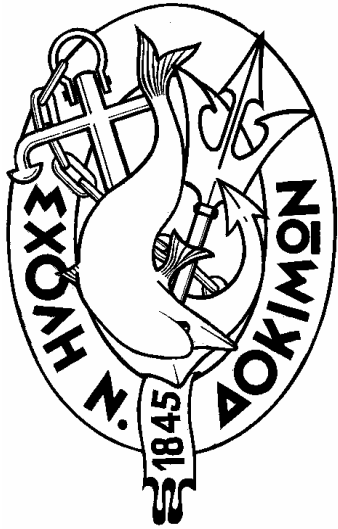


# Ανάδραση



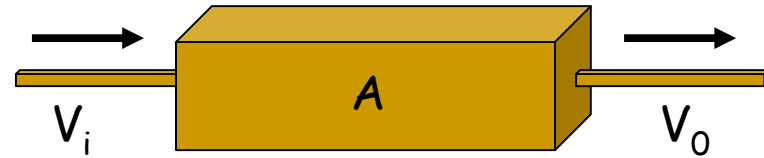
Ηλεκτρονική  
Γ' τάξη  
Επ. Καθηγ. Ε. Καραγιάννη

3

# Συστήματα Ελέγχου

Σύστημα Ελέγχου Ανοικτού Βρόχου

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

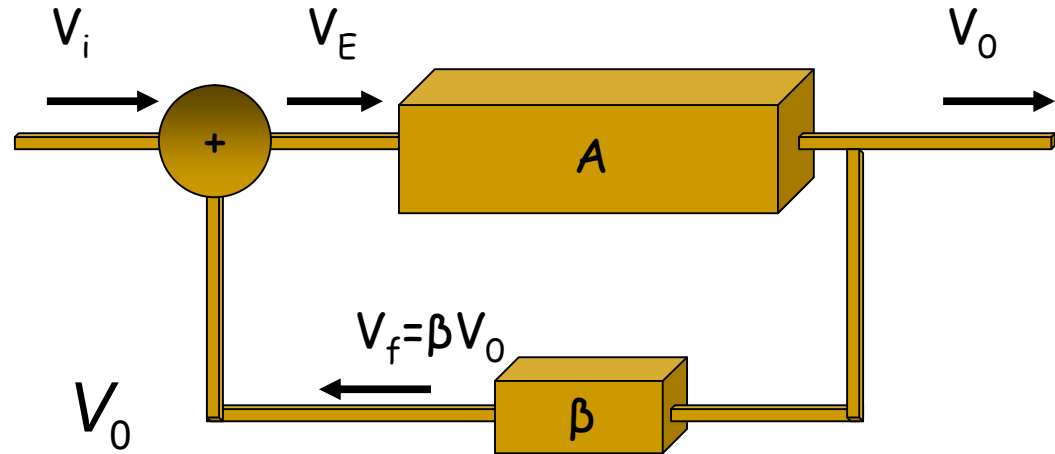


Σύστημα Ελέγχου Κλειστού Βρόχου με Ανάδραση

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

$$V_E = V_i + \beta V_0$$

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



# 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)

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



# Μειονεκτήματα Αρνητικής Ανάδρασης

- Η μεταβλητή εξόδου επιστρέφει στην είσοδο με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιτίθεται στο σήμα εισόδου
- Το κέρδος γίνεται μικρότερο από το κέρδος χωρίς ανάδραση
  - Αν  $A$  και  $\beta$  είναι πραγματικοί αριθμοί τότε  $A\beta < 0$
  - Έστω  $A = -100$  και  $\beta = 0.1$ . Τότε  $A_f = -9.1$



# Πλεονεκτήματα Αρνητικής Ανάδρασης

- Βελτιώνεται η αστάθεια

Μεταβολή στο κέρδος ανοικτού βρόχου 20%

$$A_{\text{αρχικό}} = -100$$

$$A_{f,\text{αρχικό}} = -9.1$$

$$A_{\text{τελικό}} = -80$$

$$A_{f,\text{τελικό}} = -8.8$$

$$\beta = 0.1$$

Μεταβολή στο κέρδος κλειστού βρόχου 3.3%

- Βελτιώνεται το ποσοστό παραμόρφωσης

Σήμα εισόδου  $V_i$ . Η παραμόρφωση εξόδου θα είναι  $D_f V_0$ .

Μετά την ανάδραση, η παραμόρφωση  $\beta D_f V_0$  επιστρέφει στην είσοδο και προστίθεται στο  $V_E$ . Μετά την ενίσχυση η παραμόρφωση γίνεται  $\beta D_f V_0 A$  και προστίθεται στο σήμα εξόδου  $V_0$ . Εκεί προστίθεται και η παραμόρφωση του αρχικού ενισχυτή  $D V_0$ .

$$D = 10\%$$

$$D_f V_0 = D V_0 + \beta D_f V_0 A$$

$$D_f = 0.9\%$$

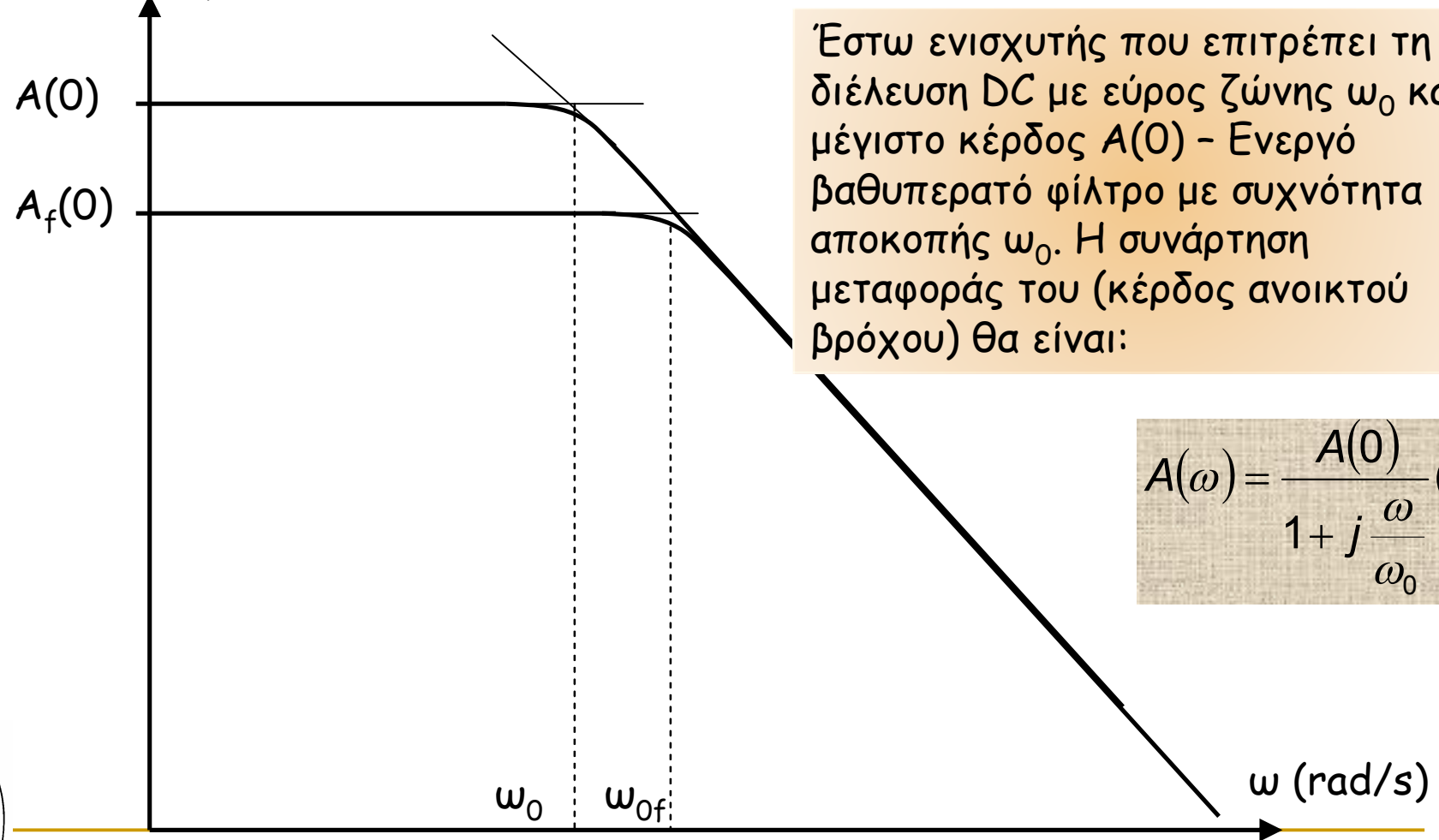
$$\frac{D_f}{D} = \frac{1}{1 - \beta A}$$

- Αυξάνεται το εύρος ζώνης συχνοτήτων



# Η αρνητική ανάδραση αυξάνει το εύρος ζώνης συχνοτήτων

$A(\omega)$  και  $A_f(\omega)$



$$A(\omega) = \frac{A(0)}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (1)$$



# ...συνέχεια

Το κέρδος κλειστού βρόχου συναρτήσει της συχνότητας θα είναι:

$$A_f(\omega) = \frac{A(\omega)}{1 - \beta A(\omega)} \quad (2)$$

Με μέγιστο κέρδος (κέρδος χαμηλών συχνοτήτων:

$$A_f(0) = \frac{A(0)}{1 - \beta A(0)}$$

Επειδή  $1 - \beta A > 1$ , το μέγιστο κέρδος με ανάδραση είναι μικρότερο από το μέγιστο κέρδος χωρίς ανάδραση

Η συχνότητα αποκοπής θα βρεθεί αν αντικαταστήσουμε στην (2) την (1)

$$A_f(\omega) = \frac{A(\omega)}{1 - \beta A(\omega)} \Rightarrow A_f(\omega) = \frac{\frac{A(0)}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}}{1 - \beta \frac{A(0)}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}} \Rightarrow$$

$$A_f(\omega) = \frac{A(0)}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0} - \beta A(0)} \Rightarrow$$

$$A_f(\omega) = \frac{A(0)}{1 - \beta A(0) + j \frac{\omega}{\omega_0 [1 - \beta A(0)]}} \Rightarrow$$

$$A_f(\omega) = \frac{A_f(0)}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{of}}}$$

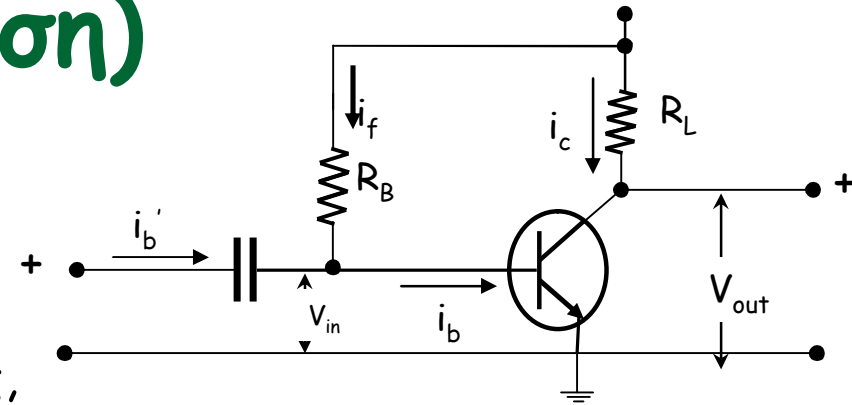
$$\omega_{of} = \omega_0 [1 - \beta A(0)]$$

Επειδή  $1 - \beta A > 1$ , η νέα συχνότητα αποκοπής είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα αποκοπής χωρίς ανάδραση



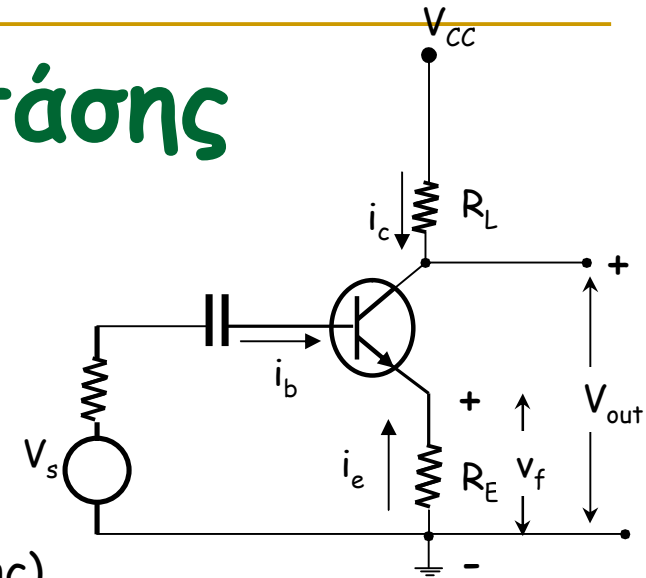
# Ανάδραση τάσης - ρεύματος (παράλληλη ανάδραση)

- Αν σε ένα κύκλωμα ενισχυτή κοινού εκπομπού συνδέσουμε μεταξύ συλλέκτη και βάσης, μια αντίσταση  $R_f$ , τότε έχουμε κύκλωμα με παράλληλη ανάδραση ή ανάδραση τάσης - ρεύματος, όπως φαίνεται στο σχήμα.
- **Παράλληλη ανάδραση:** σημαίνει ότι η  $R_f$  συνδέεται παράλληλα με την έξοδο και την είσοδο του ενισχυτή.
- **Ανάδραση τάσης - ρεύματος:** σημαίνει ότι ο ρεύμα που επιστρέφει στην είσοδο του ενισχυτή είναι ανάλογο της τάσης εξόδου.
  - Το ρεύμα ανάδρασης είναι:  $i_f = i_b - i_b'$
  - Αν η τάση εξόδου  $V_o$  αυξηθεί για οποιοδήποτε λόγο, το  $i_f$  θα αυξηθεί και προκαλεί την αύξηση του  $i_b$  ( $i_b' = \text{σταθερό}, R_s = \text{πολύ μεγάλη}$ ).
  - Η αύξηση του  $i_b$  συνεπάγεται αύξηση του  $i_c$  ( $i_c = \beta \cdot i_b$ ) και της πτώσης τάσης στα άκρα της  $R_L$  δηλαδή η  $V_{out}$  θα μειωθεί.
- Έτσι, η αρνητική ανάδραση επενεργεί σαν σταθεροποιητής, για να αντισταθμίζει τις μεταβολές που μπορούν να συμβούν στην έξοδο.





# Ανάδραση ρεύματος - τάσης (ανάδραση σειράς)



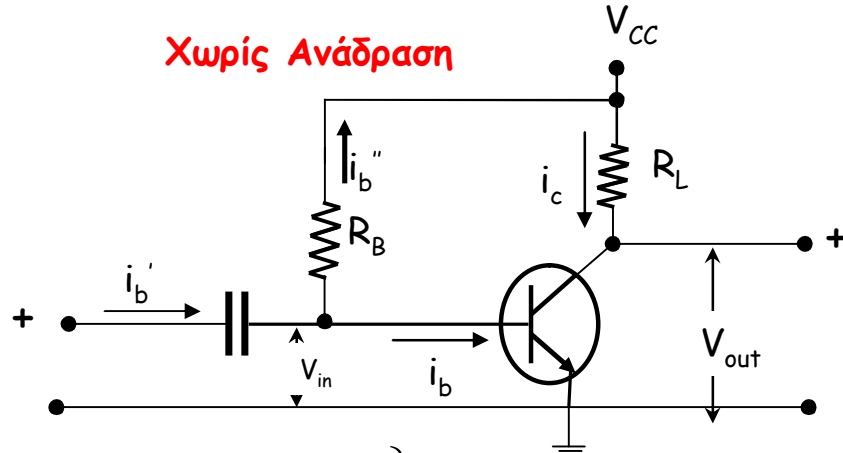
- Αν σε ένα κύκλωμα ενισχυτή κοινού εκπομπού έχουμε στον εκπομπό μόνο αντίσταση (χωρίς πυκνωτή διαρροής), τότε έχουμε κύκλωμα με ανάδραση σειράς ή ανάδραση ρεύματος - τάσης, όπως φαίνεται στο σχήμα (φαίνεται το βασικό κύκλωμα και οι αντιστάσεις πόλωσης παραλείπονται).
- **Ανάδραση σειράς:** σημαίνει ότι η τάση ανάδρασης είναι σε σειρά με την είσοδο.
- **Ανάδραση ρεύματος - τάσης:** σημαίνει ότι η τάση που επιστρέφει (τάση ανάδρασης) στην είσοδο του ενισχυτή είναι ανάλογη του ρεύματος εξόδου.
  - Στο κύκλωμα του σχήματος, η τάση ανάδρασης  $V_f$  είναι η πτώση τάσης στα άκρα της  $R_E$  και η τάση εισόδου του ενισχυτή  $V_i$  είναι μεταξύ βάσης - εκπομπού του τρανζίστορ.
  - Στο κύκλωμα αυτό, η αρνητική ανάδραση επιτυγχάνεται ως εξής: Αν για οποιοδήποτε λόγο το ρεύμα εισόδου  $I_b$  τείνει να αυξηθεί, θα προκαλέσει μια αύξηση τάσης στα άκρα της  $R_E$ , και η τάση εκπομπού θα αυξηθεί ανάλογα.

Αυτό σημαίνει αντίστοιχη μείωση της  $V_{be}$  που προκαλεί μείωση του  $I_b$  και  $I_c$  (δηλαδή το ρεύμα εξόδου  $I_o$ ). Άρα το ρεύμα εξόδου  $I_o$  θα τείνει να μειωθεί και έτσι η αρνητική ανάδραση επενεργεί σαν σταθεροποιητής στις μεταβολές του ρεύματος εξόδου.



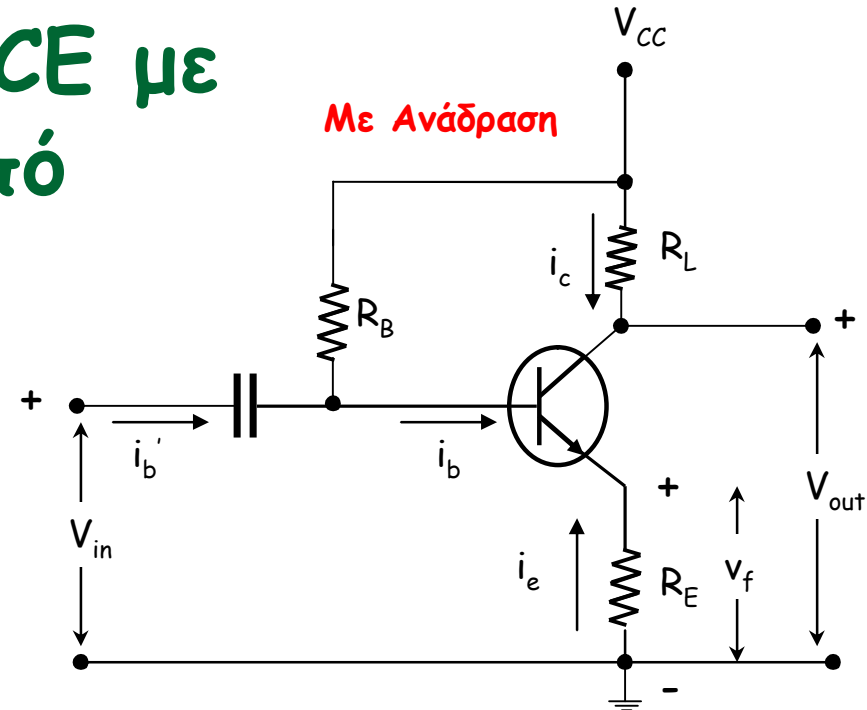
# Ανάδραση: Ενισχυτής CE με αντίσταση στον εκπομπό

Χωρίς Ανάδραση



$$\left. \begin{aligned} V_{out} &= i_L R_L = -h_{fe} R_L i_b \\ V_{in} &= V_{be} = h_{ie} i_b = R_B i_b'' \end{aligned} \right\} \Rightarrow A = \frac{V_{out}}{V_{in}} \approx -\frac{h_{fe} R_L}{h_{ie}}$$

Με Ανάδραση



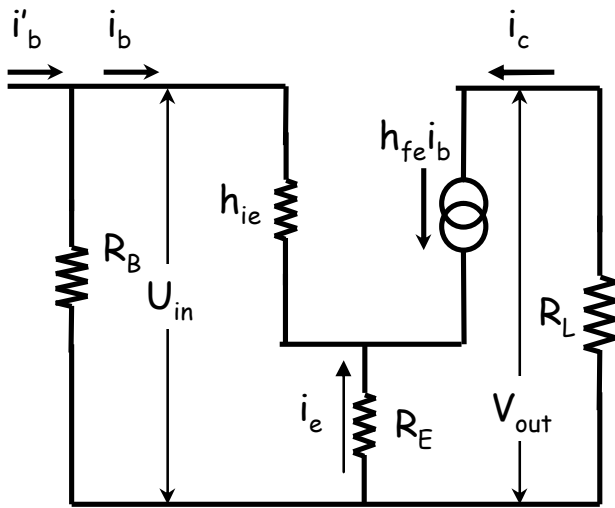
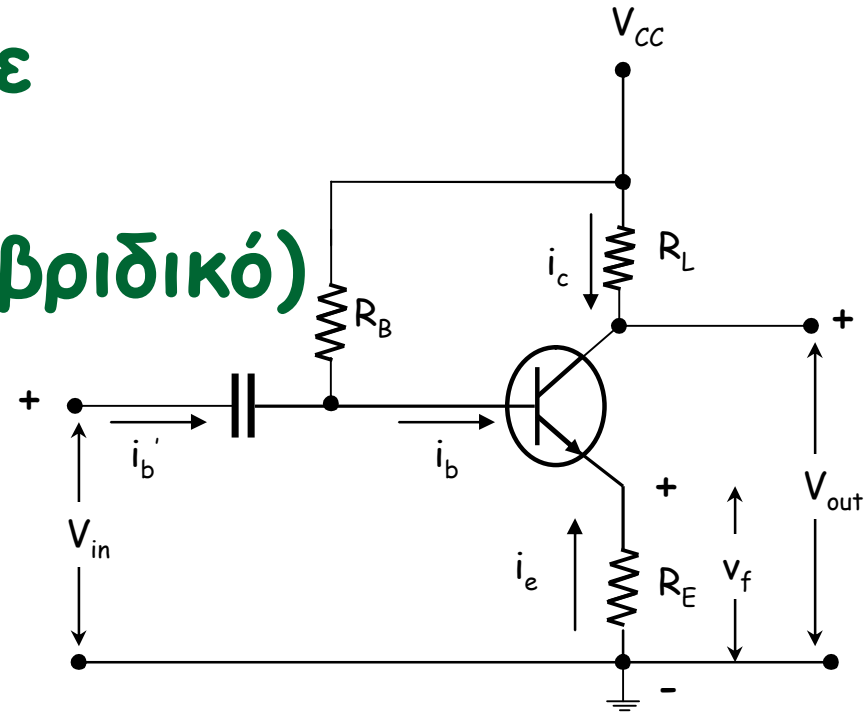
Η  $R_B$  είναι ο παράλληλος συνδυασμός  $R_1 // R_2$ . Έχουμε αποδείξει ότι η αντίσταση πόλωσης της βάσης  $R_B$  δεν επηρεάζει το κέρδος τάσης αλλά μόνο το κέρδος ρεύματος (διαφάνεια 17, Μάθημα 1)

$$\left. \begin{aligned} A_f &= \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{out}}{V_{be} + V_f} = \frac{\frac{V_{out}}{V_{be}}}{1 + \frac{V_f}{V_{be}}} = \frac{\frac{V_{out}}{V_{be}}}{1 + \frac{V_{out}}{V_{be}} \frac{V_f}{V_{out}}} = \frac{A}{1 + A \frac{V_f}{V_{out}}} \\ \beta &= -\frac{V_f}{V_{out}} = -\frac{-i_e R_E}{-i_c R_L} \xrightarrow{i_e \approx -i_c} \beta = \frac{R_E}{R_L} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A}{1 - \beta A}$$

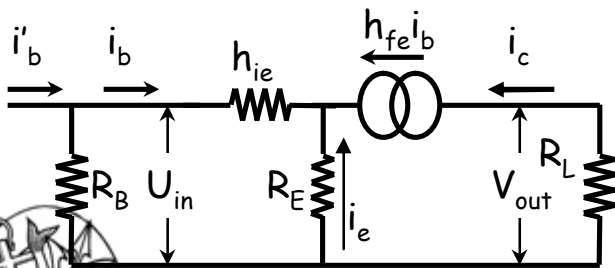


# Κέρδος ενισχυτή CE με αντίσταση ανάδρασης (αντιμετώπιση με το υβριδικό)



$$i_b + h_{fe}i_b = -i_e$$

$$\left. \begin{aligned} V_{out} &= -h_{fe}R_L i_b \\ V_{in} &= i_b h_{ie} - i_e R_E = i_b h_{ie} + i_b (1 + h_{fe}) R_E \stackrel{h_{fe} \gg 1}{\approx} (h_{ie} + h_{fe} R_E) i_b \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{h_{fe}R_L}{h_{ie} + h_{fe}R_E} = -\frac{\frac{h_{fe}R_L}{h_{ie}}}{1 + \frac{R_E h_{fe}}{h_{ie}}} = \frac{A}{1 - \frac{R_E}{R_L} A} = \frac{A}{1 - \beta A}$$



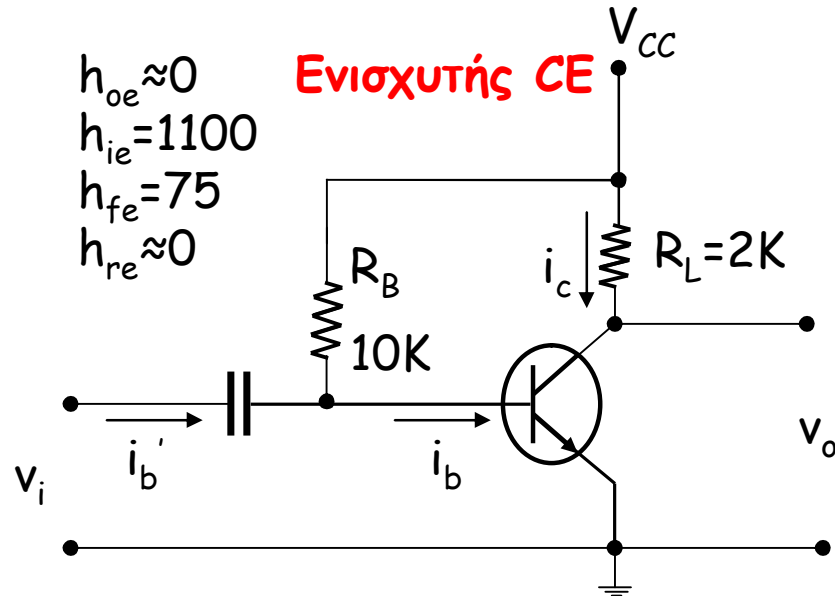
Με Ανάδραση

Μάρτιος 2011

Μάθημα 3, Ηλεκτρονική Γ' Έτος

11

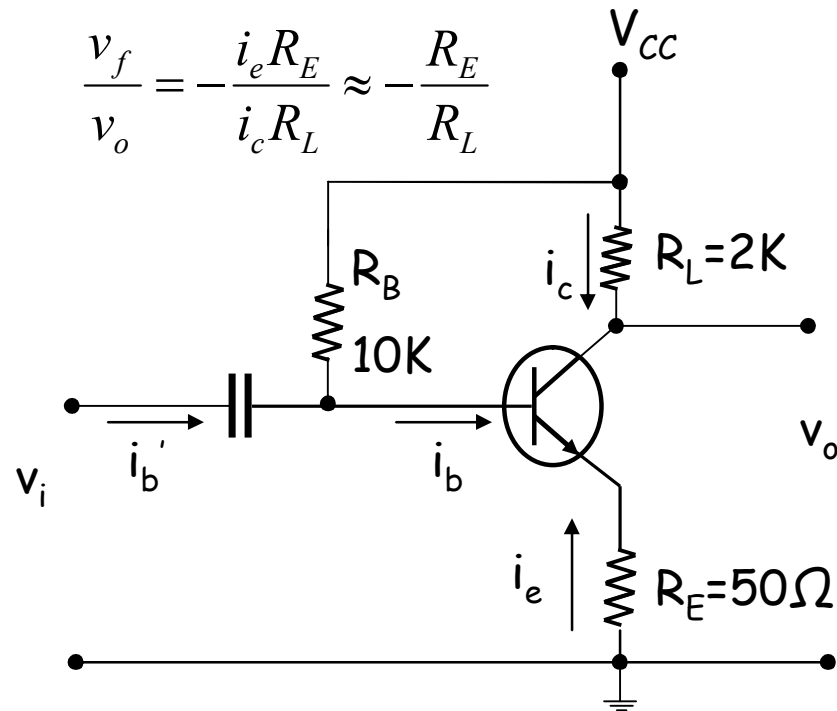
# Αριθμητικό Παράδειγμα Ενισχυτή CE



Χωρίς Ανάδραση

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} \approx -\frac{h_{fe} R_L}{h_{ie}} = -136,4$$

$v_i = v_{be}$



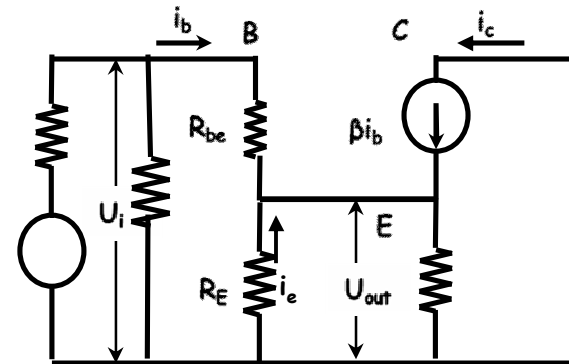
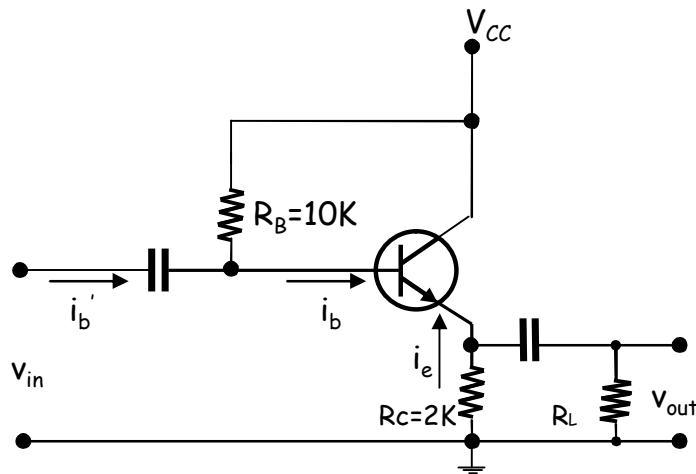
Με Ανάδραση

$$A_{Vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_{be} + v_f} = \frac{v_o / v_{be}}{1 + v_f / v_{be}} = \frac{A_V}{1 + \left(\frac{v_f}{v_o}\right) A_V} = \frac{A_V}{1 - \frac{R_E}{R_L} A_V} = -31$$



# Ακόλουθος Εκπομπού (Emitter Follower)

- Στο κύκλωμα αυτό η είσοδος είναι στη βάση και η έξοδος στον εκπομπού. Γιαυτό καλείται και **ενισχυτής κοινού συλλέκτη (CC - Common Collector)**



$$\left. \begin{aligned} i_e &= -(i_b + i_c) \\ i_c &= h_{fe} i_b = \beta i_b \end{aligned} \right\} \Rightarrow i_e = -(1 + \beta) i_b \quad (1)$$

$$V_{out} = -R_E i_e \xrightarrow{(1)} V_{out} = R_E (1 + \beta) i_b \quad (2)$$

$$V_{in} = R_{be} i_b + V_{out} = [R_{be} + R_E (1 + \beta)] i_b \quad (3)$$

$$(2), (3) \Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_E (1 + \beta)}{R_{be} + R_E (1 + \beta)} \approx 1$$

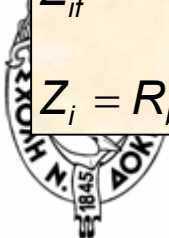
$$Z_{if} = \frac{V_{in}}{i_b} \xrightarrow{(3)} Z_{if} = R_{be} + R_E (1 + \beta) > Z_i$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{out}}{V_{be} + V_f} = \frac{V_{out}}{V_{be}} = \frac{A}{1 + \frac{V_f}{V_{be}}} = \frac{A}{1 + A \frac{V_f}{V_{out}}} \approx 1$$

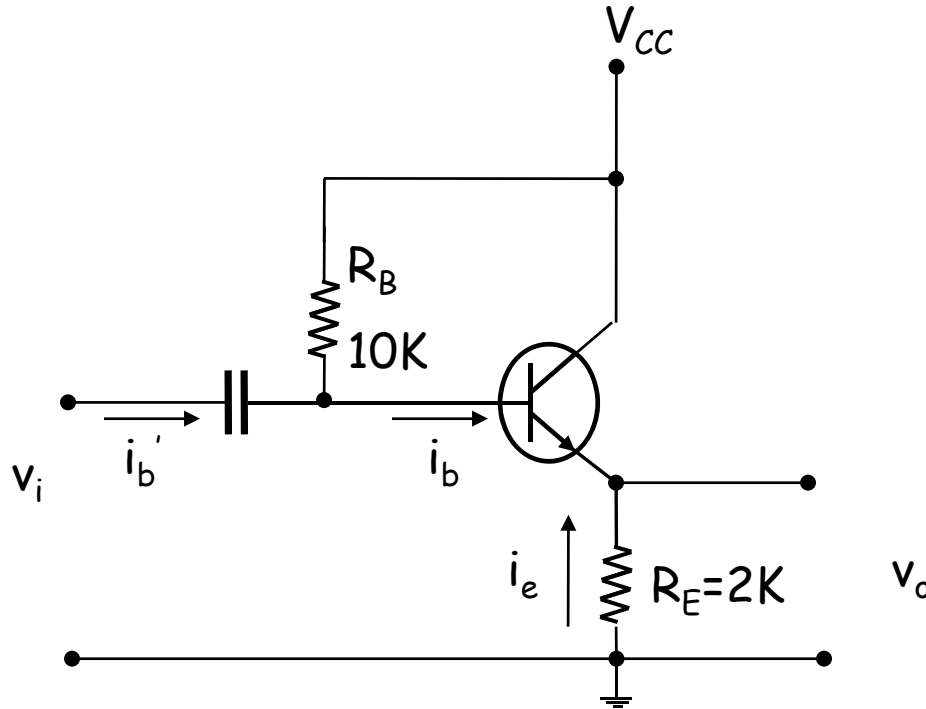
$$Z_{if} = \frac{V_{be} + V_f}{i_b} = \frac{i_b R_{be} - i_e R_E}{i_b} = R_{be} + R_E (1 + \beta) > Z_i$$

$$Z_i = R_{be}$$

$$Z_i = R_{be}$$



# Ακόλουθος εκπομπού ή ενισχυτής CC



$$\beta = \frac{v_f}{v_o} = 1$$

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 - \beta \cdot A_v} \approx 1$$

Ο ακόλουθος εκπομπού χαρακτηρίζεται από:

- Μικρό κέρδος
- Μεγάλη αντίσταση εισόδου
- Μικρή αντίσταση εξόδου

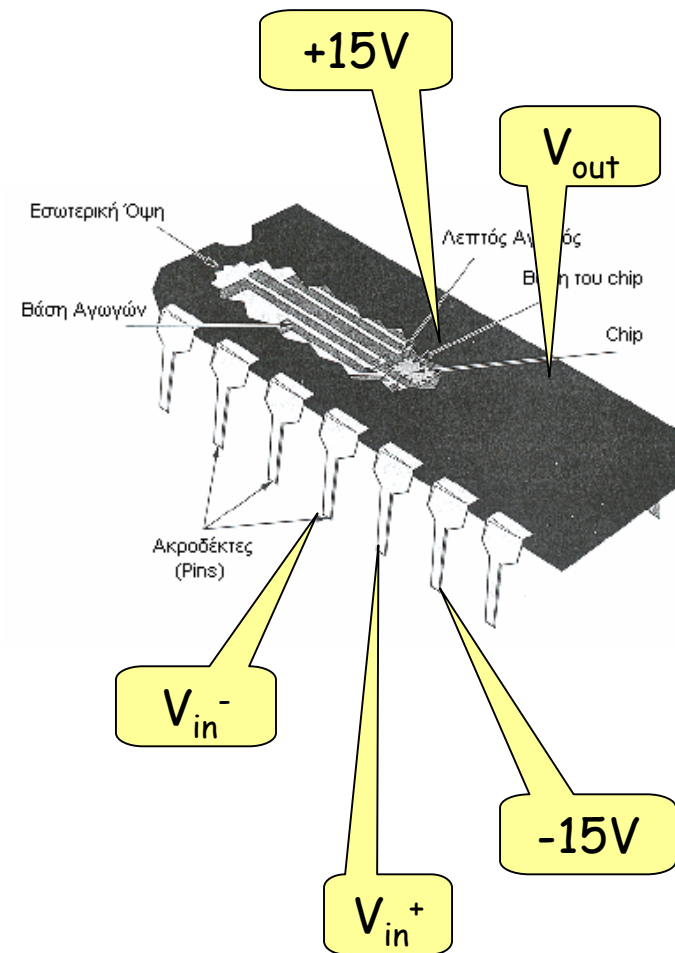
Αποδεικνύεται ότι στα κυκλώματα transistor με ανάδραση, η αντίσταση εισόδου άνετα με τον ίδιο συντελεστή που μειώνεται το κέρδος

$$R_{if} = R_i \cdot (1 - \beta \cdot A)$$

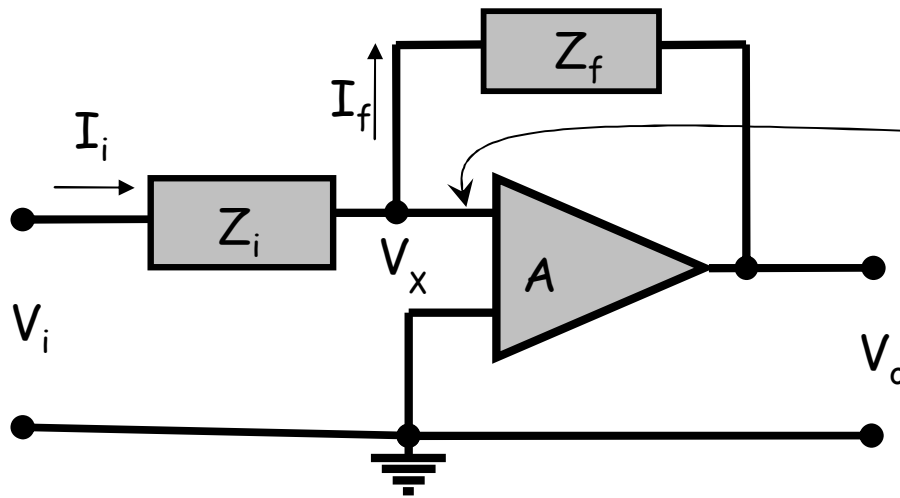


# Ο Τελεστικός Ενισχυτής

- Είναι μία εφαρμογή της ανάδρασης
- Εκτελεί μαθηματικές πράξεις:
  - Πρόσθεση
  - Αφαίρεση
  - Ολοκλήρωση
  - Παραγωγή
- Είναι ένας DC ενισχυτής υψηλού κέρδους
- Με μηδενική είσοδο, πρέπει η τάση εξόδου να είναι μηδενική



# Ο τελεστικός ενισχυτής σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία



Παραδοχές:  
Αντίσταση εισόδου τείνει στο άπειρο  
Ρεύμα εισόδου τείνει στο μηδέν

$$I_i = I_f$$

$$\frac{V_x - V_i}{Z_i} = \frac{V_o - V_x}{Z_f}$$

$$\frac{0 - V_i}{Z_i} = \frac{V_o - 0}{Z_f}$$

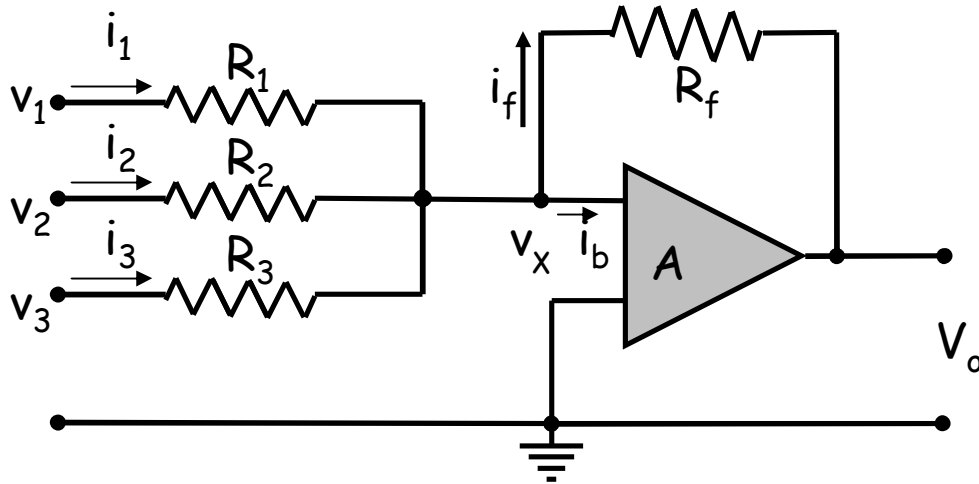
$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_f}{Z_i}$$





# Αθροιστής

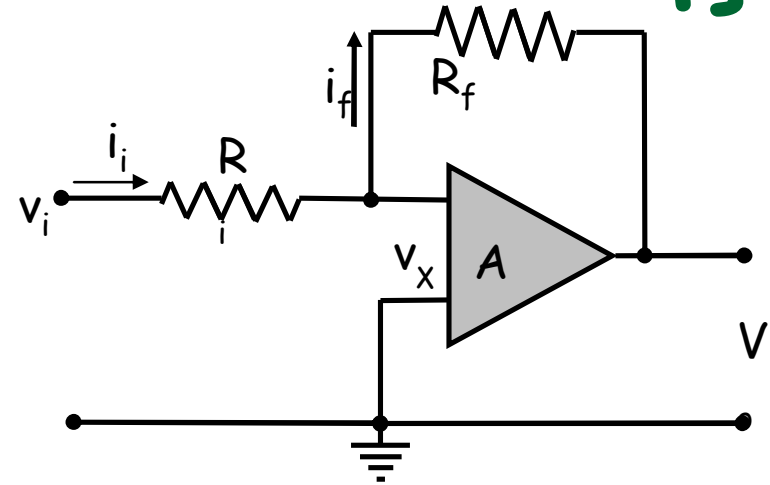
# Πολλαπλασιαστής



$$\frac{v_x - v_1}{R_1} + \frac{v_x - v_2}{R_2} + \frac{v_x - v_3}{R_3} = \frac{v_0 - v_x}{R_f}$$

$$-\frac{v_1}{R_1} - \frac{v_2}{R_2} - \frac{v_3}{R_3} = \frac{v_0}{R_f}$$

$$v_0 = - \left( v_1 \frac{R_f}{R_1} + v_2 \frac{R_f}{R_2} + v_3 \frac{R_f}{R_3} \right)$$



$$\frac{v_x - v_i}{R_i} = \frac{v_0 - v_x}{R_f}$$

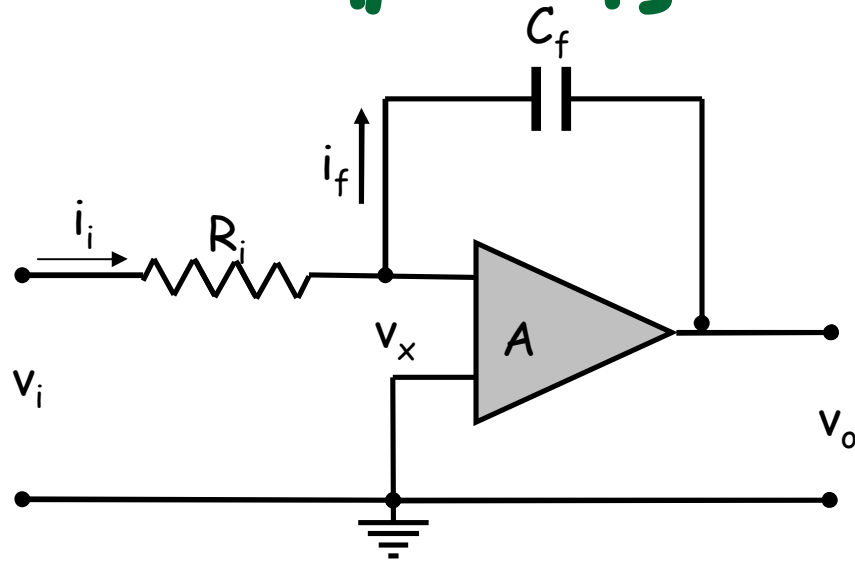
$$\frac{0 - v_i}{R_i} = \frac{v_0 - 0}{R_f}$$

$$\frac{v_0}{v_i} = - \frac{R_f}{R_i}$$

$$v_0 = -K \cdot v_i$$



# Ολοκληρωτής



$$i_i = i_f$$

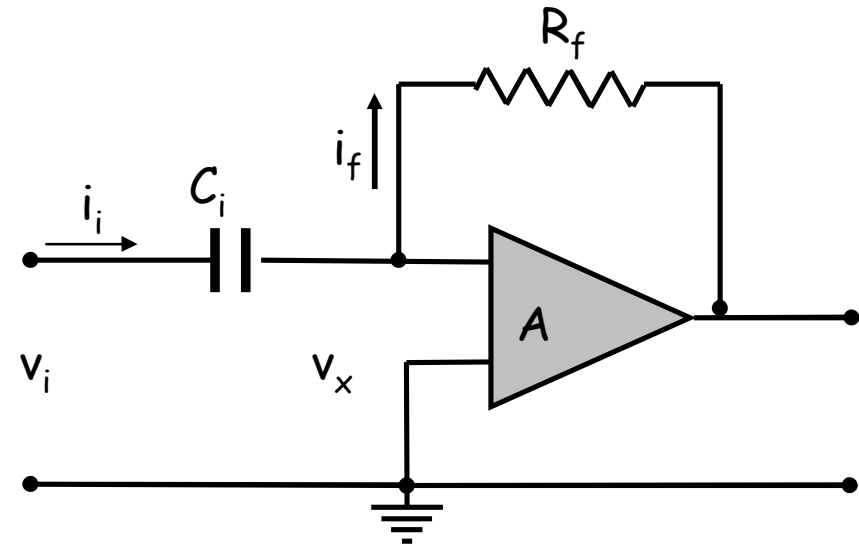
$$\frac{v_x - v_i}{R_i} = C \cdot \frac{d(v_o - v_x)}{dt}$$

$$-\frac{v_i}{R_i} = C \cdot \frac{dv_o}{dt}$$

$$dv_o = -\frac{v_i}{R_i C} dt$$

$$v_o = -\frac{1}{R_i C} \int v_i dt + v(0)$$

# Διαφοριστής



$$i_i = i_f$$

$$C \frac{d(v_x - v_i)}{dt} = \frac{v_o - v_x}{R_f}$$

$$\frac{v_o}{R_f} = -C \cdot \frac{dv_i}{dt}$$

$$v_o = -R_f C \cdot \frac{dv_i}{dt}$$

Το κύκλωμα παραγωγίσις είναι ασταθές και εισάγει θόρυβο

