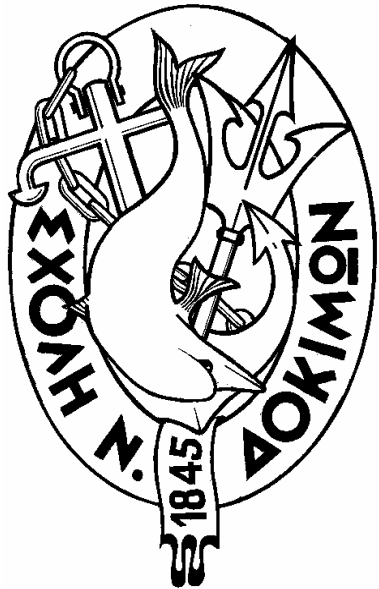


# Ταλαντωτές

4

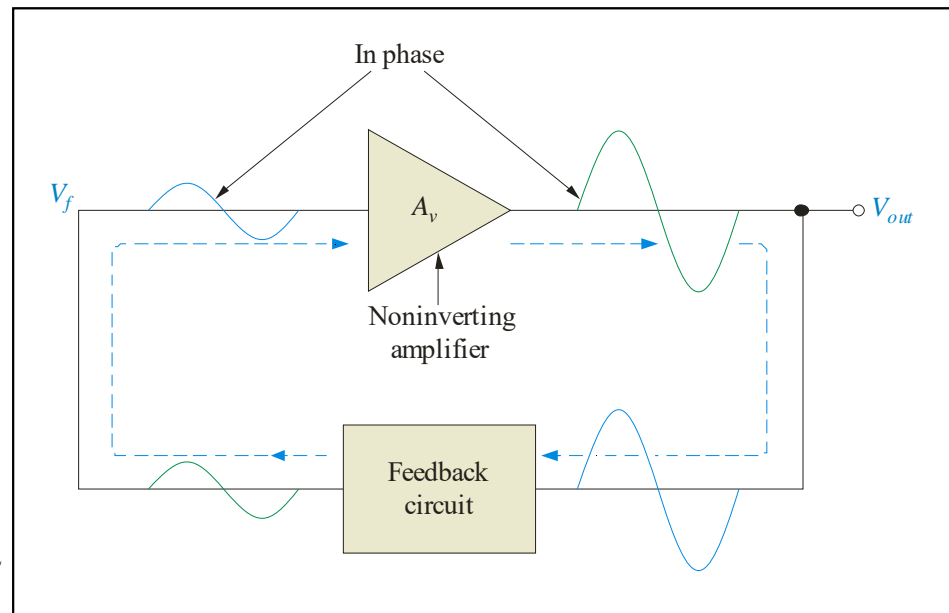


Ηλεκτρονική  
Γ' Τάξη - Β' εξάμηνο - Μάρτιος 2011  
Επ. Καθ. Ε. Καραγιάννη

# Ταλαντωτές ανάδρασης

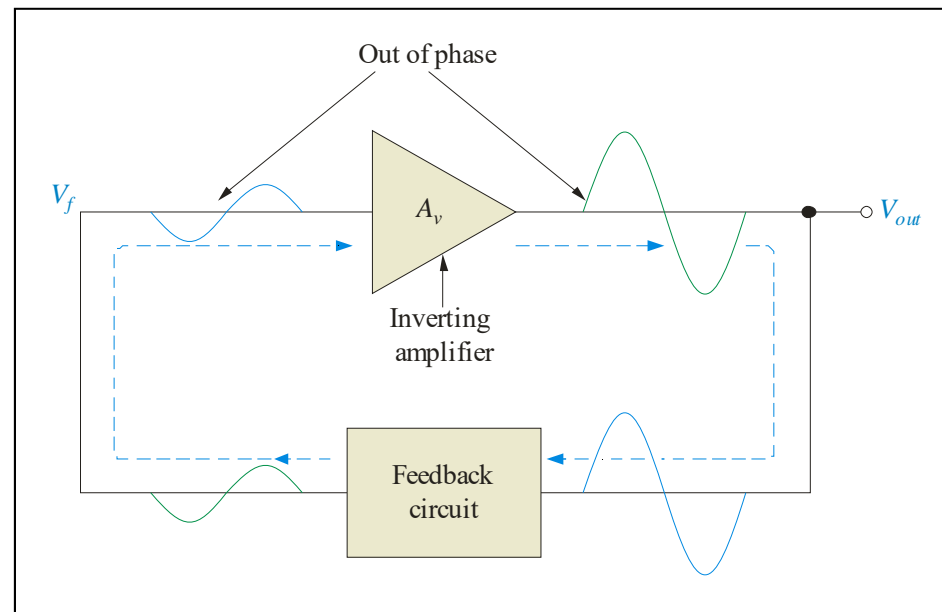
Οι ταλαντωτές είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα που παράγουν μια περιοδική κυματομορφή με μόνη είσοδο την DC τροφοδοσία. Στους ταλαντωτές ανάδρασης, ένα ποσοστό της εξόδου ανατροφοδοτείται στην είσοδο χωρίς μετατόπιση φάσης ( $0^\circ$  ή  $360^\circ$ ).

Η ανατροφοδότηση αυτή συμβάλλει στην ενίσχυση του σήματος εξόδου. Το εν φάσει σήμα ανάδρασης  $V_f$ , ενισχύεται για να δημιουργηθεί το σήμα εξόδου, το οποίο στη συνέχεια παράγει το σήμα ανάδρασης. Δημιουργείται δηλαδή ένας βρόχος στον οποίο το σήμα αναπαράγει τον εαυτό του και παράγεται συνεχής ημιτονοειδής έξοδος, δηλ. **ταλάντωση**.



# Ταλαντωτές ανάδρασης

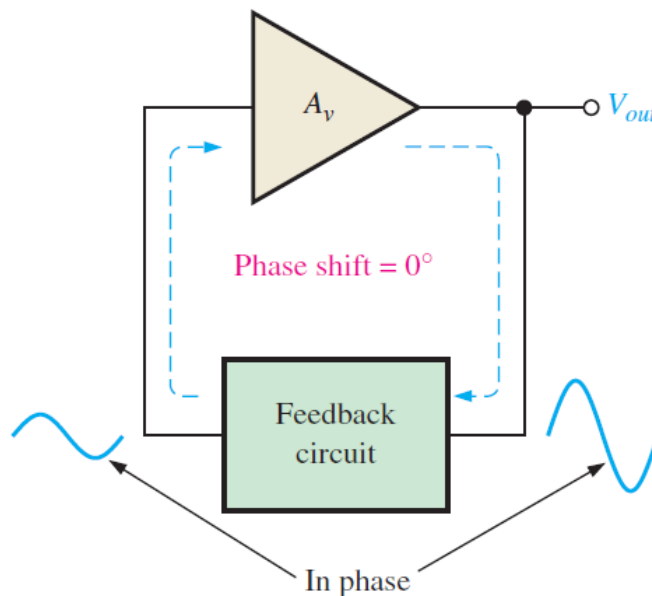
Εάν το κύκλωμα ανάδρασης επιστρέφει το σήμα με διαφορά φάσης  $180^\circ$ , τότε ένας αναστρέφων ενισχυτής προσθέτει την επιπλέον αναγκαία φάση των  $180^\circ$  ώστε να δημιουργηθεί θετική ανατροφοδότηση με μηδενική μετατόπιση φάσης.



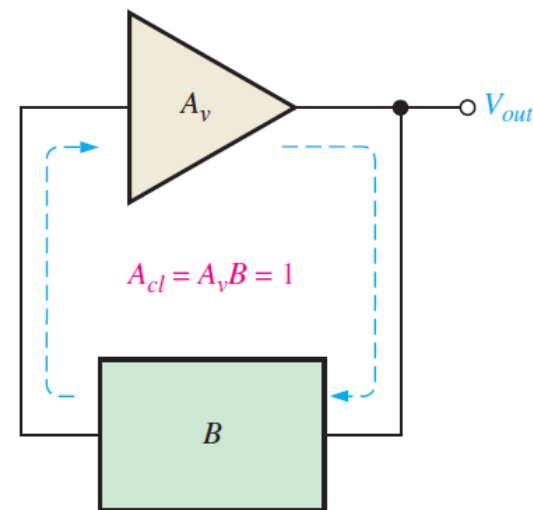
# Ταλαντωτές ανάδρασης

Για αυτοσυντηρούμενη ταλάντωση, πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής δύο συνθήκες:

1. Η ολίσθηση φάσης κατά μήκος του βρόχου πρέπει να είναι  $0^\circ$ .
2. Το κέρδος τάσης,  $A_{cl}$ , κατά μήκος του βρόχου ανάδρασης πρέπει να είναι ίσο με 1 (μοναδιαίο).



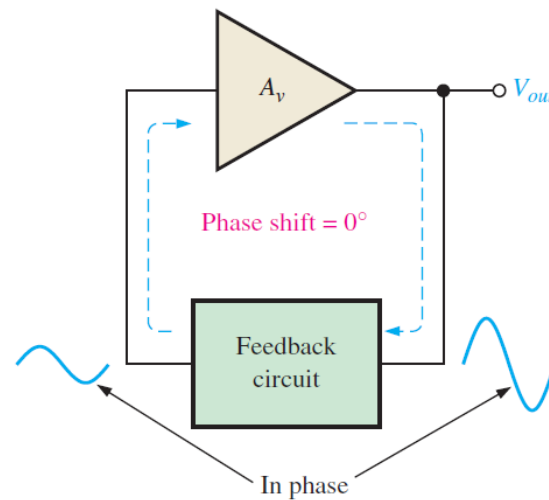
(a) The phase shift around the loop is  $0^\circ$ .



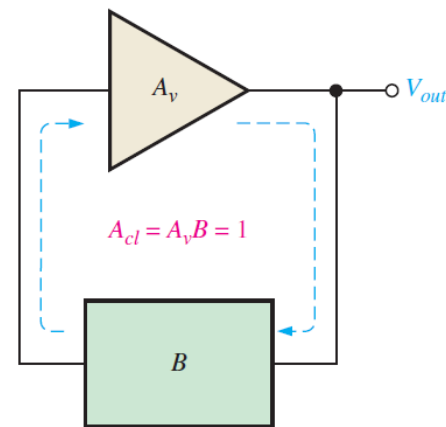
(b) The closed loop gain is 1.

# Ταλαντωτές ανάδρασης

Το κέρδος τάσης κατά μήκος του βρόχου είναι το γινόμενο του κέρδους του ενισχυτή, και του παράγοντα εξασθένησης,  $B$ , του κυκλώματος ανάδρασης. Εάν το σήμα εξόδου είναι ημίτονο, ένα κέρδος βρόχου μεγαλύτερο του 1 θα εξαναγκάσει γρήγορα την έξοδο να φτάσει στον κόρο, παραμορφώνοντας το σήμα εξόδου. Για να το αποφύγουμε, πρέπει να ελέγξουμε το κέρδος ώστε να το κρατήσουμε σταθερά στο 1 μόλις ξεκινήσουν οι ταλαντώσεις. Π.χ., εάν η εξασθένηση του κυκλώματος ανάδρασης είναι 0.01, ο ενισχυτής πρέπει να έχει κέρδος ακριβώς 100 για να αντισταθμίσει αυτή την εξασθένηση. Εάν το κέρδος είναι μεγαλύτερο από 100 ο ενισχυτής θα δουλεύει στον κόρο και θα ψαλιδίζει (παραμορφώνει) τα άκρα της κυματομορφής.



(a) The phase shift around the loop is  $0^\circ$ .

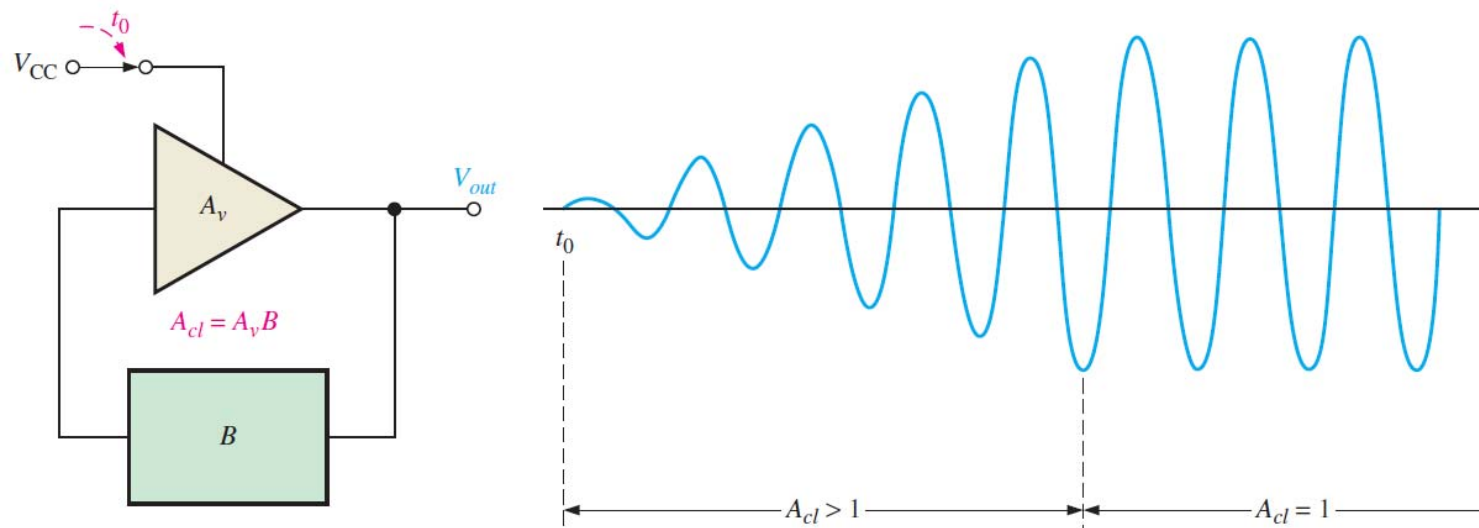


(b) The closed loop gain is 1.

# Ταλαντωτές ανάδρασης

Οι ταλαντωτές ανάδρασης χρειάζονται μια μικρή διαταραχή στην αρχή για να ξεκινήσουν οι ταλαντώσεις, όπως αυτή που παράγεται από το θερμικό θόρυβο.

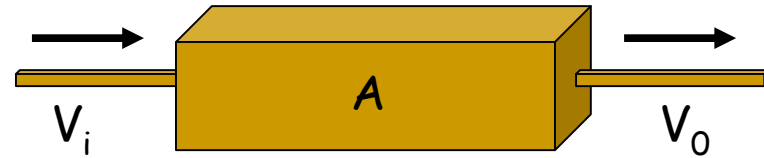
Αρχικά, αναπτύσσεται μια μικρή θετική τάση ανάδρασης από θερμικά παραγόμενο θόρυβο στις αντιστάσεις του κυκλώματος ή από μεταβατικά φαινόμενα κατά την εκκίνηση της τροφοδοσίας. Το κύκλωμα ανάδρασης επιτρέπει μόνο την συνιστώσα τάσης με συχνότητα ίση με την επιλεγμένη συχνότητα ταλάντωσης να εμφανιστεί συμφασικά στην είσοδο του ενισχυτή. Το αρχικό αυτό σήμα ανάδρασης ενισχύεται συνεχώς, οδηγώντας σε αύξηση της τάσης εξόδου μέχρι του σημείου που το κύκλωμα φτάνει σε μια κατάσταση ισορροπίας με αυτοσυντηρούμενη ταλάντωση στην έξοδο.



# Συστήματα Ελέγχου

Σύστημα Ελέγχου Ανοικτού Βρόχου

$$A = \frac{V_0}{V_i}$$

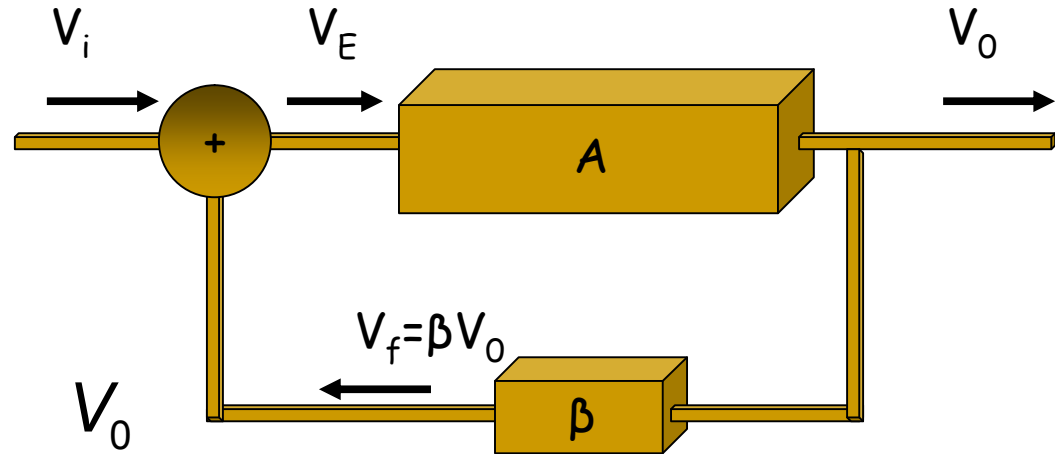


Σύστημα Ελέγχου Κλειστού Βρόχου  
με Ανάδραση

$$A = \frac{V_0}{V_E}$$

$$V_E = V_i + \beta V_0$$

$$A_f = \frac{V_0}{V_i} = \frac{V_0}{V_E - \beta V_0} = \frac{\frac{V_0}{V_E}}{1 - \beta \frac{V_0}{V_E}} = \frac{A}{1 - \beta A}$$



# Είδος Ανάδρασης

Είναι η μεταφορά ενός σήματος από ένα μέρος του κυκλώματος σ' ένα άλλο.

- Συνάρτηση μεταφοράς συστήματος κλειστού βρόχου

$$A_f = \frac{A}{1 - \beta A}$$

Αν το σήμα επανέρχεται στην είσοδο με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνεται το σήμα εισόδου (δηλαδή σε αντίφαση με το σήμα εισόδου), τότε η ανάδραση ονομάζεται **αρνητική ανάδραση**.

Αν το σήμα επανέρχεται στη είσοδο έτσι ώστε να αυξάνονται οι μεταβολές εξόδου (δηλαδή συμφασικό με το σήμα εισόδου), τότε η ανάδραση ονομάζεται **θετική ανάδραση**.

- Αρνητική Ανάδραση (Negative Feedback)

$$|A_f| < |A| \quad |1 - \beta A| > 1$$

- Θετική Ανάδραση (Positive Feedback)

$$|A_f| > |A| \quad |1 - \beta A| < 1$$

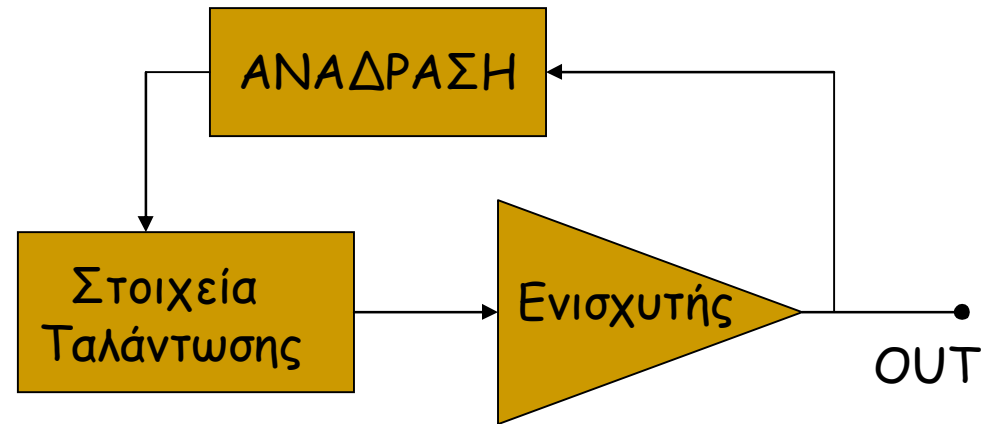
- Ταλαντώσεις (Oscillations)

$$|A_f| \rightarrow \infty \quad |1 - \beta A| \rightarrow 0$$





# Ταλαντωτές



- Ταλαντωτής είναι ένα κύκλωμα που παράγει ηλεκτρικό σήμα σταθερής συχνότητας
- Η συχνότητα ταλάντωσης εξαρτάται από από εξωτερικά στοιχεία (L,C,R). Έτσι έχουμε ταλαντωτή που ταλαντώνεται εξαιτίας του δικτυώματος RC ή του συντονισμένου κυκλώματος LC. Αυτοί οι ταλαντωτές είναι φθηνοί αλλά όχι σταθεροί και παράγουν χαμηλές συχνότητες
- Οι κρύσταλλοι χρησιμοποιούνται για να παράγουν μια συγκεκριμένη υψηλή συχνότητα και έχουν μεγάλη σταθερότητα
- Δίνοντας ενέργεια σε ένα συντονισμένο κύκλωμα αυτό θα παράγει μια συχνότητα ενώ η ταλάντωση θα είναι φθίνουσα. Για να κρατήσουμε το πλάτος της ταλάντωσης σταθερό πρέπει να τροφοδοτούμε το κύκλωμα με ενέργεια: **Αυτό γίνεται από την έξοδο του ενισχυτή που χρησιμοποιεί ο ταλαντωτής για την επεξεργασία του ασθενούς σήματος που παράγει το συντονισμένο κύκλωμα.** Άρα, μέρος του σήματος εξόδου οδηγείται στην είσοδο του συντονισμένου κυκλώματος.
- Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι ο ταλαντωτής είναι ένας ενισχυτής που έχει ανάδραση και χρησιμοποιεί στοιχεία παραγωγής ταλαντώσεων.



# Ταξινόμηση Ταλαντωτών

- Τριγωνικοί, τετραγωνικοί, ημιτονοειδείς
- VCOs: Η συχνότητα ελέγχεται από τάση (Voltage Controlled Oscillator)
- Ταλαντωτές χαμηλών συχνοτήτων, ακουστικών συχνοτήτων, ραδιοσυχνοτήτων
- Πολυδονητές:
  - Ταλαντώνονται στιγμιαία, αλλάζουν μόνο την κατάσταση εξόδου μεταξύ δύο διακεκριμένων θέσεων (1 ή 0) κάθε φορά που έρχεται το σήμα ελέγχου
  - Ταλαντώνονται συνεχώς με δύο διακεκριμένες θέσεις εξόδου (τετραγωνικός παλμός) και παρέχουν τη δυνατότητα διαφορετικών χρονικά ημιπεριόδων.



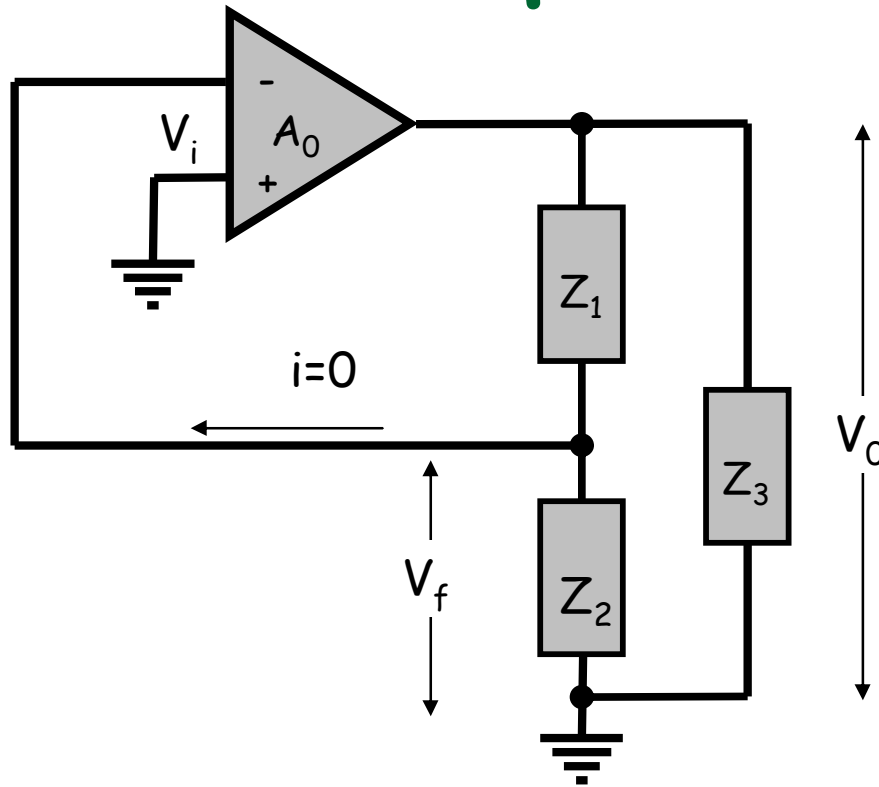
# Κυκλώματα Ταλαντωτών RF

- Τα περισσότερα κυκλώματα ταλαντωτών κατασκευάζονται με transistor BJT ή με FET (τα οποία προτιμώνται λόγω της μεγαλύτερης αντίστασης εισόδου)
- Σύνηθες πρόβλημα ταλαντωτών είναι η σταθεροποίηση της πόλωσης η οποία μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση της συχνότητας εξόδου λόγω ολίσθησης του σημείου ηρεμίας
- Τα κυριότερα κυκλώματα ταλαντωτών είναι:

Κυκλώματα με θετική ανάδραση	Κυκλωματα με αρνητική ανάδραση
Meisner (με συντονισμένο LC)	Με κρύσταλο χαλαζίου
<b>Hartley και Colpits</b> (με συντονισμένο LC)	Με δίοδο tunnel
Μεταβολής φάσης (Phase-Shift)	



# Γενική μορφή κυκλώματος Ταλαντωτή



$$Z_L = Z_3 \parallel (Z_1 + Z_2) = \frac{Z_3(Z_1 + Z_2)}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$$

$$\beta = \frac{V_f}{V_0} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$A = A_0 \frac{Z_L}{Z_L + R_0}$$

Διάρθρωση τάσης εφαρμόζουμε αν τα στοιχεία διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα. Διάρθρωση ρεύματος, αν στα στοιχεία εφαρμόζεται ίδια τάση.

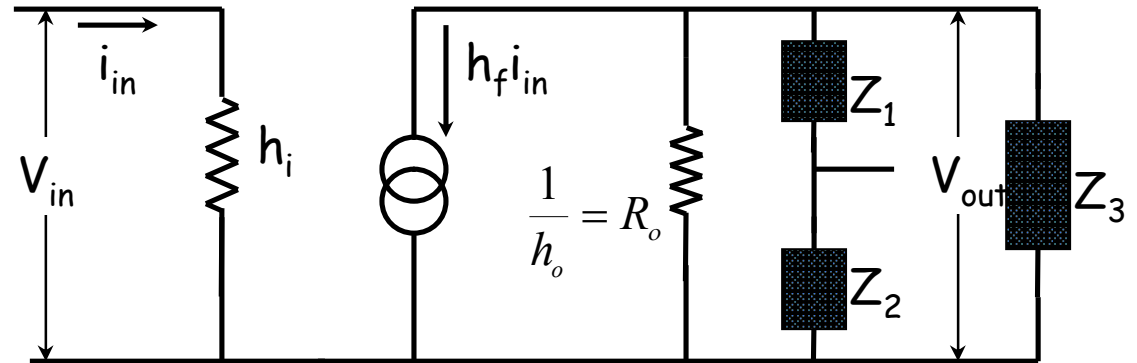
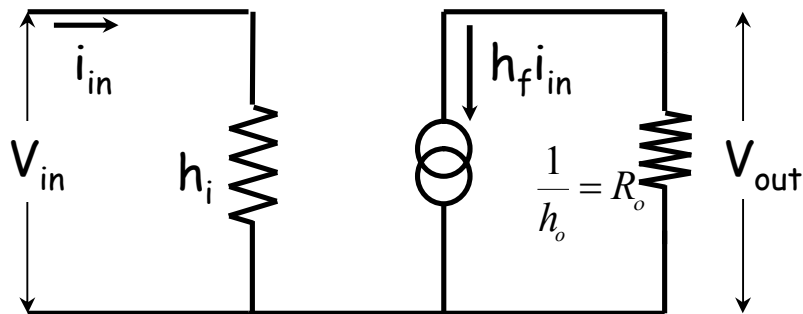
Η σχέση αυτή αποδεικνύεται στην επόμενη διαφάνεια. Συνθήκες:  $h_f=0$  και  $A$  είναι αρνητικός αριθμός

$$\beta \cdot A = A_0 \frac{Z_2 \cdot Z_3}{R_0(Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_3(Z_1 + Z_2)}$$



# Κέρδος τάσης κυκλώματος ταλαντωτή

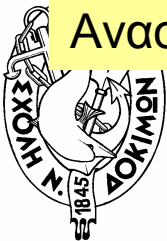
Κέρδος τάσης για τον  
τελεστικό ενισχυτή



$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-h_f i_{in} (R_o // Z_L)}{h_i i_{in}} \Rightarrow$$

$$A = \frac{-h_f \frac{R_o Z_L}{R_o + Z_L}}{h_i} = A_0 \frac{Z_L}{R_o + Z_L}$$

Αναστρέφων ενισχυτής:  $A_0$  αρνητικό!!



# Ανάλυση για σχεδίαση ταλαντωτή

στη θέση των  $Z_i$  βάζουμε

$$Z_i = jX_i$$

χωρητικότητες ( $X_i < 0$ )

ή πηνία  $X_i > 0$

$$\beta \cdot A = A_0 \frac{Z_2 \cdot Z_3}{R_0(Z_1 + Z_2 + Z_3) + Z_3(Z_1 + Z_2)}$$

$$\beta \cdot A = -A_0 \frac{X_2 \cdot X_3}{jR_0(X_1 + X_2 + X_3) - X_3(X_1 + X_2)}$$

Συνθήκη ταλαντώσεων Barkhausen:

$$\beta \cdot A = 1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_0(X_1 + X_2 + X_3) = 0 \\ -A_0 \cdot X_2 \cdot X_3 = -X_3(X_1 + X_2) \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$X_1 + X_2 = -X_3$$

$$-A_0 \cdot X_2 = X_3$$

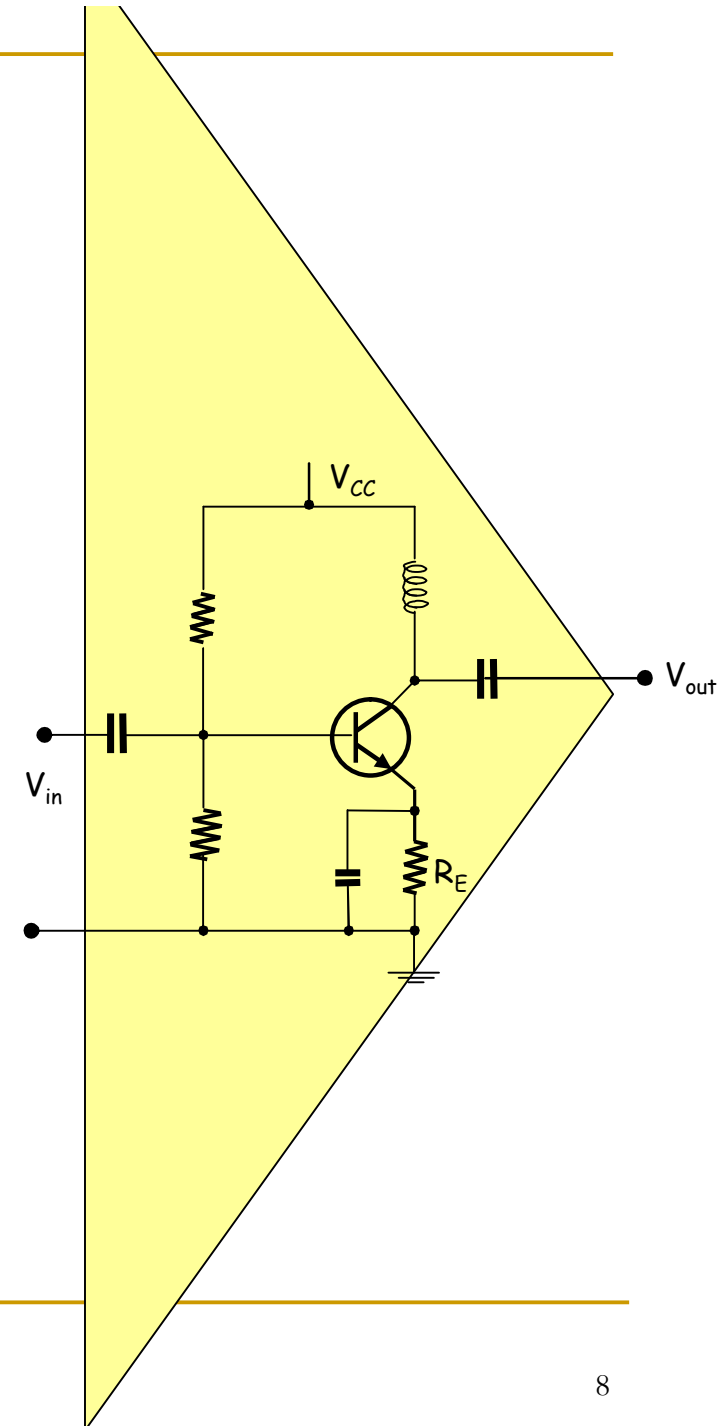
Τα  $X_2$  και  $X_3$  πρέπει να έχουν το ίδιο πρόσημο αφού  $A_0$  αρνητικό.

Δηλαδή να είναι και τα δύο αυτεπαγωγές και η  $X_1$  χωρητικότητα ή και τα δύο χωρητικότητες και η  $X_1$  αυτεπαγωγή

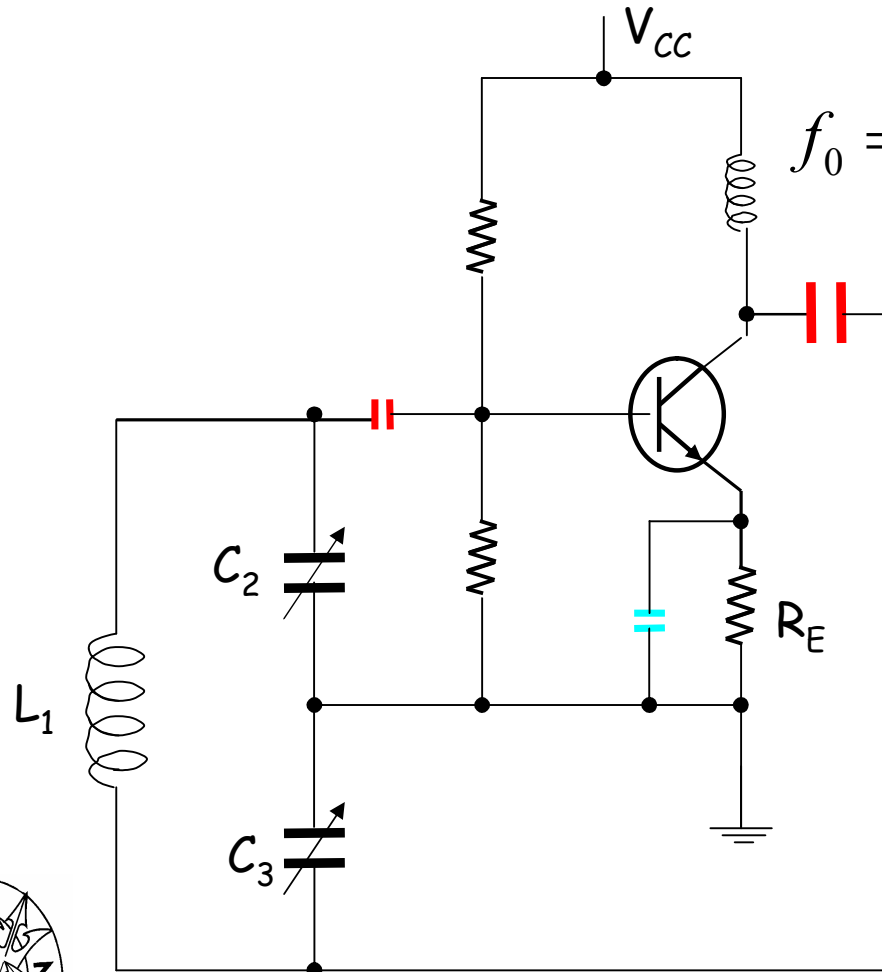


# Colpits και Hartley

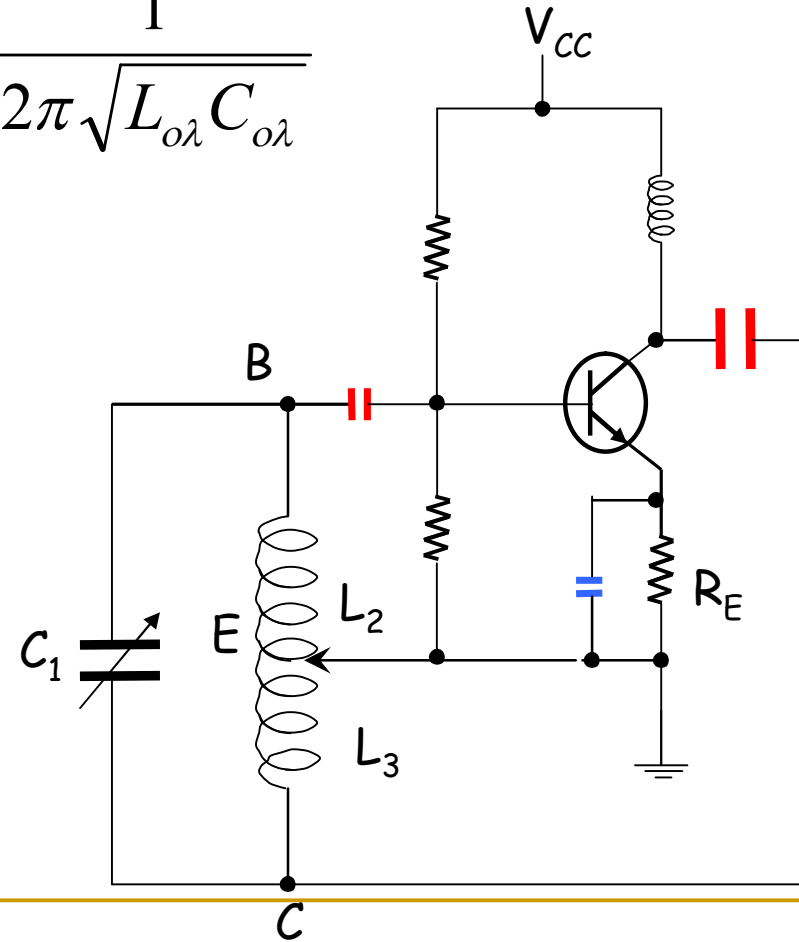
- Το προηγούμενο συμπέρασμα μας οδηγεί στους δυο πιο γνωστούς τύπους ταλαντωτών
  - Τον Colpits με πυκνωτές
  - Τον Hartley με αυτεπαγωγές
- Αντικαθιστώντας στο κύκλωμα της διαφάνειας 5 τα  $Z_i$  σαν αυτεπαγωγές ή πυκνωτές, προκύπτουν:



# Ταλαντωτής Colpits    Ταλαντωτής Hartley με transistor



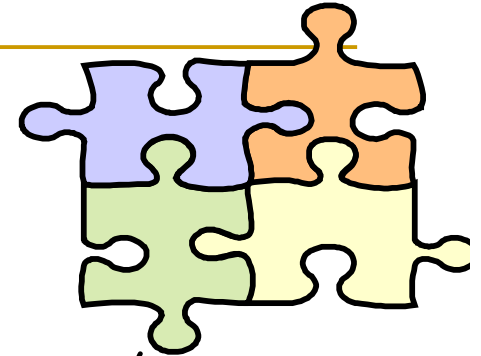
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{ολ}C_{ολ}}}$$





# Υπενθύμιση!

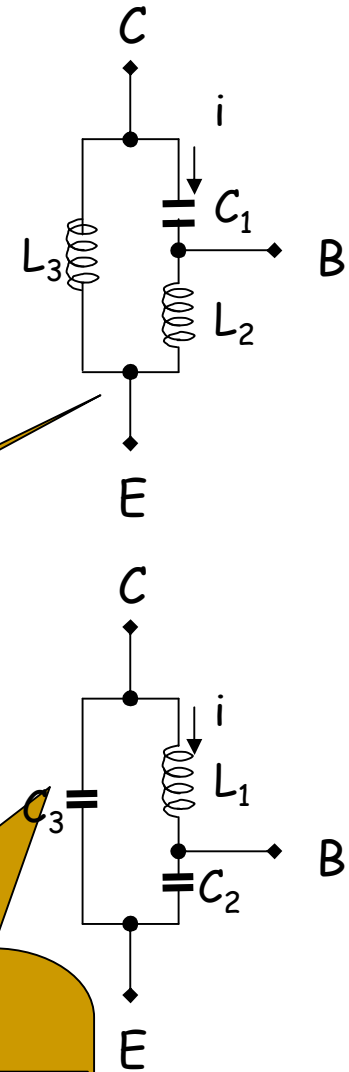
(...)



- Bypass Capacitor: Η χωρητικότητα παράλληλα στην αντίσταση εκπομπού. Για την DC πόλωση θεωρείται ανοικτοκύκλωμα. Τα ρεύματα και οι τάσεις πόλωσης δεν επηρεάζονται από το  $C$  διατηρώντας καλή ευστάθεια του σημείου Q. Για πολύ υψηλές συχνότητες αυτός ο πυκνωτής γειώνει τον εκπομπό και στο φορτίο εμφανίζεται μόνο η  $R_L$  παράλληλα με την εσωτερική αντίσταση εξόδου του transistor. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται το κέρδος τάσης στο μέγιστο. Η τιμή της επιλέγεται ώστε η σύνθετη αντίστασή της να είναι το πολύ το  $1/10$  της τιμής της  $R_E$  στη χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας.
- Coupling Capacitors: Είναι οι χωρητικότητες στην είσοδο και την έξοδο του ενισχυτή. Διαχωρίζουν τα AC σήματα από το DC δυναμικό πόλωσης.

# Ανάλυση

- Έχουμε ανάδραση τάσης από το κύκλωμα συλλέκτη προς το κύκλωμα βάσης με διαφορά φάσης 180 (άρνητικό κέρδος)
- Οι ταλαντώσεις διατηρούνται λόγω της διαφοράς φάσης που είναι 180°
  - Το  $L_2$  είναι πολύ μικρό αφού είναι κομμάτι του  $L_2+L_3$ . Άρα το ρεύμα  $i$  προπορευεται της τάσης  $V_{CE}$  κατά 90°(είναι χωρητικό).
  - Αν η ωμική αντίσταση του  $L_2$  είναι μηδενική τότε η τάση  $V_{be}$  θα προπορεύεται του ρεύματος.
  - Άρα η διαφορά φάσης  $V_{be}$  και  $V_{ce}$  είναι περίπου 180°.
  - Η αντίσταση συλλέκτη (κύκλωμα CE) είναι ένα ταλαντευόμενο κύκλωμα το οποίο παρουσιάζει ωμική αντίσταση στη συχνότητα συντονισμού του. Στη συχνότητα αυτή υπάρχει διαφορά φάσης 180° μεταξύ της τάσης βάσης και συλλέκτη και είναι η ίδια διαφορά με την οποία φτάνει το σήμα ανάδρασης στη βάση. Έτσι συντηρούνται οι ταλαντώσεις.
- Η συχνότητα συντονισμού είναι:



$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_2 + L_3)C_1}}$$

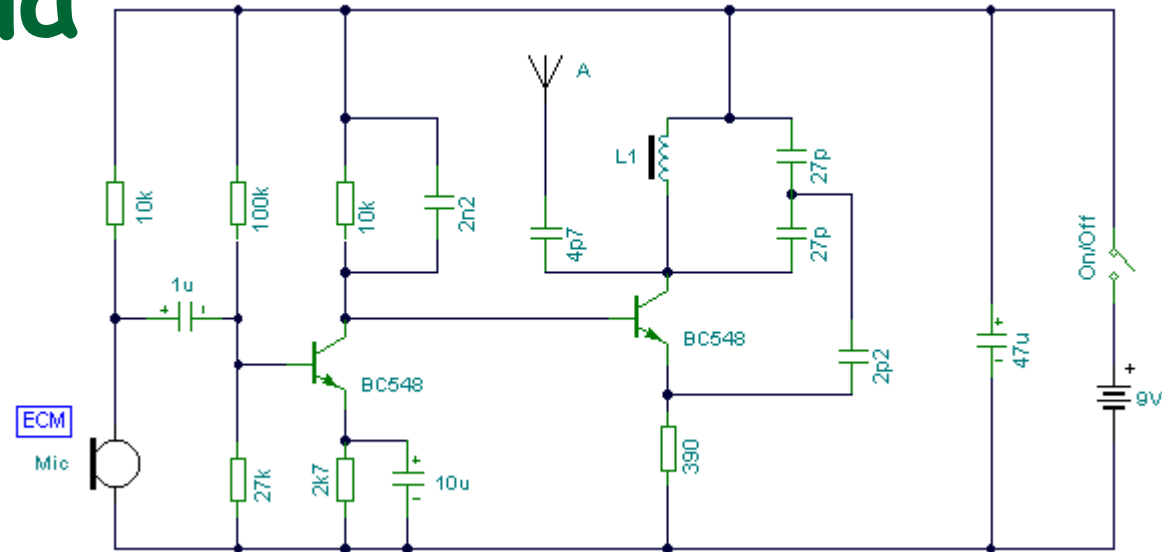
Colpits

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \left( \frac{1}{1/C_2 + 1/C_3} \right)}}$$

Hartley



# Παράδειγμα



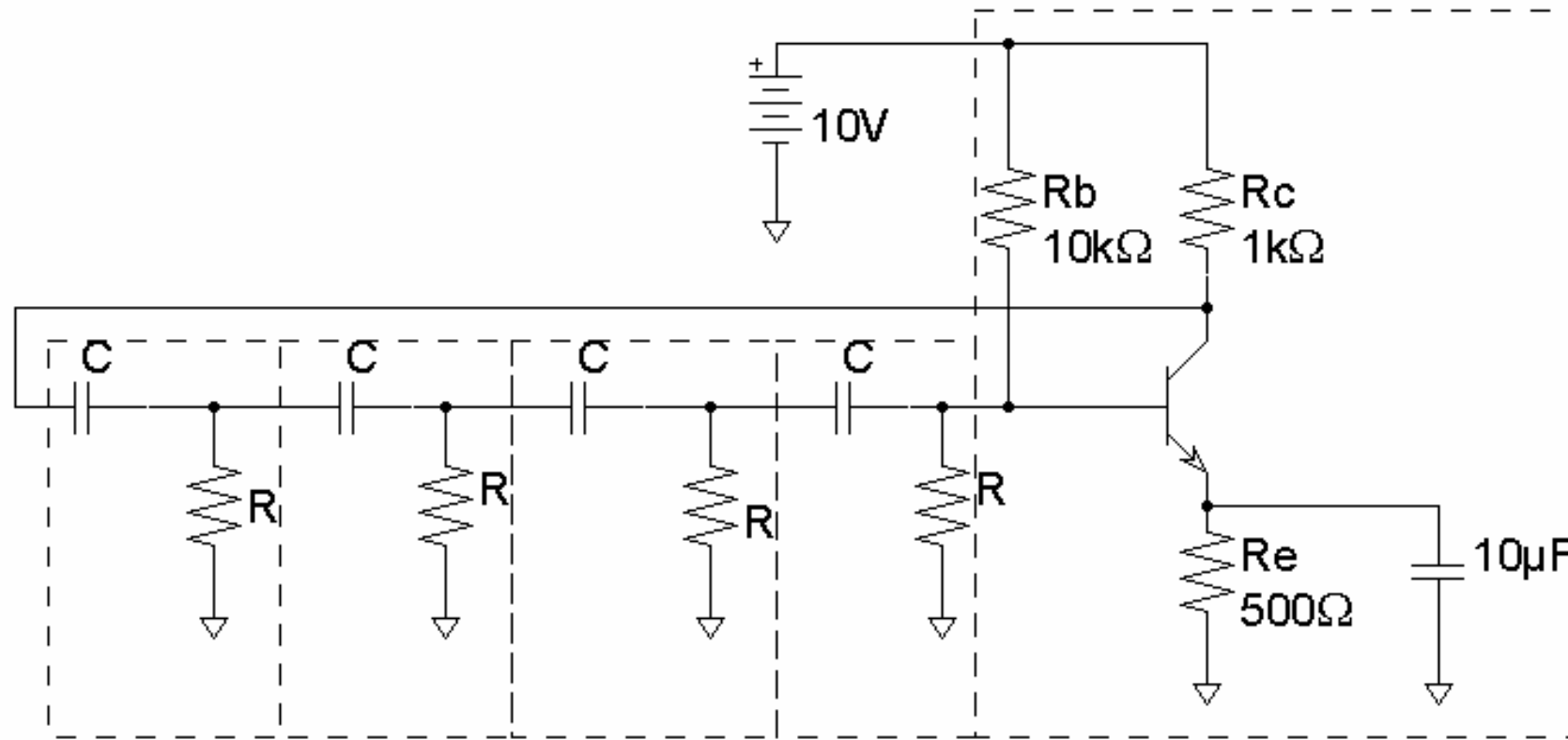
Υπολογίζοντας την παράλληλη χωρητικότητα,  $C1//C2=(27*27)/(27+27) = 13.5\text{pF}$  και υποθέτοντας ότι η αυτεπαγωγή του πηνίου είναι  $0.2\mu\text{H}$ , τότε:

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.2 \cdot 10^{-6} + 13.5 \cdot 10^{-12}}} = 96.8\text{MHz}$$

Αυτό σημαίνει ότι η συχνότητα ταλάντωσης του συγκεκριμένου ταλαντωτή βρίσκεται στο κέντρο της μπάντας FM (87.5 - 108 MHz). Με τοποθέτηση ενός μεταβλητού πηνίου, ο ταλαντωτής μπορεί να ρυθμιστεί.



# Ταλαντωτής μεταβολής ή στροφής φάσης



Phase-Shift Oscillator



# Phase Shift Oscillator

- Ένα από τα κυκλώματα RC που χρησιμοποιούνται στην είσοδο του BJT δηλαδή στη βάση είναι μια αντίσταση και ένας πυκνωτής.
- Η τάση εξόδου αυτού του δικτυώματος έχει στραφεί ως προς την τάση εισόδου κατά γωνία  $\arctan(1/\omega RC)$ . Η γωνία αυτή είναι
  - 0 αν  $R \rightarrow \infty$
  - $90^\circ$  αν  $R \rightarrow 0$
- Στο κύκλωμα του προηγούμενου σχήματος συνδέονται 4 τέτοιες βαθμίδες σε σειρά στις οποίες η τάση εξόδου της μίας είναι τάση εισόδου της επόμενης. Έτσι, μπορούμε να πετύχουμε διαφορά φάσης  $180^\circ$  από το κύκλωμα του συλλέκτη στο κύκλωμα της βάσης.
- Η συχνότητα αυτού του ταλαντωτή εξαρτάται από τις τιμές των R και C
- Η τελευταία αντίσταση στη βάση έχει τιμή  $R' = R // R_b / h_{ie}$ . Αποδεικνύεται ότι η συχνότητα ταλαντώσεων (για ταλαντωτή 3 βαθμίδων) είναι

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \frac{1}{\sqrt{6 + 4 \frac{R_c}{R'}}$$

- Για να υπάρξουν ταλαντώσεις πρέπει το τρανζίστορ να έχει κέρδος τουλάχιστον  $h_{fe} > 45$ . Ο ταλαντωτής αυτός χρησιμοποιείται για χαμηλές συχνότητες.



# Άλλοι ταλαντωτές

- Ταλαντωτής Meisner
  - Η ανάδραση γίνεται με μαγνητική σύζευξη
- Ταλαντωτής Κρυστάλλου
  - Τοποθετώντας πλακίδιο κρυστάλλου χαλαζία ( $\text{SiO}_2$ ) ως διηλεκτρικό ανάμεσα στις πλάκες ενός πυκνωτή, τότε αυτός μετατρέπεται σε ταλαντωτή.
  - Το φαινόμενο οφείλεται στις πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού το οποίο μετατρέπει τη μηχανική πίεση σε ηλεκτρική και αντίστροφα.
  - Το ισοδύναμο κύκλωμα είναι ο παράλληλος συνδυασμός ενός  $C$  με το συνδυασμό  $R, L, C$  σε σειρά.
- Ταλαντωτής διόδου tunnel
  - Η στατική χαρακτηριστική της διόδου tunnel έχει μια περιοχή αρνητικής αντίστασης (αυξανόμενης της τάσης το ρεύμα μειώνεται).
  - Η παράλληλη σύνδεση της διόδου με ένα συντονισμένο κύκλωμα ή με έναν κρύσταλλο δίνει ταλαντωτή με συνεχή ταλάντωση. (Οι απώλειες αναπληρώνονται από τη δίοδο)

Παράγονται ταλαντώσεις υψηλών συχνοτήτων



# Ασκήσεις (Ανάδραση - Ταλαντωτές)

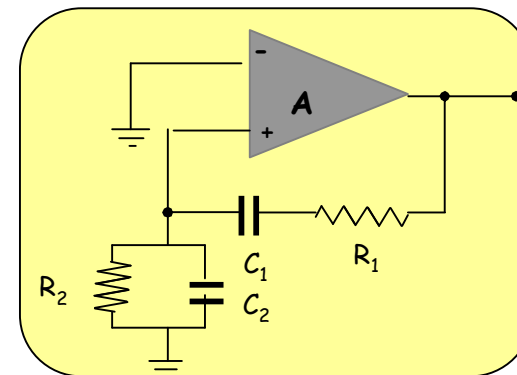
1. Ενισχυτής με ανάδραση έχει κέρδος ανοικτού βρόχου

$$A_V(s) = \frac{10^3}{\left(1 + \frac{s}{10^4}\right)^3}$$

Ο συντελεστής ανάδρασης  $\beta$  είναι ανεξάρτητος της συχνότητας.

- A) Να βρεθεί η συχνότητα  $\omega_0$  στην οποία η φάση του  $A_V$  είναι  $180^\circ$ .
- B) Στη συνέχεια να υπολογιστεί η τιμή  $\beta_0$  του συντελεστή ανάδρασης  $\beta$  για την οποία έχουμε μετάβαση από ευσταθή σε ασταθή λειτουργία. Τι συμβαίνει όταν  $\beta = \beta_0$ ;
- Γ) Ποιο θα είναι το κέρδος κλειστού βρόχου αν  $\beta = 0,0008$ ;
2. Να σχεδιαστεί ταλαντωτής με συχνότητα ταλάντωσης 10 KHz.

3. Ένας ενισχυτής χωρίς ανάδραση έχει μέγιστο κέρδος  $A=1000$ . Για ενίσχυση 3dB μικρότερη της μέγιστης οι συχνότητες αποκοπής είναι  $f_L=100\text{Hz}$  και  $f_H=1000\text{KHz}$ . Ο ενισχυτής όταν εργάζεται με ανάδραση έχει  $A_f=100$ . Να βρεθούν οι νέες συχνότητες αποκοπής και το εύρος ζώνης.
4. Ποιο κύκλωμα θα συνδέσουμε στην έξοδο ενός ταλαντωτή προκειμένου να «οδηγήσει» το σήμα σε άλλα κυκλώματά;
5. Δίνεται το ακόλουθο κύκλωμα. Ποια η τιμή του  $A$  ώστε το κύκλωμα να λειτουργεί ως ταλαντωτής; Να βρεθεί η  $\omega_0$ . Δίνεται  $R_1=R_2=R$  και  $C_1=C_2=C$



# Υπόδειξη 1

$$(a+b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3$$

Το κέρδος ανοικτού βρόχου μπορεί να γραφεί

$$A_V(s) = \frac{10^3}{\left(1 + \frac{s}{10^4}\right)^3} \Rightarrow A_V(j\omega) = \frac{10^3}{\left(1 + \frac{j\omega}{10^4}\right)^3} \Rightarrow$$

$$A_V(j\omega) = \frac{10^3}{\left(1 - \frac{3\omega^2}{10^8}\right) + j \frac{\omega}{10^4} \left(3 - \frac{\omega^2}{10^8}\right)}$$

Όταν  $\varphi=180^\circ$  τότε

$$\frac{\frac{\omega}{10^4} \left(3 - \frac{\omega^2}{10^8}\right)}{1 - \frac{3\omega^2}{10^8}} = 0^- \Rightarrow \omega^2 = 3 \cdot 10^8 \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{3} \cdot 10^4 \text{ rad/sec}$$

$$A_V(j\omega_0) = \frac{10^3}{\left(1 - \frac{3 \cdot 3 \cdot 10^8}{10^8}\right)} = -\frac{1000}{8} = -125$$

Για να συμβούν ταλαντώσεις πρέπει  $\beta A=1$  για την  $\omega_0$

$$\beta \cdot |A_V(j\omega_0)| = 1 \Rightarrow \beta \frac{10^3}{8} = 1 \Rightarrow \beta = \frac{8}{10^3} = 0.008$$

Τότε το  $A_{Vf}$  γίνεται άπειρο!

## Άλλη μέθοδος

$$A_V(j\omega) = \frac{10^3}{\left(1 + \frac{j\omega}{10^4}\right)^3} \Rightarrow \begin{cases} |A_V(\omega)| = \frac{10^3}{\left(\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{10^8}}\right)^3} \\ \phi(\omega) = -3\tau_{\text{οξεφ}}\left(\frac{\omega}{10^4}\right) \end{cases}$$

$$\left. \begin{aligned} |A_V(\omega_0)| &= \frac{10^3}{\left(\sqrt{1 + \frac{\omega_0^2}{10^8}}\right)^3} \\ -180^\circ &= 3\tau_{\text{οξεφ}}\left(\frac{\omega_0}{10^4}\right) \Rightarrow \tau_{\text{οξεφ}}\left(\frac{\omega_0}{10^4}\right) = 60^\circ \Rightarrow \frac{\omega_0}{10^4} = \sqrt{3} \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{3} \cdot 10^4 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$|A_V(\omega_0)| = \frac{10^3}{\left(\sqrt{1 + \frac{(\sqrt{3} \cdot 10^4)^2}{10^8}}\right)^3} \Rightarrow |A_V(\sqrt{3} \cdot 10^4)| = \frac{10^3}{8}$$

$$A_{Vf}(s) = \frac{\frac{10^3}{\left(1 + \frac{s}{10^4}\right)^3}}{1 + \beta \frac{10^3}{\left(1 + \frac{s}{10^4}\right)^3}} = \frac{10^3}{\left(1 + \frac{s}{10^4}\right)^3 + \beta 10^3}$$

$$A_{Vf}(j\omega) = \frac{10^3}{\left(1 + j \frac{\omega}{10^4}\right)^3 + \beta \cdot 10^3} = \frac{10^3}{\left(1 - \frac{3\omega^2}{10^8} + \beta \cdot 10^3\right) + j \frac{\omega}{10^4} \left(3 - \frac{\omega^2}{10^8}\right)}$$

$$|A_{Vf}(\omega_0)| \xrightarrow{\beta=0,0008} \frac{10^3}{\left(1 - \frac{3(\sqrt{3} \cdot 10^4)^2}{10^8} + 0,8\right)} = \frac{10^3}{-7,2} = -138,9$$



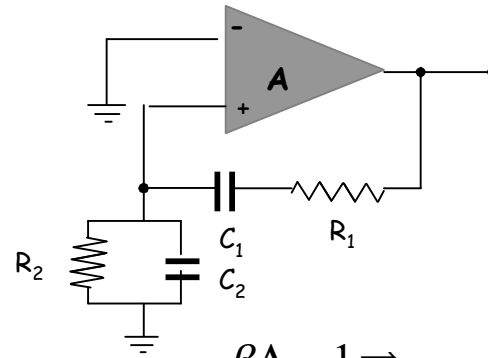


# Υπόδειξη 5

$$\frac{v_f}{v_0} = \frac{R_2 // C_2}{R_2 // C_2 + R_1 + C_1} = \frac{\frac{R_2}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} \xrightarrow{R,C}$$

$$\frac{v_f}{v_0} = \frac{\frac{R}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\frac{R}{j\omega C}}{\frac{R}{j\omega C} + R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega CR}{j\omega CR + (j\omega CR + 1)^2} = \frac{j\omega CR}{j\omega CR - \omega^2 C^2 R^2 + 1 + j2\omega CR} \Rightarrow$$

$$\left| \frac{v_f}{v_0} \right| = \frac{\omega CR}{\sqrt{(1 - \omega^2 C^2 R^2)^2 + (3\omega CR)^2}}$$



$$\beta A = 1 \Rightarrow$$

$$\frac{j\omega CRA}{1 - \omega^2 C^2 R^2 + j3\omega CR} = 1 \Rightarrow$$

$$\begin{cases} 1 - \omega^2 C^2 R^2 \\ 3\omega CR = \omega CRA \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \omega = \frac{1}{RC} \\ A = 3 \end{cases}$$

Για να λειτουργεί ως ταλαντωτής πρέπει το  $A$  να είναι τουλάχιστον ίσο με 3

