμα 2.4.4.1 Διάκενο ασφαλείας*

Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στο διάκενο ασφαλείας πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να διασπάει μόνο όταν φτάσει μια προκαθορισμένη τιμή τάσης. Για τον καθορισμό της απόστασης του διακένου λαμβάνουμε υπόψη μας την θερμοκρασία λειτουργίας, την υγρασία και την πίεση του αέρα που θα διασπαστεί από το διάκενο στη μέγιστη τιμή της προκαθορισμένης τάσης στο πρωτεύον κύκλωμα. Για να αποφύγουμε την λειτουργία του κατά την διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του πηνίου Tesla, συνήθως ρυθμίζουμε την απόσταση των ηλεκτροδίων παραπάνω από την υπολογισμένη.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ (MALVINO)
2. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ (ΜΟΗΑΝ/UNDELAND/ROBBINS)
3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ (STEPHEN CHARMAN)
4. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΩΝ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ( ΠΕΤΡΟΣ ΝΤΟΚΟΠΟΥΛΟΣ)
5. ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑ 2 (ΝΙΚΟΣ ΚΟΛΙΟΠΟΥΛΟΣ)
6. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ (ΣΙΔΕΡΑΚΗΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ)
7. THE ULTIMATE TESLA COIL DESIGN AND CONSTRUCTION GUIDE (MITCH TILBURY)
8. [www.teslasociety.com/teslacoil.htm](http://www.teslasociety.com/teslacoil.htm)
9. [www.teslacoil.com](http://www.teslacoil.com)
10. [www.pbs.org/tesla/](http://www.pbs.org/tesla/)
11. [en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_coil](http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### Φωτογραφίες κατασκευής πηνίου Tesla



*Ολοκληρωμένη μορφή κατασκευής Πηνίου Tesla*

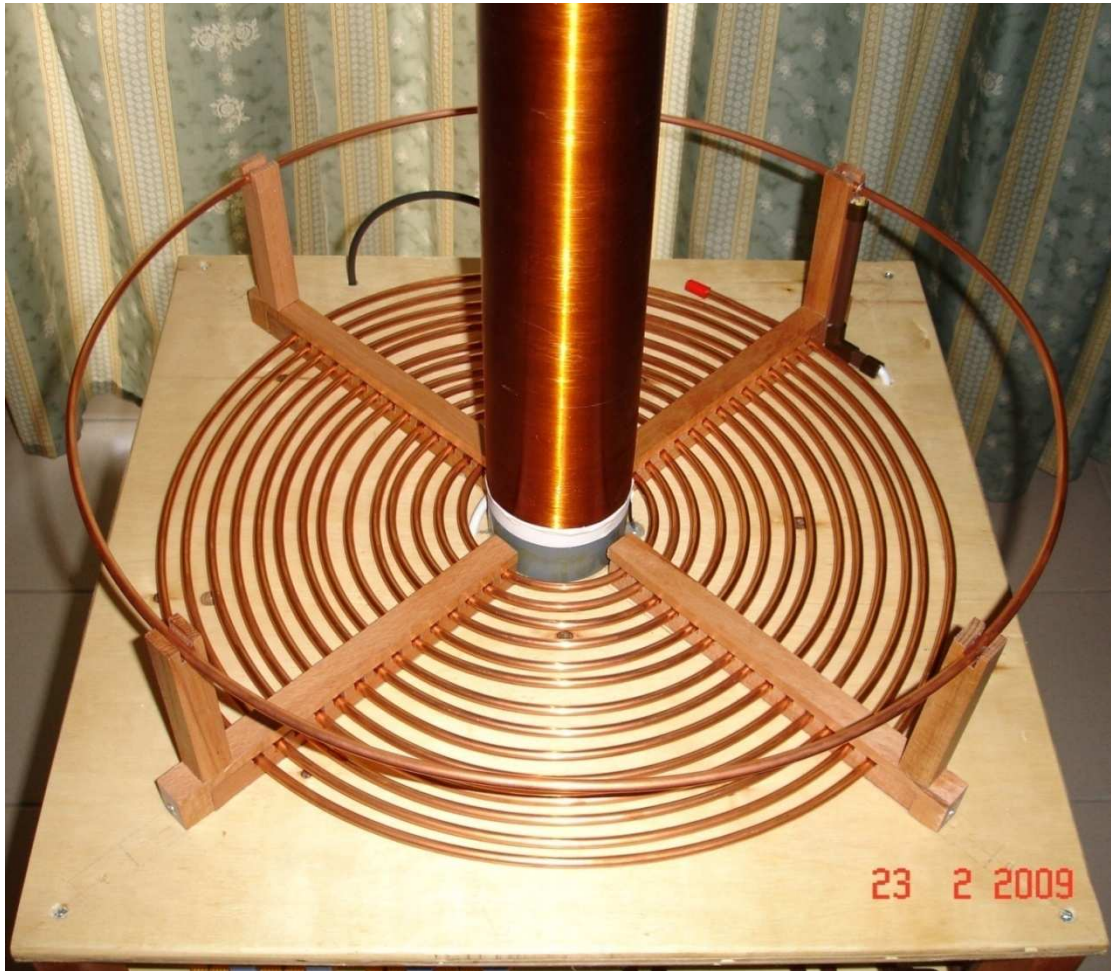
Μετασχηματιστής Tesla



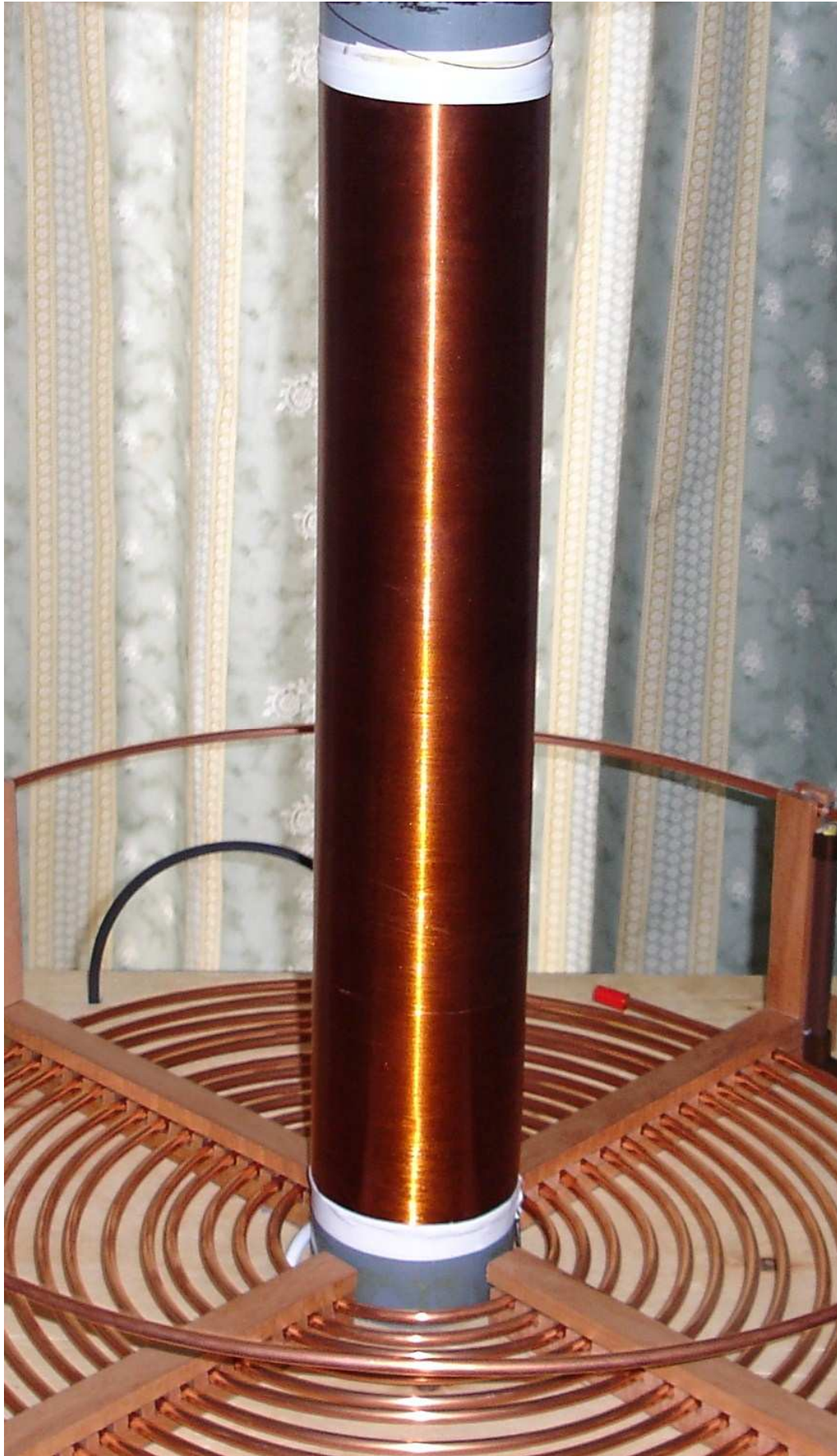
*Πηνίο Tesla*

Μετασχηματιστής Tesla



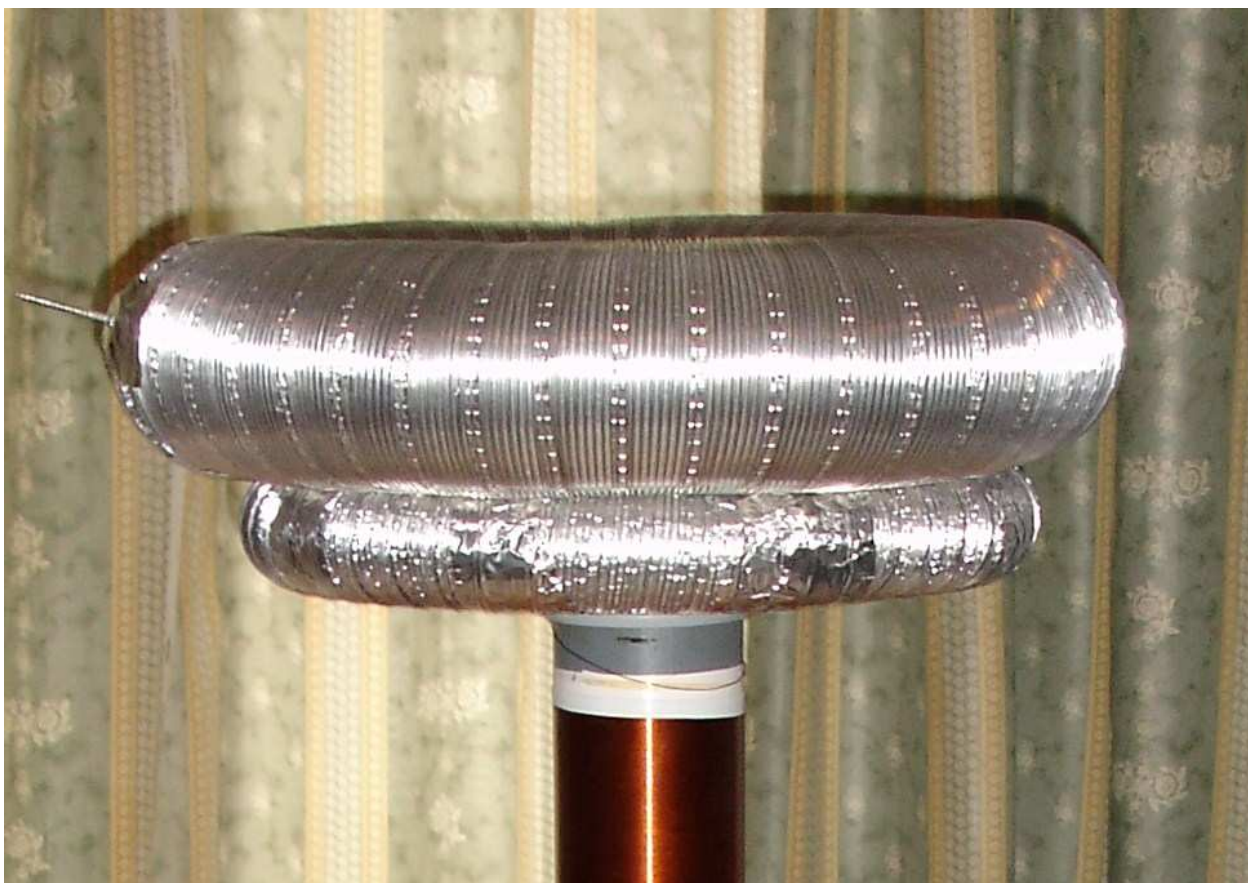


*Πρωτεύον πηνίο*

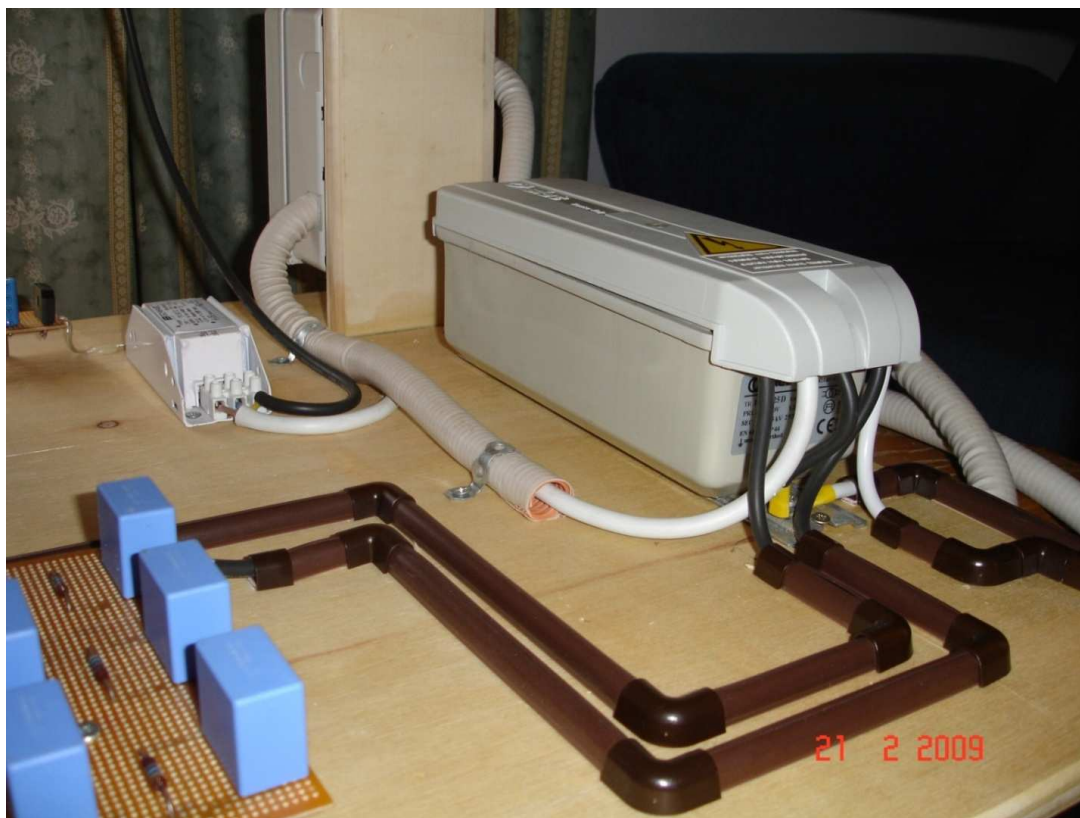


*Δευτερεύον Πηνίο*

Μετασχηματιστής Tesla

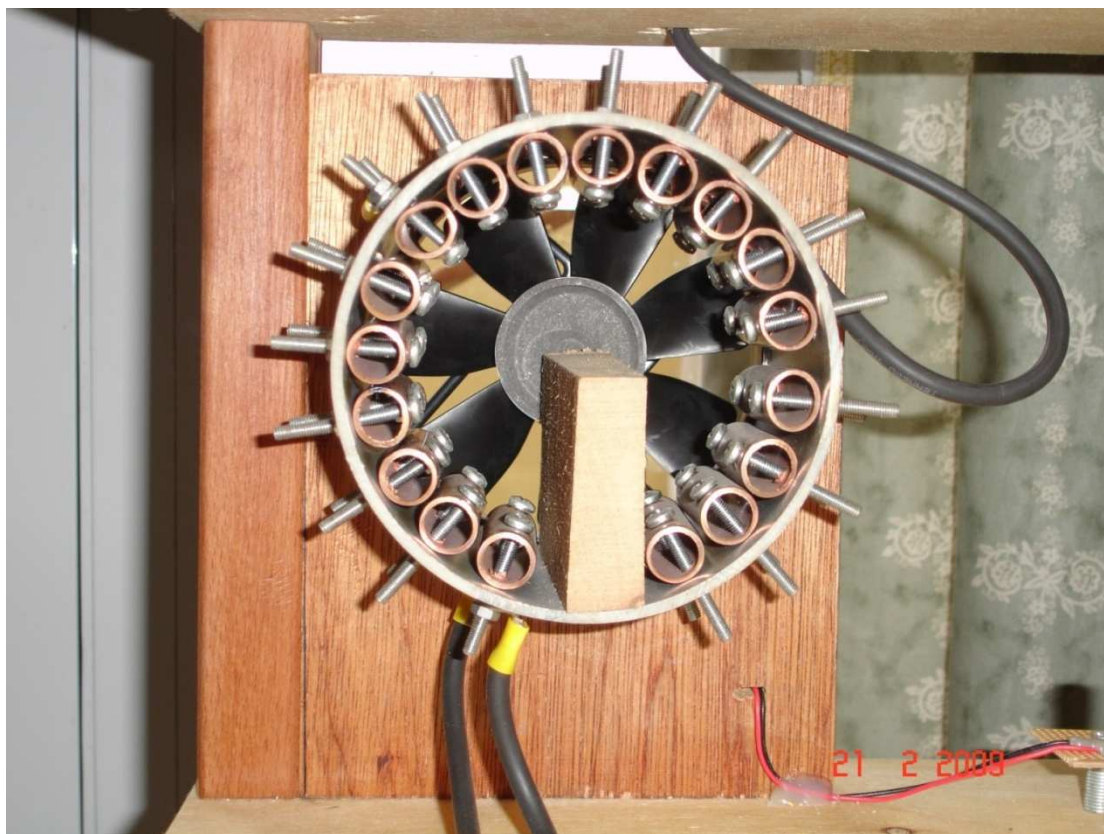


*Τοροειδές*

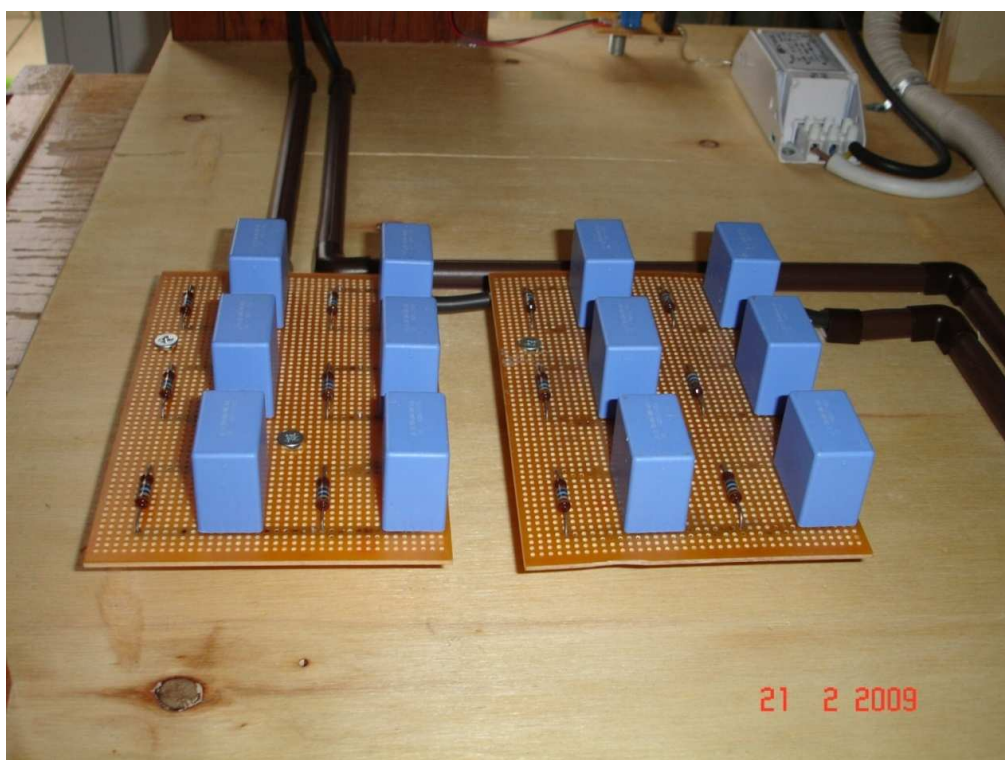


*Μετασχηματιστής NEON πηνίου Tesla*

Μετασχηματιστής Tesla



*Διάκενο διάσπασης (Spark gap)*



*Πυκνωτές πρωτεύοντος κυκλώματος πηνίου Tesla*

Μετασχηματιστής Tesla

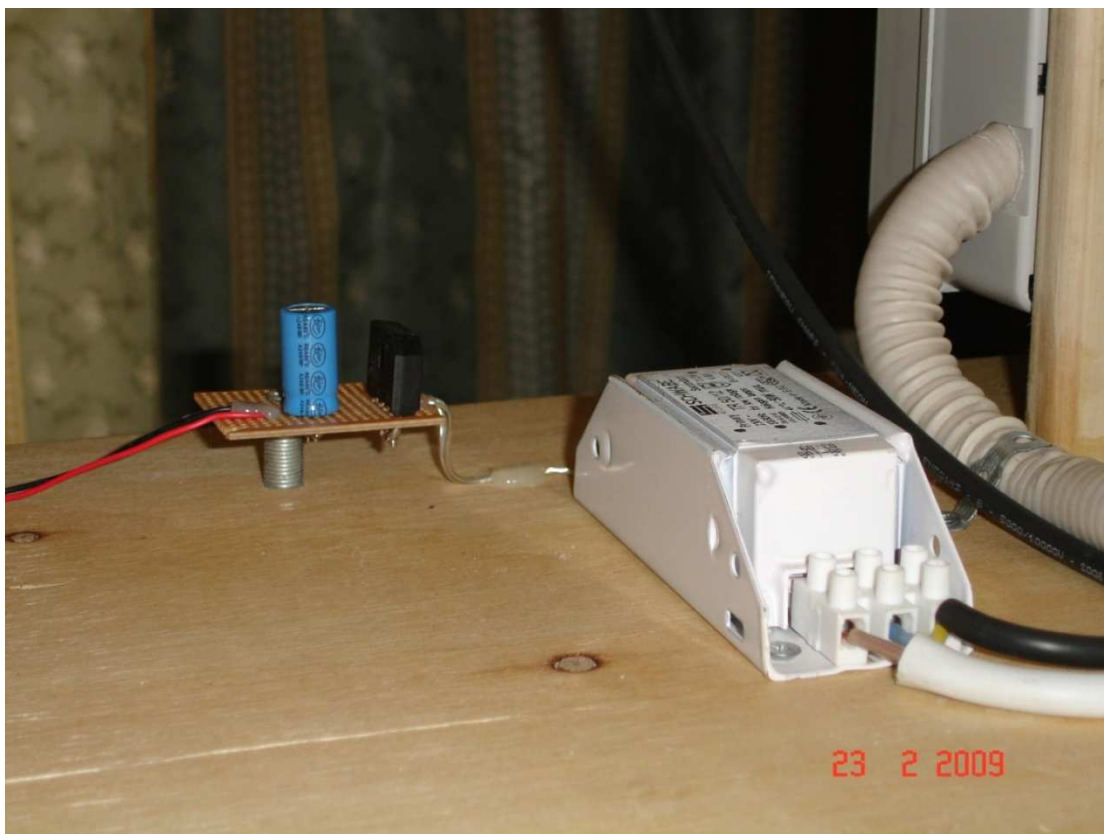


*Variac*

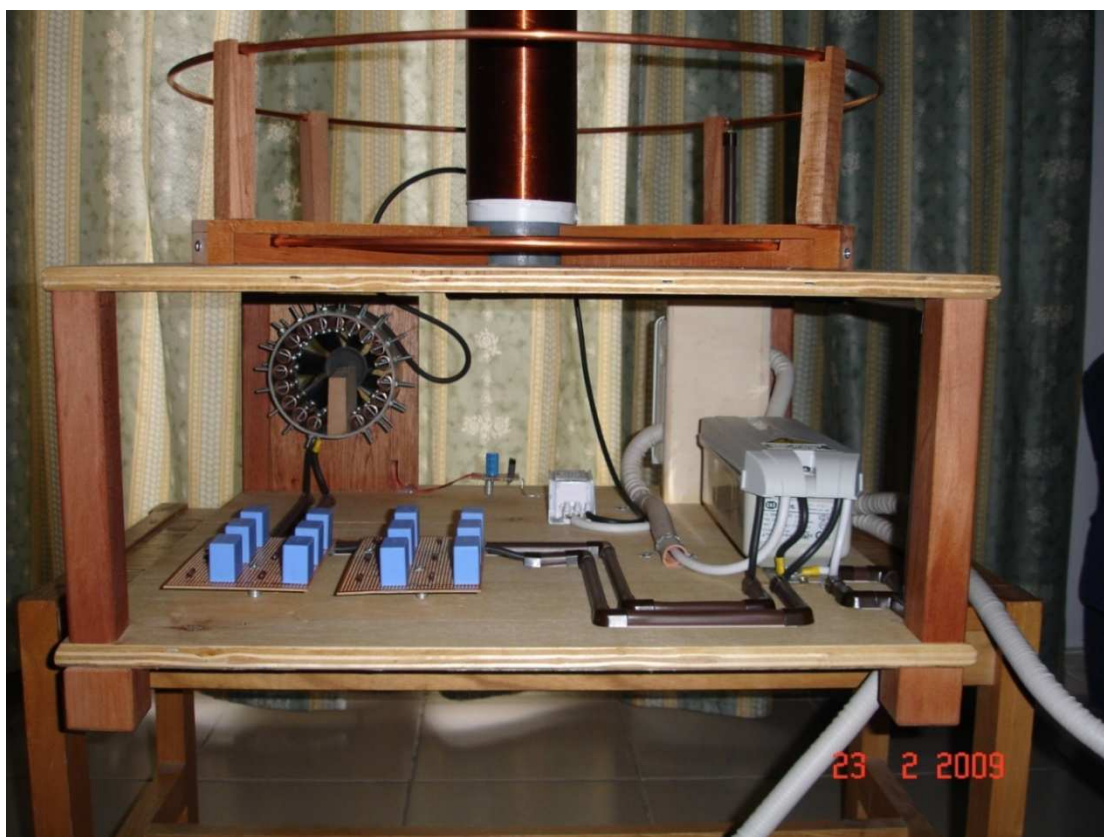


*Γενικός πίνακας πηνίου Tesla*

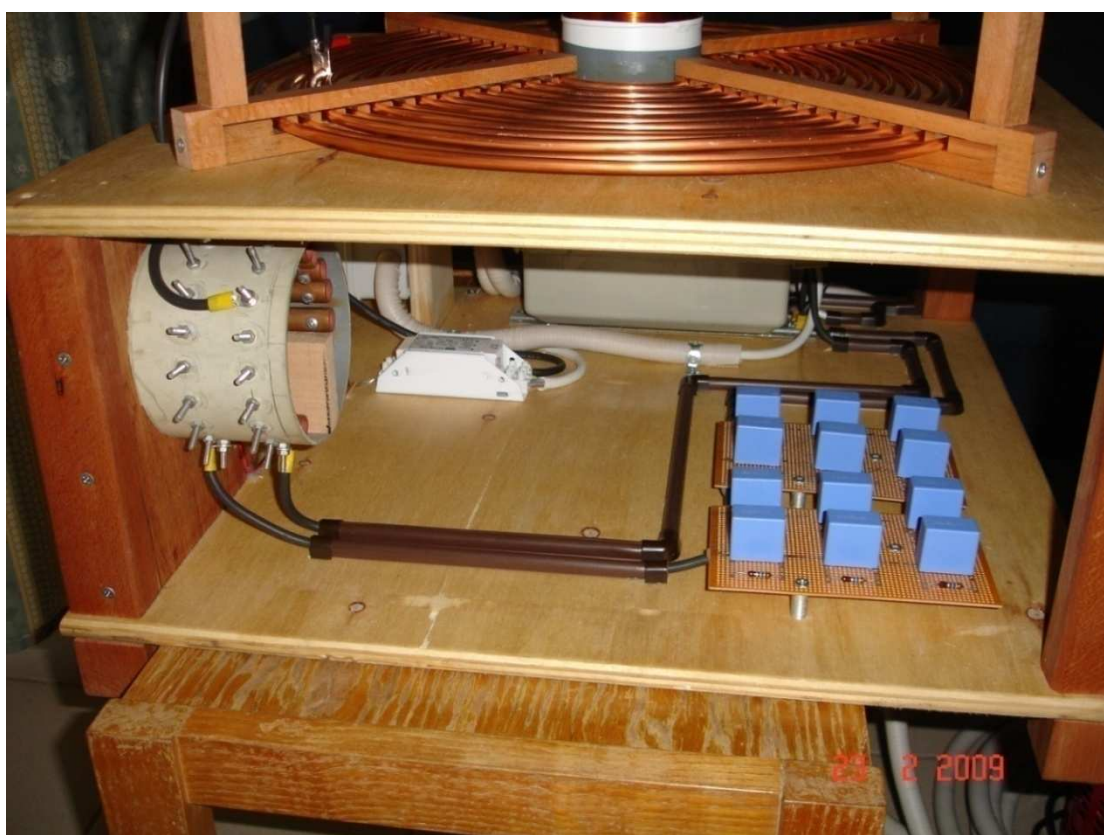
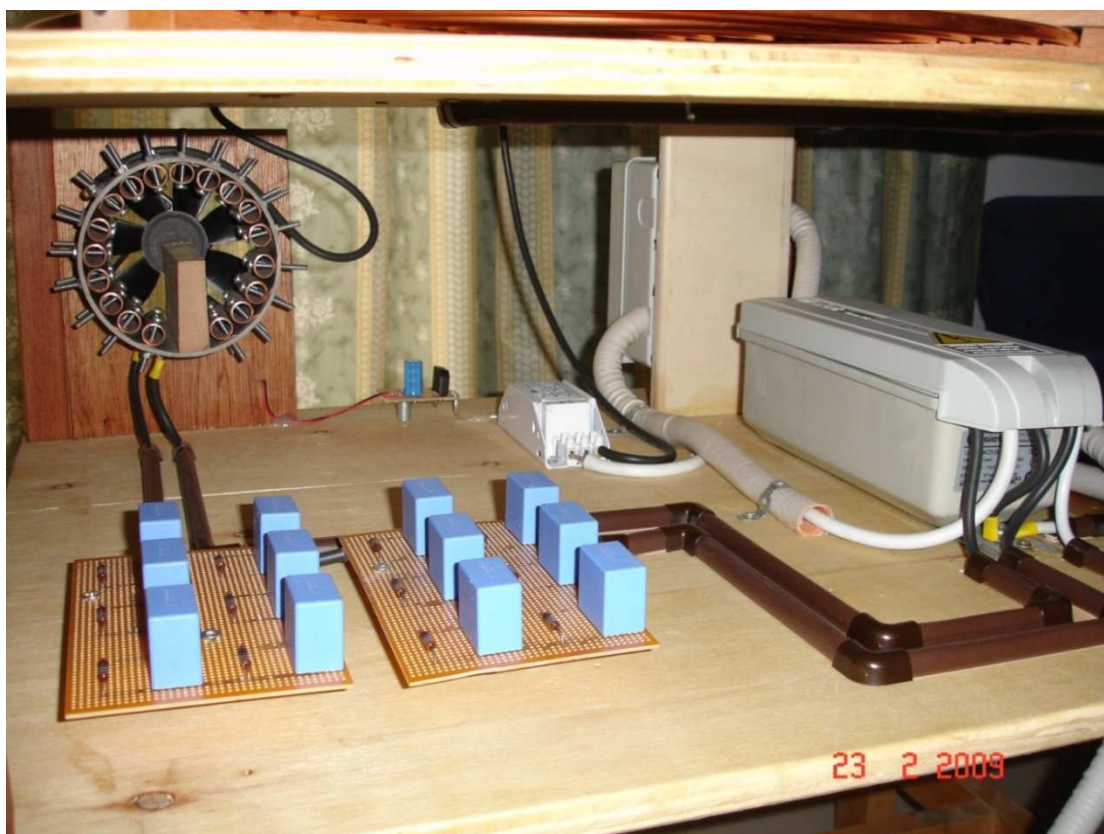
Μετασχηματιστής Tesla

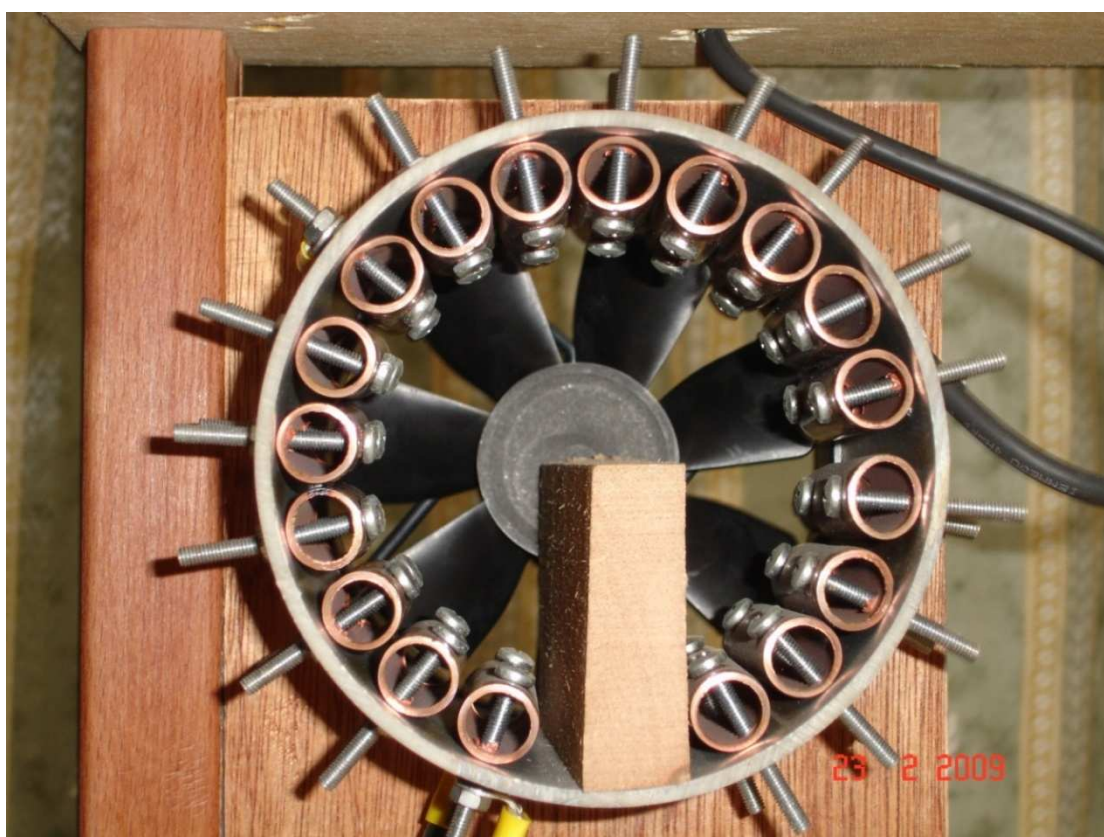


*Μετασχηματιστής και ανορθωτική γέφυρα για την τροφοδοσία του ανεμιστήρα ψύξης του διακένου διάσπασης*

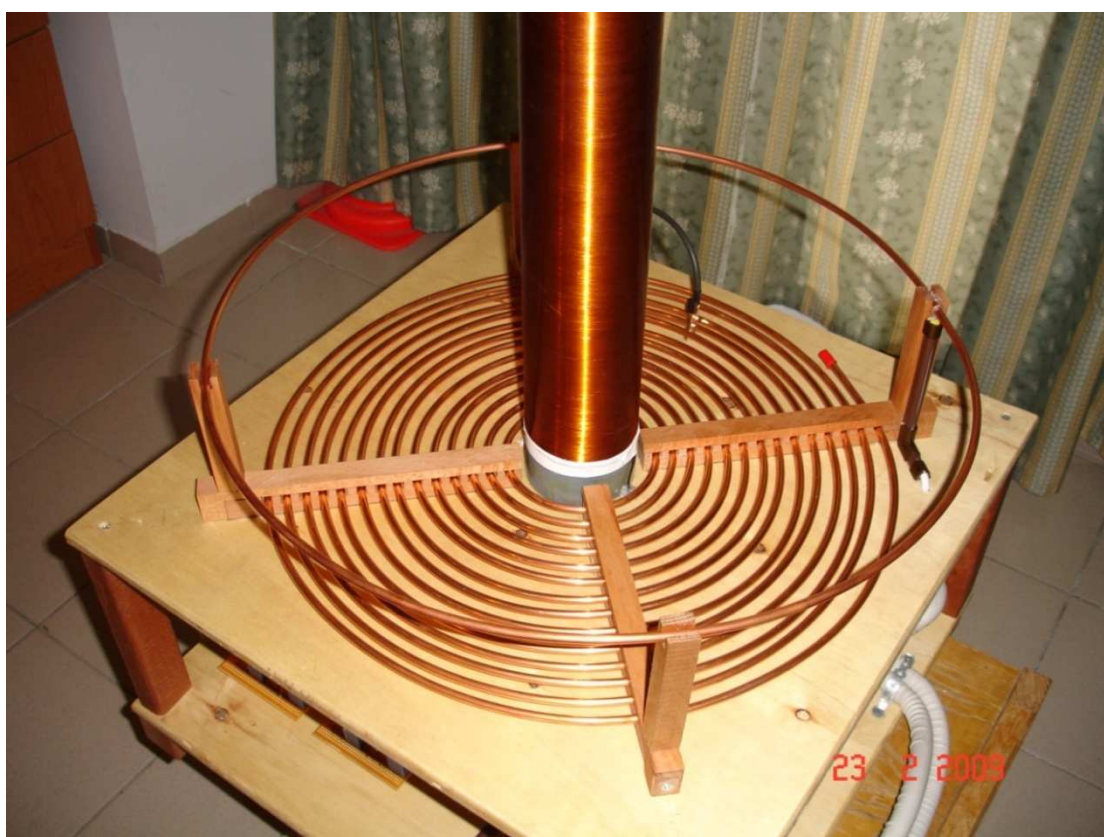


Μετασχηματιστής Tesla













Μετασχηματιστής Tesla

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### Στοιχεία για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν

Για την κατασκευή της πτυχιακής εργασίας < Πηνίο Tesla> χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω υλικά, εργαλεία και ηλεκτρικά μηχανήματα :

#### Για την βάση του πηνίου tesla

- 2 x (60x60x2 cm) κόντρα πλακέ θαλάσσης
- 4 x (20x5x5 cm ) ξύλο οξιάς
- 4 x (5x5x5 cm ) ξύλο οξιάς

#### Για την βάση του πρωτεύοντος πηνίου

- 12 x (30x10x10 cm) ξύλο οξιάς

#### Καλωδιώσεις και κανάλια γραμμών

- 4m καλώδιο σιλικόνης υψηλής τάσης (μαύρο)
- 4m καλώδιο υψηλής τάσης (λευκό)
- 2m καλώδιο 3x1.5mm εύκαμπτο (λευκό)
- 8m κανάλι γραμμών μαζί με καμπύλες, γωνίες και συνδετήρες (καφέ)

#### Για το πρωτεύον τύλιγμα

- 10m χαλκοσωλήνα ¼ της ίντσας (σωλήνα ψυκτικών υψηλής πίεσης)

#### Για το δευτερεύον τύλιγμα

- 100m χαλκός διατομής 0.6 mm / AWG #22
- 70cm σωλήνας PVC διατομής 90mm
- 1lt άχρωμο προστατευτικό βερνίκι διάβρωσης χαλκού για περιελίξεις μοτέρ
- 1.5 lt διαλυτικό ξυλόλης

#### Για το τοροειδές

- 3m εύκαμπτη σωλήνα αλουμινίου Φ100
- 3m εύκαμπτη σωλήνα αλουμινίου Φ50
- 1 στρογγυλό κομμάτι αλουμινίου διατομής 30cm
- 2 μεταλλικές αλουμινοταινές

#### Για το διάκενο διάσπασης (spark gap)

- 20 κομμάτια χαλκοσωλήνα 8cm διατομής 15mm
- 15cm σωλήνα PVC Φ150

#### Ηλεκτρικά και ηλεκτρολογικά υλικά

- Μετασχηματιστής NEON υψηλής τάσης 230/10.000V 25mA
- Μετασχηματιστής 230/12V 100W
- Variac 0-230V 1KVA

- 12 Booster πυκνωτές υψηλής τάσης 100nF / 1600V
- 12 Αντιστάσεις 1MΩ
- 3 διάτρητες ηλεκτρονικές πλακέτες 7x10cm
- Ανορθωτική γέφυρα 100W
- Ανεμιστήρας 50W
- Αυτόματα ασφάλεια 6A
- Μονοπολικός διακόπτης 10A
- Ενδεικτική λυχνία
- Εξωτερικός στεγανός πίνακας 5 σειρών
- 15m καλώδιο 3x1.5mm εύκαμπτο
- 10m σπирάλ καλωδίων

#### Αναλώσιμα υλικά

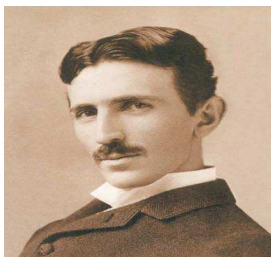
- Μονωτική ταινία
- Κόλλα στιγμής
- Κόλλα θερμοκόλλησης
- Ακροδέκτες (διάφοροι)
- Κος (διάφορα)
- Βίδες (διάφορες)
- Παξιμάδια (διάφορα)
- Ροδέλες (διάφορες)
- Τσέρκι
- Πινέλο
- Γυαλόχαρτο (διάφορα)

#### Εργαλεία χειρός και ηλεκτρικά εργαλεία

- Ηλεκτρικό δρόπανο
- Ηλεκτρικό κατσαβίδι
- Ηλεκτρικός τροχός
- Ηλεκτρικό τριβείο
- Πολύμετρο
- Φασίμετρο
- Κολλητήρι
- Πιστόλι θερμοκόλλησης
- Κατσαβίδια (διάφορα)
- Πένσα
- Κόφτης
- Μυτοσίμπιδο
- Σφυρί
- Πριονόλαμα
- Γερμανικά κλειδιά (διάφορα)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

### Βιογραφία του Nicola Tesla



Ο **Νίκολα Τέσλα** (10 Ιουλίου 1856- 7 Ιανουαρίου 1943) ήταν εφευρέτης, φυσικός, και ηλεκτρολόγος μηχανικός. Γεννημένος στο Σμίλιαν της σημερινής Κροατίας, ανήκε στη Σερβική κοινότητα της Αυστριακής Αυτοκρατορίας και αργότερα έγινε αμερικανός πολίτης.

Ο Τέσλα είναι κυρίως γνωστός για τις επαναστατικές του συνεισφορές στους κλάδους του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού στα τέλη του 19ου και τις αρχές του 20ου αιώνα. Οι ανακαλύψεις και η θεωρητική εργασία του αποτέλεσαν τη βάση για την εφαρμογή του σημερινού συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος. Εφευρέσεις όπως τα πολυφασικά συστήματα διανομής ισχύος και ο κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος συνετέλεσαν στην εκδήλωση της **“Δεύτερης Βιομηχανικής Επανάστασης”**. Μετά την πρώτη δημόσια επίδειξη ασύρματης επικοινωνίας στα 1893 και τη νίκη του στον **“Πόλεμο των ρευμάτων”**, κέρδισε πλατιά εκτίμηση ως ο μεγαλύτερος ηλεκτρολόγος μηχανικός στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Το μεγαλύτερο μέρος του πρώιμου έργου του άνοιξε το δρόμο για τη σύγχρονη επιστήμη της **ηλεκτρολογικής μηχανικής** και πολλές από τις ανακαλύψεις του ήταν πρωτοποριακές. Εκείνη την περίοδο, η φήμη του Τέσλα στις Ηνωμένες Πολιτείες ήταν μεγαλύτερη από κάθε άλλου εφευρέτη ή επιστήμονα στη λαϊκή συνείδηση, αλλά λόγω της εκκεντρικότητάς του και των περιέργων και μερικές φορές εξωφρενικών ισχυρισμών του για τις δυνατότητες της επιστημονικής και τεχνολογικής ανάπτυξης, τελικά εξοστρακίστηκε σαν τρελός επιστήμονας. Καθώς δεν φρόντιζε ιδιαίτερα τα οικονομικά του, ο Τέσλα πέθανε φτωχός σε ηλικία 86 χρόνων μονάδα της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο **SI**, το **Τέσλα**, ονομάστηκε προς τιμή του στο Γενικό Συνέδριο Μέτρων και Σταθμών

του Παρισιού το 1960. Εκτός από τη δουλειά του στον ηλεκτρομαγνητισμό και τα συστήματα ισχύος, ο Τέσλα λέγεται ότι έχει συνεισφορές και στη θεμελίωση της ρομποτικής, του τηλεχειρισμού, στην ανάπτυξη του ραντάρ και της επιστήμης υπολογιστών, όπως και στην επέκταση της βαλλιστικής, της πυρηνικής και θεωρητικής φυσικής. Το 1943 το Ανώτατο Δικαστήριο των Ηνωμένων Πολιτειών τον αναγνώρισε σαν τον εφευρέτη της ασύρματης επικοινωνίας. Πολλά από τα επιτεύγματά του έχουν χρησιμοποιηθεί για να υποστηριχτούν διάφορες **ψευδοεπιστήμες**, θεωρίες περί ΑΤΙΑ και, σε κάποιες περιπτώσεις, θεωρίες του **αποκρυφισμού** της Νέας Εποχής. Σύγχρονοι μελετητές του έργου του τον έχουν αποκαλέσει “τον άνθρωπο που εφύρε τον Εικοστό Αιώνα” και “προστάτη άγιο του σύγχρονου ηλεκτρισμού. Μετά το θάνατό του, η κληρονομιά του -

70.000 επιστολές, 31.522 προσωπικά ντοκουμέντα, 5.297 τεχνικά σχέδια, 12.832 αποκόμματα περιοδικών, 1.000 φωτογραφίες, 40 βραβεία και διπλώματα- φυλάσσεται σήμερα στο Μουσείο Νικόλα Τέσλα στο Βελιγράδι.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

### Φωτογραφίες Πηνίων Tesla



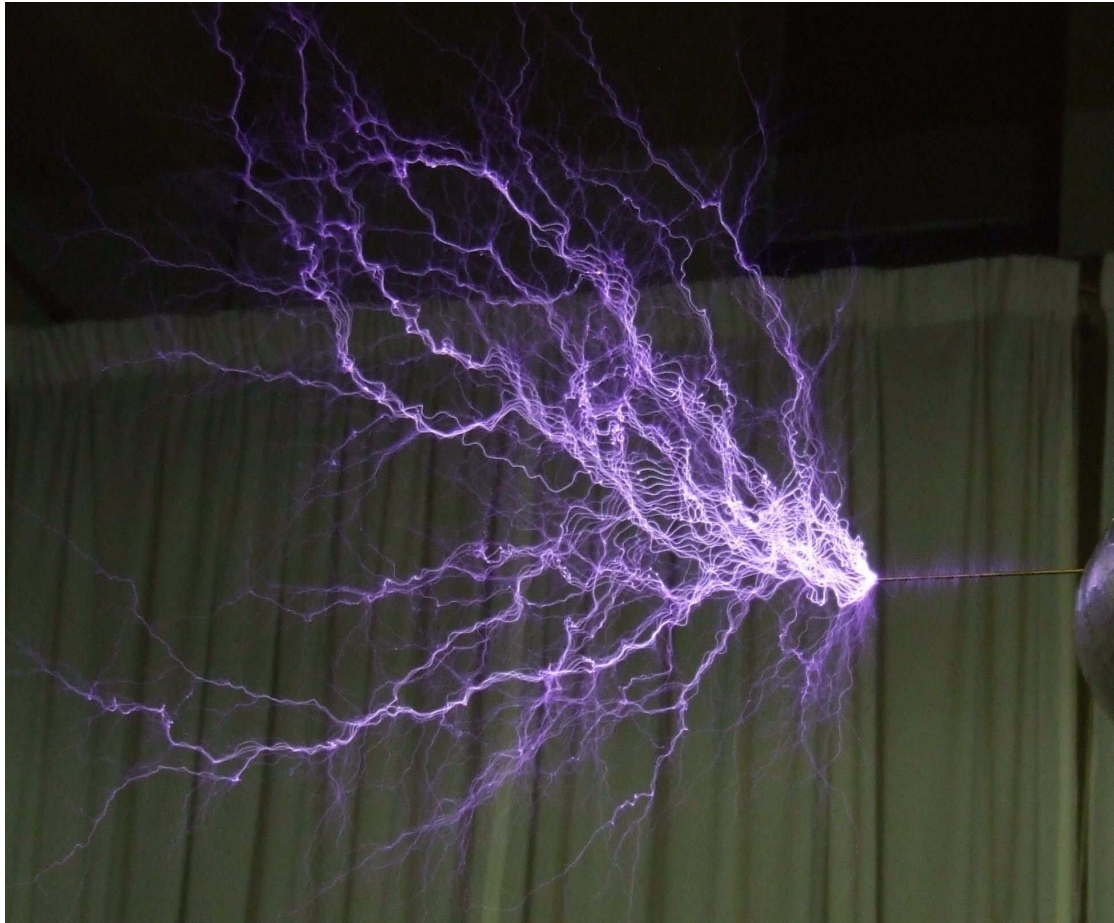


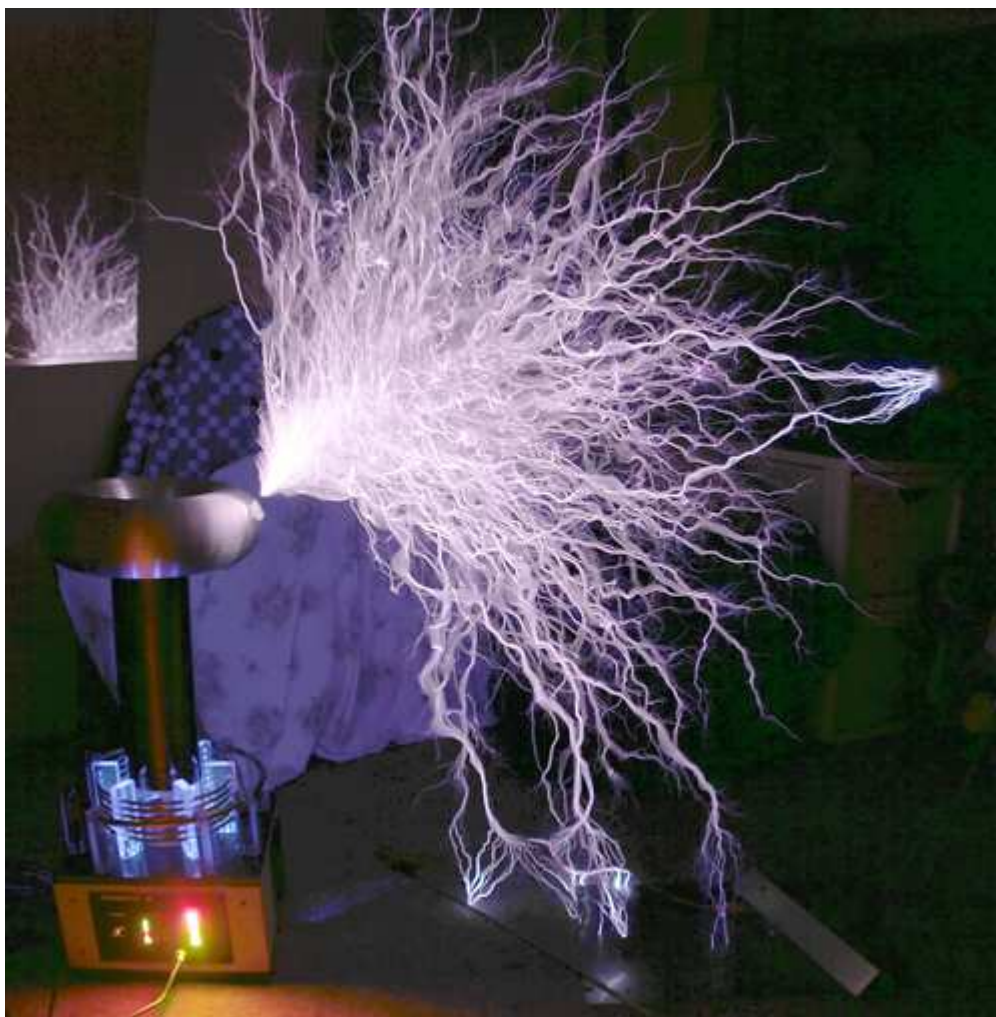


Μετασχηματιστής Tesla



Μετασχηματιστής Tesla





λ