

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμός 1357

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΗΝΙΟΥ TESLA

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΒΑΝΙΚΙΩΤΗΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:

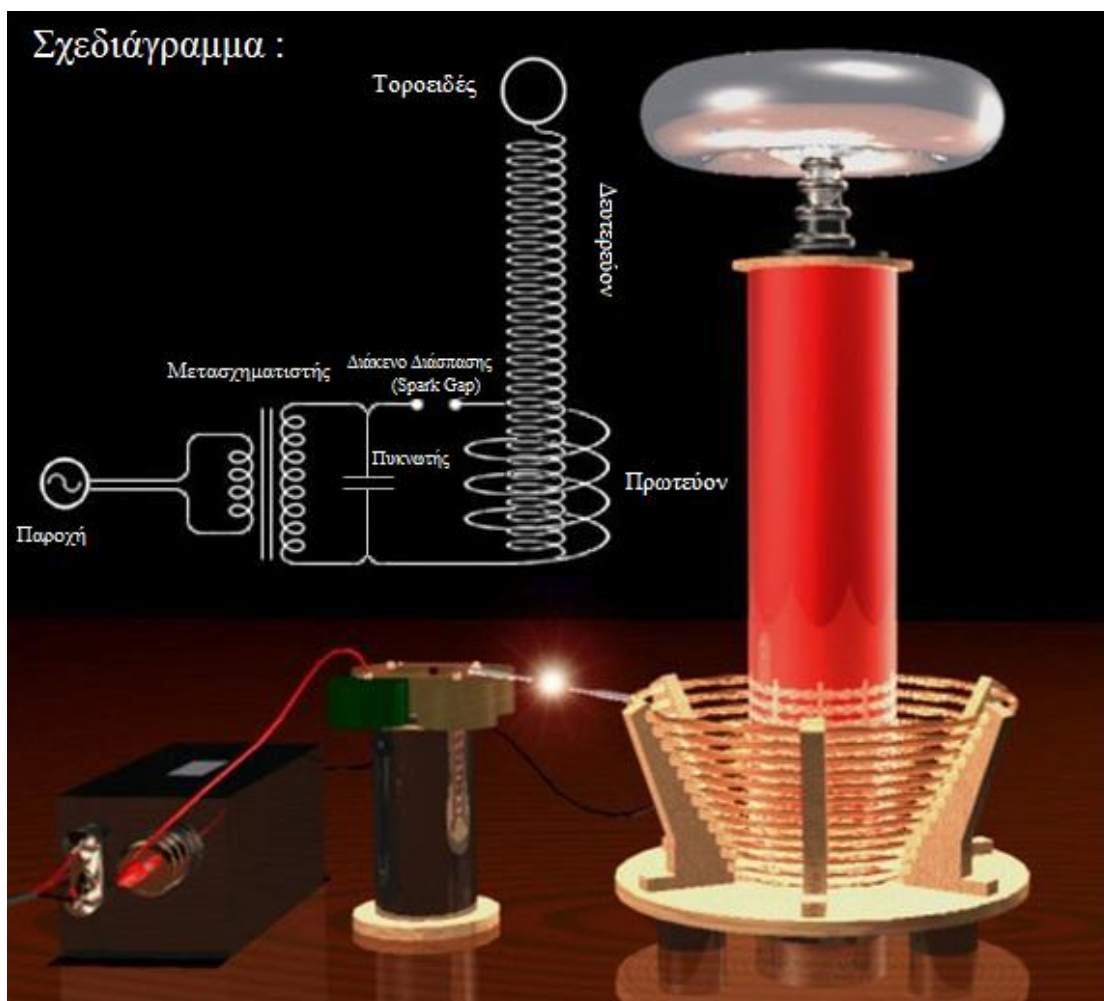
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΔΡΟΣΟΠΟΥΛΟΣ

ΠΑΤΡΑ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο μετασχηματιστής Tesla, ή αλλιώς πηνίο Tesla, είναι μία από τις πιο γνωστές εφευρέσεις του Nikola Tesla. Πρόκειται για μια συσκευή που παράγει υψηλή τάση, χαμηλής έντασης, υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος και χρησιμοποιήθηκε από τον Tesla σε διάφορα μεγέθη και παραλλαγές.

Ο Tesla χρησιμοποίησε το πηνίο για τη διεξαγωγή πρωτοπόρων πειραμάτων στον φωτισμό με πηγή το ηλεκτρικό ρεύμα, στο φωσφορισμό, στις ακτινογραφίες με ακτίνες X, στην ηλεκτροθεραπεία με εναλλασσόμενο ρεύμα και στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Σήμερα η κύρια χρήση τους είναι για διασκέδαση και για εκπαιδευτικές επιδείξεις.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

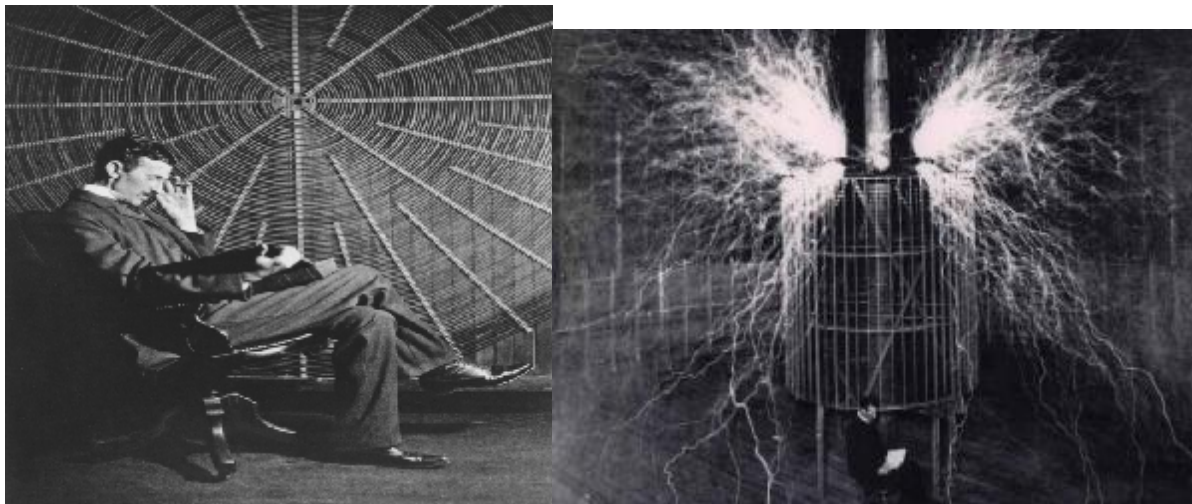
Το πηνίο Tesla είναι ένας υψηλής τάσης μετασχηματιστής κενού το οποίο δουλεύει με συντονισμό. Ένα πηνίο Tesla έχει έξι βασικά στοιχεία. Το πρώτο είναι ένας μετασχηματιστής υψηλής τάσης. Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται μετασχηματιστής NEON. Το δεύτερο στοιχείο είναι ο πυκνωτής πρωτεύοντος. Αυτός είναι ένας υψηλής τάσης πυκνωτής και συνήθως κατασκευάζεται από συστοιχία μικρότερων πυκνωτών, τους λεγόμενους πυκνωτές MMC (Multi MiniCapacitor). Το τρίτο είναι ένα διάκενο που λειτουργεί σαν διακόπτης(SparkGap). Στην απλούστερη του μορφή είναι ένα σφαιρικό διάκενο. Το τέταρτο, είναι ένα πηνίο που αποτελείται από περίπου 10 έως 15 σπείρες. Είναι κατασκευασμένο από παχύ, βαρύ σύρμα και αποτελεί το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή κενού. Το πέμπτο είναι το δευτερεύον πηνίο του μετασχηματιστή κενού και αποτελείται από πολλές εκατοντάδες στροφών του σχετικά λεπτού, μικρού διαμετρήματος σύρματος. Το πρωτεύον και δευτερεύον πηνίο συνθέτουν τον μετασχηματιστή κενού. Ο συγκεκριμένος τύπος μετασχηματιστή δεν έχει εσωτερικό πυρήνα σιδήρου. Το έκτο βασικό συστατικό είναι το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης. Είναι συνήθως από αλουμίνιο και έχει σχήμα τόρου ή σφαίρας. Τοποθετείται στην κορυφή του δευτερεύοντος πηνίου. Το στοιχείο αυτό αποτελεί το πρώτο ηλεκτρόδιο του πυκνωτή δευτερεύοντος. Σαν δεύτερο ηλεκτρόδιο ο πυκνωτής έχει τα γειωμένα μέρη του χώρου του οποίου βρίσκεται.

Για την κατασκευή ενός μικρού πηνίου Teslaθα γίνει χρήση υλικών χαμηλού κόστουςτα οποία είναι εύκολο να συγκεντρωθούν.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	2
Περίληψη	3
Εισαγωγή	5
1. Υλικά	
1.1 Συλλογή υλικών	6
1.2 Αναλώσιμα υλικά	12
1.3 Εργαλεία	12
2. Οδηγίες κατασκευής μικρού πηνίου Tesla	
2.1 Κατασκευή δευτερεύοντος πηνίου	13
2.2 Κατασκευή τοροειδούς	16
2.3 Συνδεσμολογία κυκλώματος	18
2.4 Δημιουργία διακένου διάσπασης	20
2.5 Τύλιγμα πρωτεύοντος	22
2.6 Καλιμπράρισμα και ασφαλή λειτουργία	25
2.7 Προσαρμογή τοροειδούς και ασύρματη μεταφορά ενέργειας	28
3. Ανάλυση λειτουργίας πηνίου Tesla	
3.1 Περιγραφή των στοιχείων και ιδιοτήτων που το αποτελούν	32
3.2 Επιλογή συνδεσμολογίας	36
3.3 Λειτουργία του πηνίου Tesla	37
Βιβλιογραφία	41
Παράρτημα	43

ΕΙΣΑΓΩΓΗ



Ο Nikola Tesla (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 Tesla 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.

Εκτός από τη δουλειά του στον ηλεκτρομαγνητισμό και τα συστήματα ισχύος έχει συνεισφορές και στη θεμελίωση της ρομποτικής, του τηλεχειρισμού, στην ανάπτυξη του ραντάρ και της επιστήμης υπολογιστών, όπως και την επέκταση της βαλλιστικής, της πυρηνικής και θεωρητικής φυσικής.

Το 1943 το Ανώτατο Δικαστήριο των Ηνωμένων Πολιτειών τον αναγνώρισε σαν τον αληθινό εφευρέτη του ράδιο έναντι του Guglielmo Marconi.

Προς τιμή του Tesla υπάρχει η ομώνυμη μονάδα μέτρησης της έντασης μαγνητικού πεδίου στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI).

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 Nikola Tesla στο Βελιγράδι.

Παρακάτω θα δοθούν οδηγίες για την κατασκευή ενός μικρού πηνίου Tesla. Ένα είδος συντονιζόμενου μετασχηματιστή κενού που δημιούργησε ο Tesla το 1891 με σκοπό να μεταφέρει ενέργεια ασύρματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

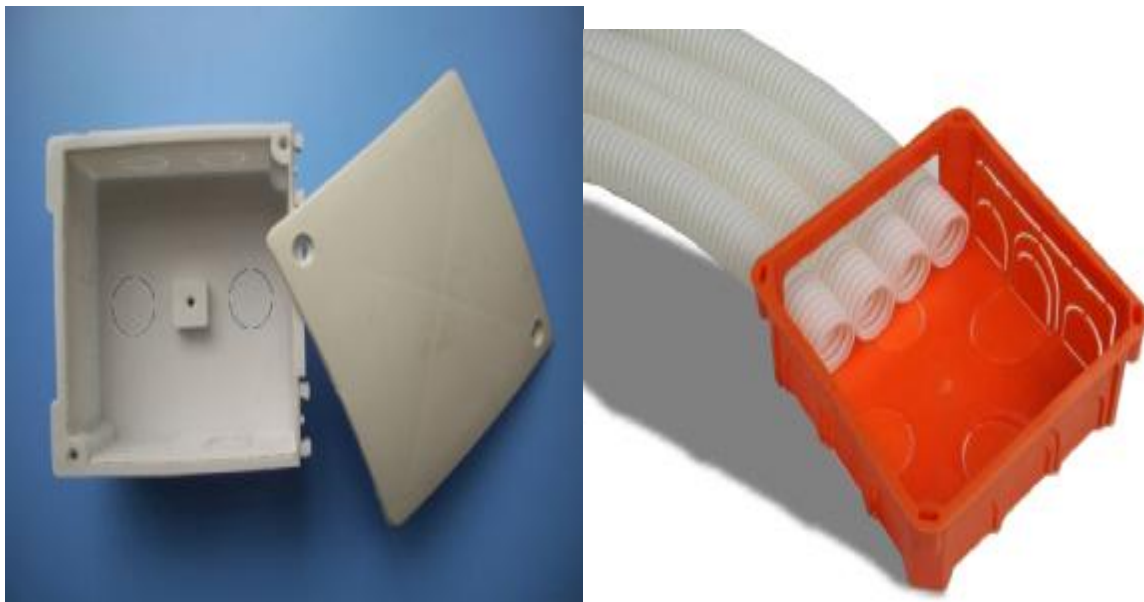
Υλικά

1.1 Συλλογή υλικών

Για τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν έγινε προσπάθεια να είναι οικονομικά και εύκολα στη συγκέντρωση. Το συνολικό κόστος της κατασκευής δεν ξεπέρασε τα 20 ευρώ.

Η λίστα είναι η ακόλουθη.

- Ηλεκτρολογικό πλαστικό κουτί



Εύκολο να βρεθεί σε οποιοδήποτε ηλεκτρολογικό κατάστημα.

Θα χρειαστεί και το καπάκι του για βάση του πηνίου.

Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε κουτί διαστάσεων 11x11x4 cm.

•Σωλήνας PVC



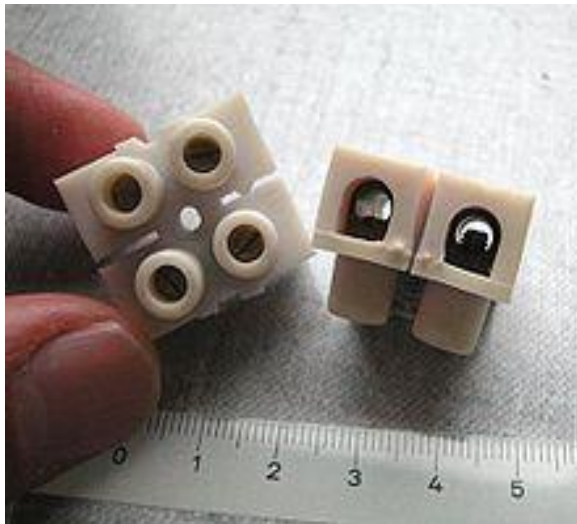
Υπάρχουν καταστήματα με υδραυλικά είδη που κόβουν πλαστικούς σωλήνες pvc σε διαστάσεις κατά παραγγελία. Εναλλακτικά μπορούν να βρεθούν σε κάποιο μεγάλο χρωματοπωλείο ή κατάστημα ηλεκτρολογικών ειδών για εγκαταστάσεις.

Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε PVCσωλήνας με 13cmμήκος και 3cmεξωτερική διάμετρο.

• Το κάτω μέρος απο 2 αλουμινένια κουτάκια



• Κλέμες, 3 ζευγάρια



• Το κύκλωμα από αντικουνουπική ρακέτα



Σε μεγάλα καταστήματα παιχνιδιών θα είναι εύκολο να βρεθεί μια τέτοια ρακέτα.

Το κύκλωμα υψηλή τάσης που διαθέτει ανυψώνει τα 3V σε εκατοντάδες φορές περισσότερα.

Γίνεται αφαίρεση όλων των βιδών από την ρακέτα και προσεκτικός χωρισμός των πλαστικών κομματιών για να μην κοπεί κάποιος αγωγός.

Υπολογίζουμε το μήκος των αγωγών που συνδέονται με τη ρακέτα να είναι περίπου 3-5 cm και κόβουμε όσο σύρμα περισσεύει μαζί με το πάνω μέρος της ρακέτας.

Για να είναι πιο εύκολη η λειτουργία του πηνίου μπορεί να γίνει αντικατάσταση του μικρού διακόπτη επαναφοράς με διακόπτη On/Off και της θήκης μπαταριών με μετασχηματιστή υποβίβασης τάσης σε 3V.

Η συνδεσμολογία της ρακέτας είναι ενδεικτική και μπορεί να διαφέρει σε άλλες ρακέτες που έχουν π.χ. επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ή 2 διακόπτες.

- Απλός διακόπτης On/Off



- Μετασχηματιστής 230V → 3V



Θα χρειαστεί να κοπεί το βύσμα για να συνδεθούν τα καλώδια σε κλέμα, εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν 2 μπαταρίες 1.5V σε σειρά με την θήκη μπαταριών της ρακέτας.

•Στερεοφωνικό καλώδιο



Για την κατασκευή δοκιμάστηκαν διαφορα είδη καλωδίων και τρόποι τοποθέτησης για την δημιουργία του πρωτεύοντος τυλίγματος.

Το στερεοφωνικό καλώδιο, μονωμένο και τυλιγμένο γύρω από το δευτερεύον αποδείχτηκε το πιο αποδοτικό στην μεταφορά ενέργειας.

Το καλώδιο πωλείται σε όλα τα καταστήματα με μουσικά είδη και σε αρκετά καταστήματα ηλεκτρολογικών ειδών.

Θα χρειαστούν περίπου 1,10 με 1,40μέτρα με εξωτερικη διαμετρο περίπου 0,3cm-0,5cm

•Εμαγιέ χάλκινο σύρμα



Μπορεί να ζητηθεί σε διατομή και μήκος κατά παραγγελία σε καταστήματα που ασχολούνται με περιελίξεις και γενικότερα χάλκινους αγωγούς.

Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε σύρμα διατομής $0,07\text{mm}^2$

Και μήκους περίπου 35 μέτρων. (Βάρος περίπου 20g)

1.2 Αναλώσιμα υλικά

Χρειάστηκαν τα ακόλουθα:

- Κόλλα θερμοκόλλησης
- Κόλλα στιγμής
- Μονωτική ταινία
- Ταινία διπλής όψης
- Γυαλόχαρτο
- Παξιμάδια
- Βίδες
- Συνδετήρας
- Καλάι
- Μικρά τμήματα καλωδίων για ενώσεις (3cm μέχρι 15cm)
- Σελοτέιπ

1.3 Εργαλεία

- Ηλεκτρικό κολλητήρι
- Πιστόλι θερμοκόλλησης
- Κόφτης
- Κατσαβίδια
- Πένσα
- Μέτρο– μεζούρα
- Δοκιμαστικό κατσαβίδι
- Απογυμνωτής καλωδίων
- Μικρόμετρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Οδηγίες κατασκευής μικρού πηνίου Tesla

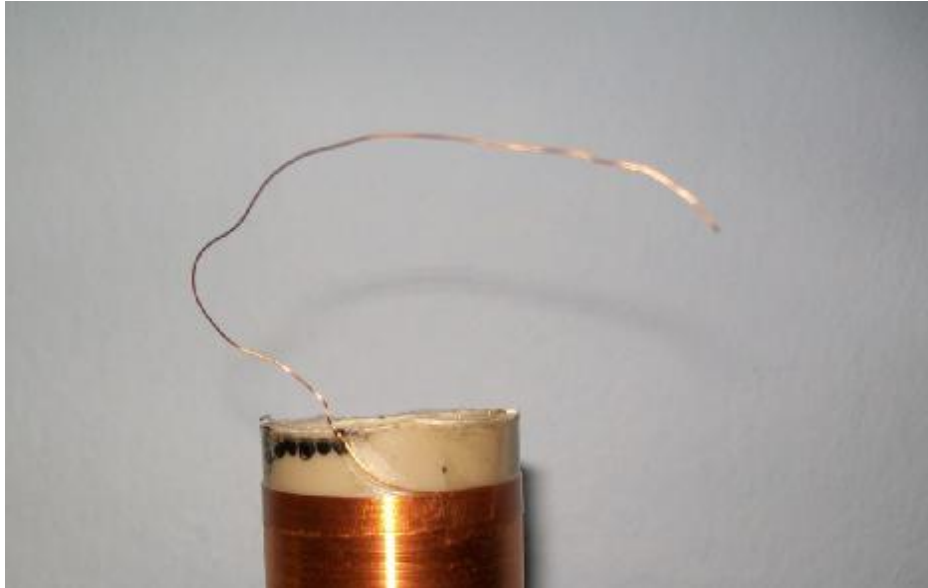
2.1 Κατασκευή δευτερεύοντος πηνίου

Για την κατασκευή του δευτερεύοντος θα γίνει περιέλιξη του χάλκινου σύρματος γύρω από τον ηνc σωλήνα. Χρησιμοποιούμε σελοτέιπ για να κρατήσουμε σταθερό το σύρμα σε ένα από τα άκρα του σωλήνα και τυλίγουμε το σύρμα περιστροφικά μέχρι να φτάσει σε ύψος περίπου 1 cm κάτω από την κορυφή.

Όσο πιο καλά εφάπτονται η σπείρες του τυλίγματος η μια πάνω από την άλλη και είναι σφιχτές ώστε να μην μετακινούνται, τόσο πιο αποδοτικό θα είναι το δευτερεύον.



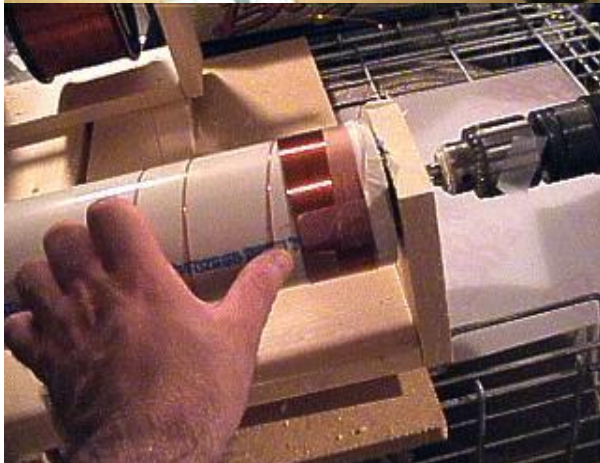
Όταν ολοκληρωθεί το τύλιγμα χρησιμοποιούμε πάλι σελοτέιπ περιμετρικά του σωλήνα για να κρατήσουμε σταθερές τις τελευταίες σπείρες του πηνίου και αφήνουμε περίπου 7 cm χάλκινο σύρμα ελεύθερο να περισσεύει.



Τέλος παίρνουμε γυαλόχαρτο ή σμυριδόπανο και τρίβουμε λίγο τα τελευταία 5-6 εκατοστά του σύρματος για να απομακρύνουμε την εξωτερική μόνωση του χαλκού και όποια πιθανή συσσωρευμένη σκόνη ή βρωμιά.



Για μεγαλύτερη ευκολία στην περιέλιξη μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κάποια αυτοσχέδια κατασκευή με μοτεράκι και χαμηλές στροφές ή κάποιο μικρό τórνο.



2.1 Κατασκευή τοροειδούς

Παίρνουμε το κάτω μέρος από τα 2 κουτάκια και μια μακρόστενη βίδα με παξιμάδι. Ο σκοπός της βίδας είναι να συγκρατήσει τα 2 κομμάτια μαζί για αυτό δεν έχει σημασία η ακριβής διάσταση. Ανοιγούμε μια τρύπα σε κάθε κομμάτι στη μέση του, με διάμετρο λίγο μικρότερη από τη διάμετρο της βίδας να μπορέσει να σφίξει.



Βιδώνουμε τα 2 κομμάτια με το κάτω μέρος από το κουτάκι στην εξωτερική μεριά και περνάμε και σφίγγουμε το παξιμάδι. Το αποτέλεσμα είναι ένα τοροειδές με ένα κένο στην μέση, οπότε θα προσπαθήσουμε να “πιέσουμε” το κομμάτι με το κεφάλι της βίδας μέσα στο άλλο ωστέ να ενωθούν τα κομμάτια και όσο γίνεται να μην υπάρχει κενό.





Τελικά το σχήμα θε πρέπει να είναι περίπου όπως την παρακάτω εικόνα.



Αυτό το τοροειδές είναι ενδεικτικό και χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί οτιδήποτε παρόμοιο ή ακόμα και ένας κρίκος από αλουμινόχαρτο.

2.3 Συνδεσμολογία κυκλώματος



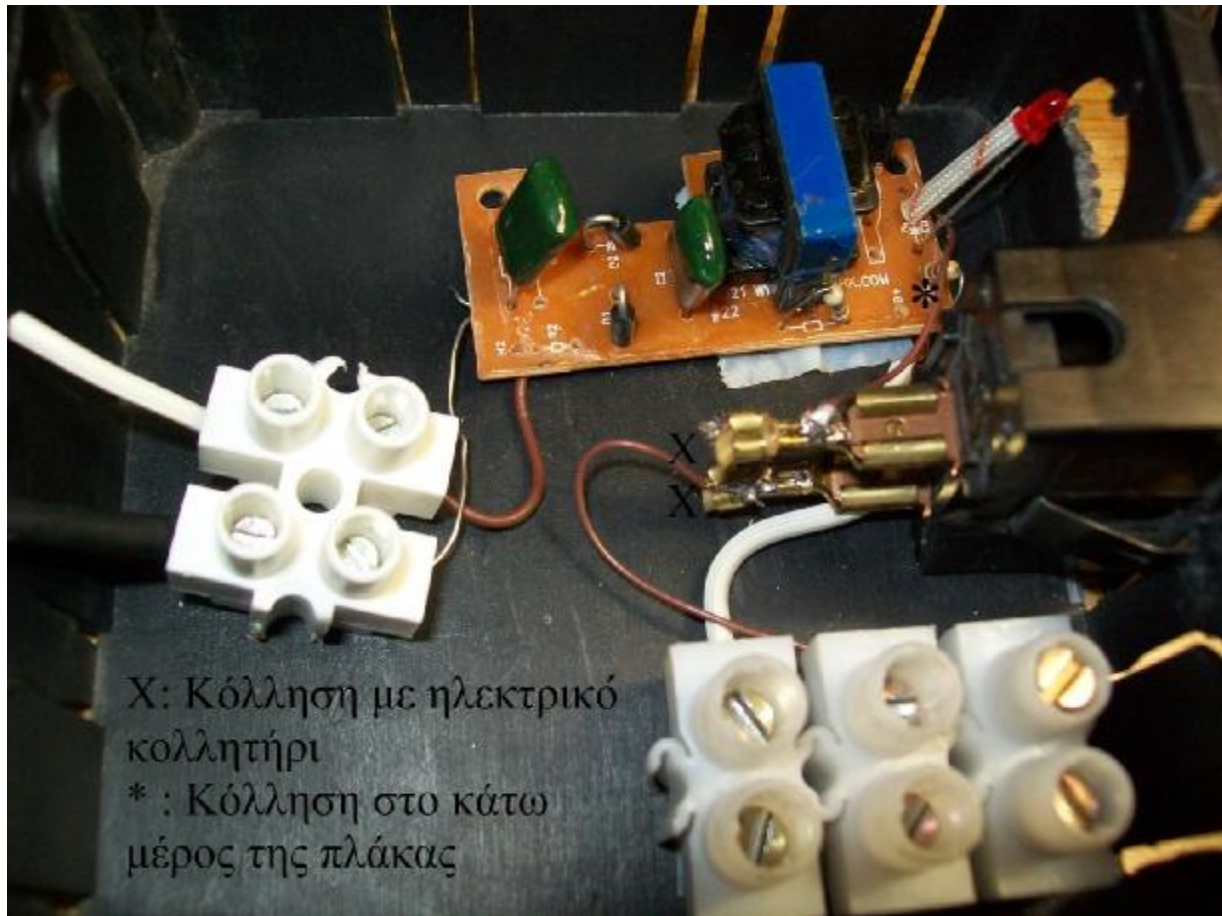
Η συνδεσμολογία μέσα στο ηλεκτρολογικό κουτί είναι εύκολη, αρκεί να προσέξουμε να είναι σωστές οι πολικότητες.

Αρχικά παίρνουμε τα 2 άκρα του μετασχηματιστή και τα περνάμε μέσα σε μια από τις εσοχές του κουτιού για να τα συνδέσουμε με μια κλέμα.

Την κλέμα για ευκολία μπορούμε να την ακινητοποιήσουμε με ταινία διπλής όψης ή με θερμοκόλληση.

Ανάλογα με τον διακόπτη που έχουμε μπορούμε να δοκιμάσουμε να τον ενσωματώσουμε στο κουτί, διαφορετικά τον αφήνουμε εξωτερικά.

Από την κλέμα συνδέουμε το ένα άκρο με το αντίστοιχης πολικότητας άκρο του κυκλώματος υψηλής τάσης(π.χ. το θετικό άκρο του μετασχηματιστή με το άκρο του κυκλώματος που ήταν συνδεδεμένο με τον θετικό πόλο της θήκης μπαταριών) και στο άλλο άκρο παρεμβάλουμε τον διακόπτη.



Ανάλογα με τα καλώδια και το είδος του διακόπτη είναι πιθανό να χρειαστεί ηλεκτρικό κολλητήρι.

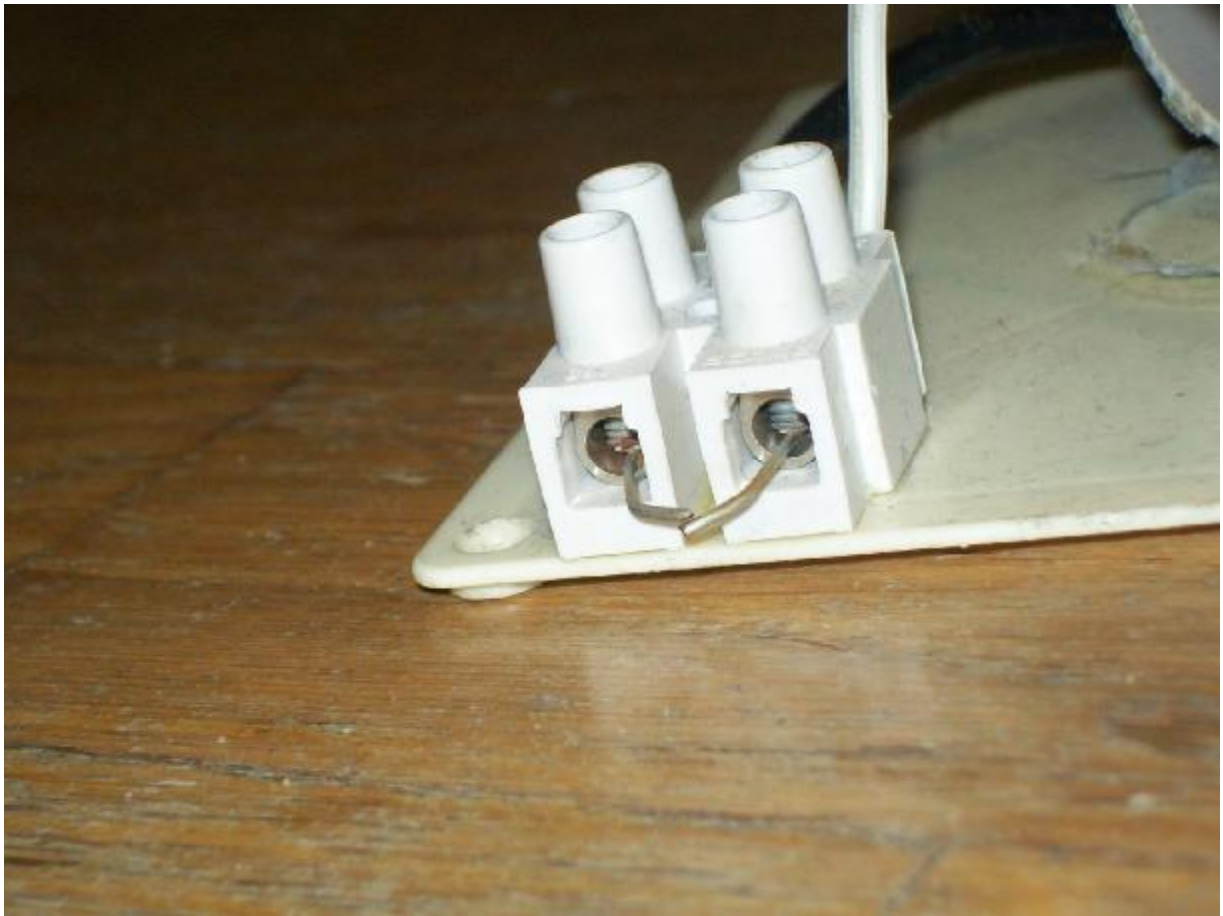
Πιθανώς να χρειαστούν και επιπλέον μικρά καλώδια αν τα καλώδια της ρακέτας ήταν μικρά ή αν είχε κοπεί καποιο.

Συνδέουμε στην έξοδο του κυκλώματος μια κλέμα που στην συνέχεια θα ενωθούν το πρωτεύον και το διάκενο διάσπασης.

Η πολικότητα εδώ δεν έχει σημασία.

2.4 Δημιουργία διακένου διάσπασης

Το διάκενο διάσπασης (sparkgap) είναι ένα είδος σπινθηριστή που λειτουργεί σαν διακόπτης. Στην απλούστερη μορφή του αποτελείται από 2 αγωγούς σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους και όταν η τάση στα άκρα τους γίνει αρκετά υψηλή, ο αέρας αναμεσά τους ionίζεται και προκαλεί ένα επιθυμητό βραχυκύκλωμα.



Κόβουμε με ένα κοφτάκι από ένα μεσαίου μεγέθους συνδετήρα 2 περίπου ισομήκη κομμάτια τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως αγωγοί.

Τα βιδώνουμε μέσα στην κλέμα και τα κάμπτουμε ώστε να έρθουν πολύ κοντά μεταξύ τους αλλά να μην αγγίζονται.



Στην συνέχεια της κατασκευής θα χρειαστεί να καλιμπράρουμε την απόσταση των αγωγών για να έχουμε κατάλληλη συχνότητα ενεργοποίησης του διακένου διάσπασης για την ομαλή λειτουργία του πηνίου.

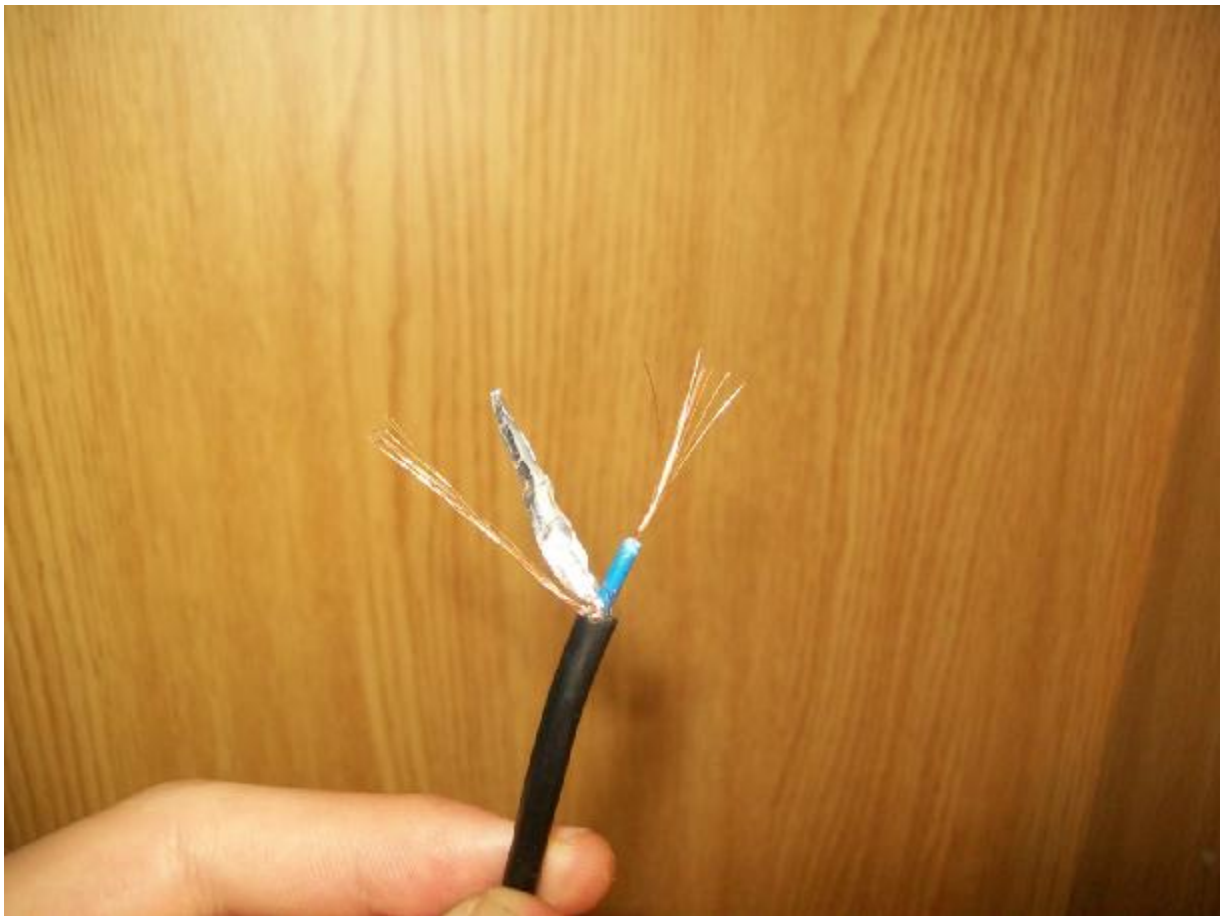


Συνδέουμε με καλώδιο ένα από τα 2 κενά άκρα της κλέμας του διακένου διάσπασης με την κλέμα που ενώνεται με την έξοδο του κυκλώματος υψηλής τάσης μέσα στο ηλεκτρολογικό κουτί.

Στο πάνω μέρος του κουτιού μπορούμε να κολλήσουμε την κλέμα του διακένου για να έχουμε σταθερότητα και να είναι πιο εύκολο τοκαλιμπράρισμα.

2.5 Τύλιγμα πρωτεύοντος

Το στερεοφωνικό καλώδιο ανάλογα με τον τύπο του μπορεί να διαφέρει. Στην πιο απλή μορφή του είναι 2 μονωμένα καλώδια το ένα εσωτερικά του άλλου και ένα υλικό ανάμεσα τους, το οποίο παρέχει προστασία απο παρεμβολές.



Στα άκρα που θα χρησιμοποιήσουμε ενώνουμε τα σύρματα μεταξύ τους και κόβουμε το υλικό που περισσεύει.

Αρχικά συνδέουμε το ένα άκρο του πρωτεύοντος καλωδίου στο άκρο της κλέμας που ενώνεται με την έξοδο του κυκλώματος υψηλής τάσης και φροντίζουμε το υπόλοιπο καλώδιο να προεκτείνεται έξω από το κουτί.

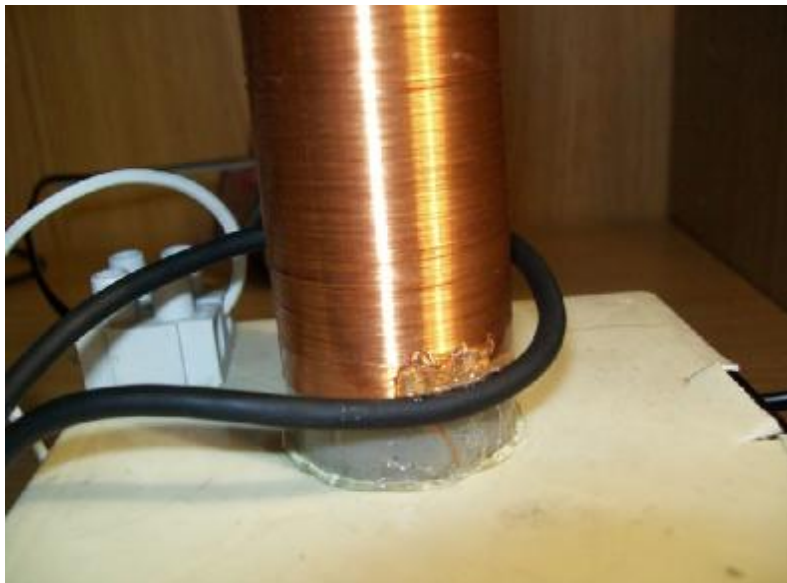
Χρησιμοποιούμε το πιστόλι κόλλας για να κολλήσουμε το δευτερεύον στο πάνω μέρος του ηλεκτρολογικού κουτιού.

Η πλευρά που περισσεύει το χάλκινο σύρμα είναι η πάνω.

Ανάλογα με τις παραμέτρους του κυκλώματος, του δευτερεύοντος πηνιου και του καλωδίου που χρησιμοποιούμε για το πρωτεύον, χρειάζεται συγκεκριμένος αριθμός στροφών γύρω απο το δευτερεύον ο οποίος θα διαπιστωθεί πειραματικά.



Με το πιστόλι κόλλας ακινητοποιούμε την αρχή της πρώτης σπείρας για ευκολία.



Ξεκινάμε να τυλίγουμε το καλώδιο γύρω απο το δευτερεύον μέχρι να φτάσουμε περίπου 8-9 σπείρες και χρησιμοποιούμε μονωτική ταινία για να το σταθεροποιήσουμε στο κατάλληλο ύψος. Στη συνέχεια θα καλιμπράρουμε το διάκενο διάσπασης και θα βρούμε τον ιδανικό αριθμό σπειρών για την καλύτερη μεταφορά ενέργειας.

Για να γίνει αυτό συνδεούμε το καλώδιο του πρωτεύοντος που έχει περισσέψει στο τελευταίο κενό άκρο του διακένου.



2.6 Καλιμπράρισμα και ασφαλή λειτουργία

Με την περιέλιξη του πρωτεύοντος γύρω απο δευτερεύον και την ένωση του στο διάκενο διάσπασης μπορούμε να ενεργοποιήσουμε το πηνίο με σκοπό να ρυθμίσουμε αρχικά την σωστή απόσταση των αγωγών του διακένου και στη συνέχεια τον αριθμό των στροφών του πρωτεύοντος.

Σχετικά με την ασφαλή λειτουργία.



Αν το πηνίο έχει κατασκευαστεί με τις παραμέτρους που έχουν δοθεί, τότε η μικρή εκφόρτιση στην κορυφή του θα είναι ακίνδυνη και η μόνη αίσθηση στην αφή θα είναι ίσως ένα μικρό μούδιασμα.

Η εκφόρτιση απο το διάκενο διάσπασης μπορεί να είναι επώδυνη στην αφή οπότε χρησιμοποιούμε καποιο κατσαβίδι για να το επεξεργαζόμαστε.

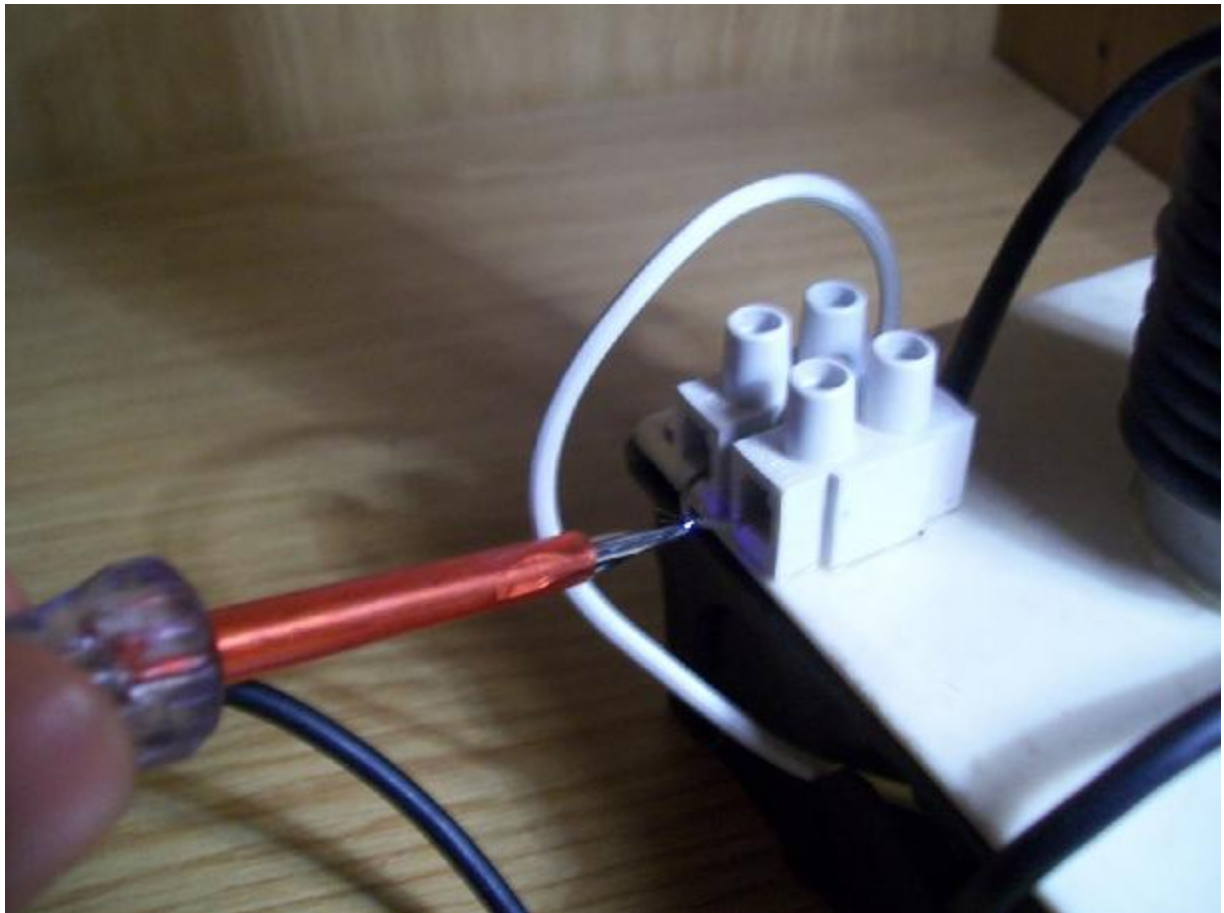
Να σημειωθεί οτί και αφού απενεργοποιήσουμε το πηνίο ο πυκνωτής μπορεί να είναι ακόμα φορτισμένος.

Αν βραχυκυκλώσουμε το διάκενο διάσπασης τότε θα εκφορτιστεί πλήρως αλλά θα μειωθεί η διάρκεια ζωής του.

Το πηνίο παράγει ηλεκτρομαγνητίσμο υπάρχουν συσκευές που πιθανώς να επηρεάζονται Τέλος υπάρχει η παραγωγή του όζοντος στον αέρα (έχει χαρακτηριστική μυρωδιά και ετσι μπορεί να γνωρίζει κάποιος πότε το εισπνέει)η οποία δεν είναι επικίνδυνη στις μικρές συγκεντρώσεις που προκαλεί το πηνίο εκτός και αν κάποιος αναπνέει καθημερινά για αρκετές ώρες.

Για το καλιμπράρισμα του διακένου διάσπασης φροντίζουμε οι αγωγοί να μην εφάπτονται αλλά να έχουν ένα μικρό κενό μεταξύ τους.

Ενεργοποιούμε το πηνίο και χρησιμοποιώντας ένα κατσαβίδι προσπαθούμε να λυγίσουμε η να κάμψουμε τους 2 αγωγούς με σκοπό να φτάσουν στην μεγαλύτερη δυνατή απόσταση που ο αέρας ανάμεσά τους εξακολουθεί να ιονίζεται με υψηλή και σταθερή συχνότητα αρκετές φορές το δευτερόλεπτο.



Έχοντας καταφέρει να φτάσουμε το διάκενο διάσπασης σε μια σταθερή κατάσταση λειτουργίας αρχίζουμε να πειραματιζόμαστε με τον αριθμό σπειρών του πρωτεύοντος.

Για να γίνει αυτό πλησιάζουμε ένα κατσαβίδι στο χαλκό που περισσεύει από το δευτερεύον και παρατηρούμε το μήκος της εκφόρτισης η οποία θα κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,5 -3 cm.

Με χαμηλό φωτισμό είναι πιο εύκολο να την διακρίνουμε.

Αρχίζουμε να αφαιρούμε ή να προσθέτουμε σπείρες και υπολογίζουμε πάλι το μήκος της εκφόρτισης.

Όταν διαπιστωθεί ο κατάλληλος αριθμός σπειρών για να έχουμε την μεγαλύτερου μήκους δυνατή εκφόρτιση, χρησιμοποιούμε το πιστόλι κόλλας για να ακινητοποιήσουμε την περιέλιξη στην επιθυμητή θέση.



2.7 Προσαρμογή τοροειδούς και ασύρματη μεταφορά ενέργειας

Παίρνουμε το τοροειδές και τυλίγουμε το χάλκινο σύρμα του πρωτεύοντος που περισσεύει γύρω από το κάτω μέρος της βίδας του τοροειδούς, αφήνοντας μια ανοχή χάλκινου σύρματος περίπου 2-3 cm.



Χρησιμοποιούμε το πιστόλι κόλλας για να ενώσουμε το δευτερεύον με το τοροειδές

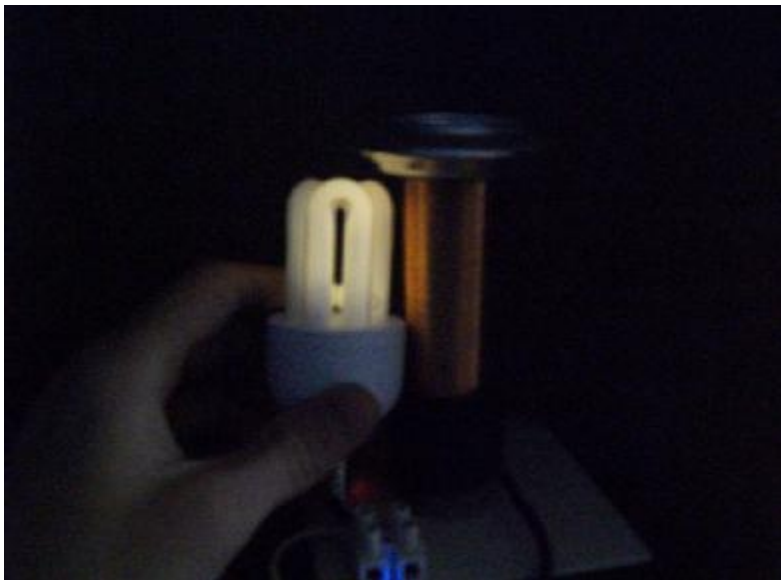




Πλέον έχει ολοκληρωθεί ένα μικρό πηνίο Tesla και επόμενο βήμα είναι να διαπιστωθεί αν μπορεί να μεταφέρει ενέργεια ασύρματα.

Ένα απλό πείραμα είναι να πάρουμε μια μικρή λάμπα φθορισμού και να την πλησιάσουμε κοντά στο πηνίο όταν είναι ενεργοποιημένο.

Αν η λάμπα φωτίσει η κατασκευή θα έχει πετύχει τον σκοπό της.





Μπορούμε να δοκιμάσουμε να πλησιάσουμε και άλλα αντικείμενα στο πηνίο και να παρατηρήσουμε πως αλληλεπιδρούν, όπως λάμπες πυρακτώσεως, συσκευές που δουλεύουν με κύματα όπως το ραδιόφωνο ή οι ασύρματοι, ηχεία και άλλα.

Να σημειωθεί ότι ορισμένες συσκευές μπορεί να δυσλειτουργήσουν.

Ένα laptop που έτυχε να είναι κοντά στο πηνίο έκανε επανεκκίνηση οπότε δεν ενδείκνυται η χρήση του πηνίου κοντά σε τέτοιου είδους συσκευές.

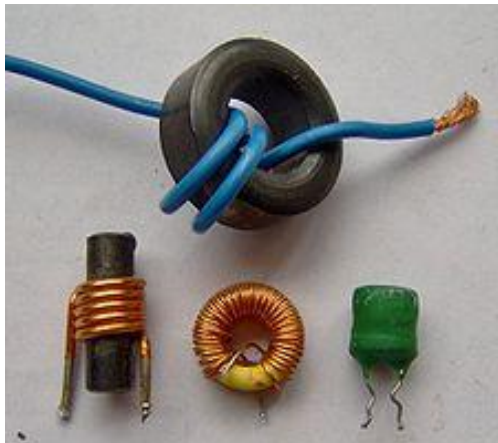
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ανάλυση λειτουργίας πηνίου Tesla

3.1 Περιγραφή στοιχείων και ιδιοτήτων που το αποτελούν

Για να γίνει κατανοητό πώς λειτουργεί ένα πηνίο Tesla θα πρέπει να καταλάβουμε ορισμένα πράγματα για τα στοιχεία και τις ιδιότητες που το αποτελούν.

• Πηνία

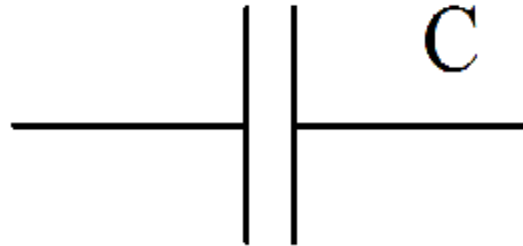


Η συμμάτινη περιέλιξη του πηνίου αναπτύσσει μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του όταν διαρρέεται από ρεύμα και έτσι μπορεί να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μαγνητική. Το σύρμα είναι μονωμένο ώστε να το ρεύμα να διέρχεται μέσα από όλες τις στροφές. Χαρακτηριστικό μέγεθος του πηνίου είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής που συμβολίζεται με L και μετρείται σε Henry. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του πηνίου όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα δίνεται από τη σχέση

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

όπου n ο αριθμός των σπειρών του πηνίου, l το μήκος του πηνίου, I το ρεύμα που το διαρρέει, μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα κενού] και μ_r η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του πυρήνα (για το κενό, $\mu_r=1$).

•Πυκνωτές



Ο πυκνωτής δημιουργείται όταν μεταξύ 2 αγωγών παρεμβάλλουμε καποίο είδος μονωτικού υλικού. Οι δύο αγωγοί ονομάζονται οπλισμοί του πυκνωτή, ενώ το παρεμβαλλόμενο υλικό ονομάζεται διηλεκτρικό του πυκνωτή. Βασικό χαρακτηριστικό κάθε πυκνωτή είναι η ιδιότητά του να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια. Όταν ένας πυκνωτής είναι φορτισμένος, οι οπλισμοί του έχουν ηλεκτρικά φορτία κατά μέτρο ίσα και αντίθετα. Μεταξύ των οπλισμών ενός φορτισμένου πυκνωτή αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού η οποία ονομάζεται τάση του πυκνωτή (V_c). Το πηλίκο του φορτίου ενός πυκνωτή προς την τάση του ονομάζεται χωρητικότητα (C) του πυκνωτή και μετριέται σε Farad.

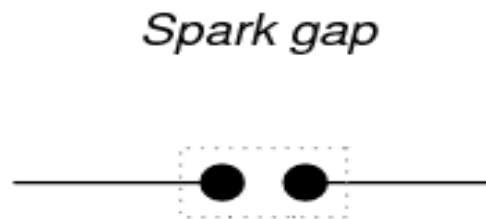
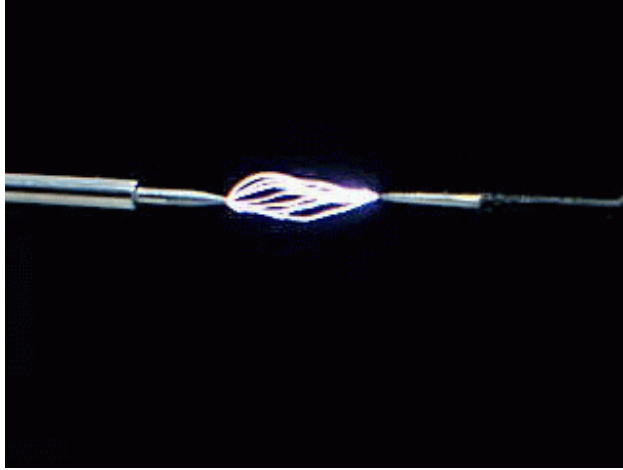
$$C = \frac{Q}{V}$$

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και από τη φύση του διηλεκτρικού του, είναι όμως ανεξάρτητη από το υλικό των οπλισμών του.

Μια μεταφορά για να κατανοήσουμε την λειτουργία ενός πυκνωτή είναι να θεωρηθεί σαν ένα σφουγγάρι που απορροφά νερό. Ανάλογα με την κατασκευή του σφουγγαριού χρειάζεται διαφορετικός χρόνος για να απορροφήσει όλο το νερό και ανάλογα με το μεγθός του μπορεί να συκρατήσει διαφορετική ποσότητα. Αν στη συνέχεια συμπιεστεί τότε μια μεγάλη ποσότητα του νερού που είχε παγιδεύσει απελευθερώνεται σε αναλογικά πολύ μικρότερο χρόνο.

Σε ένα πηνίο Tesla η διάρκεια της φόρτισης του πυκνωτή μπορεί να κυμαίνεται σε millisecc και της εκφόρτισης σε microsec ή nanosec.

• Διάκενο διάσπασης (Spark gap)

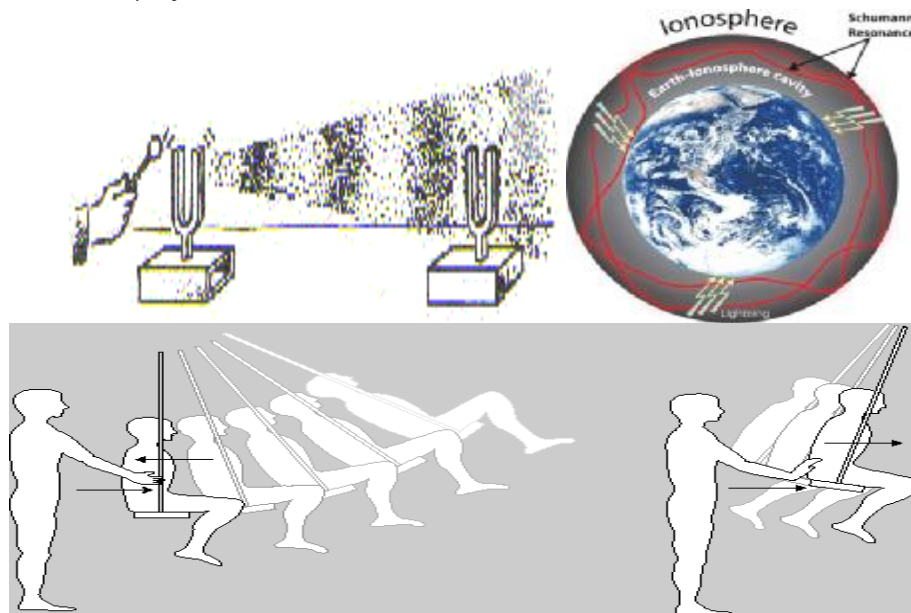


Ο αναφλεκτήρας (μπουζί) σε ένα αυτοκίνητο έχει την ίδια αρχή λειτουργίας με το διάκενο διάσπασης. Όταν μεταξύ των ηλεκτροδίων του αναφλεκτήρα εφαρμοσθεί αρκετά υψηλή τάση, τότε δημιουργείται σπινθήρας και προκαλεί την ανάφλεξη του μίγματος αέρα-καυσίμου. Στην περίπτωση του διάκενου διάσπασης όταν ο αέρας μεταξύ των αγωγών ιονιστεί, τότε η αντίσταση του αέρα πέφτει σε πολύ χαμηλές τιμές, επιτρέποντας μια συνεχόμενη αγωγή για όσο συνεχίζει να εφαρμόζεται μια συγκεκριμένη τιμή ρεύματος. (Ρεύμα συγκράτησης)

Για την βέλτιστη λειτουργία του πηνίου Tesla, το διάκενο διάσπασης πρέπει να ενεργοποιείται περιοδικά και όχι συνεχόμενα για να μπορεί ο πυκνωτής να φορτίζεται και να εκφορτίζεται στο μέγιστο των δυνατοτήτων του.

Αυτός είναι ο λόγος που καλιμπράρουμε το διάκενο στην μέγιστη δυνατή απόσταση που του επιτρέπει να ιονίζει τον αέρα, ωστόσο χωρίς συνεχόμενη διάρκεια αλλά με μια διακοπτόμενη αλλά πολύ υψηλή συχνότητα.

•Συντονισμός (Resonance)



Συντονισμός στην κυματική καλείται το φαινόμενο της εξαναγκασμένης ταλάντωσης κατά το οποίο η συχνότητα του διεγέρτη ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή.

Κάθε ταλαντωτής μπορεί να ταλαντώνεται σε μία ή περισσότερες συχνότητες. Όταν το σύστημα διεγείρεται στιγμιαία, τότε αρχίζει η ταλάντωση η οποία συμβαίνει με συχνότητα που ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητά του. Όταν η ταλάντωση είναι εξαναγκασμένη, η συχνότητα της είναι η συχνότητα του διεγέρτη. Όταν η συχνότητα του διεγέρτη ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή έχουμε συντονισμό.

Για να κατανοήσουμε την ιδιότητα του συντονισμού μπορούμε να φανταστούμε μια κούνια.

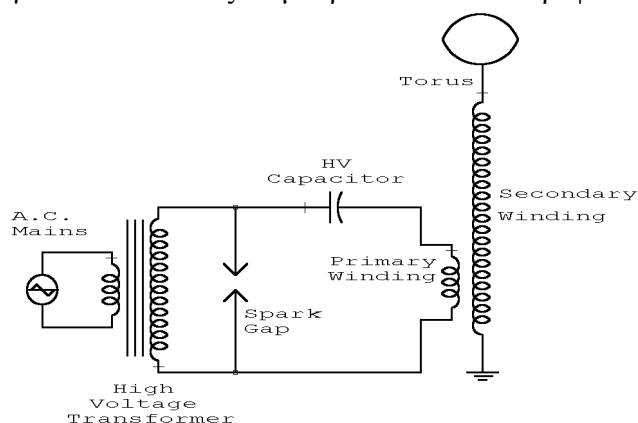
Εάν αφεθεί μόνης της να ταλαντευτεί έχει μια δικιά της ιδιοσυχνότητα που προκύπτει από την κατασκευή της κούνιας. Αν τώρα κάποιος αποφασίσει να σταθεί πίσω από την κούνια και παρατηρήσει την περιοδική κίνηση που κάνει, αν θέλει να της δώσει ώθηση αποτελεσματικά, θα το κάνει την στιγμή που η κούνια έχει ολοκληρώσει τον κύκλο της ταλάντωσης και είναι έτοιμη να ξεκινήσει τον καινούργιο. Έτσι η ώθηση που δίνεται βρίσκεται σε συντονισμό με την κίνηση της κούνιας.

Ο συντονισμός δεν μεγαλώνει την ενέργεια, αυτό που κάνει είναι να επιτρέπει την μεταφορά της.

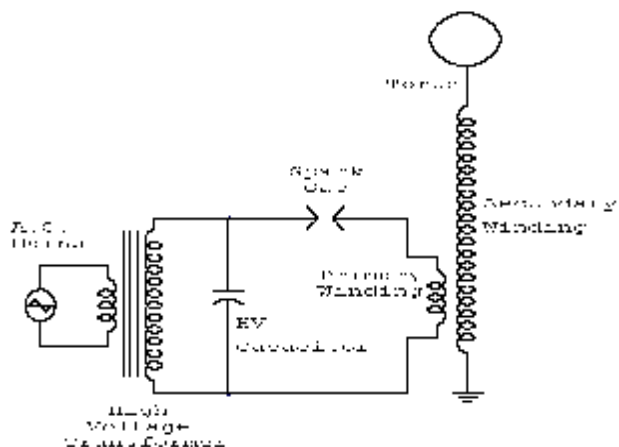
Η ιδιότητα του συντονισμού είναι πολύσημαντική για τη λειτουργία όλων των πηνίων Tesla.

3.3 Επιλογή συνδεσμολογίας

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος κατασκευής ενός μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους πηνίου Tesla, προϋποθέτει έναν μετασχηματιστή πηοπ γιατί έχει την ιδιότητα να ανυψώνει την τάση σε τιμές περίπου από 7KV μέχρι 25KV. Αυτό οδηγεί στην επιλογή της συνδεσμολογίας κατά την οποία το διάκενο διάσπασης συνδέεται παράλληλα στην έξοδο μετασχηματιστή έναντι του πυκνωτή γιατί ο τελευταίος θα μπορούσε να καταστρέψει τον μετασχηματιστή.

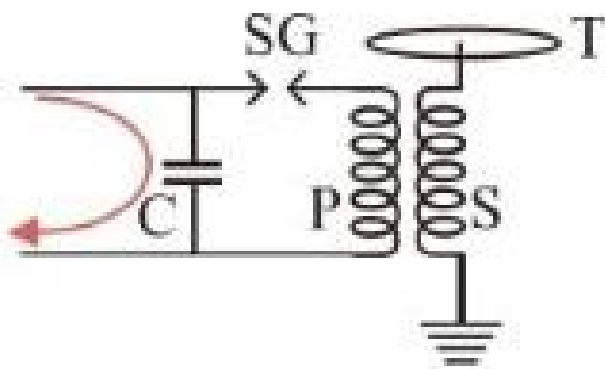


Στην περίπτωση όμως του μικρού πηνίου Tesla που δουλεύει με εξόδο μετασχηματιστή της τάξεως των 3V μπορούμε και χρησιμοποιήσαμε την παρακάτω συνδεσμολογία γιατί δεν υπάρχει κίνδυνος πρόκλησης φθορών και για τον ίδιο λόγο συνδέσαμε το πρωτεύων μαζί με την μόνωσή του γύρω απο το δευτερεύον. Με πολύ μεγάλες τάσεις η μόνωση θα έλιωνε ενώ τώρα λόγω της πολύ κοντινής απόστασης πετυχαίνουμε καλύτερη μεταφορά ενέργειας.

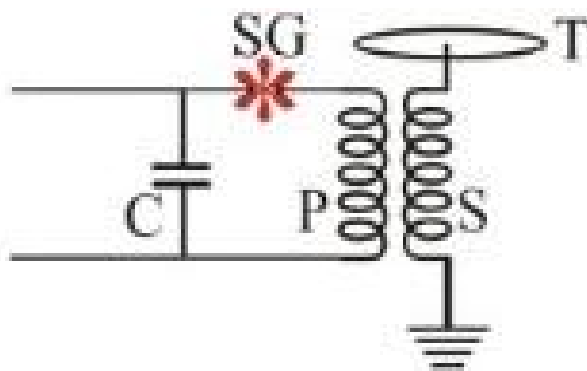


3.3 Λειτουργία του πηνίου Tesla

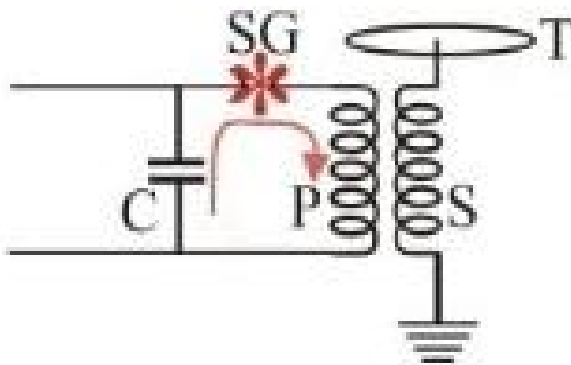
Έχοντας συνδέσει τον μετασχηματιστή στην παρόχη τα 3V περνάμε μέσα στο κύκλωμα. Επειδή η τιμή τους είναι πολύ χαμηλή ακόμα δεν μπορούν να περάσουν μέσα από το διάκενο διάσπασης (SG) το οποίο αρχικά δουλεύει ως ανοιχτός διακόπτης άρα ανοιχτοκύκλωμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα να περνάει μέσα από τον πυκνωτή (C) ο οποίος αρχίζει να φορτίζεται σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Όταν η τάση του πυκνωτή γίνει αρκετά υψηλή ο αέρας που παρεμβάλλεται στο διάκενο διάσπασης ιονίζεται και η αντίσταση του πέφτει σε πολύ χαμηλές τιμές με αποτέλεσμα να γίνει καλός αγωγός και επιθυμητό βραχυκύκλωμα.



Ο πυκνωτής έχοντας αποκτήσει διέξοδο εκφορτίζεται μέσα από το διάκενο διάσπασης και η ενέργεια περνάει στο πρωτεύον τύλιγμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα συντονισμένο κύκλωμα.



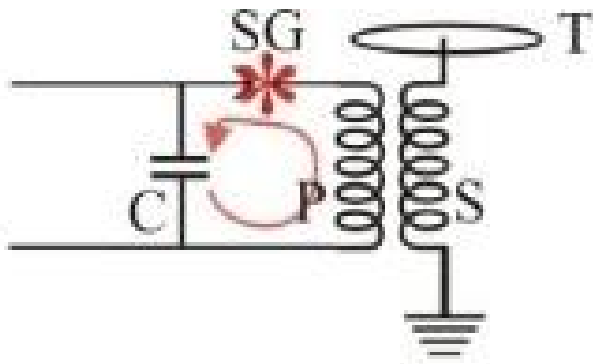
Το συντονισμένο κύκλωμα ή κύκλωμα LC είναι ένα κύκλωμα πυκνωτή - πηνίου παράλληλα που ύστερα από μία αρχική διέγερση παράγει ημιτονικό ηλεκτρικό σήμα. Όταν ένα πηνίο συνδεθεί σε σειρά με έναν φορτισμένο πυκνωτή, το κύκλωμα αρχίζει να διαρρέεται από ρεύμα λόγω του φορτίου του πυκνωτή. Αν δεν υπήρχε το πηνίο και συνδέαμε τα άκρα του πυκνωτή αυτός θα εκφορτιζόταν ακαριαία. Λόγω του φαινομένου αυτεπαγωγής του πηνίου καθυστερεί η εκφόρτιση και σταδιακά η ηλεκτρική ενέργεια του πυκνωτή μετατρέπεται σε μαγνητική ενέργεια στο εσωτερικό του πηνίου. Και πάλι λόγω αυτεπαγωγής το κύκλωμα εξακολουθεί να διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ η μαγνητική ενέργεια του πηνίου μετατρέπεται ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια του πυκνωτή. Στην ιδανική περίπτωση που δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας ο πυκνωτής ξαναποκτά το αρχικό του φορτίο, αυτή τη φορά με αντεστραμμένη πόλωση και το φαινόμενο εξακολουθεί να επαναλαμβάνεται θεωρητικά επ'άπειρον. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός αρμονικού εναλλασσόμενου ρεύματος (ημιτονικό σήμα) στο εσωτερικό του κυκλώματος, αυτό το φαινόμενο ονομάζεται αρμονική ηλεκτρική ταλάντωση.

Η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος που δημιουργείται δίνεται από την σχέση

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

όπου L ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου και C η χωρητικότητα του πυκνωτή.

Στην πραγματικότητα υπάρχουν απώλειες ενέργειας, γιατί οι αγωγοί και τα εξαρτήματα εμφανίζουν ωμική αντίσταση.

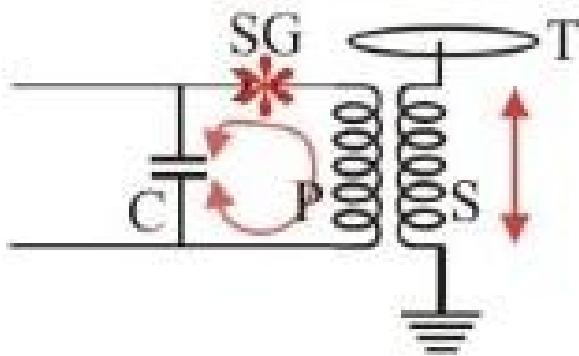


Η εκφόρτιση του πυκνωτή έχει την μορφή φθίνουσας ταλάντωσης που συνεχίζει μέχρι να μην έχει αρκετή ενέργεια για να μπορεί να εξακολουθήσει να ιονίζει τον αέρα στο διάκενο διάσπασης και έτσι αρχίζει η διαδικασία από την αρχή για να φορτιστεί ξανά ο πυκνωτής. Η συχνότητα που συμβαίνει αυτή η ακολουθία είναι της τάξεως των KHZ.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ο πυκνωτής έχει μεταφέρει μεγάλο μέρος της ενέργειας του στο πρωτεύον τυλίγμα.

Η γεινίαση του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος προκαλεί μαγνητική σύζευξη μεταξύ τους. Το ταλαντούμενο ρεύμα μεγάλου πλάτους που ρέει στο πρωτεύον προκαλεί παρόμοιο ταλαντούμενο ρεύμα που επάγεται στο δευτερεύον πηνίο.

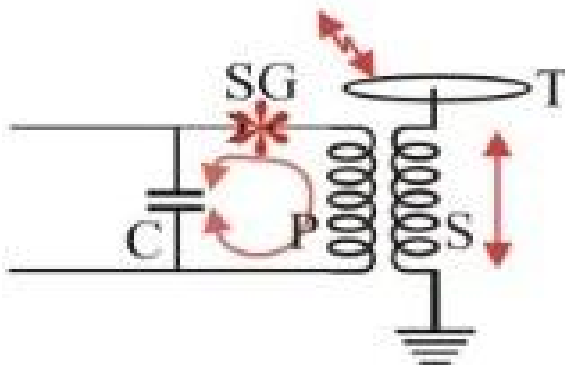
Έτσι η ενέργεια μεταφέρεται σταδιακά μέσα από το πρωτεύον στο δευτερεύον.



Το τοροειδές στην κορυφή του πηνίου έχει τον ρόλο του πυκνωτή. Είναι στην ουσία τον πρώτο ηλεκτρόδιο του πυκνωτή με δεύτερο ηλεκτρόδιο την γη και διηλεκτρικό τον αέρα.

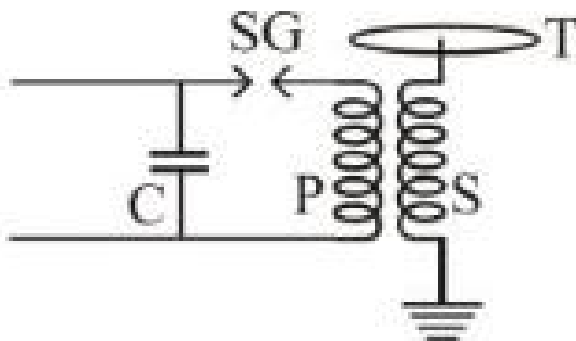
Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το δευτερεύον πηνίο να δημιουργεί σε συνδυασμό με το τοροειδές ένα ακόμα κύκλωμα LC που έχει παρόμοια συμπεριφορά με το προηγούμενο.

Η ενέργεια περνάει από την αρχή του σπειρών του δευτερεύοντος μέχρι το τοροειδές και επιστρέφει για να φορτιστεί ακόμα περισσότερο μέχρι που τελικά ο αέρας διασπάται και ανάλογα με την τάση υπάρχουν και ανάλογες εκφορτίσεις στον περιβάλλοντα χώρο.



Στην διάρκεια της διαδικασίας που είναι μερικά εκατοντάδες μικροsec το ρεύμα που παράγει ο πυκνωτής πέφτει κάτω από το ρεύμα συγκράτησης του διακένου διάσπασης, και η φόρτιση του πυκνωτή ξεκινάει από την αρχή.

Σε ένα ιδανικό πηνίο Tesla κατάλληλη συμπεριφορά του διακένου διάσπασης θα ήταν να άγει όσο χρειάζεται για να εκφορτιστεί όλη η ενέργεια του πυκνωτή και να παραμένει ανοιχτοκύκλωμα για όσο χρειάζεται ο πυκνωτής να φορτίσει εντελώς.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Όλα τα linkσελέγχτηκαν στις 9/12/2013 για την ενεργή λειτουργία τους.

[1]http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%AF%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%B1_%CE%A4%CE%AD%CF%83%CE%BB%CE%B1

[2]<http://en.wikipedia.org/wiki/Inductor>

[3]<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%B7%CE%BD%CE%AF%CE%BF> -

[4]<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82>

[5]<http://www.youtube.com/watch?v=QDZnCOLZ394>

[6]<http://www.youtube.com/watch?v=X2PrPHgOy04>

[7]<http://scienceworld.wolfram.com/biography/Tesla.html>

[8]<http://www.engineersgarage.com/contribution/mosquito-swatter?page=2>

[9]http://deepfriedneon.com/tesla_frame6.html

[10]http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%8D%CE%BA%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1_LC

[11]<http://www.extremeelectronics.co.uk/tccct/>

[12]<http://www.hvtesla.com/>

[13]<http://www.teslacoildesign.com/>

[14]http://www.bibliotecapleyades.net/tesla/esp_tesla_17.htm

[15]http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%86%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B7_%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AF%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%B7

Βιβλία:

[16]The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide - M. Tilbury (McGraw-Hill, 2008)

[17]My Inventions: The Autobiography of Nikola Tesla -Ben Johnston

[18]Φυσική Θετικής & Τεχνολογικής Κατεύθυνσης Γ΄ Τάξης Γενικού Λυκείου, ΟΕΔΒ, έκδοση Η΄, Αθήνα 2008

Πτυχιακές – Διπλωματικές:

[19]Παραγωγή υψηλών τάσεων με συχνότητα μεγαλύτερη της βιομηχανικής - Πηνία TESLA του Ανδρουλιδάκη Σπυρίδων, 2011Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Τμήμα Ηλεκτρολογίας

[20]Βελτίωση της λειτουργίας του μετασχηματιστή Tesla του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων των Καρύδας Αριστόδημος και Λούδος Χρήστος, 2012Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

[21]Tesla Transformer for Experimentation and Research του Marco Denicolai, 2001 Helsinki University of Technology

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1.Χρήσιμοι τύποι και προγράμματα

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε περισσότερο για βοήθεια στους υπολογισμούς κατά την διάρκεια της κατασκευής ήταν το TeslaMap.

Η ολοκληρωμένη του έκδοση έχει ένα μικρό κόστος, αλλά η περιορισμένη σε δυνατότητες δωρεάν έκδοσή του είναι αρκετά επαρκής για να βοηθήσει.

Ένα άλλο αλλά πιο χρήσιμο με μεγαλύτερα πηνία είναι τοTeslaCoilCad.

Παρακάτω είναι μια λίστα με χρήσιμους τύπους για την κατασκευή ενός πηνίου Tesla.

•Μέγιστο μήκος εκφόρτισης τοροειδούς
 $1.7 * \sqrt{\text{Wattεξόδου μετασχηματιστή}}$

Αυτός είναι ένας τύπος για να υπολογιστείθεωρητικά το μέγιστο μήκος της εκκένωσης σε ένα ιδανικό πηνίο Tesla.

•Αριθμός στροφών δευτερεύοντος
 $(1 / (\text{διάμετρο του χάλκινου σύρματος})) * \text{Ύψος της περιέλιξης του δευτερεύοντος}$

• Μήκος του δευτερεύοντος χάλκινου σύρματος
 $\text{Στροφές} * (\text{εξωτερική διάμετρος του PVCσωλήνα} * \pi) / 12$

•Βάρος του δευτερεύοντος χάλκινου σύρματος
 $\pi * ((\text{διάμετρο του χάλκινου σύρματος} / 2)^2) * \text{Μήκος του σύρματος} * 3.86$

•Επαγωγική αντίσταση
 $X_L = \omega L = 2\pi fL$

Όπου L ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου και ω η γωνιακή συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η επαγωγική αντίσταση οφείλεται στην τάση λόγω αυτεπαγωγής που αναπτύσσεται στα άκρα ενός πηνίου καθώς διαρρέεται από μεταβαλλόμενο ρεύμα.Απεικονίζοντας την τάσηκαι την ένταση ενός πηνίου διανυσματικά, η τάση προηγείται της έντασης κατά 90°.

•Χωρητική αντίσταση

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

Όπου C η χωρητικότητα του πυκνωτή και ω η γωνιακή συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η χωρητική αντίσταση οφείλεται στην ανάπτυξη ηλεκτρικού πεδίου στους οπλισμούς ενός πυκνωτή το οποίο έχει πολικότητα τέτοια ώστε να δημιουργεί ρεύμα αντίθετης φοράς με το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα του πυκνωτή. Απεικονίζοντας την τάση και την ένταση ενός πυκνωτή διανυσματικά, η τάση έπεται της έντασης κατά 90° .

•Συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος

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

Όπου L ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου και C η χωρητικότητα του πυκνωτή.

•Επαγωγή σπειροειδούς περιέλιξης

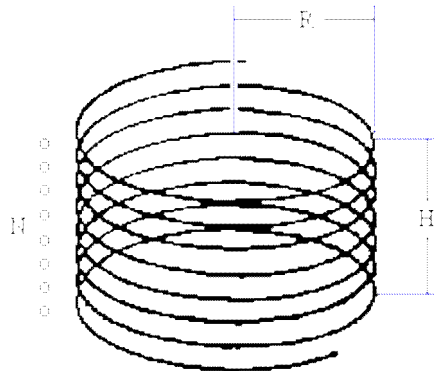
$$L = \frac{(NR)^2}{9R + 10H}$$

L = ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου

N = αριθμός στροφών

R = η ακτίνα σε ίντσες

H = το ύψος της περιέλιξης σε ίντσες



2. Ο πίνακας αφορά τις σχέσεις στην μετατροπή των διαστάσεων των συρμάτων μεταξύ AWG(American wire gauge) σε διάμετρο και διατομή.

AWG	Diam mm	Sect. mm ²	Resist. ohm/m	AWG	Diam mm	Sect. mm ²	Resist. ohm/m
0000	11.7	107,0	0.000161	19	0,91	0,6530	0.0264
000	10.4	85.0	0.000203	20	0,81	0,5190	0.0333
00	9.26	67.4	0.000256	21	0,72	0,4120	0.0420
0	8.25	53.5	0.000323	22	0,64	0,3250	0.0530
1	7,35	42,4	0.000407	23	0,57	0,2590	0.0668
2	6,54	33,6	0.000513	24	0,51	0,2050	0.0842
3	5,83	26,7	0.000647	25	0,45	0,1630	0.106
4	5,19	21,2	0.000815	26	0,40	0,1280	0.134
5	4,62	16,8	0.00103	27	0,36	0,1020	0.169
6	4,11	13,3	0.00130	28	0,32	0,0804	0.213
7	3,67	10,6	0.00163	29	0,29	0,0646	0.268
8	3,26	8,35	0.00206	30	0,25	0,0503	0.339
9	2,91	6,62	0.00260	31	0,23	0,0415	0.427
10	2,59	5,27	0.00328	32	0,20	0,0314	0.538
11	2,30	4,15	0.00413	33	0,18	0,0254	0.679
12	2,05	3,31	0.00521	34	0,16	0,0201	0.856
13	1,83	2,63	0.00657	35	0,14	0,0154	1.08
14	1,63	2,08	0.00829	36	0,13	0,0133	1.36
15	1,45	1,65	0.0104	37	0,11	0,0095	1.72
16	1,29	1,31	0.0132	38	0,10	0,0078	2.16
17	1,15	1,04	0.0166	39	0,09	0,0064	2.73
18	1,02	0,82	0.0210	40	0,08	0,0050	3.44