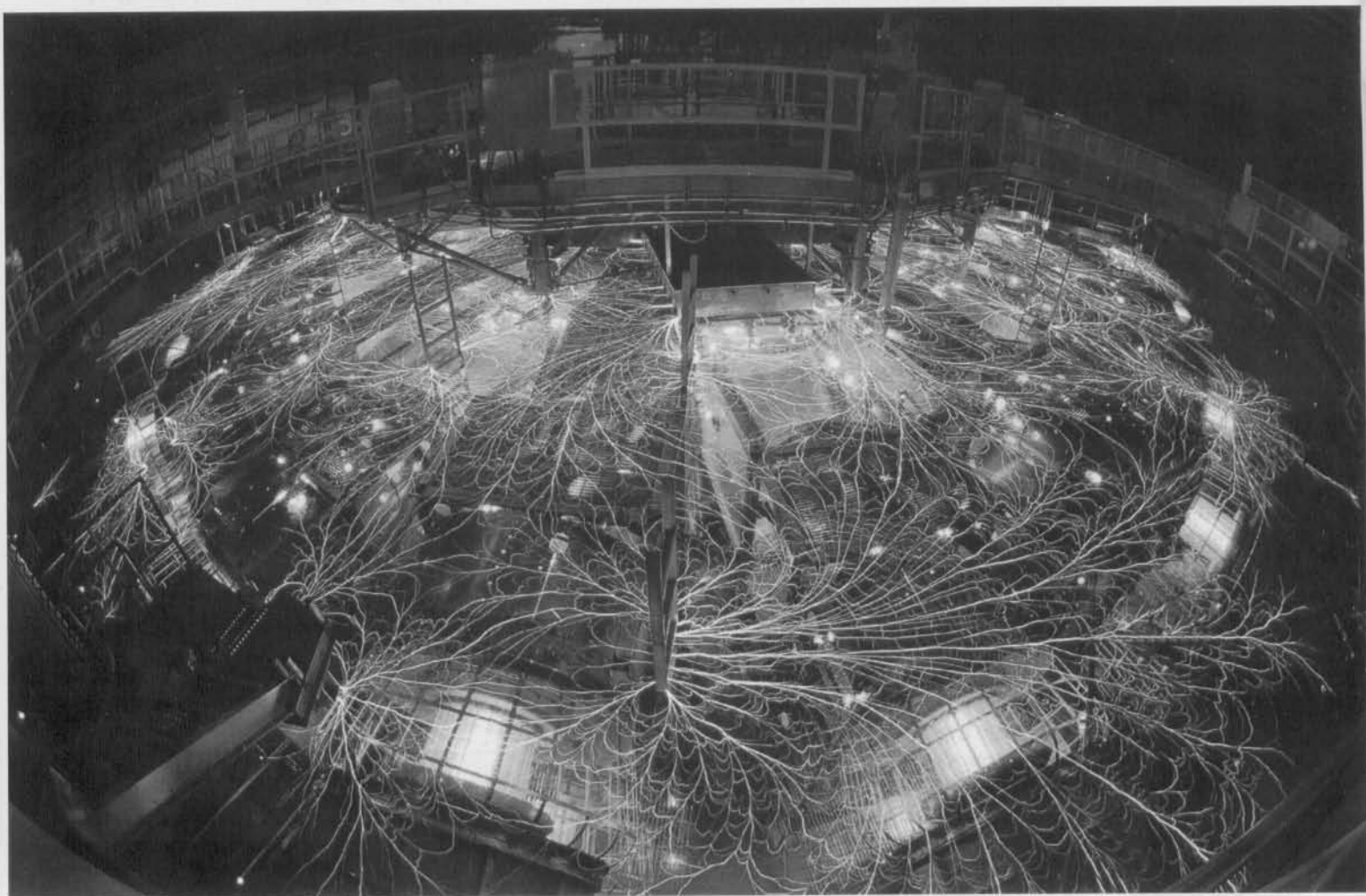


# Ασύρματη μεταφορά ισχύος

Από τον Martin Ossmann



Η ασύρματη μεταφορά ισχύος χρησιμοποιείται ήδη σε πολλές εφαρμογές όπως είναι οι ηλεκτρικές οδοντόβουρτσες, οι ετικέτες RFID και το "γέμισμα" των ηλεκτρικών οχημάτων. Υπάρχουν επίσης σχέδια για την τροφοδοσία μέσω ασύρματης μεταφοράς ισχύος, κινητών τηλεφώνων και φορητών υπολογιστών. Στο άρθρο που ακολουθεί περιγράφουμε την αρχή λειτουργίας της ασύρματης μεταφοράς ισχύος καθώς και κάποια σημεία τα οποία πιστεύουμε ότι χρήζουν προσοχής. Εκτός από την περιγραφή των θεωρητικών αρχών, παρουσιάζουμε και κάποια πραγματικά μεγέθη από υπάρχουσες υλοποιήσεις.

Η "ασύρματη" παροχή πληροφορίας προχωρά με ταχύτατους ρυθμούς: ραδιόφωνα, τηλεοράσεις, κινητά τηλέφωνα, ασύρματα δίκτυα (WLAN) και Zigbee, μας βεβαιώνουν ότι η μεταφορά και ανταλλαγή δεδομένων μέσω ραδιοκυμάτων είναι πλέον γεγονός και τεχνικά αξιόπιστη. Κοιτώντας πολλές φορές τον χαμό από καλώδια τροφοδοτικών επάνω στο γραφείο μας, αναρωτιόμαστε πότε θα έλθει και η ώρα της ασύρματης μεταφοράς ισχύος. Στο άρθρο που ακολουθεί περιγράφουμε το γιατί αυτή η ώρα αργεί ακόμη.

## Μήκη κύματος

Όταν ο κόσμος μιλά για ασύρματη μεταφορά ισχύος, αναφέρεται συχνά σε κεραιές που χρησιμοποιούνται για την εκπομπή αυτής της "ασύρματης ισχύος".

Όπως είναι γνωστό η λειτουργία μιας κεραιάς μπορεί να είναι αποδοτική, μόνον όταν οι γεωμετρικές διαστάσεις της κεραιάς είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος του σήματος που εκπέμπεται. Είναι επίσης γνωστό ότι το μέγεθος

Table 1	
Frequency	Wavelength
10 kHz	30 km
100 kHz	3 km
1 MHz	300 m
10 MHz	30 m
100 MHz	3 m
1 GHz	30 cm

εκπομπής σε επίπεδα ισχύος είναι αμελητέο, όταν η κατασκευαστική δομή της κεραιάς είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος. Για τον λόγο αυτό καλό είναι να εξετάσουμε την σχέση μεταξύ των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στην πράξη, το εύρος των οποίων είναι μεταξύ μερικών KHz και αρκετών GHz, με τα αντίστοιχα μήκη κύματος που εικονίζονται στον Πίνακα 1. Εάν θεωρήσουμε ότι το σύστημα της κεραιάς θα πρέπει να είναι μικρότερο από 1 μέτρο, τότε βλέπουμε ότι ακόμη και στην συχνότητα των 13,56 MHz (που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ISM και RFID) είναι μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος. Τα συστήματα της κατηγορίας αυτής είναι αυτά ακριβώς με τα οποία θα ασχοληθούμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

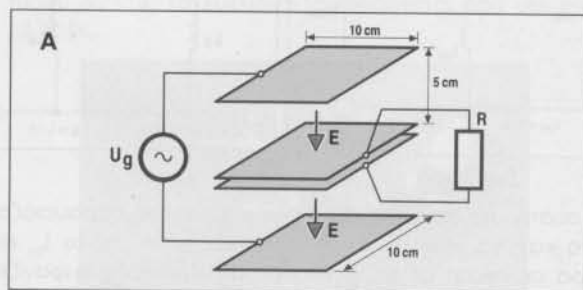
Στα συστήματα αυτά, τα πάντα βρίσκονται σε μία περιοχή η οποία στην θεωρία των κεραιών καλείται "περιοχή εγγύς πεδίου". Η περιοχή του εγγύς πεδίου χαρακτηρίζεται από μία μετατόπιση φάσης σχεδόν 90 μοιρών μεταξύ του ηλεκτρικού (E) και μαγνητικού (H) πεδίου. Α

υτό στην ουσία σημαίνει ότι εκπέμπεται άεργη ισχύς, οπότε το ποσοστό της πραγματικής ισχύος είναι σχετικά μικρό. Τα συστήματα τα οποία είναι μικρά σε σχέση με το μήκος κύματος μπορούν σε γενικές γραμμές να περιγραφούν χωρίς να χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η διάδοση των κυμάτων. Κάτι τέτοιο σημαίνει ουσιαστικά ότι δεν υπάρχει ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Είναι κατά

## [Ένθετο 1]

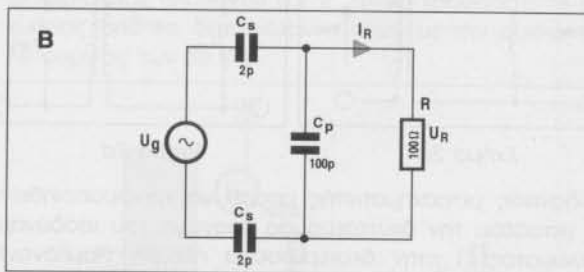
### Χωρητική μεταφορά ισχύος

Ένα υποθετικό σύστημα χωρητικής εκπομπής ισχύος στα 13,5 MHz σαν κύβος με ακμή 10 cm, θα μπορούσε να έχει την μορφή του παρακάτω σχήματος, όπου το επάνω και το κάτω μέρος αποτελούνται από δύο μεταλλικές πλάκες. Οι πλάκες αυτές σχηματίζουν τον "πυκνωτή εκπομπής" και συνδέονται με την πηγή τροφοδοσίας. Στο μέσον βρίσκονται δύο πυκνωτικές πλάκες με απόσταση μεταξύ τους 1 mm και 5 cm απόσταση από τις ακραίες πλάκες, οι οποίες εξυπηρετούν στην εξαγωγή ισχύος από το σύστημα. Η ισχύς που αντλείται από το σύστημα οδηγείται σε μία αντίσταση R με τιμή 100 Ω. Ο σκοπός είναι να εκπέμψουμε από την αντίσταση αυτή μία ισχύ P1 της τάξης του 1 W.



Η δομή ενός χωρητικού συστήματος

Το πόσο δύσκολο είναι το εγχείρημα αυτό εύκολα το διαπιστώνουμε εάν εξετάσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα που εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα και υπολογίσουμε κατά προσέγγιση τις τιμές των εξαρτημάτων. Για τον σκοπό αυτό θεωρούμε ότι οι πυκνωτές είναι ιδανικοί πυκνωτές επίπεδων πλακών όπου μπορούμε να αγνοήσουμε τα πεδία σκέδασης. Καταλήγουμε λοιπόν στο ισοδύναμο κύκλωμα που περιγράφεται στο επόμενο σχήμα:



Ισοδύναμο κύκλωμα ενός χωρητικού συστήματος

Η τάση στα άκρα της αντίστασης είναι

$$U_R = \rho I_a (P \times R) = 10 \text{ V.}$$

Το ρεύμα μέσα από την αντίσταση είναι

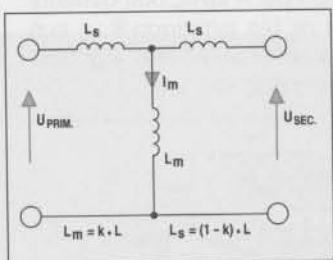
$$I_R = (U_R \times R) = 0,1 \text{ A.}$$

Η εμπέδηση του πυκνωτή παράλληλων πλακών είναι περίπου 100 Ω στα 13,56 MHz, το οποίο σημαίνει ότι το ρεύμα μέσα από την (πολύ μικρή) αντίσταση σειράς είναι περίπου  $I_S = 0,14 \text{ A}$ . Το πρόβλημα είναι πλέον σαφές: η πηγή τροφοδοσίας θα πρέπει να παράγει μία τάση αρκετά μεγάλη ώστε να προκαλεί την διέλευση μέσα από τους δύο πυκνωτές σειράς στα 2 pF, ενός ρεύματος 140 mA. Στα 13,56 MHz, προκύπτει ότι χρειαζόμαστε μία τάση 1,4 kV - για να εκπέμψουμε μόλις 1 watt ισχύος.

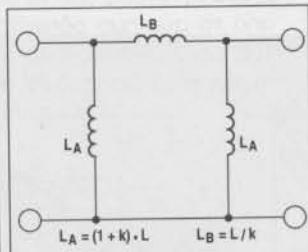
## [Ένθετο 2]

### Ισοδύναμο κυκλώματα μετασχηματιστή

Ένας μετασχηματιστής με ίδιο πρωτεύον και δευτερεύον πηνίο (και με επαγωγή ανοικτού κυκλώματος  $L$ ) είναι δυνατόν να περιγραφεί μέσω του Σχήματος 2α. Οι συμβατικοί μετασχηματιστές έχουν κατά κανόνα ένα υψηλό συντελεστή ζεύξης ( $k = 1$ ), οπότε η επαγωγή σκέδασης  $L_s$  είναι μικρή σε σχέση με την κύρια επαγωγή  $L_m$ . Το ρεύμα μαγνήτισης  $I_m$ , το οποίο κατά κάποιο τρόπο δεν συνεισφέρει στην μεταφορά ισχύος είναι δυνατόν να παραμείνει χαμηλό εάν χρησιμοποιήσουμε τον κατάλληλο αριθμό σπειρών στα πηνία.

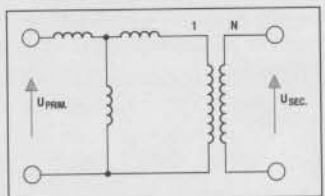


Σχήμα 2α

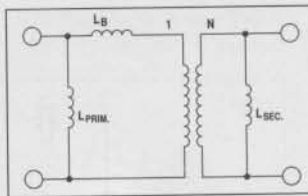


Σχήμα 2β

Τα συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος παρουσιάζουν κατά κανόνα χαμηλό συντελεστή ζεύξης, οπότε το  $L_m$  είναι μικρό σε σχέση με το  $L_s$ . Το ρεύμα μαγνήτισης εμφανίζεται σαν ένα τεράστιο, "άχρηστο" ορθογωνικό ρεύμα. Το ισοδύναμο κύκλωμα Π που εικονίζεται στο Σχήμα 2b αντιστοιχεί σε επίπεδο ηλεκτρικής συμπεριφοράς στο ισοδύναμο κύκλωμα T. Εάν ο μετασχηματιστής δεν έχει συμμετρική δομή, στο κάθε ισοδύναμο κύκλωμα θα πρέπει να προστεθεί και ένας ιδανικός μετασχηματιστής όπως εικονίζεται στο Σχήμα 2c. Ο μετασχηματιστής αυτός εκπροσωπεί ουσιαστικά τον λόγο σπειρών  $n$  που προκύπτει από το διαφορετικό πλήθος σπειρών στις δύο περιελίξεις.



Σχήμα 2c



Σχήμα 2d

Ο ιδανικός μετασχηματιστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μεταθέσει την δευτερεύουσα επαγωγή του ισοδύναμου κυκλώματος Π στην δευτερεύουσα πλευρά (λαμβάνοντας υπόψη τον λόγο σπειρών  $n$  του μετασχηματιστή). Καταλήγουμε λοιπόν στο ισοδύναμο κύκλωμα που εικονίζεται στο Σχήμα 2d, τα μέρη του οποίου εύκολα μπορούν να ερμηνευτούν με φυσικούς όρους.

Η επαγωγή  $L_{pri}$  αποτελεί ουσιαστικά την επαγωγή του πρωτεύοντος μετρούμενη με το δευτερεύον τοποθετημένο σε άπειρη απόσταση (μηδενική ζεύξη).  $L_{sec}$  είναι η επαγωγή του δευτερεύοντος κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Εάν οι δύο περιελίξεις έλθουν η μία κοντά στην άλλη, ενεργοποιείται η επαγωγή σειράς  $L_s$ . Η επαγωγή αυτή αντιστοιχεί στην δυνατότητα ζεύξης της μαγνητικής ροής, και σε ασθενείς ζεύξεις είναι πολύ μεγάλη. Στην πράξη είναι πολύ δύσκολο να μεταφέρουμε ένα υψηλό ρεύμα χωρίς να έχουμε μεγάλη πτώση τάσης στα άκρα του μετασχηματιστή με χαμηλή ζεύξη. Τελειώνοντας, ο ιδανικός μετασχηματιστής εκπροσωπεί την σχέση μεταξύ των τάσεων και ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, η οποία είναι δυνατόν να μεταβληθεί αλλάζοντας τον λόγο σπειρών.

## [Ένθετο 3]

### Συντελεστής ζεύξης

Τυλίξαμε 70 σπείρες από πολυκλώνο σύρμα 30 x 0,1 mm σε δύο φόρμες τύπου PS47 x 14,9 (βείτε την φωτογραφία). Το αποτέλεσμα ήταν μία επαγωγή  $L$  περίπου 150  $\mu$ H για κάθε πηνίο. Η εσωτερική διάμετρος ήταν περίπου 30 mm, η εξωτερική διάμετρος περίπου 32 mm, και το ύψος του πηνίου ήταν περίπου 9 mm. Ο συντελεστής ζεύξης  $k$  μετρήθηκε μέσω μετρήσεως του λόγου τάσης σε απουσία φορτίου.



Τα αποτελέσματα του συντελεστή ζεύξης σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των πηνίων παρατίθενται στον διπλανό πίνακα:

Απόσταση σε mm	σε k
0	0,33
3	0,17
10	0,11
20	0,05
32	0,02
45	0,01

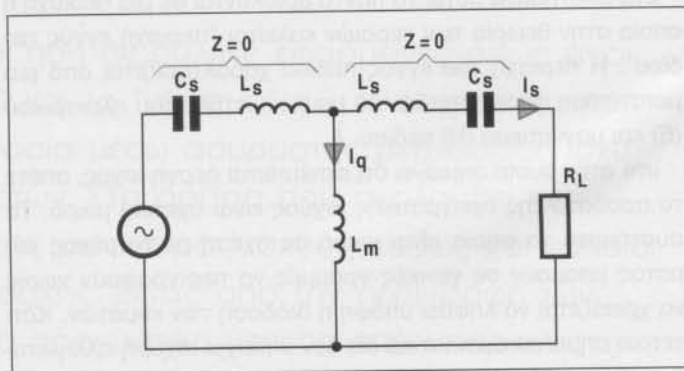
συνέπεια δυνατό να διαχωρίσουμε τα συστήματα που λειτουργούν με επαγωγική ζεύξη από τα συστήματα που λειτουργούν με χωρητική ζεύξη.

Η βασική ιδέα των συστημάτων χωρητικής ζεύξης περιγράφεται στο ένθετο περί Χωρητικής μεταφοράς ισχύος. Την στιγμή που η διηλεκτρική σταθερά του αέρα (ή του κενού) είναι πολύ μικρή, είναι μάλλον δύσκολο να μεταφέρουμε ισχύς μέσω χωρητικής ζεύξης. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν γιατί τα περισσότερα συστήματα στην πράξη χρησιμοποιούν επαγωγική ζεύξη.

### Επαγωγική ζεύξη

Όπως αναφέραμε και νωρίτερα, η διάδοση των κυμάτων δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα, οπότε στην περίπτωση επαγωγικά συζευγμένων συστημάτων είναι σημαντικό να έχουμε σαφή αντίληψη του πώς λειτουργεί ένας μετασχηματιστής. Για τον λόγο αυτό θα χρειαστεί να εξετάσουμε το συγκεκριμένο θέμα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Ένα ισοδύναμο κύκλωμα θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε το θέμα ευκολότερα. Τα διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα που χρησιμοποιούμε εδώ, περιγράφονται στο ένθετο Ισοδύ-



Σχήμα 1: Αντιστάθμιση της επαγωγής.

ναμα κυκλώματα μετασχηματιστή. Το κύκλωμα που εικονίζεται στο Σχήμα 2d δίνει μία καλή αναπαράσταση της κατάστασης σε ένα σύστημα με ασθενή επαγωγική ζεύξη, παρότι οι παράμετροι του είναι δυνατόν να μετατραπούν σε ισοδύναμο κύκλωμα T.

## Μετασχηματιστές

Σαν πρώτο παράδειγμα ας θεωρήσουμε δύο κυκλικά πηνία με ίδιο πλήθος σπειρών, τοποθετημένα σε μία συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους.

Η συμπεριφορά ενός μετασχηματιστή αυτής της μορφής μπορεί να περιγραφεί από το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα. Για τον σκοπό αυτό υπάρχουν πολλές επιλογές: στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιούμε τα συμμετρικά ισοδύναμα κυκλώματα Π και T. Τα δύο αυτά κυκλώματα παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις το ένα ή το άλλο εξυπηρετούν καλύτερα στην κατανόηση κάποιου συγκεκριμένου θέματος.

Ας εξετάσουμε αρχικά το κύκλωμα T. Εάν μετρήσουμε την πρωτεύουσα επαγωγή κάτω από συνθήκες απουσίας φορτίου, καταλήγουμε στην τιμή  $L = L_s + L_m$ . Η συγκεκριμένη τιμή είναι αρκετά χρήσιμη στην πράξη, και συχνά καλείται επαγωγή του μετασχηματιστή. Μία σημαντική σε σχέση με την ασύρματη μεταφορά ισχύος παράμετρος, είναι ότι τα πηνία του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος βρίσκονται σε χαλαρή ζεύξη. Η ζεύξη περιγράφεται από τον συντελεστή ζεύξης  $k$ , ο οποίος ελαττώνεται όσο αυξάνει η απόσταση μεταξύ των πηνίων.

Μετρήσαμε τον συντελεστή ζεύξης σε διάφορες αποστάσεις, και τα αποτελέσματα παρατίθενται στο ένθετο Ισοδύναμο κυκλώματα μετασχηματιστή. Στην περίπτωση μας (όπου το πρωτεύον και το δευτερεύον είναι ολόιδια), ο συντελεστής ζεύξης είναι όπως φαίνεται και από το ισοδύναμο κύκλωμα, ο ίδιος με τον λόγο της τάσης κάτω από συνθήκες απουσίας φορτίου. Ένας συντελεστής ζεύξης υψηλότερος από 0,4 αποτελεί σπάνια περίπτωση στην ασύρματη μεταφορά ισχύος. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα η τιμή είναι συχνά πολύ χαμηλότερη, σε αντίθεση με ένα συμβατικό μετασχηματιστή όπου ο συντελεστής ζεύξης είναι συχνά υψηλότερος από 0,95. Τώρα θα χρειαστεί να εξετάσουμε τις συνέπειες αυτού του χαμηλού συντελεστή ζεύξης.

### Λειτουργία συντονισμού

Όταν ο συντελεστής ζεύξης είναι χαμηλός, η επαγωγή ( $L_s$ ) του ισοδύναμου κυκλώματος T είναι σχεδόν ίδια με την επαγωγή L και κατά συνέπεια εμφανίζει στο κύκλωμα υψηλή εμπέδηση. Ένας τρόπος να αποφύγουμε το πρόβλημα αυτό είναι με την χρήση μίας χωρητικότητας σειράς  $C_s$ , η οποία θα αντισταθμίσει την επαγωγή σειράς. Αυτό ακριβώς εικονίζεται στο Σχήμα 1.

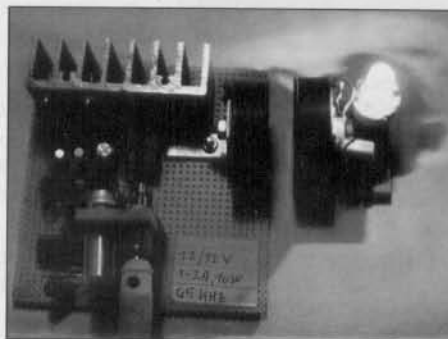
Με τον τρόπο αυτό δημιουργούμε δύο συντονιζόμενα σε σειρά κυκλώματα, τα οποία στην ιδανική περίπτωση και στην συχνότητα συντονισμού μηδενίζουν την εμπέδηση σειράς. Παρόλα αυτά, υπάρχει ακόμη ένα πρόβλημα διότι όταν ο συντελεστής ζεύξης είναι μικρός η εμπέδηση  $L_m$  είναι επίσης μικρή.

Το γεγονός αυτό προκαλεί δίπλα στο επιθυμητό ρεύμα  $I_s$ ,

## [Ένθετο 4]

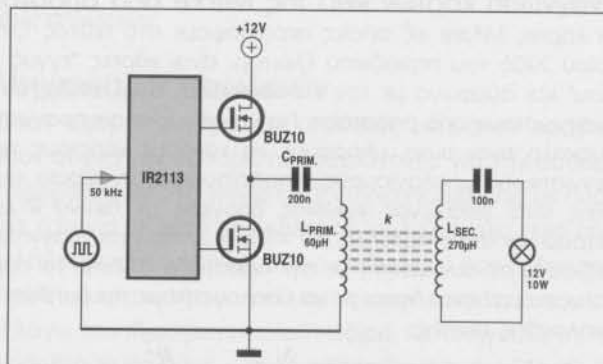
### Τροφοδοτικό λαμπήρα αλογόνου 10 watt

Στην φωτογραφία εικονίζεται ένα σύστημα το οποίο είναι σε θέση να τροφοδοτήσει ένα λαμπήρα αλογόνου 12 V / 10 W από μία απόσταση 3 με 8 mm. Όπως φαίνεται και από το βασικό σχηματικό διάγραμμα, το πρωτεύον κύκλωμα συντονισμού οδηγείται από ένα ζευγάρι MOSFET τα οποία λειτουργούν σε διάταξη push-pull. Οι περιελίξεις του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος βρίσκονται στα δύο μέρη ενός πυρήνα τύπου PM36. Η πρωτεύουσα περιέλιξη αποτελείται από 26 σπείρες σύρματος RF litze (60 x 0,1 mm), η επαγωγή  $L_{pri}$  του οποίου είναι 60 μH. Ο πυκνωτής στο πρωτεύον κύκλωμα είναι τύπου MKP10 με χωρητικότητα 0,2 μF. Τα τρανζίστορ BUZ10 ( $R_{Dson} = 0,07 \Omega$ ) οδηγούνται από ένα ολοκληρωμένο οδηγησης τύπου IR2113. Το κύκλωμα τροφοδοτείται από μία πηγή 12 V DC.



Ασύρματο τροφοδοτικό για λαμπήρα αλογόνου 10 W.

Το δευτερεύον έχει 55 σπείρες και επαγωγή  $L_{sec}$  270 μH. Ο λόγος σπειρών που προκύπτει επιτρέπει στον λαμπήρα των 12 V να λειτουργεί με μία τάση κοντά στην ονομαστική τάση λειτουργίας του. Ο πυκνωτής στο δευτερεύον κύκλωμα είναι τύπου MKP10 και έχει χωρητικότητα 0,1 μF. Ο λαμπήρας αλογόνου (12 V, 10 W) τροφοδοτείται απ' ευθείας από το δευτερεύον τύλιγμα με την συχνότητα λειτουργίας των 50 KHz.



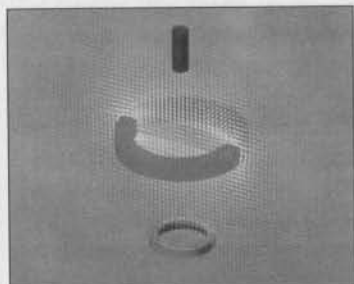
Το βασικό σχηματικό διάγραμμα του συστήματος μεταφοράς

Το ρεύμα στο πρωτεύον και σε κανονική λειτουργία είναι περίπου 5 A (ενεργή τιμή). Η άεργος ισχύς στον πυκνωτή του πρωτεύοντος θα είναι κατά συνέπεια  $N = 400 \text{ VA}$  ( $= I^2 \times Z_c$ , όπου  $Z_c = 16 \Omega$ ). Αυτό σημαίνει ότι η άεργος ισχύς είναι 40 περίπου φορές μεγαλύτερη από την μεταφερόμενη ισχύ, ακόμη και όταν το κενό αέρα είναι σχετικά μικρό.

## [Ένθετο 5]

### Εξομοίωση πεδίου

Ο αναλυτικός υπολογισμός των πεδίων στα εφαρμοσμένα συστήματα μεταφοράς ισχύος είναι συχνά αδύνατος. Σε αυτές τις περιπτώσεις εξυπηρετεί πολλές φορές η εξομοίωση πεδίου, για να μπορέσουμε τουλάχιστον να εκτιμήσουμε τα αποτελέσματα. Το αποτέλεσμα λοιπόν μίας τέτοιας εξομοίωσης εικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Το μαγνητικό πεδίο ενός πηνίου εκπομπής

Στο μέσον βρίσκεται ένας αγωγίμος δακτύλιος ο οποίος εκπροσωπεί το πηνίο εκπομπής. Ο δακτύλιος αυτός παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, και πάνω από αυτό τον "πομπό" εξομοιώνουμε μία μικρή ράβδο φερριτή. Όπως μπορούμε να δούμε στην εικόνα, αν και η ράβδος "απορροφά" στο άμεσο περιβάλλον της το πεδίο, δεν αλλάζει δραματικά το πεδίο του πηνίου εκπομπής. Αυτό σημαίνει ότι σε μεγάλες αποστάσεις δεν είναι δυνατό να αυξήσουμε σημαντικά τον συντελεστή ζεύξης ακό-

μη και εάν χρησιμοποιήσουμε πυρήνες φερριτή, για τον απλό λόγο ότι ένα μεγάλο μέρος της μαγνητικής ροής που παράγεται από τον πομπό δεν είναι δυνατόν να κατευθυνθεί προς τον δέκτη. Κάτω από το πηνίο εκπομπής εξομοιώνουμε επίσης και ένα δακτύλιο χαλκού, ο οποίος και αυτός επηρεάζει το πεδίο μόνον στον άμεσο χώρο γύρω του. Από αυτό μπορούμε να συνάγουμε ότι τα πηνία με πυρήνα αέρα είναι ακόμη πιο ακατάλληλα για την επίτευξη καλών συντελεστών ζεύξης.

Ένα μεγάλο μέρος του πεδίου του πηνίου εκπομπής δεν επηρεάζεται από την παρουσία οποιουδήποτε αντικειμένου, και το μαγνητικό πεδίο συμπεριφέρεται ουσιαστικά με τον ίδιο τρόπο που θα συμπεριφερόταν ένα πεδίο ενός ανενόχλητου πηνίου. Η αντίστοιχη ισχύς πεδίου εμφανίζεται στο σύστημα απλώς σαν μία επιπρόσθετη άεργος ισχύς η οποία θα πρέπει να παρασχεθεί στο σύστημα. Η εν λόγω άεργος ισχύς συνοδεύεται από ένα ρεύμα, και το ρεύμα αυτό προκαλεί επιπρόσθετες απώλειες σε όλα τα ωμικά στοιχεία του κυκλώματος.

Από μία εξομοίωση πεδίου μπορούμε συχνά να εξάγουμε αξιόπιστες τιμές σχετικά με την επαγωγή και τον συντελεστή ζεύξης. Είναι επίσης δυνατό να πάρουμε κάποιες ενδείξεις σχετικά με τις απώλειες που θα πρέπει να αναμένουμε λόγω των ρευμάτων eddy. Με την πληροφορία αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε την απόδοση του συστήματος από τα πρώτα κιόλας βήματα της σχεδίασης. Για μία ρεαλιστική βέβαια αποτίμηση του συστήματος, η υλοποίηση πολύ καλών εκτιμήσεων είναι "εκ των ων ουκ άνευ", και σε πολλές περιπτώσεις πάρα πολύ δύσκολη.

## [Ένθετο 6]

### Ανάγνωση καρτών RFID της Mifare από απόσταση

Οι κάρτες Mifare τις οποίες περιγράψαμε στο τεύχος Οκτωβρίου 2006 του περιοδικού *Ελεκτορ*, είναι κάρτες "εγγύς πεδίου" και σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι αδύνατον να αναγνωστούν από απόσταση. Για να δούμε πόσο πραγματικά δύσκολο είναι αυτό, μπορούμε να κάνουμε κάποιους προσεγγιστικούς υπολογισμούς. Υποθέτουμε ότι η κεραία εκπομπής είναι ένας κυκλικός βρόγχος με ακτίνα  $R$  ενός μέτρου και απλή περιέλιξη ( $N = 1$ ). Η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  σε συνάρτηση με την απόσταση  $d$  (βείτε το παρακάτω σχήμα) είναι δυνατόν να υπολογιστεί με την βοήθεια της ακόλουθης σχέσης:

$$H = \frac{N I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}}$$

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1443-2 ο συγκεκριμένος τύπος κάρτας RFID λειτουργεί με ένταση μαγνητικού πεδίου στην περιοχή  $H_{\min} = 1,5 \text{ A/m}$  έως  $H_{\max} = 7,5 \text{ A/m}$ .

Εάν θέλουμε να έχουμε ένταση πεδίου  $1 \text{ A/m}$ , μπορούμε να υπολογίσουμε ότι απαιτείται ένα ρεύμα  $I = 5,64 \text{ A}$ .

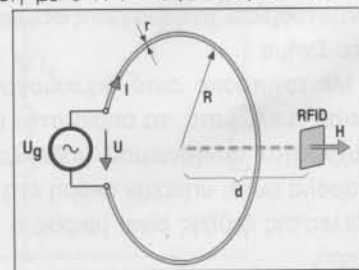
Το συγκεκριμένο ρεύμα θα πρέπει να ρέει μέσα από την κε-

ραία εκπομπής σε μία συχνότητα  $f = 13,56 \text{ MHz}$ . Εάν θεωρήσουμε ότι το πηνίο αποτελείται από μία σπείρα σύρματος ακτίνας  $r = 1 \text{ mm}$ , η επαγωγή της κεραίας εκπομπής υπολογίζεται κατά προσέγγιση με την βοήθεια της σχέσης:

$$L = \mu_0 \frac{(\ln 8R-2)}{r} = 8,8 \mu\text{H}$$

Στην συχνότητα  $f$  των  $13,56 \text{ MHz}$ , η σχέση δίνει μία εμπέδηση πηνίου  $Z_L$  περίπου  $750 \Omega$ . Αυτό σημαίνει ότι η τάση  $U$  στα άκρα της κεραίας θα πρέπει να είναι περίπου  $750 \Omega \times 5,64 \text{ A} = 4,2 \text{ kV}$ , το οποίο δεν είναι και τόσο απλό. Η αντίστοιχη άεργος ισχύς ταλάντωσης  $N$  είναι ίση με  $U \times I = (4,2 \times 5,64) \text{ kVA} = 24 \text{ kVA}$ .

Όπως μπορούμε λοιπόν να δούμε από αυτό το αριθμητικό παράδειγμα, δεν είναι και τόσο εύκολο να διαβάσει κανείς μία κάρτα Mifare RFID σε σχετικά μεγάλη απόσταση.



## [Ένθετο 7]

### Ασύρματη τροφοδοσία LED

Στη διπλανή εικόνα έχουμε μία διάταξη για την παροχή τροφοδοσίας σε ένα λευκό LED. Η μέγιστη απόσταση με την διάταξη αυτή στην οποία το LED εξακολουθεί να εκπέμπει κάποιο φως, είναι αρκετά μεγάλη και φθάνει τα 1,3 m.

Ο πομπός ισχύος χρησιμοποιεί το ίδιο κύκλωμα push-pull που χρησιμοποιεί και το τροφοδοτικό λαμπτήρα αλογόνου 10 W. Το πηνίο εκπομπής (το πρωτεύον του μετασχηματιστή) αποτελείται από 15 σπείρες σύρματος HF litze (Ø0 x 0,1 mm) τυλιγμένο γύρω από μια κυκλική φόρμα με διάμετρο 22 cm. Η επαγωγή του είναι 100 μH, και ο πυκνωτής συντονισμού (τύπου MKP10) έχει χωρητικότητα 0,1 μF. Η συχνότητα λειτουργίας είναι 50 KHz. Η εμπέδηση του πηνίου μαζί με τον πυκνωτή που προκύπτει είναι 31,4 Ω. Η εκπεμπόμενη ισχύς είναι  $I^2 \times Z_0 = 1,2 \text{ kVA}$ , μολονότι το ρεύμα στο πρωτεύον είναι μόλις 6 A<sub>eff</sub>.

Το πηνίο εκπομπής παρουσιάζει μια αντίσταση συνεχούς 0,25 Ω, η οποία προκαλεί μία απαγωγή ισχύος περίπου  $I^2 \times 0,25 \Omega = 9 \text{ W}$ , την στιγμή βέβαια που το LED λαμβάνει μόλις μερικά mW ισχύος. Οι απώλειες μεταγωγής είναι τουλάχιστον  $(36 \text{ A})^2 \times 0,07 \Omega = 2,5 \text{ W}$ . Η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι  $I_{\text{eff}} \times Z_0 = 200 \text{ V}$ . Το πηνίο στην λήψη αποτελείται από 250 σπείρες

χάλκινου σύρματος διαμέτρου 0,2 mm, τυλιγμένο γύρω από μία ράβδο φερριτή με διάμετρο 10 mm και μήκος 60 mm. Η επαγωγή του είναι 4,6 mH, και συντονίζεται με μία χωρητικότητα 2,2 nF. Το φορτίο αποτελείται από ένα λευκό LED. Ο διαχωρισμός στην φωτογραφία είναι περίπου 30 cm, και στην απόσταση αυτή το LED είναι αρκετά φωτεινό. Η μέγιστη απόσταση πριν το LED σβήσει τελείως είναι περίπου 1,3 m. Χωρίς την ράβδο φερριτή η μέγιστη απόσταση είναι περίπου 20 cm, με εμπέδηση 680 μH και χωρητικότητα 15 nF.



Τροφοδοσία ενός LED σε απόσταση 30 cm.

και ένα ορθογωνικό (quadrature) ρεύμα  $I_q$ . Στα ένθετα όπου περιγράφεται ένα Τροφοδοτικό λαμπτήρα αλογόνου 10 watt, η Ανάγνωση καρτών RFID Mifare από απόσταση και ένα Ασύρματη τροφοδοτικό LED, υπάρχουν κάποια παραδείγματα με πραγματικούς αριθμούς. Λόγω της τάσης συντονισμού, τα συγκεκριμένα κυκλώματα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μόνον σε ένα στενό εύρος συχνοτήτων, κάτι το οποίο αποτελεί μειονέκτημα. Τα πηνία και οι πυκνωτές σε τέτοια συστήματα είναι εξαρτήματα υψηλής ονομαστικής ισχύος και κατά συνέπεια δεν είναι εύκολο να ρυθμιστούν (και σε καμία περίπτωση κατά την λειτουργία), όταν για παράδειγμα θέλουμε να αντισταθμίσουμε την ολίσθηση σε υψηλές θερμοκρασίες.

### Άεργος ισχύς

Η ιδέα της χρήσης επιπλέον εξαρτημάτων για τον σχηματισμό κυκλωμάτων συντονισμού με σκοπό την αντιστάθμιση των άεργων εξαρτημάτων (πηνία ή πυκνωτές) παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα, δεδομένου ότι καταλήγει σε μία επιπλέον ανταλλαγή αέργου ισχύος μεταξύ των εξαρτημάτων αυτών. Στα πραγματικά συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος, η άεργος ισχύς είναι αισθητά υψηλότερη της πραγματικά μεταφερόμενης ισχύος (δείτε επίσης την εισαγωγική παρατήρηση σχετικά με τις περιοχές εγγύς πεδίου και απόμακρου πεδίου των κεραίων).

Η εν λόγω άεργος ισχύς οδηγεί σε σημαντικά υψηλότερες τάσεις και ρεύματα. Αυτό δεν θα αποτελούσε πρόβλημα εάν τα εξαρτήματα ήταν χωρίς απώλειες, αλλά δυστυχώς είμαστε υποχρεωμένοι να χρησιμοποιήσουμε πραγματικά εξαρτήματα. Το παράδειγμα με το Τροφοδοτικό λαμπτήρα αλογόνου 10 watt με ασύρματη σύνδεση που περιγράφεται στο ένθετο,

αποτελεί μία ένδειξη των τιμών που θα πρέπει να αναμένουμε. Όπως είναι προφανές, είμαστε υποχρεωμένοι να χρησιμοποιήσουμε πυκνωτές υψηλής τάσης.

Την ίδια στιγμή οι πυκνωτές θα πρέπει να παρουσιάζουν πολύ χαμηλή ενεργή αντίσταση σειράς, διαφορετικά η ισχύς που θα αναλώνεται στους πυκνωτές θα είναι υψηλότερη από την πραγματική μεταφερόμενη ισχύ. Η απώλειες που υπάρχουν στα εξαρτήματα λόγω της αέργου ισχύος, καθιστούν πολύ δύσκολη την επίτευξη καλών αποδόσεων. Στην συνέχεια θα μελετήσουμε με κάποια λεπτομέρεια μερικούς μηχανισμούς απωλειών.

### Μηχανισμοί απωλειών

Όσον αφορά τα πηνία, οι απώλειες ρευμάτων eddy αποτελούν συχνά τον καθοριστικό παράγοντα για την ασύρματη μεταφορά ισχύος. Τα πηνία είναι συχνά περιελίξεις με πυρήνα αέρα, ή πηνία με αυτό που καλείται "πολύ μεγάλο κενό αέρα". Εάν λάβουμε υπόψη το κλασικό επιδερμικό φαινόμενο το σημαίνει συγκέντρωση του ρεύματος στην επιφάνεια του αγωγού λόγω του ίδιου μαγνητικού πεδίου, καταλήγουμε σε πολύ αισιόδοξες τιμές όσον αφορά την αυξημένη εμπέδηση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η περιέλιξη βρίσκεται εντός του δικού της ισχυρού πεδίου, το οποίο σε πολύ χαμηλές συχνότητες προκαλεί έντονες απώλειες ρευμάτων eddy. Οι απώλειες αυτές καλούνται συχνά "απώλειες προσέγγισης". Στο ένθετο 8 φαίνεται η επίδραση του φαινομένου προσέγγισης αρκετά έντονα. Στις υψηλότερες συχνότητες γίνονται επίσης εμφανείς οι απώλειες μαγνητικής υστέρησης στους πυρήνες φερριτή. Από την άλλη θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι απώλειες μεταγωγής στα τρανζίστορ της βαθμίδας εξόδου του πομπού.

Αυτό απαιτεί συχνά προσεκτική σχεδίαση για να ελαχιστοποιηθούν οι καθαρές απώλειες.

Στα συστήματα που λειτουργούν σε σχετικά υψηλές συχνότητες, σημαντικός παράγοντας καθίστανται οι διηλεκτρικές απώλειες στους μονωτές. Εάν στην γειτονική περιοχή υπάρχουν ηλεκτρικά αγωγά υλικά, είναι προφανές ότι τα ρεύματα eddy επάγονται σε αυτά, γεγονός το οποίο προκαλεί θέρμανση. Αυτό είναι επιθυμητό αποτέλεσμα όταν συζητάμε για επαγωγικό ψήσιμο, αλλά στους υπόλοιπους τύπους συστημάτων θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα ώστε τα μαγνητικά πεδία να μην επιδρούν σε άλλες συσκευές ή ακόμη και ανθρώπους. Είναι βέβαια λογικό οι απώλειες αυτές να επιδρούν αρνητικά και στις επιδόσεις που μπορούμε να έχουμε στην πράξη.

Σε συστήματα μεγάλης εμβέλειας η θωράκιση είναι πολλές φορές ανέφικτη, επειδή διαφορετικά το χρήσιμο πεδίο θα εξασθενούσε σημαντικά. Το επόμενο σημαντικό ζήτημα είναι οι πυκνωτές συντονισμού που χρησιμοποιούνται. Είναι γεγονός ότι άγουν υψηλά ρεύματα τα οποία με την σειρά τους οδηγούν σε υψηλές τάσεις (αρκετές εκατοντάδες volt μέχρι μερικές χιλιάδες KV).

Συνήθως είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούνται πυκνωτές με μικρές απώλειες ("υψηλό Q").

Η ισχύς  $P_c$  την οποία απάγει λόγω της αέργου ισχύος  $N_c$  ένας πυκνωτής ο οποίος έχει τιμή  $Q_c$  όσον αφορά τον συντελεστή Q, δίνεται κατά προσέγγιση από την σχέση  $P_c = N_c \times Q_c$ . Στην περίπτωση μας οι δυσκολίες προκύπτουν από το γεγονός ότι η αέργος ισχύς  $N_c$  είναι συχνά πολλαπλάσια της πραγματικής ισχύος που μεταφέρεται.

Σαν αποτέλεσμα αυτού, η ισχύς που απάγεται στα άεργα εξαρτήματα είναι δυνατόν να είναι ίδιας τάξης μεγέθους με την

μεταφερόμενη ισχύ, παρ' όλη την χρήση πολύ καλών πυκνωτών.

## Σύνοψη

Μέχρι στιγμής περιγράψαμε αρκετούς μηχανισμούς που επιδρούν στην σχεδίαση συστημάτων ασύρματης μεταφοράς ισχύος με επαγωγική ζεύξη και η εφαρμογή στην πράξη απαιτεί προσεκτική μελέτη όλων αυτών των παραμέτρων. Ίσως κάποια στιγμή, να φθάσουμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα της χρήσης του φορητού μας υπολογιστή χωρίς μπαταρία, αξιοποιώντας την ασύρματη μεταφορά ισχύος.

(070825-1)

## Σύνδεσμοι στο διαδίκτυο

<http://web.mit.edu/newsoffice/2007/wireless-0607.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/WiTricity>

<http://www.witricitynet>

## [Ένθετο 8]

### Το φαινόμενο της προσέγγισης

Τα πηνία που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος λειτουργούν με σχετικά υψηλές εντάσεις μαγνητικών πεδίων, οι οποίες επιδρούν επίσης στις σπειρές των πηνίων. Εάν λάβουμε υπόψη μόνο την αυξημένη εμπέδηση λόγω του επιδερμικού φαινομένου που προκύπτει από το μαγνητικό πεδίο του ίδιου του αγωγού, καταλήγουμε στην καμπύλη A του παρακάτω διαγράμματος, από το οποίο αντιλαμβανόμαστε ότι τα πηνία θα μπορούσαν άνετα να χρησιμοποιηθούν σε συχνότητες κάτω από τα 100 KHz.

Εάν μετρήσουμε την εμπέδηση (ισοδύναμη εμπέδηση σειράς), καταλήγουμε στην καμπύλη B, όπως αυτή προκύπτει από τα σημεία μέτρησης. Στην συγκεκριμένη καμπύλη περιγράφεται η πραγματική χαρακτηριστική εμπέδησης, δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψη και το ισχυρό συνολικό πεδίο (φαινόμενο προσέγγισης). Όπως μπορούμε να δούμε, η εμπέδηση στα 10 KHz είναι ήδη σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με την αντίσταση συνεχούς (DC). Στην περίπτωση λοιπόν αυτή, καλό θα ήταν να χρησιμοποιήσουμε πολύκλωνω λεπτό σύρμα τύπου HF litze. Για να μπορέσουμε να έχουμε αξιόπιστες προβλέψεις για τον προσδιορισμό του βέλτιστου τύπου σύρματος, είναι απαραίτητο να

χρησιμοποιήσουμε ένα καλό πρόγραμμα εξομοίωσης πεδίου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα περιγράφεται η σημασία που έχει το να συνηγορήσουμε τις απώλειες του συστήματος.

Χαρακτηριστικές εμπέδησης με επιδερμικό φαινόμενο (A) και φαινόμενο προσέγγισης (B) (• = μετρούμενη τιμή)

