

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ 1078

ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟ

ΨΥΧΟΓΙΟΣ ΛΑΜΠΡΟΣ (4985)

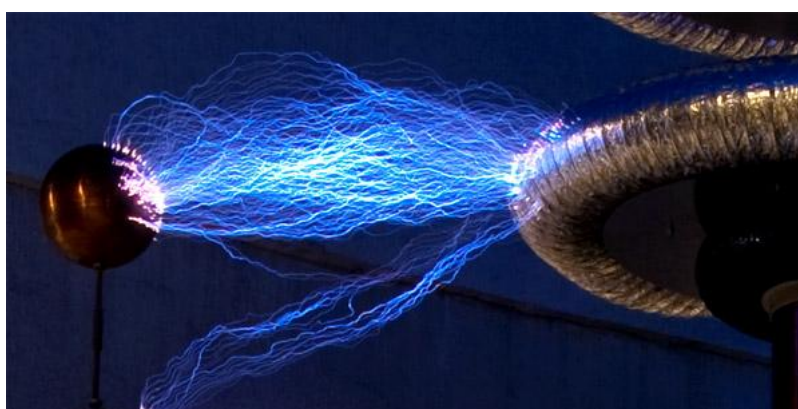
ΠΑΤΡΑ 2012

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ασύρματη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με μαγνητικό συντονισμό	1
2	Πηγή έμπνευσης της Τεχνολογίας	3
2.1	Ο μαγνητικός συντονισμός και η επίτευξη του στόχου	4
2.2	Φυσικά φαινόμενα που εμπλέκονται σε αυτή τη τεχνολογία	4
3	Θεωρία συστημάτων ισχυρής σύζευξης	9
3.1	Κίνητρα και βασικές θεωρίες	9
3.2	Μεμονωμένος ταλαντωτής που οδηγείται με σταθερή συχνότητα	10
3.3	Δύο συζευγμένοι ταλαντωτές	11
3.4	Μεταφορά Ενέργειας	11
4	Αναλυτικό μοντέλο για αυτό-συντονισμένα πηνία	15
4.1	Περιγραφή των αυτο-συντονισμένων πηνίων	15
4.2	Υποθέσεις του αναλυτικού μοντέλου	15
4.3	Συχνότητα συντονισμού	16
4.4	Απώλειες	16
4.5	Συντελεστής σύζευξης μεταξύ δυο πηνίων	17
4.6	Εγκυρότητα της ημιστατικής προσέγγισης	18
4.7	Πειραματική επιβεβαίωση	18
5	Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σπείρας	25
5.1	Νόμος Biot-Savart	25
6	Συμπεράσματα και προοπτικές για το μέλλον	31
6.1	Συμπεράσματα	31
6.2	Προοπτικές για το μέλλον	31
	Βιβλιογραφία	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή



1.1 Ασύρματη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με μαγνητικό συντονισμό

Το αντικείμενο της πτυχιακής είναι η ασύρματη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με μαγνητικό συντονισμό.

Ασύρματη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε γενικά την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δυο σημείων χωρίς τη χρήση κάποιου αγωγού που να συνδέει τα δυο σημεία. Δεν εννοούμε την ασύρματη μετάδοση πληροφορίας σε συστήματα τηλεπικοινωνιών (κινητά, δορυφορική τηλεόραση, κλπ), τεχνολογία που ήδη χρησιμοποιείται σήμερα. Η ασύρματη μετάδοση πληροφορίας γίνεται υπό συνθήκες χαμηλής ισχύος και η επέκτασή της σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (υψηλής ισχύος) θα σήμαινε την χρήση ισχυρής έντασης ακτινοβολίας μεταξύ δυο κεραίων (πομπός-δέκτης) με διαρροές που θα είχαν σοβαρές βιολογικές επιπτώσεις σε όποιους οργανισμούς ευρίσκονταν στο περιβάλλον λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος.

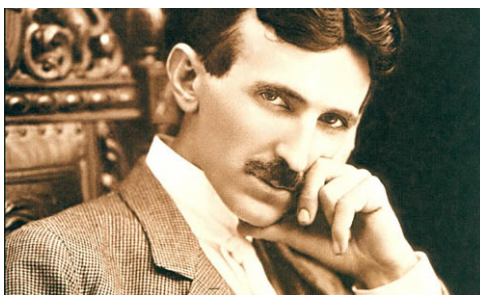
Πρόσφατη ανακάλυψη των Marin Soljacic, Αριστείδη Καραλή και Ιωάννη Γιαννόπουλο (ομάδα θεωρητικής φυσικής του MIT – δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 2009) δείχνει ότι μπορεί να γίνει μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας που να βασίζεται στο φαινόμενο του μαγνητικού συντονισμού, μέσω του μαγνητικού πεδίου και όχι του ηλεκτρικού, για μικρές αποστάσεις (χώρος κοντινού πεδίου - near field region). Αυτό σημαίνει ότι για αποστάσεις της τάξεως ολίγων μέτρων, μπορεί να γίνει ασύρματη μεταφορά ωφέλιμης και αξιοποιήσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς βιολογικές επιπτώσεις, εφόσον τα μαγνητικά πεδία που χρησιμοποιούνται είναι σε ένταση μικρότερα από το μαγνητικό πεδίο της γης. Αναφέρεται επίσης ότι η αρχική ιδέα ανήκε στον Νικόλα Τέσλα, ο οποίος έναν αιώνα πριν

φαινόταν ότι προσπαθούσε να επιτύχει κάτι ανάλογο.

Στα παρακάτω θα διερευνήσουμε το μοντέλο του μαγνητικού συντονισμού πάνω στο οποίο βασίζεται αυτή η τεχνολογία και θα εξετάσουμε τους δρόμους που ανοίγονται μπροστά μας. Είναι πολύ πιθανόν οι εφαρμογές της να εξελιχθούν στην ίδια ευρύτητα που έχουν και οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες με τα σύγχρονα κινητά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Πηγή έμπνευσης της Τεχνολογίας



Σχήμα 2.1: Νικόλα Τέσλα 1856-1943

Στα τέλη του 19ου αιώνα, εκφράστηκε έντονο ενδιαφέρον από τον Νικόλα Τέσλα για την ασύρματη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Ο κεντρικός στόχος του Τέσλα ήταν να παρακάμψει το καλωδιακό ηλεκτρικό δίκτυο και να κάνει την ηλεκτρική ενέργεια προσιτή σε όλο τον κόσμο, αλλά δυστυχώς υπήρξαν τεχνολογικές και οικονομικές δυσκολίες εκείνη την εποχή που στάθηκαν εμπόδιο και έτσι αυτό το σχέδιο δεν ολοκληρώθηκε ποτέ. Στις μέρες μας όμως, με την εξάπλωση όλο και περισσότερων φορητών ηλεκτρικών συσκευών στην καθημερινότητα, των οποίων οι μπαταρίες χρειάζονται συνεχώς φόρτιση, υπάρχει ανάγκη εξέλιξης της τεχνολογίας. Η ανάγκη αυτή επιτάσσει την εξέλιξη τεχνολογικών εφαρμογών που θα επέτρεπαν στις φορητές συσκευές να λειτουργούν πραγματικά αυτόνομα, δηλαδή καταργώντας την σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο ακόμα και για μια απλή φόρτιση. Έτσι την τελευταία δεκαετία το ενδιαφέρον για ασύρματη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας έχει γίνει περισσότερο έντονο.

Αυτό το ενδιαφέρον λοιπόν έχει ενεργοποιήσει μια προσπάθεια από πολλούς επιστήμονες να εντοπίσουν φυσικά φαινόμενα τα οποία θα μας βοηθήσουν να πραγματοποιήσουμε ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Ωστόσο η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ακτινοβολίας χρησιμοποιείται στην καθημερινότητα μας αρκετές δεκαετίες για να καλύψει τις ανάγκες της μεταφοράς πληροφορίας (κινητή τηλεφωνία, ασύρματα δίκτυα κ.α.), και αυτό γιατί παρόλο που η ωφέλιμη ισχύς είναι χαμηλή, μπορεί να αναπληρωθεί επαρκώς από τον δέκτη. Αυτό όμως δεν θα ταίριαζε για μεταφορά ενέργεια υψηλής ισχύος γιατί για να έχουμε ωφέλιμα επίπεδα μεταφερόμενης ενέργειας πρέπει να αυξηθεί κατά πολύ η εκπεμπόμενη ισχύς λόγω της χαμηλής απόδοσης αυτού του μηχανισμού, και πρέπει να σημειωθεί ότι έχουμε να κάνουμε με ψηλή ένταση ακτινοβολίας με ό,τι αυτό συνεπάγεται σε δυσμενείς βιολογικές επιπτώσεις στο άμεσο περιβάλλον.

2.1 Ο μαγνητικός συντονισμός και η επίτευξη του στόχου

Σε πρόσφατη δημοσίευση [5] όμως που αναφέρεται στην ανακάλυψη των Marin Soljagic, Αριστείδη Καραλή και Ιωάννη Γιαννόπουλο (ομάδα θεωρητικής φυσικής του MIT – δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 2009), παρουσιάστηκε η δυνατότητα ασύρματης μεταφοράς ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ αντικειμένων που βρίσκονται σε μαγνητικό συντονισμό, μέσα στα όρια του εγγύς πεδίου (όχι όμως του πεδίου ακτινοβολίας).



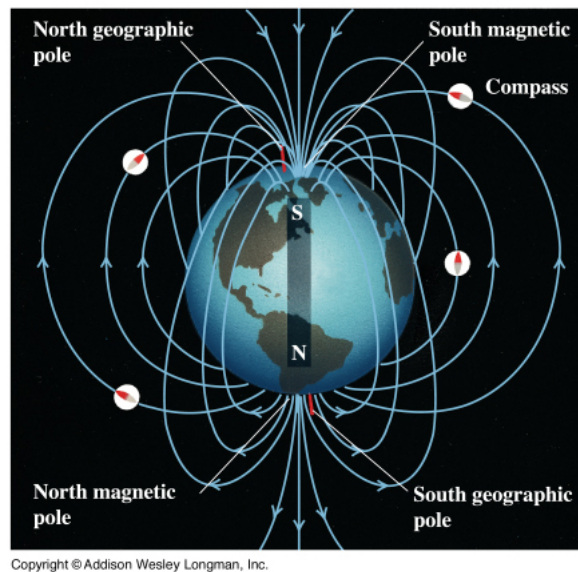
Σχήμα 2.2: Η Ομάδα που εφηύρε την WiTricity τεχνολογία κάθεται μεταξύ των πηνίων της πρώτης πειραματικής διάταξης που τροφοδοτεί έναν κοινό λαμπτήρα. Πρώτη γραμμή από αριστερά προς δεξιά, Peter Fisher και Robert Moffatt. Κέντρο, Marin Soljačić. Πίσω γραμμή, από αριστερά προς δεξιά, Andre Kurs, John Joannopoulos, Aristeidis Karalis.

Η βασική τους ιδέα πηγάζει από διάφορα συστήματα τα οποία μπορούν να επιτύχουν σύζευξη συντονισμού (τέτοια συστήματα είναι π.χ. ακουστικά, ηλεκτρομαγνητικά, μαγνητικά και πυρηνικά). Οι αποστάσεις των στοιχείων σε τέτοια συστήματα είναι της τάξεως 5-10 φορές των φυσικών διαστάσεων των αντικειμένων που βρίσκονται σε μαγνητικό συντονισμό. Για συνήθη αντικείμενα αυτό σημαίνει αποστάσεις της τάξεως ολίγων μέτρων όμως μπορεί επιτευχθεί επέκταση με κατάλληλους αναμεταδότες. Είναι γεγονός πως τα παραπάνω θυμίζουν την συνηθισμένη μεταφορά ενέργειας μεταξύ πηνίων μέσω μαγνητικής σύζευξης σύμφωνα με την οποία για να μεταφερθεί ενέργεια πρέπει τα πηνία να είναι πολύ κοντά το ένα με το άλλο σχεδόν εξ' επαφής (σε αυτή την αρχή λειτουργίας βασίζεται ο ηλεκτρικός μετασχηματιστής και ο ηλεκτρικός κινητήρας). Με τον συμβατικό όμως τρόπο μαγνητικής σύζευξης έχουμε πολύ χαμηλό βαθμό απόδοσης για αποστάσεις εγγύς πεδίου όταν τα αντικείμενα που ανταλλάσσουν ενέργεια δεν βρίσκονται σε μαγνητικό συντονισμό.

2.2 Φυσικά φαινόμενα που εμπλέκονται σε αυτή τη τεχνολογία

Με απλά φαινόμενα και νόμους της φυσικής ο τρόπος να μπορεί ένα σύστημα να μεταφέρει ασύρματα, δηλαδή χωρίς την παρουσία αγωγού, ηλεκτρική ενέργεια ή ισχύ σε απόσταση μεγαλύτερη από το εγγύς πεδίο και μάλιστα χωρίς την ανεπιθύμητη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, φαίνεται και είναι απλός. Ας δούμε λοιπόν βασισμένοι στην φυσική μια σειρά από αναφορές

σε φαινόμενα που εμπλέκονται σε αυτή τη τεχνολογία ώστε να κατανοήσουμε με ποιον τρόπο λειτουργεί και πως ο τρόπος αυτός δεν επηρεάζει βιολογικούς οργανισμούς όπως τον άνθρωπο. Ξεκινάμε με απλά αλλά βασικά θέματα μαγνητισμού και ηλεκτρισμού για να προσεγγίσουμε το θέμα μας. Είναι γνωστό πως ο ηλεκτρισμός είναι το φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο ροή ηλεκτρονίων υπό την μορφή ρεύματος μέσω ενός αγωγού και υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσω της ελεύθερης ατμόσφαιρας μεταφέρει ενέργεια από ένα μέρος σε ένα άλλο. Μια θεμελιώδης δύναμη της φύσης είναι και ο μαγνητισμός, η οποία δύναμη προκαλεί ορισμένα υλικά να προσελκύουν ή να απωθούν το ένα το άλλο. Δυο κατηγορίες του μαγνητισμού είναι τα μόνιμα μαγνητικά πεδία, όπως για παράδειγμα το μαγνητικό πεδίο της γης ή πιο απλά οι μαγνήτες ψυγείου, και τα μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία τα οποία αλλάζουν με τον χρόνο και μπορούν να παραχθούν από το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) που ρέει σε έναν αγωγό (καλώδιο). Η δύναμη, η κατεύθυνση και η ένταση των μαγνητικών πεδίων συχνά απεικονίζεται με σχεδιαγράμματα μαγνητικών γραμμών.

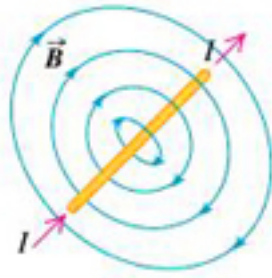


Σχήμα 2.3: Μια εικόνα που αντιπροσωπεύει το μαγνητικό πεδίο της Γης

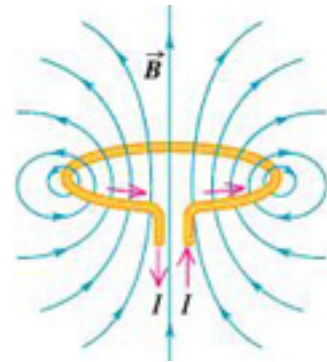
Ο ηλεκτρομαγνητισμός είναι ένας όρος που δηλώνει την αλληλεξάρτηση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων καθώς μεταβάλλονται με τον χρόνο. Για παράδειγμα, όταν ένα μαγνητικό πεδίο ταλαντεύεται παράγει ένα ηλεκτρικό πεδίο και αντίστροφα όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο ταλαντεύεται παράγει ένα μαγνητικό πεδίο.

Σύμφωνα με την μαγνητική επαγωγή ένας βρόχος ή ένα πηνίο κάποιου αγώγιμου υλικού όπως ο χαλκός, όταν διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σχηματίζει μια πολύ καλή διάταξη για την δημιουργία ή την σύλληψη ενός μαγνητικού πεδίου. Εάν ένας αγώγιμος βρόχος (ή πηνίο) συνδέεται με μια πηγή εναλλασσομένου ρεύματος, τότε θα δημιουργηθεί ένα ταλαντευόμενο μαγνητικό πεδίο στην περιοχή του βρόχου. Αν ένας δεύτερος αγώγιμος βρόχος έρθει αρκετά κοντά στον πρώτο, τότε ο πρώτος μπορεί να συλλάβει ένα μέρος του ταλαντευόμενου μαγνητικού πεδίου του πρώτου βρόχου. Το ταλαντευόμενο μαγνητικό πεδίο με την σειρά του, δημιουργεί ή επάγει ένα ηλεκτρικό ρεύμα στο δεύτερο βρόχο. Το ρεύμα που παράγεται στο δεύτερο πηνίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση συσκευών-καταναλωτών. Αυτός ο τρόπος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από έναν βρόχο ή πηνίο σε ένα άλλο είναι γνωστός και ως μαγνητική επαγωγή. Τα πιο γνωστά παραδείγματα μαγνητικής επαγωγής είναι οι ηλεκτρικοί μετασχηματιστές και οι ηλεκτρικές γεννήτριες.

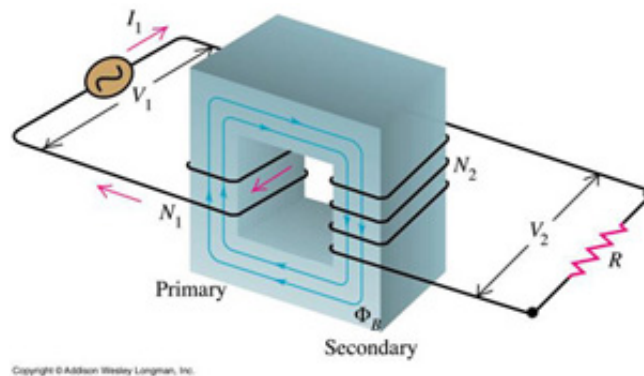
Σύζευξη ενέργειας-ισχύος μπορεί να συμβεί όταν μια πηγή ενέργειας έχει ένα μέσο μεταφοράς της ενέργειας αυτής σε ένα άλλο αντικείμενο. Ένα απλό παράδειγμα είναι μια ατμομηχανή που τραβά



Σχήμα 2.4: Καθώς ηλεκτρικό ρεύμα, I , ρέει σε ένα καλώδιο, δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο, B , το οποίο αναδιπλώνεται γύρω από το καλώδιο. Όταν αντιστρέφεται η κατεύθυνση του ρεύματος, αντιστρέφεται και η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 2.5: Οι μπλε γραμμές αντιπροσωπεύουν το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται όταν διέρχεται ρεύμα μέσα από ένα πηνίο. Όταν αντιστρέφεται η κατεύθυνση του ρεύματος, αντιστρέφεται και η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.



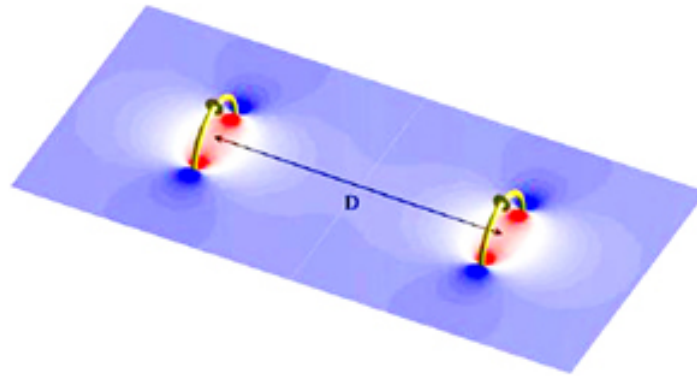
Σχήμα 2.6: Ένας ηλεκτρικός μετασχηματιστής είναι μια συσκευή που χρησιμοποιεί μαγνητική επαγωγή για τη μεταφορά ενέργειας από το πρωτεύον πηνίο(τύλιγμα) στο δευτερεύον, χωρίς να συνδέονται μεταξύ τους. Χρησιμοποιείται για να «μετατρέψει» εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια διαφορετικού επιπέδου τάσης.

το βαγόνι ενός τρένου. Οι μηχανικοί σύνδεσμοι μεταξύ των ατμομηχανής και βαγονιού επιτρέπουν στην ατμομηχανή να τραβήξει το βαγόνι ξεπερνώντας τις δυνάμεις τριβής και αδράνειας που το κρατούν ακίνητο και έτσι το τρένο κινείται. Μαγνητική σύζευξη συμβαίνει όταν το μαγνητικό πεδίο ενός αντικειμένου αλληλεπιδρά με ένα δεύτερο αντικείμενο και προκαλεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα μέσα ή πάνω σ' αυτό το αντικείμενο. Με αυτόν τον τρόπο, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί από μια πηγή ενέργειας σε μια ηλεκτρικά τροφοδοτούμενη συσκευή. Σε αντίθεση με το παράδειγμα της μηχανικής σύζευξης που προαναφέρθηκε για το τρένο, η μαγνητική σύζευξη δεν απαιτεί καμία φυσική επαφή μεταξύ του αντικειμένου που παράγει την ενέργεια και του αντικειμένου που λαμβάνει αυτήν την ενέργεια.

Ο συντονισμός είναι μια ιδιότητα που υπάρχει σε πολλά διαφορετικά φυσικά συστήματα. Συμβαίνει σε συχνότητες όπου η ενέργεια μπορεί πιο αποτελεσματικά να προστεθεί σε ένα ταλαντευόμενο σύστημα. Μια κούνια στην παιδική χαρά είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός ταλαντευμένου συστήματος το οποίο περιλαμβάνει δυναμική και κινητική ενέργεια. Το παιδί που κάνει κούνια ταλαντεύεται εμπρός και πίσω σε ποσοστό που καθορίζεται από το μήκος της κούνιας. Το παιδί μπορεί να κάνει την κούνια να πάει πιο ψηλά (να κάνει δηλαδή μεγαλύτερη ταλάντωση) αν καταφέρει να συντονίσει το βάρος του, με τα χέρια και τα πόδια του, με την φορά της κούνιας. Βλέπουμε λοιπόν ότι καθώς η κούνια ταλαντεύεται στην συχνότητα συντονισμού το παιδί με απλές κινήσεις

καταφέρνει να μεταδώσει ενέργεια στο σύστημα. Ένα άλλο παράδειγμα συντονισμού, που πολλοί από εμάς έχουμε δει ακόμα και στην τηλεόραση, είναι αυτό που ένας τραγουδιστής θρυμματίζει κυριολεκτικά ένα κρυστάλλινο ποτήρι κρασιού μόνο με την φωνή του. Τραγουδώντας καθαρά και δυνατά μια μουσική νότα προκαλεί ταλάντωση στο ποτήρι. Όταν η ταλάντωση αυτή μεγαλώσει το ποτήρι θρυμματίζεται. Σε αυτό το παράδειγμα το ποτήρι του κρασιού είναι συντονισμένο στο ταλαντευμένο από την φωνή του τραγουδιστή σύστημα. Τα ηχητικά κύματα που μεταφέρονται μέσω του αέρα συλλαμβάνονται από το ποτήρι, και η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται από το ίδιο το ποτήρι σε μηχανικές δονήσεις. Όταν λοιπόν ο τραγουδιστής πετυχαίνει την νότα που ταιριάζει στην συχνότητα συντονισμού του ποτηριού, το ποτήρι απορροφά ενέργεια, ξεκινά να δονείται, και μπορεί τελικά ακόμα και να θρυμματιστεί. Η συχνότητα συντονισμού του ποτηριού εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα, το πάχος του, ακόμα και πόσο κρασί έχει μέσα.

Σύζευξη ταλαντευμένου μαγνητικού πεδίου εμφανίζεται όταν δύο αντικείμενα ανταλλάσσουν ενέργεια μέσω μαγνητικού συντονισμού. Σύζευξη με συντονισμό συμβαίνει όταν οι ιδιοσυχνότητες δυο αντικειμένων είναι περίπου ίδιες. Έτσι καταφέρνουμε ασύρματη μεταφορά ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας με σχεδόν καθόλου απώλειες, σε σχέση με συμβατικά συστήματα.



Σχήμα 2.7: Δύο εξιδανικευμένα ταλαντευόμενα μαγνητικά πηνία, εμφανίζονται με κίτρινο χρώμα. Οι μπλε και κόκκινο χρώματος ζώνες απεικονίζουν τα μαγνητικά πεδία τους. Η σύζευξη των αντίστοιχων μαγνητικών πεδίων τους υποδεικνύεται από τη σύνδεση των χρωματισμένων μπλε και κόκκινων ζωνών.

Ο κροάτικης καταγωγής αμερικανός φυσικός Μάριν Σόλιατσιτς (Marin Soljacic), αναφέρει ότι οι ηλεκτρικές 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. Επιπλέον, υποστήριξε πώς το φυσικό φαινόμενο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να κάνουμε αυτή την ασύρματη ενεργειακή μεταφορά είναι ο «συντονισμός», ένα φαινόμενο που αναγκάζει ένα αντικείμενο να δονηθεί όταν εφαρμόζεται ενέργεια μιας ορισμένης συχνότητας.

«Όταν έχετε δύο αντικείμενα που συντονίζονται στην ίδια συχνότητα τείνουν να συνδεθούν πολύ έντονα», είπε ο καθηγητής Soljacic. Ο συντονισμός μπορεί να φαίνεται στα έγχορδα μουσικά όργανα παραδείγματος χάριν. «Όταν παίζετε μία νότα σ' ένα όργανο, τότε ένα άλλο όργανο που είναι σε συντονισμό μαζί του θα πάρει αυτή τη νότα και θα δονηθεί», συνέχισε. Αντί όμως της χρησιμοποίησης ακουστικών δονήσεων, το σύστημα της ομάδας εκμεταλλεύεται το συντονισμό των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία περιλαμβάνει τα ραδιοκύματα, τις υπέρυθρες ακτίνες και τις ακτίνες X. Όμως τα συστήματα που χρησιμοποιούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως είναι οι ραδιοκεραίες, δεν είναι κατάλληλες για την αποδοτική μεταφορά της ενέργειας, επειδή διασκορπίζουν την ενέργεια προς όλες τις κατευθύνσεις, σπαταλώντας έτσι μεγάλα ποσά από αυτήν στο ελεύθερο διάστημα. Για να υπερνικήσουν αυτό το πρόβλημα, η ομάδα ερευνήσε μια ειδική κατηγορία «μη-ακτινοβολούντων» αντικειμένων με τον αποκαλούμενο «μακροχρόνιο συντονισμό». Όταν παρέχεται ενέργεια σε αυτά τα αντικείμενα παραμένει συνδεδεμένη

σε αυτά αντί να διαφεύγει στο χώρο. «Ουρές» της ενέργειας, που μπορεί να είναι πολλά μέτρα σε μήκος, τρεμοπαίζουν πάνω από την επιφάνεια. «Εάν φέρετε ένα άλλο συντονιζόμενο αντικείμενο με την ίδια συχνότητα, αρκετά κοντά σε αυτές τις ουρές τότε αυτή η ενέργεια μεταφέρεται από το ένα αντικείμενο στο άλλο», συνεχίζει ο Soljacic. Ως εκ τούτου, μια απλή κεραία χαλκού σχεδιασμένη να έχει συντονισμό μεγάλου χρόνου θα μπορούσε να μεταφέρει την ενέργεια σε ένα laptop που η κεραία του θα συντονιζόταν στην ίδια συχνότητα. Ο υπολογιστής τότε θα ήταν αληθινά ασύρματος. Οποιαδήποτε ενέργεια που δεν θα εκτρέπεται σε μια συσκευή θα απορροφιέται εκ νέου πολύ απλά. Τα συστήματα που η ομάδα αυτή έχει περιγράψει θα ήταν σε θέση να μεταφέρουν την ενέργεια από τρία έως πέντε μέτρα. «Αυτό θα δούλευε σε ένα δωμάτιο, αλλά θα μπορούσαμε να το προσαρμόσουμε να δουλέψει και σε ένα εργοστάσιο», τόνισε ο καθηγητής Soljacic.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Θεωρία συστημάτων ισχυρής σύζευξης

3.1 Κίνητρα και βασικές θεωρίες

Προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας, απαιτείται ένας μεθοδικός τρόπος για την βελτίωση των παραμέτρων του συγκεκριμένου συστήματος (όπως η γεωμετρία του, τα υλικά που χρησιμοποιούνται, και η συχνότητα συντονισμού) έτσι ώστε αυτό να λειτουργεί σε καθεστώς ισχυρής σύζευξης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ανάλυση αυτή μπορεί να γίνει απευθείας με βάση τις γνωστές ποσότητες. Για παράδειγμα, όταν ασχολούμαστε με σύζευξη συστημάτων LCR τα οποία αποτελούνται από τα γνωστά ιδανικά στοιχεία ωμικές αντιστάσεις, πηνία και πυκνωτές μπορούμε να λύσουμε το κύκλωμα απευθείας με διαφορικές ή αλγεβρικές εξισώσεις (Kirchhoff). Ωστόσο, τα πραγματικά συστήματα αποτελούνται από αυτο-συντονισμένα πηνία με καταναμημένες επαγωγές και χωρητικότητες και δεν μπορούν εύκολα να αναλυθούν με βάση το μοντέλο των ιδανικών, συγκεντρωμένων στοιχείων. Ο τρόπος που ακολουθείται είναι η εφαρμογή της θεωρίας συζεύξεως που παρέχει ένα απλό αλλά ακριβή τρόπο για την μοντελοποίηση τέτοιων συστημάτων, και δίνει μια πιο διαισθητική, αν μπορούσαμε να πούμε, κατανόηση στο τι είναι αυτό που κάνει την μεταφορά ενέργειας αποτελεσματική υπό καθεστώς ισχυρής σύζευξης. Ουσιαστικά η θεωρία συζεύξεων χρησιμοποιείται έτσι ώστε να μειωθεί η ανάλυση των συστημάτων γενικής φύσεως με το παρακάτω σύστημα συζευγμένων διαφορικών εξισώσεων:

$$\dot{\alpha}_m(t) = -(i\omega_m - i\Gamma_m)\alpha_m(t) - \sum_{m \neq n} i\kappa_{mn}\alpha_n(t) + F_m(t) \quad (3.1)$$

όπου οι δείκτες αντιστοιχούν σε αντικείμενα που βρίσκονται σε συντονισμό. Οι μεταβλητές $\alpha_m(t)$ ορίζονται έτσι ώστε η ενέργεια που περιέχει το αντικείμενο m να είναι $|\alpha_m(t)|^2$. ω_m είναι η συχνότητα συντονισμού του αντικειμένου m και Γ_m είναι ο ρυθμός διαρροής ενέργειας λόγω των διαφόρων μηχανισμών απωλειών. Έτσι λοιπόν σε αυτό το πλαίσιο, η μεταβλητή $\alpha_0(t)$ αντιστοιχεί σε ένα ασύζευκτο και μη οδηγούμενο ταλαντωτή με παραμέτρους ω_0 και Γ_0 που εξελίσσονται στον χρόνο σύμφωνα με τη σχέση $e^{-i\omega_0 t - \Gamma_0 t}$. Τα κ_{mn} είναι οι συντελεστές σύζευξης μεταξύ των αντικειμένων σε συντονισμό και $F_m(t)$ είναι οι εκτός συστήματος παράγοντες εξωτερικής οδήγησης.

Σαν πρώτη παραδοχή της λειτουργίας της θεωρίας συζεύξεων, είναι ότι το φάσμα συχνοτήτων ενδιαφέροντος είναι αρκετά περιορισμένο. Για το λόγο αυτό οι φαινομενολογικοί παράγοντες στην εξίσωση 3.1 μπορούν να αντιμετωπιστούν ως σταθερές και οι συζευγμένες διαφορικές εξισώσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν ως γραμμικές. Η δεύτερη παραδοχή είναι ότι η συνολική λειτουργία του συστήματος μπορεί να περιγραφεί σαν μια υπέρθεση των λειτουργιών που οφείλονται σε κάθε αντικείμενο. Η δεύτερη προϋπόθεση συνήθως υποδηλώνει ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των συντονιστών δεν πρέπει να είναι αρκετά ισχυρή έτσι ώστε να μην αλλοιώνονται σημαντικά οι με-

μονωμένες τιμές ιδιομορφιών. Ωστόσο υπό την έννοια αυτή, ο λόγος που χρησιμοποιούμε την λέξη «ισχυρή» όταν αναφερόμαστε σε καθεστώς ισχυρής σύζευξης, θα αναφερθεί παρακάτω.

Περιορίζοντας το μοντέλο το πολύ σε δυο αντικείμενα θα χαρακτηρίσουμε το ένα ως πηγή (προσδιορίζοντας το με τον δείκτη S) και το άλλο σαν συσκευή-δέκτης (με τον δείκτη D). Οι συντελεστές σύζευξης κ_{SD} και κ_{DS} δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Πράγματι, ένα εξαναγκασμένο σύστημα που αποτελείται από αυτά τα δύο αντικείμενα χάνει ενέργεια σε ποσοστό που φαίνεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης όπου αντικαθιστούνται από την 3.1 τα α_S και α_D μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης γραμμής.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (|\alpha_S|^2 + |\alpha_D|^2) &= \alpha_S \dot{\alpha}_S^* + \dot{\alpha}_S \alpha_S^* + \alpha_D \dot{\alpha}_D^* + \dot{\alpha}_D \alpha_D^* \\ &= -2\Gamma_S |\alpha_S|^2 - 2\Gamma_D |\alpha_D|^2 \\ &\quad - i(\kappa_{SD} \alpha_S^* \alpha_D - \kappa_{SD}^* \alpha_S \alpha_D^* + \kappa_{DS} \alpha_S \alpha_D^* - \kappa_{DS}^* \alpha_S^* \alpha_D) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Δεδομένου λοιπόν ότι οι μόνοι μηχανισμοί μέσω των οποίων το σύστημα μπορεί να χάσει ενέργεια ενσωματώνονται στα Γ_S και Γ_D , η τρίτη γραμμή στην εξίσωση 3.2 πρέπει να εξισωθεί με μηδέν. Επιπλέον, οι φάσεις των α_S και α_D είναι αυθαίρετες, και βρίσκουμε ότι οι συντελεστές κ_{SD} και κ_{DS} είναι πραγματικοί και μεταξύ τους ίσοι ($\kappa_{SD} = \kappa_{DS}$). Σαφώς, αυτή η ιδιότητα ισχύει για όλες τις τιμές που παίρνει το κ_{mn} στην 3.1 όπου χρησιμοποιείται. Στο εξής θα χρησιμοποιήσουμε τον ενιαίο συντελεστή σύζευξης $\kappa = \kappa_{SD} = \kappa_{DS}$. Η 3.2 επίσης δείχνει ότι ο κ σχετίζεται με τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των δύο ταλαντωτών, και θα χρησιμοποιήσουμε αυτή την ιδιότητα παρακάτω να επιλύσουμε θεωρητικά το κ στην πειρατική μας διάταξη.

3.2 Μεμονωμένος ταλαντωτής που οδηγείται με σταθερή συχνότητα

Για ένα μεμονωμένο ταλαντωτή, η 3.1 περιορίζεται σε

$$\dot{\alpha}(t) = -i(\omega_0 - i\Gamma)\alpha + Fe^{-i\omega t} \quad (3.3)$$

Όπου $Fe^{-i\omega t}$ είναι ο όρος οδήγησης για σταθερή κατάσταση. Η λύση είναι

$$\alpha_S(t) = \frac{Fe^{-i\omega t}}{i(\omega_0 - \omega) + \Gamma} \quad (3.4)$$

Ένας τρόπος να μετρήσουμε το Γ_S πειραματικά είναι να οδηγήσουμε τον ταλαντωτή σε σταθερή κατάσταση και να καθορίσουμε το εύρος συχνοτήτων Δ_ω όπου το πλάτος της ταλάντωσης είναι μεγαλύτερο κατά $1/\sqrt{2}$ από το μέγιστο πλάτος (το οποίο εμφανίζεται όταν $\omega = \omega_S$). Από την 3.4 βρίσκουμε ότι $2\Gamma = \Delta_\omega$. Επίσης, είναι εύκολο να χρησιμοποιήσουμε τον παράγοντα ποιότητας Q που ορίζεται ως

$$Q = 2\pi \frac{\langle \text{αποθηκευμένη ενέργεια} \rangle}{\langle \text{ισχύς που καταναλώνεται ανά κύκλο} \rangle} = \frac{\omega_0}{2\Gamma} = \frac{\omega_0}{\Delta_\omega} \quad (3.5)$$

Δηλαδή, σε μια περίοδο ταλάντωσης ένα συντονισμένο αντικείμενο χάνει το $1/Q$ της ενέργειας του.

3.3 Δύο συζευγμένοι ταλαντωτές

Μπορούμε να λύσουμε τις εξισώσεις λειτουργίας ισχυρής σύζευξης με δυο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος είναι όταν το σύστημα δεν οδηγείται από εξωτερικό ταλαντωτή (μη οδηγούμενο) και ο δεύτερος όταν το σύστημα οδηγείται από εξωτερικό ταλαντωτή (οδηγούμενο). Τα αποτελέσματα της μη οδηγούμενης μεθόδου που προκύπτουν από την εξομοίωση του συστήματος με ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι χρήσιμα για την εξαγωγή του κ , ενώ τα αποτελέσματα της οδηγούμενης μεθόδου μας επιτρέπουν να προσδιορίσουμε το κ πειραματικά. Το σύστημα των εξισώσεων της μη οδηγούμενης μεθόδου είναι

$$\begin{aligned}\dot{\alpha}_S &= -i(\omega_S - i\Gamma_S)\alpha_S - i\kappa\alpha_D \\ \dot{\alpha}_D &= -i(\omega_D - i\Gamma_D)\alpha_D - i\kappa\alpha_S\end{aligned}\quad (3.6)$$

Το σύστημα αυτό έχει λύσεις που βασίζονται στις ιδιοσυχνότητες

$$\begin{aligned}\omega_{1,2} &= \frac{1}{2}[\omega_S + \omega_D - i(\Gamma_S + \Gamma_D)] \\ &\pm \frac{1}{2}[4\kappa^2 + (\omega_S - \omega_D)^2 - (\Gamma_S - \Gamma_D)^2 - 2i(\Gamma_S - \Gamma_D)(\omega_S - \omega_D)]^{1/2}\end{aligned}\quad (3.7)$$

Για την περίπτωση δύο πανομοιότυπων ταλαντωτών με $\omega_S = \omega_D = \omega_0$ και $\Gamma_S = \Gamma_D = \Gamma$ αυτές απλοποιούνται σε

$$\omega_{1,2} = \omega_0 - i\Gamma \pm \kappa \quad (3.8)$$

Έτσι βλέπουμε ότι ο κ σχετίζεται με το διαχωρισμό μεταξύ των ιδιοσυχνοτήτων από $2\kappa = \omega_1 - \omega_2$. Η μέθοδος με οδήγηση προσθέτει έναν όρο $F e^{-i\omega t}$ στην πρώτη γραμμή της 3.6. Η λύση στο νέο σύστημα συντονισμένων εξισώσεων είναι:

$$\begin{aligned}\alpha_S &= \frac{[\Gamma_D - i(\omega - \omega_D)]F e^{-i\omega t}}{\kappa^2 + \Gamma_S\Gamma_D - (\omega_S - \omega)(\omega_D - \omega) + i[\Gamma_S(\omega_D - \omega) + \Gamma_D(\omega_S - \omega)]} \\ \alpha_D &= \frac{-i\kappa F e^{-i\omega t}}{\kappa^2 + \Gamma_S\Gamma_D - (\omega_S - \omega)(\omega_D - \omega) + i[\Gamma_S(\omega_D - \omega) + \Gamma_D(\omega_S - \omega)]}\end{aligned}\quad (3.9)$$

Ο προσδιορισμός του κ περιλαμβάνει τη μέτρηση του πλάτους διέγερσης στο αντικείμενο της συσκευής ενώ «σαρώνεται» η συχνότητα οδήγησης ω . Περιορίζοντάς μας στην περίπτωση των δύο πανομοιότυπων ταλαντωτών, οι δύο κορυφές στο πλάτος εμφανίζονται στην:

$$\omega'_{1,2} = \omega_0 \pm \sqrt{\kappa^2 - \Gamma^2} \quad (3.10)$$

Το κ συνεπώς προκύπτει από την μέτρηση του Γ και η συχνότητα διαχωρίζεται μεταξύ των δύο κορυφών.

3.4 Μεταφορά Ενέργειας

Όταν η συσκευή διεγερθεί από την πηγή (η οποία με την σειρά της οδηγείται με σταθερή συχνότητα), μπορούμε να εξάγουμε ενέργεια και να την μετατρέψουμε σε αξιοποιήσιμη προσθέτοντας

ένα φορτίο (συμβολίζοντας το με τον δείκτη W) στη συσκευή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών συντονισμών, το φορτίο δρα αποτελεσματικά σαν κύκλωμα αντίστασης συνδεδεμένο με την συσκευή. Γενικότερα, το φορτίο έχει την ιδιότητα προσθήκης ενός επιπλέον όρου για την εκφόρτωση του δέκτη Γ_D της συσκευής. Το συνολικό ποσοστό φθοράς στη συσκευή ως εκ τούτου αλλάζει σε $\Gamma'_D = \Gamma_D + \Gamma_W$ όπου Γ_D είναι ο πραγματικός ρυθμός φθοράς της συσκευής, όπως και προηγουμένως. Το αποτέλεσμα καθορίζεται από την διάχυση της ενέργειας στο φορτίο, δηλαδή $2\Gamma_W|\alpha_D(t)|^2$ και η συνολική απόδοση του συστήματος είναι :

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\Gamma_W|\alpha_D|^2}{\Gamma_S|\alpha_S|^2 + (\Gamma_D + \Gamma_W)|\alpha_D|^2} \\ &= \frac{\Gamma_W\kappa^2}{\Gamma_S[(\Gamma_D + \Gamma_W)^2 + (\omega - \omega_D)]^2 + (\Gamma_D + \Gamma_W)\kappa^2} \end{aligned} \quad (3.11)$$

όπου κάνουμε τη σύνδεση με την 3.9 κατά την μετάβαση από την πρώτη στη δεύτερη γραμμή. Μπορούμε τώρα να πούμε ότι η αποδοτικότητα μεγιστοποιείται όταν $\omega = \omega_D$. Η 3.11 απλοποιείται τότε σε:

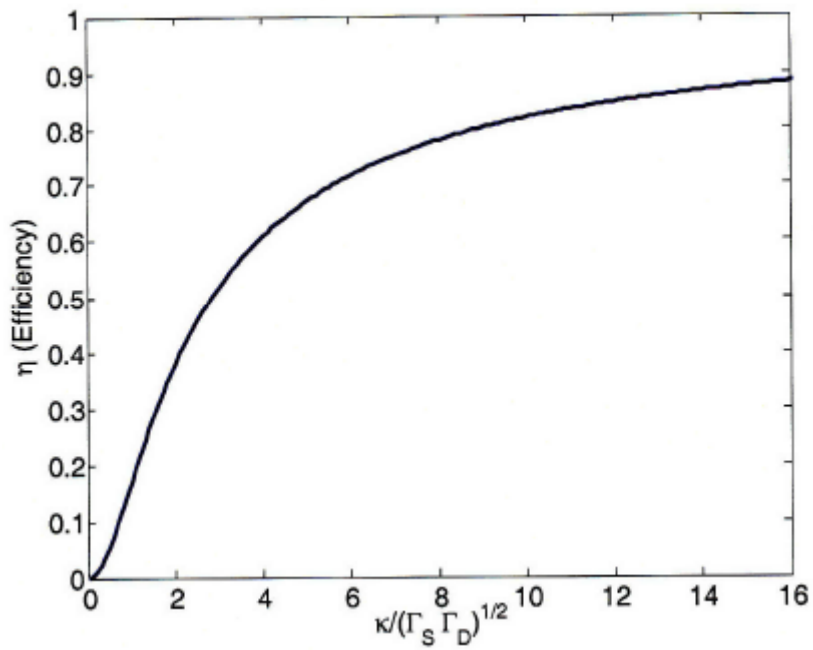
$$\eta = \frac{(\Gamma_W/\Gamma_D)\kappa^2/(\Gamma_S\Gamma_D)}{[1 + \Gamma_W/\Gamma_D]\kappa^2/(\Gamma_S\Gamma_D) + [1 + \Gamma_W/\Gamma_D]^2} \quad (3.12)$$

Για ηλεκτρομαγνητικά συστήματα, ένας διαισθητικός τρόπος για να καταλήξουμε στο ίδιο αποτέλεσμα είναι να παρατηρήσουμε ότι η ισχύς που καταναλώνεται από κάθε αντικείμενο είναι ανάλογη με το τετράγωνο του πλάτους των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται. Επίσης σε αναλογία με την γνωστή μιγαδική ισχύ, η πραγματική ισχύς που μεταφέρεται μεταξύ πηγής και φορτίου αντιπροσωπεύεται από τη μέση τιμή του διανύσματος Poynting $\langle P \rangle = 1/2\text{Re} [\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*]$. Εφόσον τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία στο συντονισμό έχουν διαφορά φάσης 90° το διάνυσμα Poynting μεγιστοποιείται όταν υπάρχει διαφορά φάσης 90° μεταξύ ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου.

Μεγιστοποίηση της απόδοσης είναι ισοδύναμη με την επίλυση ενός προβλήματος εμπέδησης, δεδομένων των εγγενών παραμέτρων του συστήματος. Μεγιστοποιώντας το φορτίο Γ_W μεγιστοποιείται το η . Από αυτή τη μεγιστοποίηση η 3.12 δίνει την βέλτιστη τιμή

$$\Gamma_W = \Gamma_D \sqrt{1 + \kappa^2/\Gamma_S\Gamma_D}$$

Έχουμε διαπιστώσει ότι η απόδοση της μεταφοράς ενέργειας εξαρτάται αποκλειστικά από την αδιάστατη παράμετρο $\kappa/\sqrt{\Gamma_S\Gamma_D}$, το σχήμα 3.1 δείχνει ότι η μεταφορά είναι αποτελεσματική (δηλαδή το η είναι της τάξης 1) όταν το $\kappa/\sqrt{\Gamma_S\Gamma_D} \gtrsim 1$. Αυτό είναι εκείνο που εμείς αποκαλούμε ως καθεστώς ισχυρής σύζευξης. Ένας έξυπνος τρόπος να κατανοήσουμε γιατί η μεταφορά ενέργειας είναι αποτελεσματική υπό αυτό το καθεστώς είναι να σημειώσουμε ότι $\sqrt{\Gamma_S\Gamma_D}$ είναι ουσιαστικά ο ρυθμός με τον οποίο η πηγή και η συσκευή διαχέει την ενέργεια, ενώ το κ είναι ένα μέτρο του πόσο γρήγορα ανταλλάσσουν ενέργεια τα δύο αντικείμενα. Εάν $\kappa \geq \sqrt{\Gamma_S\Gamma_D}$, τότε η ενέργεια πηγαινει από την πηγή στην συσκευή πριν γίνουν οι απώλειες πολύ μεγάλες. Να σημειώσουμε ότι τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου εφαρμόζονται σε όλα τα φυσικά συστήματα των συζευγμένων ταλαντωτών. Τώρα θα στρέψουμε την προσοχή μας στο σύστημα αυτό-συντονισμένων ηλεκτρομαγνητικών τυλιγμάτων-πηνιών.



Σχήμα 3.1: Η απόδοση ως συνάρτηση της παραμέτρου $\kappa/\sqrt{\Gamma_S \Gamma_D}$. Για τιμές $\kappa/\sqrt{\Gamma_S \Gamma_D} \simeq 1$, η απόδοση αυξάνεται απότομα, δικαιολογώντας έτσι το κριτήριο $\kappa/\sqrt{\Gamma_S \Gamma_D} \gtrsim 1$ για αποτελεσματική μεταφορά ισχύος. Η καμπύλη της απόδοσης ασυμπτωτικά πλησιάζει το 1 όταν $\kappa/\sqrt{\Gamma_S \Gamma_D} \rightarrow \infty$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Αναλυτικό μοντέλο για αυτό-συντονισμένα πηνία

4.1 Περιγραφή των αυτο-συντονισμένων πηνίων

Η πειραματική υλοποίηση της ομάδας του MIT, του συστήματος μεταφοράς ενέργειας αποτελείται από δύο πανομοιότυπα αυτό-συντονισμένα πηνία φτιαγμένα από ένα ηλεκτρικά αγώγιμο καλώδιο-σύρμα συνολικού μήκους l και ακτίνας διατομής a τυλιγμένο σε ελικοειδή μορφή n περιστροφών, ακτίνας r και ύψους h . Δεν υπάρχει ακριβής ηλεκτρομαγνητική λύση για το πεδίο έλικα πεπερασμένου μήκους στη βιβλιογραφία. Ακόμη και στην περίπτωση πηνίων απείρου μήκους, τα αποτελέσματα βασίζονται σε παραδοχές που είναι ανεπαρκείς για το σύστημα μας [6]. Έχει ωστόσο διαπιστωθεί ότι ένα απλό ημιστατικό μοντέλο είναι σε πολύ καλή συμφωνία με το πείραμα (περίπου 5%). Έχουμε επίσης προσπαθήσει να μοντελοποιήσουμε τα πηνία υπολογιστικά χρησιμοποιώντας ένα πακέτο λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων αλλά με δεδομένο τους περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους στη διάθεση μας, δεν ήμασταν σε θέση εξάγουμε όλες τις παραμέτρους που απαιτούνται για μια πλήρη λειτουργία της θεωρίας ισχυρής σύζευξης. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το αναλυτικό μοντέλο, ενώ η υπολογιστική ανάλυση περιγράφεται στο επόμενο.

4.2 Υποθέσεις του αναλυτικού μοντέλου

Ξεκινάμε με την παρατήρηση ότι το ρεύμα πρέπει να είναι ίσο με μηδέν στα άκρα του πηνίου, και κάνουμε την εμπειρική υπόθεση ότι οι τρόποι συντονισμού του πηνίου προσεγγίζονται από ημιτονοειδές τύπου ρεύμα κατά μήκος του αγωγού. Μας ενδιαφέρει η θεμελιώδης κανονική κατάσταση. Έτσι, αν δηλώσουμε με s την παράμετρο που αντιστοιχεί στο μήκος του αγωγού, έτσι ώστε να διατρέχει τις τιμές από $-l/2$ σε $+l/2$, τότε η εξαρτημένη από τον χρόνο συνάρτηση ρεύματος έχει τη μορφή

$$I_0 \cos(\pi s/l) e^{-i\omega_0 t}$$

Χρησιμοποιώντας της εξίσωση συνεχείας για την φόρτιση

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot J = 0 \quad (4.1)$$

(όπου ρ είναι η πυκνότητα της φόρτισης και J είναι η πυκνότητα ρεύματος) βρίσκουμε ότι η συ-

νάρτηση γραμμικής πυκνότητας φόρτισης είναι της μορφής

$$\lambda_0 \sin(\pi s/l) e^{-i\omega t}$$

Γιαυτό το λόγο το ήμισυ του πηνίου (όταν τέμνεται κάθετα προς τον άξονα) περιέχει μια ταλαντούμενη συνολική φόρτιση (πλάτους $q_0 = \lambda_0 l/\pi$) που είναι ίση σε μέγεθος αλλά με αντίθετο πρόσημο από την φόρτιση στο άλλο μισό.

4.3 Συχνότητα συντονισμού

Καθώς το πηνίο ταλαντεύεται, οι συναρτήσεις πυκνότητας ρεύματος και φόρτισης έχουν διαφορά φάσης μεταξύ τους $\pi/2$, πράγμα που σημαίνει ότι το πραγματικό μέρος του ενός είναι μέγιστο όταν το πραγματικό μέρος του άλλου είναι μηδέν. Αντίστοιχα, η ενέργεια που περιέχεται στο πηνίο είναι σε ορισμένα σημεία χρονικά ολοκληρωμένη λόγω του ρεύματος, και σε άλλα σημεία, ολοκληρωμένη λόγω της φόρτισης. Χρησιμοποιώντας την θεωρία ηλεκτρομαγνητισμού, μπόουμε να καθορίσουμε μια αποτελεσματική αυτεπαγωγή L και μια αποτελεσματική χωρητικότητα C για κάθε πηνίο όπως τα παρακάτω:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi|I_0|^2} \iint dr dr' \frac{J(r) \cdot J(r')}{|r - r'|} \quad (4.2)$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{4\pi\epsilon|q_0|^2} \iint dr dr' \frac{\rho(r) \cdot \rho(r')}{|r - r'|} \quad (4.3)$$

όπου το χωρητικό ρεύμα $J(r)$ και η πυκνότητα φόρτισης $\rho(r)$ προέρχονται αντίστοιχα από την πυκνότητα του ρεύματος και της φόρτισης κατά μήκος του μεμονωμένου πηνίου, σε συνδυασμό με την γεωμετρία του αντικειμένου. Το L και C μπορούν να υπολογιστούν από αριθμητική ολοκλήρωση. Όπως ορίζεται, L και C έχουν την ιδιότητα ότι η ενέργεια U που υπάρχει στο πηνίο δίνεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} L |I_0|^2 \\ &= \frac{1}{2C} |q_0|^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την ανωτέρα σχέση, βρίσκει κανείς ότι η συχνότητα συντονισμού είναι η γνωστή $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$. Έτσι μπορούμε να αντιμετωπίσουμε πλέον αυτό το πηνίο ως ένα πρότυπο ταλαντωτή στη θεωρία ισχυρής σύζευξης ορίζοντας

$$\alpha(t) = \sqrt{L/2I_0(t)}$$

4.4 Απώλειες

Σε αυτό το μοντέλο, τα πηνία διαχέουν ενέργεια μέσω δυο μηχανισμών: ωμικές απώλειες και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Στις συχνότητες της τάξεως των MHz, το ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα τυπικό μέταλλο ρέει μέσα σε λίγες δεκάδες μικρόμετρα της επιφάνειας του αγωγού, λόγω της επίδρασης του επιδερμικού φαινομένου. Για ένα ομοιόμορφο ρεύμα που διαρρέει έναν κυλινδρικό

αγωγό αγωγιμότητας σ , ακτίνας εγκάρσιας διατομής α , μήκους l , και επιδερμικό βάθος $\sqrt{2/\mu_0\sigma\omega}$, η ωμική αντίσταση θα είναι

$$R'_o = l/2\pi\sigma\alpha\delta = \sqrt{\mu_0\omega/2\sigma}(l/2\pi\alpha)$$

Το συγκεκριμένο μοντέλο προϋποθέτει μια ημιτονοειδή διανομή ρεύματος έτσι ώστε η μέση τιμή να είναι $|I_0|^2/2$. Αν ορίσουμε την ωμική αντίσταση R_o για το τρέχον ανομοιόμορφης διανομής ρεύματος πηνίο έτσι ώστε οι απώλειες αντίστασης να είναι ίσες με $R_o|I_0|^2/2$, οπότε:

$$R_o = \sqrt{\frac{\mu_0\omega}{2\sigma}} \frac{l}{4\pi\alpha} \quad (4.5)$$

Την ακτινοβολία που εκπέμπεται από το πηνίο θα μπορούσαμε να την διαχωρίσουμε σε δυο όρους. Ο πρώτος από αυτούς είναι ο όρος που προκύπτει από το μαγνητικό δίπολο λόγω της ροής του ρεύματος γύρω από τις σπείρες. Ο άλλος όρος είναι ένα ηλεκτρικό δίπολο που δημιουργείται από ταλαντευμένη φόρτιση κατά μήκος του άξονα του πηνίου. Τα πεδία που δημιουργούνται από τον κάθε όρο έχουν διαφορετικές πολώσεις και δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Επομένως, η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς θα είναι απλά το άθροισμα όλων των εκπομπών ισχύος από κάθε όρο. Προχωρώντας όπως στην περίπτωση ωμικής αντίστασης, θα τροποποιήσουμε τους πρότυπους τύπους για μαγνητικά και ηλεκτρικά δίπολα ακτινοβολίας και βρίσκουμε:

$$R_r = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left(\frac{\pi}{12} n^2 \left(\frac{\omega r}{c} \right)^4 + \frac{2}{3\pi^3} \left(\frac{\omega h}{c} \right)^2 \right) \quad (4.6)$$

Ο πρώτος όρος στην εξίσωση 4.6 είναι η ακτινοβολία λόγω του μαγνητικού διπόλου και ο δεύτερος είναι λόγω του ηλεκτρικού διπόλου. Μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε την σταθερά απόσβεσης της θεωρίας ισχυρής σύζευξης για το πηνίο ως $\Gamma = (R_o + R_r)/2L$ και ο σχετικός παράγοντας ποιότητας είναι $Q = \omega_0/2\Gamma$. Για σύγκριση των αποτελεσμάτων με υπολογισμούς πεπερασμένων στοιχείων, είναι βολικό να καθορίσουμε τις ωμικές απώλειες με $Q'_o : Q_o = \omega_0 L/R_o$ και τις απώλειες ακτινοβολίας με $Q_r = \omega_0 L/R_r$. Αυτές οι δυο σχετίζονται με το συνολικό Q από $Q^{-1} = Q_o^{-1} + Q_r^{-1}$.

4.5 Συντελεστής σύζευξης μεταξύ δυο πηνίων

Ο συντελεστής σύζευξης κ_{DS} μπορεί να βρεθεί εξετάζοντας την ενέργεια που μεταφέρεται από το πηνίο της πηγής στο πηνίο της συσκευής, υποθέτοντας λύση σταθερής κατάστασης. Τα ρεύματα και οι πυκνότητες φόρτισης μεταβάλλονται τότε στον χρόνο ως $e^{-i\omega_0 t}$.

$$\begin{aligned} P_{DS} &= \int dr E_S(r) \cdot J_D(r) \\ &= - \int dr (\dot{A}_S(r) + \nabla\phi_S(r)) \cdot J_D(r) \\ &= - \frac{1}{4\pi} \iint dr dr' \left(\mu_0 \frac{\dot{J}_S(r')}{|r' - r|} + \frac{\rho_S(r')}{\epsilon_0} \frac{r' - r}{|r' - r|^3} \right) \cdot J_D(r') \end{aligned} \quad (4.7)$$

όπου ϕ είναι το βαθμωτό δυναμικό, A το διανυσματικό δυναμικό, και ο δείκτης S υποδεικνύει ότι το ηλεκτρικό πεδίο είναι λόγω της πηγής μόνο. J_S και ρ_S είναι ανάλογα με το I_S , ενώ το J_D είναι ανάλογο με το I_D . Έτσι βρίσκουμε ότι:

$$P_{DS} = i\omega_0 M I_S I_D \quad (4.8)$$

όπου M , η αποτελεσματική αυτεπαγωγή είναι συνάρτηση του ω_0 και της γεωμετρίας του συστήματος. Στη συνέχεια συμπεραίνουμε από τα επιχειρήματα του πρότυπου θεωρίας ισχυρής σύζευξης και μια σύγκριση με την 3.2 ότι $\kappa = \omega_0 M / 2\sqrt{L_S L_D}$.

4.6 Εγκυρότητα της ημιστατικής προσέγγισης

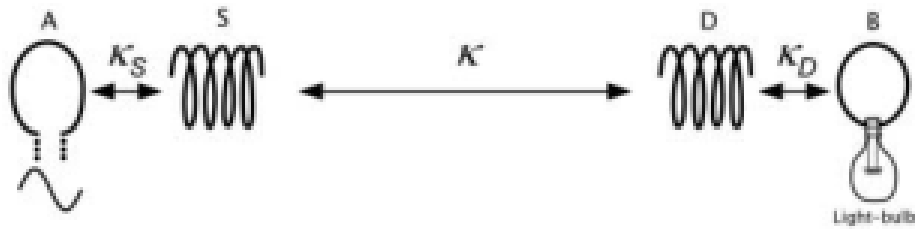
Μέχρι τώρα, έχουμε ασχοληθεί με την ημιστατική προσέγγιση και την αντιμετώπιση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο πηνίων για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η ημιστατική προσέγγιση είναι καλή όσο $\omega_0 D/c \ll 1$, όπου D είναι η απόσταση μεταξύ της πηγής και του αντικειμένου, η μεγαλύτερη διάσταση στο σύστημα μας. Στην εργασία του Andre Kurs αναφέρεται ότι στο εργαστήριο, δούλεψαν με συχνότητες της τάξεως των 10kHz και αποστάσεις μεγαλύτερες από τα 2.5m, για τα οποία $\omega_0 D/c \simeq 0.5$. Έτσι θα πρέπει να δικαιολογήσουμε την ημιστατική προσέγγιση πιο προσεκτικά. Οι πιο σημαντικές διορθώσεις στο ημιστατικό καθεστώς θα μπορούσαν να επηρεάσουν το κ , δεδομένου ότι είναι η μόνη παράμετρος της θεωρίας ισχυρής σύζευξης, η οποία εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των πηνίων. Εάν η ποσότητα αυτή επηρεάζεται σημαντικά, τότε η ανάλυση ισχυρής σύζευξης θα είναι πιο περίπλοκη λόγω της μη στιγμιαίας αλληλεπίδρασης. Για να ποσοτικοποιηθεί η αλλαγή στο κ , πρέπει να αντικατασταθούν τα στιγμιαία δυναμικά στην δεύτερη γραμμή της 4.7 από τα καθυστερημένα δυναμικά

$$\begin{aligned} \phi_S(r, t) &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int dr' \frac{\rho_S(r', t) e^{i\omega_0|r'-r|/c}}{|r' - r|} \\ A_S(r, t) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int dr' \frac{J_S(r', t) e^{i\omega_0|r'-r|/c}}{|r' - r|} \end{aligned} \quad (4.9)$$

όπου έχει χρησιμοποιηθεί το μέτρο του Lorenz. Αυτές οι διορθώσεις έχουν υπολογιστεί με αριθμητική ολοκλήρωση και διαπιστώθηκε ότι βρίσκονται εντός των ορίων σφάλματος λόγω της αβεβαιότητας στη μέτρηση των γεωμετρικών διαστάσεων. Επομένως η ημιστατική προσέγγιση ισχύει για τον σκοπό μας.

4.7 Πειραματική επιβεβαίωση

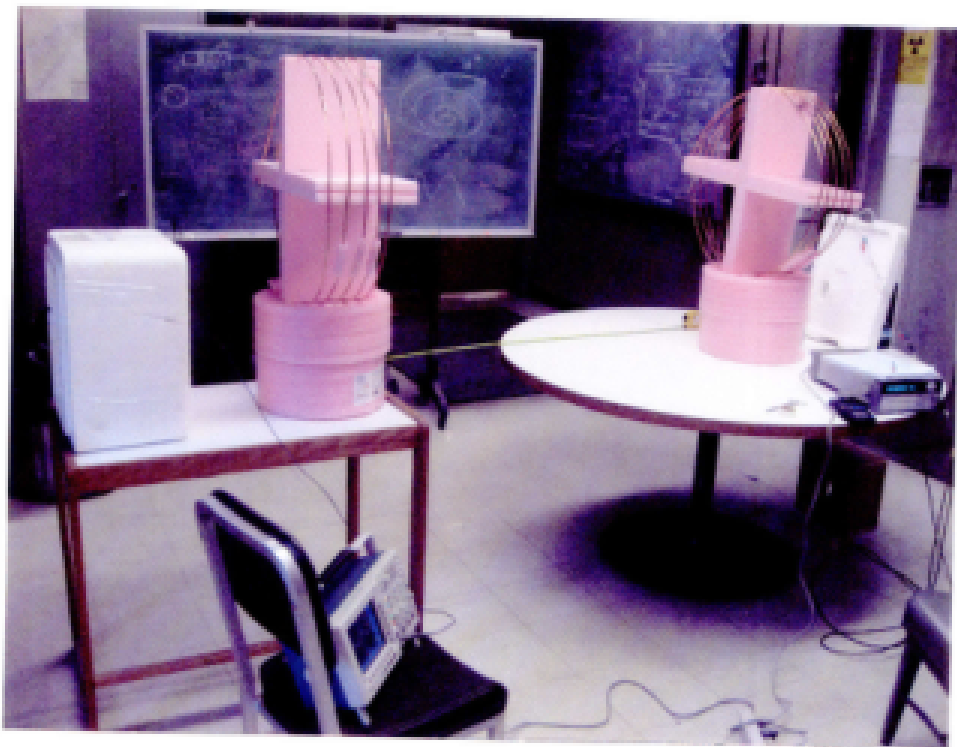
Η παραπάνω θεωρία επιβεβαιώθηκε πειραματικά στα εργαστήρια του MIT με την πειραματική διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 4.1. Τα υπόλοιπα σχήματα δείχνουν τη διάταξη σε λειτουργία καθώς και τις επιμέρους διατάξεις για πειραματική μέτρηση ορισμένων από τις παραμέτρους που υπολογίζονται σύμφωνα με το ημιστατικό μοντέλο. Λόγω οικονομικών δυσκολιών στο ίδρυμά μας, δεν κατέστη δυνατόν να επιβεβαιώσουμε πειραματικά και εμείς τα παρακάτω αποτελέσματα όπως αρχικά σχεδιάζαμε.



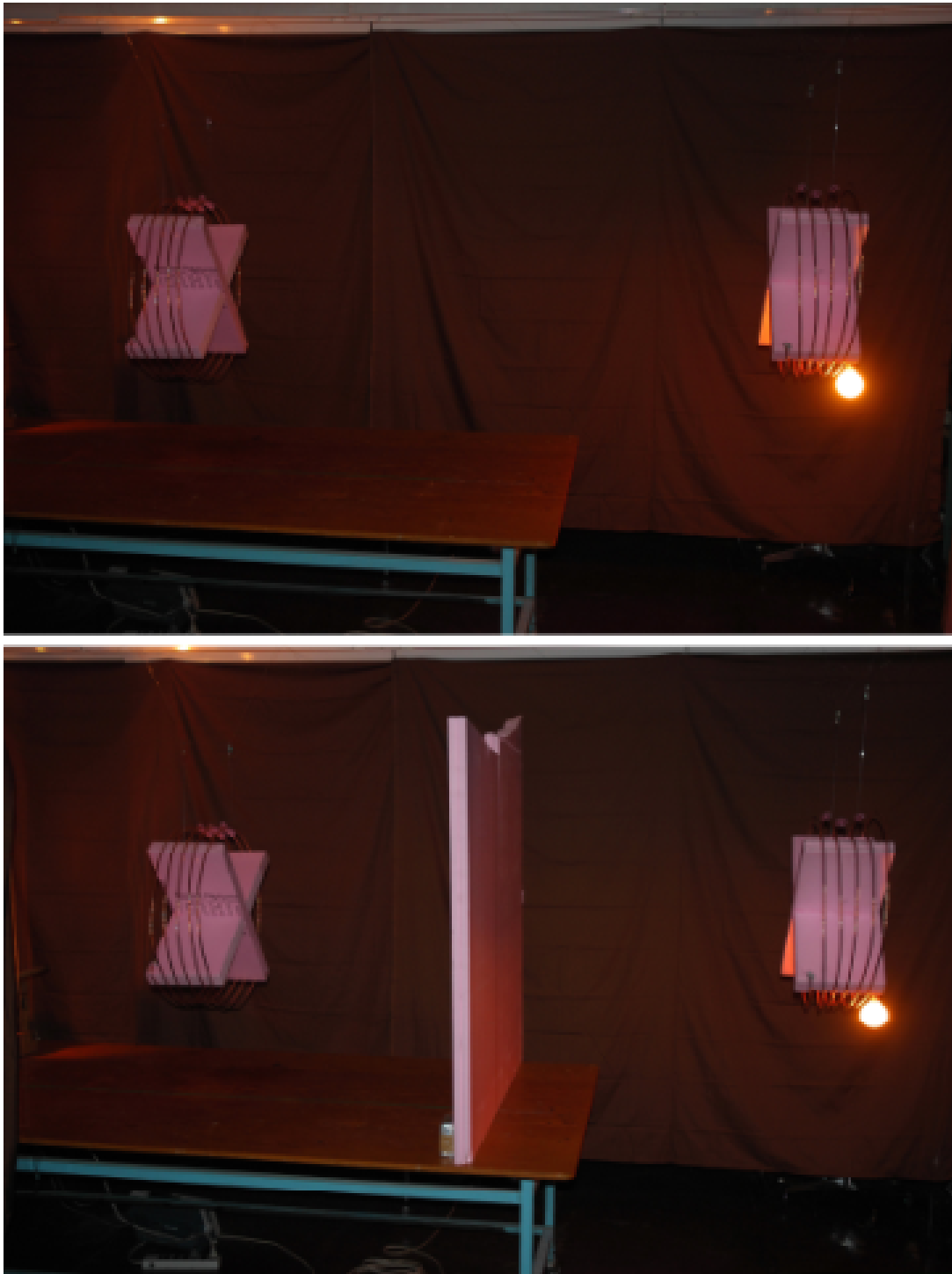
Σχήμα 4.1: Σχηματικό πειραματικής διάταξης. Το A είναι ένας χάλκινος δακτύλιος ακτίνας 25 cm που αποτελεί μέρος του κυκλώματος οδήγησης το οποίο δίνει στην έξοδο ημιτονικό σήμα συχνότητας 9.9 MHz. Τα S και D είναι αντίστοιχα τα πηνία πηγής και δέκτη. Ο B είναι συρμάτινος δακτύλιος συζευγμένος με το φορτίο (ηλεκτρικός λαμπτήρας). Οι δείκτες κ αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές σύζευξης μεταξύ των στοιχείων που φαίνονται με τα βέλη στο σχήμα. Τα πηνία S και D είναι τοποθετημένα στον ίδιο άξονα. Η ευθεία σύζευξη μεταξύ B και A καθώς και μεταξύ B και S είναι αμελητέες.



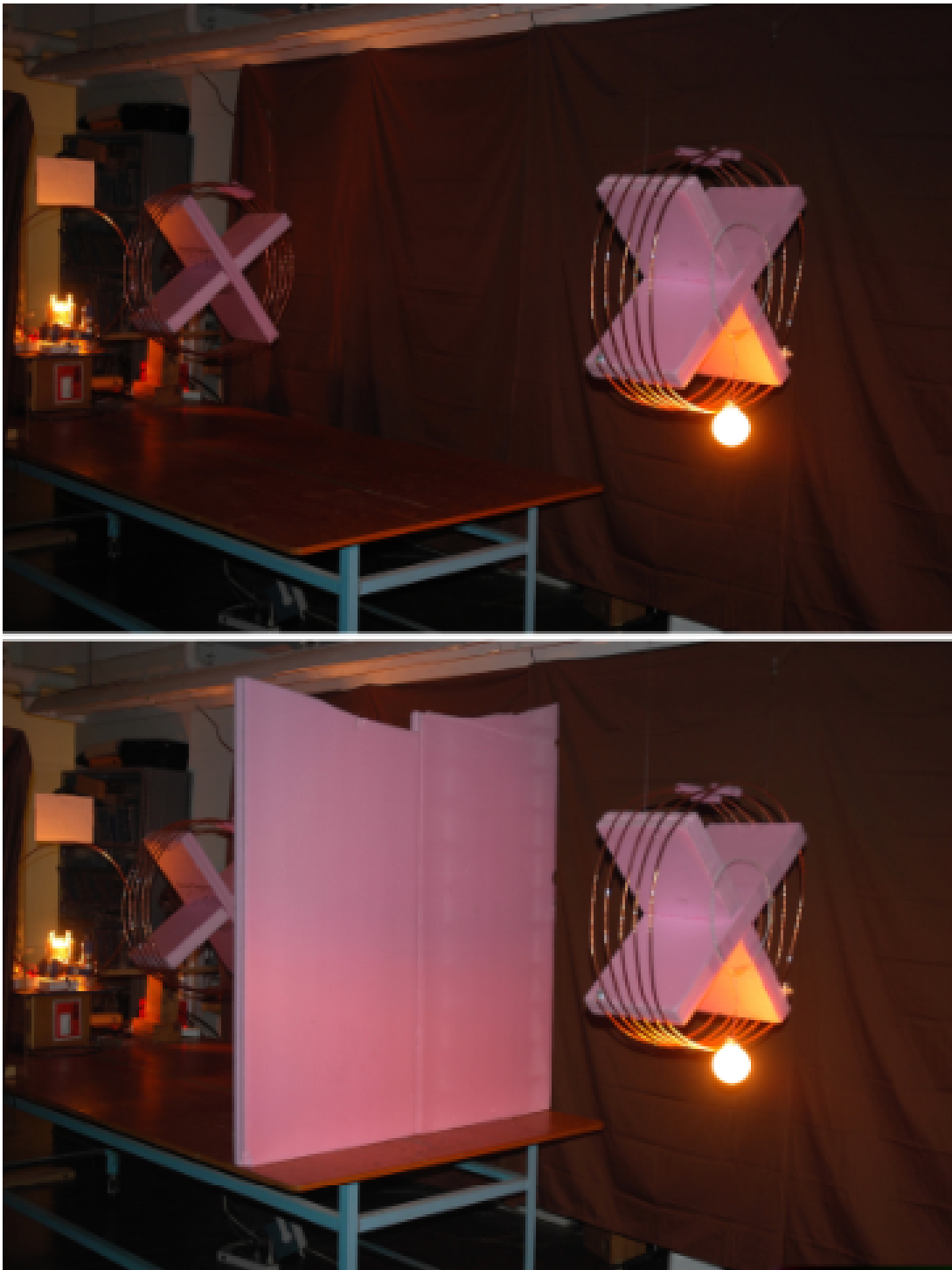
Σχήμα 4.2: Πειραματική διάταξη για μέτρηση συντελεστή ποιότητας Q . Το πηνίο σε συντονισμό είναι το χάλκινο σύρμα που φαίνεται τυλιγμένο γύρω από το κομμάτι styrofoam. Το πηνίο διέγερσης δεξιά είναι συνδεδεμένο με γεννήτρια συχνοτήτων ενώ το πηνίο δέκτης αριστερά είναι συνδεδεμένο στον παλμογράφο.



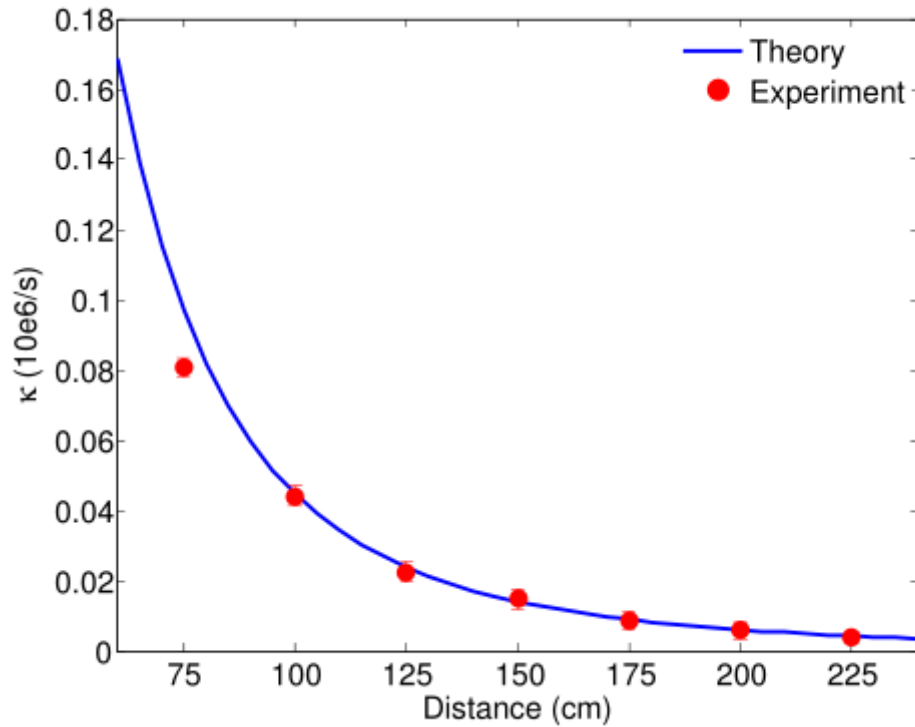
Σχήμα 4.3: Πειραματική διάταξη για μέτρηση συντελεστή σύζευξης k . Το πηνίο σε συντονισμό φαίνεται στα δεξιά και οδηγείται από άλλο πηνίο συνδεδεμένο με γεννήτρια συχνοτήτων. Ένα άλλο πηνίο δέκτης μετρά το πλάτος της δημιουργηθείσας διέγερσης στο δεύτερο πηνίο.



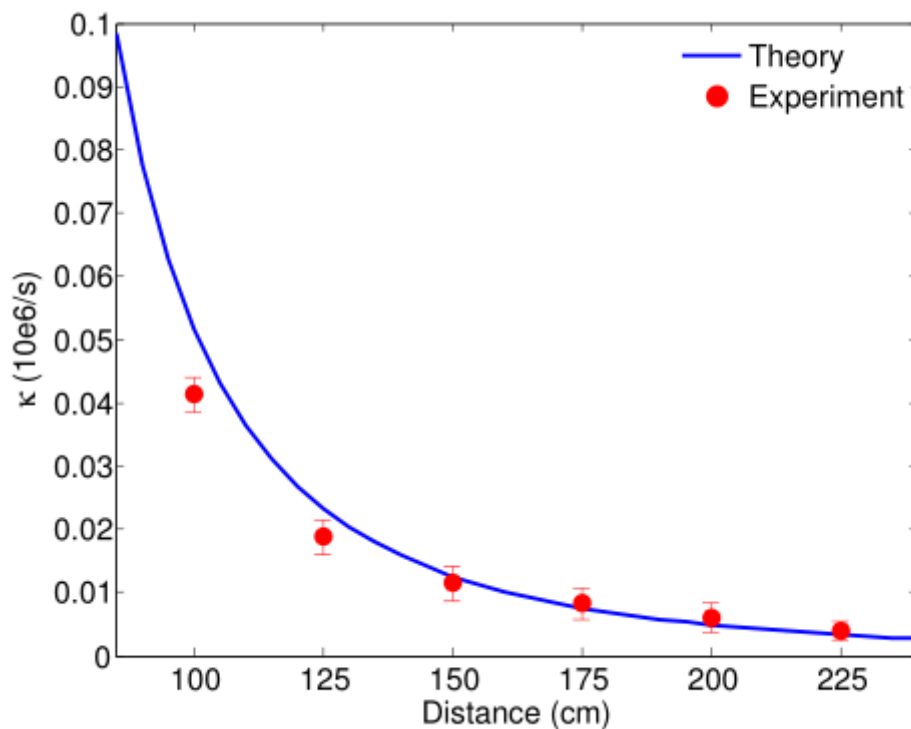
Σχήμα 4.4: Η πειραματική διάταξη σε λειτουργία. Λαμπτήρας 60 W σε απόσταση 2 m φωτοβολεί. Προσέξτε το εμπόδιο στη δεύτερη φωτογραφία.



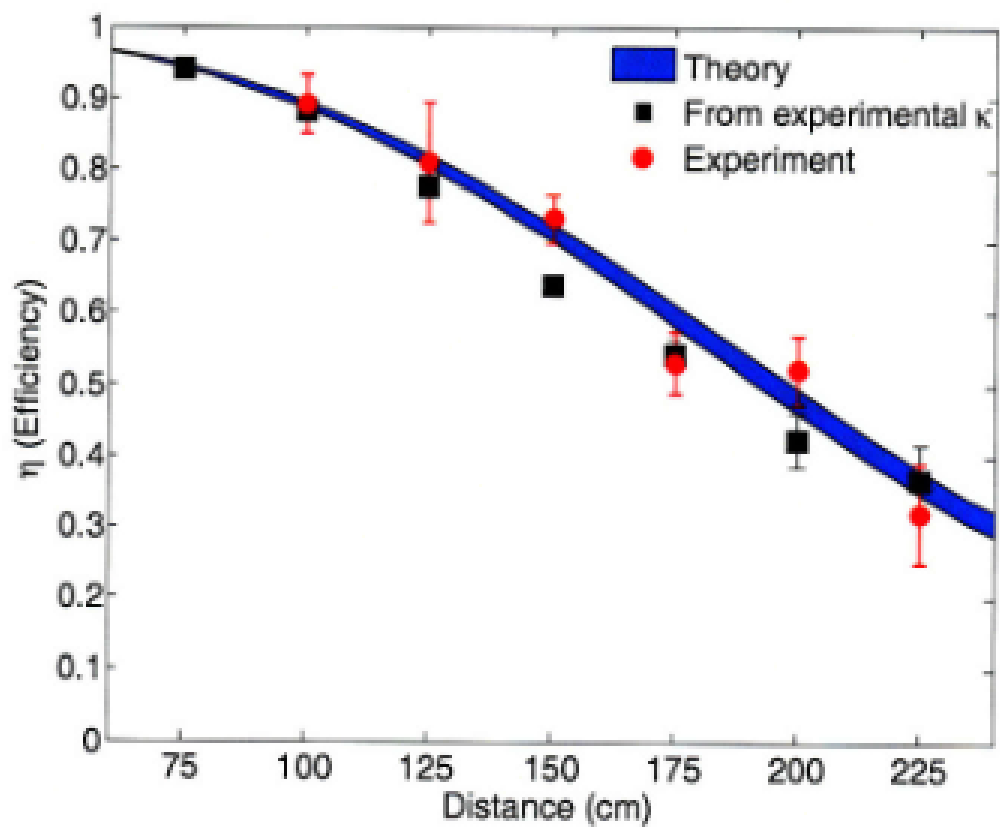
Σχήμα 4.5: Η πειραματική διάταξη σε λειτουργία από άλλη γωνία.



Σχήμα 4.6: Θεωρητικές και πειραματικές τιμές του κ σαν συνάρτηση απόστασης όταν ένα από τα πηνία είναι στραμμένο κατά 45° από τον κοινό άξονα των πηνίων.



Σχήμα 4.7: Θεωρητικές και πειραματικές τιμές του κ σαν συνάρτηση απόστασης όταν τα πηνία είναι προσανατολισμένα στο ίδιο επίπεδο.



Σχήμα 4.8: Θεωρητικές και πειραματικές τιμές της απόδοσης σαν συνάρτηση της απόστασης όπου γίνεται η ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Η σκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί στις θεωρητικές προβλέψεις για μέγιστη απόδοση. Οι πειραματικές κουκίδες αντιστοιχούν σε απευθείας μετρήσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σπείρας

Οι υπολογισμοί που έγιναν από την ομάδα του MIT βασίζονται στο COMSOL, λογισμικό πακέτο υψηλού κόστους ανάλυσης προβλημάτων με πεπερασμένα στοιχεία (multiphysics package, based on finite element methods). Δεν υπήρχε πρόσβαση σε τέτοιου είδους πακέτα οπότε κοιτάξαμε στην βιβλιογραφία εναλλακτικούς τρόπους υπολογισμού ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Επειδή υπάρχουν αρκετά κοινά σημεία με την μαγνητική τομογραφία, η παρακάτω ανάλυση βασίζεται στον νόμο των Biot-Savart.

5.1 Νόμος Biot-Savart

Στην αξονική ή μαγνητική τομογραφία είναι απαραίτητο να διεγείρουμε τους ιστούς με μαγνητικό πεδίο σε κατάλληλες συχνότητες RF προκειμένου να παράγουν εικόνες σε κλίμακα τιμών του γκρι (grayscale images) το οποίο εξαρτάται μόνο από τον τύπο των ιστών και όχι από τις διακυμάνσεις της εφαρμοσμένης RF ενέργειας. Η δημιουργία καταλλήλων μαγνητικών πεδίων βασίζεται σε κυκλικά πηνία τα οποία διεγείρονται κατάλληλα. Στον ελεύθερο χώρο το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από ένα μικρό κυκλικό βρόχο μπορεί να βρεθεί σε πρώτη προσέγγιση από τη γενική μορφή του νόμου Biot-Savart.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I d\vec{L} \times \vec{r}}{4\pi r^3} \quad (5.1)$$

Ο νόμος Biot-Savart που δίνεται από την εξίσωση 5.1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου (B) σε κάθε σημείο γύρω από το χώρο του βρόχου. Ο υπολογισμός είναι απλός για σημεία του άξονα που διέρχεται από το κέντρο του βρόχου και γίνεται σύνθετος με χρήση ελλειπτικών ολοκληρωμάτων όταν απομακρυνόμαστε από τον παραπάνω άξονα.

Για τον υπολογισμό αυτό υποθέτουμε έναν αγωγό που βρίσκεται στο πεδίο xz με ακτίνα R και ρεύμα I να ρέει αντίστροφα από την κίνηση των δεικτών του ωρολογίου μέσα στον βρόχο. Ένα σημείο στο χώρο με καρτεσιανές συντεταγμένες (x, y, z) αντιστοιχεί σε κυλινδρικές συντεταγμένες r, ϕ από τον κάθετο άξονα που διέρχεται από το κέντρο του βρόχου (z άξονας) και γωνία θ από το z άξονα. Οι εξαρτήσεις του μαγνητικού πεδίου που δημιουργούνται από ένα τέτοιο βρόχο μπορούν να εκφραστούν όσον αφορά κυλινδρικές συντεταγμένες και ελλειπτικά ολοκληρώματα του πρώτου ($E(k)$) και δεύτερου ($K(k)$) είδους και δίδονται από:

$$B_{rad} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y}{r [(R+r)^2 + y^2]^{1/2}} \left[-K(k) + \frac{R^2 + r^2 + y^2}{(R-r)^2 + y^2} E(k) \right]$$

$$B_{\theta} = 0 \quad (5.2)$$

$$B_{ax} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{r [(R+r)^2 + y^2]^{1/2}} \left[K(k) + \frac{R^2 + r^2 + y^2}{(R-r)^2 + y^2} E(k) \right]$$

Όπου B_{rad} είναι παράλληλο προς τον άξονα x και B_{ax} είναι παράλληλο προς τον άξονα y, και $E(k)$ και $K(k)$ ορίζονται ως:

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} (1 - k^2 \sin^2 \phi)^{1/2} d\phi \quad (5.3)$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} (1 + k^2 \sin^2 \phi)^{-1/2} d\phi \quad (5.4)$$

με τη μεταβλητή k να ορίζεται από:

$$k^2 = \frac{4Rr}{(R+r)^2 + y^2} \quad (5.5)$$

Τα ελλειπτικά ολοκληρώματα μπορούν να επεκταθούν με την μορφή σειράς επιτρέποντας την εξίσωση 5.2 να αξιολογείται σε κάθε σημείο σε καθορισμένο χώρο όγκου ενδιαφέροντος.

$$E(k) = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{\prod_{t=1}^i (2t-1)^2}{\prod_{t=1}^i (2t)^2} \frac{k^{2i}}{2i-1} \right] \right\} \quad (5.6)$$

$$K(k) = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{\prod_{t=1}^i (2t-1)^2}{\prod_{t=1}^i (2t)^2} k^{2i} \right] \right\} \quad (5.7)$$

Η λύση με χρήση πρώτης και δευτέρας τάξης ελλειπτικών ολοκληρωμάτων μπορεί να αντιμετωπιστεί αρκετά εύκολα με αριθμητικό υπολογισμό με την βοήθεια της μεθόδου King. Ο κώδικας Matlab που έχει γραφτεί για αυτόν τον υπολογισμό από τον D. Bennet είναι:

```
function [F,E] = kings_method(k,N)
% this m-file uses King's direct numerical method to calculate elliptic
% integrals of the first and second kind, F and K respectively.
%
% Creation date: 7/22/09
% Author: D. Bennett
%
% INPUT: k = the elliptic integral constant in
% E(k) = pi/2[1-sum(n=1 -> inf)(1,3,...(2n-1)/2,4,...2n)^2 * k^2n/(2n-1)]
% and
% F(k) = pi/2[1+sum(n=1 -> inf)(1,3,...(2n-1)/2,4,...2n)^2 * k^2n]
%
% N = # of iterations through the following algorithm:
% k' = sqrt[1-k^2]
```

```

% A0 = 1
% B0 = k'
% C0 = k
% An+1 = [An+Bn]/2, Bn+1 = sqrt[An*Bn], Cn+1 = [An-Bn]/2
%
% OUTPUT:
% When Cn+1 becomes negligibly small in the algorithm described above, F(k)
% and E(k) are given as:
% F(k) = pi/2/An (first order)
% E(k) = F(K)[1-(C0^2 + 2C1^2 + 4C2^2 + ... + 2^nCn^2)/2] (second order)
format long;
% ***** King's Direct Numerical Method to calculate
% elliptic integrals. From the appendix of MRM 4:591 (1987)
A = zeros(1,N+1);
B = A;
C = A;
N_final = 1;
k_prime = sqrt(1-k^2);
% initialize A, B, and C
A(1) = 1; % "Ao = 1"
B(1) = k_prime;
C(1) = k;
for is = 2:N
    A(is) = (A(is-1) + B(is-1))/2; % An+1 = [An+Bn]/2
    B(is) = sqrt(A(is-1)*B(is-1)); % Bn+1 = [An*Bn]^1/2
    C(is) = (A(is-1) - B(is-1))/2; % Cn+1 = [An-Bn]/2
%if (C(is) < 0.000001)
% N_final = is-1 % use previous N when C ~ 0
% break
% end
end
F = pi/2/A(N-1);
% use only N = 4 for now
E = F *(1 - ((C(1)^2 + 2*C(2)^2 + 4*C(3)^2)/2));

% loop_field.m
% this m-file calculates the field at an arbitrary point from the center of
% a single loop of current carrying wire. The algorithm is based on
% equations given on page 439 of Mispelter et al. "NMR Probeheads For Biophysical
% and Biomedical Experiments"
%
% Created: 7/22/09
% Author: D. Bennett
% Input
% Output
% the equations for Brad and Bax were taken from page 439 of the book "NMR
% Probeheads for Biophysical and Biomedical Experiments" c 2006
% The only loop constant is the radius, 'a' in meters
% center of loop assumed to be at x,y,z = 0,0,0

a = 5e-2; % 10 cm
mu_not = 4*pi*10e-7; % permeability of free space = mu not
I = 1; % current in amps

```

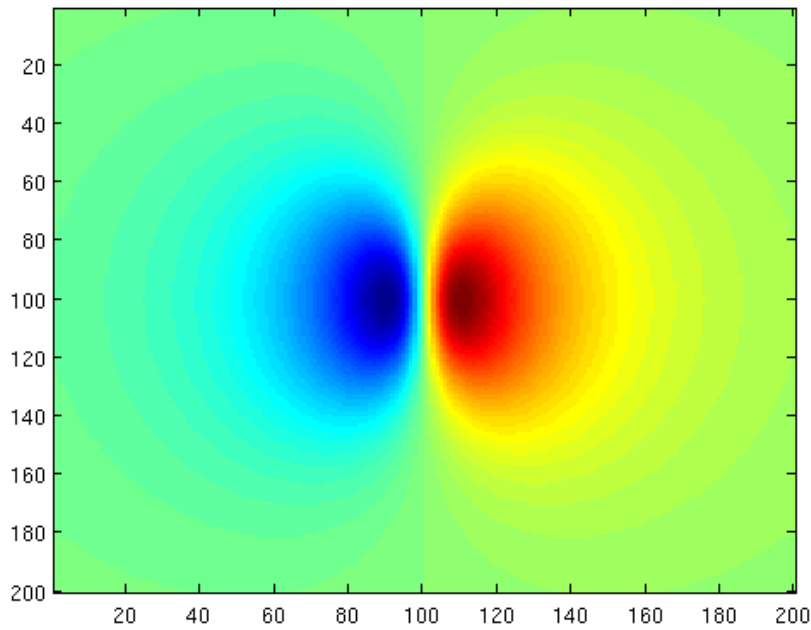
```

M = (mu_not*I)/(2*pi);
% now to see the field amplitude as a function of spatial position it's best
% to setup x, y, and z as vectors
x = linspace(-10e-2,10e-2,200); % x range is -10 - 10 cm...to match the Xfdtd simulation
y = x; % y range is -10 - 10 cm
z = x; % z range is -10 - 10 cm
% units of x,y, and z are mm
size_x = size(x,2)
size_y = size(y,2);
size_z = size(z,2);
B_rad = zeros(size_x,size_y,size_z); % radial component of the magnetic field
B_ax = B_rad; % axial component of the magnetic field
B_total = B_rad;
kings_count = 4;
% In all (x,y,z) calculate the radial and axial components of the magnetic field
% produced by a single loop.
for ix = 1:size_x
    for iy = 1:size_y
        for iz = 1:size_z
            N = x(ix)^2 + z(iz)^2;
            O = (a + sqrt(N))^2;
            P = (a - sqrt(N))^2;
            Q = a^2 + N + y(iy)^2;
            R = a^2 - N - y(iy)^2;
            k = sqrt((4*a*sqrt(N))/(O + y(iy)^2));
            [K_k,E_k] = kings_method(k,kings_count);
            B_rad(ix,iy,iz) =
                M * (y(iy)/(N * sqrt(O + y(iy)^2))) * (-1*K_k + (Q/(P + y(iy)^2))*E_k);
            B_ax(ix,iy,iz) = M * (1/sqrt(O + y(iy)^2)) * (K_k + (R/(P + y(iy)^2))*E_k);
        end
    end
end
B_total = sqrt(B_rad.^2 + B_ax.^2);
%figure(1), imagesc(B_rad(:,:,1))
%figure(2), imagesc(B_ax(:,:,1))

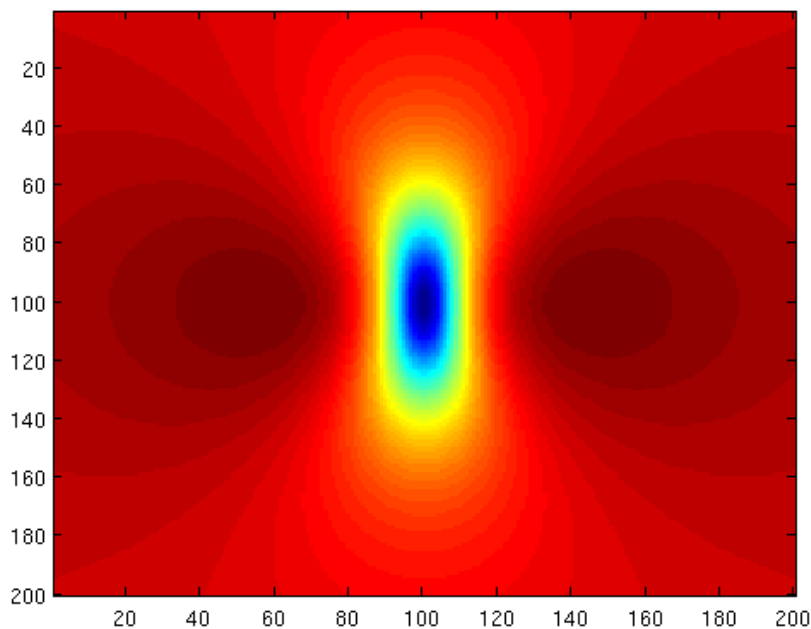
```

Ο παραπάνω κώδικας δοκιμάστηκε και με μικρές τροποποιήσεις έτρεξε σε δικά μας συστήματα χρησιμοποιώντας το λογισμικό octave.

Ένα μειονέκτημα στη χρήση του νόμου Biot-Savart για τον υπολογισμό των τοπικών μαγνητικών πεδίων στους βρόχους ενός αγωγού (ή τοπικά σε πηνία ή κεραίες με άλλες γεωμετρίες) είναι η υπόθεση ότι το μήκος το ηλεκτρικού αγωγού της κεραίας είναι μικρότερο από το ένα δέκατο του μήκους κύματος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι υψηλές συχνότητες έχουν και μικρότερο μήκος κύματος που σημαίνει ότι η παραπάνω υπόθεση συχνά παραβιάζεται. Η μέθοδος που ενδείκνυται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αυτή των πεπερασμένων διαφορών (finite difference) η οποία μπορεί να συμπεριλάβει μη συμμετρικές γεωμετρίες καθώς και να υπολογίσει με ακρίβεια τα πεδία σε όλες σχεδόν τις πρακτικές περιπτώσεις.

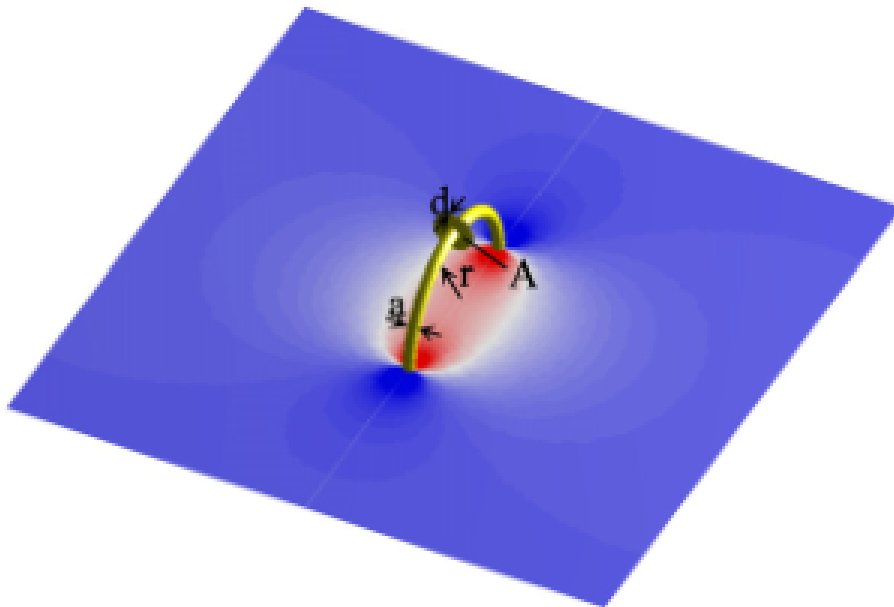


Σχήμα 5.1: Ένταση μαγνητικού πεδίου B_{rad} (ακτινικής συντεταγμένης) σε επίπεδο κάθετο στην επιφάνεια του βρόχου και σε απόσταση 4 cm από το κέντρο του. Υπολογίστηκε από τον παραπάνω κώδικα με την εντολή `imagesc(B_rad(:,40))`.



Σχήμα 5.2: Ένταση μαγνητικού πεδίου B_{ax} (αξονικής συντεταγμένης) σε επίπεδο κάθετο στην επιφάνεια του βρόχου και σε απόσταση 4 cm από το κέντρο του. Υπολογίστηκε από τον παραπάνω κώδικα με την εντολή `imagesc(B_ax(:,40))`.

A. Karalis et al. / Annals of Physics 323 (2008) 34–48

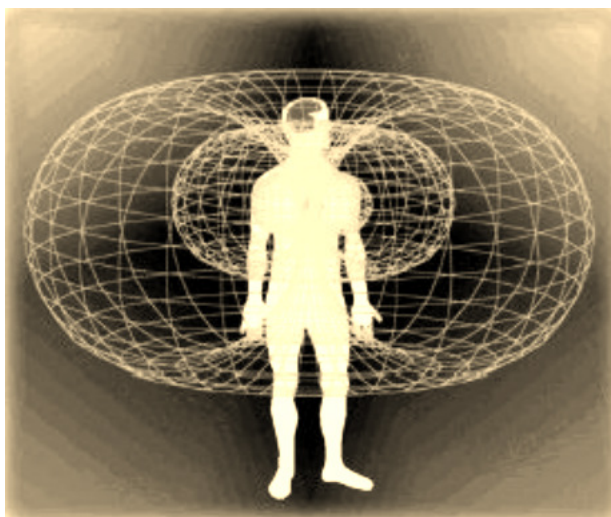


Σχήμα 5.3: Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου βρόχου με πεπερασμένες διαφορές από τη δημοσίευση [5]. Φαίνεται η ποιοτική ομοιότητα με τις προηγούμενες γραφικές παραστάσεις με τον υπολογισμό Biot-Savart.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα και προοπτικές για το μέλλον

6.1 Συμπεράσματα



Σχήμα 6.1: Το βιομαγνητικό πεδίο στον άνθρωπο

Σύμφωνα με τα προηγούμενα κεφάλαια βλέπουμε να αποδεικνύεται ότι νέος αυτός τρόπος μεταφοράς ενέργειας ασύρματα μέσω μαγνητικού συντονισμού δεν επηρεάζει βιολογικούς οργανισμούς όπως επίσης δεν επηρεάζει το περιβάλλον, γιατί χρησιμοποιείται για την μεταφορά το μαγνητικό πεδίο του χώρου και κατά την διαδικασία αυτή, το μαγνητικό πεδίο σε εκείνη την περιοχή που εξελίσσεται η ασύρματη μεταφορά ενέργειας, είναι μικρότερο από το μαγνητικό πεδίο της Γής. Επιπρόσθετα, η επιστήμη μέχρι τις μέρες μας έχει αποδείξει ότι από το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο, το ηλεκτρικό είναι εκείνο που επιδρά έντονα με βιολογικούς οργανισμούς, έτσι λοιπόν ο άνθρωπος, όπως όλοι οι ζωικοί και φυτικοί οργανισμοί στη Γή, ζει και εξελίσσεται υπό αυτό το μαγνητικό πεδίο.

6.2 Προοπτικές για το μέλλον

Κατά την διάρκεια της έκθεσης TED που πραγματοποιήθηκε το 2009 παρουσιάστηκε από τον Eric Giler (διευθύνων σύμβουλος, μέλος του διοικητικού συμβουλίου της WiTricity) μια ανεπτυγμένη μορφή της τεχνολογίας ασύρματης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με κύριο σκοπό την κατάρ-



Σχήμα 6.2: Ο Eric Giler παρουσιάζει στην TED το 2009 την τεχνολογία WiTricity

γηση καλωδίων και μπαταριών. Ο Eric Giler κατά την επίδειξη της τεχνολογίας κατάφερε να τροφοδοτήσει και να λειτουργήσει μια οθόνη LCD και διάφορα κινητά τηλέφωνα της αγοράς αφήνοντας φυσικά το κοινό έκπληκτο. Ίσως κάπως έτσι οι μεγάλες ιδέες να γίνονται πραγματικότητα και απ'ότι φαίνεται μάλλον πρόκειται για μια αρχή με πολύ δυναμικό μέλλον. Το εύρος που θα μπορούσε να έχει εφαρμογή αυτή η τεχνολογία είναι αρκετά μεγάλο, γιατί αν αναλογιστούμε διαπιστώνουμε ότι στην άμεση καθημερινότητα θα μας ανεξαρτητοποιούσε από πολλά προβλήματα που αντιμετωπίζουμε από το κλασικό ενσύρματο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ακόμα και από την χρήση μπαταριών η τεχνολογία των οποίων δεν συμβαδίζει την τεχνολογία των εκάστοτε συσκευών. Αν και η τεχνολογία αυτή βρίσκεται σε αρχικό στάδιο μπορούμε άμεσα να εκμεταλλευτούμε τα οφέλη της σε τομείς κομβικούς για τον άνθρωπο και την εξέλιξη του, όπως η ιατρική, η βιομηχανία, η υποδομή, η καθημερινότητα.

Ας δούμε λοιπόν μερικές από τις εφαρμογές στους τομείς που προαναφέραμε:

<p>Ιατρική</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Μικρορομποτ, Νανορομποτ ● Ενδοσκοπικά εργαλεία ● Βηματοδότες (λειτουργεία- ασύρματη φόρτηση) ● Οδοντιατρικά μηχανήματα-εργαλεία ● Οφθαλμολογικά -//- ● Χειρουργικά -//- ● Μηχανισμοί για άτομα με ειδικές ανάγκες ● Ηλεκτρομηχανικά τεχνητά άκρα ● ...
----------------	---

<p>Βιομηχανία</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Γραμμές παραγωγής ● Μηχανήματα τυποποιής ● Τηλεκατεύθυνση νεας μορφής ● υποβρύχιες λειτουργίες διαφόρων διατάξεων ● Αισθητήρες ασφαλείας και άλλοι ● Ασύρματες κάμερες και άλλα συστήματα προστασίας ιδιωτικής ή δημόσιας περιουσίας ● Ρομποτική Ασύρματη διαχείριση εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων ● Εποπτικά μέσα διασφάλισης υγείας εργαζομένων σε βιομηχανίες-βιοτεχνίες ● ...
-------------------	--

Υποδομή	<ul style="list-style-type: none"> ● Οδικό δίκτυο με τεχνολογία ασύρματης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ● Ρομποτικά συστήματα καθαρισμού πόλεων ● Διαχείριση ηλιακής ενέργειας ● Διαχείριση πετρελαϊκών πηγών ● Διαχείριση πηγών φυσικού αερίου ● Υποδομή "έξυπνων" κτηρίων ● ...
---------	---

Καθημερινότητα	<ul style="list-style-type: none"> ● Οικιακές συσκευές υγιεινής ● Φωτισμός ● Οικιακές συσκευές κουζίνας π.χ. τοστιέρα, μίξερ,.. ● Οικιακές συσκευές ψυχαγωγίας ● Ατομικές συσκευές π.χ. φορητοί Η/Υ, κινητά τηλέφωνα... ● Ασύρματα ηλεκτρικά μέσα μεταφοράς μαζικά-ατομικά ● Οικιακές συσκευές καθαρισμού ● Οικιακές συσκευές πυροπροστασίας ● ...
----------------	---

Βιβλιογραφία

- [1] Giler E. http://www.ted.com/talks/eric_giler_demos_wireless_electricity.html. (last accessed 15-05-2011). The link <http://www.witricity.com> is a good starting point to learn about this technology.
- [2] Hamam R.E., Karalis A., Joannopoulos J.D., and Soljačić M. Efficient weakly-radiative wireless energy transfer: An EIT-like approach. *Annals of Physics*, 324:1783–1795, 2009.
- [3] Haus H.A. and Huang W. Coupled-Mode Theory. *IEEE Proc.*, 79(10):1505–1518, October 1991.
- [4] Joannopoulos J.D., Karalis A., and Soljačić M. Wireless Non-Radiative Energy Transfer. US Patent 2007/0222542 A1, September 2007.
- [5] Karalis A., Joannopoulos J.D., and Soljačić M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer. *Annals of Physics*, 323:34–48, 2008.
- [6] Kurs A. Power Transfer Through Strongly Coupled Resonances. Master’s thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [7] Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P., and Soljačić M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science*, 317:83–86, July 2007.
- [8] Kurs A., Moffatt R., and Soljačić M. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices. *Applied Physics Letters*, 96, 2010.
- [9] Moffatt R.A. Wireless Transfer of Electric Power. BSc thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [10] Schneider D. Electrons unplugged. *IEEE Spectrum*, 47(5):30–35, 2010.
- [11] Stark J.C. III. Wireless Power Transmission Utilizing a Phased Array of Tesla Coils. Master’s thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [12] Trikolikar A.A., Nalbalwar S.L., and Bhagat M.P. Review of Wireless Power Transmission by Using Strongly Coupled Magnetic Resonance. *Int. Journal of Advanced Engineering & Applications*, page 177, January 2010.
- [13] Wei X.C. and Li E.P. Simulation and Experimental Comparison of Different Coupling Mechanisms for the Wireless Electricity Transfer. *Journal of Electromagnetic Waves & Applications*, 23:925–934, 2009.