

Κατασκευάστε ένα απλό antenna tuner (Μέρος Α')

Του Νίκου Παναγιωτίδη (SV6 DBK) φυσικού και ραδιοερασιτέχνη.

Ο σκοπός του άρθρου αυτού είναι να κατευθύνει τον αναγνώστη – ραδιοερασιτέχνη να κατασκευάσει το «tuner που του ταιριάζει». Εκτός του ότι η λύση αυτή είναι οικονομικά συμφέρουσα, η κατασκευή είναι αρκετά μικρότερη σε όγκο από ένα συνηθισμένο tuner (λέγοντας tuner εννοώ μια συσκευή που συντονίζει το σύστημα κεραίας – γραμμής μεταφοράς, ανεξάρτητα αν τοποθετείται στην έξοδο του πομπού, στην είσοδο της κεραίας ή στο μέσον της γραμμής μεταφοράς) αλλά θα είναι κατάλληλη μόνο για την συγκεκριμένη κεραία που θα τοποθετείται.

«Εκ των ουκ άνευ» στην κατασκευή του tuner είναι ένας antenna analyser (όπως ο MFJ 259) και η ικανότητα να κάνουμε στοιχειώδεις υπολογισμούς.

Το πρώτο βήμα είναι να μετρήσουμε την κεραία μας. Η κεραία (πέρα απ' τη δυνατότητά της να εκπέμπει ΗΜ κύματα) ουσιαστικά συμπεριφέρεται σαν ένα συνδυασμός κάποιας Ωμικής αντίστασης με κάποια αυτεπαγωγή ή κάποια χωρητικότητα.

Όταν η κεραία είναι συντονισμένη στη συχνότητα που εκπέμπουμε, συμπεριφέρεται σαν Ωμική αντίσταση και μόνο. Δηλαδή έχει Ωμική συμπεριφορά.

Εκτός της συχνότητας συντονισμού, η κεραία συμπεριφέρεται είτε σαν Ωμική αντίσταση σε σειρά με χωρητικότητα (χωρητική συμπεριφορά), είτε σαν Ωμική αντίσταση σε σειρά με αυτεπαγωγή (επαγωγική συμπεριφορά).

Σε κάθε χωρητικότητα ή αυτεπαγωγή αντιστοιχεί μια αντίσταση. Η αντίσταση αυτή έχει διαφορετικό χαρακτήρα απ' την Ωμική αντίσταση και λέγεται *αντίδραση*. Η κεραία δηλαδή έχει μια Ωμική αντίσταση και σε σειρά μ' αυτή μια χωρητική ή επαγωγική αντίδραση.

Αν στο άκρο της καθόδου που συνδέεται στην κεραία συνδέσω τον antenna analyser και τον ρυθμίσω στην ένδειξη R & X, θα βγει στο display μια ένδειξη σαν την παρακάτω:

$$R=87 \ \Omega \quad X=143 \ \Omega$$

Που με πληροφορεί πως το σύστημα κεραίας - καθόδου ισοδυναμεί με μια Ωμική αντίσταση 87 Ω σε σειρά με μια αντίδραση 143 Ω.

Μια αντίδραση X μπορεί να πάρει θετική ή αρνητική τιμή. Θετική αντίδραση σημαίνει αυτεπαγωγή ενώ αρνητική χωρητικότητα. Αντίθετα, μια αντίσταση R παίρνει μόνο θετικές τιμές.

Ένα ζεύγος αριθμών (R, X) όπου R θετικός και X θετικός ή αρνητικός ή 0 περιγράφει μια *εμπέδηση* ή *σύνθετη αντίσταση*. Κεραίες, έξοδοι ή είσοδοι ενισχυτών, κυκλώματα με πυκνωτές, πηνεία και αντιστάσεις αποτελούν εμπέδησεις.

Όταν ο ενισχυτής RF ή ο πομπός έχει εμπέδηση εξόδου (50, 0) Ω, για να πάρω τη μέγιστη ισχύ, το φορτίο πρέπει να έχει εμπέδηση (50, 0) Ω επίσης. Έτσι αν το σύστημα καθόδου – κεραίας έχει εμπέδηση (87, 143) Ω δε θα έχω καλή προσαρμογή και δε θα πάρω τη μέγιστη ισχύ. Ένα tuner μετασχηματίζει την εμπέδηση του φορτίου που συνδέω στο άκρο του στην επιθυμητή τιμή, που, στην περίπτωση του πομπού, είναι (50, 0) Ω. Ιδανικά το tuner δεν τρώει ισχύ, έτσι όλη σχεδόν η ισχύς του πομπού πάει στην κεραία.

Τα tuner του εμπορίου είναι ένας συνδυασμός από πυκνωτές και πηνεία σε συνδυασμούς που φέρνουν περιγραφικές ονομασίες, όπως Π, Τ, L. Στα λεγόμενα χειροκίνητα tuner οι πυκνωτές, και συχνά και τα πηνεία, είναι μεταβλητοί και αραιόφυλλοι. Ρυθμίζοντας την χωρητικότητά τους μπορούμε να φέρουμε οποιαδήποτε εμπέδηση μέσα σε κάποια κλίμακα στην επιθυμητή τιμή. Τα tuner που θα περιγράψουμε σ' αυτό και το επόμενο άρθρο είναι μικρά και φθηνά, αλλά μπορούν να προσαρμόσουν την εμπέδηση μιας μόνο κεραίας στον πομποδέκτη (ας

μη ξεχνάμε ότι όταν ένα tuner προσαρμόζει την κεραία για εκπομπή, την προσαρμόζει επίσης και για λήψη).

Τα tuner στο παρόν άρθρο θα αποτελούνται από μία και μόνη αντίδραση! Στο επόμενο άρθρο θα κάνουμε ένα βήμα μπροστά και θα περιγράψουμε tuner με 2 αντιδράσεις σε διάταξη L.

Το tuner μοναδικής αντίδρασης

Η κεραία (για την ακρίβεια το σύστημα κεραία – κάθοδος) μπορεί να θεωρηθεί είτε σαν μια Ωμική αντίσταση και μια αντίδραση συνδεδεμένες σε σειρά, είτε σαν μια αντίσταση και μια αντίδραση συνδεδεμένες παράλληλα (**Σχήμα 1**). Μια εμπέδηση (R, X) ισοδυναμεί με μια αντίσταση R συνδεδεμένη σε σειρά με μια αντίδραση X. Μια καθαρή αντίδραση X' είναι στην ουσία μια εμπέδηση της μορφής (0, X'). Αν αυτή μπει σε σειρά με την (R, X), η συνολική εμπέδηση γίνεται (R, X+X'). Αν επιλέξω X'=-X, η συνολική εμπέδηση του συστήματος θα γίνει (R,0). Η αντίδραση X' αποτελεί το *tuner μοναδικής αντίδρασης*.

Το μέτρο της συνολικής εμπέδησης του συστήματος (που είναι $\sqrt{R^2 + X'^2}$) μειώνεται όταν το X μηδενίζεται χωρίς ν' αλλάζει το R με αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος. Αν μάλιστα είμαι αρκετά τυχερός και το R έχει τιμή κοντά στα 50 Ω, καταλήγω το σύστημα κεραία – tuner να έχει εμπέδηση (50, 0) Ω, δηλ. να έχω άριστη προσαρμογή με VSWR=1:1. Αν το R είναι μεταξύ του 33 Ω και του 75 Ω, ο Λόγος Στασίμου Κύματος δεν θα ξεπερνάει το 1,5:1.

Όμως μια κεραία με εμπέδηση (R, X) ισοδυναμεί επίσης μια αντίσταση R'≠R συνδεδεμένη παράλληλα με μια αντίδραση X'≠X. Ισχύει R'>R ενώ η X' είναι του ίδιου τύπου με τη X, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 1**. Αν στην παράλληλη αυτή συνδεσμολογία προσθέσω μια αντίδραση -X' παράλληλα, η νέα αυτή αντίδραση εξουδετερώνει την X' απειρίζοντας την συνολική παράλληλη αντίδραση και αφήνοντας αναλλοίωτη την Ωμική. Η εμπέδηση του συστήματός μου θα γίνει επομένως (R', 0), όπου R'>R.

Συγκεκριμένα, αν έχω το R και το X, το R' υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R' = R + \frac{X^2}{R}$$

Έχοντας το R' το R και το X, υπολογίζω το X' από τη σχέση:

$$X' = \frac{R'R}{X}$$

Όπως και στο παράδειγμα της σε σειρά συνδεσμολογίας, αν καταφέρω ώστε η R' να είναι κοντά στα 50 Ω, θα έχω πολύ καλή προσαρμογή, ενώ αν η R' είναι μεταξύ 33 Ω και 75 Ω, τα στάσιμα δεν θα υπερβαίνουν το 1,5:1.

Στο **Σχήμα 2** δίνω ένα διάγραμμα για την συνδεσμολογία σειράς και ένα για την παράλληλη.

Μέτρηση του R και του X

Συνδέοντας τον analyser στο άκρο της καθόδου της κεραίας, και ρυθμίζοντας τη συχνότητά του, διαβάζω στην οθόνη του την εμπέδηση (R, X) του συστήματος κεραία – κάθοδος στη δεδομένη συχνότητα. Η τιμή όμως του X ενδέχεται να είναι λάθος για τον εξής λόγο: Ο MFJ 259 δίνει πάντα την απόλυτη τιμή του X, χωρίς το πρόσημό της. Δηλαδή αν διαβάζω X=67 Ω, το X μπορεί να είναι είτε +67 Ω, είτε -67 Ω. Πρέπει λοιπόν ν' αποφασίσω ποιο είναι το σωστό. Μια από τις μεθόδους προσδιορισμού του προσήμου είναι η παρακάτω: Φτιάξτε μια προέκταση μικρού μήκους (10 – 40 εκ για τα HF, λιγότερο από 10 εκ για τα VHF) από ομοαξονικό του ίδιου τύπου.

Προσαρμόστε την στο άκρο της καθόδου με μια μούφα και επαναλάβετε τη μέτρηση. Θα δείτε ότι τα R και X αλλάζουν λίγο.

Αν με αυτή την προσθήκη η τιμή του R αυξάνεται, η αντίδραση της κεραίας είναι θετική. Αντίθετα, αν μικρύνει το R με την προσθήκη, η τιμή της αντίδρασης είναι αρνητική.

Η καλύτερη τοποθέτηση

Ένα tuner μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο μιας γραμμής μεταφοράς. Όμως στο κομμάτι της γραμμής που συνδέει το tuner με την κεραία το SWR είναι μεγάλο. Αυτό έχει σαν συνέπεια οι απώλειες σ' αυτό το κομμάτι της γραμμής να είναι μεγαλύτερες από τις κανονικές απώλειες της γραμμής. Θα υπάρχει λοιπόν όφελος αν το κομμάτι της γραμμής που συνδέει το tuner με την κεραία είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Επί πλέον, στην περίπτωση μας, υπάρχει κι άλλος ένας παράγοντας που έχει να κάνει με την τοποθέτηση: η εμπέδηση (R, X) του συστήματος εξαρτάται από το μήκος της καθόδου που πάει από το tuner στην κεραία. Αν, είτε η R, είτε η ισοδύναμη παράλληλη R' έχει τιμή κοντά στα 50 Ω για ένα συγκεκριμένο μήκος, τότε πρέπει να τοποθετήσουμε το tuner σ' ένα σημείο που να μπορεί να συνδεθεί με την κεραία με ένα καλώδιο τέτοιου μήκους. Σ' αυτό το μήκος μπορούμε να προσθέσουμε ή να αφαιρέσουμε ένα μήκος ίσο με έναν ακέραιο αριθμό του μισού μήκους κύματος (σαν μήκος κύματος εννοώ το μήκος κύματος στον αέρα επί τον συντελεστή ταχύτητας).

Ποιο κύκλωμα θα χρησιμοποιήσω;

Εξετάζω ποια από τις παρακάτω ποσότητες, R και $R'=R+X^2/R$, είναι πιο κοντά στα 50 Ω. Αν είναι και οι δύο μικρότερες των 25 Ω ή μεγαλύτερες των 100 Ω, να μη περιμένω βελτίωση με στάσιμα κάτω του 2:1. Ίσως είναι καλύτερα να περιμένω το B μέρος αυτού του άρθρου.

1. Έστω ότι η R είναι πιο κοντά στα 50 Ω. Τότε το tuner μου θα είναι μια αντίδραση με τιμή (-X) σε σειρά με το σύστημα καθόδου – κεραίας. Θα ακολουθήσω δηλαδή την κατασκευή του **Σχ. 2 (α)**. Αν δηλαδή $X=+85 \Omega$, το tuner μου θα είναι μια χωρητικότητα με αντίδραση -85Ω σε σειρά με το σύστημα καθόδου – κεραίας. Αν, αντίθετα, το X έχει αρνητική τιμή, το tuner θα είναι αυτεπαγωγή με αντίδραση την απόλυτη τιμή του X. Οι αντιδράσεις αυτές υποτίθεται ότι αναφέρονται στη συχνότητα λειτουργίας.
2. Έστω ότι η $R'=R+X^2/R$, είναι πιο κοντά στα 50 Ω. Τότε θ' ακολουθήσω το **Σχ. 2 (β)**, δηλ. θα τοποθετήσω μια αντίδραση με τιμή (-X') (όπου $X'=R'/R/X$) παράλληλα στο σύστημα καθόδου – κεραίας. Η σχέση $X'=R'/R/X$ δίνει αντίδραση του ίδιου τύπου (ίδιου προσήμου) με τη X. Η αντίδραση που θα βάλω στο tuner θα έχει την ίδια τιμή αλλά αντίθετο πρόσημο με την X'.

Οι υπολογισμοί

Στο κύκλωμα σειράς δεν χρειάζονται ιδιαίτεροι υπολογισμοί για να βρω την αντίδραση: Αν η κεραία έχει εμπέδηση (R, X), η αντίδραση που θα βάλω σε σειρά θα είναι (-X). Αν το X έχει θετική τιμή, θα προσθέσω χωρητικότητα. Η τιμή της χωρητικότητας σε μF δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{1}{2\pi\nu X}$$

Όπου ν η συχνότητα σε MHz και $\pi=3,14$.

Αν το X έχει αρνητική τιμή θα προσθέσω αυτεπαγωγή. Κατασκευάζω λοιπόν μια αυτεπαγωγή που η μέτρησή της στον Analyser στη συχνότητα λειτουργίας να δίνει την τιμή X .

Στο παράλληλο κύκλωμα υπολογίζω αρχικά την τιμή της R' (της ισοδύναμης παράλληλης αντίστασης):

$$R' = R + \frac{X^2}{R}$$

Μετά υπολογίζω την τιμή της X' (της ισοδύναμης παράλληλης αντίδρασης) από τη σχέση:

$$X' = \frac{R'R}{X}$$

Που έχει το ίδιο πρόσημο με τη X . Στο παράλληλο κύκλωμα θα βάλω μια αντίδραση ($-X'$). Δηλαδή, αν $X' > 0$ θα βάλω χωρητικότητα με αντίδραση ($-X'$). Η τιμή της σε μF δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{1}{2\pi\nu X'}$$

Όπου ν η συχνότητα σε MHz και $\pi=3,14$.

Ενώ αν $X' < 0$ θα βάλω αυτεπαγωγή με αντίδραση $|X'|$.

Δεν είναι απαραίτητο να υπολογίσω την τιμή της αυτεπαγωγής σε μH . Αρκεί η αυτεπαγωγή, όταν μετρηθεί στον analyser, να έχει τη δεδομένη αντίδραση. Αν όμως με ενδιαφέρει η τιμή της σε μH , αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{X}{2\pi\nu}$$

Όπου ν η συχνότητα σε MHz.

Όταν μετράω μια αντίδραση X στον analyser, θα περίμενα να δω στην οθόνη: $R=0$, X =κάποια τιμή. Ενδέχεται όμως να δω ότι το R δεν είναι μηδέν, αλλά έχει κάποια θετική τιμή. Δεν θα υπάρξει πρόβλημα, αρκεί το R να είναι αρκετά μικρότερο από το X .

Ας δώσουμε ένα παράδειγμα υπολογισμού. Έστω $R=31$, $X=92$ είναι οι ενδείξεις του analyser. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο που προανέφερα, έστω ότι βρίσκω ότι το X είναι αρνητικό, άρα η εμπέδηση της κεραίας είναι $(31, -92) \Omega$. Επομένως, αν το tuner μου αποτελείται από μία αυτεπαγωγή 92Ω σε σειρά, η αυτεπαγωγή αυτή θα μετατρέψει την εμπέδηση σε $(31, 0) \Omega$, που δεν είναι πολύ άσχημη, αφού αντιστοιχεί σε SWR περίπου 1,5. Ας εξετάσω όμως αν θα ήταν καλύτερο να βάλω παράλληλη αντίδραση. Αν κάνω τους υπολογισμούς, βρίσκω $R'=304 \Omega$. Αν δηλαδή χρησιμοποιήσω παράλληλη αντίδραση, θα καταλήξω σε εμπέδηση $(304, 0) \Omega$ που διαφέρει πολύ απ' τα $(50, 0) \Omega$ που είναι ο στόχος.

Η κατασκευή

Η κατασκευή να γίνει σε ένα μικρό μεταλλικό κουτί που θα περιέχει τους κονέκτορες (εισόδου και εξόδου) και την αντίδραση. Αν το κουτί πρόκειται να τοποθετηθεί σε εξωτερικό χώρο, να είναι καλά μονωμένο για να μη μπάζει. Για ελαχιστοποίηση των απωλειών το πηνείο να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διάμετρο από σύρμα εμαγιέ πάχους τουλάχιστον 1 χιλ. Για τη χωρητικότητα να χρησιμοποιηθεί συστοιχία κεραμικών πυκνωτών μεγάλης αντοχής σε τάση.

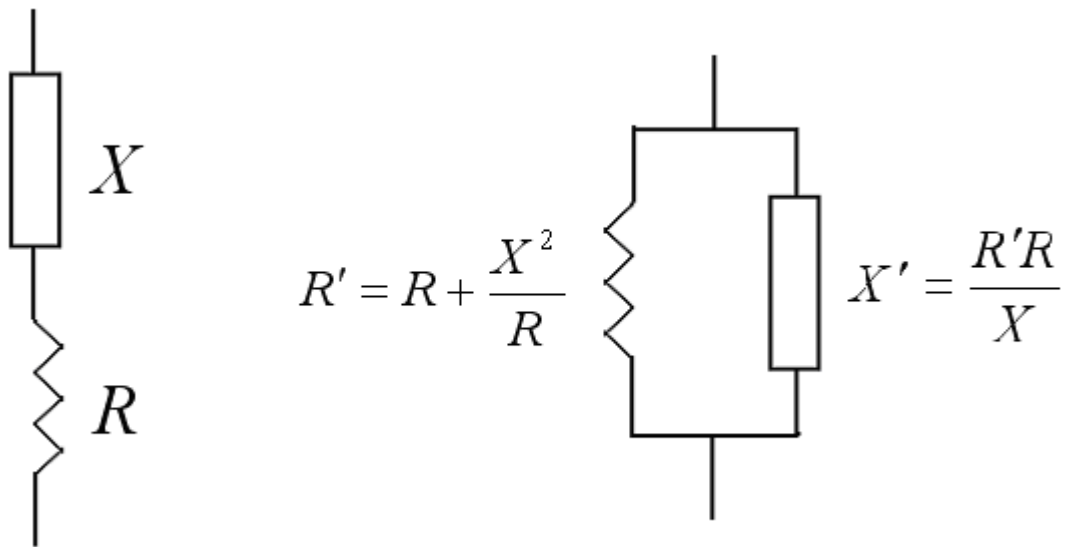
Η μέτρηση της αντίδρασης ενός πυκνωτή είναι καλύτερη από τον υπολογισμό της βάση της αναγραφόμενης τιμής του, επειδή η αναγραφόμενη τιμή μπορεί να διαφέρει αισθητά από την πραγματική. Με τον MFJ analyser μπορούμε να μετρήσουμε είτε τη χωρητικότητα, είτε την αντίδραση. Όταν μετράμε εμπεδήσεις με τον analyser, η τιμή της αντίδρασης είναι το X . Κανονικά το R θα έπρεπε να είναι 0, αλλά συνήθως έχει μια μικρή θετική τιμή.

Ο λόγος που συνιστώ συστοιχία πυκνωτών είναι ότι αν βάλουμε πχ 4 πυκνωτές 1kV σε σειρά, αποκτούμε μια χωρητικότητα 4kV. Αλλά η χωρητικότητα αυτή θα είναι το $\frac{1}{4}$ της αρχικής. Άρα χρειάζονται 4 τέτοιες συστοιχίες συνδεδεμένες παράλληλα ώστε η χωρητικότητα να παραμείνει ως έχει. Από την άλλη αν έχουμε πυκνωτές μεγάλης αντοχής (πχ 10 kV) αλλά μικρής χωρητικότητας, η παράλληλη συστοιχία προσθέτει τις χωρητικότητες.

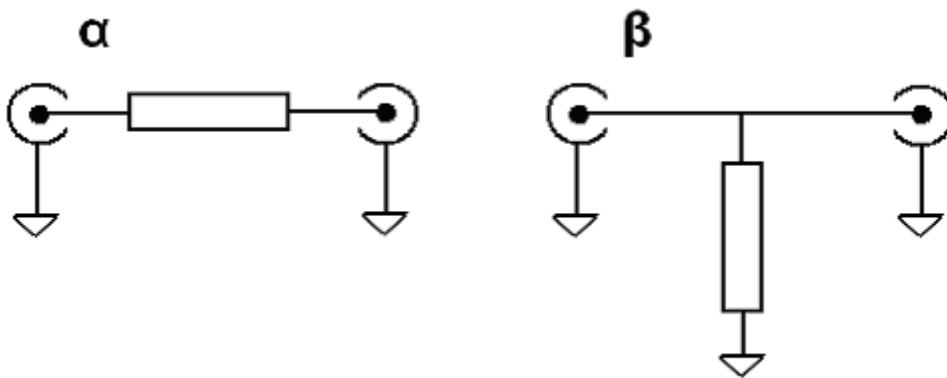
Ο προφανής λόγος που ένα tuner θέλει χωρητικότητες μεγάλης αντοχής είναι ότι αν η προσαρμογή είναι δύσκολη και η ισχύς μεγάλη, οι πυκνωτές μπορεί να εκραγούν. Αλλά ακόμα κι αν δεν εκραγούν κάτω από αντίξοες συνθήκες, οπωσδήποτε θα ζεσταθούν κι αυτό σημαίνει απώλεια ισχύος. Ο αραιόφυλλος μεταβλητός βέβαια δεν ζεσταίνεται (κι ακόμα πιο βέβαια δεν εκρήγνυται) αλλά κοστίζει σημαντικά κι έχει μεγάλο όγκο. Αν υπάρχει αραιόφυλλος, αλλά με μικρότερη χωρητικότητα απ' όση χρειάζεται, να χρησιμοποιηθεί και η χωρητικότητα να συμπληρωθεί με σταθερούς πυκνωτές παράλληλα με τον μεταβλητό.

Πάντως, αν θέλουμε να στείλουμε μια έξοδο 100 W στην κεραία μέσω ενός tuner μοναδικής αντίδρασης, δεν θα χρειαστούμε χωρητικότητες που ν' αντέχουν σε πολλά kV. Για παράδειγμα, ισχύς 100 W σε κεραία 50 Ω αντιστοιχεί σε τάση κορυφής (peak) 100 V. Αν κάνω το κύκλωμα του Σχήματος 2 (β) και η X' είναι χωρητικότητα, η τάση που θα συγκρατεί θα είναι ίση με την τάση εξόδου, δηλ. περίπου 100 V. Άρα μια χωρητικότητα 400 V~ θα έκανε πολύ καλή δουλειά. Αλλά αν κάνω το κύκλωμα του Σχήματος 2 (α) και η αντίδραση είναι χωρητικότητα, η τάση που θα συγκρατεί ενδέχεται να είναι μεγαλύτερη. Για την ακρίβεια θα είναι ανάλογη με το X της κεραίας. Αν, για παράδειγμα, το R της κεραίας είναι 50 Ω και το X είναι 100 Ω, η χωρητικότητα του tuner θα συγκρατεί $2 \times 100 \text{ V} = 200 \text{ V}$. Αν το X είναι 200 Ω θα συγκρατεί 400 V peak. Ας μη ξεχνάμε ότι οι αριθμοί αυτοί αναφέρονται σε ισχύ εξόδου 100 W.

Τα ίδια βέβαια ισχύουν κι αν η αντίδραση είναι αυτεπαγωγή αντί για χωρητικότητα. Αν αυτή αποτελείται από σύρμα με λεπτή μόνωση εμαγιέ, δεν πρέπει να έρχονται σε επαφή οι σπείρες.



Σχήμα 1. Μιά κεραία με εμπέδηση (R,X) είναι ισοδύναμη με οποιοδήποτε από τα παραπάνω 2 κυκλώματα όπου τα R και R' έχουν θετική τιμή και τα X και X' οποιαδήποτε τιμή. Αν η κεραία είναι συντονισμένη, ισοδυναμεί με μια απλή Ωμική αντίσταση R .



Σχήμα 2. Τυπες μοναδικής αντίδρασης σε συνδεσμολογία σειράς (α) και σε παράλληλη συνδεσμολογία (β).