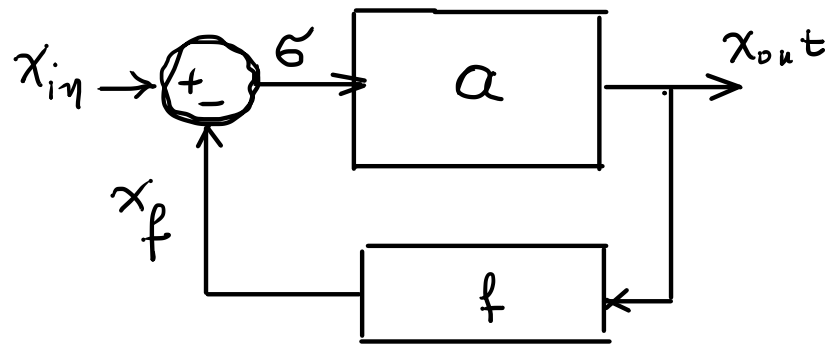


Με βάση το διάγραμμα της
αρνητικής ανάδρασης:



$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= x_{in} - x_f \\ x_f &= f \cdot x_{out} \end{aligned} \right\} \Rightarrow x_f = a \cdot f \cdot \epsilon$$

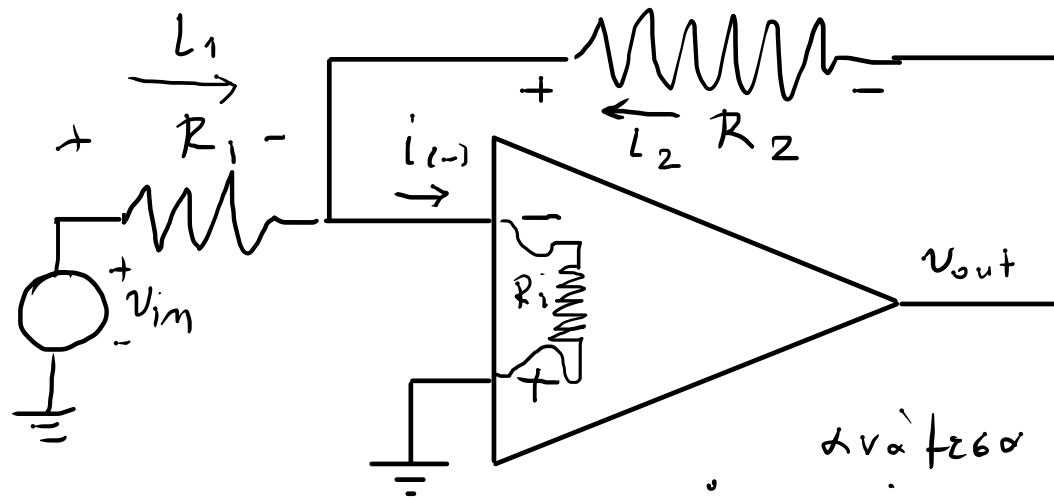
$$x_{out} = a \cdot \epsilon$$

άρα $\epsilon = x_{in} - a \cdot f \cdot \epsilon \Leftrightarrow \epsilon (1 + a \cdot f) = x_{in}$

υα, $\epsilon = \frac{x_{in}}{1 + a \cdot f}$ A_v $a \cdot f \rightarrow \infty$ το $\epsilon \rightarrow 0$

δηλ το $x_{in} - x_f \rightarrow 0 \Leftrightarrow \underline{x_f \simeq x_{in}}$

Τελεστικοί ενισχυτές με αρνητική ανάδραση σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία



Αφού η τάση στον αντροδέυτη
(+) είναι 0, η τάση στον
αντροδέυτη (-) είναι 0

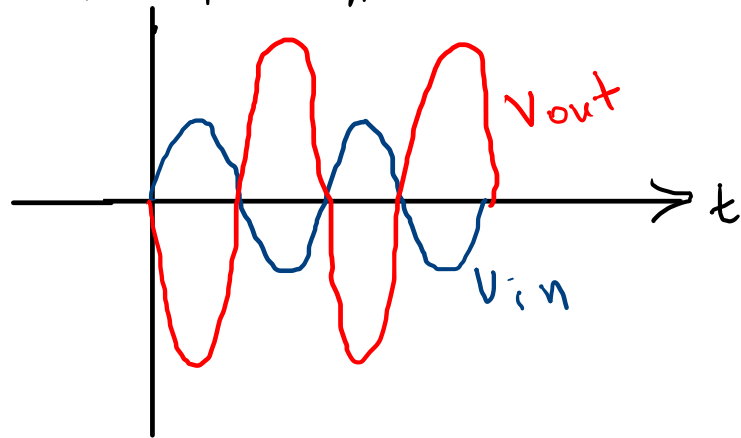
έτσι το ρεύμα μέσα από την R_1
θα είναι 0 (έχει 0 διαφορά δυναμικού

ανάμεσα στα άκρα της) επομένως $i_1 + i_2 = 0 \Leftrightarrow$

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= -i_2 \\ i_1 &= \frac{v_{in} - v_{(-)}}{R_1} = \frac{v_{in} - 0}{R_1} = \frac{v_{in}}{R_1}, \quad i_2 = \frac{v_{out}}{R_2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{v_{out}}{v_{in}} = - \frac{R_2}{R_1}$$

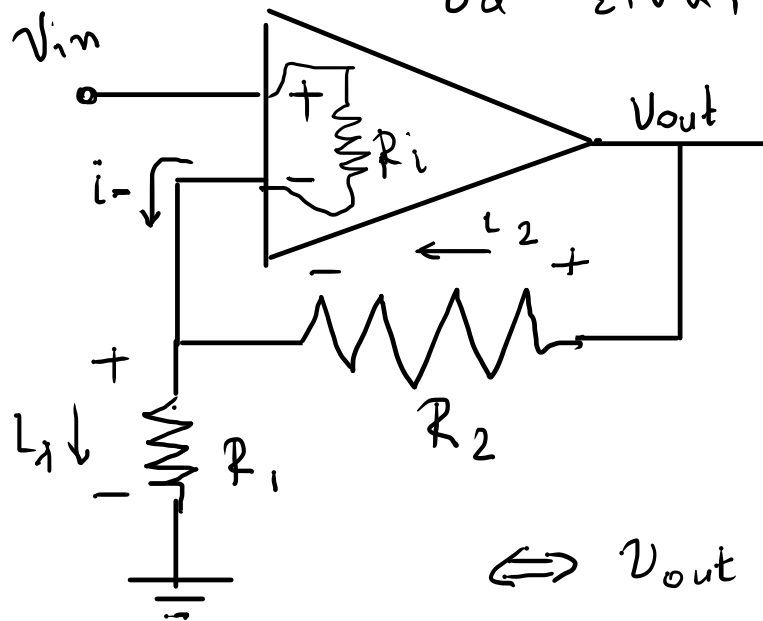
Βλέπουμε δηλαδή ότι αν $\frac{R_2}{R_1} > 1$ έχουμε ενίσχυση:

π.χ. για $\frac{R_2}{R_1} = 2$ για $V_{in} = 1V$, $V_{out} = -2V$
 για $V_{in} = -0.5V$, $V_{out} = 1V$



Μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία

Αφού η τάση στον αντροδευτή + είναι V_{in} και η τάση στον αντροδευτή- θα είναι V_{in} , επομένως το $V_- = 0$,
 Έτσι $I_2 = I_1$



$$I_1 = \frac{V_{(-)}}{R_1} = \frac{V_{in}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V_{out} - V_{(-)}}{R_2} = \frac{V_{out} - V_{in}}{R_2} \quad \Rightarrow$$

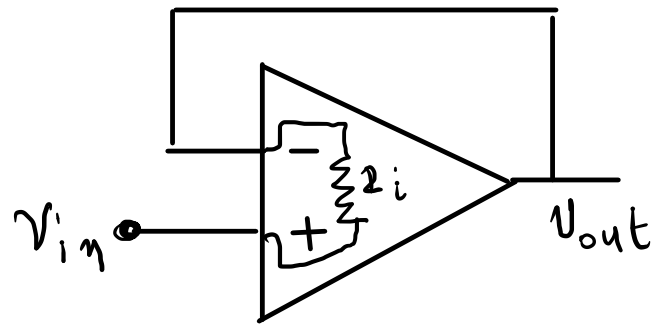
$$\frac{V_{in}}{R_1} = \frac{V_{out} - V_{in}}{R_2} \Leftrightarrow \frac{V_{in}}{R_1} + \frac{V_{in}}{R_2} = \frac{V_{out}}{R_2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \Leftrightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \text{π.χ. αν } \frac{R_2}{R_1} = 2$$

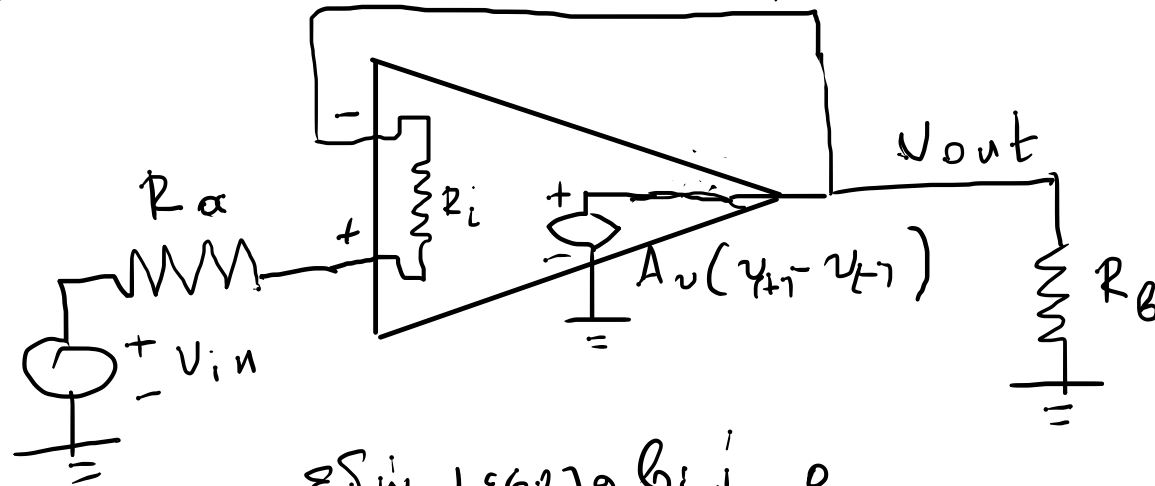
$$\text{Το } V_{out} = 3 \cdot V_{in}$$

Απομονωτής

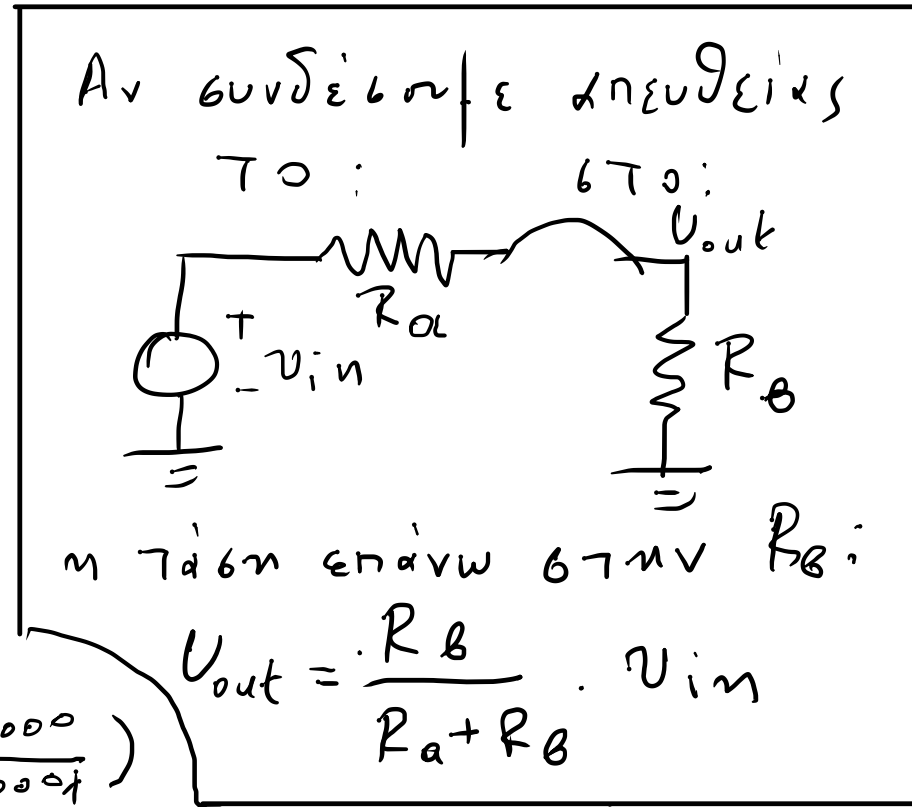
$$V_{(+)} = V_{in}, \text{ άρα } V_{(-)} = V_{in} \text{ . Όμως } V_{out} = V_{(-)} \text{ άρα } V_{out} = V_{in}$$



As το δοῦτε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια:



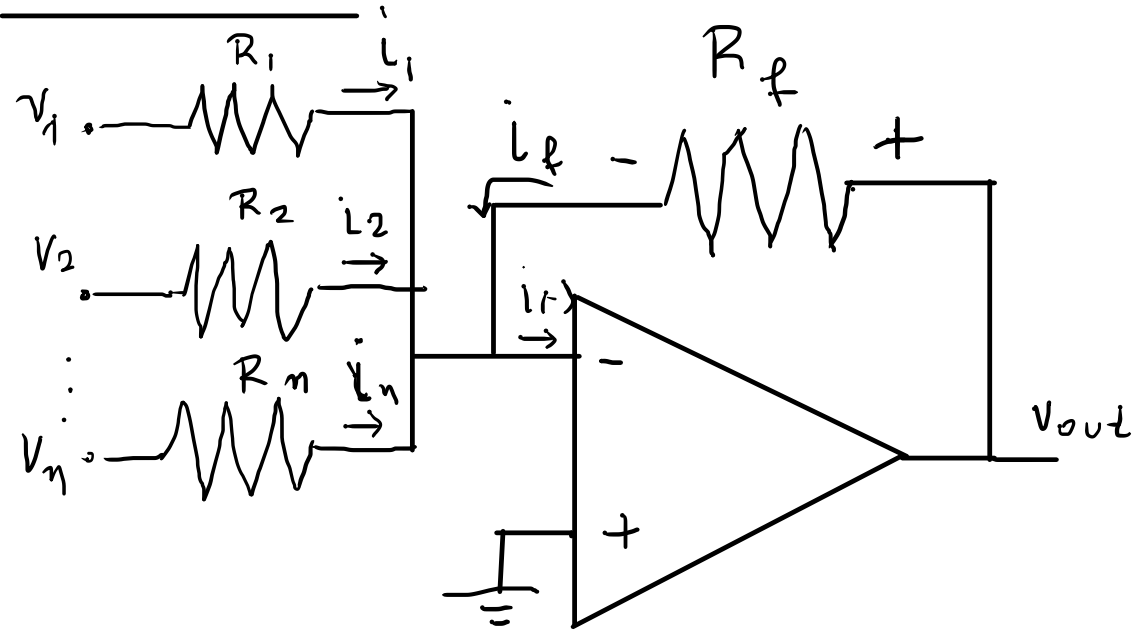
εδώ παραβλέπουμε
απομονωτή



$$V_{out} = A(V_{+} - V_{out}) \Leftrightarrow AV_{+} = V_{out}(1 + A) \Leftrightarrow V_{out} = \frac{A}{1 + A} V_{+} \text{ και επειδή } \frac{A}{1 + A} \approx 1 \text{ (π.χ. } \frac{200000}{200001} \text{)}$$

$V_{out} = V_{+}$, 'Ετσι το ρεύμα επάνω στην $R_b \approx 0$ και άρα το ρεύμα που μπαίνει στην είσοδο (+) είναι περίπου 0. Αυτό σημαίνει ότι η πτώση τάσης επάνω στην $R_a \approx 0$ και επομένως $V_{(+)} \approx V_{in}$, δηλ και $V_{out} = V_{in}$

Αθροιστής με βάρη



$$V_{(-)} \approx V_{(+)} = 0$$

$$i_{(-)} \approx 0 \quad (\text{γιατί } \Delta V \text{ ενάντια στην } R_i \text{ είναι } 0)$$

άρα

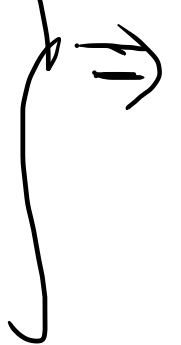
$$i_1 + i_2 + \dots + i_n + i_f = 0$$

$$i_1 = \frac{V_1 - V_{(-)}}{R_1} = \frac{V_1}{R_1}$$

$\vdots$

$$i_n = \frac{V_n - V_{(-)}}{R_n} = \frac{V_n}{R_n}$$

$$i_f = \frac{V_{out} - V_{(-)}}{R_f} = \frac{V_{out}}{R_f}$$



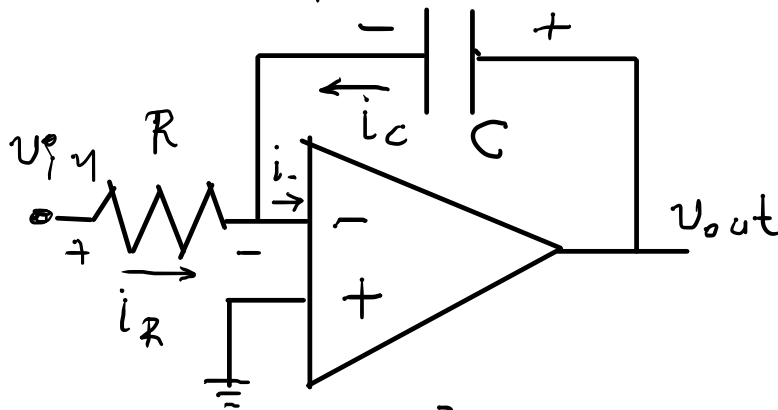
$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} = - \frac{V_{out}}{R_f} \Leftrightarrow V_{out} = - V_1 \cdot \frac{R_f}{R_1} - V_2 \cdot \frac{R_f}{R_2} - \dots - V_n \cdot \frac{R_f}{R_n}$$

Ένας μεγάλος αριθμός κυκλωμάτων βασίζεται στην χρήση τελεστικών ενισχυτών με αρνητική ανάδραση.

Μπορούν να κατανοηθούν με την χρήση δύο αληθών κανόνων:

$$1) (V_+ - V_-) \approx 0 \quad 2) I_+ \approx 0, I_- \approx 0$$

Παραδείγματα



Ανάλυση

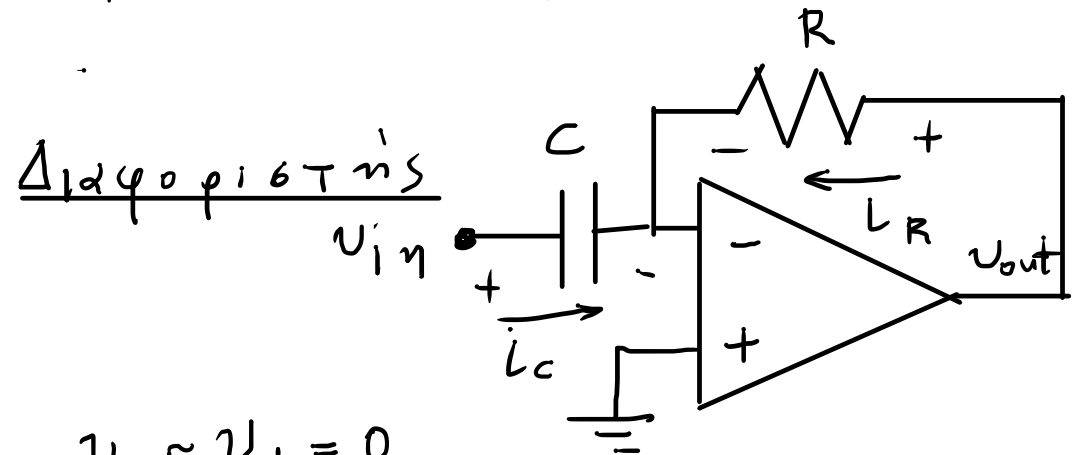
$$V_- \approx V_+ = 0$$

$$I_R + I_C - I_- = 0$$

$$I_R = \frac{V_{in} - V_-}{R} = \frac{V_{in}}{R}$$

$$I_C = C \frac{d}{dt} (V_{out} - V_-) = C \frac{dV_{out}}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{V_{in}}{R} = C \frac{dV_{out}}{dt} \Rightarrow \frac{dV_{out}}{dt} = \frac{V_{in}}{CR} \Rightarrow \int_0^t dV_{out} = \frac{1}{CR} \int_0^t V_{in} dt \Rightarrow V_{out}(t) = \frac{1}{CR} \int_0^t V_{in} dt + V_{out}(t=0)$$



$$V_- \approx V_+ = 0$$

$$I_C + I_R + I_- = 0$$

$$I_R = \frac{V_{out} - V_-}{R}, I_C = C \frac{d}{dt} (V_{in} - V_-)$$

$$\propto \frac{V_{out}}{R} = C \frac{dV_{in}}{dt} \Rightarrow V_{out} = CR \frac{dV_{in}}{dt}$$

Πολυπληθιστικός ρεύματος:

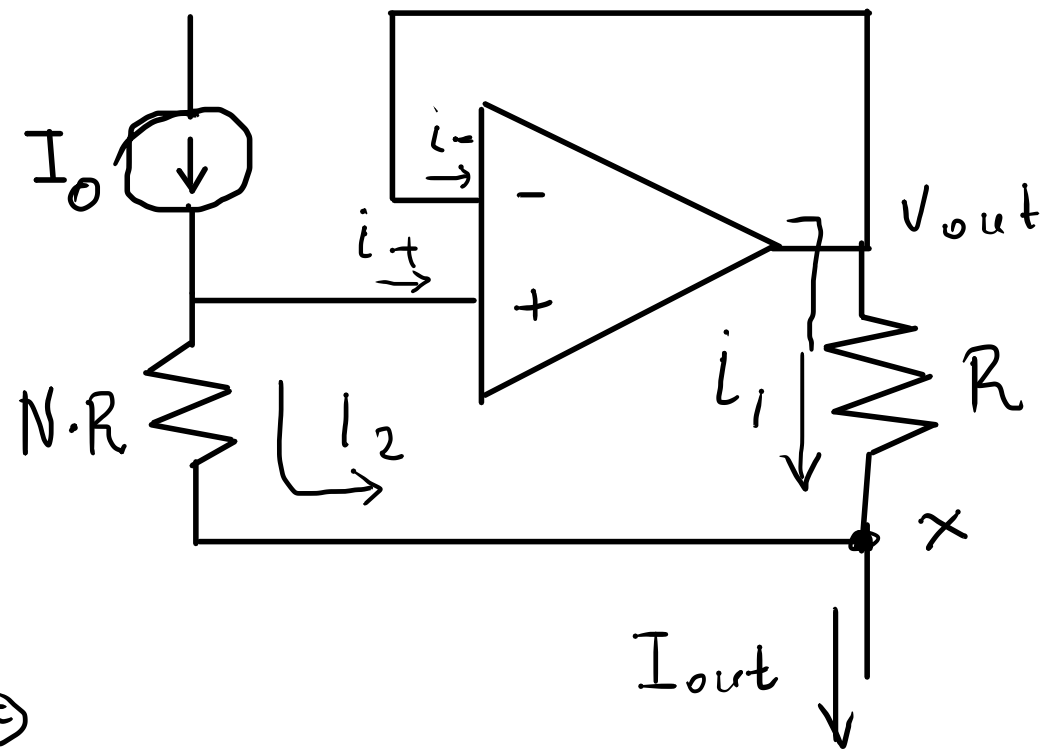
Η πηγή ρεύματος παρέχει
ρεύμα I_0 . Το I_0 περνάει
όλο από την $N \cdot R$ γιατί
 $V_+ \approx 0$, δηλ $I_2 = I_0$

$$\left. \begin{array}{l} \text{ήφα } V_{(+)} - V_x = I_0 \cdot N \cdot R \\ V_{(+)} \approx V_{(-)} = V_{out} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{out} - V_x = I_0 \cdot N \cdot R \\ \text{Επίσης } V_{out} - V_x = I_1 \cdot R \end{array} \right\} \Rightarrow I_0 \cdot N \cdot R = I_1 \cdot R \Leftrightarrow I_1 = I_0 \cdot N$$

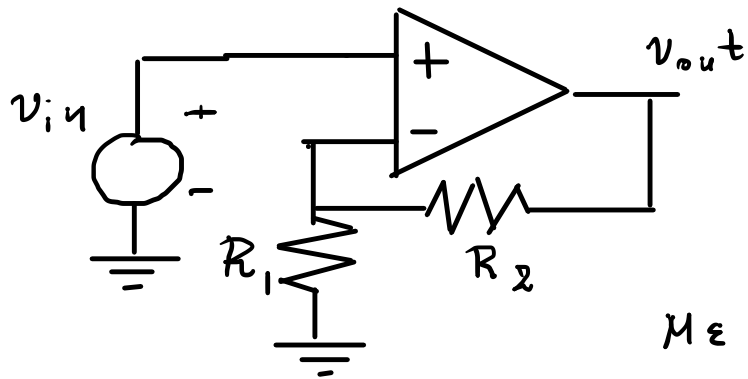
$$\text{Επειδή } I_{out} = I_1 + I_2 = I_0 \cdot N + I_0 \Rightarrow$$

$$I_{out} = (N + 1) I_0$$



Ας δούμε τα κυκλώματα περιμοποιώντας έχοντας μικρό κέρδος για τον ρεζεβτικό ενισχυτή. π.χ. $A_v \approx 10^3$ ή 10^2 και όχι 10^5 ή 10^6

Μη ανατρεπόμενα συνδεσμολογία



$$v_{out} = A_v(v_{in} - v_-) \Leftrightarrow v_- = \frac{A_v v_{in} - v_{out}}{A_v} = v_{in} - \frac{v_{out}}{A_v} \quad (1)$$

Βλέπουμε ότι υπάρχει μια μικρή διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις (+) και (-) εισόδους. Θα θεωρήσουμε το R_{in} «πολύ μεγάλο» έτσι ώστε να έχουμε το $i_{(-)} \approx 0$

Με αυτή την υπόθεση βρίσκουμε ότι $v_- = v_{out} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2)$

$$(1), (2) \Rightarrow v_{out} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = v_{in} - \frac{v_{out}}{A_v} \Leftrightarrow v_{out} \left(\frac{1}{A_v} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot A_v = v_{in} \cdot A_v \Leftrightarrow$$

$$v_{out} \cdot \left(1 + A_v \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = A_v \cdot v_{in} \quad \text{άρα} \quad v_{out} = \frac{A_v}{1 + A_v \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}} v_{in}$$

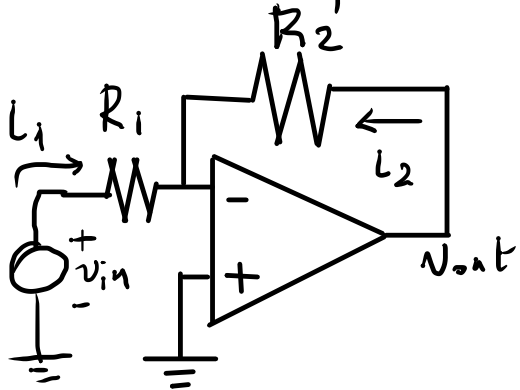
Το κέρδος για $A_v \rightarrow \infty$ το έχουμε βρει $1 + \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ άρα $\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{G}$
 όπου G το κέρδος για $A_v \rightarrow \infty$ Έτσι

$$v_{out} = \frac{A_v}{1 + \frac{A_v}{G}} v_{in}$$

$$A_v \text{ π.χ. } G = 10 \text{ και } A_v = 100 \text{ τότε } v_{out} = \frac{100}{1 + \frac{100}{10}} = \frac{100}{11} \approx 9,091$$

Δηλ. για $A_v = 100$ το υέρδος είναι 10% μικρότερο από το υέρδος για $A_v \rightarrow \infty$
για $A_v = 1000$, $v_{out} = \frac{1000}{1 + \frac{1000}{10}} = \frac{1000}{101} \approx 9,9$ δηλ 1% μικρότερο

Θα κάνουμε το ίδιο για την αναεζρεψομετα συνδεσμογρια



$$v_{out} = A_v (0 - v_-) = -A_v v_- \Leftrightarrow v_- = -\frac{v_{out}}{A_v} \quad \text{Πάλι θεωρώ ότι } R_{in} \text{ πολύ}$$

μικρό έτσι ώστε $L_- \approx 0$, έτσι

$$i_2 + i_1 = 0 \Rightarrow i_1 = -i_2 \quad i_1 = \frac{v_{in} - v_-}{R_1}, \quad i_2 = \frac{v_{out} - v_-}{R_2}$$

$$\text{Επομένως } \frac{v_{in} - (-\frac{v_{out}}{A_v})}{R_1} = -\frac{v_{out} - (-\frac{v_{out}}{A_v})}{R_2} \Leftrightarrow v_{in} \frac{1}{R_1} + \frac{v_{out}}{A_v} \cdot \frac{1}{R_1} = -\frac{1}{R_2} v_{out} (1 + \frac{1}{A_v}) \Leftrightarrow$$

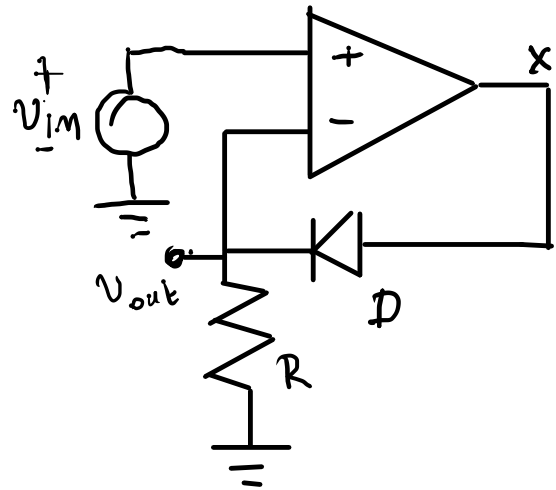
$$\Leftrightarrow v_{in} + \frac{v_{out}}{A_v} = -\frac{R_1}{R_2} v_{out} (1 + \frac{1}{A_v}) \Leftrightarrow v_{in} (-\frac{R_2}{R_1}) = v_{out} (1 + \frac{1}{A_v} + \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{A_v}) \Leftrightarrow$$

$$v_{out} = \frac{(-R_2/R_1)}{1 + \frac{1}{A_v} + \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{A_v}} v_{in} \quad \text{ή} \quad v_{out} = \frac{A_v G}{A_v + 1 - G} v_{in} \quad \text{όπου} \quad G = -\frac{R_2}{R_1} \quad \text{δηλ. το}$$

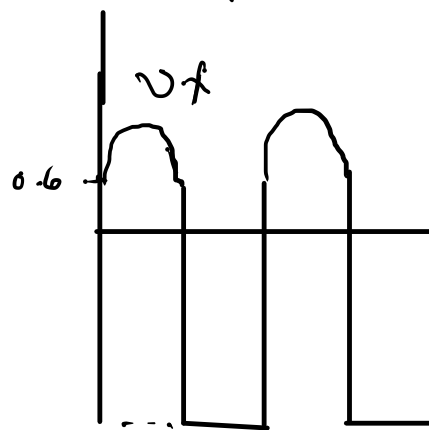
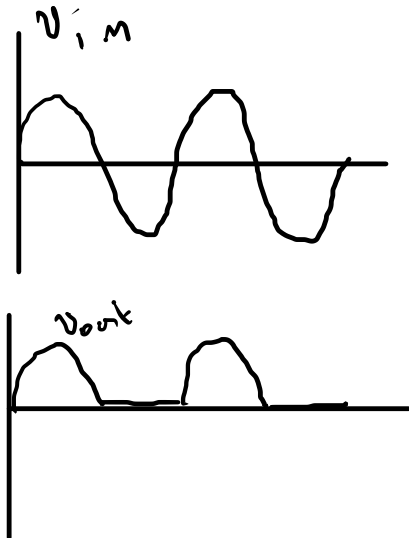
υέρδος για $A_v \rightarrow \infty$ π.χ. για $G = -10$ και για $A_v = 100$ έχουμε

$$V_{out} = \frac{100 \cdot (-10)}{100 + 1 + 10} V_{in} = \frac{-1000}{111} V_{in} \approx -9 V_{in} \quad 10\% \text{ μικρότερο}$$

Στο κυκλώμα αντίδρασης μπορεί να είναι οποιοδήποτε στοιχείο
π.χ. διορθωτής αμυβείας



Εδώ ανάμεσα στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή και την είσοδο (-) βάζουμε την διόδo D και θέρουμε έξοδο του κυκλώματος το V_- και όχι την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή V_X όταν το V_{in} είναι θετικό, η διόδος έχει, το $V_{out} = V_{(-)} \approx V_{(+)} = V_{in}$ λόγω της ανάδρασης (και $V_X \approx V_{out} + 0.6V$) όταν $V_{in} < 0$, η διόδος δεν έχει και το $V_{out} = V_{(-)} = 0$ ενώ το $V_X = A_v(V_{in} - 0)$ παθαίνει προς το $-\infty$ κεν $V_{in} < 0$, Πρακτικά γίνεται ίσο με την αρνητική τάση τροφοδοσίας



← αρνητική τροφοδότηση