

# Να κόψει κανείς ή να μην κόψει;

Του Νίκου Παναγιωτίδη, Φυσικού και Ραδιοερασιτέχνη (SV6 DBK)

Συντονίζω στους 145,510 MHz με στάσιμα 1,5:1. Να κοντύνω μερικά εκατοστά το καλώδιο μήπως καλύτερέψει; κι αν χειροτερέψει;

Η άποψη ότι μπορώ να πετύχω συντονισμό κόβοντας το καλώδιο στο κατάλληλο μήκος είναι διαδεδομένη. Πόσο όμως είναι αληθινή; Η απάντηση εξαρτάται από τις σχέσεις των τριών αντιστάσεων,  $r$ ,  $Z$  και  $R$ , δηλ. της αντίστασης εξόδου ( $r$ ) του πομπού, της χαρακτηριστικής αντίστασης ( $Z$ ) του καλωδίου και της αντίστασης της κεραίας ( $R$ ). Η τελευταία είναι γενικά μιγαδική αντίσταση, δηλ. έχει πραγματικό και φανταστικό μέρος. Ο αναγνώστης που δεν ξέρει μιγαδικούς αριθμούς ίσως μείνει εδώ με μια απορία. Θα πούμε απλά ότι μια μιγαδική αντίσταση είναι το άθροισμα μια πραγματικής (πραγματικές αντιστάσεις είναι οι συνηθισμένες Ωμικές) και μιας φανταστικής (φανταστικές είναι οι χωρητικές και οι επαγωγικές). Στα επόμενα όμως, χάριν απλότητας, η αντίσταση της κεραίας θα θεωρείται Ωμική.

Θα εξετάσουμε 2 περιπτώσεις:

## 1. $r=Z=R$

Είναι η πλέον τυπική περίπτωση. Ο πομπός έχει 50 Ω αντίσταση εξόδου, το καλώδιο είναι 50 Ω και η κεραία είναι 50 Ω. Εδώ τα στάσιμα θα είναι 1:1 και δεν υπάρχει λόγος να κόψω το καλώδιο.

## 2. Όλες οι άλλες περιπτώσεις, δηλ. $r \neq Z=R$ , $r=Z \neq R$ , $r \neq Z \neq R$

Στην περίπτωση  $r \neq Z=R$  αν η κεραία έχει αντίσταση  $R=50 \Omega$  και το καλώδιο  $Z=50 \Omega$ , τότε η κεραία μαζί με το καλώδιο θα είναι ένα σύστημα με αντίσταση 50 Ω. Με άλλα λόγια ο πομπός θα βλέπει στην έξοδό του μια αντίσταση 50 Ω όσο και να είναι το μήκος του καλωδίου. Αν δηλαδή με το αρχικό καλώδιο δεν υπάρχει προσαρμογή, είτε το κοντύνω είτε το μακρύνω δε θα δω βελτίωση. Τα στάσιμά μου όμως εδώ θα είναι 1:1! Τα στάσιμα είναι πάντα 1:1 όταν η αντίσταση του καλωδίου προσαρμόζει στην αντίσταση της κεραίας. Η κακή προσαρμογή σ' αυτή την περίπτωση είναι από την έξοδο του πομπού στο σύστημα καλωδίου – κεραίας. Το ανακλώμενο συμβαίνει στον κονέκτορα του πομπού, δηλ. η ισχύς γυρίζει προς τα μέσα στο σημείο του κονέκτορα. Αυτή όμως η ανάκλαση δεν φαίνεται στο στασιμόμετρο που είναι συνδεδεμένο μετά τον κονέκτορα.

Στην περίπτωση  $r=Z \neq R$ , αν ο πομπός έχει αντίσταση  $r=50 \Omega$  και το καλώδιο  $Z=50 \Omega$ , τότε ο πομπός μαζί με το καλώδιο θα είναι ένα σύστημα με αντίσταση 50 Ω. Αφού όμως το  $R$  της κεραίας είναι διαφορετικό, θα υπάρχει ανάκλαση του κύματος και επομένως το SWR (τα στάσιμα) δεν θα είναι 1:1. Όπως και προηγουμένως, αν αλλάξουμε το μήκος του καλωδίου δεν θα αλλάξει τίποτα αφού το σύστημα πομπού – καλωδίου θα συνεχίσει να είναι 50 Ω. Το SWR σ' αυτή την περίπτωση βρίσκεται ως εξής: Αν  $R > Z$ ,  $SWR=R/Z$ . Αν  $R < Z$ ,  $SWR=Z/R$ . Για παράδειγμα, ένα ιδανικό ανοικτό δίπολο  $\lambda/2$  έχει αντίσταση περίπου 75 Ω. Με καλώδιο 50 Ω, το SWR είναι 1,5 ανεξάρτητα απ' το μήκος του καλωδίου.

Η τρίτη όμως περίπτωση,  $r \neq Z \neq R$  έχει πιο πολύ ενδιαφέρον. Θα εξετάσουμε τι αποτέλεσμα έχει η μεταβολή του μήκους του καλωδίου τόσο στα στάσιμα όσο και στην ισχύ σ' αυτή την περίπτωση.

Ο συντελεστής ανάκλασης είναι μια ποσότητα που έχει τιμή σε κάθε σημείο του καλωδίου που συνδέει την κεραία με τον πομπό. Είναι μιγαδική ποσότητα, αλλά εμείς θ' ασχοληθούμε μόνο με το μέτρο του που είναι θετικός αριθμός κι αυτό θα ονομάζουμε στο εξής συντελεστή ανάκλασης.

Το SWR εξαρτάται απ' το συντελεστή ανάκλασης. Όταν δεν έχουμε ανάκλαση, ο συντελεστής ανάκλασης είναι 0 και το SWR=1. Όσο περισσότερη είναι η ανάκλαση, τόσο μεγαλύτερος ο συντελεστής ανάκλασης και η μέγιστη τιμή του είναι 1. Όταν ο συντελεστής ανάκλασης είναι 1, τότε το άκρο του καλωδίου είναι είτε ανοικτό (δεν έχουμε συνδέσει

τίποτα) είτε βραχυκυκλωμένο. Όταν ο συντελεστής ανάκλασης αυξάνει από το 0 στο 1, το SWR αυξάνει από το 1 στο  $\infty$  (άπειρο).

Όταν το καλώδιο προσαρμόζει στην κεραία, ο συντελεστής ανάκλασης είναι μηδέν σ' όλο το μήκος του καλωδίου. Όταν δεν υπάρχει προσαρμογή, ο συντελεστής ανάκλασης έχει κάποια τιμή  $>0$  στη σύνδεση του καλωδίου με την κεραία και η τιμή αυτή μειώνεται με ένα ρυθμό που εξαρτάται από το συντελεστή απόσβεσης του καλωδίου καθώς πάμε από την κεραία στον πομπό. Σε περίπου πλήρη απόσβεση, ο συντελεστής ανάκλασης σχεδόν μηδενίζεται και το SWR μειώνεται προς τη μονάδα. Άρα, με την αύξηση του μήκους του καλωδίου, το SWR στην έξοδο του πομπού μειώνεται με ρυθμό που αυξάνει με το συντελεστή απωλειών του καλωδίου. Είναι λοιπόν λάθος να περιμένω να βρώ το μήκος καθόδου που ελαχιστοποιεί τα στάσιμα.

Η άποψη όμως ότι, λόγω της απόσβεσης του καλωδίου, όσο μακρύτερο το καλώδιο τόσο μικρότερη η εκπομπή, δεν ισχύει στην περίπτωση  $r \neq Z \neq R$ . Ο λόγος; Ο λόγος (που είναι και το αξιοσημείωτο της περίπτωσης που εξετάζουμε) είναι ότι: Στην περίπτωση  $r \neq Z \neq R$  η εκπεμπόμενη ισχύς εξαρτάται από το μήκος της καθόδου με περιοδικό τρόπο. (Το συμπέρασμα αυτό είναι ακριβές μόνο αν θεωρήσουμε αμελητέα την απόσβεση. Αλλιώς ισχύει κατά προσέγγιση).

Αν και είναι αρκετά διαδεδομένο ότι με  $SWR > 1$  δεν μπορώ να βγάλω όλη την ισχύ έξω, αυτή η άποψη είναι άστοχη σε 2 συγκεκριμένες περιπτώσεις: Η μια είναι όταν η χαρακτηριστική αντίσταση του καλωδίου ακολουθεί τη σχέση  $Z^2 = rR$  και το μήκος του είναι ίσο με το  $1/4$  του μήκους κύματος πολλαπλασιασμένο με έναν περιττό (δηλ. μονό) αριθμό. Σ' αυτή την περίπτωση το SWR θα είναι ίσο με  $R/Z$  (ή  $Z/R$ , όποιο είναι μεγαλύτερο) και, αν οι απώλειες του καλωδίου είναι αμελητέες, θα εκπέμπεται ολόκληρη η ισχύς. Θα υπάρχει δηλ. προσαρμογή, αλλά με  $SWR > 1$ . Για παράδειγμα, αν η κεραία έχει  $R = 100 \Omega$  και η έξοδος του πομπού είναι  $r = 50 \Omega$ , τότε χρειαζόμαστε καλώδιο με  $Z = 71,7 \Omega$  ( $\sqrt{rR} = 71,7 \Omega$ ) και μήκος  $1/4$  ή  $3\lambda/4$  ή  $5\lambda/4$  κοκ (σαν λ εννοείται το μήκος κύματος μέσα στο καλώδιο, δηλ. το κανονικό μήκος κύματος επί το συντελεστή ταχύτητας). Βέβαια, αν οι απώλειες του καλωδίου δεν είναι αμελητέες, θα εκπέμψω μικρότερη ισχύ απ' ότι αν είχα  $r = Z = R$ .

Η δεύτερη από τις 2 περιπτώσεις είναι όταν ισχύει  $r = R$ . Τότε, αν η κάθοδος είναι πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος και έχει οποιαδήποτε χαρακτηριστική αντίσταση  $Z$ , μπορώ πάλι να πετύχω προσαρμογή με  $SWR > 1$ . Αν πχ το  $R$  είναι  $50 \Omega$  και το  $Z = 75 \Omega$ , τότε  $SWR = Z/R = 1,5$  αλλά, αν η κάθοδος έχει μήκος ακέραιος  $\times \lambda/2$ , θα υπάρχει προσαρμογή. Οι απώλειες κατά τη διάδοση θα είναι βέβαια λίγο περισσότερες απ' ότι αν και η κεραία και το  $Z$  ήταν  $50 \Omega$ .

Από τα παραπάνω θα μπορούσε να οδηγηθεί κανείς στην σκέψη ότι θα ήταν αναμενόμενη κάποια εξάρτηση της εκπεμπόμενης ισχύος από το μήκος του καλωδίου, ακόμα κι αν οι συνθήκες που δώσαμε παραπάνω, δηλ.  $Z^2 = rR$  και  $r = R$  δεν ίσχυαν. Όντως η εκπεμπόμενη ισχύς εξαρτάται από το μήκος της καθόδου. Θεωρώντας αμελητέες τις απώλειες στο καλώδιο, ο τύπος είναι:

$$P = P_0 \frac{1 + \tan^2(\phi)}{1 + \alpha^2 \tan^2(\phi)}$$

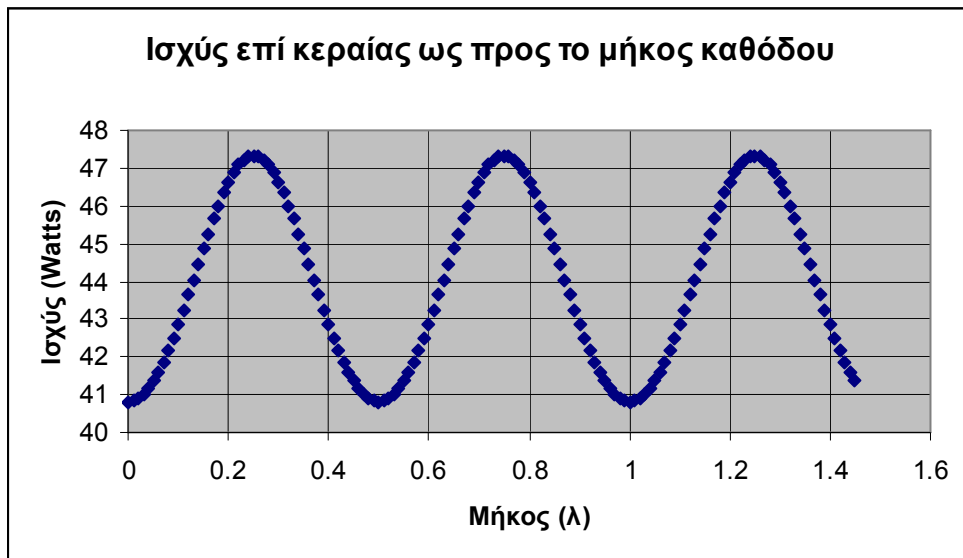
όπου το μήκος περιέχεται στη φάση  $\phi$ . Το  $\phi$  είναι η μεταβολή φάσης του κύματος από την αρχή μέχρι το τέλος του καλωδίου. Η αλλιώς  $\phi$  είναι  $2\pi$  φορές το πλήθος των μηκών κύματος μέσα στο καλώδιο:

$$\phi = 2\pi \frac{l}{\lambda} \quad (l \text{ το μήκος του καλωδίου}).$$

$P_0$  είναι η ισχύς που εκπέμπουμε αν η κάθοδος έχει μηδενικό μήκος (αν δηλ. συνδέσουμε τον πομπό στην κεραία κατευθείαν). Η συνάρτηση  $\tan(\phi)$  είναι η εφαπτομένη της φωνιάς  $\phi$ . Τέλος, το  $\alpha$  εξαρτάται από τις τρεις αντιστάσεις  $r$ ,  $Z$  και  $R$ :

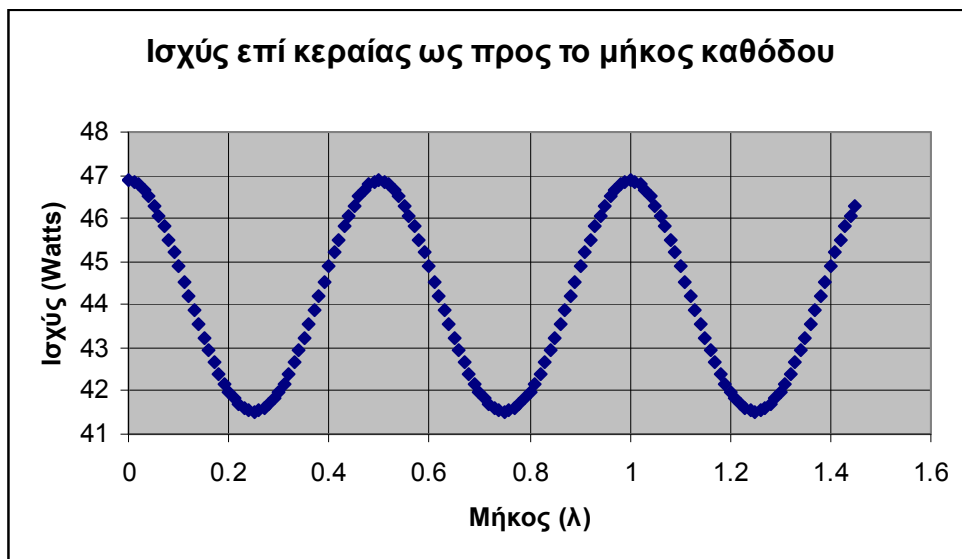
$$\alpha = \frac{rR + Z^2}{(r + R)Z}$$

Θα μπορούσε κανείς να χειριστεί εύκολα αυτόν τον τύπο, μέσω του excel για παράδειγμα, και να κάνει γραφικές παραστάσεις. Εδώ θα παρουσιάσω μια γραφική παράσταση που δίνει την ισχύ επί κεραίας ως προς το ηλεκτρικό μήκος του καλωδίου (δηλ. τον αριθμό των πλήρων κυμάτων κατά μήκος του καλωδίου).



Στο παραπάνω διάγραμμα ένα καλώδιο με  $Z=50 \Omega$ , συνδέει ένα πομπό με  $r=40 \Omega$  με μια κεραία με  $R=100 \Omega$ . Υποτίθεται ότι ο πομπός δίνει  $50 \text{ W}$  σε άριστη προσαρμογή. Αν ένα φορτίο  $100 \Omega$  συνδέονταν κατευθείαν σε μια πηγή  $40 \Omega$ , θα είχαμε, όπως βλέπουμε και στο διάγραμμα,  $P_0=41 \text{ Watts}$  περίπου. Αν όμως συνδέονταν μέσω της γραμμής μεταφοράς, τότε, για κάποια συγκεκριμένα μήκη της γραμμής, η ισχύς θα ξεπερνούσε τα  $47 \text{ Watts}$ ! Δηλ. αν και το SWR είναι  $2:1$  ( $R/Z=2$ ), αν κόψουμε τη γραμμή στο κατάλληλο μήκος, μπορούμε να βγάλουμε στον αέρα όλη σχεδόν την ισχύ του πομπού! Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μέγιστη ισχύς βγαίνει όταν το μήκος έχει ελάχιστη τιμή  $0,25 \lambda$ . Το μήκος της καθόδου πρέπει δηλαδή να είναι  $\lambda/4+n\lambda/2$  ( $n$  ακέραιος αριθμός).

Από την άλλη μεριά όμως, αν και η αντίσταση εξόδου του πομπού και η αντίσταση της κεραίας είναι μεγαλύτερες του  $Z$ , τότε το καλώδιο πρέπει να είναι  $n\lambda/2$  όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα ισχύος ως προς το μήκος όπου  $r=60 \Omega$ ,  $Z=50 \Omega$  και  $R=100 \Omega$ .



Εδώ παρατηρούμε ότι η μέγιστη ισχύς που μπορούμε να εκπέμψουμε είναι σχεδόν  $47 \text{ W}$  που την παίρνουμε με μήκος καλωδίου είτε  $0$  είτε κάποιο πολλαπλάσιο του μισού μήκους

κύματος. Αν όμως το μήκος του καλωδίου είναι  $\lambda/4$  μεγαλύτερο από το άριστο μήκος, παίρνουμε 41,5 W περίπου! Το SWR μας θα είναι πάντα 2.

Το ενδιαφέρον και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις είναι ότι, αν και τα στάσιμα είναι 2:1, παίρνουμε στη μια περίπτωση 47,5 W και στην άλλη 47 W ισχύ αρκεί να κόψουμε το καλώδιο στο κατάλληλο μήκος. Αν η αντίσταση εξόδου του πομπού μας όμως είχε την εργοστασιακή τιμή των 50 Ω, θα παίρναμε 44,4 W στην κεραία ανεξαρτήτως του μήκους του καλωδίου. Το ευτύχημα είναι ότι συνήθως η αντίσταση εξόδου ενός πομπού διαφέρει αισθητά από τα υποτιθέμενα 50 Ω. Έτσι, αν είναι μικρότερη των 50 Ω, για να πάρουμε τη μέγιστη ισχύ θέλουμε μια κάθοδο μήκους όσο το  $\lambda/4$  επί κάποιο περιττό αριθμό. Και αν είναι μεγαλύτερη των 50 Ω, η κάθοδος πρέπει να είναι  $\lambda/4$  επί κάποιο άρτιο αριθμό.

Σ' όλα τα παραπάνω υποθέσαμε ότι η κεραία είναι 100 Ω. Αν η κεραία είχε  $Z < 50 \Omega$ , για παράδειγμα 25 Ω, όλα τα συμπεράσματά μας θα αντιστρέφονταν. Με βάση τις τιμές των  $r$ ,  $Z$  και  $R$ , όμως, και χρησιμοποιώντας τους τύπους που δώσαμε (και ξέροντας το excel, το origin ή κάποιο παρόμοιο πρόγραμμα), μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για όλες τις δυνατές περιπτώσεις.

Αλλά ας έρθουμε και λίγο στα πρακτικά προβλήματα. Η ακριβής τιμή της αντίστασης εξόδου του πομπού είναι λίγο δύσκολο να βρεθεί. Το ίδιο ισχύει και για την αντίσταση της κεραίας που έχει επί πλέον το πρόβλημα να είναι μιγαδική (πχ  $39 + j110 \Omega$ ). Όσον αφορά τις γραμμές μεταφοράς, μια γραμμή των 50 Ω μπορεί να μην είναι ακριβώς 50 Ω αλλά εκεί γύρω. Και για να κόψουμε τη γραμμή σε ένα μήκος που έχει δεδομένη σχέση ως προς το μήκος κύματος, μας χρειάζεται ο συντελεστής ταχύτητας του καλωδίου που πρέπει είτε να τον μετρήσουμε ή να τον υπολογίσουμε με βάση τις εξισώσεις που τον συνδέουν με τη χαρακτηριστική αντίσταση και τη χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους (C). Όλα αυτά είναι, βέβαια, δύσκολο να γίνουν. Το προτιμότερο είναι να ξεκινήσουμε με ένα καλώδιο λίγο μεγαλύτερο απ' ότι μας χρειάζεται και να ακολουθήσουμε τη μέθοδο «κόβω και μετράω». Δηλ. να μετρήσουμε την ισχύ στο βαττόμετρο στο αρχικό μήκος, μετά να κόψουμε ένα μικρό κομμάτι, να ξαναμετρήσουμε κοκ. Πρέπει να είμαστε έτοιμοι να αντιμετωπίσουμε το ενδεχόμενο της ελάττωσης της ισχύος μετά τα πρώτα κοψίματα, αλλά, αν έχουμε υπομονή, θα έρθει και η αύξηση. Η δουλειά μπορεί να είναι αρκετή, αλλά θα είναι μια ευχάριστη εμπειρία σε όποιον αρέσουν οι πειραματισμοί.

Υπάρχει όμως ένα πρόβλημα όσον αφορά τη μέτρηση της ισχύος με ένα συνηθισμένο βαττόμετρο. Όταν υπάρχουν στάσιμα κύματα, δίνει λάθος μέτρηση της ισχύος. Ενδέχεται ακόμα και η ενδείξεις μεταβολής της ισχύος από τη μια μέτρηση στην άλλη να μην είναι σωστές. Αυτό συμβαίνει επειδή η ένδειξη της ισχύος ενός βαττομέτρου επηρεάζεται και από το SWR, αλλά και από τυχόν παρασιτικά ρεύματα (common mode currents) που υπάρχουν στη γραμμή και αλλάζουν από τη μία μέτρηση στην άλλη. Έτσι θα ήταν ασφαλέστερο, αντί να μετράμε κάθε φορά την ισχύ, να μετράμε την ένταση του πεδίου που εκπέμπει η κεραία χρησιμοποιώντας ένα πεδιόμετρο. Αν έχουμε ένα παλμογράφο που να πιάνει μερικές δεκάδες MHz και τον συνδέσουμε με μια απ' τις κεραίες μας, τότε θα μπορούσαμε να δούμε στην οθόνη του το σήμα που θα εκπέμπει η άλλη κεραία που θα συνδέσουμε στον πομπό μας. Δηλαδή θα χρησιμοποιήσουμε τον παλμογράφο σαν πεδιόμετρο. Αν δεν έχουμε δεύτερη κεραία, μπορούμε να φτιάξουμε μια πρόχειρη. Κατεβάζουμε πχ ένα ομοαξονικό καλώδιο που στη μία άκρη του κοντά στην κεραία που εκπέμπει συνδέουμε μια επαγωγή. Η άλλη άκρη του θα είναι συνδεδεμένη στον παλμογράφο. Το σύστημα αυτό θα χρησιμεύσει σαν πεδιόμετρο. Θα μπορούσαμε ακόμα να χρησιμοποιήσουμε σαν πεδιόμετρο το σηματομέτρο του δέκτη κάποιου φίλου μας που θα συνεργάζεται στα πειράματά μας.

Αν, παρά το γεγονός ότι έχουμε πολλά στάσιμα, τα πειράματά μας δεν δείξουν μεταβολή της ισχύος εκπομπής με το μήκος του καλωδίου, αυτό δεν πρέπει να μας φανεί παράξενο. Σημαίνει απλά ότι είτε η αντίσταση εξόδου του πομπού, είτε η αντίσταση της κεραίας, ταιριάζει με τη χαρακτηριστική αντίσταση της καθόδου. Αν, μετά την πρώτη ελάττωση του μήκους, δούμε και ελάττωση της ισχύος, τότε πιθανότατα θα δούμε και αύξηση αν συνεχίσουμε να ελαττώνουμε κανονικά. Εκτός κι αν το αρχικό μήκος ήταν συμπτωματικά μήκος μέγιστης ισχύος, θα βρούμε ότι με το κατάλληλο μήκος θα πάρουμε ισχύ μεγαλύτερη της αρχικής.

Πάντως, μεταξύ μας, ίσως είναι κουτό να κάνει κανείς όλη αυτή τη δουλειά μόνο και μόνο για να βγάλει δύο ή τρία βαττ παραπάνω. Σε κάποιο άλλο άρθρο ίσως δώσουμε πιο πρακτικούς τρόπους για να πετύχουμε αυτό το αποτέλεσμα.

Ο λόγος που έγραψα αυτό το άρθρο ήταν το «μικροτεχνικό» άρθρο του 117 τεύχους στο οποίο ο SV8 YM ασχολείται (και αντικρούει) την άποψη ότι με κατάλληλο μήκος καλωδίου μπορώ να βελτιώσω το συντονισμό από την άποψη ότι μπορώ να ελαχιστοποιήσω το SWR. Πρόκειται για πλάνη. Αιτίες διαφορετικές από την καλύτερη προσαρμογή μπορεί να κάνουν το στασιμόμετρο να αλλάζει ένδειξη με αλλαγή του μήκους του καλωδίου. Οι κυριότερη απ' αυτές είναι ένα παρασιτικό ρεύμα του καλωδίου, το λεγόμενο common mode current, που έχει σαν αιτία την κακή ισοστάθμιση της καθόδου με την κεραία. Αν δεν υπάρχουν common mode currents και οι συνθήκες πλησιάζουν τις ιδανικές, το SWR ενός ιδανικού καλωδίου είναι ανεξάρτητο του μήκους. Αν συνυπολογίσουμε και τις απώλειες της καθόδου, το SWR ελαττώνεται σταθερά με το μήκος. Ας μη παραπλανούμαστε λοιπόν από τις ενδείξεις του στασιμόμετρου και να μην το εμπιστευόμαστε τόσο όταν ψάχνουμε να βρούμε το βέλτιστο μήκος καθόδου.

Ευχές για πολλά και όμορφα QSO. SV6 DBK