ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

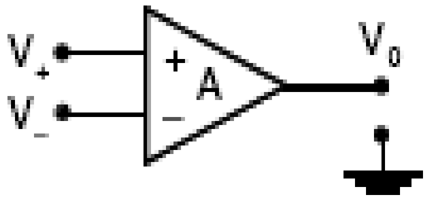
ΔΙΑΛΕΞΗ 3

Ο Τελεστικός Ενισχυτής

- Ο τελεστικός ενισχυτής (op-amp) αποτελεί ένα βασικό δομικό στοιχείο στη σχεδίαση αναλογικών κυκλωμάτων.
  - Η συμπεριφορά του μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μια εξαρτημένη πηγή
  - Αν συνδυαστεί με αντιστάσεις, πυκνωτές, και επαγωγικά στοιχεία, μπορεί να υλοποιήσει αρκετές χρήσιμες συναρτήσεις
    - **Ενίσχυση/Αναστροφή σήματος εισόδου**
    - **Πρόσθεση/Αφαίρεση πολλών σημάτων εισόδου**
    - **Διαφόριση/Ολοκλήρωση (στο χρόνο) σήματος εισόδου**
    - **Υλοποίηση αναλογικού φίλτρου**
    - **Υλοποίηση μη γραμμικών συναρτήσεων (exp, log, sqrt…)**
  - Απομόνωση εισόδου/εξόδου - cascading

Ενισχυτής εξαρτημένος από πηγή

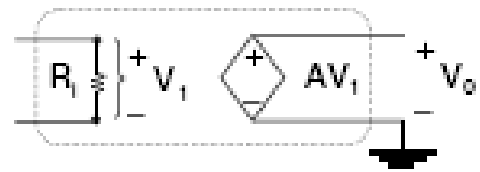
ΣΥΜΒΟΛΟ ΕΝΙΣΧΥΤΗ



$$V_0 = A(V_+ - V_-)$$

Η V_0 εξαρτάται μόνο από την έισοδο (V_+ - V_-)

ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

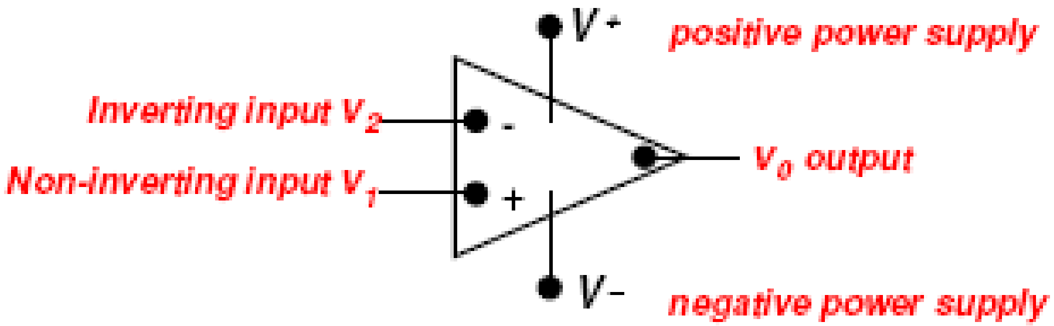


Κυκλωματικό μοντέλο στην γραμμική περιοχή

Η σωστή χρησιμοποίηση του μοντέλου αυτού μιμείται τη συμπεριφορά ενός ενισχυτή παραλείποντας την πολυπλοκότητα των πολλών αντιστάσεων και άλλων στοιχείων

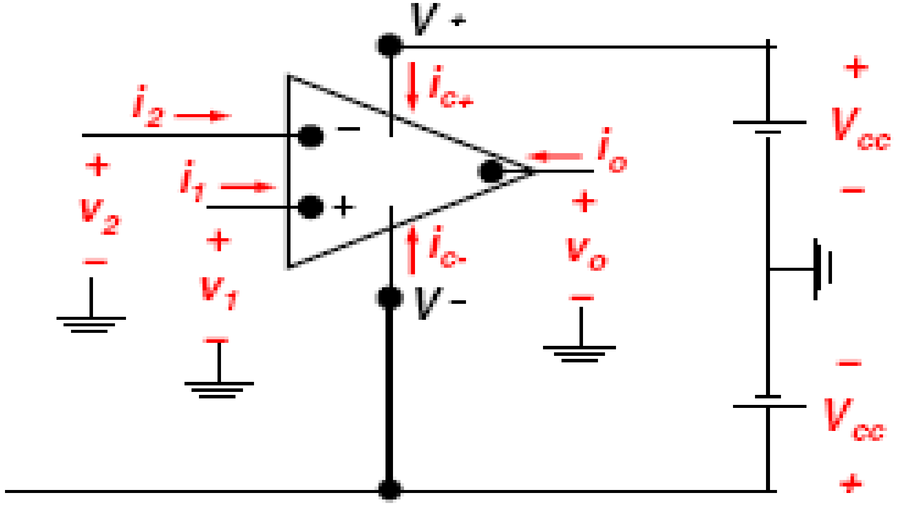
Ακροδέκτες του τελεστικού ενισχυτή

- 3 σήματα: 2 είσοδοι, 1 έξοδος
- IC op-amps έχουν 2 πρόσθετα σήματα για DC τροφοδοσία
- Κοινού τρόπου (Common-mode) σήμα = $(v_1 + v_2)/2$
- Διαφορικό σήμα = $v_1 - v_2$



Ρεύματα και Τάσεις του τελεστικού ενισχυτή

- Όλες οι τάσεις έχουν σαν αναφορά τον κοινό κόμβο (common node)
- Οι κατευθύνσεις των ρευμάτων αναφοράς είναι <u>μέσα</u> στον Op-amp



(εξωτερικός στον ενισχυτή)

Μοντέλο εσωτερικής λειτουργίας

- Ορίζουμε σαν Α το διαφορικό κέρδος ή κέρδος ανοιχτού βρόγχου
- Ιδανικός Op-amp

$$A \to \infty$$

$$R_i \to \infty$$

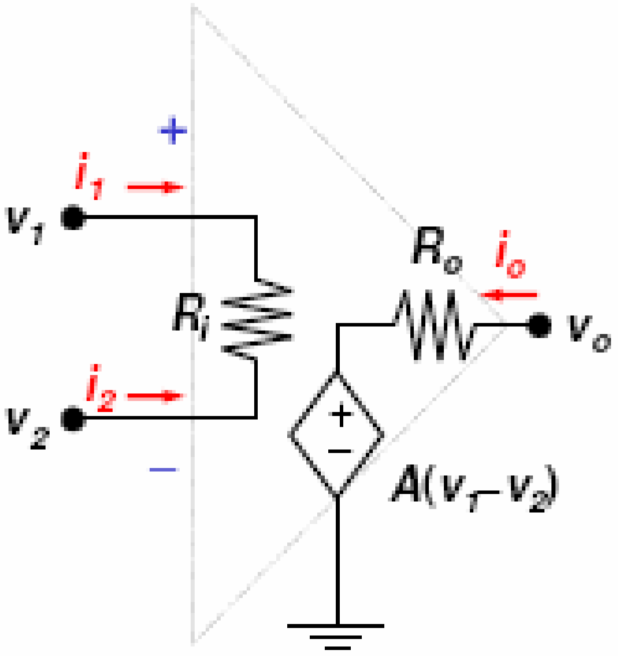
$$R_0 \to = 0$$

  – Κέρδος common-mode = 0

$$V_{cm} = (v_1 + v_2)/2, v_d = v_1 - v_2$$

$$v_0 = A_{cm} v_{cm} + A_d v_d$$

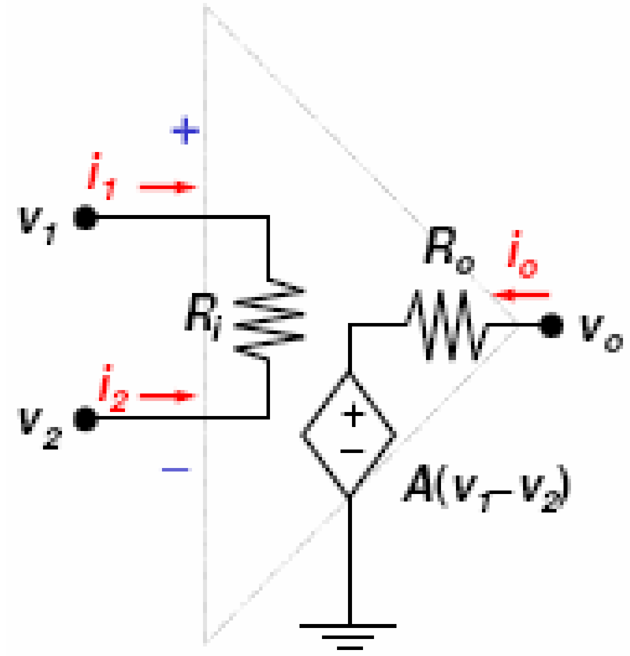
$$v_0 = A(v_1 - v_2) \to A_{cm} = 0$$



Μοντέλο κυκλώματος

Μοντέλο και ανάδραση

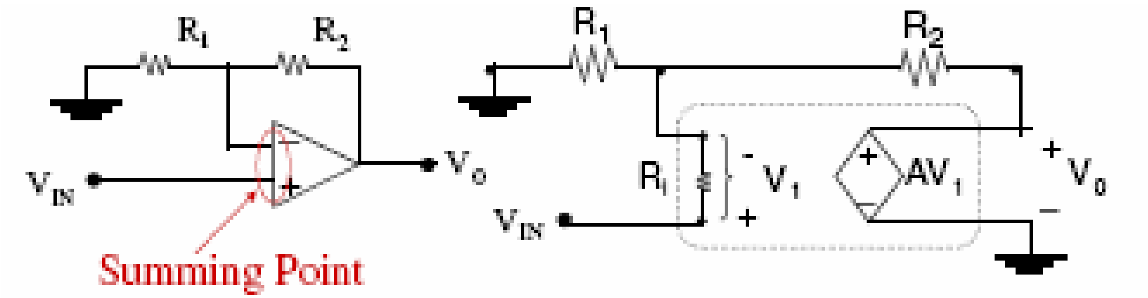
- Αρνητική ανάδραση
  - Συνδέουμε την έξοδο στην αρνητική είσοδο
- Θετική ανάδραση
  - Συνδέουμε την έξοδο στη θετική είσοδο



Μοντέλο κυκλώματος

Τελεστικός ενισχυτής – χρήση ανάδρασης

Ένας διαφορικός ενισχυτής πολύ μεγάλου κέρδους μπορεί να λειτουργήσει γραμμικά σαν ένας τελεστικός ενισχυτής χρησιμοποιώντας αρνητική ανάδραση



Αρνητική ανάδραση => **σταθεροποιεί** την έξοδο

Ισχύει ότι:

Για $(A \to \infty,\ R_i \to \infty) \Rightarrow V_0 \cong V_{in} \dfrac{R_1 + R_2}{R_1}$

(Σταθερή, πεπερασμένη και ανεξάρτητη από τις ιδιότητες ενός Op-amp)

Τυπικά παραδείγματα

- Αρνητική ανάδραση **(*ευστάθεια*)**
  - Ελεγκτής θερμοστάτη θερμοκρασίας δωματίου
  - Σύστημα διεύθυνσης αυτοκινήτου
  - Photochromic lenses σε γυαλιά
- Θετική ανάδραση **(αστάθεια ή ημιαστάθεια)**
  - “squawk” μικροφώνου σε στούντιο ήχου
  - Μηχανική ημιαστάθεια σε διακόπτες φωτός
  - Thermonuclear reaction in H-bomb

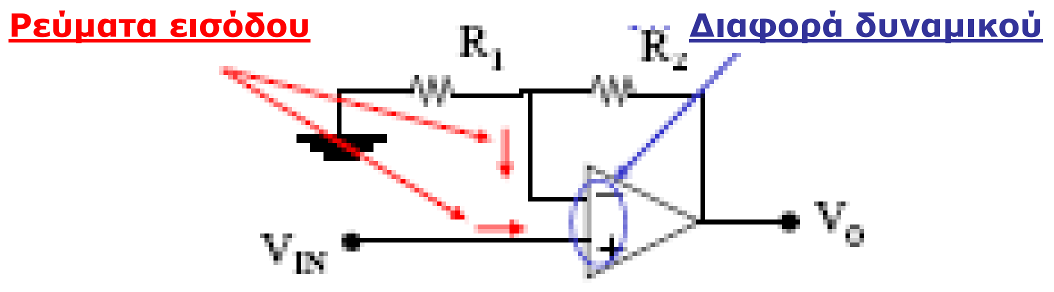
Summing point Constraint

- Σε περίπτωση αρνητικής ανάδρασης
  - Μικρό v_i «δίνει» μεγάλο v_0
  - Η v_0 συνδέεται στην ανάστροφη είσοδο για ελαχιστοποίηση της v_i
- Summing point constraint
  - $v_1=v_2$
  - $i_1=i_2$
- Κατ’ ουσία βραχυκύκλωμα (virtual short circuit)
  - Voltage drop = 0 και ρεύμα εισόδου = 0
  - Είναι διαφορετικό από το βραχυκύκλωμα (short circuit)

Ιδανικός Τελεστικός Ενισχυτής
Τεχνική Ανάλυση

Μόνο στην περίπτωση παρουσίας αρνητικής ανάδρασης

- Προϋπόθεση 1: το δυναμικό μεταξύ των εισόδων $v_{(+)}-v_{(-)}=0$
- Προϋπόθεση 2: τα 2 ρεύματα εισόδου είναι μηδενικά

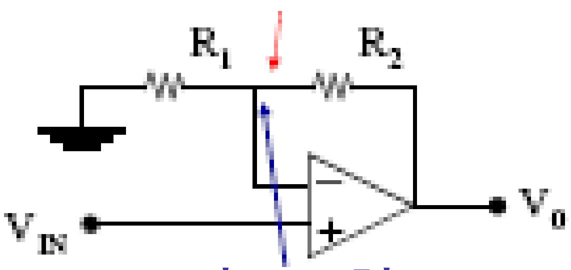


Ανάλυση ιδανικού Τελεστικού ενισχυτή Μη-αναστρέφων Ενισχυτής

Έχουμε αρνητική ανάδραση

- Προϋπόθεση 1: το δυναμικό μεταξύ των εισόδων $v_{(+)}-v_{(-)}=0$
- Προϋπόθεση 2: τα 2 ρεύματα εισόδου είναι μηδενικά

KCL για ρεύματα σε δυο κλάδους



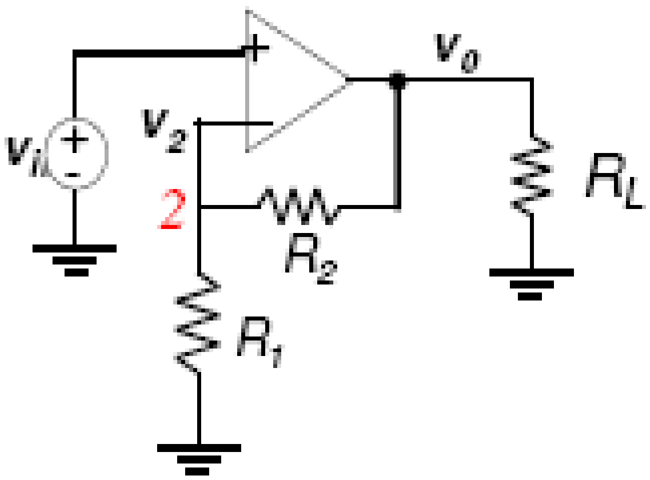
V_{in} φαίνεται εδώ

$$\frac{v_{in}}{R_1}+\frac{v_{in}-v_{out}}{R_2}=0$$

$$v_{out}=\frac{R_1+R_2}{R_1}v_{in}$$

Μη-αναστρέφων Ενισχυτής

- Ιδανικός ενισχυτής τάσης



$$\kappa\acute{\varepsilon}\rho\delta o\varsigma\ \kappa o\iota\nu o\acute{\upsilon}\ \beta\rho\acute{o}\gamma\chi o\upsilon\ A_v = \frac{v_0}{v_{in}}$$

$$v_1 = v_2 = v_{in}, \quad i_1 = i_2 = 0$$

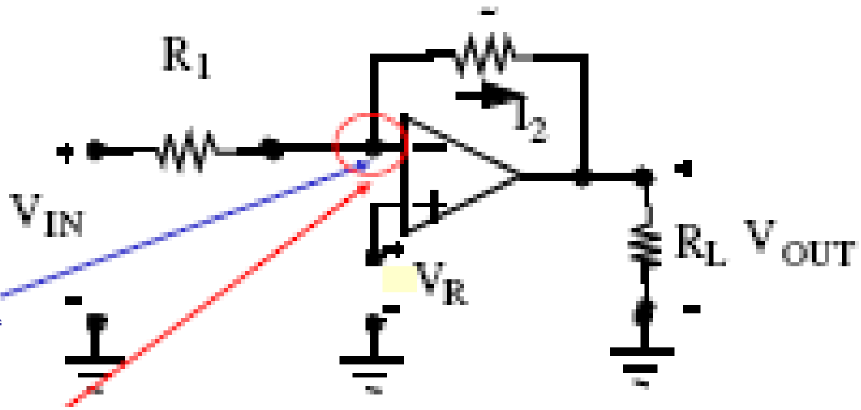
$$KCL\ \sigma\tau o\nu\ \kappa\acute{o}\mu\beta o\ 2$$

$$\iota = \frac{(v_0 - v_2)}{R_2} = \frac{(v_2 - 0)}{R_1}$$

$$A = \frac{v_0}{v_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

$$\alpha\nu\tau\acute{\iota}\sigma\tau\alpha\sigma\eta\ \varepsilon\iota\sigma\acute{o}\delta o\upsilon = \frac{v_{in}}{i} \to \infty$$

Ανάλυση ιδανικού Op-amp Αναστρέφων Ενισχυτής



Η τάση είναι V_R

2 ρεύματα για KCL

$$\frac{V_R - V_{IN}}{R_1} + \frac{V_R - V_{OUT}}{R_2} = 0$$

$$V_{OUT} = V_R - \frac{R_2}{R_1}(V_{in} - V_R)$$

Αναστρέφων ενισχυτής με τάση αναφοράς

Αναστρέφων Ενισχυτής

- Αρνητική ανάδραση ->ναι
- Χρήση summing point constraint

$$\text{κέρδος κοινού βρόγχου}\ A_v = \frac{v_0}{v_{in}}$$

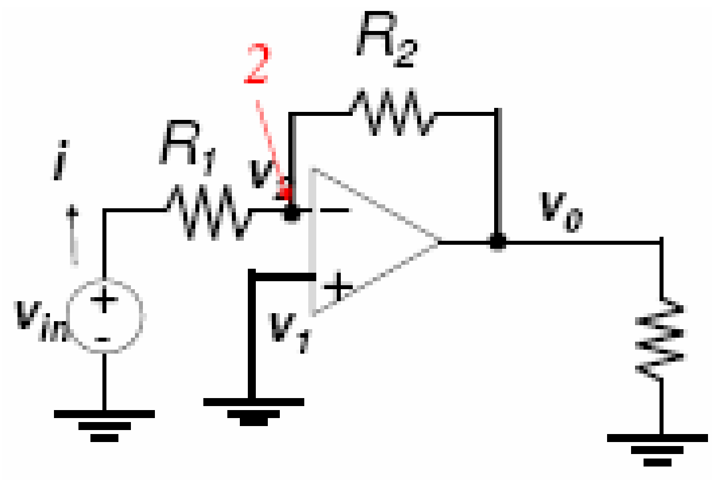
$$v_1 = v_2 = v_{in}, \quad i_1 = i_2 = 0$$

$$KCL\ \text{στον κόμβο}\ 2$$

$$\iota = \frac{(v_0 - v_2)}{R_2} = \frac{(v_2 - 0)}{R_1}$$

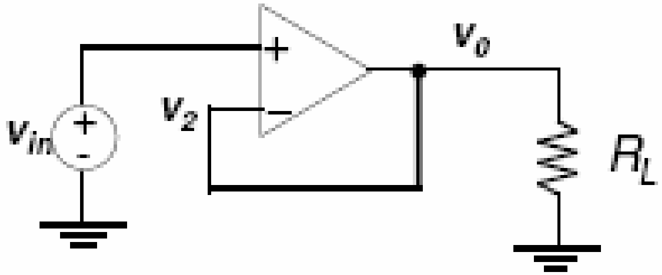
$$A = \frac{v_0}{v_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

$$\text{αντίσταση εισόδου} = \frac{v_{in}}{i} \to \infty$$



Ιδανική πηγή τάσης – ανεξάρτητη του φορτίου αντίστασης

Ακόλουθος τάσης



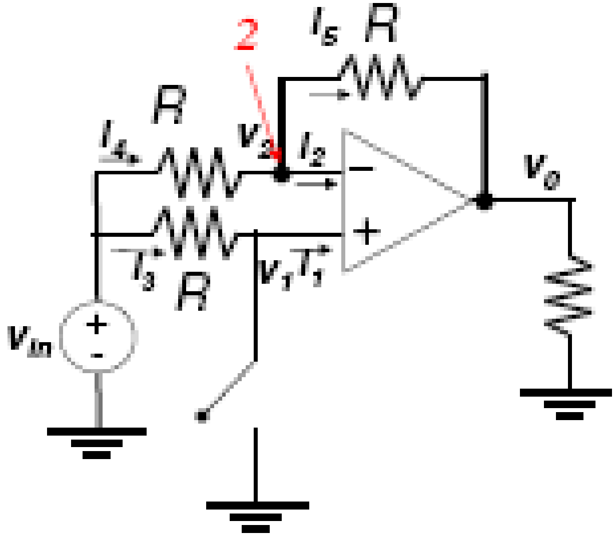
$$R_2 = 0$$

$$R_1 \to \infty$$

$$i = \frac{(v_0 - v_2)}{R_2} = \frac{(v_2 - 0)}{R_1}$$

$$A = \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{(R_1 + R_2)}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1$$

Παράδειγμα 1 (1/2)



Διακόπτης ανοιχτός

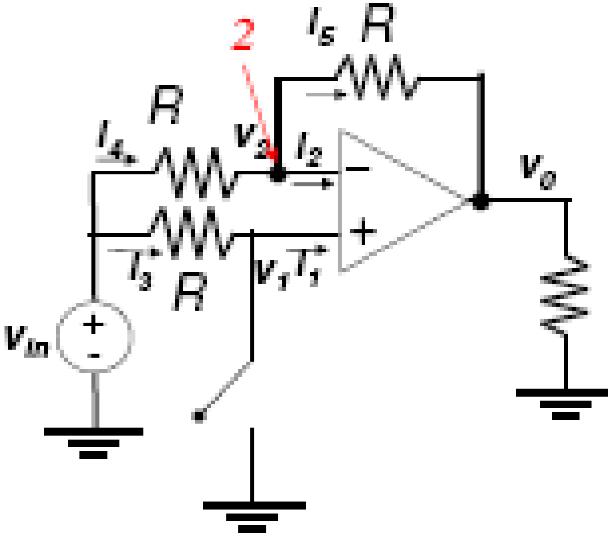
$$v_1 = v_2 \quad , i_1 = 0 \rightarrow i_3 = 0$$

$$i_3 = \frac{(v_{in} - v_1)}{R} \rightarrow v_1 = v_2 = v_{in} \rightarrow i_4 = 0 \rightarrow i_5 = 0$$

$$i_5 = \frac{(v_0 - v_2)}{R} \rightarrow v_0 = v_2 = v_{in}$$

$$A = \frac{v_o}{v_{in}} = 1 \quad , R_{in} \rightarrow \infty$$

Παράδειγμα 1 (2/2)



Διακόπτης κλειστός

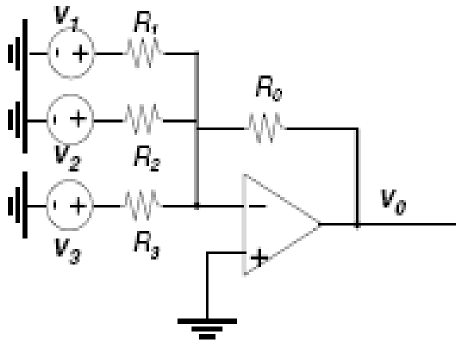
$$v_1 = v_2 = 0 \quad , i_1 = 0 \rightarrow i_3 = 0$$

$$i_4 = \frac{(v_{in} - v_2)}{R} = i_5 = -\frac{(v_0 - v_2)}{R}$$

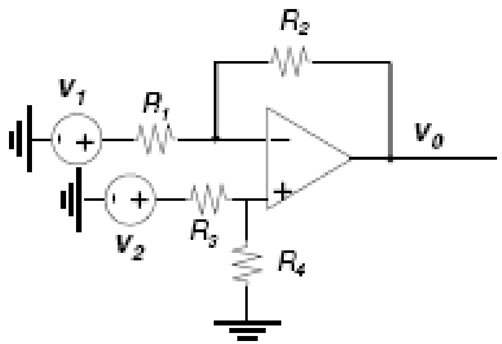
$$v_0 = -v_{in}$$

$$A = \frac{v_o}{v_{in}} = -1 \quad , R_{in} = R/2$$

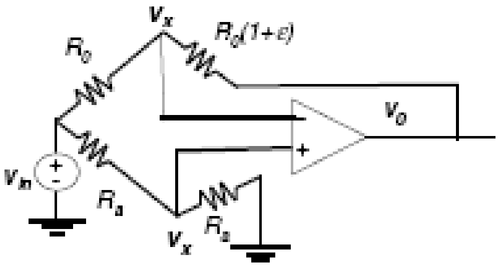
Τύποι ενισχυτών



Ενισχυτής μίξης (summing)



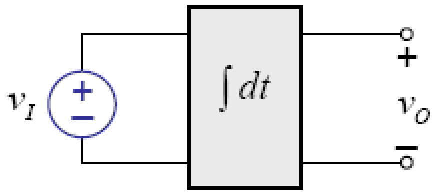
Ενισχυτής διαφοράς (difference)



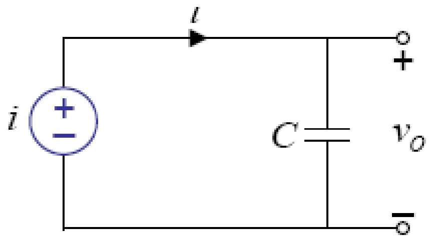
Ενισχυτής γέφυρας

Ενισχυτής ολοκληρωτής (1/3)

- Θέλω



- Ας δοκιμάσουμε το παρακάτω κύκλωμα

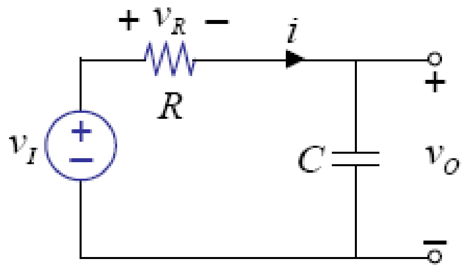


$$v_o = \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} i\,dt$$

- Πρέπει με κάποιο τρόπο να μετατρέψουμε την τάση v_1 σε ρεύμα.

Ενισχυτής ολοκληρωτής (2/3)

- Χρησιμοποιώ την αντίσταση R



$$\frac{v_I}{R} \rightarrow i$$

- Αλλά η v_o πρεπει να είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την v_R αλλιώς

$$i \neq \frac{v_I}{R}$$

- Η v_o είναι μικρή σε σχέση με την v_R όταν:

$$RC\frac{dv_o}{dt} + v_o = v_I$$ ➔ μεγάλο RC, μικρό v_o

$$RC\frac{dv_o}{dt} >> v_o$$

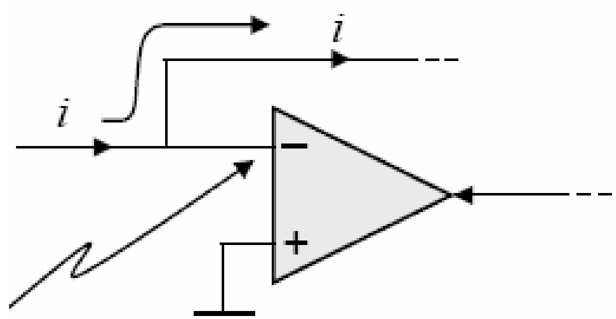
ή $$v_o \approx \frac{1}{RC}\int_{-\infty}^{t} v_I dt$$

$$RC\frac{dv_o}{dt} \approx v_I$$

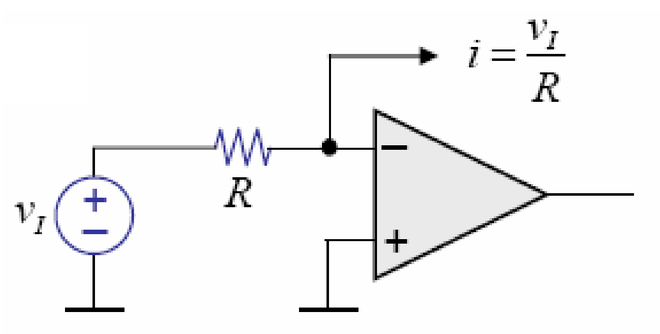
Όταν θέλω καλό ολοκληρωτή πρέπει ωRC>>1

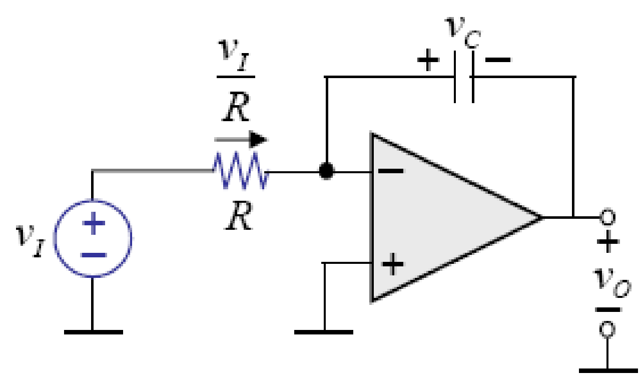
Ενισχυτής ολοκληρωτής (3/3)

- Υπάρχει καλύτερος τρόπος



v ~ 0V με αρνητική ανάδραση οπότε:



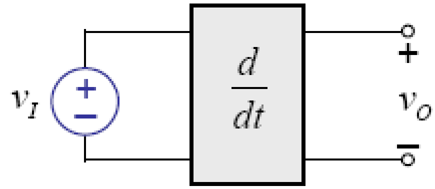


$$v_o = -v_c$$

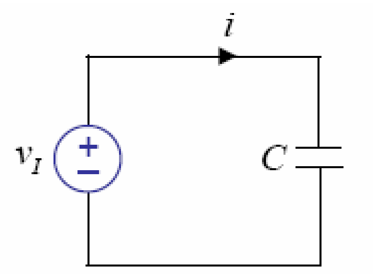
$$v_o = -\frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t} \frac{v_I}{R}\,dt$$

Ενισχυτής διαφοριστής (1/2)

- Θέλω



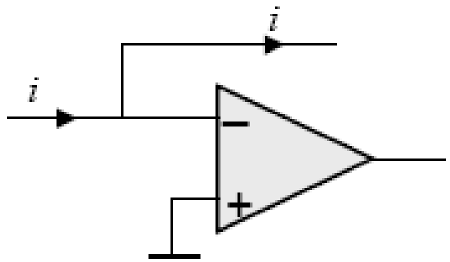
- Ας δοκιμάσουμε το παρακάτω κύκλωμα

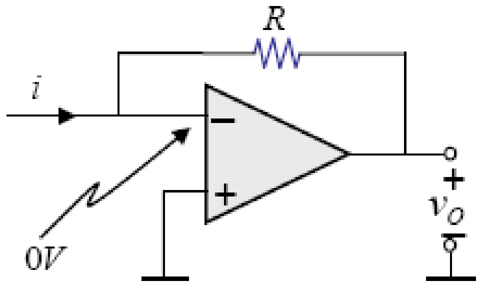


$$i = C\frac{dv_I}{dt}$$

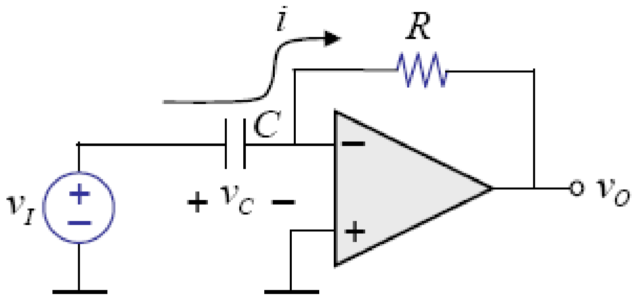
- Πρέπει με κάποιο τρόπο να μετατρέψουμε το ρεύμα i σε τάση.

Ενισχυτής διαφοριστής (2/2)





vo =-iR (ρεύμα σε τάση)



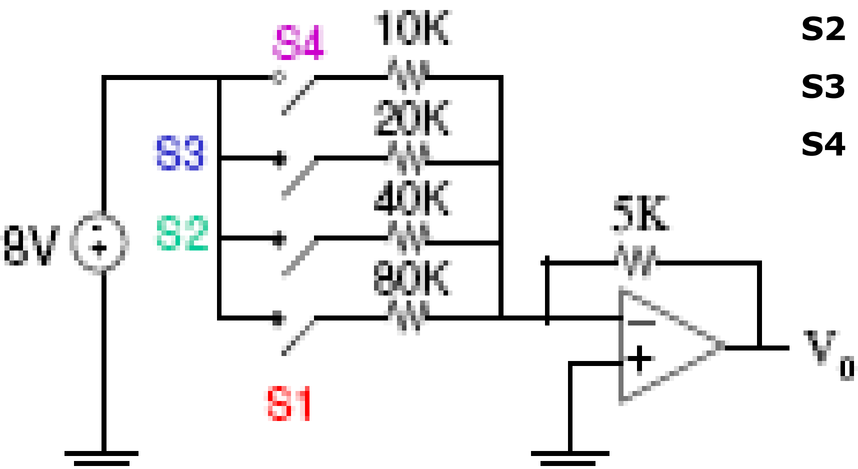
$$v_I = v_C$$

$$i = C\frac{dv_I}{dt}$$

$$v_o = -RC\frac{dv_I}{dt}$$

Μετατροπή ψηφιακού σε αναλογικό σήμα (DAC)

Ο DAC χρησιμοποιείται για την μετατροπή ενός ψηφιακού ηχητικού σήματος σε αναλογική τάση η οποία οδηγεί τα ηχεία



4-Bit D/A

S1 κλειστό αν LSB =1

S2 κλειστό αν επόμενο bit =1

S3 κλειστό αν επόμενο bit =1

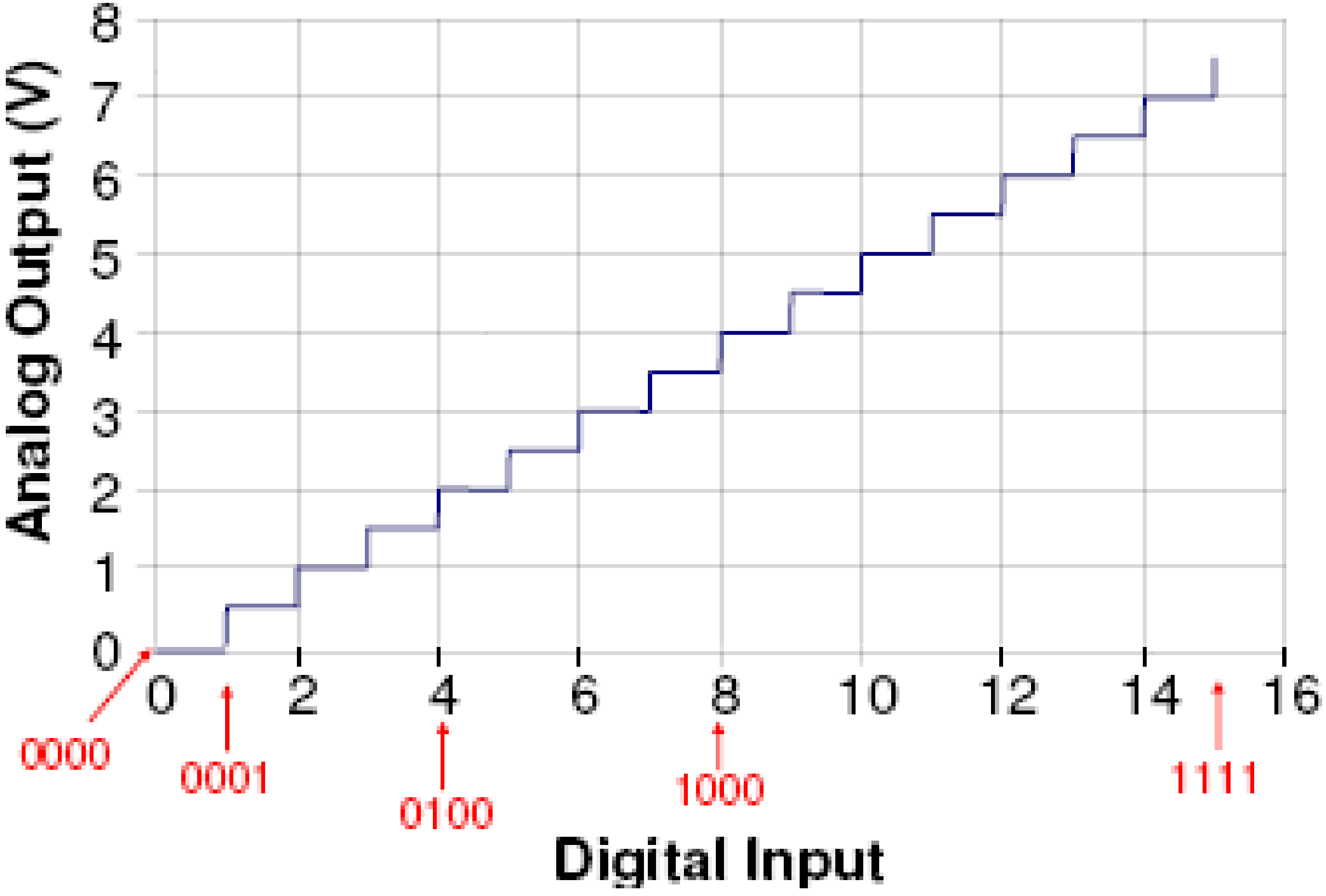
S4 κλειστό αν MSB =1

Binary number	Analog output (volts)
0 0 0 0	0
0 0 0 1	.5
0 0 1 0	1
0 0 1 1	1.5
0 1 0 0	2
0 1 0 1	2.5
0 1 1 0	3
0 1 1 1	3.5
1 0 0 0	4
1 0 0 1	4.5
1 0 1 0	5
1 0 1 1	5.5
1 1 0 0	6
1 1 0 1	6.5
1 1 1 0	7
1 1 1 1	7.5

MSB LSB

(Οι αντιστάσεις χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρονικοί διακόπτες)

Χαρακτηριστική ενός 4-bit DAC



Ενεργό φίλτρο

- Περιέχει λίγα στοιχεία
- Η συνάρτηση μεταφοράς δεν επηρεάζεται από τη διακύμανση των τιμών των επιμέρους στοιχείων
- Προσαρμόζεται εύκολα
- Απαιτεί μικρό εύρος τιμών
- Επιτρέπει πολλές χρήσιμες συναρτήσεις μεταφοράς

Ενεργό φίλτρο - παράδειγμα

$$v_1 = v_2 = \frac{v_o}{k}$$

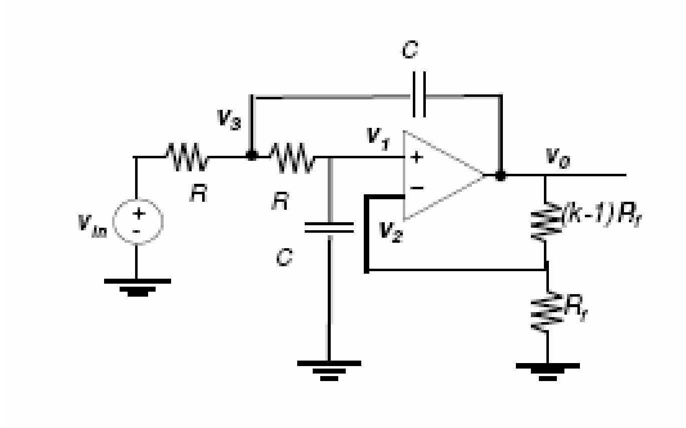
$$\frac{(v_3 - v_1)}{R} = j\omega C v_1$$

$$\frac{(v_{in} - v_3)}{R} = j\omega C(v_3 - v_0) + \frac{(v_3 - v_1)}{R}$$

$$\frac{v_0}{v_{in}} = \frac{k}{1 - \omega^2 R^2 C^2 + j\omega RC(3-k)}$$

$$\omega_B = 1/RC$$

$$|H(\omega)| = \left|\frac{v_o}{v_{in}}\right| = \frac{k}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_B^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{\omega_B^2}(3-\kappa)^2}}$$



➔

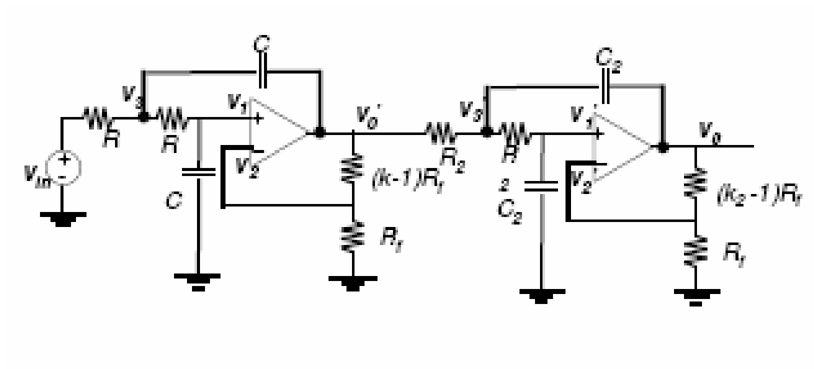
$$\omega = 0, |\mathrm{H}(\omega)| = k$$

$$\omega = \omega_{\mathrm{B}}, |\mathrm{H}(\omega)| = \frac{k}{3-k}$$

$$\omega >> \omega_{\mathrm{B}}, |\mathrm{H}(\omega)| = \frac{k}{\left(\frac{\omega^2}{\omega_{\mathrm{B}}^2}\right)} \square\ \omega^{-2}$$

Το 20log|H(ω)| Μειώνεται με ρυθμό 40dB/δεκάδα

Cascaded ενεργό φίλτρο – παράδειγμα



$$\frac{v_o}{v_{in}} = \frac{k}{1-\omega^2 R_2^2 C_2^2 + j\omega R_2 C_2 (3-k_2) 1-\omega^2 R^2 C^2 + j\omega RC(3-k)}$$

$$\omega_{\mathrm{B}} = 1/RC,\ \omega_{\mathrm{B}2} = 1/R_2 C_2$$

$$|H(\omega)| = \left| \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{k}{\sqrt{\left(1-\frac{\omega^2}{\omega_{\mathrm{B}2}^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{\omega_{\mathrm{B}2}^2}(3-k_2)^2}} \frac{k}{\sqrt{\left(1-\frac{\omega^2}{\omega_{\mathrm{B}}^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{\omega_{\mathrm{B}}^2}(3-k)^2}} \right|$$

$$\omega = 0, |\mathrm{H}(\omega)| = k_2 k$$

$$\omega = \omega_{\mathrm{B}}, |\mathrm{H}(\omega)| = \frac{k_2}{3-k_2}\frac{k}{3-k}$$

$$\omega >> \omega_{\mathrm{B}}, |\mathrm{H}(\omega)| = \frac{k_2 k}{\left(\frac{\omega^4}{\omega_{\mathrm{B}2}^2 \omega_{\mathrm{B}}^2}\right)} \square\ \omega^{-4}$$

- Η διάλεξη αυτή έγινε στο πλαίσιο του ΕΠΕΑΚ ΙΙ για το μάθημα Αναλογικά Ηλεκτρονικά