



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Wireless Power Transfer

(Ασύρματη μεταφορά ενέργειας)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής : ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Καθηγητής : ΚΩΣΤΑΣ ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗΣ

Επίκουρος Καθηγητής : ΕΥΤΥΧΙΟΣ ΚΟΥΤΡΟΥΛΗΣ

BASSAM ALNATSHEH

2015

Περίληψη

Ο όρος WiFi-Energy (ασύρματη μεταφορά ενέργειας) ορίζεται ως μια μορφή μεταφοράς ενέργειας με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών ταλαντωτών. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά ηλεκτρισμού/ενέργειας μεταξύ ηλεκτρικών πηγών και δεκτών χωρίς τη χρησιμοποίηση συρμάτων ή καλωδίων.

Η διαδικασία μεταφοράς είναι διαφορετική αφού χρησιμοποιεί μαγνητική σύζευξη. Σε αυτή, δε χρειάζεται καθαρή οπτική γραμμή μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Έτσι επιτυγχάνεται αποτελεσματικά μεταφορά ενέργειας με ασύρματο τρόπο και αποτελεί έναν πιο ασφαλή τρόπο μεταφοράς ενέργειας λόγω της μικρότερης απόστασης μεταξύ του πομπού και του δέκτη.

Η ασύρματη μεταφορά ρεύματος είναι μια βολική και οικονομικά αποδοτική τεχνολογία, καθώς θα βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση της χρήσης του πλαστικού και του χαλκού που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές συσκευές. Αυτή η νέα τεχνολογία έχει τεράστια πλεονεκτήματα, όπως υψηλή ακεραιότητα μετάδοσης σε συνδυασμό με χαμηλές απώλειες.. Παρόλο που η μέχρι στιγμής πρόοδος δεν καθιστά πρακτικό να χρησιμοποιηθεί για όλες τις ηλεκτρικές συσκευές, μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την επαναφόρτιση πολλών κινητών ηλεκτρονικών συσκευών που χρησιμοποιούν ακριβές μπαταρίες. Με βελτιωμένη απόδοση και εύρος, αυτή η τεχνολογία θα αλλάξει τον τρόπο που βλέπουμε την μεταφορά ενέργειας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο :	Ιστορική Αναδρομή.....	(6)
1.1.	Εισαγωγή ...	(6)
1.2.	Τα Εντυπωσιακά Πειράματα του Τέσλα στο Κολοράντο Σπρινγκς ...	(8)
1.3.	Η Συσκευή Ελεύθερης Ενέργειας του Τέσλα...	(13)
1.4.	Στα Ίχνη του Τέσλα Σύγχρονα Πειράματα Ασύρματης Μεταφοράς Ενέργειας...	(16)
1.5.	Ο Ασύρματος Ηλεκτρισμός Σήμερα...	(19)
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο :	Ηλεκτρομαγνητικά κύματα.....	(22)
2.1.	Εισαγωγή...	(22)
2.2.	Η θεωρία του Maxwell...	(23)
2.3.	Ηλεκτρομαγνητικά κύματα...	(25)
2.4.	Δημιουργία και εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων...	(29)
2.5.	Η ενέργεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων...	(33)
2.6.	Διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας...	(35)
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο:	Ηλεκτρομαγνητικές Ταλαντώσεις.....	(37)
3.1.	Εισαγωγή...	(37)
3.2.	Ηλεκτρικό πεδίο...	(37)
3.3.	Μαγνητικό πεδίο...	(39)
3.4.	Επαγωγή και αυτεπαγωγή...	(42)
3.5.	Κυκλώματα RL...	(43)
3.6.	Ταλαντούμενα κυκλώματα LC ...	(48)
3.7.	Κυκλώματα RLC ...	(53)
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο:	Μεθοδολογία Πειραματικής Μελέτης.....	(59)
4.1.	WiFi-Energy (ασύρματη μεταφορά ενέργειας) ...	(59)
4.1.1.	Ορισμός WiFi-Energy...	(59)
4.1.2.	Σημαντικότητα του WiFi-Energy...	(59)
4.1.3.	Απόσταση Τροφοδοσίας...	(60)
4.2.	Πειραματικό Μέρος...	(61)
4.2.1.	Λειτουργία της WiFi-Energy...	(61)
4.2.2.	Το κύκλωμα της παρούσας μελέτης...	(63)
4.3.	Παρουσίαση αποτελεσμάτων & συμπερασμάτων ...	(68)
4.4.	Εφαρμογές ασύρματης μεταφοράς ενέργειας...	(71)
4.5.	Πλεονεκτήματα...	(74)

- 4.6. Γενικά Συμπεράσματα...(75)
- 4.7. Περιορισμοί της μελέτης ...(76)
- 4.8. Προτάσεις ...(76)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Υγεία και Ηλεκτρομαγνητική.....(77)

- 6.1. Εισαγωγή...(77)
- 6.2. Ο αόρατος ηλεκτρομαγνητικός εφιάλτης...(78)
- 6.3. Οι βιολογικές επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας...(80)
- 6.4. Ζώνες κινδύνου και όρια «ασφαλείας» ...(81)
- 6.5. Υγεία και WiFi-Energy...(82)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ...(83)

■ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Ιστορική Αναδρομή

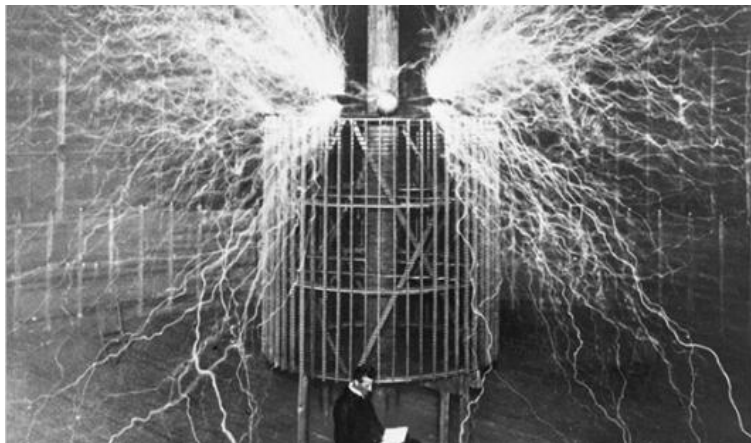
1.1. Εισαγωγή

«Το σχέδιο μου καθυστέρησε από τους νόμους της Φύσης. Ο κόσμος δεν ήταν έτοιμος γι' αυτό. Ήταν πολύ μπροστά από την εποχή του, αλλά οι ίδιοι νόμοι θα επικρατήσουν στο τέλος και θα το κάνουν να επιτύχει θριαμβευτικά».

Στις 14 Αυγούστου του 2003, στο βορειοανατολικό τμήμα των ΗΠΑ και του Καναδά, έλαβε χώρα η μεγαλύτερη συσκότιση (Blackout) στην ιστορία του ανθρώπινου πολιτισμού. Η συσκότιση αυτή έπληξε πόλεις στον ανατολικό Καναδά, καθώς και οκτώ πολιτείες των ΗΠΑ. Συνολικά 50 εκατομμύρια άνθρωποι βρέθηκαν ξαφνικά χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα και το χάος που προκλήθηκε κράτησε αρκετές ώρες.

Τρένα και μετρό ακινητοποιήθηκαν και πολλοί άνθρωποι αναγκάστηκαν να πάνε σπίτι τους με τα πόδια. Αρκετοί άνθρωποι αναγκάστηκαν να κοιμηθούν στα δάπεδα των επιβατικών σταθμών και στους δρόμους της Νέας Υόρκης, εφόσον δεν μπορούσαν να πάνε σπίτι τους ακόμη και με τα πόδια. Τα συστήματα κλιματισμού τέθηκαν εκτός λειτουργίας, τα ασανσέρ στους ουρανοξύστες ακινητοποιήθηκαν και σε αρκετές περιοχές τα συστήματα υδροδότησης σταμάτησαν να λειτουργούν. Τα τρόφιμα άρχισαν να σαπίζουν, επειδή τα ψυγεία δεν λειτουργούσαν. Στα νοσοκομεία η κατάσταση ήταν δραματική και όλα τα αποθέματα στις τράπεζες αίματος κόντεψαν να αλλοιωθούν από την έλλειψη τεχνητής ψύξης. Στα αεροδρόμια ακυρώθηκαν οι προγραμματισμένες πτήσεις, δημιουργώντας προβλήματα στην αεροπορική συγκοινωνία παγκοσμίως. Κινητά τηλέφωνα, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, τηλεοράσεις, ραδιόφωνα και άλλες συσκευές ήταν πλέον άχρηστες. Χωρίς το νυκτερινό φωτισμό το Μανχάταν έμοιαζε με ένα τεράστιο σκοτεινό κενοτάφιο. Δισεκατομμύρια δολάρια χάθηκαν μόνο μέσα σε μια μέρα. Η αιτία αυτής της καταστροφής έγινε αντικείμενο μεγάλης κυβερνητικής έρευνας, αν και πολλοί πιστεύουν πως η συσκότιση προκλήθηκε από τα παλιά ηλεκτρικά δίκτυα που υπερφορτώθηκαν. Μόνο μια μέρα χωρίς το εναλλασσόμενο ρεύμα του Τέσλα και η Αμερική επέστρεψε στο σκοτεινό Μεσαίωνα.

«Αν θελήσουμε να εξαφανίσουμε από το δικό μας βιομηχανικό κόσμο τα αποτελέσματα του έργου του κυρίου Τέσλα, τότε τα γρανάζια στις βιομηχανίες θα έπρεπε να σταματήσουν να γυρίζουν, τα ηλεκτρικά τρένα μας θα έπρεπε να ακινητοποιηθούν, οι πόλεις μας να βυθιστούν στο σκοτάδι... Ναι, τόσο μακριά έφτασε με το έργο του, που αποτέλεσε το θεμέλιο του σύγχρονου κόσμου. Το όνομα του σημάδεψε μια εποχή προόδου στην επιστήμη του ηλεκτρισμού. Από αυτό το έργο ξεπήδησε μια επανάσταση...» Σχολίασε προφητικά το μακρινό 1917 ο Αμερικανός φυσικός B. A. Behrend τη συνεισφορά του Τέσλα στη διαμόρφωση του σύγχρονου κόσμου. Και πράγματι ο Νίκολα Τέσλα όχι μόνον «ανακάλυψε» τον 20^ο αιώνα, αλλά οραματίστηκε και τον 21^ο αιώνα, στον οποίο προέβλεψε ότι θα επικρατήσει η παγκόσμια ειρήνη και η Ελεύθερη Ενέργεια (Free Energy). Ήδη διανύουμε την πρώτη δεκαετία αυτού του νέου αιώνα και τα αισιόδοξα οράματα του Τέσλα μας φαίνονται ακόμη μακρινά.



1.2. Τα Εντυπωσιακά Πειράματα του Τέσλα στο Κολοράντο Σπρινγκς

Ο Τέσλα ήταν μια προμηθεϊκή μορφή, που νίκησε έναν πανάρχαιο εχθρό, τη σκοτεινή νύχτα. Εξερεύνησε και κατέκτησε τη Νέα Γη του ηλεκτρισμού. Επιδίωξε να δαμάσει τη φυσική δύναμη του ηλεκτρισμού και να τη θέσει στην υπηρεσία της ανθρωπότητας, φιλοδοξώντας να δημιουργήσει έναν «επίγειο παράδεισο» με δωρεάν ηλεκτρική ενέργεια για όλους. Τα οράματα του Τέσλα ξεπερνούσαν κατά πολύ την «πρωτόγονη» επιστημονική φαντασία της εποχής του. Έκανε δημόσιες φαιστικές επιδείξεις του εναλλασσόμενου ρεύματος και των συσκευών του, για να αποδείξει στο κοινό την ασφάλεια τους, αντιμετωπίζοντας τις συκοφαντικές επιθέσεις και τις λασπολογίες του Τόμας Έντισον, που είχε ταχθεί υπέρ του συνεχούς ρεύματος. Σ' αυτές τις επιδείξεις ο Τέσλα χρησιμοποιούσε τον εαυτό του ως «πειραματόζωο» και αφηνόταν να διαποτιστεί από ρεύμα χιλιάδων βολτ, ώστε τελικά το σώμα του σπινθηροβολούσε από ηλεκτρισμό!

Αν και θα μπορούσε να επαναπαυτεί στις δάφνες του, όντας δοξασμένος και πλούσιος από την ηλικία των 34 ετών, εκείνος προτίμησε να προχωρήσει κι άλλο προσφέροντας στην ανθρωπότητα, ως νέος Προμηθέας, ένα πολύ μεγαλύτερο δώρο: την Ελεύθερη Ενέργεια. Το πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση ήταν τα εντυπωσιακά πειράματα **Ασύρματης Μεταφοράς Ενέργειας (Wireless Transmission of Energy)**, που διεξήγαγε ο εφευρέτης στο Κολοράντο Σπρινγκς.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1890 το μυαλό Τέσλα βασανίζονταν διαρκώς από την αναζήτηση τρόπων αποστολής ενέργειας και μηνυμάτων δια μέσω της γης. Δεν δημοσίευσε ποτέ τις λεπτομέρειες του σχεδίου του, το οποίο κρατούσε κρυφό ακόμη κι από τους βοηθούς του. Τον Φεβρουάριο του 1896 ο Τέσλα πήρε για πρώτη φορά το τρένο για το Κολοράντο Σπρινγκς, όπου αναζητούσε μια απομονωμένη τοποθεσία για να στήσει το νέο του εργαστήριο και να διεξαγάγει μια σειρά από πειράματα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της παραμονής του διεξήγαγε μάλιστα κι ένα μικρό πείραμα μεταφοράς ηχητικών σημάτων μέσω του εδάφους. Βασισμένη στις αισιόδοξες δηλώσεις του Τέσλα η κυριακάτικη έκδοση του *World* δημοσίευσε στις 8 Μαρτίου του 1896 την άποψη ότι η περίφημη Ελεύθερη Ενέργεια δεν ήταν μακριά:

«Ο ηλεκτρισμός θα μπορούσε να είναι ελεύθερος, όπως ο αέρας... Έρχεται το τέλος των τηλεγραφικών και τηλεφωνικών εταιρειών... Όλα τα μονοπώλια θα συντριβούν...».



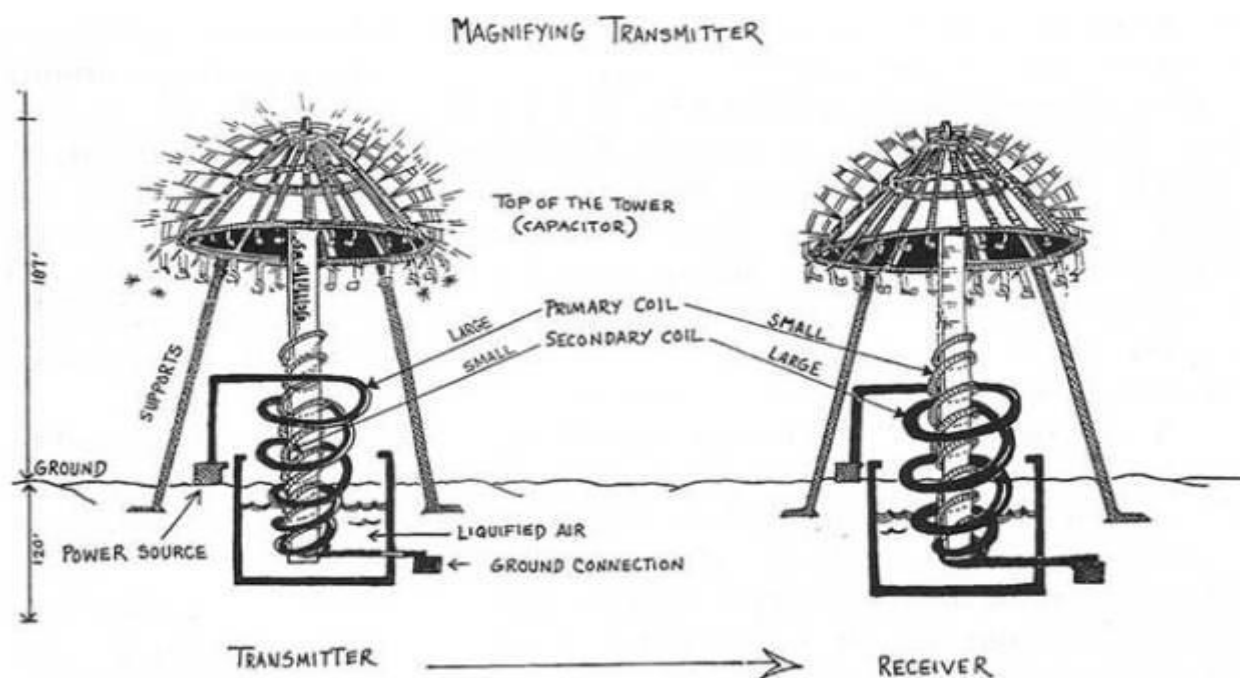
Στις αρχές του 1899 ο Τέσλα εξασφάλισε νέες επενδύσεις από έναν αριθμό πλούσιων προσωπικοτήτων, συμπεριλαμβανομένου και του Τζον Τζέικομπ Άστορ (John Jacob Astor), ιδιοκτήτη του ξενοδοχείου Γουάλντορφ Αστόρια στο οποίο και διέμενε ο εφευρέτης. Μ' αυτά τα χρήματα έστησε έναν εργαστήριο στο Κολοράντο Σπρινγκς και σε υψόμετρο 2.300 μέτρων. Εκεί, για ένα σχεδόν χρόνο (1899-1900), ο εφευρέτης πραγματοποίησε μια σειρά από σημαντικά πειράματα πάνω στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Ο Τέσλα κατόρθωσε όχι μόνο να δημιουργήσει τεχνητές αστραπές μήκους 40 μέτρων, αλλά και ν' ανάψει λαμπτήρες και να θέσει σε λειτουργία συσκευές σε απόσταση δεκάδων χιλιομέτρων! Εντυπωσιακές φωτογραφίες δείχνουν τον εφευρέτη να κάθεται ψύχραιμος σε μια καρέκλα στο μέσον του εργαστηρίου του στο Κολοράντο Σπρινγκς, ενώ πάνω του ξεσπούν τεχνητές αστραπές και ηλεκτρικές εκκενώσεις χιλιάδων βολτ!

Στις 3 Ιουλίου του 1899, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων του στο Κολοράντο Σπρινγκς, ο Σερβοαμερικάνος εφευρέτης ισχυρίστηκε ότι ανακάλυψε μια «ανεξάντλητη πηγή ενέργειας». Προέβλεψε μάλιστα ότι στο μέλλον ο κόσμος θα κατάφερνε να συνδεθεί μ' αυτήν την πηγή αστείρευτης ενέργειας, κι αυτό θα άλλαζε τη μορφή του ανθρώπινου πολιτισμού και θα οδηγούσε στην κατάκτηση του διαστήματος!

Στο Κολοράντο Σπρινγκς ο Τέσλα ανακάλυψε κάτι που ήδη διαισθανόταν: η Γη ήταν μια τεράστια «ενεργειακή πισίνα», ένας καλός ενεργειακός αγωγός, πράγμα που σήμαινε ότι το παγκόσμιο σύστημα ασύρματης μετάδοσης ενέργειας, που οραματιζόταν, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί. Εκεί ο Τέσλα ανακάλυψε πως «η Γη κυριολεκτικά πάλλεται από ηλεκτρικές δονήσεις» και πως μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως συντονιστικός αγωγός, ως ένα είδος δονούμενου διαπασών που θα μπορούσε να στέλνει δωρεάν ενέργεια σε όλα τα μήκη και τα πλάτη.

Ο Τέσλα οραματίζονταν ένα «Παγκόσμιο Σύστημά» μετάδοσης σημάτων και μεταφοράς ενέργειας, που θα βασίζονταν κυρίως σε τρεις δικές του εφευρέσεις:

- Το μετασχηματιστή Τέσλα (πηνίο Τέσλα).
- Τον ενισχυτικό μεταδότη Τέσλα (ένας μετασχηματιστής, που προσαρμόζεται έτσι ώστε να διεγείρει το έδαφος).
- Και την Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας (μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς καλώδια).



Σύμφωνα με το φιλόδοξο σχέδιο του Τέσλα, όπως αναφέρεται στις σημειώσεις του, «οι πρώτες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας του Παγκόσμιου Συστήματος μπορούν να τεθούν σε λειτουργία μέσα σε εννέα μήνες. Με αυτές τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας θα μπορεί να επιτευχθεί ηλεκτρική ισχύ μέχρι

7,5 δισεκατομμύρια Watt, με σκοπό να εφοδιάσει με ενέργεια όλα τα τεχνικά επιτεύγματα της εποχής μας».

Φεύγοντας από το Κολοράντο Σπρινγκς, γεμάτος αισιοδοξία κι ελπίδες, ο Τέσλα έγραφε στο ημερολόγιό του: «**Η δυνατότητα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας διαμέσου του φυσικού περιβάλλοντος και σε μεγάλες αποστάσεις, θ' δημιουργήσει ανεξάντλητες πηγές πλούτου και δύναμης, θέτοντας ακόμη και την ίδια την ηλιακή ενέργεια στην υπηρεσία του ανθρώπου**» (*Colorado Spings Notes 1899-1900*).

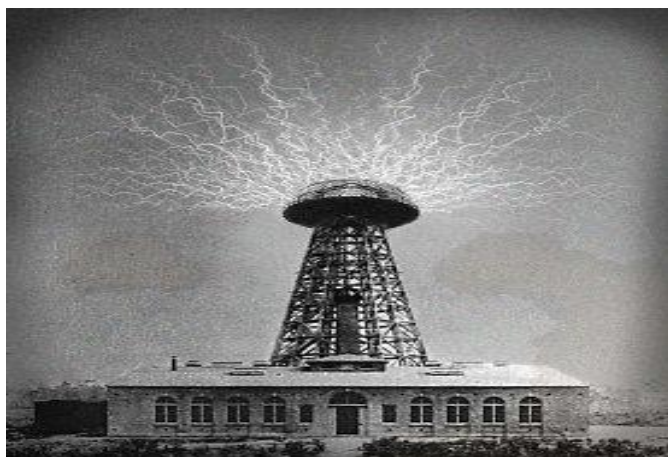
Λίγο μετά το τέλος ο Τέσλα αιώνα έγγραψε μια σειρά άρθρων όπου εξηγούσε αρκετές μεθόδους για την άντληση ενέργειας από το περιβάλλον. Το Ιούνιο του 1900 δημοσίευσε στο περιοδικό *Century* μια σειρά άρθρων, που αποτελούσαν μια μακροσκελή μελέτη του με τον τίτλο *The Problem Of Increasing Human Energy (To Πρόβλημα της Αυξανόμενης Ανθρώπινης Ενέργειας)*, στην οποία γινόταν ειδική αναφορά στους τρόπους τιθάσευσης της ηλιακής ενέργειας: «Ο ήλιος είναι η πηγή που καθοδηγεί τα πάντα. Ο ήλιος συντηρεί όλη την ανθρώπινη ζωή και εφοδιάζει την ανθρώπινη ενέργεια...»

Στο ίδιο κείμενο ο Τέσλα περιέγραφε πως είχε καταλήξει στην ιδέα της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας: «Για μεγάλο διάστημα είχα πειστεί ότι αυτού του είδους η μετάδοση ενέργειας δεν θα πραγματοποιούνταν ποτέ σε βιομηχανική κλίμακα, αλλά μια ανακάλυψη μ' έκανε να' αλλάξω γνώμη. Παρατήρησα ότι κάτω από ειδικές συνθήκες η ατμόσφαιρα, η οποία είναι κανονικά ένα μονωτικό στρώμα, αποκτά δυνατότητες αγωγιμότητας, και γι' αυτό είναι ικανή να μεταφέρει οποιαδήποτε ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας».

Όταν ο Τέσλα πειραματίστηκε το 1899 στο Κολοράντο Σπρινγκς, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα ισχύος 1,5 MW, έκπληκτος διαπίστωσε πως οι παλμοί της ηλεκτρικής ενέργειας, που έστειλε σε όλη την ολόκληρη υδρόγειο, επέστρεψαν με αμείωτη δύναμη! «Αυτό», είπε ο εφευρέτης, «ήταν ένα τόσο απίστευτο αποτέλεσμα που η ανακάλυψή του σχεδόν με ζάλισε». Ο Τέσλα είχε την εντύπωση πως η γη είχε «απαντήσει» στα σήματά του και πως «αντί μιας ηχούς, είχα λάβει ένα στάσιμο ηλεκτρικό κύμα, ένα κύμα που αντανακλάται από μακριά».

Στο σύστημα που σχεδίασε ο Τέσλα δεν είχε καμιά διαφορά η απόσταση μετάδοσης των κυμάτων. Η αποδοτικότητα της μεταφοράς ενέργειας των στάσιμων «κυμάτων Τέσλα» προσέγγιζε το 96-97% και δεν υπήρχε σχεδόν καμία απώλεια ενέργειας εκτός από αυτή που απαιτούσε η λειτουργία των μηχανημάτων. Αν δεν υπήρχε δέκτης, δεν υπήρχε και κατανάλωση ενέργειας. Όταν δεν υπάρχει κανένας δέκτης, οι εγκαταστάσεις καταναλώνουν μόνο μερική ισχύ, που είναι απαραίτητη να για να διατηρηθεί η δονητική συχνότητα.

Αξιοποιώντας αυτή την ανακάλυψη ο Τέσλα πίστευε πως ολόκληρος ο πλανήτης θα μπορούσε να διασυνδεθεί ενεργειακά αν κατασκευαζόταν ένα δίκτυο από πύργους εκπομπής και λήψης ηλεκτρικής και ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Ακόμη και η ίδια η γη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας, έτσι ώστε ο καθένας να ήταν σε θέση ν' αντλήσει ενέργεια χώνοντας απλά μια μεταλλική ράβδο στο έδαφος! Ο Τέσλα υποστήριζε πως η εκπεμπόμενη ενέργεια θα μπορούσε να μετατρέψει τις παγωμένες εκτάσεις σε καλλιεργήσιμη γη, θα καθάριζε τις πόλεις από τα καυσαέρια, θα καταργούσε τους πολέμους, την πείνα και τη φτώχεια. Αν και ορισμένοι πίστευαν πως αυτά που έλεγε ο Τέσλα θα έπρεπε να μουν στο «κουτί με τις παλαβομάρες» της ανθρωπότητας, εντούτοις η σύγχρονη επιστήμη και οι τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις δείχνουν να τον δικαιώνουν.



1.3. Η Συσκευή Ελεύθερης Ενέργειας του Τέσλα

Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας ήταν βασικά μια τεχνολογία διανομής ενέργειας, η οποία όμως συνέχιζε να παράγεται με συμβατικό τρόπο, δηλαδή με γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Αλλά ο Τέσλα δεν ήταν ικανοποιημένος με τις υπάρχουσες μορφές ενέργειας, καθώς είχε ήδη γοητευτεί με την ιδέα μιας νέας και ανεκμετάλλευτης πηγής ενέργειας. Το 1892, σε μια από τις πιο διάσημες ομιλίες του, ο Τέσλα δήλωσε στο έκπληκτο ακροατήριο του: «Προτού περάσουν μερικές γενιές οι μηχανές μας θα μπορούν να λειτουργούν με μια δύναμη που θα αντλείται από οποιοδήποτε σημείο του σύμπαντος... Σε κάθε σημείο του χώρου υπάρχει αυτή η ενέργεια. Είναι αυτή η ενέργεια στατική ή κινητική; Αν είναι στατική, τότε οι ελπίδες μας είναι μάταιες. Αν είναι κινητική –και γνωρίζουμε ότι είναι– τότε είναι απλώς θέμα χρόνου πότε ο άνθρωπος θα κατορθώσει να συνδέσει τα μηχανήματά του με τα γρανάζια της Φύσης».

Μια από τις βασικότερες εφευρέσεις του, πάνω στην οποία θα στηριζόταν το Παγκόσμιο Σύστημα του Τέσλα, ήταν και ο **Αποδέκτης Ελεύθερης Ενέργειας (Free Energy Receiver)**, που κατοχυρώθηκε στις 5 Νοεμβρίου του 1901 με την ονομασία **Apparatus for the Utilization of Radiant Energy** (Αριθμός ευρεσιτεχνίας 685,957). Αυτή η βασική «συσκευή» αποτελούταν κυρίως από μια μεταλλική πλάκα, που λειτουργούσε ως συσσωρευτής της Ελεύθερης Ενέργειας για οικιακή χρήση!

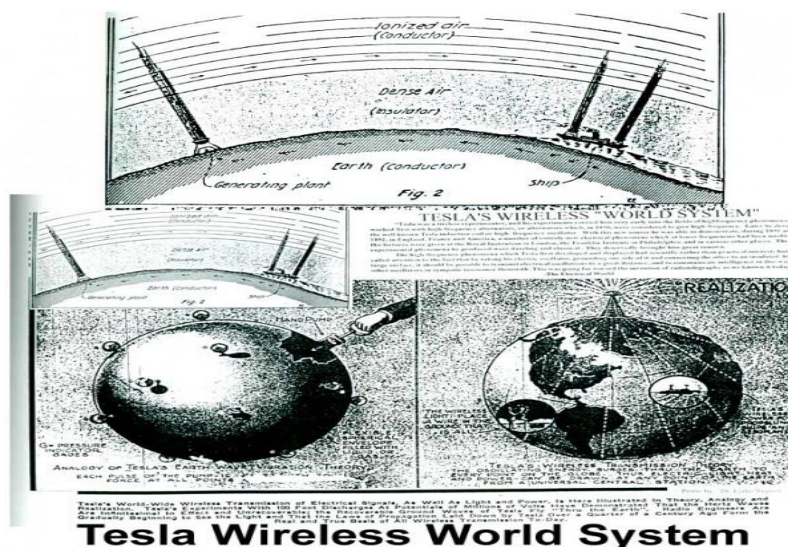
Ο Αποδέκτης Ελεύθερης Ενέργειας έμοιαζε κάπως με τους σημερινούς ηλιακούς συλλέκτες και συγκεκριμένα με τη συμβατική τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Η σημαντικότερη διαφορά του με τα συμβατικά ηλιακά συστήματα έγκειται σ' ένα υπόστρωμα κρυστάλλινης σιλικόνης: μια από τις τελευταίες ίσως χρήσεις της άμορφης σιλικόνης, η οποία υπόσχεται πολλά στην πρόσληψη ενέργειας από τον ήλιο. Βέβαια, οι σημερινές ηλιακές κυψέλες κοστίζουν ακόμη ακριβά, ενώ η «ηλιακή πλάκα» του Τέσλα ήταν μια απλή μεταλλική πλάκα καλυμμένη με μια διάφανη επίστρωση ενός μονωτικού υλικού. Ας δούμε όμως τον τρόπο λειτουργίας αυτής της απλής «συσκευής» του Τέσλα.

Η «ηλιακή πλάκα» του Τέσλα τοποθετείται όσο γίνεται ψηλότερα –σαν να ήταν κεραία– και συνδέεται μ' έναν πυκνωτή που βρίσκεται κοντά στο έδαφος. Η

ηλιακή ενέργεια φορτίζει συνεχώς τον πυκνωτή. Κατόπιν η ενέργεια που συσσωρεύεται στον πυκνωτή μετατρέπεται πολύ εύκολα σε ηλεκτρισμό για οικιακή χρήση. Και το εκπληκτικό είναι ότι αυτή η «ηλιακή πλάκα», που όσο μεγαλύτερη επιφάνεια έχει τόσο περισσότερη ενέργεια συσσωρεύει, δε χρειάζεται απαραίτητα το φως του ήλιου, εφόσον μπορεί να παράγει ενέργεια και τη νύχτα! Δε χρειάζεται βέβαια να συμπληρώσουμε ότι κάτι τέτοιο θεωρείται το λιγότερο αδύνατο από τη συμβατική επιστήμη...

Ο Τέσλα πίστευε πως ήταν δυνατή η μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας με ασύρματο τρόπο κι έφτιαξε ολόκληρα σχέδια για ένα παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα. Το όραμα του ήταν ένα παγκόσμιο σύστημα, που ταυτόχρονα θα μετέδιδε ραδιοσήματα και θα μετέφερε με ασύρματο τρόπο ηλεκτρική ενέργεια! Το σχέδιο του ήταν τόσο προχωρημένο και ριζοσπαστικό για την εποχή του, που μόλις δημοσιοποιήθηκε οι πόρτες των επιχειρηματιών της Wall Street έκλεισαν γι' αυτόν. Τα μονοπωλιακά συμφέροντα, ακόμη κι εκείνοι που επένδυσαν εκατομμύρια δολάρια στο σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος, αρνήθηκαν να τον χρηματοδοτήσουν.

Όταν ο μεγαλοτραπεζίτης Τζον Πίερποντ Μόργκαν, που αρχικά χρηματοδότησε με 150.000 δολάρια (λαμβάνοντας βεβαίως το 51% των κερδών από τις μελλοντικές πατέντες του Τέσλα πάνω στις ραδιοεπικοινωνίες) το σχέδιο του εφευρέτη στο Γουόρντεκλιφ του Λονγκ Άιλαντ, πληροφορήθηκε πως ο στόχος του Τέσλα ήταν η ασύρματη μεταφορά ενέργειας ρώτησε τον εφευρέτη: «Και ποιος θα πουλάει την ενέργεια στους αποδέκτες της;» «Κανείς», απάντησε με ειλικρίνεια ο Τέσλα, **«ο καθένας θα μπορεί να τη λαμβάνει καρτώνοντας μια ράβδο στο έδαφος ή τοποθετώντας μια κεραία στη στέγη του σπιτιού του. Σκεφθείτε το: δεν θα υπάρχουν καλώδια, αερόπλοια θα πετούν χρησιμοποιώντας την εκπεμπόμενη ενέργεια...»** «Αρκετά», τον διέκοψε ο μεγαλοτραπεζίτης. «Σας ευχαριστώ πολύ κύριε Τέσλα. Θα σας στείλω την απάντηση μου». Η απάντηση, και τα χρήματα, δεν ήρθαν ποτέ. Μέχρι το τέλος της ζωής του ο Τέσλα περίμενε μιαν απάντηση...



Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα ο αισιόδοξος Τέσλα είχε προβλέψει:

«Στο κοντινό μέλλον θα δούμε πολλές χρήσεις της ηλεκτρικής ενέργειας. Θα είμαστε σε θέση να διασκορπίζουμε την ομίχλη με την ηλεκτρική δύναμη και με ισχυρές και διαπεραστικές ακτίνες. Θα δημιουργήσουμε ασύρματες εγκαταστάσεις με σκοπό τη φωταγώγηση των ωκεανών. Σύντομα θα επιτευχθεί η μετάδοση εικόνων με τις συνηθισμένες τηλεγραφικές μεθόδους. Μια άλλη σημαντική καινοτομία θα είναι μια ηλεκτρική γραφομηχανή, που θα καταγράφει την ανθρώπινη φωνή. Θα έχουμε τα εξουδετερωτές καπνού, απορροφητές σκόνης, αποστειρωτές του νερού, του αέρα, των τροφίμων και των ρούχων. Θα είναι επίσης αδύνατον να μεταδοθούν τα μικρόβια ασθενειών και οι άνθρωποι θα μπορούν να θεραπεύονται από αυτές.

Αν χρησιμοποιήσουμε ορυκτά καύσιμα ύλες για να αντλήσουμε την ενέργειά μας τότε, ζώντας εις βάρος του κεφαλαίου μας, θα το εξαντλήσουμε γρήγορα. Αυτή η μέθοδος είναι βάρβαρη και επιπόλαια σπάταλη και θα πρέπει να σταματήσει για χάρη των ερχόμενων γενεών. Το αναπόφευκτο συμπέρασμα είναι ότι η υδροδυναμική είναι ο πολυτιμότερος ενεργειακός πόρος μας. Σε αυτήν η ανθρωπότητα πρέπει να εναποθέσει τις ελπίδες της για το μέλλον. Με την πλήρη ανάπτυξη της καθώς και μ' ένα τέλειο σύστημα της ασύρματης μετάδοσης της ενέργειας σε οποιαδήποτε απόσταση, ο άνθρωπος θα είναι σε θέση να λύσει όλα τα προβλήματα της υλικής του ύπαρξης. Η απόσταση, που είναι το κύριο εμπόδιο στην ανθρώπινη πρόοδο, θα εκμηδενιστεί εντελώς όσον αφορά τη σκέψη, τη λέξη, και τη δράση. Η ανθρωπότητα

θα ενωθεί, οι πόλεμοι θα γίνουν αδύνατοι, και η ειρήνη θα βασιλέψει ανώτατο επίπεδο».

Αν και τα περισσότερα απ' όσα προέβλεψε πιο πάνω ο διορατικός Τέσλα πραγματοποιήθηκαν, δεν συνέβη το ίδιο με τη βασικότερη πρόβλεψη του: την Ελεύθερη Ενεργεία και την ασύρματη μεταφορά της σ' οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη. Όχι επειδή δεν υπήρξαν τεχνολογικές εξελίξεις σ' αυτό τον τομέα. Απλούστατα επειδή τα κατεστημένα συμφέροντα, που ελέγχουν την παραγωγή και διακίνηση της ενέργειας, δεν άφησαν να συμβεί κάτι τέτοιο.

Ο οραματιστής και αθεράπευτα ανθρωπιστής Τέσλα είχε κάνει το λάθος να δείξει στον μεγαλοκαρχαρία Μόργκαν, τον κατεξοχήν εκπρόσωπο των μονοπωλιακών συμφερόντων της εποχής του, τον κόσμο όπως θα μπορούσε να είναι: ελεύθερος από ενεργειακά μονοπώλια και με άφθονη και φθηνή ενέργεια για τον καθένα. Έναν κόσμο για τον οποίο η ανθρωπότητα ίσως να είναι έτοιμη τον 21^ο αιώνα...

1.4. Στα Ίχνη του Τέσλα: Σύγχρονα Πειράματα Ασύρματης Μεταφοράς Ενέργειας

Ακόμη και σήμερα επικρατεί σύγχυση σχετικά με το αν ο Τέσλα βρισκόταν ή όχι στο δρόμο για την υλοποίηση της περίφημης ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Αυτή η σύγχυση όμως λειτουργεί ως ένα βαθμό θετικά για την προώθηση σχετικών ερευνών, τις οποίες πραγματοποιεί ένας μικρός αριθμός ερευνητών και ινστιτούτων, που υποστηρίζουν αυτή την ιδέα του Τέσλα.

Στις ΗΠΑ, με τις έρευνες πάνω στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας ασχολούνται εδώ και δύο δεκαετίες ο Τζέιμς και ο Κένεθ Κόρουμ (James & Kenneth Corum). Η εργασία των αδελφών Κόρουμ προσφέρει νέα πολύτιμα δεδομένα σχετικά με την κατανόηση των λεπτομερειών του σχεδίου του Τέσλα. Οι νέες γνώσεις σχετικά με τη μεταφορά ενέργειας στην ιονόσφαιρα έχουν εφαρμοστεί στα πλαίσια του στρατιωτικού προγράμματος HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program), που έχει τη βάση του στην Αλάσκα. Ο Μπέρναρντ Ίστλουντ (Bernard

Eastcloud), πάνω στις ιδέες του οποίου βασίζεται το σχέδιο, αναφέρεται απευθείας στις ιδέες του Τέσλα. Ωστόσο για τους ερευνητές της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας είναι πολύτιμα και τα αποτελέσματα των ερευνών, που πραγματοποίησαν Ρώσοι επιστήμονες.

Σε μια πρόσφατη επιστολή του Ρώσου επιστήμονα N. N. Πορτνάγκιν, προς το Μουσείο Νικόλα Τέσλα του Βελιγραδίου, αναφέρεται: «Τα πειράματα του Τέσλα, που πραγματοποιήθηκαν από την 1^η Ιουλίου του 1899 μέχρι τις 7 Ιανουαρίου του 1900, άνοιξαν δρόμο σε θεμελιώδεις νέες τεχνολογίες ανάπτυξης συστημάτων των υπόγειων συνδέσεων για τη μεταφορά μεγάλης ηλεκτρικής ισχύος υψηλής συχνότητας και όλα αυτά με φυσικές υπόγειες επικοινωνίες. Δυστυχώς η επιστήμη στις αρχές του 20^{ου} αιώνα δεν είχε την δυνατότητα κατανόησης των πειραμάτων του Νικόλα Τέσλα πάνω στην υπόγεια μεταφορά ηλεκτρικών σημάτων και ισχύος. Μόλις τα τελευταία χρόνια μια προωθημένη θεωρία της αυτό-οργάνωσης των πολύπλοκων υπόγειων ηλεκτρικών δομών έκανε εφικτή την κατανόηση αυτών των πειραμάτων του Νικόλα Τέσλα... Εμείς εδώ και χρόνια παρακολουθούμε την υψηλή ηλεκτρική δραστηριότητα του εσωτερικού της γης. Αυτή η ηλεκτρική δραστηριότητα μας επέτρεψε να επαναλάβουμε τα μεγάλης ισχύος πειράματα του Νικόλα Τέσλα σε μια φθηνή και πιο χαμηλής ισχύος εκδοχή και να καταλήξουμε στο βασικό συμπέρασμα ότι υπάρχει δυνατότητα ανάπτυξης ενός υπόγειου συστήματος ηλεκτρικών συνδέσεων για τη μεταφορά υψηλής συχνότητας ηλεκτρικής ενέργειας».

Στο μέλλον θα αποδειχθεί η αλήθεια και θα απομακρυνθούν οι όποιες αμφιβολίες. Αυτό που όμως μπορούμε να πούμε σήμερα με σιγουριά είναι ότι η εργασία του Τέσλα πάνω στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας, εκτός από τεχνολογική αξία, είχε ταυτόχρονα και πνευματική, κοινωνική και φιλοσοφική. Οι απόψεις του Τέσλα, τις οποίες δημοσίευσε στη μελέτη του για *Το Πρόβλημα της Αυξανόμενης Ανθρώπινης Ενέργειας* (1900), αν ειπωθούν υπό το φως της σύγχρονης στρατηγικής και προσπάθειας του ανεπτυγμένου τμήματος της ανθρωπότητας να εμποδίσει τις καταστροφικές διεργασίες που απειλούν το περιβάλλον του πλανήτη μας, αποκτούν ιδιαίτερα μεγάλη αξία. Οι ιδέες και οι συμβουλές του Τέσλα, που δημοσιεύτηκαν πριν από έναν αιώνα, ακόμη και σήμερα φαίνονται πολύ σοφές και μακρόπνοες.

Ένας από τους ανθρώπους, που ασχολήθηκαν με την ασύρματη μεταφορά ενέργειας, ήταν και ο Toby Grotz, ο οποίος μελέτησε επισταμένα το έργο και τις ιδέες

του Τέσλα. Στη μελέτη του ο Grotz περιλαμβάνει όλες τις λεπτομέρειες για μια προκαταρκτική δοκιμή του συστήματος της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Επίσης εξηγεί τον τρόπο μετάδοσης, εξίσου σε ολόκληρο τον πλανήτη, ενός κύματος ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης, το οποίο αναπηδά στην αντίθετη πλευρά και επιστρέφει στην πηγή του, επαναλαμβάνοντας τον κύκλο πολλές φορές. Ο Toby Grotz συνεργάστηκε επίσης με τους αδερφούς Κόρουμ στο λεγόμενο «**Project TESLA**», το οποίο ήταν ένα σχέδιο πρακτικής εφαρμογής της ασύρματης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι σημειώσεις του Δρ Τζέιμς Κογυμ, στο εισαγωγικό του άρθρο σχετικά με τον **ELF (εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας)** ταλαντωτή Τέσλα, αναφέρουν ότι το συντονισμένο κύκλωμα του **ενισχυτικού μεταδότη σημάτων Τέσλα (Tesla Magnifying Transmitter)**, μπορεί να αξιοποιήσει ολόκληρη την γήινη ιονόσφαιρα!

Το δεύτερο άρθρο του Δρ Τζέιμς Κογυμ αποτελεί πιθανότατα και το πληρέστερο άρθρο που έχει γραφτεί ποτέ πάνω στη συσκευή ενίσχυσης της αποστολής των κυμάτων Τέσλα. Το κείμενο αυτό εξηγεί με πολλές λεπτομέρειες την έννοια της ενίσχυσης των μεταδιδόμενων κυμάτων, με παραδείγματα και εξισώσεις. Ακόμη κι ένας απλός αναγνώστης, χωρίς ιδιαίτερες γνώσεις πάνω στην ηλεκτρομηχανική, μπορεί να κατανοήσει αλλά και να απολαύσει το ενθουσιώδες ύφος με το οποίο ο Δρ Κογυμ περιγράφει τις εργασίες και τις ιδέες του Τέσλα πάνω στον Ενισχυτικό Μεταδότη του.

Πριν από έναν αιώνα ο Τέσλα έγραφε: «Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μεταδοθεί οικονομικά χωρίς καλώδια σε οποιαδήποτε απόσταση στη Γη. Το έχω διαπιστώσει χωρίς αμφιβολία στις πολυάριθμες παρατηρήσεις, σε ποιοτικά και ποσοτικά πειράματα και μετρήσεις. Όλα αυτά έχουν καταδείξει ότι είναι δυνατόν να διανεμηθεί η ηλεκτρική ισχύς από κεντρικές εγκαταστάσεις σε απεριόριστες ποσότητες, με μια απώλεια κατά τη μετάδοση που δεν θα υπερβαίνει το 1%, ακόμη και στη μέγιστη απόσταση, τα δώδεκα χιλιάδες μίλια, που είναι και η διάμετρος του πλανήτη μας».

Ο Toby Grotz αναφέρει στο άρθρο του ότι, κατά τη δεκαετία του 1980, περίπου το 1/3 της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στις ΗΠΑ χάθηκε κατά τη μεταφορά της. Σήμερα, δύο δεκαετίες αργότερα, οι ανεπτυγμένες χώρες έχουν

διπλασιάζει την εξάρτησή τους από το εισαγόμενο πετρέλαιο και έχουν επίσης αυξήσει την ανεπάρκεια του δικτύου μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Παρ' όλα αυτά περίπου τα 2/3 της ηλεκτρικής ενέργειας χάνονται στις λεγόμενες «απώλειες μετατροπής». Αυτό είναι κάτι το απαράδεκτο. Για παράδειγμα, αντί οι ΗΠΑ να προσπαθούν να κατασκευάσουν δύο καινούργιες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ισχύος 300 MW) την εβδομάδα, προκειμένου να έχουν στη διάθεσή τους άλλα 6 τρισεκατομμύρια kWh μέχρι το 2020, θα έπρεπε απλά να βρουν ένα τρόπο για να εξοικονομήσουν τις 7 τρισεκατομμύρια kWh, που χάνονται κάθε χρόνο κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σήμερα στη χώρα. Μόνο με την ασύρματη μεταφορά ενέργειας θα μπορούσε να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη διανομή ηλεκτρικής ισχύος χωρίς σημαντικές απώλειες.



1.5. Ο Ασύρματος Ηλεκτρισμός Σήμερα

Τα πειράματα και τα οράματα του Τέσλα για την ασύρματη μεταφορά ενέργειας έχουν βρει, ευτυχώς, στην εποχή μας πολλούς συνεχιστές. Το Νοέμβριο του 2006 ο Αμερικανός Φυσικός Μάριν Σόλιατσιτς (Marin Soljatic), βοηθός καθηγητή στο MIT, και η ομάδα των συνεργατών του στο MIT, υποστηρίζουν ότι η ασύρματη μεταφορά ενέργειας είναι κάτι το εφικτό και ότι σύντομα θα μπορούμε να φορτίσουμε το κινητό μας ή το φορητό υπολογιστή μας χωρίς να χρειαζόμαστε συνδέσεις καλωδίων. Ο καθηγητής Μάριν Σόλιατσιτς ισχυρίζεται πως έχει ανακαλύψει ένα νέο τρόπο μεταφοράς της ενέργειας, που θα επηρεάζει μόνο τις συσκευές που θα φορτίζονται και όχι το περιβάλλον τους. Προτείνει αντί για την

παραδοσιακή ακτινοβολία, την χρήση μέρους του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που δεν εκπέμπει ακτινοβολία. Ο Αμερικανός Φυσικός αναφέρει ότι οι ηλεκτρονικές συσκευές μπορούν να ρυθμιστούν στη συχνότητα του πεδίου και να δράσουν ως «δεξαμενές της ενέργειας» που εκπέμπει η πηγή. Μ' αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται η διαρροή ενέργειας, εξασφαλίζοντας έναν αποτελεσματικό και ασφαλέστατο τρόπο ασύρματης μεταφοράς της ενέργειας.

Η διάταξη που περιγράφει βασίζεται στο φαινόμενο του «συντονισμού», κατά το οποίο ένα αντικείμενο ταλαντώνεται όταν δεχθεί ενέργεια μιας συγκεκριμένης συχνότητας. Για παράδειγμα, συντονισμός παρατηρείται στα έγχορδα μουσικά όργανα: «Όταν παίζεις μία νότα σ' ένα μουσικό όργανο, ένα άλλο όργανο με το ίδιο ακουστικό συντονισμό θα αναγνωρίσει τη νότα και θα αρχίσει να δονείται» εξηγεί ο καθηγητής Μάριν Σόλιατσιτς. Ο ίδιος λέει ότι «η ερευνητική ομάδα έχει υπολογίσει ότι μια συσκευή στο μέγεθος ενός φορητού υπολογιστή, θα μπορούσε να φορτιστεί σε απόσταση μερικών μέτρων από την πηγή. Τοποθετώντας μια πηγή λοιπόν σε κάθε δωμάτιο του σπιτιού σας θα μπορούσατε να είστε ενεργειακά καλυμμένοι στο χώρο του σπιτιού σας».

Στο συγκεκριμένο σύστημα, αντί της χρησιμοποίησης των ακουστικών δονήσεων, οι επιστήμονες αξιοποιούν το συντονισμό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι συνηθισμένες κεραίες που μεταδίδουν ραδιοκύματα δεν θα ήταν κατάλληλες για την αποδοτική μεταφορά της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας καθώς τη διαχέουν προς όλες τις κατευθύνσεις, αντί να την εστιάζουν σε ένα συγκεκριμένο σημείο.

Προκειμένου να υπερβούν αυτό το εμπόδιο, οι ερευνητές του MIT μελέτησαν μια ειδική κατηγορία αντικειμένων τα οποία είναι «μη-ακτινοβόλα» και διαθέτουν «μακρόβιο συντονισμό». Τα αντικείμενα αυτά μπορούν να εκπέμπουν πίδακες ενέργειας, μήκους τριών έως πέντε μέτρων οι οποίοι θα μπορούσαν να τροφοδοτούν ασύρματα ηλεκτρικές συσκευές. Για παράδειγμα, μια κεραία από χαλκό, κατάλληλα σχεδιασμένη ώστε να διαθέτει «μακρόβιο συντονισμό», θα μπορούσε να τροφοδοτεί με ενέργεια μια κοντινή συσκευή που διαθέτει επίσης μια κεραία που ταλαντώνεται στην ίδια συχνότητα. Στην ερευνητική ομάδα του MIT συμμετέχουν και οι Έλληνες ερευνητές Αριστείδης Καράλης και Τζον Τζοανόπουλος.

Υπάρχουν βέβαια και ενστάσεις. Ο Δρ. Τζίοφ Άνστις (Geoff Anstis) του Πανεπιστημίου Τεχνολογίας του Σίδνεϊ, αναφερόμενος στην αβεβαιότητα που υπάρχει για τις επιπτώσεις στην υγεία μας λόγω της χρήσης των κινητών τηλεφώνων, λέει: «Θα δημιουργηθούν παρόμοια προβλήματα με αυτά που προέκυψαν από τη χρήση των κινητών τηλεφώνων. Μονάχα μετά από δύο δεκαετίες ίσως καταφέρουμε να βεβαιωθούμε ότι δεν συντρέχουν σημαντικοί λόγοι ανησυχίας».

Σήμερα, περισσότερο από ποτέ, το σχέδιο της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας του Τέσλα καθίσταται επιτακτική ανάγκη προκειμένου η ανθρωπότητα, από τη μια να αποφύγει την επερχόμενη ενεργειακή «δίψα» και από την άλλη να απελευθερωθεί από μονοπώλια και συμφέροντα, που στραγγαλίζουν τις προοπτικές της.

■ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

2.1. Εισαγωγή

Με τον όρο “κύματα” συνήθως εννοούμε τα κύματα που διαδίδονται μέσα στην ύλη όπως για παράδειγμα τα κύματα της θάλασσας, τα κύματα στις τεντωμένες χορδές ενός πιάνου, τα ηχητικά κύματα κλπ. Τα κύματα αυτά συνήθως ονομάζονται μηχανικά κύματα μιας και ουσιαστικά είναι μηχανικές παραμορφώσεις της ύλης μέσα στην οποία διαδίδονται.

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που αποτελούν παραμορφώσεις του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου και που φυσικά, εφόσον δεν έχουν ανάγκη της ύλης για να διαδοθούν, διαδίδονται και στο κενό.

Ξεκινώντας από τις θεωρίες του Maxwell που προέβλεψε την ύπαρξη και διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων θα εξετάσουμε τους τρόπους δημιουργίας των. Θα δούμε πως και το φως ή καλύτερα η φωτεινή ακτινοβολία είναι και αυτή ηλεκτρομαγνητικά κύματα και θα γνωρίσουμε το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τέλος θα εξετάσουμε πως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στον χώρο.

2.2. Η θεωρία του Maxwell

Ο Maxwell, ίσως ο μεγαλύτερος θεωρητικός φυσικός του 19ου αιώνα, συνδυάζοντας τις τότε γνωστές θεωρίες για τον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό πρότεινε μια ενιαία θεωρία, την θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού, δίνοντας εξήγηση σε όλα τα μέχρι τότε γνωστά προβλήματα αυτού του τομέα της φυσικής. Αλλά η αξία της θεωρίας του δεν περιορίστηκε μόνο στην ερμηνεία των μέχρι τότε γνωστών φαινομένων. Προέβλεπε πριν ακόμη ανακαλυφθούν και την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα παρήχθησαν και

ανιχνεύθηκαν για πρώτη φορά το 1887 από τον Hertz, οκτώ χρόνια μετά τον θάνατο του Maxwell.

Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία περιγράφεται πλήρως από ένα σύνολο τεσσάρων εξισώσεων που έχουν γίνει πια γνωστές σαν εξισώσεις του Maxwell, παρόλο που κάθε μία από αυτές έχει προταθεί από διαφορετικούς επιστήμονες. Οι τέσσερις αυτές εξισώσεις είναι

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (2.2)$$

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_m}{dt} \quad (2.3)$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_e}{dt} \quad (2.4)$$

Η πρώτη εξίσωση, γνωστή και σαν **νόμος του Gauss**, μας λέει ότι “Η ολική ροή του ηλεκτρικού πεδίου, που περνάει μέσα από μία κλειστή επιφάνεια S, ισούται με το ολικό φορτίο Q, που περιέχεται μέσα στην επιφάνεια, προς την ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού ϵ_0 ”.

Η δεύτερη εξίσωση αναφέρεται και ως **νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό** και ορίζει ότι “η ολική ροή του μαγνητικού πεδίου που διέρχεται μέσα από μία κλειστή επιφάνεια είναι ίση με το μηδέν”.

Η τρίτη εξίσωση, είναι ο **νόμος της επαγωγής του Faraday**. Ο νόμος ορίζει ότι “το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E που υπολογίζεται κατά μήκος μιας κλειστής καμπύλης L , ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής που περνά από την επιφάνεια που περικλείεται από την κλειστή καμπύλη”. Η σχέση (2.3) ίσως φαίνεται διαφορετική από την σχέση του νόμου του Faraday όπως αυτή αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, δηλαδή την σχέση (1.12), αλλά στην ουσία είναι ίδια, αφού το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα δεν είναι τίποτε άλλο από την ηλεκτρεγερτική δύναμη που εμφανίζεται στα άκρα ενός αγωγού που έχει το σχήμα της καμπύλης L .

Τέλος, η τέταρτη εξίσωση είναι ο νόμος του Ampère έτσι όπως γενικεύτηκε από τον Maxwell, για τον λόγο αυτό αναφέρεται και ως **νόμος των Ampère - Maxwell**. Η εξίσωση ορίζει ότι “το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του μαγνητικού πεδίου (μαγνητικής επαγωγής) κατά μήκος μιας κλειστής καμπύλης είναι ανάλογο (με σταθερή αναλογίας μ_0) με το άθροισμα του ρεύματος αγωγιμότητας I που περνά μέσα από μία επιφάνεια της οποίας το όριο είναι η κλειστή καμπύλη, συν το ρεύμα μετατόπισης ($\epsilon_0 d\Phi_e/dt$).

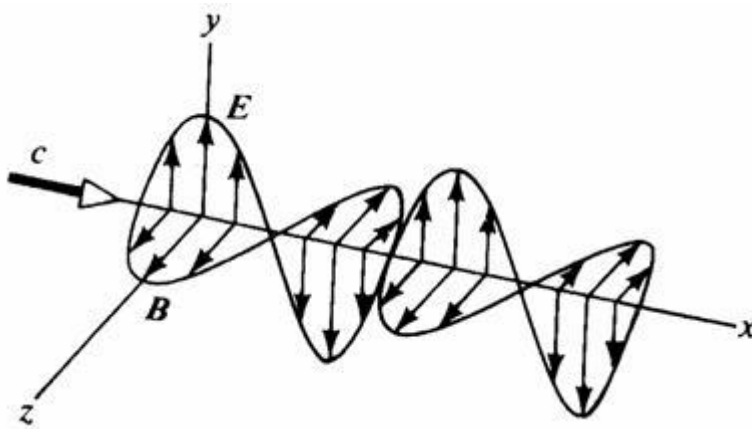
Οι τέσσερις αυτές εξισώσεις ενοποιούν πλήρως τον ηλεκτρισμό με τον μαγνητισμό λέγοντας ουσιαστικά ότι είναι οι δύο όψεις το ίδιου νομίσματος, του ηλεκτρομαγνητισμού. Παρατηρώντας μάλιστα τις δύο τελευταίες εξισώσεις βλέπουμε ότι ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίου παράγει μαγνητικό πεδίο που με την σειρά του όταν μεταβάλλεται παράγει ηλεκτρικό πεδίο (και αντίστροφα).

2.3. Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Από τις εξισώσεις (2.3) και (2.4) μπορούμε, μετά από μερικές μάλλον επίπονες πράξεις, να αποδείξουμε την ύπαρξη και να βρούμε τις ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η αυστηρά όμως μαθηματική απόδειξη ξεφεύγει από τα πλαίσια του συγγράμματος και τους σκοπούς διδασκαλίας του μαθήματος στο Τμήμα Πληροφορικής και Επικοινωνιών. Για τον λόγο αυτό θα ακολουθήσουμε έναν

κάπως πιο εύκολο και όχι τόσο μαθηματικό τρόπο για να εξαγάγουμε από τις δύο τελευταίες εξισώσεις του Maxwell την εξίσωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι έχουμε ένα επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο οδεύει με μία ταχύτητα v προς τον άξονα x . Το κύμα έχει το διάνυσμα της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου να ταλαντώνεται κατά μήκος της διεύθυνσης y και το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής B να ταλαντώνεται κατά την διεύθυνση του άξονα z . Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η μορφή ενός τέτοιου κύματος. Τέτοιου είδους κύματα που τα E και B ταλαντώνονται μόνο κατά μήκος ορισμένων διευθύνσεων ονομάζονται, όπως θα δούμε και σε επόμενο κεφάλαιο, **γραμμικώς πολωμένα**.



Σχήμα 2.1 Γραφική αναπαράσταση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται κατά την θετική διεύθυνση του άξονα x .

Υποθέτοντας ότι το κύμα διαδίδεται στο κενό, όπου δεν υπάρχουν φορτία και ηλεκτρικό ρεύμα ($Q=0$ και $I=0$), οι δύο τελευταίες εξισώσεις του Maxwell γράφονται

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = - \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (2.5)$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_e}{dt} \quad (2.6)$$

Μιας και το κύμα είναι επίπεδο και το E έχει συνιστώσα μόνο κατά την διεύθυνση y ενώ το B μόνο κατά την z καταλήγουμε στις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις.

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.8)$$

Παραγωγίζοντας την (2.5) έχουμε και χρησιμοποιώντας την (2.6)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right) &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} &= -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} &= -\frac{\partial}{\partial t} \left(-\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

από την οποία καταλήγουμε στην

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

Όμοια παραγωγίζοντας την (2.6) καταλήγουμε στην σχέση

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

Οι εξισώσεις (2.10) και (2.11) έχουν την γενική μορφή της εξίσωσης κύματος

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}$$

που διαδίδεται κατά την διεύθυνση x με ταχύτητα v . Άρα λοιπόν οι εξισώσεις (2.10) και (2.11) παριστάνουν ένα ηλεκτρομαγνητικό που διαδίδεται με ταχύτητα ίση με

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.12)$$

Χρησιμοποιώντας τις γνωστές τιμές για τις σταθερές $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb/A m}$ και $\epsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N m}^2$ βρίσκουμε ότι η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο κενό είναι

$$v = 2.99792 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Η ταχύτητα όμως αυτή είναι ίδια με την ταχύτητα του φωτός στο κενό c . Άρα λοιπόν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα λοιπόν έχουν μία συχνότητα f και ένα μήκος κύματος λ που σχετίζονται με την απλή σχέση

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.13)$$

Η πιο απλή εξίσωση κύματος, λύση των εξισώσεων (2.10) και (2.11) είναι

$$E = E_{\max} \cos(kx - \omega t) \quad (2.14)$$

$$B = B_{\max} \cos(kx - \omega t) \quad (2.15)$$

όπου η σταθερή k ονομάζεται κυματάριθμος και είναι ίση με $k = 2\pi / \lambda$, ενώ η γωνιακή ταχύτητα ω είναι ίση με $\omega = 2\pi f$.

Αν παραγωγίσουμε τις εξισώσεις (2.14) και (2.15), την πρώτη ως προς x και την δεύτερη ως προς t , έχουμε

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -k E_{\max} \sin(kx - \omega t) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \omega B_{\max} \sin(kx - \omega t) \quad (2.17)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις με την (2.7) καταλήγουμε

$$\begin{aligned} k E_{\max} &= \omega B_{\max} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{E_{\max}}{B_{\max}} &= \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = f\lambda = c \end{aligned} \quad (2.18)$$

Εφόσον ο λόγος των μέγιστων τιμών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι σταθερός τότε, σύμφωνα με τις σχέσεις (2.14) και (2.15), θα έχουμε πάντα

$$\frac{E}{B} = \frac{E_{\max}}{B_{\max}} = c \quad (2.19)$$

Η ένταση, δηλαδή, του ηλεκτρικού πεδίου και η ένταση (μαγνητική επαγωγή) του μαγνητικού πεδίου σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα μεταβάλλονται έτσι ώστε σε κάθε σημείο του χώρου που το κύμα διαδίδεται και σε κάθε χρονική στιγμή, λόγος τους να είναι ίσος με την ταχύτητα του φωτός.

2.4. Δημιουργία και εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

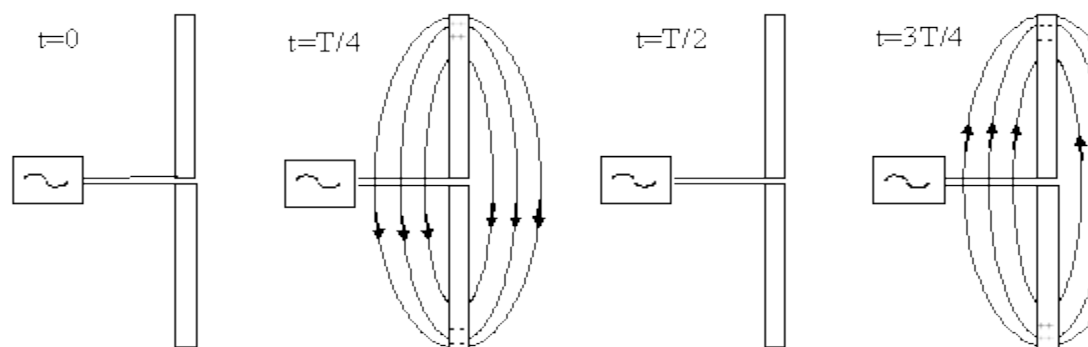
Εξετάζοντας τις δύο τελευταίες εξισώσεις του Maxwell βλέπουμε ότι ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται από

- Μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία τα οποία δημιουργούν ηλεκτρικά πεδία
- Μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία τα οποία δημιουργούν μαγνητικά πεδία

Πιο γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι *“Η επιτάχυνση των ηλεκτρικών φορτίων είναι το αίτιο που δημιουργεί την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Όταν φορτισμένο σώματιο π.χ. ένα ηλεκτρόνιο, επιταχύνεται ή επιβραδύνεται, εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.”*

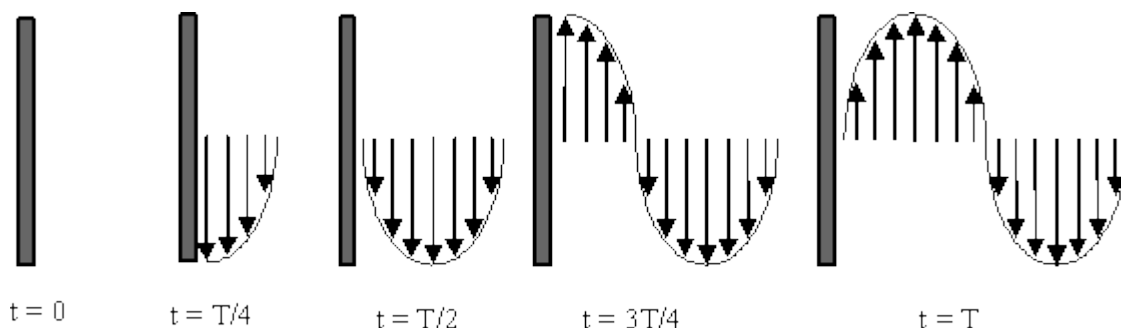
Ας εξετάσουμε πρώτα την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από ένα ηλεκτρικό δίπολο ή όπως συνήθως ονομάζεται μία διπολική κεραία. Η κεραία αποτελείται από δύο μεταλλικές ράβδους στις οποίες συνδέουμε με κύκλωμα παροχής εναλλασσόμενης τάσης. Στο **Σχήμα 2.2** παρουσιάζεται μία τέτοια κεραία. Η παρεχόμενη εναλλασσόμενη τάση μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με τον χρόνο με μία συχνότητα ν .

$$V(t) = V_{\max} \sin(2\pi \nu t) = V_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (2.20)$$



Σχήμα 2.2 Ταλαντώσεις των φορτίων και του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα ηλεκτρικό δίπολο (κεραία).

Στην χρονική στιγμή $t=0$ η παρεχόμενη τάση είναι μηδέν και η κεραία δεν παρουσιάζει φορτία. Καθώς ο χρόνος περνάει η τάση γίνεται θετική με τιμή που συνεχώς αυξάνει και την χρονική στιγμή $t=T/4$ η τάση γίνεται μέγιστη. Ταυτόχρονα με την αύξηση της τάσης το ένα άκρο (η μία ράβδος) της κεραίας φορτίζεται θετικά ενώ το άλλο άκρο της κεραίας αρνητικά. Εμφανίζεται έτσι ηλεκτρικό πεδίο το οποίο αυξάνεται μέχρι την στιγμή $t=T/4$. Στην συνέχεια και μέχρι την χρονική στιγμή $T/2$ η τάση της πηγής μειώνεται παραμένοντας όμως θετική, κατά συνέπεια μειώνονται και τα φορτία στις δύο ράβδους. Το ηλεκτρικό πεδίο αρχίζει και αυτό να μειώνεται μέχρις ότου μηδενιστεί στην χρονική στιγμή $T/2$. Στην συνέχεια αρχίζει ο αντίστροφος (αρνητικός) κύκλος όπου η τάση γίνεται αρνητική και οι δύο ράβδοι φορτίζονται με αντίθετα (σε σχέση με τον θετικό) φορτία. Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από το δίπολο κάθε στιγμή διαδίδεται στον χώρο με την ταχύτητα του φωτός c . Έτσι την χρονική στιγμή $t=T$ το ηλεκτρικό πεδίο δίπλα στο δίπολο έχει τιμή μηδέν, ενώ σε απόσταση $c \cdot T/4$ από το δίπολο το ηλεκτρικό πεδίο παίρνει την μέγιστη του τιμή, όπως δηλαδή ήταν το πεδίο δίπλα στο δίπολο πριν από χρόνο $T/4$ (την στιγμή δηλαδή $3T/4$). Στο **Σχήμα 2.3** βλέπουμε το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από την κεραία και πώς αυτό διαδίδεται προς τα δεξιά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.



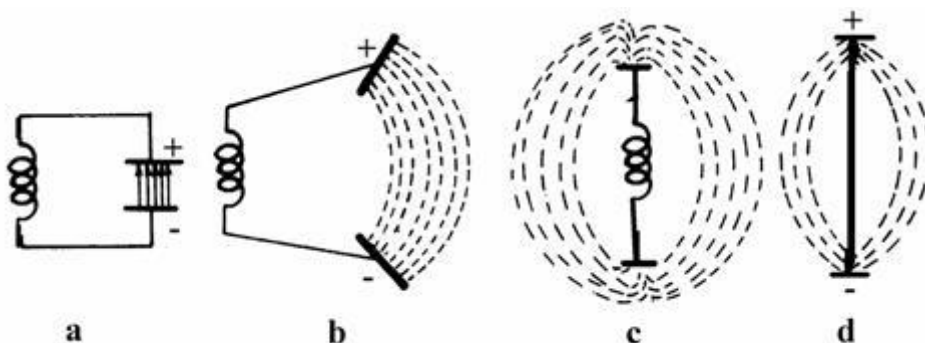
Σχήμα 2.3 Δημιουργία και διάδοση του ηλεκτρικού πεδίου στην διάρκεια μιας περιόδου από μία διπολική κεραία.

Ταυτόχρονα με το ηλεκτρικό πεδίο παράγεται και μαγνητικό πεδίο που είναι κάθετο στο επίπεδο του **Σχήματος 2.2**. Την χρονική στιγμή $t=0$ κατά την οποία αρχίζουν οι δύο ράβδοι του διπόλου να φορτίζονται το ρεύμα που διαρρέει το δίπολο είναι μέγιστο με αποτέλεσμα το δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο να παίρνει την μέγιστη τιμή. Όταν η τάση λαμβάνει την μέγιστη τιμή και το ηλεκτρικό πεδίο γίνεται μέγιστο, το ρεύμα που διαρρέει το δίπολο μηδενίζεται με συνέπεια να μηδενιστεί και

το μαγνητικό πεδίο. Στην συνέχεια η τάση μειώνεται με αποτέλεσμα να έχουμε μετακίνηση φορτίων κατά την αντίθετη φορά. Το μαγνητικό πεδίο ξαναρχίζει να αυξάνεται με φορά όμως αντίθετη από την προηγούμενη.

Έτσι λοιπόν έχουμε μία ημιτονοειδώς περιοδική μεταβολή των δύο πεδίων η οποία όπως προαναφέραμε διαδίδεται στον χώρο με ταχύτητα c . Ας σημειωθεί ότι το ηλεκτρικό πεδίο και το μαγνητικό πεδίο κοντά στην κεραία έχουν διαφορά φάσης 90° . Δηλαδή όταν το ένα μηδενίζεται το άλλο παίρνει την μέγιστη (θετική ή αρνητική) τιμή του και αντίστροφα.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάσαμε τα κυκλώματα LC και RLC στα οποία η ενέργεια μεταφέρεται περιοδικά από το ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου. Είδαμε ότι μπορούμε να επιτύχουμε ταλαντώσεις πολύ μεγάλης συχνότητας χρησιμοποιώντας πυκνωτές πολύ μικρής χωρητικότητας και πηνία πολύ μικρού συντελεστή αυτεπαγωγής.



Σχήμα 2.4 Μετάβαση από το κλειστό κύκλωμα LC στο ανοικτό κύκλωμα ενός παλλόμενου ηλεκτρικού διπόλου.

Ας πάρουμε ένα κύκλωμα LC όπως αυτό του **Σχήματος 2.4a**. Ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή εμφανίζεται όπως γνωρίζουμε ηλεκτρικό πεδίο. Απομακρύνουμε σιγά - σιγά τους οπλισμούς του πυκνωτή και τους φέρουμε σε θέση όπως στο **Σχήμα 2.4c**. Το ηλεκτρικό πεδίο τώρα διαχέεται στον χώρο. Αν επιπλέον αντικαταστήσουμε το πηνίο με έναν ευθύγραμμο αγωγό (**Σχήμα 2.4d**) τότε το κύκλωμα που προκύπτει είναι ένα **παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο**. Το ηλεκτρικό αυτό δίπολο όπως είδαμε προηγουμένως εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας ίδιας με την συχνότητα ταλάντωσης του διπόλου. Ένα σημείο που θα πρέπει να τονίζουμε είναι ότι με το να ανοίξουμε τον πυκνωτή και να χρησιμοποιήσουμε ευθύγραμμο αγωγό έχουμε μειώσει πολύ την χωρητικότητα C και

την αυτεπαγωγή L του κυκλώματος. Έτσι το κύκλωμα πάλλεται πολύ γρήγορα, εκπέμποντας ακτινοβολία πολύ μεγάλης συχνότητας, σύμφωνα με την σχέση (1.56) του προηγούμενου κεφαλαίου.

Εκτός από την διπολική κεραία, ηλεκτρομαγνητικά κύματα, όπως προαναφέραμε, δημιουργούνται όταν έχουμε αλλαγή της κινητικής κατάστασης (με άλλα λόγια επιτάχυνση) των φορτίων. Έτσι αν για παράδειγμα πάρουμε ένα φορτισμένο σώμα και αρχίσουμε να το κουνάμε δεξιά-αριστερά στον αέρα, τότε δημιουργούμε ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Στα άτομα, γνωρίζουμε από την ατομική φυσική, τα ηλεκτρόνια κατανέμονται σε στοιβάδες γύρω από τον πυρήνα. Σε ορισμένες περιπτώσεις ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε ανώτερη στοιβάδα από αυτή που πρέπει να ήταν κανονικά, όταν δηλαδή το άτομο είναι διεγερμένο, μεταπίπτουν πίσω στην βασική τους στοιβάδα. Αυτή η μετάπτωση συνοδεύεται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μιας και το ηλεκτρόνιο, άρα και το φορτίο του, επιταχύνονται και αλλάζουν κινητική κατάσταση έτσι ώστε να μπορέσουν να μετακινηθούν σε κατώτερη στοιβάδα.

2.5. Η ενέργεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καθώς διαδίδονται στον χώρο μεταφέρουν ενέργεια. Η ενέργεια αυτή ή μάλλον καλύτερα ο ρυθμός ροής της ενέργειας περιγράφεται με το **διάνυσμα Poynting** που ορίζεται ως

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (2.21)$$

και περιγράφει τον ρυθμό ροής της ενέργειας, δηλαδή την ενέργεια στην μονάδα του χρόνου, με άλλα λόγια την ισχύ, μέσα από μια μοναδιαία επιφάνεια που είναι κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η μονάδα μέτρησης φυσικά είναι W/m^2 (ισχύς ανά μονάδα επιφανείας). Η διεύθυνση του διανύσματος S είναι κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν τα διανύσματα \vec{E} και \vec{B} . Αν υποθέσουμε ότι το διάνυσμα \vec{E} κατευθύνεται κατά την διεύθυνση του άξονα x και το \vec{B} κατά την

διεύθυνση του άξονα y , τότε το διάνυσμα \vec{S} κατευθύνεται προς την διεύθυνση του άξονα z .

Σ' ένα επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα τα διανύσματα \vec{E} και \vec{B} είναι κάθετα μεταξύ τους. Άρα το διάνυσμα $\vec{E} \times \vec{B}$ έχει μέτρο ίσο με $E B$. Έχουμε λοιπόν

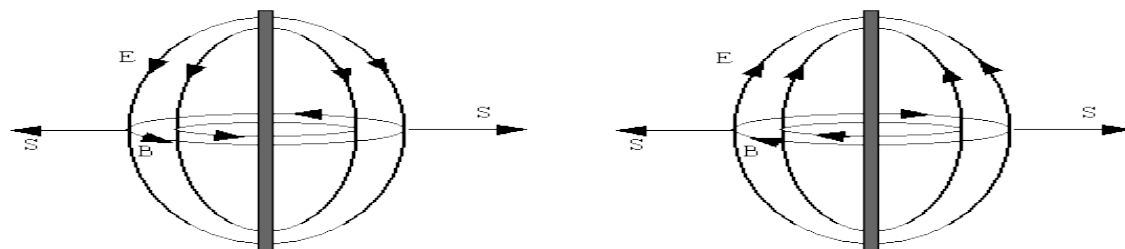
$$S = \frac{1}{\mu_0} E B \quad (2.22)$$

Αλλά γνωρίζουμε ότι $\frac{E}{B} = c$, άρα

$$S = \frac{1}{\mu_0 c} E^2 = \frac{c}{\mu_0} B^2 \quad (2.23)$$

Αν πάρουμε ένα αρμονικό ηλεκτρομαγνητικό κύμα, ένα κύμα δηλαδή που το ηλεκτρικό και μαγνητικό του πεδίο δίνεται από τις σχέσεις (2.14) και (2.15). Ο μέσος όρος του S κατά την διάρκεια μίας περιόδου ονομάζεται **ένταση του κύματος** και συμβολίζεται με I (προσοχή να μην το συγχέεται με την ένταση του ρεύματος σε έναν αγωγό που επίσης συμβολίζεται με I). Η ένταση του κύματος για το αρμονικό ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι ίσο με

$$I = \frac{1}{2\mu_0 c} E_{\max}^2 = \frac{c}{2\mu_0} B_{\max}^2 \quad (2.24)$$



Σχήμα 2.5 Η κατεύθυνση του διανύσματος Poynting σε μία διπολική κεραία.

Τέλος ας ξαναδούμε λίγο την διπολική κεραία και ας εξετάσουμε την διεύθυνση του διάνυσματος Poynting. Βλέπουμε και στο **Σχήμα 2.5** ότι το διάνυσμα S κατευθύνεται πάντα προς τα έξω παρόλο που τα E και B αλλάζουν φορά. Έτσι έχουμε μια συνεχή εκροή ενέργειας από την διπολική κεραία. Η ενέργεια αυτή πρέπει να συμπληρώνεται από μία ηλεκτρική πηγή.

2.6. Διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται από επιτάχυνση φορτίων και διαδίδονται στον χώρο με την ταχύτητα του φωτός. Ας εξετάσουμε λίγο παραπάνω την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που παράγονται από ένα ηλεκτρικό δίπολο.

Ας πάρουμε λοιπόν ένα ηλεκτρικό δίπολο που το μήκος του είναι ίσο με το μισό του μήκους κύματος της εκπεμπόμενης από αυτό ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ένα τέτοιο δίπολο ονομάζεται **κεραία μισού μήκους κύματος** ή **διπολική κεραία** ή **κεραία του Hertz**.

Στην περιοχή κοντά στην κεραία το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο παρουσιάζουν, όπως είδαμε στην 2.5 παρουσιάζουν διαφορά φάσης 90° . Επίσης τα δύο πεδία μειώνονται με την απόσταση r από το δίπολο ανάλογα με το $1/r^3$. Άρα δεν θα έπρεπε να απαντώνται σε μεγάλες αποστάσεις από την κεραία.

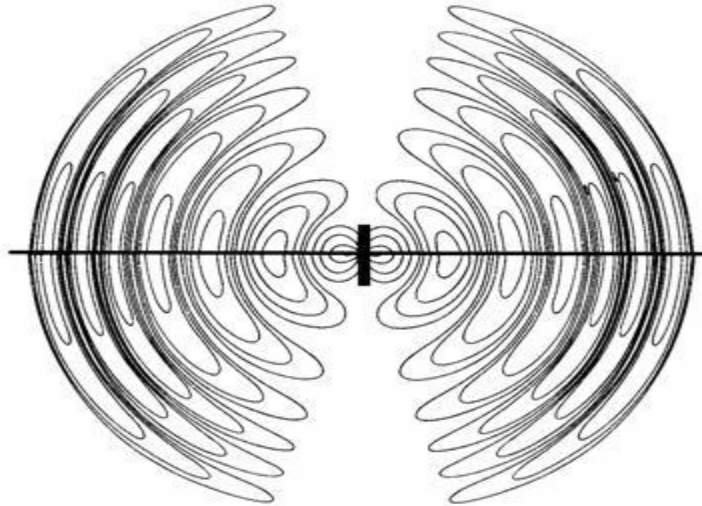
Στην πραγματικότητα, λόγω ακριβώς των εξισώσεων του Maxwell, σε μεγάλες αποστάσεις από την κεραία δημιουργείται, δευτερογενώς, ηλεκτρικό πεδίο από επαγωγή λόγω του μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Το ηλεκτρικό αυτό πεδίο δημιουργεί με την σειρά του μαγνητικό πεδίο. Τα δευτερογενώς δημιουργούμενα πεδία βρίσκονται σε φάση και μειώνονται με ρυθμό ανάλογο του $1/r$. Η σε φάση διάδοση των δύο πεδίων έχει σαν αποτέλεσμα την συνεχή εκροή ενέργειας από την κεραία. Το διάνυσμα Poynting και άρα και η ισχύς της ακτινοβολίας μεταβάλλεται με την απόσταση ανάλογα με το $1/r^2$.

Το πεδίο κοντά στην κεραία συνήθως ονομάζεται κοντινό πεδίο σε αντίθεση με το πεδίο μακριά από την κεραία που συνήθως μακρινό πεδίο. Η διάκριση μεταξύ

των δύο πεδίων δεν είναι αυστηρά σαφής. Γενικά θα μπορούσαμε να ορίσουμε πώς το μακρινό πεδίο αρχίζει από μία απόσταση r_F που είναι ίση με

$$r_F = \frac{2d^2}{\lambda} \quad (2.25)$$

όπου d το μήκος της κεραίας. Για την περίπτωση μας της διπολικής κεραίας μισού μήκους κύματος το μακρινό πεδίο αρχίζει από μία απόσταση ίση με $\lambda/2$.



Σχήμα 2.6 Το ηλεκτρικό πεδίο της εκπεμπόμενης, από μία κεραία μισού μήκους κύματος, ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργούνται από την διπολική κεραία μισού μήκους κύματος παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.6**. Η μέγιστη ισχύς εκπέμπεται κατά μήκος της ευθείας που είναι κάθετη στην κεραία και διέρχεται από την μέση της. Παρατηρήστε ότι κατά μήκος της κεραίας δεν εκπέμπεται ισχύς. Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η ισχύς που εκπέμπεται μεταβάλλεται με την γωνία από την κάθετο στην κεραία και με την απόσταση από την κεραία ως $\cos^2\theta/r^2$.

■ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Ηλεκτρομαγνητικές Ταλαντώσεις

3.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, αφού αναφερθούμε, εν συντομία, σε μερικά φαινόμενα του ηλεκτρομαγνητισμού, για να θυμηθούμε μερικές βασικές έννοιες και σχέσεις, θα μελετήσουμε τις ιδιότητες κυκλωμάτων που αποτελούνται από αντιστάσεις και πυκνωτές ή πηνία. Τέλος θα αναφερθούμε στην ιδιαίτερη κατηγορία κυκλωμάτων τα οποία, αποτελούμενα από πυκνωτές και πηνία, εμφανίζουν ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις, δηλαδή η ενέργεια τους εναλλάσσεται μεταξύ της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου του πυκνωτή και του μαγνητικού πεδίου του πηνίου.

3.2. Ηλεκτρικό πεδίο

Είναι γνωστό ότι ένα φορτίο Q δημιουργεί στο χώρο ένα πεδίο δυνάμεων. Ένα πεδίο, δηλαδή, στο οποίο αν βρεθεί ένα οποιοδήποτε άλλο φορτίο q ασκείται επάνω του δύναμη \vec{F} . Το πεδίο αυτό επειδή δημιουργείται από ηλεκτρικό φορτίο λέγεται ηλεκτρικό πεδίο.

Η δύναμη \vec{F} που ασκείται πάνω στο φορτίο q λόγω του πεδίου που δημιουργεί το φορτίο Q έχει διεύθυνση πάνω στην ευθεία που συνδέει τα δύο φορτία και είναι ίση με :

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} \hat{r} \quad (3.1)$$

όπου r η απόσταση των δύο φορτίων και \vec{r} το μοναδιαίο διάνυσμα στην ευθεία που συνδέει τα δύο φορτία με φορά από το φορτίο Q στο φορτίο q .

Φυσικά ηλεκτρικό πεδίο δεν δημιουργείται μόνο από ακίνητα σημειακά φορτία, όπως στην προηγούμενη παράγραφο, αλλά και από κινούμενα ή και από συνεχείς κατανομές φορτίων (όπως για παράδειγμα από τα φορτία στους οπλισμούς ενός πυκνωτή).

Ως **ένταση του ηλεκτρικού πεδίου** \vec{E} σε ένα σημείο του χώρου Σ (στον οποίο υπάρχει το πεδίο) ορίζουμε την δύναμη \vec{F} που εξασκείται λόγω του πεδίου σε ένα μοναδιαίο φορτίο που βρίσκεται στο συγκεκριμένο σημείο Σ . Ισοδύναμα θα μπορούσαμε να πούμε πως **ένταση του ηλεκτρικού πεδίου** σε ένα σημείο του χώρου Σ είναι το πηλίκο της δύναμης \vec{F} που ασκείται πάνω σε ένα φορτίο q που βρίσκεται στο σημείο αυτό, προς το φορτίο q . Δηλαδή

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (3.2)$$

Παράλληλα με τον ορισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μπορούμε να ορίσουμε την **ροή του ηλεκτρικού πεδίου** ή αλλιώς **ηλεκτρική ροή**. Αν θεωρήσουμε μία επιφάνεια S τότε το μέτρο της ηλεκτρικής ροής ενός πεδίου \vec{E} που περνά από την επιφάνεια S δίνεται από την σχέση :

$$\Phi = \int_S \vec{E} \cdot \vec{dS} \quad (3.3)$$

Το ολοκλήρωμα της προηγούμενης σχέσης είναι ένα επιεπιφάνειο ολοκλήρωμα, δηλαδή ένα ολοκλήρωμα που υπολογίζεται πάνω στην επιφάνεια S . Για απλή επίπεδη επιφάνεια και για \vec{E} που παραμένει σταθερό σε όλα τα σημεία της επιφάνειας η ηλεκτρική ροή είναι ίση με

$$\Phi = E S \cos \theta \quad (3.4)$$

όπου θ η γωνία που σχηματίζουν το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια S με το διάνυσμα \vec{E} .

3.3. Μαγνητικό πεδίο

Ένα κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο ή ισοδύναμα ένας αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί γύρω του ένα πεδίο δυνάμεων. Το πεδίο αυτό ασκεί δυνάμεις σε άλλα κινούμενα φορτία (ή αγωγούς που διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα). Το πεδίο αυτό ονομάζεται **μαγνητικό πεδίο**.

Ανάλογα προς την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορούμε να ορίσουμε την **ένταση του μαγνητικού πεδίου** \vec{B} ή όπως αλλιώς αναφέρεται **την μαγνητική επαγωγή**. Έστω λοιπόν ένα φορτίο q που κινείται στον χώρο του μαγνητικού πεδίου \vec{B} με ταχύτητα \vec{v} . Η δύναμη που ασκείται στο φορτίο από το μαγνητικό πεδίο είναι ίση με

$$\vec{F} = q (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.5)$$

Η δύναμη \vec{F} είναι κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν τα διανύσματα \vec{v} και \vec{B} και έχει μέτρο :

$$F = q v B \sin \theta \quad (3.6)$$

όπου θ η γωνία των διανυσμάτων \vec{v} και \vec{B} .

Πώς όμως δημιουργείται αυτό το πεδίο \vec{B} που επηρεάζει τα κινούμενα φορτία και τους ρευματοφόρους αγωγούς; Οι Biot και Savart μετά από πειράματα κατέληξαν ότι όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως I τότε κάθε στοιχειώδες τμήμα

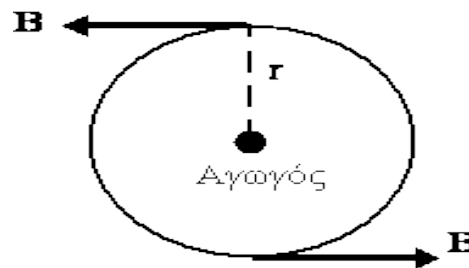
του μήκους \overrightarrow{da} δημιουργεί σε ένα σημείο Σ του χώρου (εκτός του αγωγού) μαγνητικό πεδίο που η έντασή του $d\vec{B}$ δίνεται από την σχέση :

$$\overrightarrow{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{a} \times \vec{r}}{r^3} \quad (3.7)$$

όπου \vec{r} το διάνυσμα που συνδέει το στοιχειώδες τμήμα \overrightarrow{da} με το σημείο Σ και μ_0 μία σταθερή που ονομάζεται **μαγνητική διαπερατότητα του κενού** ή απλά **διαπερατότητα του κενού** και είναι ίση με $(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb} \times \text{A}^{-1} \times \text{m})$.

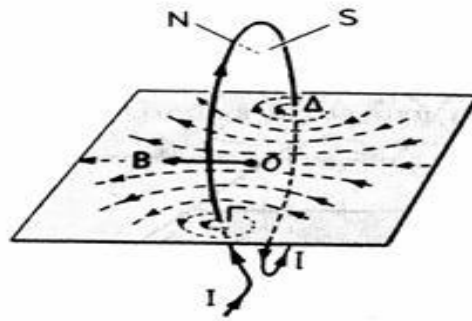
Χρησιμοποιώντας τον νόμο των Biot - Savart μπορούμε να υπολογίσουμε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν αγωγοί διαφόρων τύπων. Έτσι ένας ευθύγραμμος, θεωρητικά απείρου μήκους, αγωγός δημιουργεί σε απόσταση r μαγνητικό πεδίο έντασης :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (3.8)$$



Σχήμα 3.1 Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού.

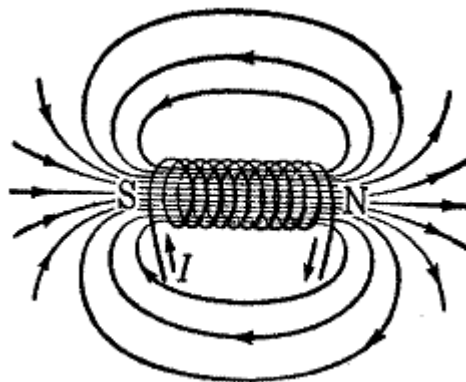
Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου είναι κύκλοι με κέντρο τον αγωγό. Έτσι, αν ο αγωγός ήταν κάθετος στο βιβλίο και η ένταση I είχε φορά από το βιβλίο προς τον αναγνώστη, η ένταση του πεδίου θα είχε την φορά που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.2 Μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού.

Ένας κυκλικός αγωγός ακτίνας R που διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως I δημιουργεί στον χώρο μαγνητικό πεδίο όμοιο με αυτό του **Σχήματος 3.2**. Το πεδίο αυτό προκύπτει από την ενισχυτική επιπρόσθεση των στοιχειωδών πεδίων που δημιουργούν κάθε ένα από τα στοιχειώδη τμήματα του αγωγού. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του κυκλικού αγωγού αποδεικνύεται ότι δίνεται από την σχέση:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (3.9)$$



Σχήμα 3.3 Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς (πηνίου).

Στην περίπτωση ενός σωληνοειδούς αγωγού ή, όπως συνήθως ονομάζεται, ενός πηνίου, μήκους ℓ που αποτελείται από N σπείρες και διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως I , το μαγνητικό πεδίο (**Σχήμα 3.3**) στο εσωτερικό του παρουσιάζεται ομογενές και έχει ένταση :

$$B = \frac{\mu_0 I N}{\ell} \quad (3.10)$$

Αντίστοιχα με την ηλεκτρική ροή μπορούμε να ορίσουμε την **μαγνητική ροή** ή **ροή του μαγνητικού πεδίου** που διαρρέει μία επιφάνεια S ως το επιεπιφάνειο ολοκλήρωμα

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} \cdot \vec{ds} \quad (3.11)$$

Φυσικά στην περίπτωση σταθερού πεδίου έντασης B και επίπεδης επιφάνειας εμβαδού S η προηγούμενη σχέση ανάγεται στην αντίστοιχη της (3.4) όπου απλώς αντικαθιστούμε το E με το B .

3.4. Επαγωγή και αυτεπαγωγή

Αν ένας αγωγός βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου και η μαγνητική ροή που διαπερνά τον αγωγό μεταβάλλεται με τον χρόνο τότε στα άκρα του αγωγού εμφανίζεται ηλεκτρεγερτική δύναμη.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **επαγωγή** και η ηλεκτρεγερτική δύναμη που εμφανίζεται στα άκρα του αγωγού δίνεται από **τον νόμο της επαγωγής του Faraday**:

$$E = - \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (3.12)$$

Από τον ορισμό του Φ_m βλέπουμε ότι φαινόμενα επαγωγής μπορούμε να έχουμε είτε όταν μεταβάλλεται το μαγνητικό πεδίο είτε όταν μεταβάλλεται η επιφάνεια του αγωγού (για παράδειγμα όταν αλλάζει ο προσανατολισμός του αγωγού δηλαδή η γωνία θ). Το αρνητικό πρόσημο στην προηγούμενη σχέση οφείλεται στο γεγονός ότι

η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι τέτοια ώστε να τείνει να δημιουργήσει ρεύμα το οποίο θα παράγει μαγνητική ροή που αντιτίθεται στην μεταβολή της Φ_m .

Ας πάρουμε τώρα ένα πηνίο που διαρρέεται από ρεύμα έντασης I . Το πηνίο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο σύμφωνα με την σχέση (3.10). Αν μεταβάλλουμε το ρεύμα I (ή αν διακόψουμε τελείως το ρεύμα) τότε το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται. Ταυτόχρονα μεταβάλλεται η μαγνητική ροή Φ_m που διαρρέει το πηνίο. Σύμφωνα λοιπόν με την σχέση (3.12) δημιουργείται στον αγωγό ηλεκτρεγερτική δύναμη η οποία δημιουργεί ρεύμα που αντιτίθεται στην μεταβολή της έντασης I . Το ίδιο θα συμβεί αν αρχικά το πηνίο δεν διαρρέεται από ρεύμα και κλείσουμε τον διακόπτη δίνοντας ρεύμα στο κύκλωμα. Και στην περίπτωση αυτή η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη αντιτίθεται στην μεταβολή της έντασης και το ρεύμα I δεν παίρνει αμέσως την μέγιστη τιμή του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **αυτεπαγωγή**.

Στην περίπτωση ενός πηνίου με N σπείρες η ηλεκτρεγερτική δύναμη από αυτεπαγωγή δίνεται από την σχέση :

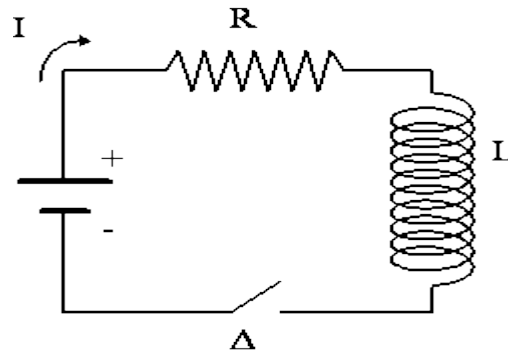
$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_m}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (3.13)$$

Η σταθερή αναλογία L ονομάζεται **συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου** και εξαρτάται από τα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πηνίου.

3.5. Κυκλώματα RL.

Όταν ένα κύκλωμα περιλαμβάνει ένα κυκλικό αγωγό ή ένα πηνίο τότε έχει αυτεπαγωγή. Είδαμε ότι το φαινόμενο της αυτεπαγωγής ανθίσταται στην μεταβολή της μαγνητικής ροής εμποδίζοντας στην ουσία το ρεύμα να αυξηθεί ή να μειωθεί ακαριαία.

Ας εξετάσουμε λοιπόν ένα κύκλωμα, όπως αυτό του **Σχήματος 3.8**, που αποτελείται από μία αντίσταση R και ένα πηνίο με συντελεστή αυτεπαγωγής L συνδεδεμένα εν σειρά. Στο κύκλωμα υπάρχει πηγή συνεχούς ρεύματος π.χ. μία μπαταρία, ηλεκτρεγερτικής δύναμης \mathcal{E} και παρεμβάλλεται ένας διακόπτης Δ .



Σχήμα 3.8 Κύκλωμα RL .

Κατά την χρονική στιγμή $t=0$ κλείνουμε τον διακόπτη και το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα έντασης I . Ταυτόχρονα με την δημιουργία μαγνητικού πεδίου στο πηνίο και την αύξηση της μαγνητικής ροής δημιουργείται ηλεκτρεγερτική δύναμη λόγω αυτεπαγωγής στα άκρα του πηνίου (βλέπε και §3.4)

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (3.29)$$

Η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι αρνητική μιας και το ρεύμα αυξάνεται. Αυτή η αρνητική ηλεκτρεγερτική δύναμη ανθίσταται στην ηλεκτρεγερτική δύναμη της μπαταρίας και στην περίπτωση αυτή ο δεύτερος κανόνας του Kirchhoff μας δίνει:

$$\mathcal{E} - IR - L \frac{dI}{dt} = 0 \quad (3.30)$$

Διαιρούμε την εξίσωση με το R και βρίσκουμε

$$\frac{\mathcal{E}}{R} - I - \frac{L}{R} \frac{dI}{dt} = 0 \quad (3.31)$$

Αν στην προηγούμενη σχέση θέσουμε $x = \frac{\mathcal{E}}{R} - I$, τότε $\frac{dx}{dt} = -\frac{dI}{dt}$ η σχέση γίνεται

$$x + \frac{L}{R} \frac{dx}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{dx}{x} = -\frac{R}{L} dt \quad (3.32)$$

Η λύση της εξίσωσης (3.31) είναι

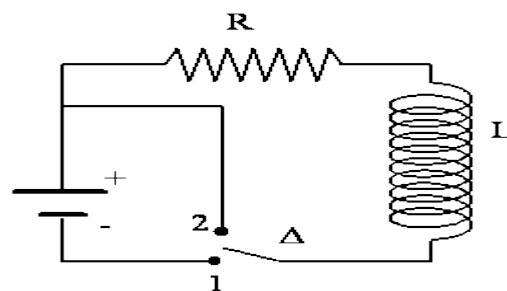
$$x = x_0 \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) \quad (3.33)$$

Αντικαθιστώντας ξανά $x = \frac{\mathcal{E}}{R} - I$ και παρατηρώντας ότι όταν $t=0$ τότε $I=0$ και $x_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}$ βρίσκουμε

$$\frac{\mathcal{E}}{R} - I = \frac{\mathcal{E}}{R} \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) \Rightarrow I = \frac{\mathcal{E}}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right)\right] \quad (3.34)$$

Η εξίσωση (3.33) αποτελεί λοιπόν την λύση της (3.30). Ορίζοντας ως σταθερά χρόνου τ του κυκλώματος τον λόγο R/L , μπορούμε να ξαναγράψουμε την προηγούμενη εξίσωση με την μορφή

$$I(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right] \quad (3.35)$$



Σχήμα 3.9 Κύκλωμα RL .

Ας τροποποιήσουμε λίγο το κύκλωμα του **Σχήματος 3.8** αλλάζοντας τον διακόπτη με ένα διακόπτη δύο θέσεων και τοποθετώντας στην θέση 2 του διακόπτη ένα μικρό τμήμα αγωγού που παρακάμπτει την μπαταρία. Το νέο κύκλωμα φαίνεται

στο Σχήμα 3.9. Όπως βλέπουμε και από το σχήμα όταν ο διακόπτης είναι στην θέση 1 το κύκλωμα τροφοδοτείται κανονικά από την μπαταρία και ισχύουν όσα αναφέραμε προηγουμένως.

Τοποθετούμε λοιπόν αρχικά τον διακόπτη στη θέση 1 και τον αφήνουμε στη θέση αυτή αρκετή ώρα έτσι ώστε στο κύκλωμα το ρεύμα να αποκτήσει την ασυμπτωτική του τιμή

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}.$$

Κατόπιν, στην χρονική στιγμή $t=0$ τοποθετούμε τον διακόπτη στην θέση 2, αφαιρώντας ουσιαστικά από το κύκλωμα την μπαταρία. Στην περίπτωση αυτή έχουμε $\mathcal{E} = 0$ και από τον κανόνα του Kirchhoff βρίσκουμε

$$IR + L \frac{dI}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt \quad (3.36)$$

Η διαφορική εξίσωση (3.36) είναι της ίδιας μορφής με την εξίσωση (3.18) οπότε η λύση της είναι ανάλογη της (3.20) δηλαδή

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3.37)$$

όπου $\tau = L/R$ η σταθερά χρόνου του κυκλώματος.

Ας πάρουμε ξανά την εξίσωση (3.30) και ας την γράψουμε με την μορφή

$$\mathcal{E} = IR + L \frac{dI}{dt} \quad (3.38)$$

Πολλαπλασιάζουμε και τα δύο μέλη της εξίσωσης με την ένταση του ρεύματος I

$$\mathcal{E}I = I^2 R + LI \frac{dI}{dt} \quad (3.39)$$

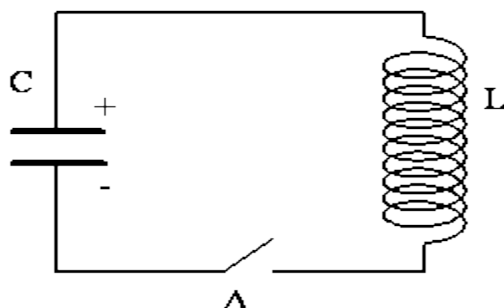
Το αριστερό μέρος της εξίσωσης (εI) μας δίνει την ισχύ (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου) που παρέχει η μπαταρία στο κύκλωμα. Ο πρώτος όρος του δεξιού μέρους της εξίσωσης ($I^2 R$) είναι ως γνωστόν η ισχύς του ηλεκτρικού ρεύματος που καταναλώνεται στην αντίσταση με την μορφή θερμότητας. Ο δεύτερος όρος θα είναι φυσικά και αυτός ισχύς και είναι η ισχύς που αποθηκεύεται στο πηνίο. Η σχέση (3.39) δεν είναι τίποτα άλλο από μία έκφραση του νόμου διατήρησης της ενέργειας.

Αν συμβολίσουμε με E_{π} την ενέργεια που αποθηκεύεται συνολικά στο πηνίο τότε η χρονική παράγωγος της ενέργειας αυτής (δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής της) είναι η ισχύς που αποθηκεύεται στο πηνίο, για την οποία αναφερθήκαμε προηγουμένως. Άρα λοιπόν

$$\begin{aligned} \frac{dE_{\pi}}{dt} &= LI \frac{dI}{dt} \Rightarrow dE_{\pi} = LI dI \Rightarrow \int_0^{E_{\pi}} dE_{\pi} = \int_0^I LI dI \Rightarrow \\ \Rightarrow E_{\pi} &= \frac{1}{2} LI^2 \end{aligned} \quad (3.40)$$

Η τελευταία σχέση μας δίνει την ενέργεια που αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου. Η σχέση αυτής μοιάζει με την σχέση (3.24) που μας δίνει την ενέργεια που αποθηκεύεται στον ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή στο κύκλωμα RC. Βλέπουμε λοιπόν ότι και στις δύο περιπτώσεις καταναλώνεται μέρος της ενέργειας της πηγής ηλεκτρικού ρεύματος για να σχηματιστεί το αντίστοιχο πεδίο.

3.6. Ταλαντούμενα κυκλώματα LC.



Σχήμα 3.10 Κύκλωμα LC.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι έχουμε ένα κύκλωμα που αποτελείται μόνο από ένα πυκνωτή χωρητικότητας C και ένα πηνίο με συντελεστή αυτεπαγωγής L . Υποθέτουμε επίσης ότι το κύκλωμα έχει μηδενική ωμική αντίσταση.

Στο **Σχήμα 3.10** παρουσιάζεται ένα κύκλωμα RL. Έστω λοιπόν ότι ο πυκνωτής είναι αρχικά φορτισμένος με φορτίο Q και την στιγμή $t=0$ κλείνουμε τον διακόπτη. Ο πυκνωτής εκφορτίζεται και ρεύμα έντασης I διαρρέει το κύκλωμα. Το ρεύμα διερχόμενο από το πηνίο δημιουργεί όπως ξέρουμε μαγνητικό πεδίο.

Σε κάθε χρονική στιγμή η ενέργεια που είναι το κύκλωμα διαμοιράζεται στην ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή και στην ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου. Επειδή το κύκλωμα δεν περιέχει αντίσταση δεν υπάρχουν απώλειες της ηλεκτρικής ενέργειας, η ολική ενέργεια που είναι το άθροισμα της ενέργειας του πηνίου και της ενέργειας του πυκνωτή διατηρείται. Άρα η ολική ενέργεια είναι ίση με την ενέργεια που είχε αρχικά ο πυκνωτής. Αν συμβολίσουμε με E την ολική ενέργεια και με E_C και E_L την ενέργεια του πυκνωτή και του πηνίου αντίστοιχα τότε, χρησιμοποιώντας και τις σχέσεις (3.24) και (1.40), έχουμε

$$E = E_C + E_L = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \text{σταθερή} \quad (3.41)$$

Αν παραγωγίσουμε την προηγούμενη σχέση ως προς τον χρόνο βρίσκουμε

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dt} &= \frac{dE_C}{dt} + \frac{dE_L}{dt} \Rightarrow 0 = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} LI^2 \right) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{1}{2} \frac{1}{C} \frac{d(q^2)}{dt} + \frac{1}{2} L \frac{d(I^2)}{dt} = 0\end{aligned}\quad (3.42)$$

για και τα L και C είναι σταθερές, ενώ μόνο τα q και I μεταβάλλονται με τον χρόνο.

Έτσι καταλήγουμε στην διαφορική εξίσωση

$$\frac{q}{C} \frac{dq}{dt} + LI \frac{dI}{dt} = 0 \quad (3.43)$$

Ξέρουμε όμως ότι

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (3.44)$$

και επομένως

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2} \quad (3.45)$$

Αντικαθιστούμε τα $\frac{dq}{dt}$ και $\frac{dI}{dt}$ από τις προηγούμενες σχέσεις στην (3.43) και βρίσκουμε

$$\frac{q}{C} I + LI \frac{d^2q}{dt^2} = 0 \Rightarrow LI \frac{d^2q}{dt^2} = -\frac{q}{C} I \quad (3.46)$$

απλοποιώντας το I και από τα δύο μέλη καταλήγουμε στην διαφορική εξίσωση δευτέρας τάξης

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = -\frac{1}{LC} q \quad (3.47)$$

Η επίλυση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης είναι απλή. Ιδιαίτερα αν παρατηρήσουμε ότι μοιάζει με την διαφορική εξίσωση, στην μηχανική, της αρμονικής ταλάντωσης που εκτελεί ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου.

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 x \quad (3.48)$$

Η οποία έχει λύση της μορφής $x=A \sin(\omega t + \beta)$. Η λύση της λοιπόν είναι μία αρμονική ταλάντωση της μορφής

$$q = \alpha \cos(\omega t + \beta) \quad (3.49)$$

όπου α και β σταθερές τις οποίες θα προσπαθήσουμε να προσδιορίσουμε στην συνέχεια και ω η κυκλική συχνότητα που είναι ίση με

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.50)$$

Παραγωγίζοντας την σχέση (3.49) ως προς τον χρόνο βρίσκουμε την σχέση μεταβολής της έντασης του ρεύματος

$$I = -\omega \alpha \sin(\omega t + \beta) \quad (3.51)$$

Ας προσπαθήσουμε τώρα να υπολογίσουμε τις δύο σταθερές α και β στις εξισώσεις (3.49) και (3.51). Την χρονική στιγμή $t=0$ το φορτίο στον πυκνωτή έχει την μέγιστη τιμή του $q=Q$ ενώ η ένταση ρεύμα είναι μηδέν. Θέτοντας $I=0$ και $t=0$ στην σχέση (3.51) βρίσκουμε ότι θα πρέπει

$$\sin(\beta) = 0 \Leftrightarrow \beta = 0 \quad (3.52)$$

Επιστρέφοντας στην σχέση (3.49) και θέτοντας $q=Q$ και $\beta=0$ βρίσκουμε ότι $\alpha=Q$ οπότε τελικά οι δύο σχέσεις γράφονται

$$q = Q \cos(\omega t) \quad (3.53)$$

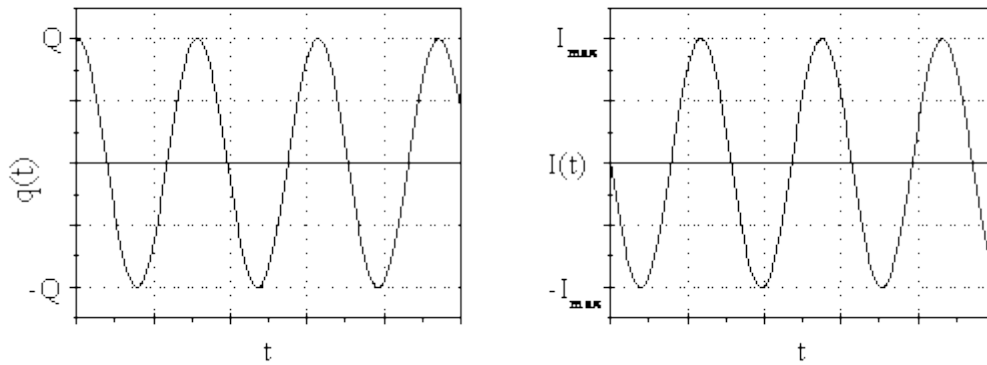
$$I = -\omega Q \sin(\omega t) = -I_{\max} \sin(\omega t) \quad (3.54)$$

όπου $I_{\max}=\omega Q$ είναι η μέγιστη ένταση του ρεύματος. Βλέπουμε λοιπόν ότι το φορτίο q ταλαντώνεται (αρμονική ή ημιτονοειδής ταλάντωση) μεταξύ των τιμών $-Q$ και Q , ενώ η ένταση του ρεύματος μεταξύ των $-I_{\max}$ και I_{\max} με μια διαφορά φάσης 90° . Δηλαδή, όταν το φορτίο μηδενίζεται το ρεύμα γίνεται μέγιστο (κατ' απόλυτη τιμή) και αντιστρόφως. Στο **Σχήμα 3.11** φαίνονται οι χρονικές μεταβολές του φορτίου και της έντασης του ρεύματος.

Ας ξαναγυρίσουμε στην εξίσωση της ενέργειας (3.41) και ας αντικαταστήσουμε το φορτίο και την ένταση του ρεύματος από τις δύο προηγούμενες εξισώσεις.

$$\begin{aligned} E &= E_C + E_L = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} LI^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow E &= \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \cos^2(\omega t) + \frac{1}{2} LI_{\max}^2 \sin^2(\omega t) \end{aligned} \quad (3.55)$$

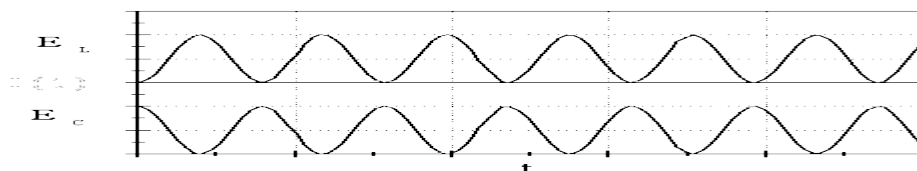
Βλέπουμε λοιπόν πως η ενέργεια του κυκλώματος ταλαντώνεται συνεχώς ανάμεσα στην ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου του πυκνωτή (πρώτος όρος του δεξιού μέρους της εξίσωσης) και του μαγνητικού πεδίου του πηνίου (δεύτερος όρος του δεξιού μέρους της εξίσωσης). Στο **Σχήμα 3.12** παρουσιάζεται γραφικά αυτή η μεταβολή της ενέργειας από ηλεκτρική σε μαγνητική και αντίστροφα. Το άθροισμα και των δύο, δηλαδή η ολική ενέργεια E , είναι πάντα σταθερό. Υπενθυμίζεται ότι η ολική ενέργεια παραμένει σταθερή μόνο αν υποθέσουμε ότι το κύκλωμα δεν έχει ωμική αντίσταση. Στην πραγματικότητα αυτό δεν συμβαίνει ποτέ. Το κύκλωμα πάντα έχει μία έστω και μικρή αντίσταση και έτσι υπάρχουν απώλειες της ολικής ενέργειας λόγω μετατροπής



Σχήμα 3.11 Μεταβολή του φορτίου q του πυκνωτή και της έντασης του ρεύματος I συναρτήσει του χρόνου σε ένα κύκλωμα LC .

της σε θερμότητα πάνω στην αντίσταση. Επίσης, όπως θα δούμε στην συνέχεια, τα κυκλώματα αυτά εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Άρα θα έχουμε απώλειες ενέργειας και λόγω αυτής της εκπομπής. Στην ιδανική περίπτωση που εξετάσαμε, όπου δηλαδή υποθέσαμε ότι δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας, οι ταλαντώσεις του κυκλώματος συνεχίζονται επ' άπειρον.

Ένα σημείο που ίσως διέφυγε της προσοχής μας είναι η εξίσωση (3.50). Η εξίσωση αυτή μας δίνει την κυκλική συχνότητα της ταλάντωσης. Γνωρίζουμε όμως ότι η κυκλική συχνότητα ω σχετίζεται με την συχνότητα f της ταλάντωσης με την σχέση $\omega = 2\pi f$. Άρα λοιπόν το κύκλωμα ταλαντώνεται με συχνότητα

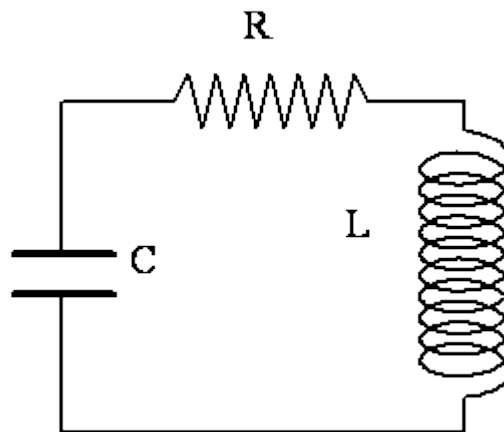


Σχήμα 3.12 Χρονική μεταβολή της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου του πηνίου E_L και του ηλεκτρικού πεδίου του πυκνωτή E_C σε κύκλωμα LC .

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.56)$$

Βλέπουμε δηλαδή ότι η συχνότητα ταλάντωσης εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος, δηλαδή την χωρητικότητα του πυκνωτή και τον συντελεστή αυτεπαγωγής του πηνίου και όχι από το αρχικό φορτίο του πυκνωτή. Μάλιστα, η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη των χαρακτηριστικών αυτών. Έτσι χρησιμοποιώντας μικρούς πυκνωτές και πηνία μπορούμε να πετύχουμε πολύ μεγάλες συχνότητες ταλάντωσης. Για παράδειγμα, με πυκνωτές μερικών pF και πηνία με συντελεστή αυτεπαγωγής της τάξης των mH, η συχνότητα είναι της τάξης των GHz.

3.7. Κυκλώματα RLC



Σχήμα 3.13 Κύκλωμα RLC.

Στην προηγούμενη παράγραφο υποθέσαμε ότι η ωμική αντίσταση του κυκλώματος είναι μηδέν. Θα εξετάσουμε τώρα την πιο ρεαλιστική περίπτωση στην οποία το κύκλωμα πέραν του πυκνωτή C και του πηνίου L περιλαμβάνει και ωμική αντίσταση R. Στο **Σχήμα 3.13** φαίνεται ένα κύκλωμα αυτού του είδους ή όπως ονομάζεται κύκλωμα RLC.

Ας υποθέσουμε ότι πριν κλείσει ο διακόπτης, ο πυκνωτής είχε φορτίο Q . Με το κλείσιμο του διακόπτη την χρονική στιγμή $t=0$ το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα και η ενέργεια που ήταν αποθηκευμένη στον πυκνωτή διαδίδεται στο κύκλωμα και ένα μέρος της αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου, ενώ ένα άλλο μέρος της καταναλώνεται με την μορφή θερμότητας πάνω στην αντίσταση.

Στην περίπτωση λοιπόν αυτή στην ολική ενέργεια του συστήματος θα πρέπει εκτός της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου του πυκνωτή και της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου του πηνίου να συμπεριλάβουμε και την ηλεκτρική ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμική πάνω στην ωμική αντίσταση. Η ολική ενέργεια του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης δηλαδή και της θερμικής, διατηρείται, αλλά η ενέργεια που διαρρέει το κύκλωμα μειώνεται λόγω αυτής της μετατροπής σε θερμότητα σε κάθε χρονική στιγμή με ρυθμό

$$\frac{dE}{dt} = -I^2 R \quad (3.57)$$

Έτσι η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας (3.43) που είχαμε στο κύκλωμα LC γράφεται στην περίπτωση του κυκλώματος RLC ως

$$\frac{q}{C} \frac{dq}{dt} + LI \frac{dI}{dt} = -I^2 R \quad (3.58)$$

Θέτοντας

$$I = \frac{dq}{dt} \quad \text{και} \quad \frac{dI}{dt} = \frac{d^2 q}{dt^2}$$

βρίσκουμε

$$\begin{aligned} \frac{q}{C} \frac{dq}{dt} + L \frac{dq}{dt} \frac{d^2q}{dt^2} &= - \left(\frac{dq}{dt} \right)^2 R \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{q}{C} + L \frac{d^2q}{dt^2} &= -R \frac{dq}{dt} \end{aligned} \quad (3.59)$$

και τελικά καταλήγουμε στην διαφορική εξίσωση

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = 0 \quad (3.60)$$

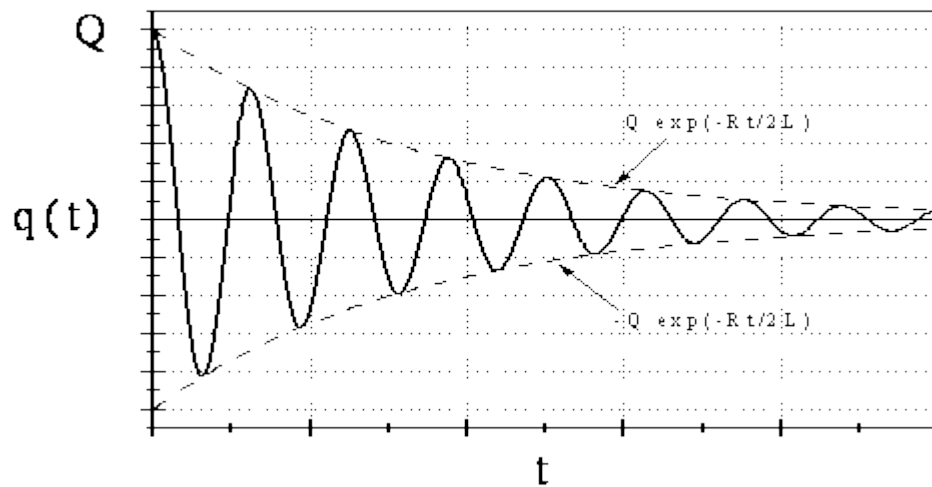
Η πλήρης λύση της (3.60) είναι αρκετά πολύπλοκη και ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτού του συγγράμματος. Μοιάζει πάντως με την λύση που έχουμε στην μηχανική στην περίπτωση ταλάντωσης με απόσβεση που είναι ανάλογη της ταχύτητας κίνησης π.χ. ταλάντωση μέσα σε υγρό.

Αν υποθέσουμε ότι η αντίσταση R είναι σχετικά μικρή. Η λύση της (3.60) για την περίπτωση αυτή είναι

$$q(t) = Q \exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right) \cos(\omega t) \quad (3.61)$$

όπου η κυκλική συχνότητα ω , στην περίπτωση αυτή, δίνεται από την σχέση

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (3.62)$$



Σχήμα 3.14 Η μεταβολή του φορτίου q σαν συνάρτηση του χρόνου σε ένα κύκλωμα RLC με μικρή ωμική αντίσταση R , δηλαδή με μικρή απόσβεση.

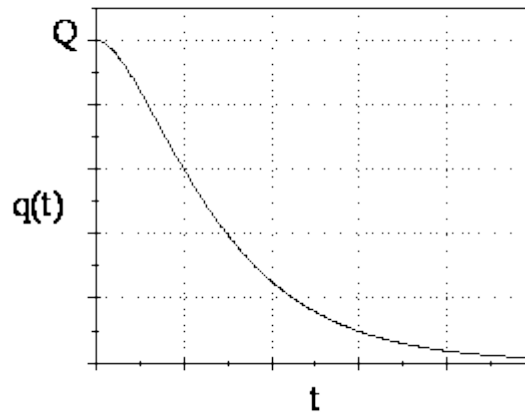
Στο **Σχήμα 3.14** παρουσιάζεται η μεταβολή του φορτίου, σύμφωνα με την εξίσωση (3.61) στην περίπτωση που η ωμική αντίσταση είναι σχετικά μικρή έτσι ώστε να έχουμε μικρή απόσβεση. Βλέπουμε δηλαδή ότι το φορτίο εκτελεί μία φθίνουσα ταλάντωση.

Πόσο μικρή όμως πρέπει να είναι η αντίσταση R και τι συμβαίνει αν είναι μεγαλύτερη; Ας δούμε λίγο την σχέση (3.62). Η γωνιακή συχνότητα πρέπει να είναι ένας πραγματικός αριθμός. Για να συμβαίνει όμως αυτό θα πρέπει η ποσότητα που βρίσκεται στα δεξιά της (3.62) μέσα στην ρίζα να είναι ένας θετικός αριθμός ή στην χειρότερη περίπτωση να είναι ίση με μηδέν. Δηλαδή θα πρέπει

$$\begin{aligned} \frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2 &\geq 0 \Rightarrow \left(\frac{R}{2L}\right)^2 \leq \frac{1}{LC} \Rightarrow \frac{R^2}{4L^2} \leq \frac{1}{LC} \Rightarrow \\ \Rightarrow R^2 &\leq \frac{4L}{C} \end{aligned} \quad (3.63)$$

Θα πρέπει δηλαδή να είναι

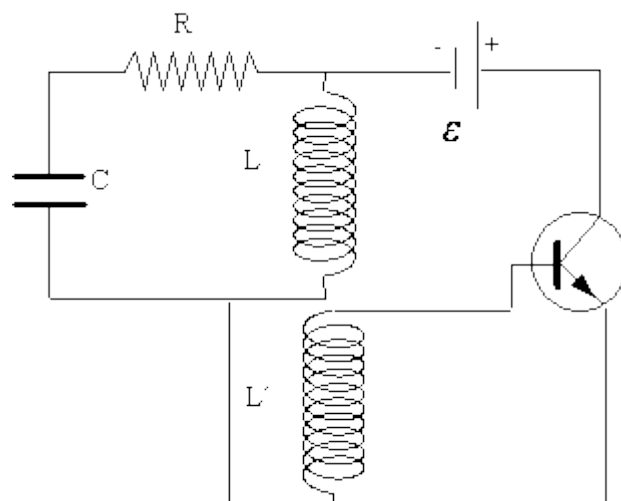
$$\Rightarrow R \leq R_c = \sqrt{\frac{4L}{C}} \quad (3.64)$$



Σχήμα 3.15 Μεταβολή του φορτίου σε κύκλωμα RLC όταν η ωμική αντίσταση είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης τιμής, $R > \sqrt{4L/C}$

Η τιμή R_c της αντίστασης ονομάζεται κρίσιμη αντίσταση. Για τιμές της αντίστασης μεγαλύτερες από την R_c η απόσβεση είναι τόσο γρήγορη έτσι ώστε να μην υπάρχει ταλάντωση. Μια τέτοια περίπτωση φαίνεται στο **Σχήμα 3.15**

Όπως είδαμε λοιπόν από την σχέση (3.61) αλλά και από το **Σχήμα 3.14**, ακόμη και για πολύ μικρή αντίσταση η ταλάντωση είναι φθίνουσα. Το κύκλωμα δηλαδή μετά από κάποιο χρονικό διάστημα θα σταματήσει πρακτικά να ταλαντώνεται. Για να επιτύχουμε η ταλάντωση να συνεχίζεται επ' άπειρον θα πρέπει με κάποιο τρόπο να αναπληρώνουμε την ενέργεια που χάνεται με την μορφή θερμότητας πάνω στην ωμική αντίσταση.



Σχήμα 3.16 Κύκλωμα RLC με αναπλήρωση ενέργειας έτσι ώστε να εκτελεί αμείωτες ταλαντώσεις.

Ένα κύκλωμα με το οποίο μπορούμε να επιτύχουμε αμείωτες ταλαντώσεις στον βρόγχο RLC , με αναπλήρωση της ενέργειας, φαίνεται **στο Σχήμα 3.16**. Το πηνίο L' είναι επαγωγικά συζευγμένο με το πηνίο L . Αυξομειώσεις, δηλαδή, της έντασης του ρεύματος που διέρχεται από το πηνίο L και που προκαλούν αυξομειώσεις στο μαγνητικό πεδίο του L , έχουν σαν συνέπεια την δημιουργία ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα άκρα του πηνίου L' λόγω αμοιβαίας επαγωγής. Το πηνίο L' ονομάζεται **συνήθως πηνίο ανάδρασης**. Το πηνίο ανάδρασης συνδέεται με την βάση και τον εκπομπό ενός τρανζίστορ (κρυσταλοτρίοδος) μεταβάλλοντας την μεταξύ των δύο ακροδεκτών διαφορά δυναμικού που με την σειρά της μεταβάλει την ένταση του ρεύματος στο κύκλωμα αναπλήρωσης ενέργειας. Έτσι με τον ίδιο ρυθμό με τις ταλαντώσεις του κυκλώματος RLC το κύκλωμα αναπλήρωσης δίνει ρυθμικές ενισχύσεις στο ρεύμα του κυκλώματος RLC . Η λειτουργία, λοιπόν, του κυκλώματος αυτού, είναι παρόμοια με το παιδί που κάνει κούνια και τον παππού (ή τη γιαγιά) που με τον ίδιο ρυθμό με την κούνια σπρώχνουν περιοδικά, έτσι ώστε να αναπληρώνεται η ενέργεια που χάνεται από τις τριβές και την αντίσταση του αέρα.

■ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Μεθοδολογία Πειραματικής Μελέτης

4.1. WiFi-Energy (ασύρματη μεταφορά ενέργειας)

4.1.1 Ορισμός WiFi-Energy

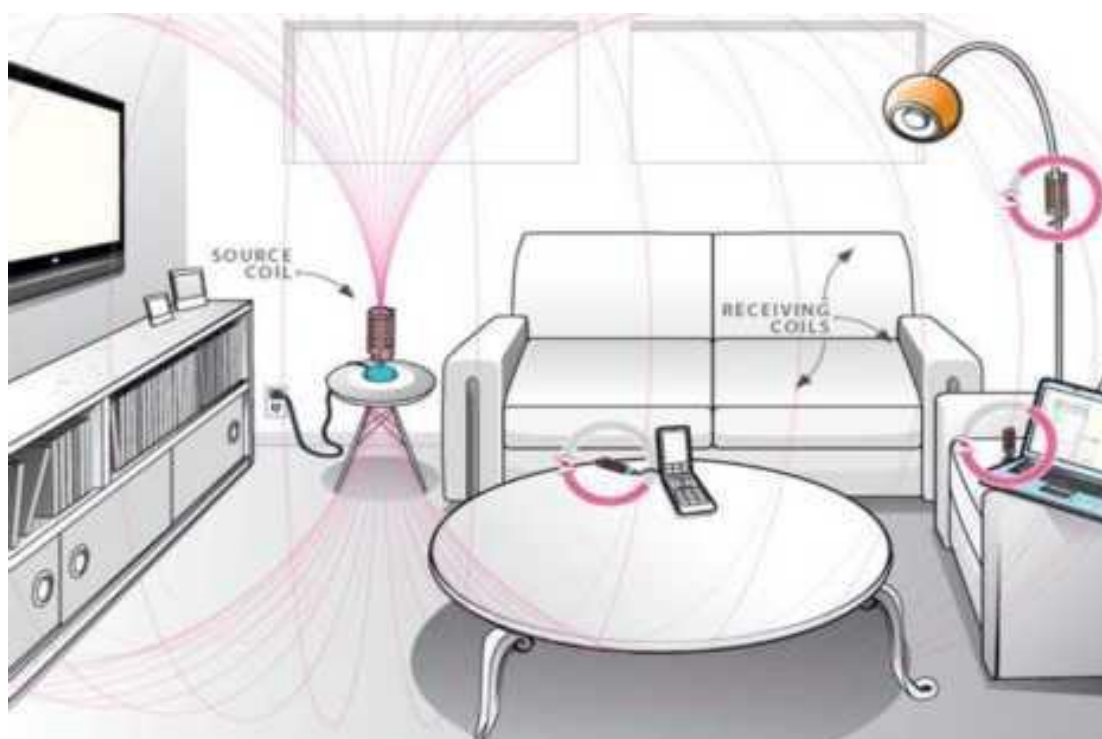
Ο όρος WiFi-Energy (ασύρματη μεταφορά ενέργειας) αποτελεί μια σύνθεση των λέξεων «ασύρματος» και «ενέργεια». Είναι μια μορφή μεταφοράς ενέργειας με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών ταλαντωτών. Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας (ασύρματο ηλεκτρικό ρεύμα) είναι διαφορετική αφού χρησιμοποιεί μαγνητική σύζευξη. Σε αυτή, δε χρειάζεται καθαρή οπτική γραμμή μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας είναι ένας πιο ασφαλής τρόπος μεταφοράς ενέργειας λόγω μικρότερης απόστασης μεταξύ του πομπού και του δέκτη.

Αυτά τα χαρακτηριστικά κάνουν το ασύρματο ηλεκτρικό ρεύμα μια πιθανή μορφή τεχνολογίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά ηλεκτρισμού/ενέργειας μεταξύ ηλεκτρικών πηγών και δεκτών χωρίς τη χρησιμοποίηση συρμάτων ή καλωδίων. Κρατώντας στο μυαλό συγκεκριμένους τομείς και σιγουρεύοντας ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι αρκετά ισχυρό ώστε να επιτρέψει μια εύλογη μεταφορά ενέργειας, είναι πιθανό να μεταφέρεις ενέργεια πάνω από μια συγκεκριμένη απόσταση. «Αυτό είναι πιθανό εφόσον και ο πομπός αλλά και ο δέκτης επιτύχουν μαγνητικό συντονισμό». Η ασύρματη μετάδοση ενέργειας είναι πολύ βοηθητική σε τομείς όπου απαιτείται συνεχόμενη, χωρίς διακοπές ενέργεια και η χρήση καλωδίων είναι άβολη, επικίνδυνη ή απίθανη.

4.1.2 Σημαντικότητα του WiFi-Energy

Φανταστείτε έναν κόσμο στον οποίο δε χρειάζεστε κανένα είδος καλωδίων για να τροφοδοτήσετε ή να φορτίσετε τις ηλεκτρονικές σας συσκευές. Τα πάντα, από τη λάμπα έως το κινητό σας, ακόμα και η τηλεόραση θα μπορούν να φορτίζονται ή να τροφοδοτούνται χωρίς καλώδια. Αυτό μπορεί να γίνει πραγματοποιήσιμο με τη χρήση του ηλεκτρικού ασύρματου ρεύματος. Αιώνες πριν, οι επιστήμονες θα γελούσαν με

την ιδέα της ασύρματης επικοινωνίας, αλλά σήμερα δεν μπορούμε να φανταστούμε έναν κόσμο χωρίς κινητά τηλέφωνα και ιντερνέτ. Η ταχεία ανάπτυξη και εξέλιξη στην έρευνα της ασύρματης τεχνολογίας έχει βοηθήσει τον κόσμο να σκέφτεται πέραν των συνηθισμένων. Τώρα είναι η ώρα η σκέψη να επεκταθεί ακόμα παραπέρα και να εξερευνηθεί ο κόσμος των ασύρματα τροφοδοτούμενων ηλεκτρονικών συσκευών μέσω της τεχνολογίας που παρέχεται από το ασύρματο ηλεκτρικό ρεύμα. Χρησιμοποιώντας ένα μόνο πηνίο-πηγή, πολλές συσκευές με πηνίο-δέκτη θα μπορούν να τροφοδοτηθούν. Σε ευρεία χρήση θα μπορούσε να εξαλείψει τις δαπανηρές μπαταρίες και να μην υπάρχουν πια ακατάστατα καλώδια.



Σχήμα 4.1 Ένα κεντρικό πηνίο-πηγή, που τροφοδοτεί πολλαπλές συσκευές

4.1.3 Απόσταση Τροφοδοσίας

Το ασύρματο ηλεκτρικό ρεύμα είναι σχεδιασμένο για μεσαίου εύρους αποστάσεις, τις οποίες υπολογίζουμε από 1 εκατοστό έως μερικά μέτρα. Η πραγματική ακτίνα λειτουργίας για μια δεδομένη εφαρμογή καθορίζεται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της πηγής ενέργειας και το μέγεθος της συσκευής σύλληψης, της επιθυμούμενης αποδοτικότητας και την ποσότητα ενέργειας που θα μεταφερθεί.

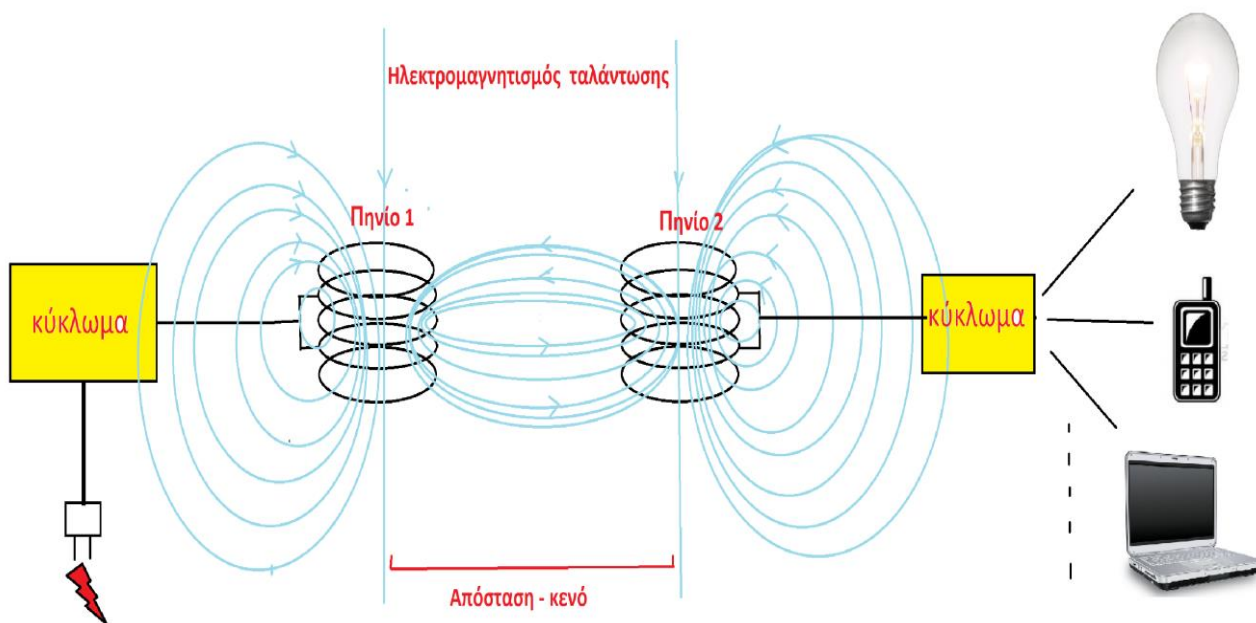
4.2. Πειραματικό Μέρος

4.2.1 Λειτουργία της WiFi-Energy

Η λειτουργία της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας είναι απλούστατη. Το πιο συνηθισμένο παράδειγμα ενός ακουστικού συντονισμού είναι η θραύση ενός ποτηριού νερού από μια τραγουδίστρια της όπερας. Όταν πανομοιότυπα ποτήρια με νερό είναι γεμάτα με διαφορετικές ποσότητες, το καθένα έχει διαφορετικές συχνότητες αντήχησης. Τώρα, όταν μια τραγουδίστρια όπερας τραγουδά και ένας συγκεκριμένος τόνος της φωνής της ταιριάζει με τη συχνότητα συντονισμού ενός από τα ποτήρια, η ακουστική ενέργεια που συσσωρεύεται από το ποτήρι αρκεί για να εκραγεί, ενώ άλλα ποτήρια παραμένουν ανεπηρέαστα. Έτσι, υπάρχει ένα έντονα συντονισμένο σύστημα και εξαιρετικά αποδοτική μεταφορά ενέργειας επιτυγχάνεται όταν λειτουργούν σε αυτό το σύστημα.

Το κύκλωμα ασύρματης μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος είναι σχεδιασμένο με τρόπο ώστε η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος αυξάνεται ανάλογα με τη συχνότητα συντονισμού. Το μεταφερόμενο ρεύμα επάγει μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία τα οποία εκτείνονται μέχρι μερικά μέτρα γύρω από τη συσκευή αναλόγως με τη συχνότητα. Αυτό το μαγνητικό πεδίο επάγει ένα ηλεκτρικό ρεύμα στο σύστημα επαγωγής κάθε κινητής συσκευής με πηνίο δέκτη με ίδια συχνότητα συντονισμού. Έτσι, και τα δυο κυκλώματα συντονίζονται μαζί και επιτυγχάνεται μεταφορά ενέργειας.

Επιπρόσθετα, υπάρχει το πλεονέκτημα ότι, ακόμη και αν το πηνίο λήψης δεν πάρει όλη τη δύναμη, η εναπομένουσα δύναμη παραμένει στην περιοχή του πηνίου αποστολής και δεν χάνεται στο περιβάλλον λόγω της ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.2 Κύκλωμα ασύρματης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Το παραπάνω κύκλωμα είναι ένα καλό παράδειγμα του συστήματος ασύρματης μεταφοράς ηλεκτρικού ενέργειας. Όπως μπορεί να φανεί από το διάγραμμα, χρησιμοποιεί δύο πηνία που είναι συντονισμένα στην ίδια συχνότητα συντονισμού. Η κύρια παροχή δίνεται σε μετασχηματιστή που προκαλεί εναλλασσόμενο ρεύμα AC υψηλής συχνότητας στο πρωτεύον πηνίο. Όταν το δευτερεύον πηνίο έρχεται κοντά του πρωτογενούς πηνίου, δύναμη μεταφέρεται από πρωτοβάθμια σε δευτεροβάθμια. Η μεταφορά ισχύος πραγματοποιείται όσο η υψηλή συχνότητα επάγεται στο δευτερεύον πηνίο. Το σήμα στο δευτερεύον πηνίο διορθώνεται και δίνεται στο φορτίο.

4.2.2 Το κύκλωμα της παρούσας μελέτης

- Το κύκλωμα χωρίζεται σε τρία μέρη :
 1. Βασικό κύκλωμα (πομπός)
 2. Τα πηνία (πομπός , δέκτης)
 3. Κύκλωμα εξόδου(δέκτης-συσκευές)

Στη συνέχεια θα αναλυθούν λεπτομερώς το κάθε μέρος ξεχωριστά.

1. Βασικό κύκλωμα (πομπός)

- **Λειτουργία**

Ο ταλαντωτής ξεκινάει από έναν τυχαίο θόρυβο ο οποίος αν πολλαπλασιαστεί θα γίνει το μέγιστο και θα συντονιστεί στο κύκλωμα του LC., το κύκλωμα του LC συντονίζει σε μια συχνότητα F (που στέλνει συχνότητα περίπου 400KHZ έως 500KHZ από το πηνίο πομπό).

Για να ξεκινήσει ο ταλαντωτής πρέπει να υπάρχει μια ανατροφοδότηση (Feedback). Πιο συγκεκριμένα, παίρνουμε ένα κομμάτι του σήματος από το πρώτο τρανζίστορ T1, το συνδέουμε στο δεύτερο τρανζίστορ T2 και μέσω της διόδου D4 ανατροφοδοτείται και ξεκινάει να αναπαράγει. Το αντίστροφο συμβαίνει με το άλλο τρανζίστορ το οποίο ανατροφοδοτείται μέσω της διόδου D3. Η διαδικασία αυτή καλείται «Οι πολυδονητές» (multi-vibrators) και είναι μία κατηγορία ταλαντωτών ανατροπής που χρησιμοποιούνται συχνά στα ψηφιακά συστήματα. Αποτελούνται από δύο όμοια τρανζίστορ T1, και T2 , συνδεσμοποιημένα έτσι ώστε η έξοδος του ενός να συνδέεται με την είσοδο του άλλου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εισάγεται ο θόρυβος στο τρανζίστορ και να άγει και απο τις δυο πλευρές , έτσι ώστε να γίνονται φορτο-εκφορτίσεις στο LC.

Δηλαδή το χαρακτηριστικό τους γνώρισμα είναι, ότι μπορούν να βρεθούν μόνο σε δύο καταστάσεις :

T1 σε κατάσταση αποκοπής (off) και T2 σε κατάσταση κόρου (on).

T2 σε κατάσταση αποκοπής (off) και T1 σε κατάσταση κόρου (on).

Το τρανζίστορ που θα ευνοηθεί περισσότερο είναι αυτό που είναι συντονισμένο το πηνίο. Άρα, είτε θα ευνοηθεί από το F1 όταν το T1 είναι on και το T2 είναι off, είτε θα ευνοηθεί από το F2 όταν το T2 είναι on και το T1 είναι off.

Έχουμε στο κύκλωμα τα πηνία L1 και L2 (μπορούμε να βάλουμε 100uH,150uH,200uH..) που είναι τύπου RFC (στραγγαλισμού). Αυτά τοποθετούνται για να μην διαρρεύσει η συχνότητα προς την πηγή. Αναλυτικότερα, καταπνίγεται η συχνότητα και παρουσιάζεται από το πηνίο μεγάλο XL (η επαγωγική αεργία αντίσταση (Inductive Reactance)) σε Ωμ . Αυτά τα πηνία χρησιμοποιούνται λόγω της ύπαρξης μεγάλης συχνότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην έχουμε διαφυγή της συχνότητας προς την πηγή. Αυτό το τρανζίστορ τροφοδοτείται με DC αλλά το κύκλωμα παράγει AC. Αν δεν τοποθετηθούν τα τσοκ-πηνία L1 και L2, τότε θα γυρίσει η συχνότητα και θα γίνει βραχυκύκλωμα.

Το κύκλωμα LC αποτελείται μόνο από τέσσερις πυκνωτές χωρητικότητας C και ένα πηνίο (πομπός) με συντελεστή αυτεπαγωγής L. Από την προηγούμενη φάση ο πυκνωτής είναι σε κατάσταση φορτο-εκφόρτισης. Έστω λοιπόν ότι ο πυκνωτής είναι αρχικά φορτισμένος με φορτίο Q και την στιγμή $t=0$ κλείνουμε για παράδειγμα έναν διακόπτη. Τότε, ο πυκνωτής εκφορτίζεται και ρεύμα έντασης (I) διαρρέει το κύκλωμα. Αυτό γίνεται λοιπόν στο κύκλωμα LC. Συμπερασματικά, το κύκλωμα εισόδου παράγει ένα ζεύγος σημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος αντίθετης πολικότητας, θετικά στο F1 και ταυτόχρονα αρνητικά στο F2, όσο το ρεύμα που ρέει μέσω του πηνίου προκαλεί μαγνητικό πεδίο (ηλεκτρομαγνήτης).

2. Τα πηνία (πομπός, δέκτης)

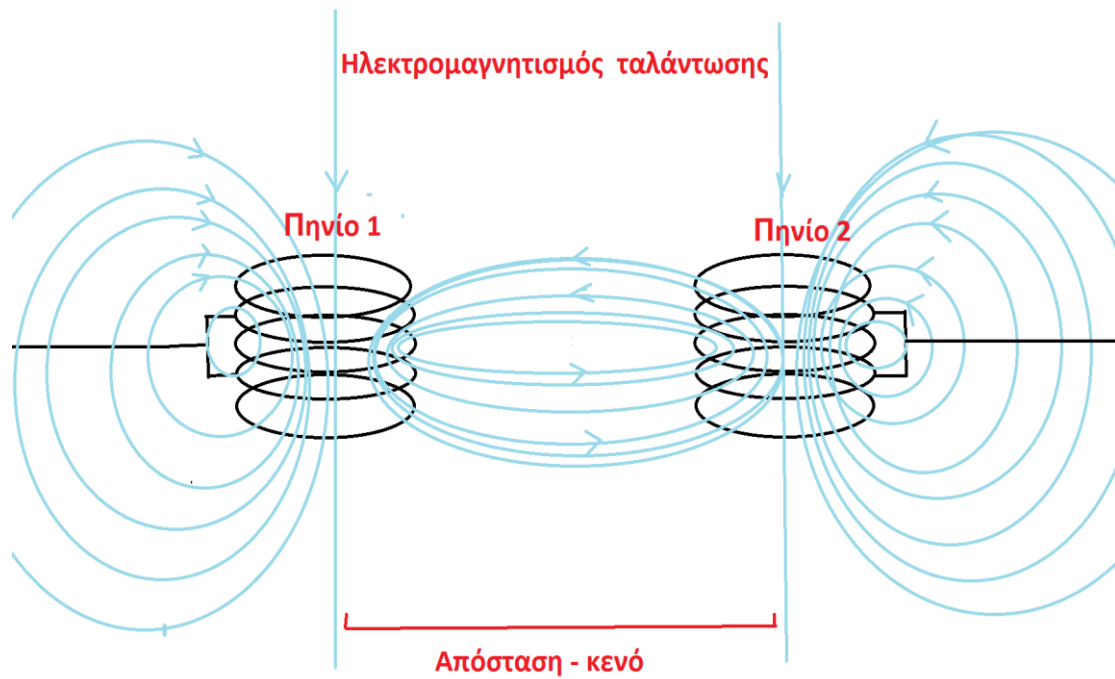
Τα δύο πηνία ενός μετασχηματιστή συντονίζονται στην ίδια συχνότητα με την ηλεκτρο δυναμική επαγωγή ή μαγνητική σύζευξη της ηλεκτρικής ενέργειας από έναν εξοπλισμό που ονομάζεται μετασχηματιστής συντονισμού.

Ενώ πολλοί μετασχηματιστές αποτελούνται από δύο πηνία που υπάρχουν σε ενιαίο εξοπλισμό ή μπορεί να αποτελούνται από δύο διαφορετικές συσκευές που χρησιμοποιούν συντονισμό, ο συγκεκριμένος τύπος έχει υψηλό συντελεστή ποιότητας .

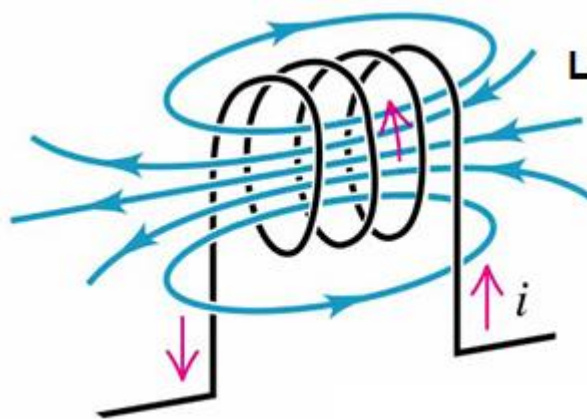
Η μεταφορά συντονισμού (ηλεκτρομαγνήτες) λειτουργεί με την παραγωγή ταλαντευόμενου ρεύματος με πηνίο σε ένα ταλαντευόμενο μαγνητικό πεδίο. Υψηλού συντονισμού πηνία διατηρούν την ενέργεια μέσα στο πηνίο για περισσότερο χρόνο. Όπως φάνηκε, αν δύο πηνία είναι κοντά, η μέγιστη ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί πριν χαθεί. Κρατώντας όλο τον εξοπλισμό σε απόσταση $\frac{1}{4}$ του μήκους κύματος, εκπέμπεται λίγη ενέργεια από τον πομπό στο δέκτη, δηλαδή η απώλεια ενέργειας είναι μικρή.

Λόγω του υψηλού συντελεστή ζεύξης, ακόμη και όταν δίνεται χαμηλή ισχύς εισόδου στο πηνίο πομπό, ένα σχετικά έντονο μαγνητικό πεδίο συσσωρεύεται μέσω του συντονισμού της συχνότητας, αυξάνοντας την ενέργεια που έλαβε από τον δέκτη πηνίο. Συγκριτικά, μεγαλύτερο ποσοστό ρεύματος τροφοδοτείται στο πηνίο.

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.4** το πηνίο 1 είναι ο πομπός που συνδέεται στο κύκλωμα LC του βασικού κυκλώματος όπως είδαμε παραπάνω. Παράγεται ηλεκτρομαγνητική συχνότητα. Όταν το πηνίο 2 του κυκλώματος εξόδου (δέκτης) φτάσει σε συγκεκριμένη απόσταση κοντά στο πηνίο 1, τότε επιτυγχάνεται σύνδεση μεταξύ των δύο πηνίων, συντονίζονται (απαιτείται ίδια συχνότητα) και παράγεται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μεταξύ τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μεταφέρεται ρεύμα από το πηνίο 1 στο πηνίο 2 και αντίστροφα. Το ρεύμα που μεταφέρεται είναι εναλλασσόμενο (AC).

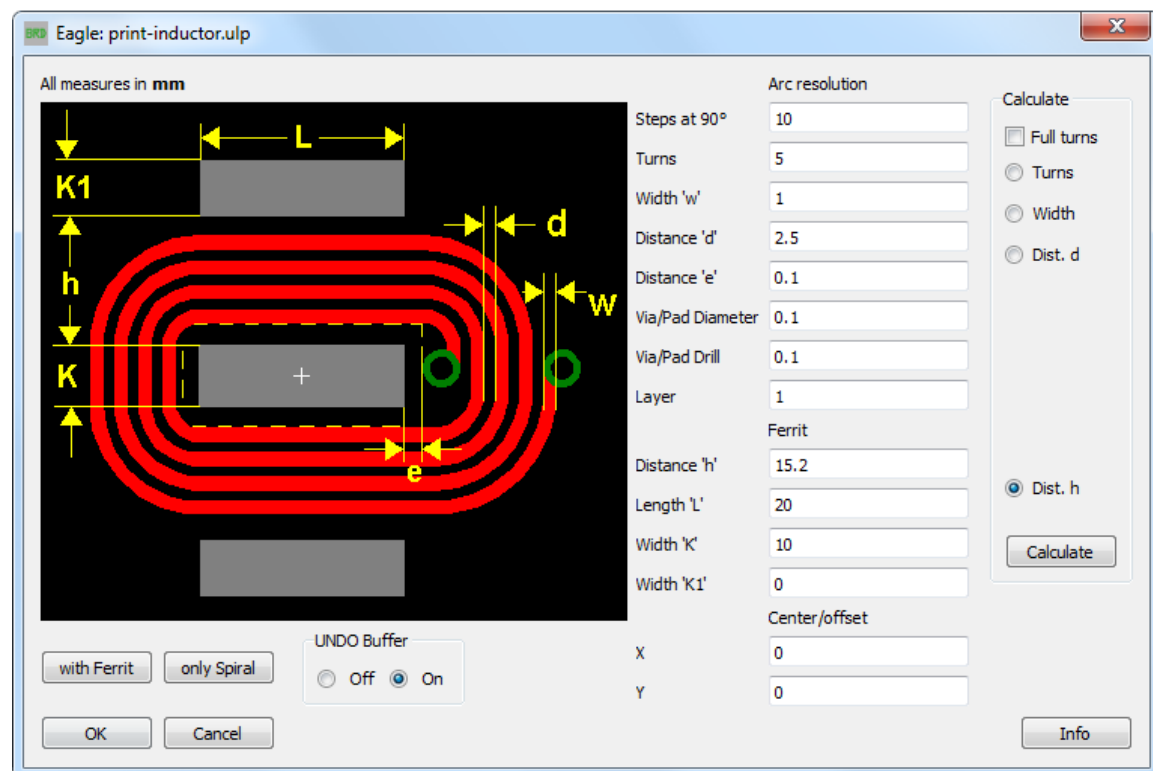
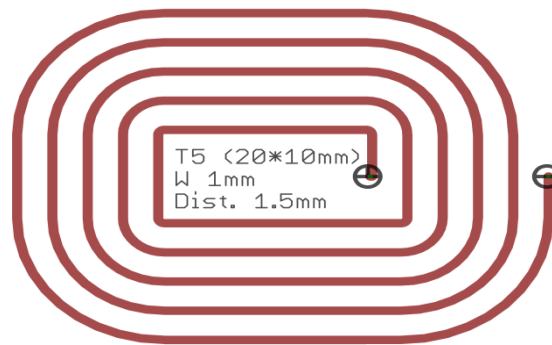


Σχήμα 4.4 Τα πηνία (πομπός, δέκτης)



Σχήμα 4.5 Ένα πηνίο

Στο παρακάτω σχήμα, δημιουργήθηκε ένα πηνίο PCB πλακέτα μέσω του προγράμματος Eagle.

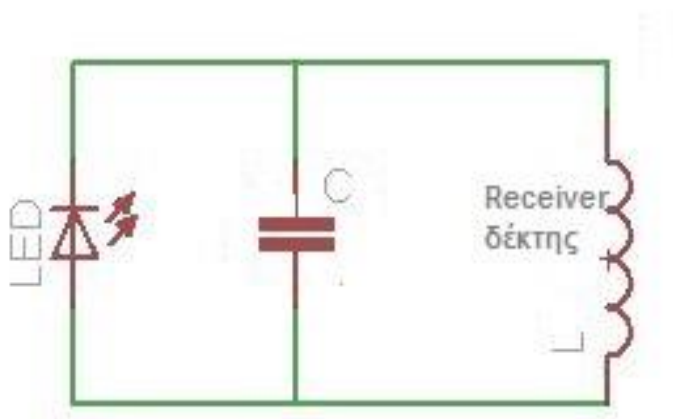


Σχήμα 4.6 το πηνίο (πομπός ή δέκτης)

3. Κύκλωμα εξόδου(δέκτης-συσκευές)

Το **Σχήμα 4.7** παρακάτω, παρουσιάζει ένα απλό παράδειγμα του πώς να ανάψει ένα Led 12V. Το πηνίο 2 (δέκτης) συνδέεται με έναν πυκνωτή και το led. Στη συνέχεια, το πηνίο 2 σε συγκεκριμένη συχνότητα, συντονίζεται με το πηνίο 1 με αποτέλεσμα την παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) το οποίο εξάγεται από το πηνίο 2 και ανάβει το led.

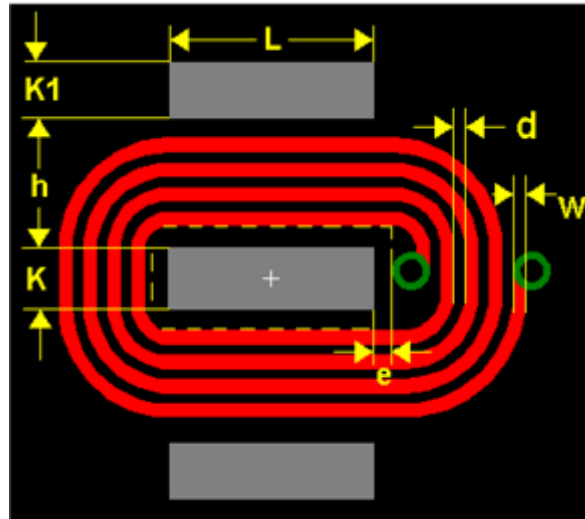
Στη θέση του Led θα μπορούσε να ήταν κάποια ηλεκτρική συσκευή όπως κινητά, laptop κλπ. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως, απαιτείται κύκλωμα ικανό να μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα AC σε συνεχές ρεύμα DC.



Σχήμα 4.7 κύκλωμα εξόδου

4.3. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων & Συμπερασμάτων

Στους παρακάτω πίνακες θα παρουσιαστούν περιληπτικά τα αποτελέσματα της μελέτης πάνω στο κύκλωμα της WiFi_Energy. Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των πηνίων (πομπός, δέκτης). Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 4.14) παρουσιάζονται οι συμβολισμοί των αποστάσεων του πηνίου. Στη μελέτη έχουν χρησιμοποιηθεί 5 πηνία.



Σχήμα 4.14

▪ Χαρακτηριστικά Πηνίων

	Εμβαδόν $K*L$	Απόσταση d	Απόσταση W	Στροφές πηνίο
Πηνίο 1	15*10cm	0,5	0,2	8
Πηνίο 2	3*3cm	0.4	0.2	9
Πηνίο 3	3*2cm	1.5	1.5	15
Πηνίο 4	30*15mm	1.5	1.5	10

Πίνακας 1

▪ Δοκιμές Πειράματος

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι αποστάσεις και τα AC και DC Volte της μεταφοράς ενέργειας από τον πομπό στο δέκτη με τη χρήση των πηνίων του Πίνακα 1 παραπάνω. Η τροφοδοσία που δόθηκε στο κύκλωμα ήταν AC 12Volt το οποίο όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 μετατράπηκε σε DC (4 δίοδοι -1 πυκνωτής) και χρησιμοποιήθηκε 1 LED 12Volt (2 Watt). Στον Πίνακα 3 μετρήσαμε το AC Volt στο LED χωρίς μετατροπή.

▪ Πηνίο 1 (Πομπό)→Πηνίο 2 (δέκτη)

Απόσταση(cm)	2	5	10	20
Μεταφορά DC (V)	9	7	5	3

Πίνακας 2

▪ Πηνίο 3 (Πομπό)→Πηνίο 4 (δέκτη)

Απόσταση(cm)	2	5	10
Μεταφορά DC (V)	5.5	3	1

Πίνακας 3

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η δοκιμή τροφοδοσίας ενός κινητού τηλεφώνου αντί για το LED μόνο με DC Volt. Τα χαρακτηριστικά του κινητού τηλεφώνου είναι τα εξής:

Nokia	3.7 Volt	1020 mAh	3.8 Wh
--------------	----------	----------	--------

▪ Πηνίο 1→Πηνίο 2

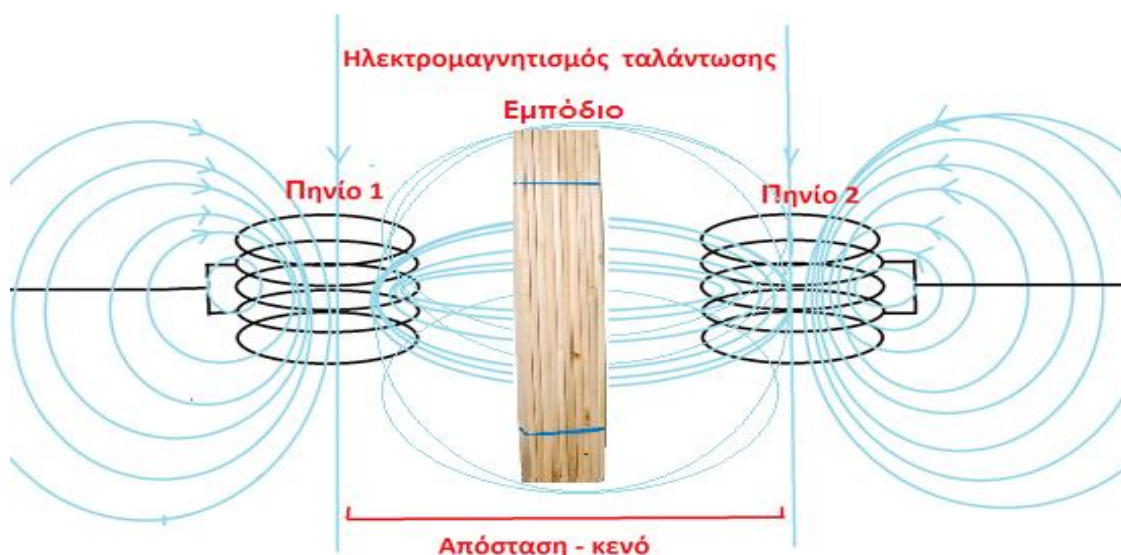
	Μεταφορά DC (V)	Ampere(mAh)
Απόσταση(4cm)	3.7	1020

Πίνακας 5

▪ Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε ότι η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη είναι ανεξάρτητη από τα πηνία που θα χρησιμοποιηθούν, αρκεί να είναι ίδια η συχνότητα (συντονισμός).

Ακόμα μια σημαντική παρατήρηση αποτελεί το φαινόμενο πως η μεταφορά ενέργειας δεν διακόπτεται ούτε σε ύπαρξη εμποδίων (ξύλο, μέταλλο) ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη, αλλά συνεχίζεται κανονικά (Σχήμα 4.15).



Σχήμα 4.15

Παρατηρούμε επίσης, ότι, αν δεν συντονιζόντουσαν τα πηνία στην ίδια συχνότητα, θα γινόταν μεταφορά λιγότερης ενέργειας και σε μικρότερη απόσταση. Άρα, η ποιότητα της μεταφοράς ενέργειας μεταβάλλεται και επηρεάζεται από το συντονισμό των πηνίων.

4.4. Εφαρμογές ασύρματης μεταφοράς ενέργειας

Η τεχνολογία της ασύρματης μεταφοράς ρεύματος βρίσκει την εφαρμογή της σε ένα ευρύ φάσμα καταναλωτικών, εμπορικών και βιομηχανικών δικτύων. Διευκολύνει την αποδοτική, ασφαλή, αξιόπιστη και βολική μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.

➤ Ηλεκτρονικά Καταναλωτών :

- Αυτόματη ασύρματη φόρτιση των κινητών ηλεκτρονικών (τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, χειριστήρια παιχνιδιών, κ.λπ.) στο σπίτι, το αυτοκίνητο, το γραφείο, σε εστίες Wi-Fi κλπ., ενώ οι συσκευές είναι σε χρήση.
- Άμεση ασύρματη τροφοδοσία των περιφερικών αξεσουάρ του υπολογιστή: ασύρματο ποντίκι, πληκτρολόγιο, εκτυπωτής, ηχεία, οθόνη, κλπ. Εξάλειψη των μπαταριών μίας χρήσης και των καλωδίων που προκαλούν δυσκολία

➤ Ιατρική :

Η πρόοδος της ιατρικής επιστήμης και η βιοϊατρική τεχνολογία παρέχει θεραπευτικά αποτελέσματα σε ασθενείς που πάσχουν από μια ποικιλία παθήσεων. Οι διάφορες εμφυτεύσιμες συσκευές που χρησιμοποιούνται αποτελούν τους εμφυτεύσιμους καρδιακούς βηματοδότες, τους καρδιακούς απινιδωτές, τις αντλίες έγχυσης φαρμάκων, μηχανήματα διέγερσης του εγκεφάλου, μόνιτορ επιληψίας, κοχλιακά εμφυτεύματα κλπ. Η πλειοψηφία αυτών των συσκευών χρησιμοποιούν μια μη επαναφορτιζόμενη μπαταρία που αποθηκεύει ενέργεια ώστε να λειτουργεί για ορισμένο χρονικό διάστημα του χρόνου. Προκειμένου να παρέχουν σταθερή ισχύ, οι μπαταρίες πρέπει να είναι μεγάλες σε μέγεθος. Αυτό καθιστά τις εμφυτεύσιμες συσκευές ακριβές. Στην περίπτωση του καρδιακού βηματοδότη, η μπαταρία τοποθετείται μαζί με τη συσκευή και εμφυτεύεται χειρουργικά στο εσωτερικό του σώματος. Κάθε φορά που η μπαταρία εξαντλείται, πρέπει να αφαιρεθεί χειρουργικά

ολόκληρη η συσκευή και να αντικατασταθεί με μια νέα μπαταρία που εμφυτεύεται πίσω στο σώμα. Η όλη διαδικασία κοστίζει έως \$ 25.000, καθιστώντας την ως την πιο ακριβή αντικατάσταση μπαταρίας στον κόσμο.

Πολλές από αυτές τις εμφυτεύσιμες συσκευές παρόλο που παρέχουν σημαντική πρόοδο σε νευρολογικές διαταραχές όπως επιληψία, κινητικές διαταραχές, παράλυση, απώλεια μνήμης, αδυναμία όρασης, κλπ. είναι απαγορευτικές στους ασθενείς λόγω των οικονομικών περιορισμών.

Η ένταξη της ασύρματης μεταφοράς ρεύματος στο συγκεκριμένο τομέα βοηθά να γεφυρωθεί αυτό το οικονομικό χάσμα, παρέχοντας εύκολες, αξιόπιστες και οικονομικά αποτελεσματικές μεθόδους παροχής ηλεκτρικού ρεύματος. Η εμφυτεύσιμη συσκευή θα μπορεί να επαναφορτίζεται σε μία νύχτα με τη χρήση μιας πηγής ασύρματου ρεύματος τοποθετημένη κοντά στο σώμα του ασθενούς. Στην περίπτωση εμφυτευμάτων, όπως μία τεχνητή καρδιά, το εξωτερικό σύστημα επαναφόρτισης μπορεί να είναι οπουδήποτε κοντά στον ασθενή. Ένα άλλο σημαντικό ιατρικό χαρακτηριστικό είναι η αισθητηριακή μονάδα η οποία παρέχει πληροφορίες σχετικά με σημαντικές σωματικές παραμέτρους όπως ο καρδιακός ρυθμός, το επίπεδο της γλυκόζης, η θερμοκρασία, η πίεση του αίματος, κλπ. Ασύρματες μονάδες αισθητήρων σώματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτούς τους σκοπούς οι οποίοι θα τροφοδοτούνται από μια μόνο πηγή συντονισμού βάσει των αρχών της ασύρματης μεταφοράς ρεύματος. Οι μονάδες αυτές έχουν σημειώσει σημαντική επίπτωση στον τομέα της έρευνας και της ιατρικής βιομηχανίας. Περαιτέρω πρόοδος στον τομέα αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους της συσκευής και παράλληλα τη βελτίωση της λειτουργικότητας και αποδοτικότητας της. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός μόνο συντονιστή (αντηχείου), και να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονη μεταφορά ρεύματος και επικοινωνίας.

➤ **Βιομηχανικά :**

Ακόμα ένας τομέας στον οποίο μπορεί να ωφελήσει η ασύρματη μεταφορά ενέργειας αποτελεί και ο βιομηχανικός τομέας. Πιο συγκεκριμένα:

- Χρησιμοποιείται άμεση ασύρματη ενέργεια και επικοινωνιακές διασυνδέσεις μεταξύ περιστρεφόμενων και μετακινούμενων συνδέσεων (ρομπότ, μηχανές συσκευασίας, εργαλειομηχανές). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εξαλείφεται η δαπανηρή καλωδίωση καθώς και το μειονέκτημα της επιρρέπειας στην αποτυχία που περιβάλλει το φαινόμενο της καλωδίωσης.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεση ασύρματη ενέργεια και επικοινωνιακές διασυνδέσεις σε σημεία χρήσης όπου επικρατούν αντίξοες συνθήκες (γεωτρήσεις, εξορύξεις, υποβρύχια κλπ.), όπου πρακτικά είναι αδύνατο και ανέφικτο να χρησιμοποιηθούν καλώδια.
- Χρήση άμεσης ασύρματης ενέργειας για ασύρματους αισθητήρες και κινητήρες, με αποτέλεσμα την εξάλειψη της ανάγκης για ακριβά καλώδια ρεύματος ή αντικατάσταση και απόρριψη μπαταρίας.
- Αυτόματη ασύρματη φόρτιση για τα κινητά ρομπότ, τα αυτόματα καθοδηγούμενα οχήματα, τα ασύρματα εργαλεία και όργανα. Το τεράστιο πλεονέκτημα σε αυτήν την περίπτωση αποτελεί η κατάργηση των πολύπλοκων μηχανισμών σύνδεσης, καθώς και της εντατικής χειροκίνητης φόρτιση και αντικατάστασης μπαταρίας στην εργασία.

➤ **Άλλες εφαρμογές :**

- Άμεσες ασύρματες διασυνδέσεις ηλεκτρικής ενέργειας και αυτόματη ασύρματη φόρτιση για εμφυτεύσιμες ιατρικές συσκευές (συσκευές κοιλιακής υποβοήθησης, βηματοδότες, κλπ).
- Αυτόματη ασύρματη φόρτιση και για στρατιωτικά συστήματα υψηλής τεχνολογίας (φορητές συσκευές που τροφοδοτούνται με μπαταρία, οι μυστικοί αισθητήρες, μη επανδρωμένα κινητά ρομπότ και αεροσκάφη, κλπ).
- Άμεση ασύρματη τροφοδοσία και αυτόματη ασύρματη φόρτιση των έξυπνων καρτών.
- Άμεση ασύρματη τροφοδοσία και αυτόματη ασύρματη φόρτιση των συσκευών των καταναλωτών, των κινητών ρομπότ, κ.λπ.

4.5. Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας (WiFi-Energy) είναι πολλά. Η χρήση ασύρματης τεχνολογίας είναι πιο βολική στην καθημερινή πρακτική. Πιο συγκεκριμένα:

- Δεν απαιτεί καμία χειροκίνητη επαναφόρτιση ή αλλαγή μπαταριών.
- Εξαλείφονται τα αντιαισθητικά, δυσκίνητα και δαπανηρά καλώδια ρεύματος.
- Το κόστος μειώνεται σε σημαντικό βαθμό αφού μηδενίζονται τα έξοδα αγοράς, τοποθέτησης και αντικατάστασης καλωδίων
- Εύκολη εγκατάσταση συσκευών
- Βελτιωμένη αισθητική
- Η ενέργεια της μπαταρίας θα είναι ανεξάντλητη.

- Μειώνονται τα ποσοστά αποτυχίας του προϊόντος αφού διορθώνεται το «πιο αδύναμο σημείο»: η κάμψη της καλωδίωσης και των μηχανικών διασυνδέσεων.
- Μειώνεται η χρήση μπαταριών μιας χρήσης.
- Το ηλεκτρικό «δίκτυο ισχύος» χρησιμοποιείται άμεσα και με βέλτιστη απόδοση, αντί της αναποτελεσματικής φόρτισης της μπαταρίας που επικρατούσε πριν.

4.6. Γενικά Συμπεράσματα

Όπως έχουμε δει η ασύρματη τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά και για τη μεταφορά ενέργειας με ασύρματο τρόπο. Παρόλο που η μέχρι στιγμής πρόοδος δεν καθιστά πρακτικό να χρησιμοποιηθεί η ασύρματη μεταφορά ρεύματος για όλες τις ηλεκτρικές συσκευές, μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την επαναφόρτιση πολλών κινητών ηλεκτρονικών συσκευών που χρησιμοποιούν ακριβές μπαταρίες. Ένα άλλο πεδίο που μπορεί η ασύρματη μεταφορά ενέργειας να εκμεταλλευθεί θετικά και αποτελεσματικά είναι η εφαρμογή της σε εμφυτεύσιμες ιατρικές συσκευές. Δεδομένου ότι δεν αυξάνει εκπομπές ραδιοσυχνοτήτων που να παρεμβαίνουν με άλλες ηλεκτρονικές συσκευές, δεν αποτελεί πηγή επιπέδων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, οπότε δεν υπάρχει καμία περίπτωση να τεθεί σε κίνδυνο η υγεία του ανθρώπου.

Η ασύρματη μεταφορά ρεύματος είναι μια βολική και οικονομικά αποδοτική τεχνολογία, καθώς θα βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση της χρήσης του πλαστικού και του χαλκού που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές συσκευές. Αυτή η νέα τεχνολογία έχει τεράστια πλεονεκτήματα, όπως υψηλή ακεραιότητα μετάδοσης σε συνδυασμό με χαμηλές απώλειες. Όσο η συχνότητα συντονισμού γίνεται αυστηρότερη, η ενέργεια που μεταφέρεται σε άλλα αντικείμενα μειώνεται. Με βελτιωμένη απόδοση και εύρος, αυτή η τεχνολογία θα αλλάξει τον τρόπο που βλέπουμε την μεταφορά ενέργειας.

4.7. Περιορισμοί της Μελέτης

- Περιορισμένη παροχή εξοπλισμού στην Ελλάδα.
- Καθυστέρηση περάτωσης της μελέτης λόγω του ότι απαιτείται μεγάλη χρονική διάρκεια παραλαβής του εξοπλισμού μετά την παραγγελία μέσω ίντερνετ.
- Η ποιότητα των αποτελεσμάτων επηρεάστηκε από την έλλειψη εξοπλισμού και χρόνου.
- Μια εκτενέστερη μελέτη πάνω στο ίδιο θέμα θα μπορούσε να επιτευχθεί αλλά το κόστος θα ήταν υψηλό.

4.8. Προτάσεις

- Επέκταση ερευνητικής μελέτης χρησιμοποιώντας περισσότερα πηνία έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα περισσότερων δοκιμών
- Προσπάθεια επίτευξης υψηλότερων στόχων όσον αφορά την ποσότητα ενέργειας που μεταφέρεται και την απόσταση στην οποία πραγματοποιείται η μεταφορά
- Ενσωμάτωση της τεχνολογίας WiFi-Energy σε μικροσυσκευές αρχικά και κατ' επέκταση ενσωμάτωση σε μεγαλύτερους τομείς (αυτοκίνητα, κατοικίες κλπ.)

■ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Υγεία και Ηλεκτρομαγνητική

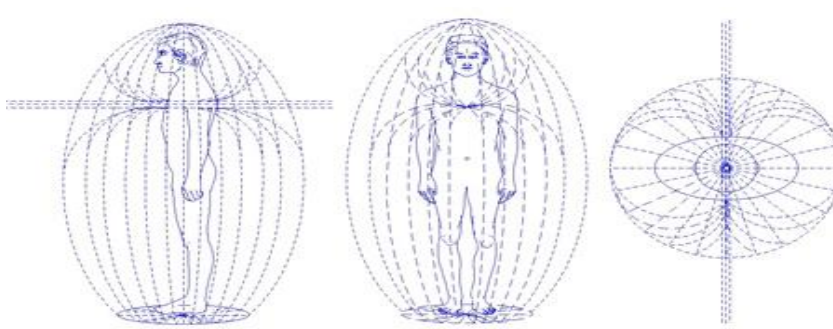


6.1. Εισαγωγή

Κάποτε ο μεγαλύτερος «μπαμπούλας» της ανθρωπότητας ήταν η πυρηνική απειλή. Σήμερα είναι η τρομοκρατία σε όλες τις μορφές της. Σύντομα όμως η ηλεκτρομαγνητική ρύπανση θα αναρριχηθεί στην κορυφή του «πάνθεον» των σημαντικότερων απειλών για την παγκόσμια υγεία. Η τεχνολογική έκρηξη, μαζί με νέες δυνατότητες, φέρνει και νέους κινδύνους.

Η ηλεκτρορύπανση αποτελεί και τον μεγαλύτερο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Η χρήση των κινητών τηλεφώνων από ένα δισεκατομμύριο ανθρώπους έχει χαρακτηριστεί από τους ειδικούς του βιοηλεκτρομαγνητισμού ως το «μεγαλύτερο πείραμα στην ιστορία της ανθρωπότητας». Δεν ξέρουμε τι ακριβώς θα συμβεί στην υγεία μας.

Ούτε καν υποψιαζόμαστε τις επιπτώσεις που έχει και θα έχει η συνεχής εκπομπή μικροκυματικής ακτινοβολίας τόσο κοντά στον εγκέφαλό μας. Το σίγουρο είναι πως σύντομα θα δούμε να ξεπηδούν νέες, άγνωστες νευροψυχικές ασθένειες, ψυχολογικές διαταραχές και εκφυλιστικές νόσοι, ενώ ο καρκίνος του εγκεφάλου θα γίνει μια συνηθισμένη αιτία θανάτου ακόμη και στις νεαρές ηλικίες. Βρισκόμαστε μήπως λίγο πριν το ξέσπασμα της μεγαλύτερης νευροψυχολογικής και όχι μόνον επιδημίας του 21^{ου} αιώνα; Αν είναι έτσι, δεν είναι καλύτερα να μάθουμε για τη νέα απειλή, ώστε να προφυλαχθούμε όσο γίνεται καλύτερα από αυτή.



6.2. Ο αόρατος ηλεκτρομαγνητικός εφιάλτης

Η ανακάλυψη του κινδύνου της ηλεκτρομαγνητικής μόλυνσης καθυστέρησε αρκετές δεκαετίες. Όχι αδικαιολόγητα η ανακάλυψη αυτή συνέπεσε χρονικά με την εμφάνιση της οικολογικής συνείδησης στις δυτικές κοινωνίες, καθώς και με το ενδιαφέρον για τις λεγόμενες εναλλακτικές τεχνολογίες. Ο νέος «αόρατος εφιάλτης» ήταν στενός συγγενής με το ραδιενεργό εφιάλτη, που ύστερα από το ατύχημα στο Τσέρνομπιλ (1986) έγινε αστέρι πρώτης κατηγορίας στο στερέωμα των μέσων ενημέρωσης.

Ενώ όμως η ραδιενέργεια ξύπνησε τις χειρότερες φοβίες του σύγχρονου ανθρώπου, η ηλεκτρομαγνητική μόλυνση, υπό την επίδραση της οποίας βρισκόμαστε συνεχώς, ούτε καν αναφέρεται ως σημαντικός κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία. Παρ' όλα αυτά η ηλεκτρομαγνητική μόλυνση είναι μια ύπουλη απειλή από την οποία κινδυνεύουν σήμερα, κυρίως εν αγνοία τους, εκατομμύρια άνθρωποι σε ολόκληρο τον πλανήτη!

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια και η ενέργεια αυτή, που εξαρτάται από την ισχύ της εκπομπής, απορροφάται από τον ανθρώπινο οργανισμό, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του. Χρόνια έκθεση σε ακτινοβολίες απορυθμίζει τον οργανισμό, προκαλώντας του μόνιμες βιολογικές αλλοιώσεις.

Δεκάδες επιστημονικές εργασίες έχουν αναφερθεί στη στενή σχέση των ELF (Εξαιρετικά Χαμηλής Συχνότητας) πεδίων με ασθένειες, όπως η λευχαιμία, το λύμφωμα και ο καρκίνος του εγκεφάλου. Δύο επιδημιολογικές μελέτες εντόπισαν στατιστικά υψηλότερο αριθμό περιπτώσεων καρκίνου σε παιδιά του Ντένβερ στο Κολοράντο, που ζούσαν ή έπαιζαν κοντά σε πυλώνες με ρεύμα υψηλής τάσης.

Μια άλλη μελέτη, που έγινε από επιδημιολόγο του Πανεπιστημίου Τζων Χόπκινς και αφορούσε τους εργαζομένους σε τηλεφωνική εταιρεία της πολιτείας της Νέας Υόρκης, απέδειξε ότι αυτοί οι άνθρωποι που εκτίθονταν καθημερινά σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, είχαν πολύ μεγαλύτερες πιθανότητες ν' αναπτύξουν λευχαιμία κι άλλες μορφές καρκίνου.

Πειράματα που έχουν γίνει σε ζώα, τα οποία βομβαρδίζονταν συστηματικά με αυτές τις ακτινοβολίες, έδειξαν χαμηλή παραγωγή γάλακτος, καθώς και γενετικά και νευρολογικά προβλήματα. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι τα αποδημητικά πτηνά συχνά χάνουν τον προσανατολισμό τους εξαιτίας των ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων. Μάλιστα, δεν είναι λίγοι εκείνοι, που υποστηρίζουν ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υψηλής συχνότητας έχουν σημαντικό μερίδιο ευθύνης για τη σκλήρυνση κατά πλάκας, τον αυτισμό, τη νόσο Αλτσχάιμερ, για νευρολογικά προβλήματα, ακόμη και για ψυχώσεις!

Αν, έστω και ορισμένα, από τα παραπάνω αληθεύουν, αυτό σημαίνει ότι μολυνόμαστε διαρκώς και εκθετικά αυξανόμενα από μεγάλες και βλαβερές δόσεις ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που κάθε μέρα αθροίζεται επιβαρύνοντας την υγεία μας. Κι όλα αυτά κάτω από τη μεγάλη συγκάλυψη των κυβερνήσεων της κάθε χώρας! Είναι αξιοπερίεργο γιατί σχεδόν καμία κυβέρνηση στον κόσμο δεν μπήκε στον κόπο να ενημερώσει τους πολίτες της για τις, έστω και ενδεχόμενες, βλαβερές επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Βέβαια, κατά καιρούς έρχονται στην επικαιρότητα έρευνες και στοιχεία για τους κινδύνους από τα ηλεκτρικά σύρματα υψηλής τάσης, από τα κινητά τηλέφωνα, τους ραδιοπομπούς, τις οθόνες της τηλεόρασης και των υπολογιστών και γενικά από τις ηλεκτρικές συσκευές, αλλά συχνά **«θάβονται» με ύποπτο τρόπο** ή ανασκευάζονται σε σημείο ώστε οι κίνδυνοι αυτοί να θεωρούνται «αμελητέοι» και είναι φυσικό να συμβαίνει κάτι τέτοιο, εφόσον πίσω από το θέμα αυτό δεν κρύβονται μόνον οι κυβερνήσεις, αλλά ολόκληρο το παγκόσμιο ηλεκτρό-βιομηχανικό κατεστημένο, που θα έπρεπε να ξοδέψει υπέρογκα ποσά προκειμένου να εξασφαλίσει ένα ελάχιστο επίπεδο ασφάλειας για τη δημόσια υγεία.

Μήπως κάτι παρόμοιο θα συμβεί και στην περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας; Μέχρι τότε πάντως **ένα απλό σεσουάρ**, αντιπροσωπεύει μια πηγή ηλεκτρομαγνητικής μόλυνσης λίγα μόλις εκατοστά από το κεφάλι μας.

6.3. Οι βιολογικές επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η μη ιονίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν είναι καθόλου αθώα. Γι' αυτό και δεν υπάρχουν όρια ασφάλειας γι' αυτήν. Υπάρχουν μόνον όρια επικινδυνότητας, δεδομένου ότι ακόμη και μια μικρή δόση ακτινοβολίας μπορεί να θεωρηθεί επικίνδυνη. Οι επιδημιολογικές μελέτες δείχνουν σοβαρές ενδείξεις της επικινδυνότητας της μη ιονίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Αρχικά στο οικιακό περιβάλλον κυριαρχούσαν οι συχνότητες των 50Hz του δικτύου της ΔΕΗ, ενώ τελευταία προστέθηκαν και οι συχνότητες των φούρνων μικροκυμάτων (2450MHz) και των ηλεκτρονικών υπολογιστών, που είναι της τάξεως των GHz. Σ' αυτά θα πρέπει να προστεθούν και οι συχνότητες στις οποίες εκπέμπουν οι ραδιοηλεκτρονικοί σταθμοί (300KHz με 300MHz), οι σταθμοί κινητής τηλεφωνίας (900MHz) και τα ραντάρ.

Οι επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ορίζονται σε θερμικές και μη θερμικές. Οι θερμικές (ισχύς άνω του 1mW/cm^2) χαρακτηρίζονται από την αύξηση της θερμοκρασίας των ιστών που ακτινοβολούνται και την αδυναμία των θερμορρυθμιστικών μηχανισμών τους για να την αντιμετωπίσουν. Οι μη θερμικές επιδράσεις προκαλούνται από μικρότερες πυκνότητες ισχύος. Και οι δύο επιδρούν βλαβερά στους βιολογικούς οργανισμούς.

Οι βιολογικές επιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ρύπανσης στον ανθρώπινο οργανισμό αφορούν: Στην αύξηση του Σχετικού Κινδύνου για την εμφάνιση παιδικού καρκίνου (λευχαιμία). Στην αύξηση της συχνότητας των διαταραχών του Κεντρικού Νευρικού συστήματος και της ανθρώπινης συμπεριφοράς. Στην αύξηση της συχνότητας των καρδιοπαθειών, της υπέρτασης και διαταραχών του ανοσοποιητικού συστήματος. Στην αύξηση του κινδύνου αποβολών εγκύων γυναικών. Στην αύξηση της συχνότητας διαταραχών της αναπαραγωγικής λειτουργίας (σπερματογένεση).

Πιο αναλυτικά οι έρευνες έχουν αποδείξει πως υπάρχει σαφής σχέση ανάμεσα στην έκθεση σε Η/Μ ακτινοβολίες και συγκεκριμένες βλάβες στην ανθρώπινη υγεία:

Επιδημιολογικές έρευνες υποδεικνύουν την ύπαρξη σχέσης ανάμεσα στους παιδικούς καρκίνους και στην έκθεση σε μαγνητικά πεδία της τάξης των $0,2 \mu\text{T}$, όπως επίσης

και τη σχέση ανάμεσα σε λευχαιμία και καρκίνο του εγκεφάλου σε επαγγελματικές ομάδες που εκτίθενται συστηματικά στην H/M ακτινοβολία.

Υπάρχουν ενδείξεις για μεγάλες γονιδιακές βλάβες από έκθεση σε H/M ELF. Έχει καταδειχτεί πως τα H/M πεδία επηρεάζουν τη διαδικασία αντιγραφής των γονιδίων, αλλάζοντας έτσι την πρωτεϊνική μορφή των κυττάρων. Αυτή η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε καρκινογένεση.

Τα H/M πεδία ELF μπορούν να διαταράξουν τη βιοχημεία των κυττάρων, επηρεάζοντας τα ένζυμα που σχετίζονται με την ανάπτυξη και το μεταβολισμό των κυττάρων.

Παρατεταμένη έκθεση σε H/M πεδία μπορούν να οδηγήσουν σε ογκογένεση με την εξέλιξη των μεταλλαγμένων κυττάρων σε καρκινικά.

Η έκθεση σε H/M πεδία ELF οδηγούν σε ανωμαλίες λειτουργίας του ανθρώπινου ανοσοποιητικού συστήματος, καταστέλλοντας τη φυσική αμυντική δράση των λεμφοκυττάρων T. Αυτό οδηγεί σε μη ικανοποιητική απόκριση του ανοσοποιητικού μας συστήματος σε λοιμώξεις και καρκίνους.

Υπάρχει σαφής σχέση ανάμεσα στην έκθεση σε H/M πεδία ενός εμβρύου και στον κίνδυνο αύξησης των αποβολών και της τερατογένεσης.

Τέλος, υπάρχουν έρευνες που επισημαίνουν την επίδραση των H/M πεδίων στην ανάπτυξη του νευρικού συστήματος, επηρεάζοντας την ψυχολογική κατάσταση και τη συμπεριφορά των ανθρώπων που εκτίθενται σε αυτά. Επίσης έχει διαπιστωθεί επίδραση των ELF πεδίων στη λειτουργία του αδένος της επίφυσης και συγκεκριμένα στη σύνθεση και έκκριση της ορμόνης μελατονίνης, που παίζει ρόλο-κλειδί στην εύρυθμη λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού, στην δέσμευση των ελεύθερων ριζών και στην προφύλαξη από τις λεγόμενες εκφυλιστικές ασθένειες.

6.4. Ζώνες κινδύνου και όρια «ασφαλείας»

Οι περισσότεροι πλέον έγκριτοι διεθνείς και κρατικοί οργανισμοί συμφωνούν πως το φάσμα της Η/Μ/κής ακτινοβολίας που βρίσκεται στην περιοχή συχνοτήτων από 1 – 1000 MHz και ειδικότερα εκείνη που κυμαίνεται από 30 – 300 MHz είναι πλέον επικίνδυνη για αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων που είναι εκτεθειμένοι.

Στη βάση αυτών των αξιολογήσεων και διαπιστώσεων προχώρησαν στη θέσπιση ορίων επικινδυνότητας που διαφοροποιούνται: α) Για εργαζόμενους που εκτίθενται λόγω της επαγγελματικής τους δραστηριότητας στους παράγοντες αυτούς (με βάση την 8ωρη ημερήσια έκθεση) και β) για τον γενικό πληθυσμό.

Τα όρια αυτά διαφοροποιούνται επίσης σε εκείνα που θεσπίστηκαν στα πλαίσια των σοσιαλιστικών χωρών (Σοβιετική Ένωση) και είχαν καθιερωθεί με κριτήριο «την πλήρη πρόληψη οποιασδήποτε διαταραχής στην υγεία» και ήταν $10\mu\text{W}/\text{cm}^2$ για εργαζόμενους με επαγγελματική έκθεση, δηλαδή εκατό φορές μικρότερα από τα αντίστοιχα όρια του λεγόμενου «δυτικού» κόσμου $1\text{mW}/\text{cm}^2$. Και για το γενικό πληθυσμό το όριο ήταν $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (διακόσιες φορές μικρότερο) έναντι $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$ αντίστοιχα.

6.5. Υγεία και WiFi-Energy

Όπως είδαμε παραπάνω, υπάρχουν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου σε σχέση με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Επίσης όμως είδαμε ότι υπάρχει ένα ελάχιστο όριο το οποίο αν ξεπεραστεί υπάρχει ο κίνδυνος. Σε περιπτώσεις μικρής έκθεσης, όπως για παράδειγμα στην παρούσα ερευνητική μελέτη ο κίνδυνος για την υγεία είναι ελάχιστος. Αυτό οφείλεται στη μικρή απόσταση στην οποία πραγματοποιείται η μεταφορά ενέργειας καθώς επίσης και στη χαμηλή συχνότητα. Σε σύγκριση με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ή τα σήματα των ραδιοφωνικών σταθμών, ο κίνδυνος για την υγεία είναι πολύ υψηλότερος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, and Marin Soljacic, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, Science, vol. 317 no. 5834, pp. 83-86, July 2007.
- [2] J. Choi and C. Seo, “High-Efficiency Wireless Energy Transmission Using Magnetic Resonance Based On Metamaterial with Relative Permeability equal to -1”, Progress in Electromagnetics Research, vol. 106, 33-47, 2010
- [3] Ning Yin, Guizhi Xu, Quingxin Yang, Jun Zhao, Xuewen Yang, Jianqiang Jin, Weinong Fu, and Mingui Sun, “Analysis of Wireless Energy Transmission for Implantable Device Based on Coupled Magnetic Resonance”, IEEE Transactions on Magnetics, vol.48, no.2, February 2012.
- [4] William A. Sahlam, and Evan Richardson, “WiTricity: Electricity cuts the cord”, Harvard Business School, N9-811-045, November 2010.
- [5] D. W. Harrist, “Wireless battery charging system using radio frequencyenergy harvesting,”M.S. thesis, Univ. Pittsburgh, Pittsburgh, PA, 2004.
- [6] Dragos Niculae, Lucia Dumitriu, Mihai Iordache, Andrei Ilie and Lucian Mandache, “Magnetic Resonant Coupling Used in Wireless Power Transfer to Charge the Electric Vehicle Batteries”, Agir Bulletin, October-December
- [7] Wireless Power May Cut the Cord for Plug-In Devices, Including Cars
<http://news.nationalgeographic.com/news/energy/2012/12/121228-wireless-power/>
- [8] Wireless power transmission may cut the cord for electronic devices
<http://newsavalanche.com/2013/02/26/wireless-power-transmission-may-cut-the-cord-for-electric-devices/>
- [9] Tu-Sheng Chen, Tsorng Juu Liang, Kai-Hui Chen and Jer-Nan Juang, “Study and Implementation of High Frequency Pulse LED Driver with Self Oscillating Circuit”, in Circuits and Systems (ISCAS), 2011 IEEE International Symposium on, pp. 498-501, May 15-18, 2011.

[10] Wireless Electricity Delivered Over Distance

<http://www.witricity.com/pages/more.html>

[11] A. Sample and J. R. Smith, “Experimental results with two wireless power transfer systems,” in *IEEE Radio Wireless Symp.*, Jan. 2009, pp. 16–18.

[12] Tu-Sheng Chen, Tsorng Juu Liang, Kai-Hui Chen and Jer-Nan Juang, “Study and Implementation of High Frequency Pulse LED Driver with Self Oscillating Circuit”, in *Circuits and Systems (ISCAS)*, 2011 IEEE International Symposium on, pp. 498-501, May 15-18, 2011.

[13] Wireless Power Efficiency

<http://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/total-energy-consumption.html>

[14] Aristeidis Karalis*, J.D. Joannopoulos, and Marin Soljačić, “Efficient Wireless Non-radiative Mid-range Energy Transfer”.

[15] N. Tesla, “The transmission of electric energy without wires,” in *13th Anniversary Number of the Electrical World and Engineer*, 1904.

[16] Hewitt, P., “Conceptual Physics, Volume II”, 1985, Ελληνική μετάφραση Σηφάκης Ε., 1997, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

[17] Schwartz, M., “Principles of Electrodynamics”, 1982, McGraw-Hill, Ελληνική μετάφραση Παπαδημητράκη-Χλίχλια Ε. Τσουκαλάς Ι., Εκδόσεις Α.Π.Θ.

[18] Serway, R., “Physics for Scientist and Engineers”, 1990, Saunders College Publishing, Ελληνική μετάφραση Ρεσβάνης Λ., εκδόσεις Γ. Κορφιάτη