

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

ΑΡΜΟΝΙΚΟΙ ΤΑΛΑΝΤΩΤΕΣ



6.1 Εισαγωγή – Βασικές αρχές

Ο ηλεκτρονικός **ταλαντωτής** είναι ένα κύκλωμα το οποίο δημιουργεί μια έξοδο περιοδικού σήματος χωρίς να εισάγεται σήμα στην είσοδό του. Ο **αρμονικός ταλαντωτής**, που συχνά ονομάζεται και **γραμμικός ταλαντωτής**, είναι υποπερίπτωση των ηλεκτρονικών ταλαντωτών οι οποίοι δημιουργούν στην εξόδό τους σήμα που είναι προσεγγιστικά ημιτονικό.

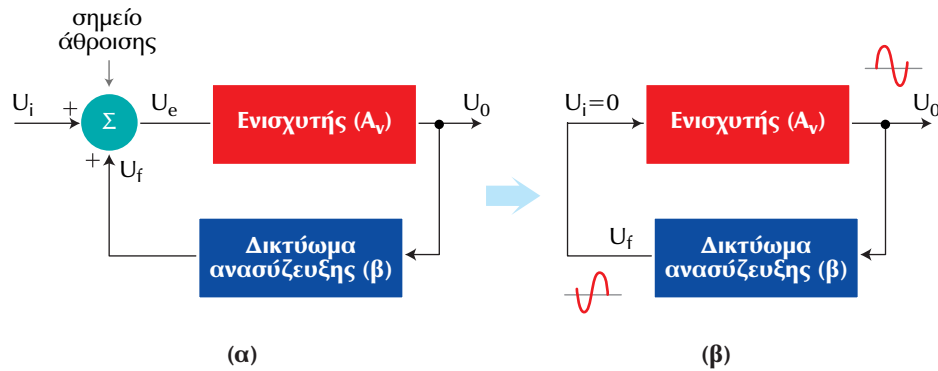
Οι ταλαντωτές βρίσκουν εφαρμογές σε πολλές περιοχές, μεταξύ των οποίων στα *συστήματα ακουστικών συχνοτήτων* και στις *τηλεπικοινωνίες*. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν διάφορους ταλαντωτές συμπεριλαμβανομένων των κρυσταλλικών ταλαντωτών και των ταλαντωτών ελεγχόμενους από τάση (VCO). Μολονότι υπάρχει μια ποικιλία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για την παραγωγή περιοδικών σημάτων, οι ταλαντωτές με *διακριτά στοιχεία* έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα απέναντι σε πολλά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Έτσι, π.χ. σε πολλές περιπτώσεις οι ταλαντωτές με ολοκληρωμένα κυκλώματα δεν μπορούν να σχεδιαστούν σε υψηλές συχνότητες και μικρούς θορύβους, που είναι απαιτήσεις πολλών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Παρομοίως, οι ταλαντωτές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ήχου υψηλής πιστότητας πρέπει να έχουν υψηλή σταθερότητα και χαμηλό θόρυβο και γι' αυτό σχεδιάζονται με διακριτά στοιχεία.

Βασικά, οι αρμονικοί ταλαντωτές χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες που είναι οι *συντονιζόμενοι* και οι *μη συντονιζόμενοι ταλαντωτές*. Οι **συντονιζόμενοι αρμονικοί ταλαντωτές** αποτελούνται από ένα *δικτύωμα συντονισμού LC* και ένα *ενεργό στοιχείο* (τρανζίστορ ή TE), ενώ οι **μη συντονιζόμενοι αρμονικοί ταλαντωτές** αποτελούνται από ένα *ενεργό στοιχείο* και ένα δικτύωμα RC.

Στη συνήθη μορφή του, ο ταλαντωτής είναι ένας ενισχυτής με ανασύζευξη (ανατροφοδότηση) στον οποίο ένα μέρος από την τάση εξόδου του επιστρέφει στην είσοδό του μέσω ενός δικτυώματος ανασύζευξης. Αν το σήμα ανασύζευξης έχει κατάλληλο πλάτος και φάση, το κύκλωμα δημιουργεί από μόνο του (χωρίς σήμα στην είσοδό του) ημιτονική κυματομορφή. Η ισχύς που απαιτείται γι' αυτή την παραγωγή σήματος προσλαμβάνεται από την τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος.

6.2 Κριτήρια ταλάντωσης

Το Σχ.6.1β δείχνει το δομικό διάγραμμα που έχει ένας τυπικός αρμονικός ταλαντωτής, θεωρούμενος σα μετεξέλιξη και ειδική περίπτωση ενός ενισχυτή με ανασύζευξη του οποίου το δομικό διάγραμμα εικονίζεται στο Σχ.6.1α.



Σχήμα 6.1. Μετάβαση από το δομικό διάγραμμα ενισχυτή με ανασύζευξη (α), ταλαντωτής (β)

Όπως παρατηρούμε, το σύστημα αποτελείται από έναν ενισχυτή τάσης (ενεργό στοιχείο), με ενίσχυσης A_v , ένα δικτύωμα ανασύζευξης με υποβιβασμό ή λόγο ανασύζευξης β και ένα σημείο άθροισης. Η ac τάση εξόδου από το σημείο άθροισης συμβολίζεται με v_e και είναι η διαφορά του σήματος εισόδου v_i μείον την τάση (εξόδου) της ανασύζευξης v_f ($v_i - v_f$).

Οι σχέσεις που διέπουν αυτό το δομικό διάγραμμα είναι οι εξής:

$$v_e = v_i + v_f \quad (6.2.1)$$

$$v_0 = A_v v_e \quad (6.2.2)$$

$$v_f = \beta v_0 \quad (6.2.3)$$

Από τις εξισώσεις αυτές αποδεικνύεται η εξής σχέση:

$$A_f = \frac{v_0}{v_i} = \frac{A_v}{1 - \beta A_v} \quad (6.2.4)$$

όπου A_f είναι η (ολική) ενίσχυση με ανασύζευξη ή η ενίσχυση με κλειστό βρόχο, A_v , είναι η ενίσχυση χωρίς ανασύζευξη και βA_v η ενίσχυση του ανοικτού βρόχου.

Από την Εξ.(6.2.4) συνάγεται ότι, αν $\beta A_v = 1$ τότε $|A_f| = |v_o/v_i| = \infty!$ Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα θα παράγει έξοδο $v_o \neq 0$ χωρίς είσοδο ($v_i=0$), δηλαδή θα λειτουργεί ως **ταλαντωτής** με δομικό διάγραμμα αυτό του Σχ.6.1 β.

Συνεπώς, η μιγαδική εξίσωση,

$$\beta A_v = 1 \quad (6.2.5)$$

που καλείται **συνθήκη Barkhausen**, είναι η συνθήκη για να έχουμε **εκκίνηση ταλαντώσεων από το σύστημα**.

Η εξίσωση αυτή, μετά από κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία αποδεικνύεται ισοδύναμη με τις σχέσεις:

$$|\beta A_v| = 1 \quad (6.2.6)$$

$$\varphi = 0^\circ \text{ (ή } 360^\circ) \quad (6.2.7)$$

όπου, φ η διαφορά φάσης που υπεισάγει το συνολικό κύκλωμα ανοικτού βρόχου (ενισχυτής+δικτυώμα ανασύζευξης).

Οι Εξ.(6.2.6) και (6.2.7) δίνουν τις εξής δυο συνθήκες που απαιτούνται για να έχουμε ταλάντωση:

1. Το μέτρο της ενίσχυσης ανοικτού βρόχου βA_v πρέπει να είναι 1.
2. Η ολική μεταβολή φάσης μέσω του ανοικτού βρόχου πρέπει να είναι 0° ή 360° .

Αυτές οι δυο συνθήκες ονομάζονται **κριτήρια ταλάντωσης Barkhausen**.

Έτσι, αν ο ενισχυτής του Σχ.6.1 δημιουργεί μεταβολή φάσης 180° τότε, για να έχουμε ταλάντωση το δικτύωμα ανασύζευξης πρέπει να δημιουργεί άλλες 180° διαφορά φάσης, ώστε η ολική μεταβολή φάσης του συστήματος ανοικτού βρόχου να είναι 360° (ή 0°). Σημειώστε ότι οι κυματομορφές που δείχνει το Σχ.6.1 είναι ημιτονικές και χρησιμοποιούνται για να δείξουν απλώς τη δράση του κυκλώματος. Στη γενική περίπτωση, οι κυματομορφές που δημιουργούνται από έναν ταλαντωτή εξαρτώνται από τα στοιχεία του κυκλώματος και επομένως μπορεί να είναι *ημιτονικές*, *τετραγωνικές* ή *τριγωνικές*. Εξάλλου, η συχνότητα ταλάντωσης καθορίζεται βασικά από τα στοιχεία του δικτυώματος ανασύζευξης.

6.2.1 Εκκίνηση και Συντήρηση των Ταλαντώσεων

Τα κριτήρια Barkhausen, είτε εκφράζονται με τη γενική μιγαδική Εξ.(6.2.5) είτε με τις επιμέρους Εξ.(6.2.6) (μέτρο) και Εξ.(6.2.7) (φάση), αποτελούν μαθηματικές εξισώσεις - συνθήκες κρίσιμων τιμών οι οποίες εξασφαλίζουν απλώς και μόνο την *εκκίνηση*, (την έναρξη των ταλαντώσεων). Στην πράξη, ταχύτατα, οι συνθήκες αυτές τείνουν να ανατραπούν, είτε γιατί οι τιμές των στοιχείων του κυκλώματος (R , L , C , κ.ά.) αλλάζουν, λόγω της διέλευσης του ρεύματος λειτουργίας ή της συνεπαγόμενης θέρμανσης του κυκλώματος, είτε γιατί οι παράμετροι του ενεργού στοιχείου (τρανζίστορ, κτλ) μεταβάλλονται για τους ίδιους λόγους. Έτσι, το β και ιδίως το A_v του ενισχυτή παύουν πλέον να ικανοποιούν τη συνθήκη Barkhausen και η ταλάντωση τείνει να αποσβεσθεί, να καταπαύσει.

Για να παρακάμψουμε αυτό το πρόβλημα, και να εξασφαλίσουμε **συντηρούμενες ταλαντώσεις**, αναγκαζόμαστε να δώσουμε στον ενισχυτή του κυκλώματος τιμή ενίσχυσης A_v ελαφρά μεγαλύτερη από όση επιβάλλει η Εξ.(6.2.5). Έτσι, για να έχουμε συντηρούμενες ταλαντώσεις πρέπει να αντιμετωπίσουμε τη συνθήκη Barkhausen όχι σαν ισότητα αλλά σαν ανισότητα της μορφής

$$\beta A_v \geq 1 \quad (6.2.8)$$

οπότε τα κριτήρια Barkhausen, γίνονται

$$|\beta A_v| \geq 1 \quad (6.2.9)$$

και

$$\varphi = 0^\circ \quad (6.2.10)$$

Αποδεικνύεται ότι, όταν ικανοποιούνται τα παραπάνω, ο ενισχυτής εξασφαλίζει τη *συντήρηση* των ταλαντώσεων όχι μόνο με την παροχή της ενίσχυσής του, και της αντίστοιχης ισχύος τροφοδοσίας του, αλλά, και με τη μεσολάβηση ενός φαινομένου που λέγεται **περιορισμός του πλάτους**. Το φαινόμενο αυτό, που οφείλεται στο ότι η απολαβή τάσης A_v του ενισχυτή ελαττώνεται όσο αυξάνει το πλάτος ταλάντωσης, οδηγεί σε *διατήρηση του πλάτους* σε σταθερή τιμή.

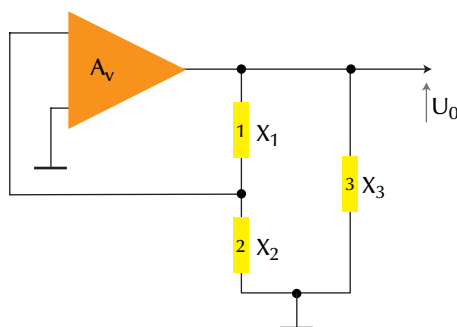
6.3 Συντονιζόμενοι ταλαντωτές

Οι **συντονιζόμενοι ταλαντωτές** ονομάζονται και **ταλαντωτές LC**, γιατί έχουν ως δικτύωμα ανασύζευξης κάποιο κύκλωμα συντονισμού L-C (συχνά συνδυασμένο και με αντιστάσεις R). Οι ταλαντωτές αυτοί χρησιμοποιούνται ιδίως σε εφαρμογές ραδιο-συχνοτήτων, με συχνότητες που κυμαίνονται από αρκετές εκατοντάδες kHz μέχρι αρκετές εκατοντάδες MHz. Οι πιο συνηθισμένοι ταλαντωτές της μορφής αυτής είναι οι ταλαντωτές Colpitts, Clapp και Hartley τους οποίους και θα δούμε αναλυτικότερα παρακάτω.

Η βασική δομή των ταλαντωτών LC απεικονίζεται από το δομικό διάγραμμα του Σχ.6.2. Όπως παρατηρούμε αποτελούνται από έναν ενισχυτή τάσης A_v και από ένα δικτύωμα ανασύζευξης που στη γενική περίπτωση περιλαμβάνει τρία κυκλωματικά στοιχεία, 1, 2, 3 (με L και C) με μεσαία λήψη μεταξύ των 1 και 2. Τα στοιχεία αυτά συγκροτούν ένα γενικό κύκλωμα συντονισμού. Με τη βοήθεια των κριτηρίων Barkhausen αποδεικνύεται, ότι για να έχουμε συντηρούμενες ταλαντώσεις με τους ταλαντωτές αυτούς, πρέπει να ισχύουν οι σχέσεις:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0 \quad (6.3.1)$$

$$A_v \geq 1 + \frac{X_1}{X_2} \quad (6.3.2)$$



Σχήμα 6.2. Βασική δομή ταλαντωτών LC (συντονιζόμενων)

όπου X_1 , X_2 και X_3 είναι φαινόμενες αντιστάσεις, με $X_k = j\omega L_k$ για καθαρές αυτεπαγωγές (πηνία) και $X_k = 1 / j\omega C_k$ για καθαρές χωρητικότητες (πυκνωτές).

6.3.1 Ταλαντωτής Colpitts

Χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός ταλαντωτή Colpitts είναι ότι το συντονιζόμενο κύκλωμά του αποτελείται από δύο πυκνωτές, C_1 , C_2 , σε σειρά και το σύστημά τους παράλληλο προς το πηνίο L . Οι δύο πυκνωτές δημιουργούν έναν ac διαιρέτη τάσης, και η τάση ανασύζευξης v_f είναι αυτή που αναπτύσσεται στα άκρα του C_2 (στη μεσαία λήψη μεταξύ των C_1 , C_2) και οδηγείται στον ενισχυτή απολαβής A_v .

Κατά τα ανωτέρω, αναφερόμενοι και στο Σχ.6.2 για ένα ταλαντωτή Colpitts θα έχουμε $X_1 = j\omega C_1$, $X_2 = j\omega C_2$, και $X_3 = j\omega L$. Από τις σχέσεις αυτές και την Εξ. (6.3.1) προκύπτει η σχέση

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (6.3.3)$$

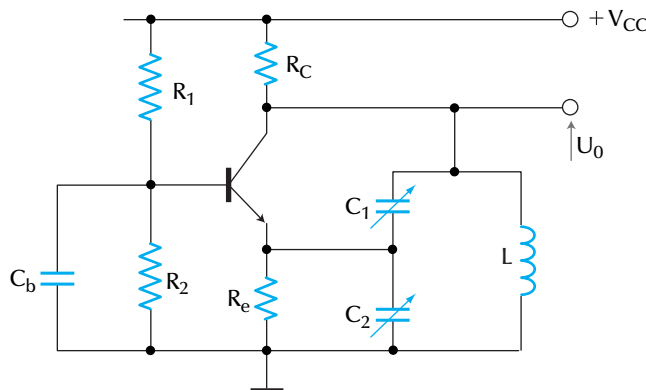
όπου, C_t η ισοδύναμη χωρητικότητα σύνδεσης των C_1 και C_2 σε σειρά, δηλ.

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (6.3.4)$$

Παρόμοια, από την Εξ. (6.3.2) βρίσκουμε, ότι για να έχουμε συντηρούμενες ταλαντώσεις πρέπει να ισχύει

$$|A_v| \geq 1 + \frac{C_2}{C_1} \quad (6.3.5)$$

Το Σχ.6.3 εικονίζει τον ταλαντωτή Colpitts με τρανζίστορ (BJT) σε συνδεσμολογία CB. Η θετική ανασύζευξη από την ακραία έως τη μεσαία λήψη μεταξύ των C_1 , C_2 , οδηγείται στην είσοδο του τρανζίστορ. Στον εκπομπό παρεμβάλλεται η αντίσταση R_e η οποία μαζί με τις R_1 και R_2 , δημιουργούν την πόλωση του τρανζίστορ. Ταυτόχρονα, όμως, ασκεί και αρνητική ανασύζευξη στη λειτουργία του, για να βελτιώσει την ημιτονική κυματομορφή που παράγεται από τον ταλαντωτή. Τέλος, η R_c είναι η κλασσική αντίσταση συλλέκτη του τρανζίστορ.



Σχήμα 6.3. Ταλαντωτής Colpitts με BJT

Αν λάβουμε υπόψη μας την έκφραση της απολαβής A_v του ενισχυτή σε συνάρτηση των υβριδικών παραμέτρων του τρανζίστορ, η Εξ.(6.3.5) γίνεται:

$$A_v = \frac{h_{fe} R_C}{R_i} \geq 1 + \frac{C_1}{C_2} \quad (6.3.6)$$

όπου

$$R_i = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_e \quad (6.3.7)$$

⇒ Παράδειγμα 6-1

Ο πιο πάνω ταλαντωτής Colpitts με BJT υλοποιείται με τις εξής τιμές εξαρτημάτων: $L=100 \mu\text{H}$, $C_1=1 \text{ nF}$, $C_2=100 \text{ pF}$, $R_c=680 \Omega$, $R_1=18 \text{ k}\Omega$, $R_2=5.6 \text{ k}\Omega$, $R_e=47 \Omega$. Εξάλλου, το τρανζίστορ έχει $h_{ie}=1 \text{ k}\Omega$ και $h_{fe}=199$. Να βρεθεί η συχνότητα ταλαντώσεών του και να εξεταστεί αν συντηρούνται οι ταλαντώσεις αυτές.

Λύση

Από την Εξ.(6.3.4) έχουμε

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{10^{-9}} + \frac{1}{0.1 \times 10^{-9}} = 10^9 + 10^{10} = 1.1 \times 10^{10} \therefore$$

$$\therefore C_t = \frac{1}{1.1 \times 10^{10}} = 91 \text{ pF}$$

Συνεπώς, από την Εξ.(6.3.4) έχουμε

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_t}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{100 \times 10^{-6} \times 91 \times 10^{-12}}} \cong 1.7 \text{ MHz}$$

Εξ' άλλου, από την Εξ.(6.3.7) έχουμε

$$R_i = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_e = 1 + 200 \times 0.047 \text{ k}\Omega = 10.4 \text{ k}\Omega$$

Έτσι, η Εξ.(6.3.6) δίνει

$$|A_v| = \frac{h_{fe} R_C}{R_i} = \frac{199 \times 0.68}{10.4} \cong 13$$

οπότε

$$|A_v| = 13 > 1 + \frac{C_2}{C_1} = 1 + 10 = 11$$

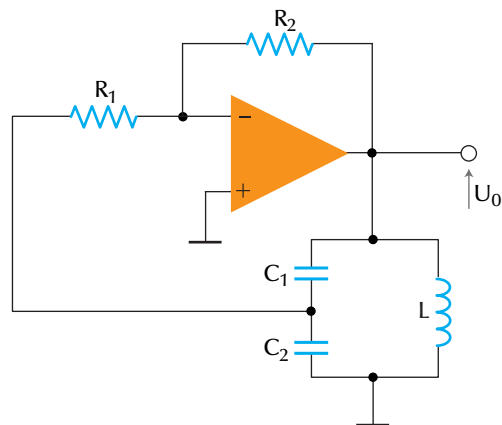
Επομένως ικανοποιείται η ανισότητα της Εξ.(6.3.6), άρα έχουμε συντήρηση ταλαντώσεων.

Το κύκλωμα του Σχ.6.4 εικονίζει τον ταλαντωτή Colpitts με ΤΕ. Ο ΤΕ δίνει την απαραίτητη ενίσχυση για να έχουμε συντήρηση των ταλαντώσεων. Η συχνότητα ταλάντωσης εξακολουθεί να δίνεται από την Εξ.(6.3.3). Επίσης, για να έχουμε συντήρηση ταλαντώσεων θα πρέπει και πάλι να ισχύει η ανισοτική Εξ.(6.3.5)

Τέλος, όπως φαίνεται από το σχήμα, ο συντελεστής ανασύζευξης β ($X_2 / (X_1 + X_2)$) δίνεται από τη σχέση:

$$\beta = \frac{C_1}{C_2 + C_1} \quad (6.3.8)$$

(Εδώ έχει ληφθεί υπόψη, ότι η αντίσταση εισόδου του ΤΕ είναι πολύ μεγάλη).



Σχήμα 6.4. Ταλαντωτής Colpitts με TE

⇒ Παράδειγμα 6-2

Θα υπολογίσουμε ταλαντωτή Colpitts με TE, συχνότητας 50 kHz, χρησιμοποιώντας τον 741 ($R_i = 2 \text{ M}\Omega$, $R_o = 70 \Omega$).

Λύση

Ξεκινάμε δεχόμενοι για το πηνίο μια λογική τιμή, π.χ. $L = 1 \text{ mH}$, οπότε η Εξ.(6.3.3) δίνει

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} = \frac{1}{4 \times \pi^2 \times f_0^2 \times L} = \frac{1}{4 \times \pi^2 \times 50^2 \times 10^6 \times 10^{-3}} = 10.1 \text{ nF}$$

Δεχόμαστε για το λόγο ανασύζευξης μια συνήθη τιμή,

$$\beta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = 0.1$$

Επομένως, από αυτή προκύπτει

$$C_1 = \frac{\beta}{1 - \beta} C_2$$

Αν δεχθούμε μια λογική τιμή για τον $C_2 = 10 \text{ nF}$, υπολογίζουμε τον C_1

$$C_1 = \frac{\beta}{1 - \beta} C_2 = \frac{0.1}{1 - 0.9} 10 \text{ nF} \approx 1.1 \text{ nF}$$

Για την R_1 δεχόμαστε μια τιμή $R_1 \geq X_{C1}$ ώστε το δικτύωμα να μη φορτώνει τον ενισχυτή. Στην πράξη παίρνουμε,

$$R_1 = 10 X_{C1} \quad (6.3.9)$$

όπου,

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega_0 C_1} \quad (6.3.10)$$

Συνεπώς,

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 10^3 \times 11 \times 10^{-9}} = 289 \Omega$$

Επομένως,

$$R_1 = 10X_{C1} = 10 \times 289 \Omega = 2.89 \text{ k}\Omega$$

Δεχόμαστε $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ και υπολογίζουμε την R_2 από το γνωστό τύπο της απολαβής του αναστρέφοντα ενισχυτή με ΤΕ

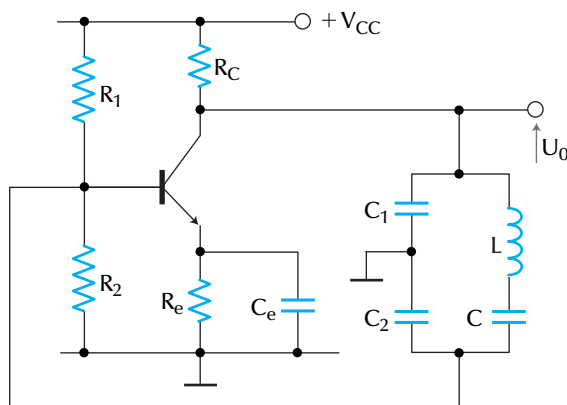
$$|A_v| = \frac{R_2}{R_1} \geq 2 \quad \therefore R_2 \geq 2R_1 \geq 20 \text{ k}\Omega$$

Η αντίσταση R_2 στην πράξη είναι συνήθως ένα ποτενσιόμετρο που το ρυθμίζουμε γύρω από την παραπάνω τιμή ώστε να έχουμε καλό ημιτονικό σήμα στην έξοδο του ταλαντωτή.

6.3.2 Ταλαντωτής Clapp

Μια τροποποίηση του ταλαντωτή Colpitts με τη σύνδεση ενός πυκνωτή C σε σειρά με το πηνίο L δίνει τον **ταλαντωτή Clapp**. Το Σχ.6.5 δείχνει ένα τέτοιο ταλαντωτή με BJT. Η προσθήκη αυτή του πυκνωτή βελτιώνει τη σταθερότητα της ταλάντωσης. Η σταθερότητα αυτή μπορεί να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο αν χρησιμοποιήσουμε *πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο*. Όταν οι χωρητικές αντιστάσεις των πυκνωτών C_1 και C_2 είναι μεγάλες ως προς αυτή του πυκνωτή που προστέθηκε, η συχνότητα ταλάντωσης καθορίζεται από τη σχέση που είδαμε στον ταλαντωτή Colpitts. Η χωρητικότητα C μπορεί να είναι μεταβλητή ώστε να έχουμε μεταβλητή συχνότητα συντονισμού σε μια δεδομένη περιοχή συχνοτήτων. Στη συχνότητα συντονισμού, η παράλληλη αντίσταση του κυκλώματος σειράς LC είναι

ελάχιστη με αποτέλεσμα η συχνότητα συντονισμού να είναι πρακτικά ανεξάρτητη από τις παραμέτρους του τρανζίστορ.



Σχήμα 6.5. Ταλαντωτής Clapp με BJT

Η συχνότητα ταλάντωσης δίνεται και πάλι από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_t}} \quad (6.3.11)$$

όπου όμως τώρα έχουμε

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C} \quad (6.3.12)$$

Επίσης, με βάση την Εξ.(6.3.2) αποδεικνύεται, ότι για να εξασφαλίσουμε τη συντήρηση των ταλαντώσεων, πρέπει να ισχύει πάλι η ίδια σχέση με τον ταλαντωτή Colpitts, δηλ. η Εξ.(6.3.5).

Αν $C_1 \ll C_2$, ο λόγος ανασύζευξης δίνεται από τη σχέση:

$$\beta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (6.3.13)$$

και η ενίσχυση του ενισχυτή:

$$A_v = - \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie}} \quad (6.3.14)$$

⇒ **Παράδειγμα 6-3**

Ο πιο πάνω ταλαντωτής έχει $L=33 \text{ mH}$, $C_1=C_2=100 \text{ nF}$, $C=1200 \text{ nF}$, $h_{ie}=100$, $R_C=470 \text{ }\Omega$ και $h_{ie}=1 \text{ k}\Omega$. Να βρεθεί η συχνότητα ταλάντωσης του, ο λόγος ανασύζευξης και εάν συντηρούνται οι ταλαντώσεις.

Λύση

Από την Εξ.(6.3.10) έχουμε

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C} = \frac{1}{100 \times 10^{-9}} + \frac{1}{100 \times 10^{-9}} + \frac{1}{1200 \times 10^{-9}}$$

Άρα

$$C_t = 48 \text{ nF}$$

Η Εξ.(6.3.9) δίνει

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_t}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{33 \times 10^{-3} \times 48 \times 10^{-9}}} \approx 4 \text{ kHz}$$

Ο λόγος ανασύζευξης είναι

$$\beta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{100}{100 + 100} = 0.5$$

Για να έχουμε συντήρηση των ταλαντώσεων πρέπει

$$A_v \geq 1 + \frac{C_2}{C_1} \geq 1 + \frac{100}{100} \geq 2$$

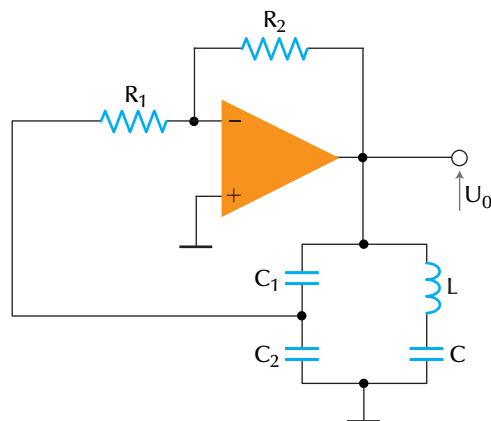
Η απολαβή τάσης του ενισχυτή με τρανζίστορ, είναι:

$$|A_v| = \frac{h_{pe} R_C}{h_{ie}} = \frac{100 \times 0.470}{1} = 47$$

η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από 2. Επομένως έχουμε συντήρηση των ταλαντώσεων.

Το Σχ.6.6 δείχνει τον **ταλαντωτή Clapp με TE**. Στον ταλαντωτή αυτόν ισχύουν όλες οι πιο πάνω σχέσεις με μόνη διαφορά την απολαβή τάσης του ενισχυτή που δίνεται από τη γνωστή σχέση του ενισχυτή με αναστροφή, δηλ.

$$|A_v| = \frac{R_2}{R_1} \quad (6.3.15)$$



Σχήμα 6.6. Ταλαντωτής Clapp με TE

⇒ Παράδειγμα 6-4

Θα υπολογίσουμε ταλαντωτή Clapp που δίνει ταλαντώσεις με συχνότητα συντονισμού 50 kHz, χρησιμοποιώντας τον TE 741.

Λύση

Δεχόμαστε ως λογική τιμή $L = 2.2 \text{ mH}$. Επομένως, από την Εξ.(6.3.9), έχουμε

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} \frac{1}{(2\pi \times 50 \times 10^3)^2 \times 2.2 \times 10^{-3}} \cong 4.6 \text{ nF}$$

Επιλέγουμε τη συνήθη τιμή $\beta = 0.1$. Επομένως,

$$\beta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \therefore C_1 = \frac{\beta}{1 - \beta} C_2$$

Αν δεχθούμε μια λογική τιμή $C_2 = 4.7 \text{ nF}$ και $C_2 = 100 \text{ nF}$ \therefore

$$C_1 = \frac{0.1}{1 - 0.1} 100 \text{ nF} = 1.11 \times 100 \text{ nF} = 11.1 \text{ nF}$$

Επομένως,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{4.7 \times 10^{-9}} - \left(\frac{1}{11.1 \times 10^{-9}} + \frac{1}{100 \times 10^{-9}} \right) \therefore$$

$$C = 4.7 \text{ nF}$$

Για να έχουμε συντηρούμενες ταλαντώσεις, πρέπει να ισχύει η Εξ(6.3.5), δηλ.

$$|A_v| \geq 1 + \frac{C_2}{C_1} \geq 1 + \frac{100}{10} \geq 11$$

$$|A_v| = \frac{R_2}{R_1} \geq 11$$

Έτσι, αν δεχούμε, π.χ $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, θα έχουμε

$$R_2 \geq 110 \text{ k}\Omega$$

6.3.3 Ταλαντωτής Hartley

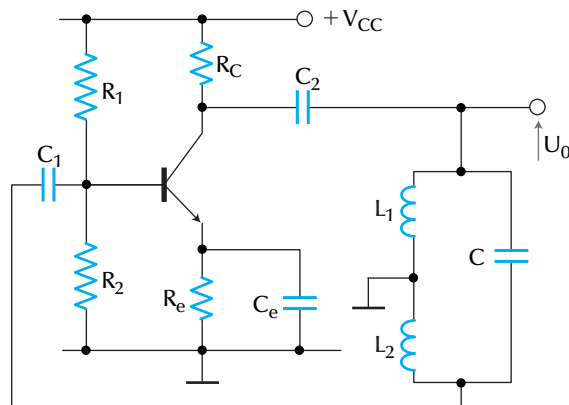
Ο **ταλαντωτής Hartley**, Σχ.6.7, μοιάζει με τον ταλαντωτή Colpitts, με τη διαφορά ότι η θέση και ο ρόλος πυκνωτών και πηνίων έχει αντιστραφεί. Δηλαδή, για να δημιουργηθεί η ανασύζευξη χρησιμοποιούνται δύο πηνία L_1 και L_2 (στη θέση των πυκνωτών C_1 και C_2) και ένας πυκνωτής C (στη θέση του L). Ο αντιστάσεις R_1 , R_2 , R_e και R_c δημιουργούν την κατάλληλη πόλωση του τρανζίστορ. Η συχνότητα συντονισμού της ταλάντωσης καθορίζεται από το δικτύωμα συντονισμού (L_1 , L_2 , C). Ο πυκνωτής C μπορεί να είναι μεταβλητός και επομένως το κύκλωμα να συντονίζει επιλεκτικά μέσα σε μια δεδομένη περιοχή συχνοτήτων. Ο πυκνωτής C_2 είναι πυκνωτής φραγμού (της dc τάσης για να μην εμφανιστεί στην έξοδο) και ο πυκνωτής C_e είναι πυκνωτής διαρροής.

Επαναλαμβάνοντας τους συλλογισμούς που κάναμε για τον ταλαντωτή Colpitts, αλλά θέτοντας τώρα $X_1 = j\omega L_1$, $X_2 = j\omega L_2$ και $X_3 = 1 / j\omega C$ στις Εξ.(6.3.1) και Εξ. (6.3.2), βρίσκουμε, ότι η συχνότητα ταλάντωσης δίνεται από τον τύπο

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_t C}} \quad (6.3.16)$$

όπου,

$$L_t = L_1 + L_2 \quad (6.3.17)$$



Σχήμα 6.7. Ταλαντωτής Harley με BJT

Επίσης, αποδεικνύεται, ότι για να είναι συντηρούμενες οι ταλαντώσεις, θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$|A_v| \geq 1 + \frac{L_1}{L_2} \quad (6.3.18)$$

όπου, A_v είναι η ενίσχυση του ενισχυτή και στην περίπτωση αυτή (τρανζίστορ CE), είναι:

$$|A_v| = \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie}} \quad (6.3.19)$$

⇒ Παράδειγμα 6-5

Ο πιο πάνω ταλαντωτής Hartley έχει τις εξής τιμές εξαρτημάτων: $L_1=L_2=4.7 \text{ mH}$, $C=22 \text{ nF}$, $R_C=2.2 \text{ k}\Omega$, και το τρανζίστορ έχει $h_{ie}=1 \text{ k}\Omega$ και $h_{fe}=50$. Να βρεθεί η συχνότητα συντονισμού της ταλάντωσής του και να ελεγχθεί αν οι ταλαντώσεις είναι συντηρούμενες.

Λύση

Επειδή,

$$L_t = L_1 + L_2 = 4.7 + 4.7 = 9.4 \text{ mH}$$

η Εξ.(6.3.16) δίνει

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{9.4 \times 10^{-3} \times 22 \times 10^{-9}}} \cong 11.1 \text{ kHz}$$

Εξ' άλλου, από την Εξ.(6.3.19), έχουμε

$$|A_v| = \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie}} = \frac{50 \times 2.2}{1} = 110$$

Άρα

$$|A_v| = 110 \geq 1 + \frac{L_1}{L_2} = 2$$

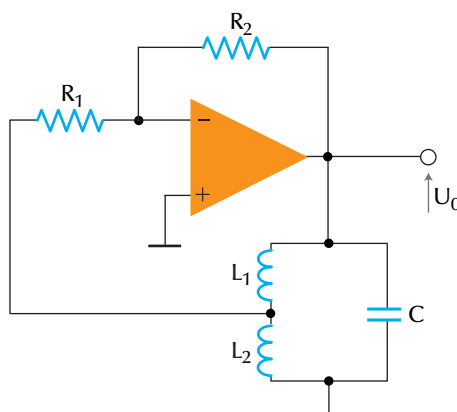
Επομένως ικανοποιείται η ανισότητα της Εξ. (6.3.18) άρα έχουμε συντήρηση των ταλαντώσεων.

Το Σχ.6.8 δείχνει τον **ταλαντωτή Hartley με ΤΕ**. Η συχνότητα συντονισμού του δίνεται και πάλι από την Εξ.(6.3.16). Επίσης, εξακολουθεί να ισχύει η συνθήκη της Εξ.(6.3.18), για τη συντήρηση των ταλαντώσεων, αλλά η ενίσχυση A_v δίνεται από το γνωστό τύπο του αναστρέφοντα ενισχυτή με ΤΕ

$$|A_v| = \frac{R_2}{R_1} \quad (6.3.20)$$

Επειδή η αντίσταση εισόδου του ΤΕ είναι πολύ μεγάλη, ο λόγος ανασύζευξης θα είναι,

$$\beta = \frac{L_2}{L_1 + L_2} \quad (6.3.21)$$



Σχήμα 6.8. Ταλαντωτής Harley με ΤΕ

⇒ Παράδειγμα 6-6

Θα υπολογίσουμε ταλαντωτή Hartley με TE (π.χ τον 741) για συχνότητα συντονισμού 30 kHz.

Λύση

Δεχόμαστε τη λογική τιμή $L_t = 1 \text{ mH}$, οπότε η Εξ.(6.3.16)

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_t} = \frac{1}{(2\pi \times 30 \times 10^3)^2 \times 10^{-3}} \approx 28 \text{ nF}$$

Στη συνέχεια δεχόμαστε, ως συνήθως, $\beta=0.1$. Επομένως, αν συνδέσουμε τις Εξ.(6.3.17) και Εξ.(6.3.21), θα έχουμε

$$L_t = L_1 + L_2 = L_1 + \left(\frac{\beta}{1-\beta} \right) L_1 = \frac{L_1}{1-\beta} \therefore$$

$$L_1 = (1 - \beta)L_t = 0,9 \times 1 = 0.9 \text{ mH}$$

και

$$L_2 = L_t - L_1 = 1 - 0.9 = 0.1 \text{ mH}$$

Τέλος, σύμφωνα με την Εξ.(6.3.18) η ενίσχυση που πρέπει να δίνει ο ενισχυτής, για να έχουμε συντηρούμενες ταλαντώσεις, είναι:

$$A_v \geq 1 + \frac{L_1}{L_2} \geq 1 + \frac{0.9}{0.1} \geq 10$$

Επομένως, κατά την Εξ.(6.3.20), πρέπει

$$\frac{R_2}{R_1} \geq 10$$

Άρα, αν δεχθούμε την $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, βρίσκουμε έτσι ότι η $R_2 \geq 10 \times R_1 = 100 \text{ k}\Omega$.

6.3.4 Σταθερότητα Συχνότητας

Η σταθερότητα της συχνότητας μιας ταλάντωσης παίζει πολλές φορές πολύ σημαντικό ρόλο σε εφαρμογές όπως τα ηλεκτρονικά ρολόγια (clock), οι γεννήτριες συχνοτήτων και τα κυκλώματα χρονισμού ακριβείας. Η σταθερότητα αυτή εξαρτάται από τρεις παράγοντες. Ο πρώ-

τος παράγοντας είναι η θερμοκρασία, επειδή τα στοιχεία του ταλαντωτή είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Ο δεύτερος παράγοντας είναι η επίδραση των μεταβολών της dc τάσης τροφοδοσίας και ο τρίτος παράγοντας είναι η επίδραση της «φόρτωσης» του ταλαντωτή που δέχεται ο ταλαντωτής στην έξοδό του.

Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι σημαντική στους ταλαντωτές LC. Η τιμή της αυτεπαγωγής αυξάνει με τη θερμοκρασία, ενώ, αντίθετα, η χωρητικότητα ελαττώνεται. Έτσι, έχουν επινοηθεί κυκλώματα με τα οποία αυτές οι επιδράσεις να αλληλοαναιρούνται. Ακριβής, όμως, εξισορρόπηση είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί.

Σημειώνουμε επίσης, ότι η επίδραση της θερμοκρασίας είναι μικρότερη στην περίπτωση που το συντονιζόμενο κύκλωμα έχει υψηλό συντελεστή ποιότητας Q .

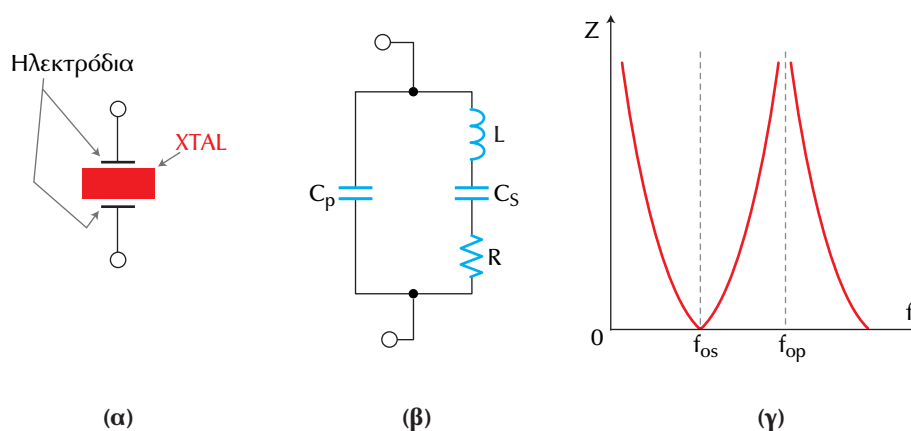
Οι μεταβολές ή διακυμάνσεις της τάσης τροφοδοσίας επιδρούν κυρίως στις παραμέτρους του ενεργού στοιχείου (τρανζίστορ, κτλ), με αποτέλεσμα να έχουν έμμεση επίδραση και στη συχνότητα ταλάντωσης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την εφαρμογή πολύ καλής ηλεκτρονικής σταθεροποίησης στην τάση τροφοδοσίας.

Η επίδραση της φόρτωσης στη σταθερότητα της συχνότητας είναι σημαντική, εφόσον υποβιβάζει το Q του παράλληλου κυκλώματος συντονισμού. Στην πράξη είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε απομονωτή (buffer), επειδή το κύκλωμα αυτό έχει υψηλή αντίσταση εισόδου και μικρή αντίσταση εξόδου και έτσι αφήνει σχεδόν ανεπηρέαστο το Q του κυκλώματος συντονισμού.

6.3.5 Ταλαντωτές με Κρύσταλλο

Όπως είπαμε πιο πάνω, ένα κύκλωμα με υψηλό Q εξασφαλίζει πολύ καλή σταθερότητα στη συχνότητα ταλάντωσης. Ο κρύσταλλος χαλαζία (quartz) είναι ένα στοιχείο που συμπεριφέρεται σαν κύκλωμα συντονισμού υψηλού Q . Η λειτουργία του κρυστάλλου βασίζεται στο *πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο*, που είναι το εξής: Αν σ' έναν κρύσταλλο που περιέχεται ανάμεσα σε δυο ηλεκτρόδια εφαρμόσουμε μηχανικές δονήσεις, δημιουργούνται στην επιφάνειά του ηλεκτρικά φορτία τα οποία αναπτύσσουν ac ηλεκτρικές τάσεις. Αντιστρόφως, αν μεταξύ των ηλεκτροδίων του κρυστάλλου εφαρμόσουμε ac ηλεκτρική τάση, οι δυνάμεις Coulomb αναπτύσσουν εσωτερικές μηχανικές τάσεις και ο κρύσταλλος ταλαντώνεται μηχανικά.

Η συχνότητα συντονισμού και ο συντελεστής ποιότητας Q του κρυστάλλου εξαρτώνται από τις διαστάσεις του, από τη διατομή του και από τον τρόπο στήριξής του. Ο κρύσταλλος χαλαζία απαντάται σε εξαγωνική μορφή. Το Σχ.6.9 δείχνει το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του κρυστάλλου και τη μεταβολή της σύνθετης αντίστασής του Z , με τη συχνότητα (καμπύλη απόκρισης).



Σχήμα 6.9. Κρύσταλλος (χαλαζία). Ισοδύναμο κύκλωμα και χαρακτηριστική σύνθετη αντίστασή του

Η ωμική αντίσταση R , η αυτεπαγωγή L και η χωρητικότητα σειράς C_s του ισοδύναμου κυκλώματος (Σχ.6.9 β) παριστάνουν τα ηλεκτρικά ισοδύναμα μεγέθη των μηχανικών χαρακτηριστικών δόνησης του κρυστάλλου. Η παράλληλη χωρητικότητα C_p παριστάνει την ηλεκτροστατική χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων του κρυστάλλου.

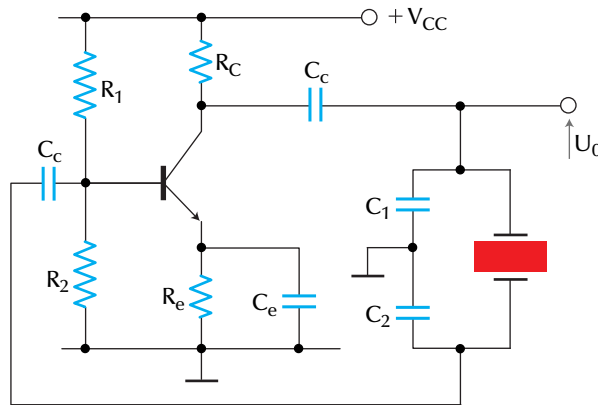
Όπως φαίνεται και από την καμπύλη απόκρισης του Σχ.6.9 γ ο κρύσταλλος έχει **δύο συχνότητες συντονισμού**, μια σειράς f_{os} , όπου η σύνθετη αντίστασή του είναι μικρή και μια παράλληλη f_{op} , όπου η σύνθετη αντίστασή του είναι μεγάλη. Και στις δυο περιπτώσεις το Q του κυκλώματος είναι μεγάλο. Για τους περισσότερους κρυστάλλους, η διαφορά της $f_{op} - f_{os}$ μεταξύ των δύο συχνοτήτων συντονισμού τους είναι πολύ μικρή. Τον κρύσταλλο μπορούμε να τον συντονίσουμε στη μια ή την άλλη από τις δυο συχνότητες συντονισμού.

Αποδεικνύεται ότι οι δύο πιο πάνω συχνότητες συντονισμού προς τα ισοδύναμα μεγέθη του κρυστάλλου δίνονται από τις σχέσεις:

$$f_{0p} \approx f_{0s} \left(1 + \frac{C_s}{2C_p} \right) \quad (6.3.22)$$

ΚΑΙ

$$f_{0s} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_s}} \quad (6.3.23)$$

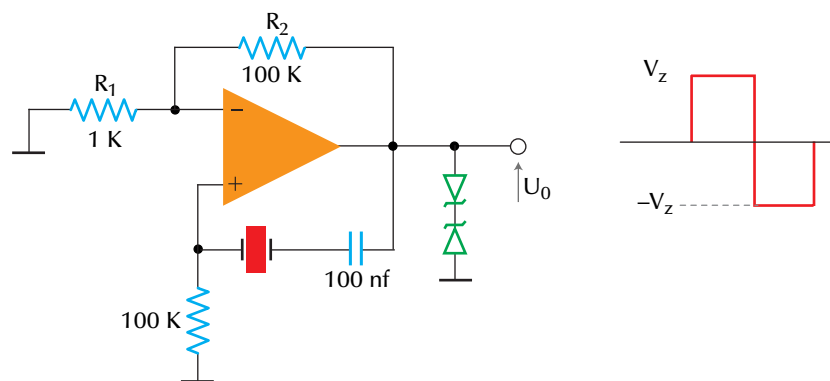


Σχήμα 6.10. Κρυσταλλικός ταλαντωτής με BJT

Οι κρύσταλλοι quartz είναι διαθέσιμοι για συχνότητες από 10 kHz έως 330 MHz. Βρίσκουμε πιο εύκολα κρυστάλλους σε συχνότητες 100 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 4 MHz, 5 MHz, 10 MHz και 25 MHz. Επίσης, βρίσκουμε εύκολα κρύσταλλο συχνότητας 3.579545 MHz που χρησιμοποιείται στους ταλαντωτές colour burst της TV. Στην αγορά υπάρχουν επίσης κρύσταλλοι συχνότητας 32.768 kHz (με διαίρεση 2^{15} δίνουν 1 Hz) που χρησιμοποιούνται στα ψηφιακά ρολόγια χειρός. Τέλος, υπάρχουν έτοιμοι κρυσταλλικοί ταλαντωτές μέσα σε “φούρνο” σταθερής θερμοκρασίας και συνεπώς μεγάλης σταθερότητας συχνότητας, όπως ο 10544 της Hewlett Packard (10 MHz).

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του κρυστάλλου είναι φανερό ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον κρύσταλλο ως τον κλάδο συντονισμού ενός ταλαντωτή τύπου Clapp. Έτσι, προκύπτει ο **κρυσταλλικός ταλαντωτής** με BJT του Σχ.6.10.

Αντίστοιχα, το Σχ.6.11 δείχνει έναν **κρυσταλλικό ταλαντωτή με ΤΕ**. Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιεί μεγάλη ενίσχυση με αποτέλεσμα να έχουμε στην έξοδό του τετραγωνική κυματομορφή. Το ζεύγος των διόδων Zener δίνουν στην έξοδο πλάτος παλμών ίσο με την τάση V_z των Zener αυτών.



Σχήμα 6.11. Κρυσταλλικός ταλαντωτής με ΤΕ

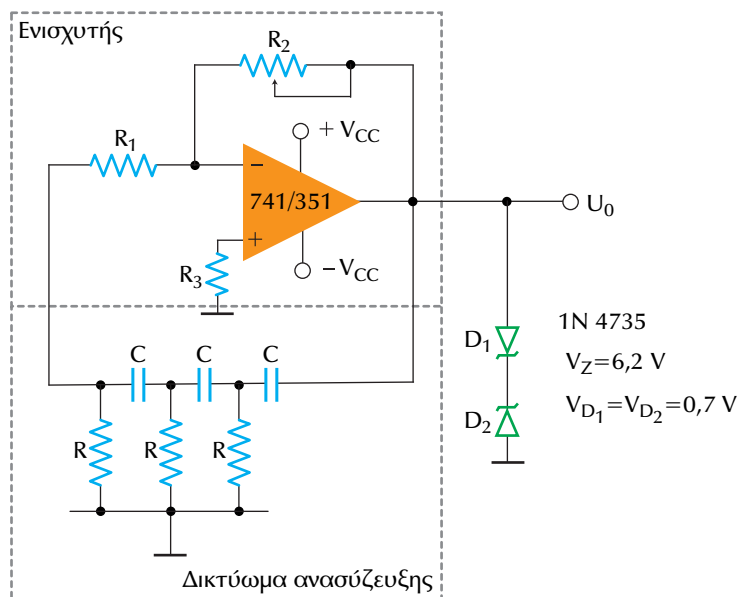
6.4 Μη συντονιζόμενοι ταλαντωτές

Η πραγματοποίηση ενός ταλαντωτή δεν προϋποθέτει απαραίτητα τη χρήση ενός συντονιζόμενου κυκλώματος με L και C στο δικτύωμα ανασύζευξης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και οποιοδήποτε άλλο δίκτυωμα, που να περιέχει μόνο συνδυασμό στοιχείων R και C , άρα *μη συντονιζόμενο*, αρκεί τα στοιχεία του να ικανοποιούν τις απαιτήσεις ανασύζευξης και μεταβολής φάσης των κριτηρίων Barkhausen, Εξ.(6.2.6) και Εξ.(6.2.7). Αυτοί οι *μη-συντονιζόμενοι ταλαντωτές*, με δίκτυωμα RC , θα εξεταστούν στις παραγράφους που ακολουθούν.

Οι *μη-συντονιζόμενοι ταλαντωτές* που χρησιμοποιούν δίκτυωμα RC για δίκτυωμα ανασύζευξης είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι στις *χαμηλές συχνότητες* και στα *ολοκληρωμένα κυκλώματα* όπου δεν μπορούν ή δε συμφέρει να χρησιμοποιηθούν πηνία. Χαρακτηριστικοί εκπρόσωποι αυτής της κατηγορίας των ταλαντωτών είναι ο *ταλαντωτής μετάθεσης φάσης*, ο *ταλαντωτής γέφυρας Wien* και ο *ταλαντωτής με διπλό T* .

6-4.1 Ταλαντωτής Μετάθεσης Φάσης

Το Σχ.6.12 δείχνει έναν από τους τύπους του **ταλαντωτή μετάθεσης φάσης με ΤΕ**. Όπως παρατηρούμε, αυτός αποτελείται από έναν ΤΕ για βαθμίδα ενίσχυσης και ένα δικτύωμα ανασύζευξης που συγκροτείται από τρία στοιχεία RC σε σειρά. Το δικτύωμα ανασύζευξης παρέχει όλη την απαιτούμενη ανασύζευξη τάσης από την έξοδο προς την είσοδο του ενισχυτή. Ο ΤΕ χρησιμοποιείται σε συνδεσμολογία με αναστρέφοντα ενισχυτή· επομένως, στην έξοδό του το σήμα εισόδου εμφανίζεται ενισχυμένο και με διαφορά φάσης 180° . Η επιπλέον διαφορά φάσης των 180° που απαιτείται, κατά το 2ο κριτήριο Barkhausen, για να έχουμε ταλάντωση, πρέπει να παρέχεται από το δικτύωμα ανάδρασης. Μόνο τότε, η ολική φάση βρόχου θα είναι 360° ή 0° . Το κύκλωμα θα ταλαντώνεται σε μια καθορισμένη συχνότητα f_0 όπου η μεταβολή φάσης μέσω του δικτυώματος είναι ακριβώς 180° και η ενίσχυση του ενισχυτή A_v είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο Barkhausen και το κύκλωμα να ταλαντώνεται.



Σχήμα 6.12. Ταλαντωτής μετάθεσης φάσης με ΤΕ

Με βάση τα κριτήρια Barkhausen αποδεικνύεται ότι η συχνότητα ταλάντωσης του ταλαντωτή μετάθεσης φάσης δίνεται από την εξίσωση:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{6} RC} \quad (6.4.1)$$

η αντίστοιχη ενίσχυση στη συχνότητα αυτή, πρέπει να είναι:

$$|A_v| = \frac{R_2}{R_1} \geq 29 \quad (6.4.2)$$

άρα το δικτύωμα RC υποβιβάζει το σήμα -29 φορές. (Το μείον δείχνει ότι στη συχνότητα συντονισμού το δικτύωμα δημιουργεί διαφορά φάσης ακριβώς 180°).

Συνεπώς,

$$R_2 \geq 29 R_1 \quad (6.4.3)$$

Για να υπολογίσουμε αυτόν τον ταλαντωτή, ξεκινάμε διαλέγοντας πρώτα μια κατάλληλη τιμή του C και μετά υπολογίζουμε την R.

⇒ Παράδειγμα 6-7

Θα υπολογίσουμε ταλαντωτή μετάθεσης φάσης με συχνότητα ταλάντωσης 500 Hz.

Λύση

Δεχόμαστε κατ' αρχή την τιμή $C=100$ nF. Συνεπώς, λύνοντας προς R την Εξ.(6.4.1), έχουμε

$$R = \frac{1}{2\pi \sqrt{6} Cf} = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{6} \times 100 \times 10^{-9} \times 500} \approx 1.3 \text{ k}\Omega$$

χρησιμοποιούμε τη σειρά των αντιστάσεων E12 και στην πράξη θα πάρουμε $R = 1.5 \text{ k}\Omega$.

Για να μη φορτώνουμε τον ενισχυτή λόγω του δικτυώματος, διαλέγουμε $R_1 \geq 10R$. Επομένως, οριακά, $R_1 = 10 R = 15 \text{ k}\Omega$

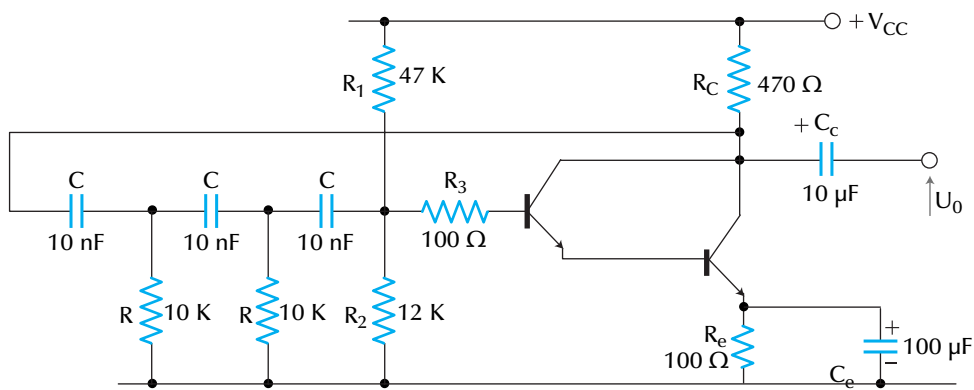
Με βάση την Εξ.(6.4.3), η αντίσταση ανσύζευξης του TE θα είναι.

$$R_2 \geq 29 \times R_1 = 29 \times 15 \text{ k}\Omega = 435 \text{ k}\Omega$$

Στην πράξη χρησιμοποιούμε $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ (ποτενσιόμετρο).

Διαλέγουμε τον 741 για χαμηλές συχνότητες ή τον LM318 ή τον LF351 για υψηλές συχνότητες, επειδή έχουν μεγαλύτερο SR.

Το Σχ.6.13 δείχνει τον ταλαντωτή μετάθεσης φάσης με BJT. Το τρανζίστορ είναι συνδεσμοποιημένο με κοινό εκπομπό (CE), πράγμα που σημαίνει ότι δημιουργεί διαφορά φάσης 180° μεταξύ εισόδου του και εξόδου του και 180° που δημιουργεί το δικτύωμα ανασύζευξης έχουμε 360° (ή 0°), που απαιτεί το 2ο κριτήριο Barkhausen.



Σχήμα 6.13. Ταλαντωτής μετάθεσης φάσης με BJT

Ο παράλληλος συνδυασμός των R_1 και R_2 δίνει μια αρκετά μεγάλη ισodύναμη αντίσταση $R = 12k/47k \approx 10 \text{ k}\Omega$. Έτσι, ο ενισχυτής χρησιμοποιεί ζεύγος Darlington, ώστε να μπορούμε να αγνοήσουμε τη μεγάλη αντίσταση εισόδου του. Η αντίσταση R_3 (100Ω) χρησιμοποιείται για να καταπνίγει ανεπιθύμητες ταλαντώσεις στις υψηλές συχνότητες.

Ως προς το τυπολόγιο, ο τύπος της συχνότητας ταλάντωσης f_0 είναι ίδιος με αυτόν που ισχύει και για την περίπτωση του TE, Εξ.(6.4.1). Ο τύπος, όμως, του κατωφλιού ενίσχυσης, Εξ.(6.4.2), ισχύει μόνο αν αντικαταστήσουμε το λόγο R_2 / R_1 με την έκφραση της A_v για ενισχυτή με τρανζίστορ, Εξ.(6.3.19).

⇒ Παράδειγμα 6-8

Να βρεθεί η συχνότητα ταλάντωσης του πιο πάνω ταλαντωτή, καθώς και αν έχουμε συντήρηση των ταλαντώσεων. Δίνεται $h_{ie} = 200$ και $h_{ie} = 1 \text{ k}\Omega$.

Λύση

Η συχνότητα ταλάντωσης θα είναι:

$$f_0 = \frac{1}{2 \sqrt{6RC}} = \frac{1}{2 \sqrt{6} \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} \cong 650 \text{ Hz}$$

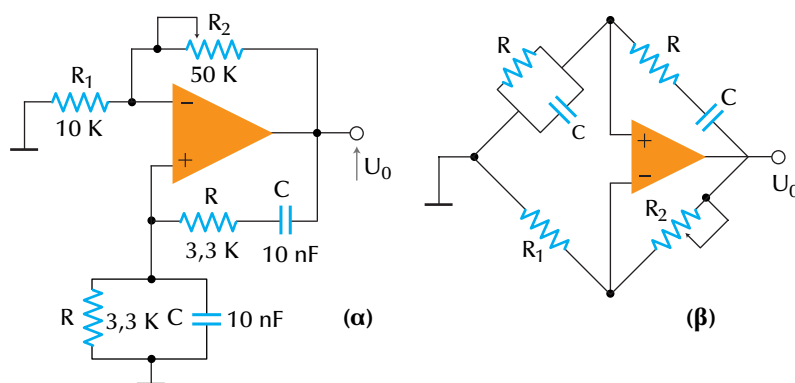
ενώ, με βάση την Εξ.(6.3.19), η απολαβή του ενισχυτή είναι:

$$|A_v| = \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie}} = \frac{200 \times 0.47}{1} = 94$$

Άρα, η $|A_v|$ που είναι πολύ μεγαλύτερη από 29 και συνεπώς ικανοποιείται άνετα η Εξ. (6.4.2). Επομένως έχουμε συντήρηση των ταλαντώσεων.

6.4.2 Ταλαντωτής Γέφυρας Wien

Ένας από τους συνηθέστερα χρησιμοποιούμενους ταλαντωτές ακουσικών συχνοτήτων, λόγω της σταθερότητάς του και της απλότητάς του, είναι ο **ταλαντωτής γέφυρας Wien**, που εικονίζει το Σχ.6.14, με **TE**. Όπως φαίνεται από το Σχ.6.14α, το δικτύωμα ανασύζευξης του ταλαντωτή είναι *φίλτρο ζώνης διέλευσης* (ΦΖΔ), με R και C, που παρεμβάλλεται στον κλαδο της θετικής ανασύζευξης (+ είσοδος) του TE. Ο δρόμος αρνητικής ανασύζευξης (- είσοδος) δημιουργείται από τις δύο αντιστάσεις R_1 και R_2 , με τις οποίες ο TE συνδεσμοποιείται ως αναστρέφων ενι-



Σχήμα 6.14. Ταλαντωτής γέφυρας Wien με TE (α) Ισοδύναμο κύκλωμα όπου φαίνεται σχηματικά η γέφυρα Wien (β)

σχυτής. Το δικτύωμα της γέφυρας Wien συνδέεται μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου και εξόδου του ενισχυτή, ενώ το 4ο άκρο της γέφυρας γειώνεται. Η γέφυρα Wien συγκροτείται από ένα δικτύωμα RC σειράς στον ένα της κλάδο και ένα παράλληλο R//C στο δίπλα κλάδο της. Στους υπόλοιπους δύο κλάδους συνδέονται οι ωμικές αντιστάσεις R_1 και R_2 , οι οποίες καθορίζουν την απολαβή τάσης A_v του αναστροφέα ενισχυτή.

Με βάση τα κριτήρια Barkhausen, αποδεικνύεται ότι η συχνότητα ταλάντωσης του ταλαντωτή με γέφυρα Wien δίνεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6.4.4)$$

Ο υποβιβασμός που δημιουργεί το δικτύωμα στη συχνότητα αυτή είναι:

$$\beta = \frac{1}{3} \quad (6.4.5)$$

ενώ η μεταβολή φάσης που προκαλείται στη συχνότητα αυτή είναι 0° . Συνεπώς, για να έχουμε ταλάντωση ο ΤΕ θα πρέπει να δημιουργεί διαφορά φάσης 0° .

Επιπλέον, για να ικανοποιείται η συνθήκη Barkhausen $\beta A_v \geq 1$ και Εξ.(6.4.5), ο ενισχυτής θα πρέπει να έχει ενίσχυση τουλάχιστον 3. Επειδή ο ΤΕ είναι συνδεσμολογημένος χωρίς αναστροφή (μη αναστρέφων ενισχυτής), η ενίσχυσή του θα πρέπει να είναι:

$$|A_v| = 1 + \frac{R_2}{R_1} \geq 3 \quad \therefore$$

$$\text{Άρα} \quad R_2 \geq 2R_1 \quad (6.4.6)$$

⇒ Παράδειγμα 6-9

Θα υπολογίσουμε ταλαντωτή γέφυρας Wien με συχνότητα ταλάντωσης 5 kHz.

Λύση

Δεχόμαστε μια κατάλληλη τιμή του πυκνωτή, π.χ. $C = 10 \text{ nF}$, και υπολογίζουμε την R από την Εξ.(6.4.4), δηλ.

$$R = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2\pi \times 5 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-9}} = 3.2 \text{ k}\Omega$$

Τέλος, δεχόμαστε την

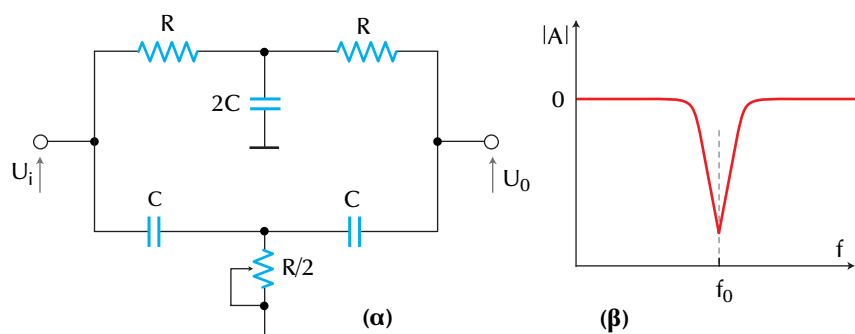
$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

και από την Εξ.(6.4.6), βρίσκουμε

$$R_2 \geq 2R_1 \geq 2 \times 10 \text{ k}\Omega \geq 20 \text{ k}\Omega \text{ (Χρησιμοποιούμε ποτ. } 50 \text{ k}\Omega)$$

6.4.3 Ταλαντωτής Διπλού T

Όπως είδαμε, ο ταλαντωτής γέφυρας Wien χρησιμοποιεί *φίλτρο ζώνης διέλευσης* στο δρόμο της θετικής ανασύζευξης (+ είσοδος) του TE. Εξίσου καλά μπορούμε να δημιουργήσουμε έναν ταλαντωτή ακουστικών συχνοτήτων με TE θέτοντας ένα κατάλληλο παθητικό φίλτρο στο δρόμο αρνητικής ανασύζευξης (- είσοδος) του TE. Ένα τέτοιο φίλτρο είναι το **δικτύωμα διπλού T**, που εικονίζεται στο Σχ.6.15.



Σχήμα 6.15. Δικτύωμα διπλού T (φίλτρο δοντιού) και καμπύλη απόκρισής του

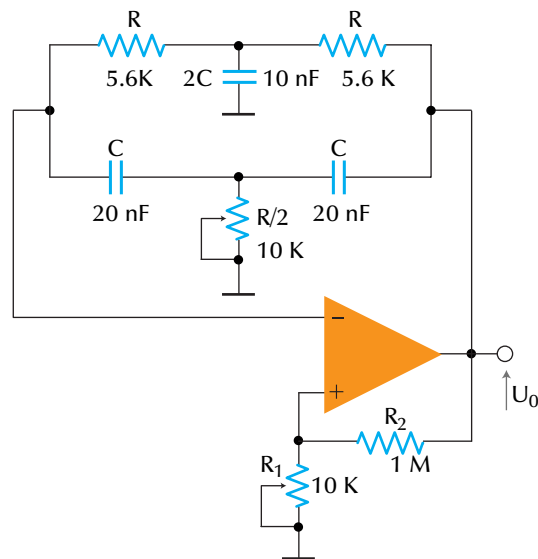
Το δικτύωμα ή *φίλτρο διπλού T* αποτελεί ένα φίλτρο στενής ζώνης αποκοπής (ΦΣΖΑ) ή *φίλτρο δοντιού* (βλ. παρ. 5.2.6) και είναι συνδυασμός ενός *φίλτρου χαμηλών* και ενός *φίλτρου υψηλών συχνοτήτων*. Ο υποβιβασμός του φίλτρου αυτού στη συχνότητα συντονισμού μπορεί να είναι και κάτω από 60 dB. Αποδεικνύεται ότι η συχνότητα συντονισμού δίνεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6.4.7)$$

Η μεταβολή φάσης μέσω του δικτυώματος στη συχνότητα αυτή είναι -90° . Για να έχουμε συντήρηση των ταλαντώσεων θα πρέπει ο ενισχυτής να έχει πολύ μεγάλη, (θεωρητικά άπειρη) ενίσχυση, στην πράξη 40 έως

60 dB (100 έως 1000), για να καλύπτει τις απώλειες λόγω του υψηλού υποβιβασμού του δικτυώματος.

Ο **ταλαντωτής διπλού T με TE** χρησιμοποιεί το παραπάνω δικτύωμα/φίλτρο όπως δείχνει το Σχ.6.16.



Σχήμα 6.16. Ταλαντωτής με TE και δικτύωμα διπλού T

⇒ Παράδειγμα 6-10

Θα υπολογίσουμε ταλαντωτή διπλού T με συχνότητα συντονισμού 3 kHz και με ενίσχυση 100 (40 dB).

Λύση

Δεχόμαστε κατ' αρχή τη λογική τιμή $C = 10 \text{ nF}$. Τότε, από την Εξ. (6.4.6), έχουμε

$$R = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2\pi \times 3 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-9}} = 5.3 \text{ k}\Omega$$

Άρα, θα πάρουμε

$$R = 5.6 \text{ k}\Omega \text{ (της σειράς E12)}$$

Δεχόμαστε $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ (ποτενσιόμετρο). Έτσι, από το γνωστό τύπο της ενίσχυσης αναστρέφοντα ενισχυτή βρίσκουμε:

$$R_2 = KR_1 = 100 \times 10 \text{ k}\Omega = 1 \text{ M}\Omega$$

Οι δίοδοι Zener παρέχουν προσαρμοζόμενη αρνητική ανασύζευξη. Δηλαδή, στη θέση συντονισμού, f_0 οπότε η τάση που εφαρμόζεται στις Zener είναι μικρή, οι Zener θέτονται εκτός λειτουργίας (δηλ. έξω από την περιοχή Zener). Έτσι, παρέχεται πολύ μικρή αρνητική ανασύζευξη πράγμα που δημιουργεί μεγάλη ενίσχυση, άρα οδηγεί σε ταλάντωση στην f_0 . Στη συχνότητα εκτός της f_0 η τάση στις Zener αυξάνει, σε σημείο που να αρχίζουν αυτές να άγουν και η αντίστασή τους πέφτει, παρέχοντας περισσότερη αρνητική ανασύζευξη ελαττώνοντας την ενίσχυση του ενισχυτή. Έτσι, οι ταλαντώσεις σε συχνότητα $\neq f_0$ αποκλείονται τελείως. Η ελάχιστη τάση εξόδου είναι προσεγγιστικά $V_{\min} \cong V_z$. Όπως και στον ταλαντωτή Wien, η ελάχιστη παραμόρφωση παρουσιάζεται σε αυτό το ελάχιστο πλάτος της τάσης εξόδου.

Ο ταλαντωτής διπλού T έχει πολλά **πλεονεκτήματα** ως προς ταλαντωτή Wien. Οι ταλαντώσεις του ταλαντωτή διπλού T ρυθμίζονται με τη μεταβολή μόνο μιας αντίστασης, ενώ στον ταλαντωτή Wien πρέπει να ρυθμίσουμε ταυτόχρονα δυο αντιστάσεις.

Το φίλτρο διπλού T είναι πιο επιλεκτικό από εκείνο του φίλτρου Wien, με αποτέλεσμα ο ταλαντωτής διπλού T να είναι πιο σταθερός και λιγότερο ευαίσθητος στο φόρτωμα. Επιπλέον, στον ταλαντωτή διπλού T η ακριβής στάθμη της ανασύζευξης δεν είναι τόσο κρίσιμη όσο του Wien, κι έτσι είναι ευκολότερη η δημιουργία ταλαντώσεων. Το μόνο πλεονέκτημα του ταλαντωτή Wien είναι ότι το κύκλωμά του έχει λιγότερα στοιχεία και επομένως είναι απλούστερο.

6.5 Σταθερότητα συχνότητας

Η σταθερότητα της συχνότητας ενός ταλαντωτή παίζει συχνά σημαντικό ρόλο για τις καλές επιδόσεις της διάταξης και τη σωστή αξιοποίησή της σε διάφορες εφαρμογές. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για συσκευές, όπως τα ηλεκτρονικά ρολόγια (clock), οι γεννήτριες κυματομορφών ή συχνοτήτων και τα κυκλώματα χρονισμού υψηλής ακρίβειας.

Ένας από τους τρόπους για να βελτιώσουμε τη σταθερότητα της συχνότητας είναι να μειώσουμε την *επίδραση των παραγόντων αστάθειας* (θερμοκρασία, κ.ά) που επηρεάζουν τη συχνότητα, όπως θα δούμε αμέσως παρακάτω. Ο άλλος τρόπος είναι να κατασκευάζουμε ταλαντωτές όσο το δυνατό σταθερής συχνότητας. Τέτοιοι ταλαντωτές είναι οι *ταλαντωτές με*

κρύσταλλο, που βασίζονται στη χρήση των κατανεμημένων στοιχείων R , L , C πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, όπως είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο.

Κατά κανόνα, η σταθερότητα συχνότητας ενός ταλαντωτή εκτιμάται από την τιμή της **ποσοστιαίας απόκλισης** S και είναι:

$$S = \frac{\omega_m - \omega_0}{\omega_0} \times 100 \% \quad (6.5.1)$$

όπου ω_0 είναι η επιδιωκόμενη συχνότητα ταλάντωσης και ω_m η πραγματικά επιτυγχανόμενη συχνότητα, σε μεγάλη απόκλιση. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του λόγου τόσο καλύτερη θα είναι η σταθερότητα συχνότητας ενός ταλαντωτή. Έτσι, π.χ. ένας ταλαντωτής με (μέγιστη) ποσοστιαία απόκλιση $S = 2 \%$ θα είναι 5 φορές σταθερότερος κατά συχνότητα από έναν ταλαντωτή που έχει $S = 10 \%$.

Βασικά, η σταθερότητα της συχνότητας ενός ταλαντωτή εξαρτάται από τους εξής τρεις κύριους παράγοντες: Τη *θερμοκρασία*, την *τάση τροφοδοσίας* και το *φόρτο* (ή την επόμενη βαθμίδα) του ταλαντωτή.

Η *επίδραση της θερμοκρασίας*, είναι αναπόφευκτη, γιατί οι τιμές των κυκλωματικών στοιχείων και των παραμέτρων του ταλαντωτή μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία.

Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι πιο σημαντική στους ταλαντωτές LC. Σημειώστε ότι η τιμή της αυτεπαγωγής L αυξάνει με τη θερμοκρασία, ενώ αντίθετα η τιμή της χωρητικότητας C ελαττώνεται. Το γεγονός αυτό έχει αποτελέσει τη βάση για διάφορες τεχνικές αντιστάθμισης των επιδράσεων των δύο αυτών στοιχείων. Ακριβής όμως εξισορρόπηση δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί.

Γενικά πάντως, η επίδραση της θερμοκρασίας είναι μικρότερη στους ταλαντωτές που έχουν συντονιζόμενο κύκλωμα με υψηλό συντελεστή ποιότητας Q .

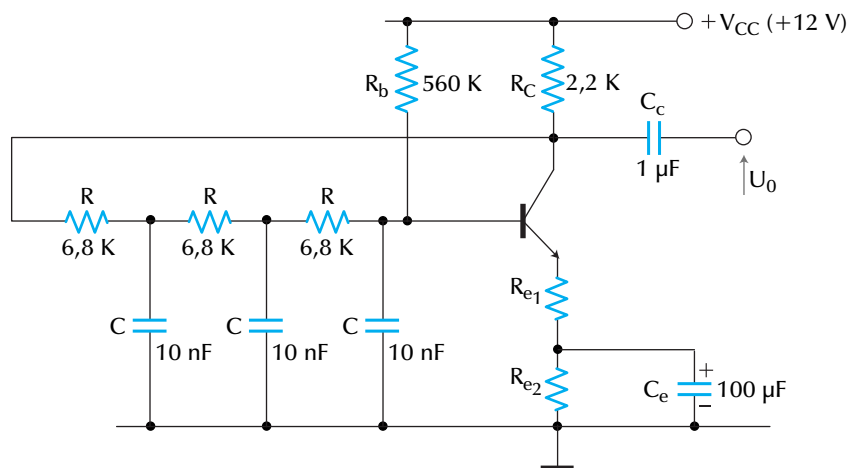
Η *επίδραση της τάσης dc τροφοδοσίας*, είτε πρόκειται για απλές μεταβολές είτε για συνεχείς διακυμάνσεις, εξαρτάται έντονα και από το βαθμό κυμάτωσης αυτής.

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

6-1. Ο ταλαντωτής Colpitts του Σχ.6.3, έχει στοιχεία: $L=10 \text{ mH}$, $C_1=100 \text{ nF}$, $C_2=4.7 \text{ nF}$, $R_c=560 \Omega$, $R_1=15 \text{ k}\Omega$, $R_2=4.7 \text{ k}\Omega$, $R_e=56 \Omega$, $h_{ie}=1 \text{ k}\Omega$

και $h_{ie}=99$. Να βρεθεί η συχνότητα ταλάντωσής του και να εξεταστεί αν συντηρούνται οι ταλαντώσεις.

- 6-2.** Να υπολογιστεί ταλαντωτής Colpitts με TE συχνότητας 100 kHz.
- 6-3.** Ο ταλαντωτής Clapp με BJT έχει $L=2.2$ mH, $C_1=4.7$ nF, $C_2=470$ pF, $C=820$ nF, $h_{ie}=49$, $h_{ie}=2.2$ kΩ και $R_C=2.7$ kΩ. Να βρεθεί η συχνότητα των ταλαντώσεων και αν αυτές είναι συντηρούμενες.
- 6-4.** Να υπολογισθεί ταλαντωτής Clapp συχνότητας 100 kHz με TE.
- 6-5.** Ταλαντωτής Hartley με BJT έχει $L_1=100$ μH, $L_2=10$ μH, $C=1$ nF, $R_C=820$ Ω, $h_{ie}=1.2$ kΩ και $h_{ie}=99$. Να υπολογισθεί η συχνότητα των ταλαντώσεών του και να εξεταστεί αν αυτές είναι συντηρούμενες.
- 6-6.** Να υπολογισθεί ταλαντωτής Hartley με TE συχνότητας 10 kHz.
- 6-7.** Ένας κρύσταλλος χαλαζία έχει τα εξής χαρακτηριστικά: $L=0.33$ H, $R=5.5$ kΩ, $C_s=0.065$ pF και $C_p=1$ pF. Να βρεθούν οι συχνότητες συντονισμού f_{os} , f_{op} και το Q του κρυστάλλου.
- 6-8.** Να υπολογισθεί ταλαντωτής μετάθεσης φάσης με TE συχνότητας 2 kHz.
- 6-9.** Για τον εικονιζόμενο ταλαντωτή, να βρεθεί η συχνότητα των ταλαντώσεων, με βάση τον τύπο $f = \sqrt{6} / 2\pi RC$ και να ελεγχθεί αν αυτές είναι συντηρούμενες.



Σχήμα 6.9. Κρύσταλλος (χαλαζία). Ισοδύναμο κύκλωμα και χαρακτηριστική σύνθετη αντίστασή του

- 6-10.** Να υπολογισθεί ταλαντωτής με TE γέφυρας Wien με συχνότητα 1 kHz.
- 6-11.** Να υπολογισθεί ταλαντωτής με TE διπλού T με συχνότητα 5 kHz.