ΑΣΚΗΣΗ 5

ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ RLC ΣΕ ΣΕΙΡΑ

(Σημειώσεις από Βιβλίο R. SERWAY)

1. **ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

33.5 ΚΥΚΛΩΜΑ *RLC* ΕΝ ΣΕΙΡΑ

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια μελετήσαμε κυκλώματα στα οποία μία γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος είναι συνδεδεμένη με αντίσταση ή με πηνίο ή με πυκνωτή. Θα μελετήσουμε τώρα την περίπτωση κατά την οποία οι τρεις παραπάνω συνιστώσες είναι συνδεδεμένες εν σειρά μεταξύ τους και με τη γεννήτρια.

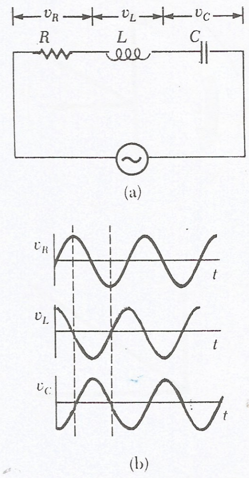
Στο Σχήμα 33.8a βλέπουμε ένα κύκλωμα αποτελούμενο από μια αντίσταση, ένα πηνίο και έναν πυκνωτή συνδεδεμένα εν σειρά. Στα άκρα τού κυκλώματος έχουμε συνδέσει μια γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης η οποία μεταβάλλεται αρμονικά ως προς τον χρόνο, όπως και προηγουμένως. Υποθέτουμε λοιπόν ότι η εφαρμοζόμενη τάση έχει τη μορφή

$$v = V_m \sin \omega t$$

και ότι το ρεύμα μεταβάλλεται ως

$$i = I_m \sin(\omega t - \phi)$$

Η ποσότητα ϕ είναι η **διαφορά φάσης** ανάμεσα στο ρεύμα και στην εφαρμοζόμενη τάση. Στόχος μας είναι να υπολογίσουμε το ϕ και το I_m. Στο Σχήμα 33.8b βλέπουμε την ως προς τον χρόνο εξάρτηση τής τάσης στα άκρα καθεμιάς συνιστώσας τού κυκλώματος και τη σχετική διαφορά φάσης τους.



Σχήμα 33.8 (a) Κύκλωμα *RLC* αποτελούμενο από μια αντίσταση, ένα πηνίο και έναν πυκνωτή, συνδεδεμένα εν σειρά μεταξύ τους και με μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος. (b) Οι σχετικές φάσεις τάσης στα άκρα τών διαφόρων συνιστωσών τού κυκλώματος (a).

Για να λύσουμε το πρόβλημα, πρέπει να κατασκευάσουμε πρωτα και να αναλύσουμε τα περιστρεφόμενα διανύσματα που περιγράφουν το κύκλωμα. Να σημειωθεί πρώτα από όλα ότι, αφού όλες οι συνιστώσες τού κυκλώματος είναι συνδεδεμένες εν σειρά, το ρεύμα από το οποίο διαρρέεται το κύκλωμα είναι το ίδιο σε κάθε στιγμή. Δηλαδή, *σε ένα εν σειρά κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος, το ρεύμα από το οποίο διαρρέεται το κύκλωμα αυτό έχει παντού το ίδιο πλάτος και την ίδια φάση*. Γνωρίζουμε όμως από τα προηγούμενα υποκεφάλαια ότι η τάση στα άκρα τών διαφόρων συνιστωσών τού κυκλώματος έχει *διαφορετικά* πλάτη και *διαφορετικές* φάσεις, όπως άλλωστε βλέπουμε στο Σχήμα 33.9. Γνωρίζουμε επίσης ότι το ρεύμα και η τάση στα άκρα μιας αντίστασης έχουν την ίδια φάση (Σχήμα 33.9a), στα άκρα όμως τού πηνίου η φάση τής τάσης προηγείται τής φάσης τού ρεύματος κατά 90°, δηλαδή η διαφορά φάσης τους είναι 90° (Σχήμα 33.9b). Αντίθετα, η τάση στους οπλισμούς τού πυκνωτή έπεται τού ρεύματος κατά 90° (Σχήμα 33.9c). Χρησιμοποιούμε αυτές τις τιμές τών σχετικών φάσεων και γράφουμε ότι οι στιγμιαίες τάσεις στα άκρα καθεμιάς από τις τρεις συνιστώσες τού κυκλώματος είναι

$$v_R = I_m R \sin \omega t = V_R \sin \omega t \tag{33.21}$$

$$v_L = I_m X_L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = V_L \cos \omega t \tag{33.22}$$

$$v_C = I_m X_C \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -V_C \cos \omega t \tag{33.23}$$

όπου τα V_R, V_L και V_C είναι *τα πλάτη* (δηλαδή οι μέγιστες τιμές) τών τάσεων στα άκρα καθεμιάς από τις αντίστοιχες συνιστώσες και

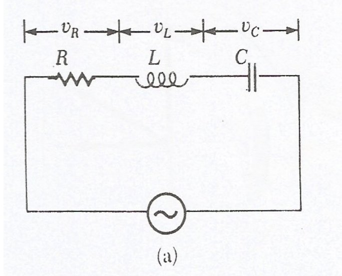
$$V_R = I_m R \tag{33.24}$$

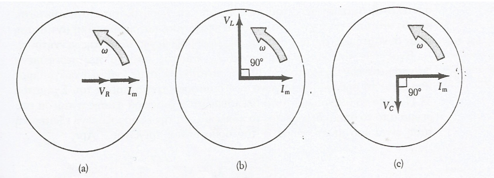
$$V_L = I_m X_L \tag{33.25}$$

$$V_C = I_m X_C \tag{33.26}$$

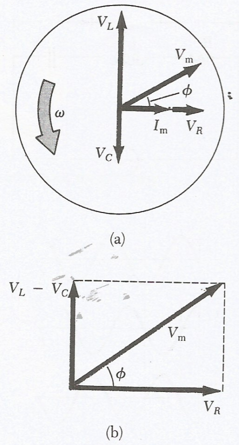
Να σημειωθεί όμως ότι η στιγμιαία τάση v ανάμεσα στην εν σειρά σύνδεση τών τριών συνιστωσών ισούται με το άθροισμα τών επιμέρους τιμών τους, δηλαδή

$$v = v_R + v_L + v_C \tag{33.27}$$





Σχήμα 33.9 Η διαφορά φάσης ανάμεσα στη μέγιστη τάση και στο μέγιστο ρεύμα για (a) αντίσταση, (b) πηνίο και (c) πυκνωτή.



Σχήμα 33.10 Διαγράμματα περιστρεφόμενων διανυσμάτων για το εν σειρά *RLC* κύκλωμα τού Σχήματος 33.8. Να σημειωθεί ότι το περιστρεφόμενο διάνυσμα V_R έχει την *ίδια φάση* με το περιστρεφόμενο διάνυσμα I_m, ενώ το περιστρεφόμενο διάνυσμα V_L *προηγείται* τού I_m κατά 90° και το V_C *έπεται* τού I_m κατά 90°. Η συνισταμένη τάση V_m σχηματίζει γωνία ϕ με το I_m. (b) Απλούστευση τού διαγράμματος τών περιστρεφόμενων διανυσμάτων τού μέρους (a).

Αν και μπορούμε να λύσουμε το πρόβλημά μας συνεχίζοντας αναλυτικά, είναι πιο εύκολο να υπολογίσουμε το παραπάνω άθροισμα με τη χρησιμοποίηση τής τεχνικής τών περιστρεφόμενων διανυσμάτων.

Αφού πάντοτε το ίδιο ρεύμα διαρρέει όλο το κύκλωμα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνισταμένη τών τριών περιστρεφόμενων διανυσμάτων τάσεων τού Σχήματος 33.9 ως προς την κατεύθυνση τού ρεύματος. Ας μην ξεχνάμε ότι στην ωμική αντίσταση το ρεύμα και η τάση βρίσκονται σε φάση. Έτσι κατασκευάζουμε το διάγραμμα τού Σχήματος 33.10a, όπου ένα και μόνο περιστρεφόμενο διάνυσμα *αρκεί* για την περιγραφή τού ρεύματος I_m στην καθεμιά συνιστώσα τού κυκλώματος. Απλουστεύουμε το διάγραμμα τού Σχήματος 33.10a προσθέτοντας τα $\mathbf{V}_L$ και $\mathbf{V}_C$ και κατασκευάζουμε το διάγραμμα τού Σχήματος 33.10b. Από αυτό βλέπουμε ότι η διανυσματική συνισταμένη τών πλατών τάσεων V_R, V_L και V_C ισούται με το πλάτος V_m (δηλαδή την μέγιστη τιμή) τής εφαρμοζόμενης εξωτερικής ΗΕΔ. Το περιστρεφόμενο διάνυσμα V_m σχηματίζει γωνία ϕ με το περιστρεφόμενο διάνυσμα τού ρεύματος I_m (το οποίο έχει *πάντοτε* την ίδια κατεύθυνση με το V_R). Να σημειωθεί ότι, αφού τα διανύσματα V_L και V_C έχουν διαφορά φάσης +90° και −90° με το V_R, είναι συγγραμμικά και αντίθετα και η συνισταμένη τους $V_L - V_C$ είναι κάθετη στο V_R. Από το ορθογώνιο τρίγωνο, λοιπόν, τού Σχήματος 33.10b βλέπουμε ότι

$$V_m = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} = \sqrt{(I_m R)^2 + (I_m X_L - I_m X_C)^2}$$

$$V_m = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \tag{33.28}$$

όπου $X_L = \omega L$ και $X_C = 1/\omega C$. Μπορούμε, λοιπόν να εκφράσουμε το μέγιστο ρεύμα ως

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

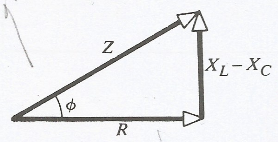
Ορίζουμε ότι η **εμπέδηση** ή ***σύνθετη αντίσταση*** (impedance), Z, τού κυκλώματος ισούται με

$$Z \equiv \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \tag{33.29}$$

Ξαναγράφουμε λοιπόν την Εξίσωση 33.28 στη μορφή

$$V_m = I_m Z \tag{33.30}$$

$\cos\phi = \frac{R}{Z}$



Σχήμα 33.11 Το τρίγωνο τών διαφόρων αντιστάσεων ενός κυκλώματος *RCL*. Από το ορθογώνιο αυτό τρίγωνο προκύπτει ότι $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

Μονάδα τής εμπέδησης στο SI είναι το ohm. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι *η Εξίσωση 33.30 είναι γενικευμένη μορφή τού νόμου τού Ohm για κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος.* Να σημειωθεί ότι το ρεύμα από το οποίο διαρρέεται το κύκλωμα εξαρτάται από την ωμική αντίσταση, από τον συντελεστή αυτεπαγωγής τού πηνίου, από τη χωρητικότητα τού πυκνωτή, καθώς και από τη συχνότητα, αφού η επαγωγική και η χωρητική αντίσταση είναι συναρτήσεις τής συχνότητας τής εφαρμοζόμενης τάσης τής γεννήτριας.

Βγάζουμε τον κοινό παράγοντα I_m καθενός από τα περιστρεφόμενα διανύσματα τού Σχήματος 33.10 και κατασκευάζουμε ένα νέο διάγραμμα, που είναι το ορθογώνιο τρίγωνο τών διαφόρων αντιστάσεων τού Σχήματος 33.11. Από το διάγραμμα αυτό βλέπουμε ότι η διαφορά φάσης ανάμεσα στο ρεύμα από το οποίο διαρρέεται το κύκλωμα και την εφαρμοζόμενη εξωτερική τάση είναι ίσο με τη γωνία ϕ τού ορθογώνιου τριγώνου. Άρα

Φάση ϕ

$$\tan\phi = \frac{X_L - X_C}{R} \tag{33.31}$$

33.7 ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ *RLC* ΕΝ ΣΕΙΡΑ

Όταν η ένταση τού ρεύματος που διαρρέει ένα κύκλωμα *RLC* έχει τη μέγιστη τιμή του, τότε λέμε ότι έχουμε *συντονισμό*, κατ' αναλογίαν με το αντίστοιχο φαινόμενο τής Μηχανικής. Γνωρίζουμε ότι η ενεργός ένταση τού ρεύματος είναι

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{Z} \tag{33.37}$$

όπου Z είναι η εμπέδηση (σύνθετη αντίσταση). Θέτουμε στην 33.37 την Εξίσωση 33.29 και παίρνουμε

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \tag{33.38}$$

Αφού η εμπέδηση είναι συνάρτηση τής συχνότητας ω τής γεννήτριας, έπεται ότι και το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα *RLC* εξαρτάται από την ω. Ας σημειωθεί ότι το ρεύμα αποκτά τη μέγιστη τιμή του όταν $X_L = X_C$, όταν δηλαδή $Z = R$. Η κυκλική συχνότητα ω_0 στην οποία συμβαίνει αυτό ονομάζεται **συχνότητα συντονισμού** τού κυκλώματος. Για να προσδιορίσουμε την ω_0, χρησιμοποιούμε τη συνθήκη $X_L = X_C$, οπότε

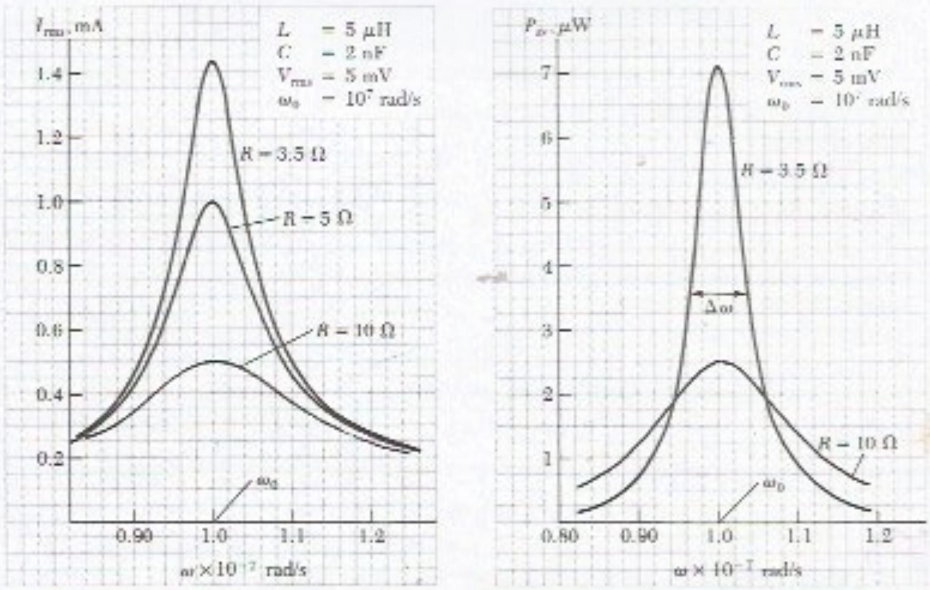
$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

Συχνότητα συντονισμού

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{33.39}$$

Να σημειωθεί ότι η συχνότητα αυτή αντιστοιχεί στη φυσική συχνότητα (ιδιοσυχνότητα) τής ταλάντωσης ενός κυκλώματος *LC* (Υποκεφάλαιο 32.5). Βλέπουμε λοιπόν ότι το ρεύμα που διαρρέει ένα εν σειρά κύκλωμα *RLC* αποκτά τη *μέγιστη* τιμή του όταν η συχνότητα τής εφαρμοζόμενης τάσης ισούται με τη φυσική συχνότητα ταλάντωσης, η οποία εξαρτάται μόνον από τα L και C. Τέλος, στη συχνότητα αυτή το ρεύμα είναι σε φάση με την εφαρμοζόμενη τάση.

Στο Σχήμα 33.13a υπάρχει γραφική παράσταση τής ενεργού έντασης τού



Σχήμα 33.13 Γραφική παράσταση τής ενεργού έντασης τού ρεύματος ως προς τη συχνότητα για κύκλωμα *RLC* εν σειρά. Οι τρεις καμπύλες αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές τιμές τής *R*. Να σημειωθεί ότι το ρεύμα αποκτά τη μέγιστη τιμή του όταν η συχνότητα ισούται με τη συχνότητα συντονισμού ω_0. (b) Γραφική παράσταση τής μέσης ισχύος ως προς τη συχνότητα για κύκλωμα *RLC* εν σειρά. Οι δύο καμπύλες αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικές τιμές τής *R*.

ρεύματος ως προς την συχνότητα για ένα εν σειρά κύκλωμα *RLC*. Τα δεδομένα που έχουν παρασταθεί προϋποθέτουν σταθερή ενεργό τάση 5 mV, $L = 5\ \mu$H, και $C = 2$nF. Οι τρεις καμπύλες αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές τιμές τής αντίστασης *R*. Προσέξτε ότι, και για τις τρεις περιπτώσεις, το ρεύμα αποκτά τη μέγιστη τιμή του στη συχνότητα συντονισμού ω_0 και ότι, καθώς η αντίσταση ελαττώνεται, το άνοιγμα τών καμπυλών στενεύει (οι καμπύλες γίνονται περισσότερο οξείες).

Διερευνώντας την Εξίσωση 33.38 καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στον συντονισμό το ρεύμα θα τιναχθεί στο άπειρο εάν $R = 0$. Στην πραγματικότητα, όλα τα κυκλώματα έχουν κάποια αντίσταση και αυτή περιορίζει την τιμή τού ρεύματος. Γνωρίζουμε ότι το φαινόμενο τού συντονισμού απαντά στη Μηχανική. Λογουχάρη, όταν ταλαντώσουμε με τη συχνότητα συντονισμού ένα σύστημα μάζας - ελατηρίου χωρίς τριβές, το πλάτος ταλάντωσης αυξάνεται, όπως μελετήσαμε στο Κεφάλαιο 13. Όπως βλέπουμε στο Δοκίμιο τού Κεφαλαίου 13, η γέφυρα Tacoma Narrows καταστράφηκε από ταλαντώσεις μεγάλου πλάτους.

Αξίζει να υπολογίσουμε τη μέση ισχύ ενός εν σειρά κυκλώματος *RLC* συναρτήσει τής συχνότητας ω. Χρησιμοποιούμε την Εξίσωση 33.36 μαζί με την 33.37 και βρίσκουμε

$$P_{av} = I_{rms}^2 R = \frac{V_{rms}^2}{Z^2} R = \frac{V_{rms}^2 R}{R^2 + (X_L - X_C)^2} \tag{33.40}$$

Αλλά $X_L = \omega L$, $X_C = 1/\omega C$ και $\omega_0{}^2 = 1/LC$. Ξαναγράφουμε λοιπόν τον όρο $(X_L - X_C)^2$ ως

$$(X_L - X_C)^2 = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 = \frac{L^2}{\omega^2}(\omega^2 - \omega_0{}^2)^2$$

Θέτουμε το αποτέλεσμα αυτό στην Εξίσωση 33.40 και βρίσκουμε

$$P_{av} = \frac{V_{rms}^2 R\omega^2}{R^2\omega^2 + L^2(\omega^2 - \omega_0{}^2)^2} \tag{33.41}$$

Ισχύς κυκλώματος *RLC*

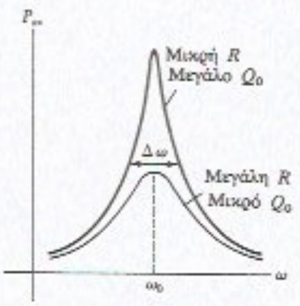
Βλέπουμε λοιπόν ότι στον συντονισμό, όπου $\omega = \omega_0$, *η μέση ισχύς είναι μέγιστη* και ισούται με $V_{rms}{}^2/R$. Στο Σχήμα 33.13b υπάρχει η ως προς την κυκλική συχνότητα ω γραφική παράσταση τής μέσης ισχύος τού κυκλώματος *RLC* τού Σχήματος 33.13a, για $R = 3.5\ \Omega$ και για $R = 10\ \Omega$. Παρατηρούμε ότι για τη μικρότερη αντίσταση η καμπύλη στενεύει (γίνεται οξύτερη) στην περιοχή τού συντονισμού. Το πόσο στενή είναι η καμπύλη τό περιγράφουμε συνήθως χρησιμοποιώντας μια παράμετρο που είναι καθαρός αριθμός και ονομάζεται **συντελεστής ποιότητας.** Συμβολίζεται με Q_0 (προσοχή, μην τον συγχέεται με το φορτίο Q!) και ορίζεται[3] ως

$$Q_0 = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \tag{33.42}$$

όπου $\Delta\omega$ είναι το πλάτος τής καμπύλης ανάμεσα στις δύο τιμές τής ω που αντιστοιχούν στο *μισό* τής μέγιστης τιμής τής P_{av} (δλ. Σχήμα 33.13b). Αποδείξτε μόνοι σας (Πρόβλημα 75) ότι $\Delta\omega = R/L$. Έτσι

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{R} \tag{33.43}$$

Συντελεστής ποιότητας



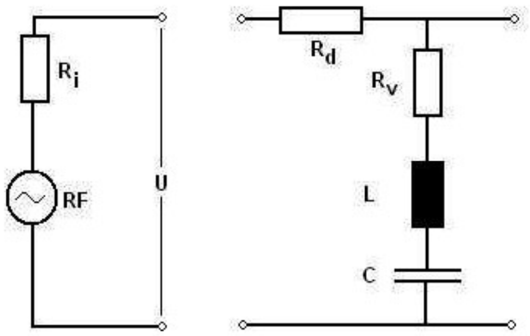
Σχήμα 33.14 Γραφική παράσταση τής μέσης ισχύος ως προς τη συχνότητα για κύκλωμα *RLC* εν σειρά (δλ. Εξίσωση 33.41). Η καμπύλη που είναι από πάνω και έχει την οξεία κορυφή αντιστοιχεί σε μικρή τιμή τής R, ενώ η από κάτω καμπύλη που έχει την αμβλεία κορυφή αντιστοιχεί σε μεγάλη τιμή τού R. Συνηθίζεται να μετρούμε το πλάτος (εύρος) $\Delta\omega$ τών καμπυλών εκεί που αντιστοιχεί το μισό τής μέγιστης τιμής (δηλαδή το μισό τής κορυφής). Το μέγιστο τών καμπυλών απαντά όταν η συχνότητα ισούται με τη συχνότητα συντονισμού, ω_0.

Δηλαδή το Q_0 ισούται με τον λόγο τής επαγωγικής αντίστασης (υπολογιζόμενης για $\omega = \omega_0$) διά τής ωμικής αντίστασης R. Να σημειωθεί ότι ο Q_0 είναι καθαρός αριθμός.

Από τις καμπύλες τού Σχήματος 33.14 βλέπουμε ότι το κύκλωμα μεγάλου Q_0 έχει στενή καμπύλη αποκρίσεως για μικρό εύρος συχνοτήτων, ενώ η αντίστοιχη τού κυκλώματος μικρού Q_0 είναι πολύ πιο ευρεία. Τυπικές τιμές τού Q_0 σε ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι από 10 έως 100. Λογουχάρη, το κύκλωμα που έχει την καμπύλη τού Σχήματος 33.13 με $R = 3.5\ \Omega$ έχει $Q_0 = 14.3$.

Ο δέκτης ραδιοφώνου είναι μια χαρακτηριστική εφαρμογή κυκλώματος συντονισμού. Για να «πιάσουμε» έναν ραδιοφωνικό σταθμό (ο οποίος εκπέμπει συνήθως σε σταθερή συχνότητα) μεταβάλλουμε έναν πυκνωτή, μεταβάλλοντας έτσι τη συχνότητα συντονισμού τού κυκλώματος λήψης τού δέκτη τού ραδιοφώνου. Όταν η συχνότητα συντονισμού τού δέκτη συμπέσει με τη συχνότητα εκπομπής τού σταθμού, δηλαδή με τη συχνότητα τού ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διεγείρει τον δέκτη, τότε αυξάνεται το ρεύμα τού δέκτη. Το σήμα ενισχύεται και μετά φθάνει στο μεγάφωνο. Επειδή πολλές φορές οι συχνότητες εκπομπής ραδιοφωνικών σταθμών βρίσκονται κοντά η μία με την άλλη, πρέπει το Q_0 τού κυκλώματος να είναι μεγάλο έτσι ώστε το $\Delta\omega$ να είναι πολύ μικρό για να μην ακούμε δύο ή περισσότερους σταθμούς ταυτόχρονα. Έτσι οι σταθμοί τών οποίων οι συχνότητες εκπομπής βρίσκονται κοντά (αλλά δεν είναι ίσες) με τη συχνότητα συντονισμού παρέχουν πολύ μικρότερο ρεύμα σε σύγκριση με τον σταθμό που εκπέμπει στη δεδομένη συχνότητα συντονισμού τού κυκλώματος λήψης τού ραδιοφώνου.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ



Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει:

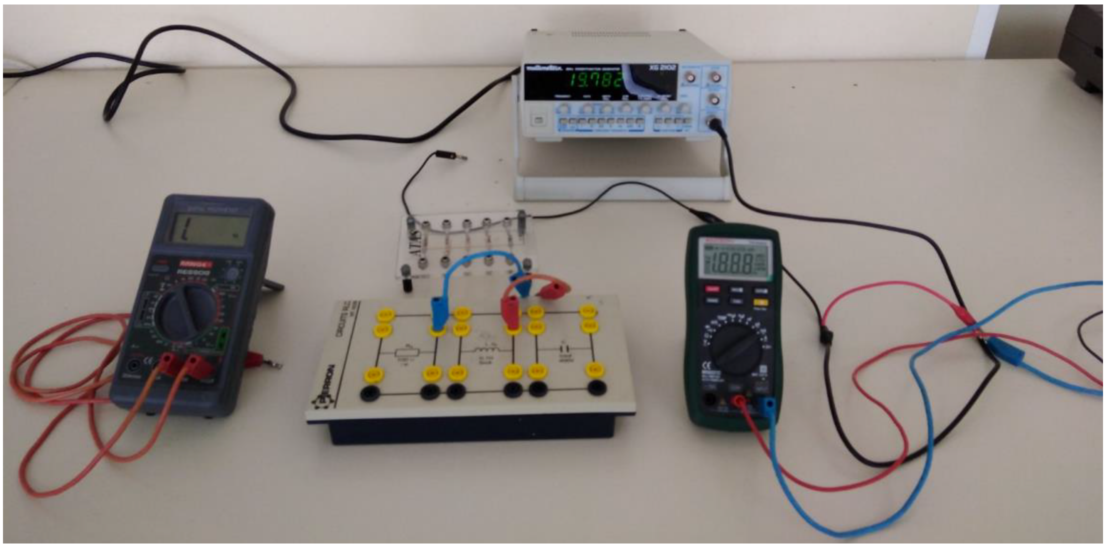
Ένα τυποποιημένο κύκλωμα RLC

Γεννήτρια συχνοτήτων

Βολτόμετρο

Αμπερόμετρο

Καλώδια σύνδεσης



3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ (RLC συντονισμός σε σειρά)

i. Συνδέουμε το κύκλωμα με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε τα στοιχεία του σε σειρά με το αμπερόμετρο και τροφοδοτούμε το κύκλωμα με τη γεννήτρια συχνοτήτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.

ii. Παρατηρούμε την ένδειξη του αμπερομέτρου και εκτελούμε με τη γεννήτρια συχνοτήτων σάρωση έτσι ώστε να εντοπίσουμε την περιοχή του συντονισμού (Μέγιστο ρεύμα).

iii. Παίρνουμε είκοσι τριάδες τιμών για τη συχνότητα, το ρεύμα και την τάση του κυκλώματος, συμμετρικά κατανεμημένες γύρω από την συχνότητα συντονισμού που περίπου εντοπίσαμε στο προηγούμενο βήμα.

iv. Συνδέουμε σε σειρά με την αντίσταση R_d μία αντίσταση R_1 και επαναλαμβάνουμε τα δύο προηγούμενα βήματα.

iv. Αποσυνδέουμε και τις δύο αντιστάσεις R_d και R_1 και επαναλαμβάνουμε τα βήματα ii και iii.

4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (RLC συντονισμός σε σειρά)

1. Καταχωρήστε τα απότελέσματα των μετρήσεων σε πίνακες και για τις δύο περιπτώσεις συντονισμού.

2. Σημειώστε σε κάθε περίπτωση την συνολική ωμική αντίσταση.

3. Χαράξτε για κάθε περίπτωση συντονισμού τις καμπύλες I(f) και U(f) (δύο διαγράμματα για κάθε είδος συντονισμού). Σε κάθε ένα από τα διαγράμματα θα φαίνονται τρείς καμπύλες που θα αντιστοιχούν στις τρείς διαφορετικές τιμές της ολικής ωμικής αντίστασης.

4. Υπολογίστε θεωρητικά τις τιμές της συχνότητας συντονισμού, του συντελεστή ποιότητας και του εύρους ζώνης του κυκλώματος αναφέροντας και τα αντίστοιχα σφάλματα.

5. Συμφωνούν οι θεωρητικές με τις μετρούμενες τιμές ; Άν όχι, ποιές θεωρείτε ως σημαντικότερες αιτίες σφαλμάτων ; Σχολιάστε.