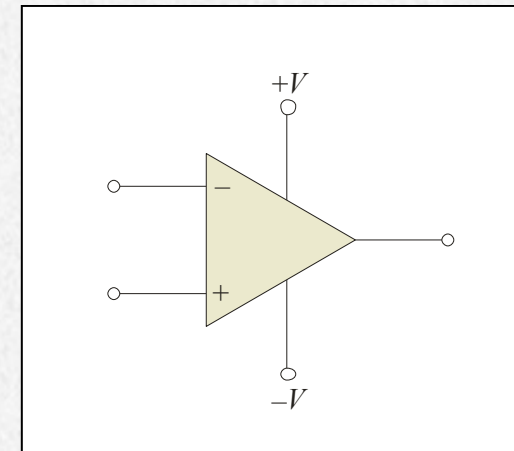
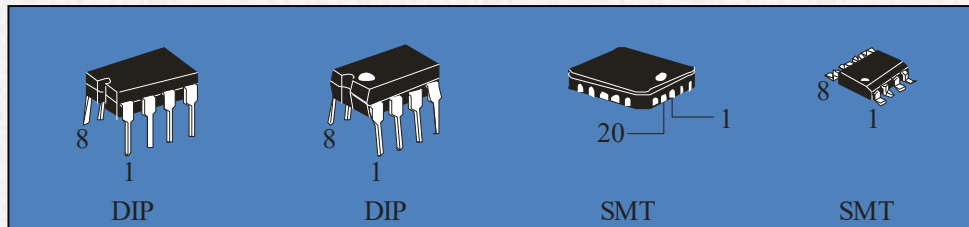


Τελεστικοί Ενισχυτές

Τελεστικοί ενισχυτές

Οι τελεστικοί ενισχυτές (**Operational amplifiers, op-amps**) είναι ενισχυτές σύζευξης dc με πολύ μεγάλο κέρδος με διαφορικές εισόδους. Η μία από αυτές ονομάζεται αναστρέφουσα (-); Ενώ η άλλη ονομάζεται μη αναστρέφουσα (+). Συνήθως έχουν μία έξοδο.

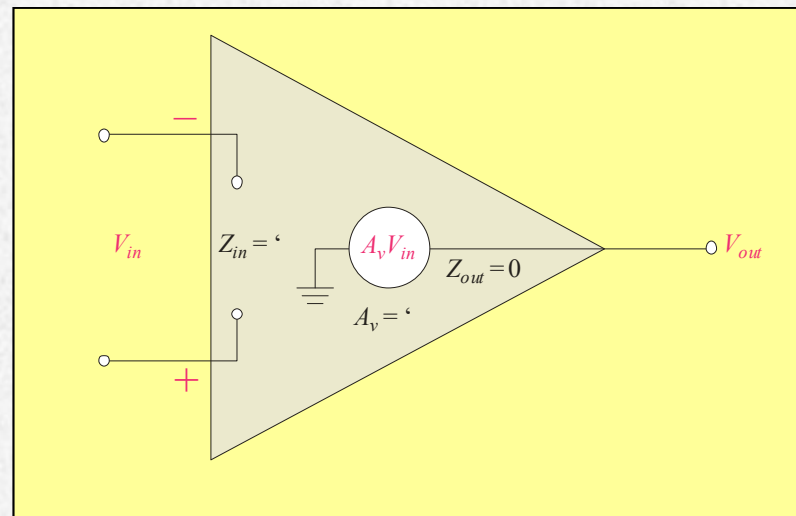
Οι περισσότεροι op-amps χρειάζονται θετική και αρνητική τροφοδοσία, οι οποίες δεν εμφανίζονται στο κύκλωμα που περιέχονται.



Ο ιδανικός op-amp

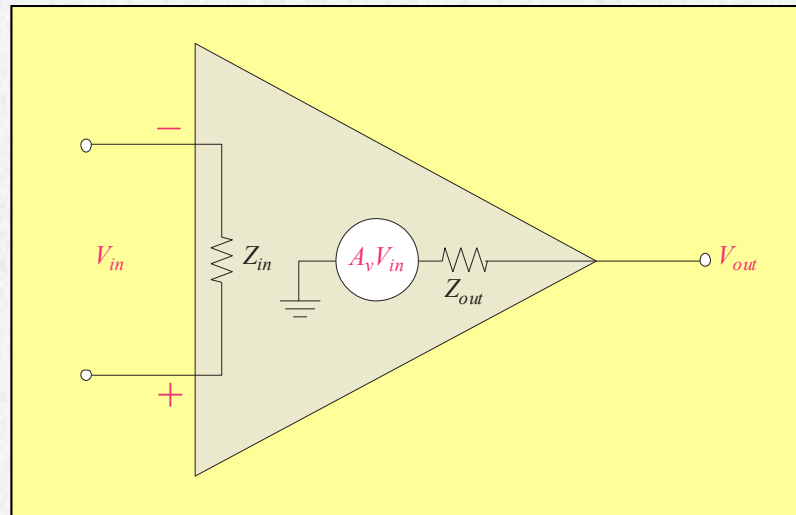
Ο ιδανικός op-amp έχει χαρακτηριστικά που απλουστεύουν την ανάλυση των κυκλωμάτων των τελεστικών ενισχυτών.

Ιδανικά, οι op-amps έχουν **άπειρο κέρδος τάσης, άπειρο εύρος ζώνης, και άπειρη αντίσταση εισόδου**. Επίσης, έχουν **μηδενική αντίσταση εξόδου**.



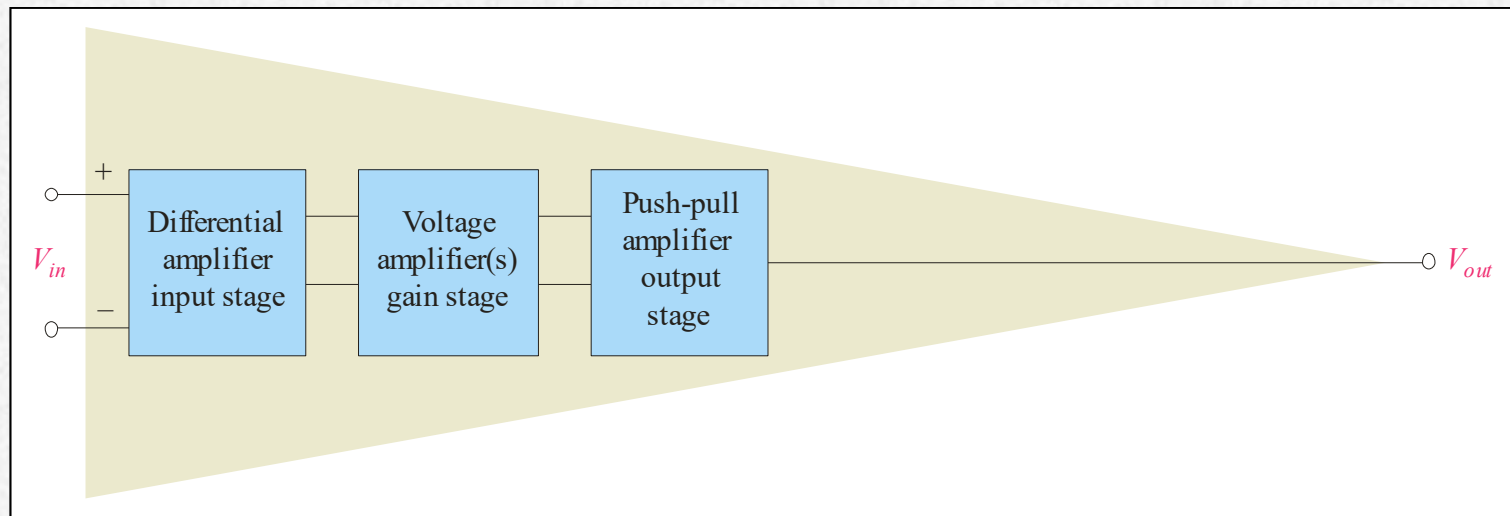
Ο πρακτικός op-amp

Οι πρακτικοί op-amps έχουν χαρακτηριστικά που συχνά μπορούν να θεωρηθούν ιδανικά σε σχέση με τη συγκεκριμένη εφαρμογή, αλλά ποτέ δεν είναι σαν του ιδανικού op-amp. Εκτός από πεπερασμένο κέρδος, εύρος ζώνης, και αντίσταση εισόδου, έχουν και άλλους περιορισμούς.



Ο πρακτικός op-amp

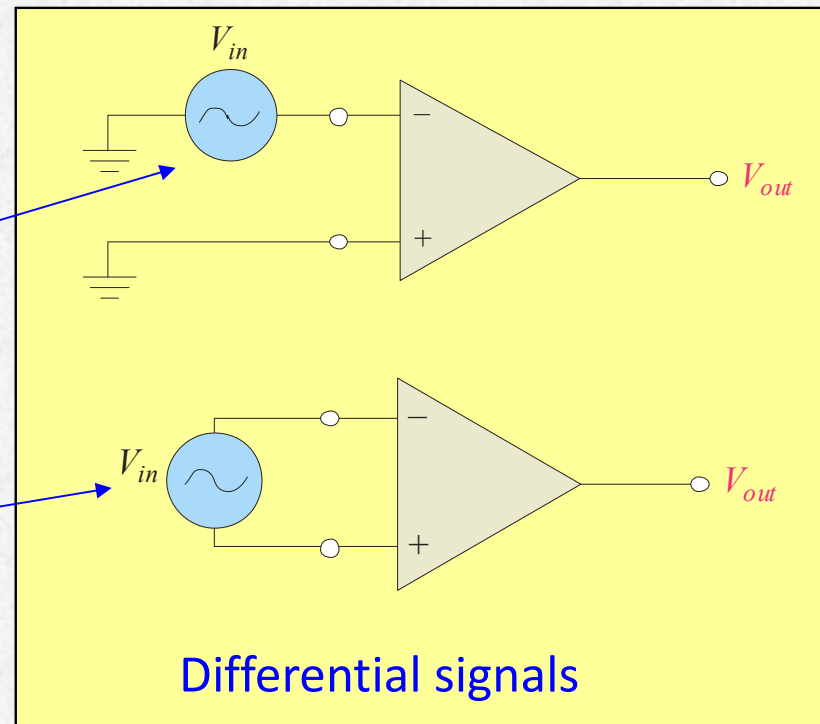
Εσωτερικά, ο op-amp δέχεται μια διαφορική είσοδο, η οποία ενισχύεται από έναν ενισχυτή τάσης, και έναν ενισχυτή push-pull. Ο τελεστικός ενισχυτής ενισχύει τη **διαφορά** των δύο σημάτων εισόδου.



Τρόποι εφαρμογής σημάτων εισόδου

Το σήμα εισόδου μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα τελεστικό ενισχυτή στο λεγόμενο **διαφορικό τρόπο λειτουργίας** (differential-mode) ή στον **κοινό τρόπο λειτουργίας** (common-mode).

Τα διαφορικά σήματα εφαρμόζονται είτε στη μία είσοδο (single-ended, η άλλη γειώνεται) ή και στις δύο εισόδους (double-ended, με αντίθετη φάση σε κάθε είσοδο).



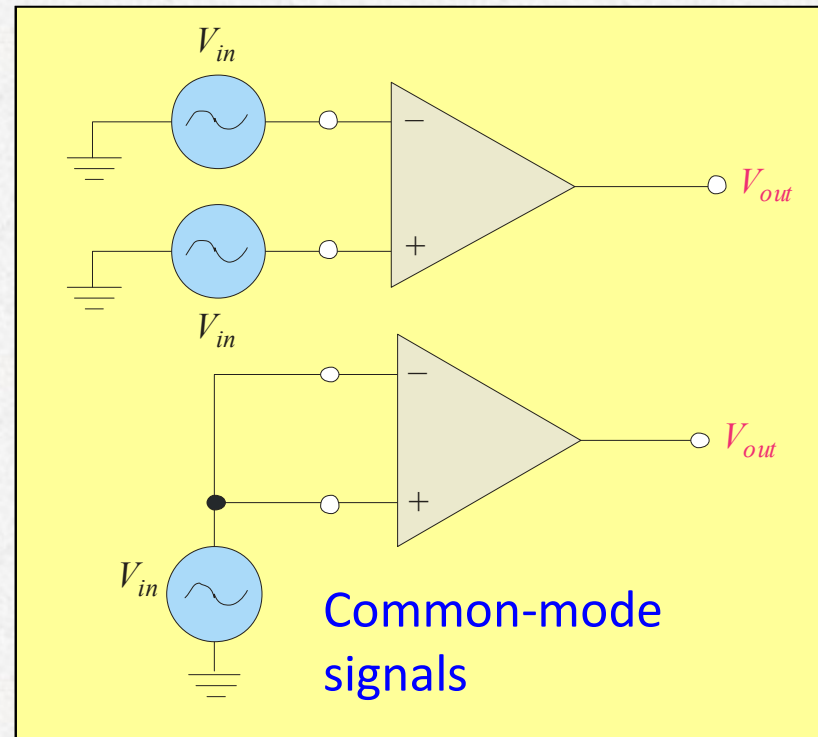
Τρόποι εφαρμογής σημάτων εισόδου

Το σήμα εισόδου μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα τελεστικό ενισχυτή στο λεγόμενο **διαφορικό τρόπο λειτουργίας** (differential-mode) ή στον **κοινό τρόπο λειτουργίας** (common-mode).

Τα κοινά σήματα

εφαρμόζονται και στις δύο εισόδους με την ίδια φάση.

Συνήθως, τα κοινά σήματα προέρχονται από ανεπιθύμητες πηγές, και επηρεάζουν τις δύο εισόδους με τον ίδιο τρόπο. Το αποτέλεσμα είναι ότι ουσιαστικά μηδενίζονται στην έξοδο.



Τρόποι εφαρμογής σημάτων εισόδου

Λόγος απόρριψης Κοινού-Τρόπου (Common-Mode Rejection Ratio)

Η ικανότητα ενός ενισχυτή να ενισχύει διαφορικά σήματα και να απορρίπτει κοινά σήματα ονομάζεται **λόγος απόρριψης κοινού-τρόπου (common-mode rejection ratio, CMRR)**.

Το CMRR δίνεται από
$$\mathbf{CMRR} = \frac{A_{ol}}{A_{cm}}$$

όπου A_{ol} είναι το διαφορικό κέρδος ανοικτού βρόχου και A_{cm} είναι το κέρδος κοινού-τρόπου.

Το CMRR εκφράζεται επίσης σε decibels:
$$\mathbf{CMRR} = 20 \log \left(\frac{A_{ol}}{A_{cm}} \right)$$

Τρόποι εφαρμογής σημάτων εισόδου

Παράδειγμα:

Πόσο είναι το CMRR σε decibels για ένα τυπικό 741C op-amp?

Το τυπικό διαφορικό κέρδος ανοικτού βρόχου του 741C είναι 200.000 και το τυπικό κέρδος κοινού τρόπου είναι is 6.3.

Λύση:

$$\begin{aligned} \text{CMRR} &= 20 \log \left(\frac{A_{ol}}{A_{cm}} \right) \\ &= 20 \log \frac{200,000}{6.3} = 90 \text{ dB} \end{aligned}$$

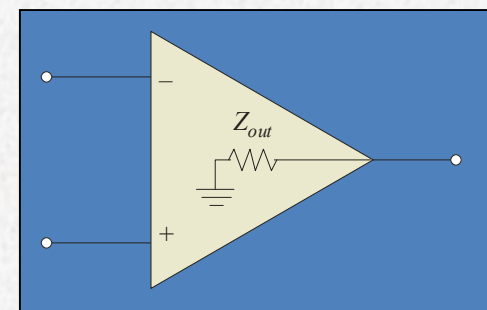
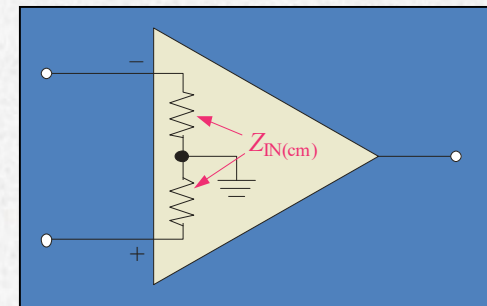
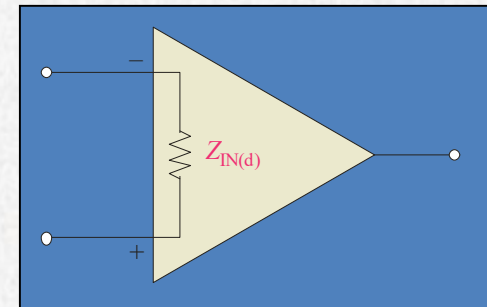
(Για τον 741C το ελάχιστο CMRR είναι 70 dB.)

Παράμετροι εμπέδησης

$Z_{IN(d)}$: Η **διαφορική εμπέδηση εισόδου** είναι η συνολική αντίσταση μεταξύ των δύο εισόδων.

$Z_{IN(cm)}$: Η **εμπέδηση εισόδου κοινού-τρόπου** είναι η αντίσταση μεταξύ κάθε εισόδου και της αναφοράς.

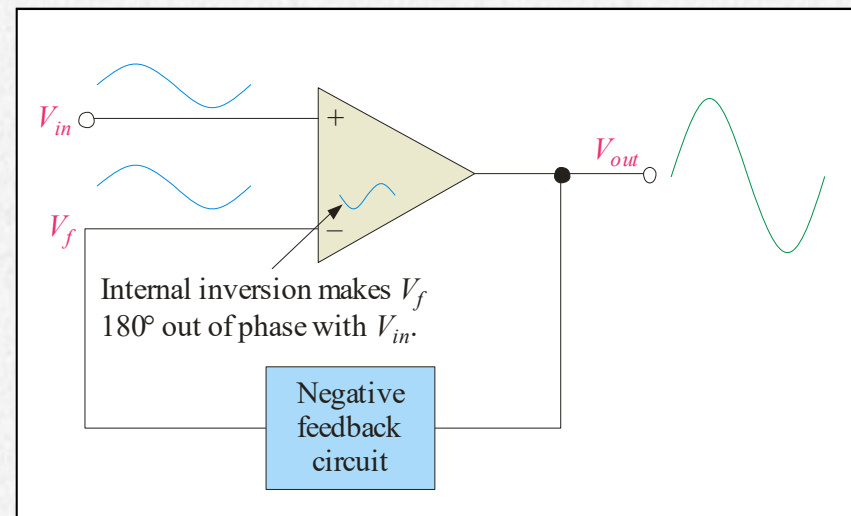
Z_{out} : Η **εμπέδηση εξόδου** είναι η αντίσταση που φαίνεται από την έξοδο του ενισχυτή.



Αρνητική ανατροφοδότηση

Αρνητική ανατροφοδότηση είναι η διαδικασία με την οποία ένα τμήμα του σήματος εξόδου επιστρέφει στην είσοδο με αντίθετη φάση σε σχέση με τη φάση του σήματος εισόδου.

Το πλεονέκτημα της αρνητικής ανατροφοδότησης είναι ότι μπορούμε να επιτύχουμε συγκεκριμένες τιμές του κέρδους του ενισχυτή. Επιπλέον, μπορούμε να ρυθμίσουμε το εύρος ζώνης και τις τιμές των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου.

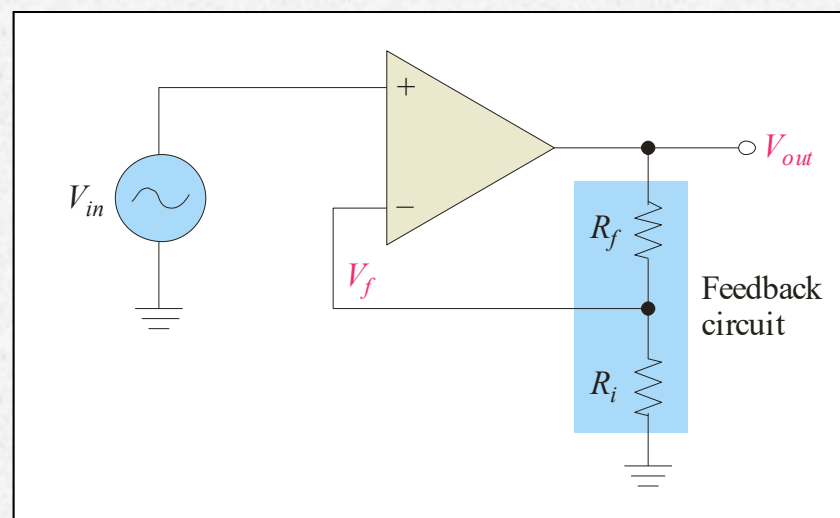


Μη αναστρέφων ενισχυτής

Ο μη αναστρέφων ενισχυτής είναι μια τοπολογία στην οποία το σήμα εφαρμόζεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο και ένα τμήμα της εξόδου επανατροφοδοτείται στην αναστρέφουσα είσοδο.

Η ανατροφοδότηση εξαναγκάζει την τάση V_f να γίνει ίση με την V_{in} , έτσι η V_{in} εφαρμόζεται πάνω στην R_i . Αποδεικνύεται εύκολα ότι το κέρδος κλειστού βρόχου του μη αναστρέφοντα ενισχυτή είναι:

$$A_{cl(NI)} = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$



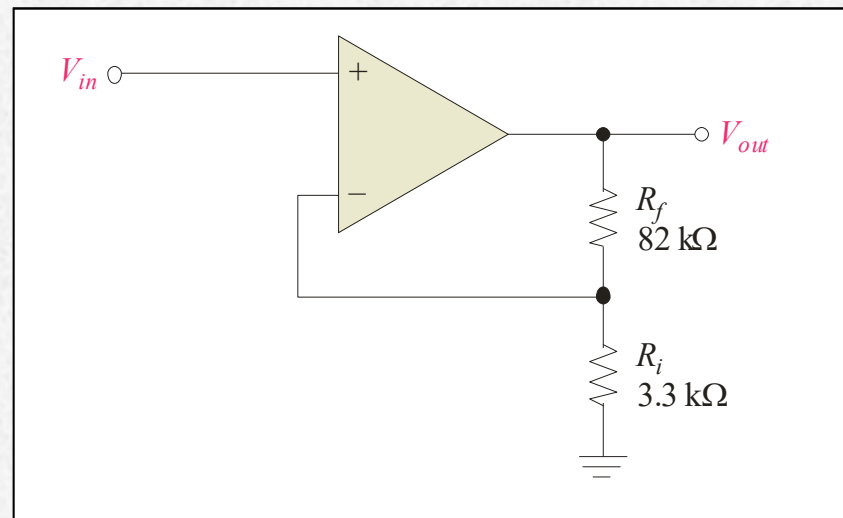
Μη αναστρέφων ενισχυτής

Παράδειγμα:

Βρείτε το κέρδος του μη αναστρέφοντα ενισχυτή που φαίνεται.

Λύση:

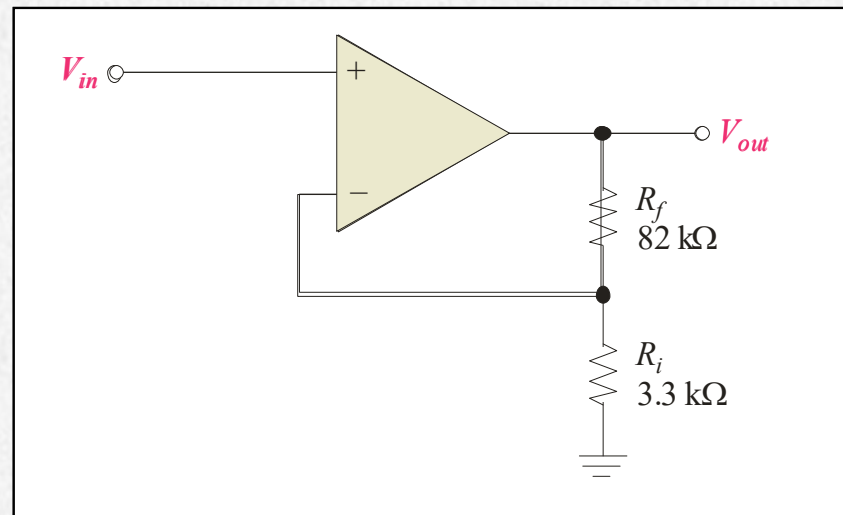
$$\begin{aligned}A_{cl(NI)} &= 1 + \frac{R_f}{R_i} \\ &= 1 + \frac{82 \text{ k}\Omega}{3.3 \text{ k}\Omega} \\ &= 25.8\end{aligned}$$



Μη αναστρέφων ενισχυτής

Μια ιδιαίτερη περίπτωση του μη αναστρέφοντα ενισχυτή είναι όταν $R_f = 0$ και $R_i = \infty$. Αυτό συνιστά έναν ακόλουθο τάσης ή απομονωτή μοναδιαίου κέρδους με κέρδος 1.

Η αντίσταση εισόδου του ακόλουθου τάσης είναι πολύ υψηλή, αποτελώντας ένα εξαιρετικό κύκλωμα απομόνωσης ενός κυκλώματος από άλλο, αποφεύγοντας προβλήματα «φόρτωσης».

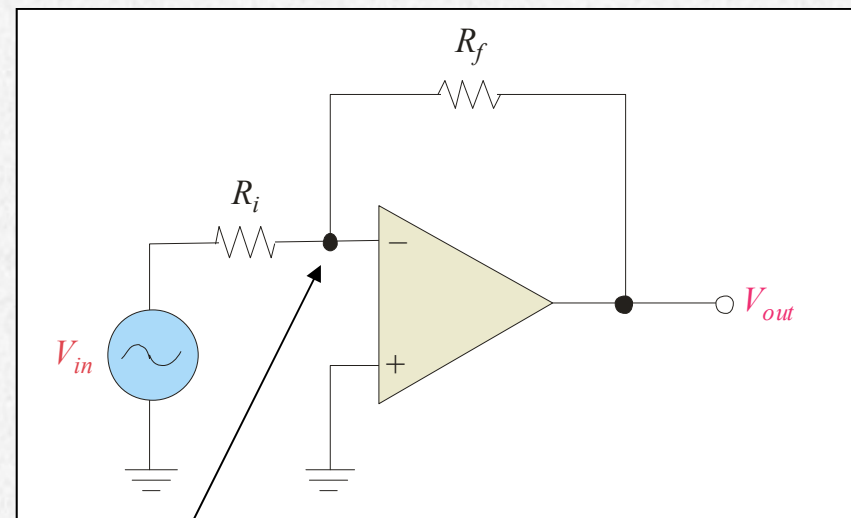


Αναστρέφων ενισχυτής

Ο αναστρέφων ενισχυτής είναι η τοπολογία στην οποία η μη αναστρέφουσα είσοδος γειώνεται και το σήμα εφαρμόζεται μέσω αντίστασης στην αναστρέφουσα είσοδο.

Η ανατροφοδότηση αναγκάζει τις εισόδους να είναι σχεδόν ίδιες; Άρα η αναστρέφουσα είσοδος είναι περίπου 0 V. Το κέρδος κλειστού βρόχου είναι:

$$A_{cl(1)} = -\frac{R_f}{R_i}$$



0 V (ιδεατή αναφορά)

Αναστρέφων ενισχυτής

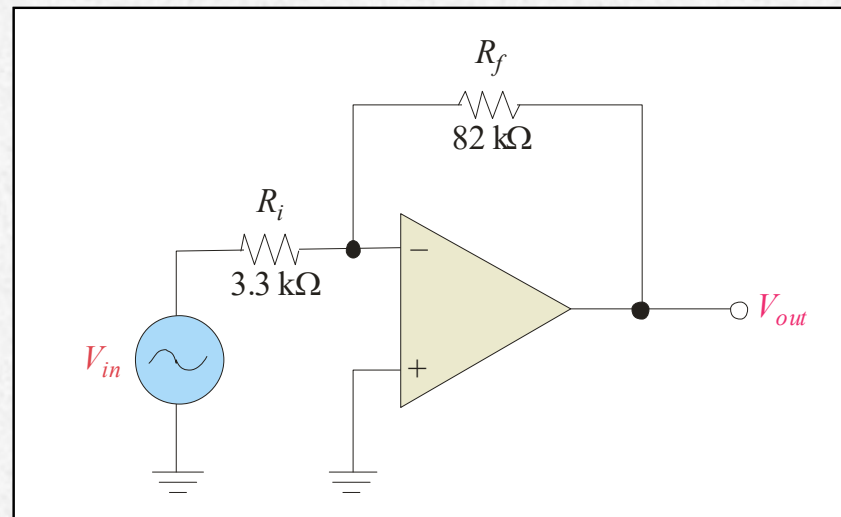
Παράδειγμα:

Βρείτε το κέρδος του αναστρέφοντα ενισχυτή που φαίνεται.

Λύση:

$$\begin{aligned} A_{cl(I)} &= -\frac{R_f}{R_i} \\ &= -\frac{82 \text{ k}\Omega}{3.3 \text{ k}\Omega} \\ &= -24.8 \end{aligned}$$

Το πρόσημο μείον σημαίνει αντιστροφή.



Εμπεδήσεις

Μη αναστρέφων ενισχυτής:

$$Z_{in(NI)} = (1 + A_{ol}B) Z_{in} \quad \text{Γενικά, θεωρείται ίση με } \infty$$

$$Z_{out(NI)} = \frac{Z_{out}}{(1 + A_{ol}B)} \quad \text{Γενικά, θεωρείται ίση με } 0$$

Αναστρέφων ενισχυτής:

$$Z_{in(I)} \cong R_i \quad \text{Γενικά, θεωρείται ίση με } R_i$$

$$Z_{out(I)} = \frac{Z_{out}}{(1 + A_{ol}B)} \quad \text{Γενικά, θεωρείται ίση με } 0$$

$$B = R_i / (R_f + R_i)$$

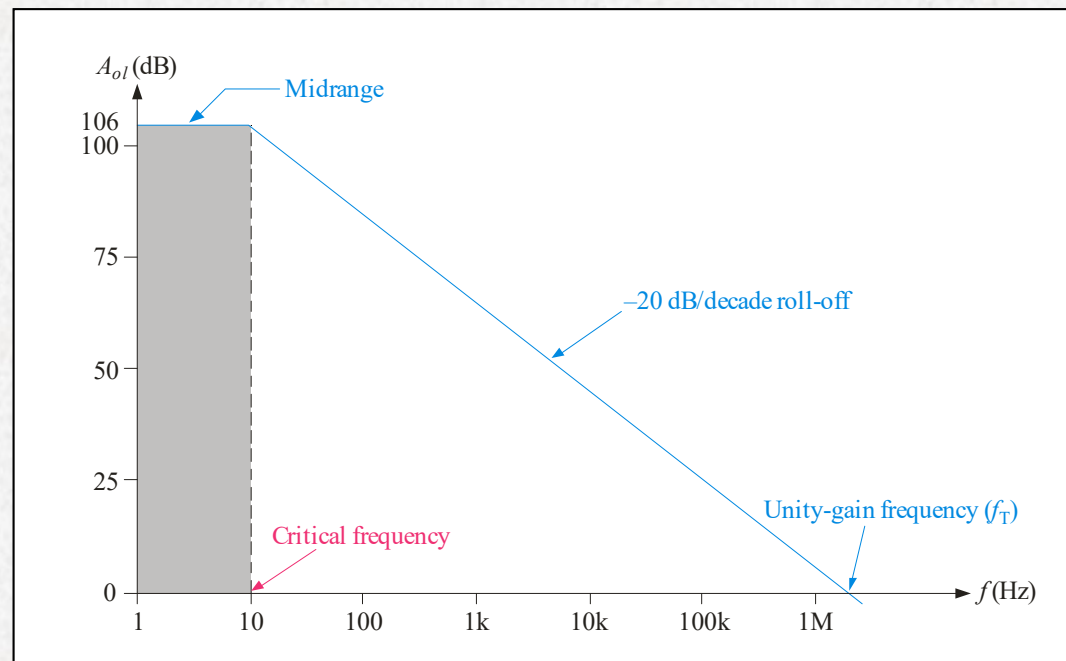
B : είναι η εξασθένηση του κυκλώματος αρνητικής ανατροφοδότησης

Σημειώστε ότι η αντίσταση εξόδου είναι ίδια και για τις δύο τοπολογίες.

Εύρος Ζώνης

Πολλοί op-amps έχουν απόκριση συχνότητας με κλίση ανάλογη με αυτήν ενός απλού κατωδιαβατού φίλτρου RC , με σταθερή κλίση -20 dB/δεκάδα έως τη μοναδιαία απολαβή.

Αυτοί οι op-amps ονομάζονται *αντισταθμισμένοι op-amps*. Η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει τη χαρακτηριστική συχνότητας ανοικτού-βρόχου (διάγραμμα Bode) του op-amp.

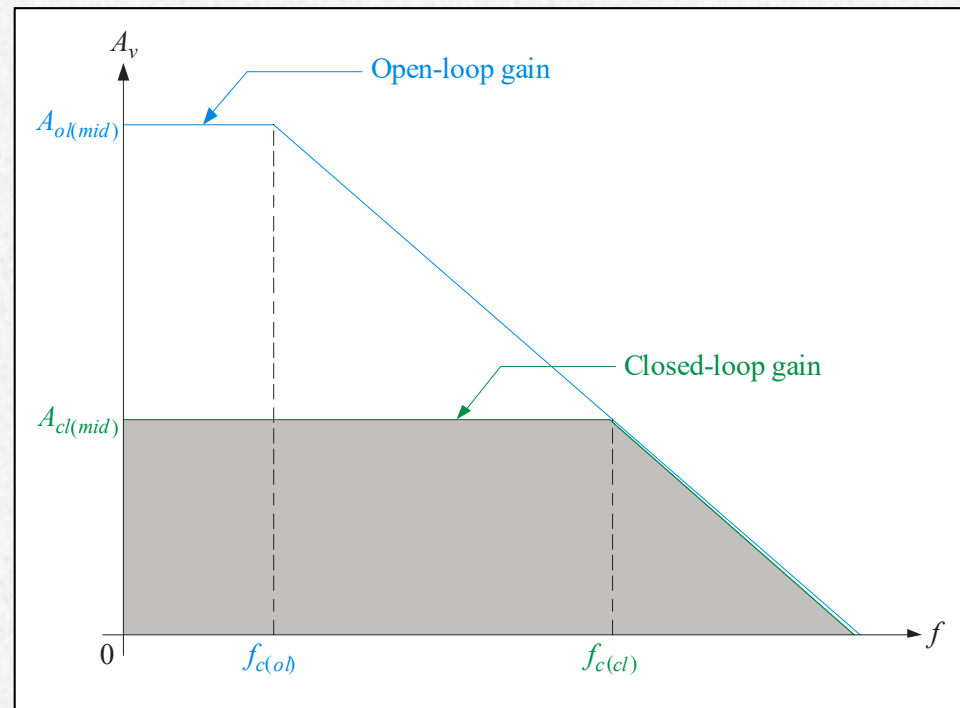


Εύρος Ζώνης

Για op-amps με χαρακτηριστική κέρδους ανοικτού βρόχου -20 dB/δεκάδα, η συχνότητα αποκοπής κλειστού βρόχου δίνεται από την:

$$f_{c(cl)} = f_{c(ol)}(1 + BA_{ol(mid)})$$

Η συχνότητα αποκοπής κλειστού βρόχου είναι μεγαλύτερη από αυτήν του ανοικτού βρόχου κατά τον παράγοντα $(1 + BA_{ol(mid)})$. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί κανείς να επιτύχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης BW αποδεχόμενος μικρότερο κέρδος. Για αντισταθμισμένο op-amp, $A_{cl}f_{c(cl)} = A_{ol}f_{c(ol)}$.



Εύρος Ζώνης

Η εξίσωση, $A_{cl}f_{c(cl)} = A_{ol}f_{c(ol)}$ δείχνει ότι το γινόμενο κέρδους-απολαβής είναι σταθερό. Το γινόμενο κέρδους-απολαβής είναι επίσης ίσο με τη συχνότητα μοναδιαίου κέρδους. Δηλαδή $f_T = A_{cl}f_{c(cl)}$, όπου f_T είναι η συχνότητα μοναδιαίου κέρδους.

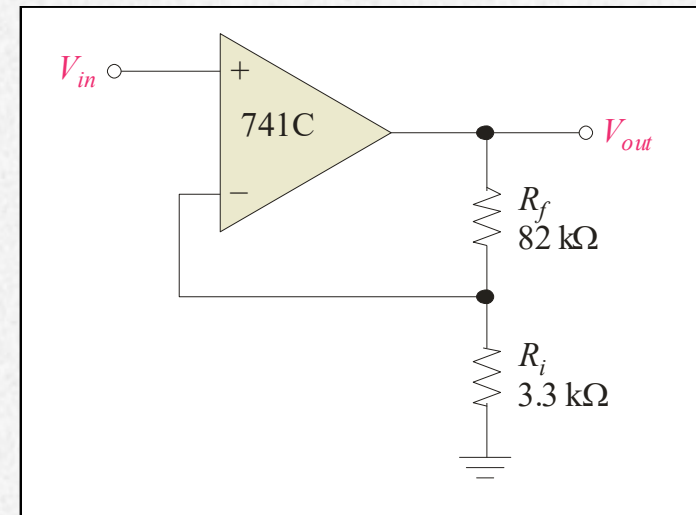
Παράδειγμα:

Η f_T για έναν 741C op amp είναι 1 MHz. Πόσο είναι το BW_{cl} αυτού του ενισχυτή?

Λύση:

$$A_{cl(NI)} = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{82 \text{ k}\Omega}{3.3 \text{ k}\Omega} = 25.8$$

$$BW_{cl} = \frac{f_T}{A_{cl}} = \frac{1 \text{ MHz}}{25.8} = 38.8 \text{ kHz}$$

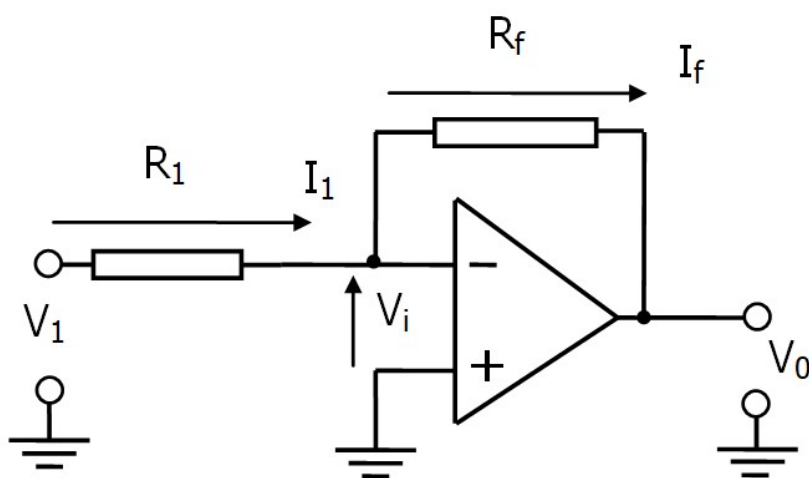


Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών

Βασική προϋπόθεση για την ανάλυση που ακολουθεί είναι ότι ένας Τ.Ε. είναι ιδανικός και άρα :

- (1) έχει άπειρο κέρδος ανοιχτού βρόχου ($\approx 10^7$).
- (2) έχει διαφορική τάση (V_i) μεταξύ των εισόδων του μηδέν.
- (3) έχει άπειρη αντίσταση εισόδου.
- (4) έχει μηδενική αντίσταση εξόδου.

ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ (ΑΝΑΣΤΡΕΦΩΝ)



Σήμα εισόδου στην αναστρέφουσα είσοδο.

Με την προϋπόθεση ότι η είσοδος των Τ.Ε. έχει άπειρη αντίσταση, τα ρεύματα I_1 και I_f είναι ίσα και $I_1 = (V_1 - V_i) / R_1$.

Αλλά και $I_f = (V_i - V_0) / R_f$

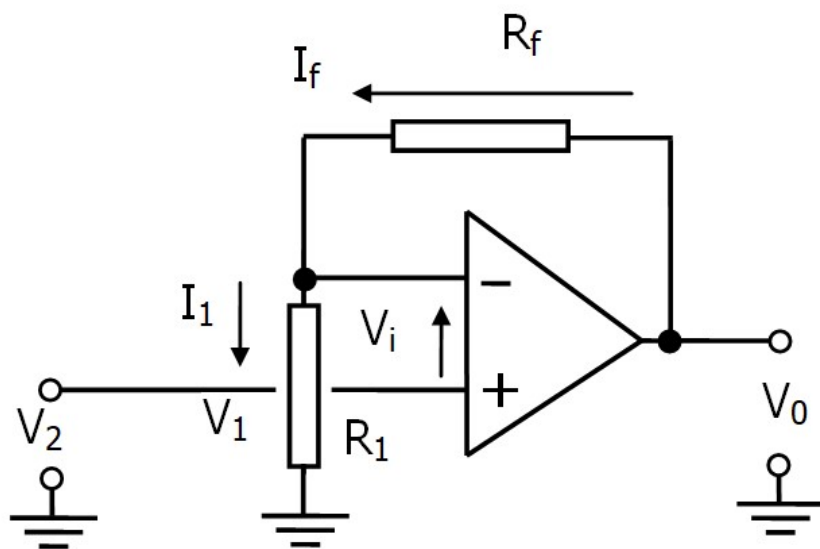
άρα $(V_1 - V_i) / R_1 = (V_i - V_0) / R_f$

Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι το κέρδος ανοιχτού βρόχου των Τ.Ε. είναι της τάξης του 10^7 τότε $V_i = V_0 / A = V_0 / 10^7 \approx 0$. Η πιο πάνω σχέση γίνεται $V_1 / R_1 = -V_0 / R_f$ απ' όπου :

$$V_0 = - (R_f / R_1) V_1$$

Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών

ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ (ΜΗ ΑΝΑΣΤΡΕΦΩΝ)



Σήμα εισόδου στη μη αναστρέφουσα είσοδο.

Μέρος της εξόδου επανατροφοδοτείται στην αναστρέφουσα είσοδο. Άρα το ρεύμα I_1 δημιουργεί πτώση τάσης στα άκρα της R_1 ίση με $V_1 = I_1 \cdot R_1$. Λόγω των R_f , R_1 αλλά και της άπειρης αντίστασης εισόδου του Τ.Ε. έχουμε :

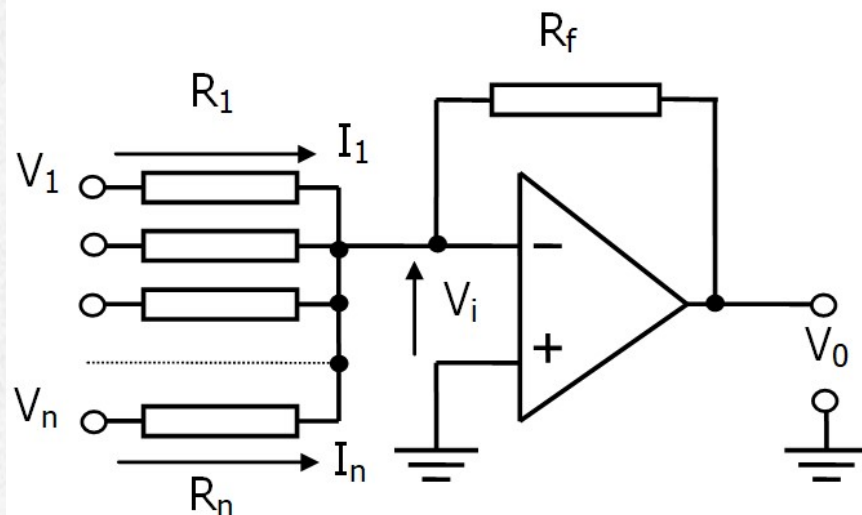
$$V_1 = V_0 [R_1 / (R_1 + R_f)] \Rightarrow V_0 = [(R_1 + R_f) / R_1] V_1$$

$$\Rightarrow V_0 = [1 + (R_f / R_1)] V_1$$

Να ληφθεί υπ' όψη ότι εφ' όσον $V_i = 0$ τότε και $V_1 = V_2$.

Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών

ΑΘΡΟΙΣΤΗΣ (ΑΝΑΣΤΡΕΦΩΝ)



Με αναφορά τα προηγούμενα έχουμε τα ρεύματα :

$$i_1 = V_1 / R_1, i_2 = V_2 / R_2, \dots, i_n = V_n / R_n \text{ άρα}$$

$$V_0 = -[(R_f / R_1) V_1 + (R_f / R_2) V_2 + \dots + (R_f / R_n) V_n] \text{ και}$$

$$\mathbf{V_0 = -R_f [(V_1 / R_1) + (V_2 / R_2) + \dots + (V_n / R_n)]}$$

όταν $R_f = R_1 = R_2 = \dots = R_n$

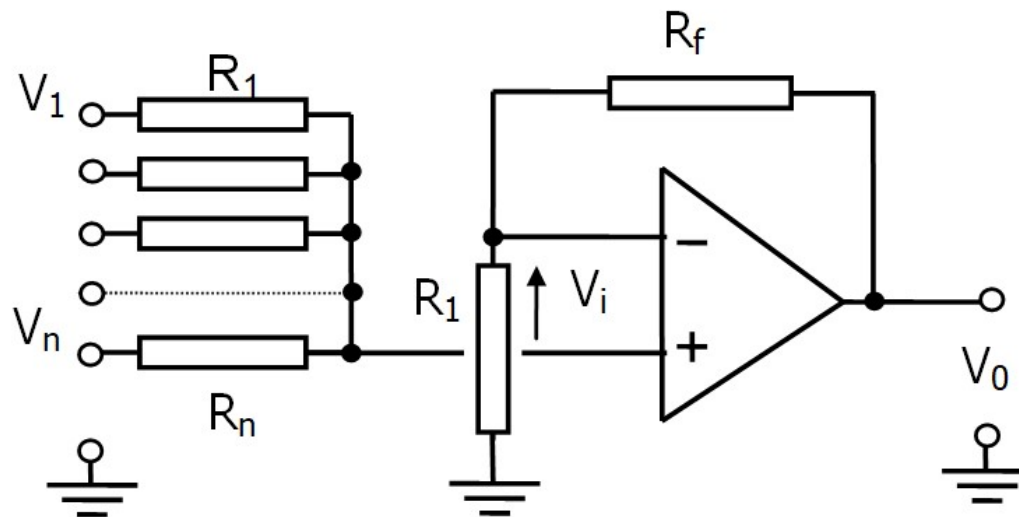
$$\mathbf{V_0 = -[V_1 + V_2 + \dots + V_n]}$$

όταν $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$ και $R_f \neq R$

$$\mathbf{V_0 = - (R_f / R) [V_1 + V_2 + \dots + V_n]}$$

Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών

ΑΘΡΟΙΣΤΗΣ (ΜΗ ΑΝΑΣΤΡΕΦΩΝ)



Με αναφορά τον μη αναστρέφοντα ενισχυτή και με την προϋπόθεση ότι όλες οι αντιστάσεις εισόδου των σημάτων είναι ίσες με R , αποδεικνύεται ότι :

$$V_0 = [1 + (R_f / R_1)] * (1/n) * (V_1 + V_2 + \dots + V_n)$$

για την περίπτωση όπου $R_f = R_1$ και δύο μόνο εισόδους στον αθροιστή (V_1 και V_2) τότε :

$$V_0 = [1 + 1] * (1/2) * (V_1 + V_2)$$

$$\text{και άρα: } V_0 = (V_1 + V_2)$$

Μη αναστρέφων αθροιστής (ανάλυση)

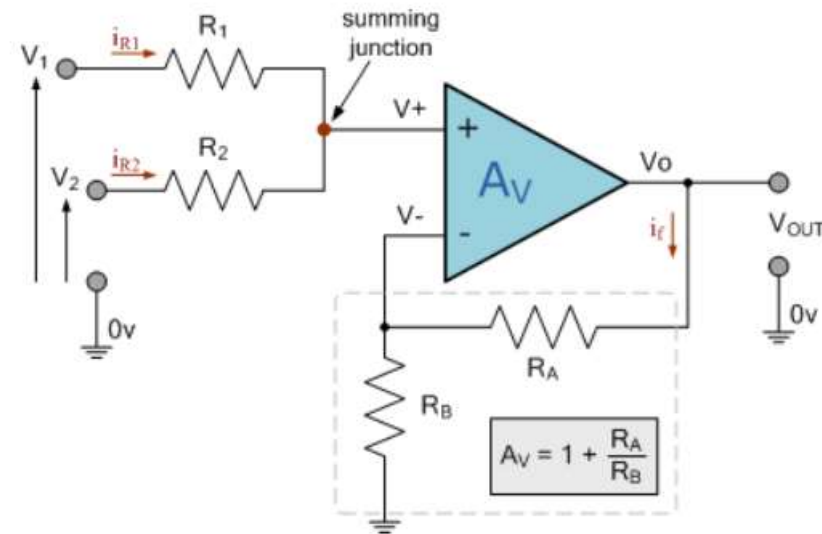
$$I_{R1} + I_{R2} = 0 \text{ (KCL)}$$

$$\frac{V_1 - V+}{R_1} + \frac{V_2 - V+}{R_2} = 0$$

$$\therefore \left(\frac{V_1 - V+}{R_1} \right) + \left(\frac{V_2 - V+}{R_2} \right) = 0$$

$$V+ = \frac{\frac{V_1}{R} + \frac{V_2}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

$$V+ = \frac{V_1 + V_2}{2}$$



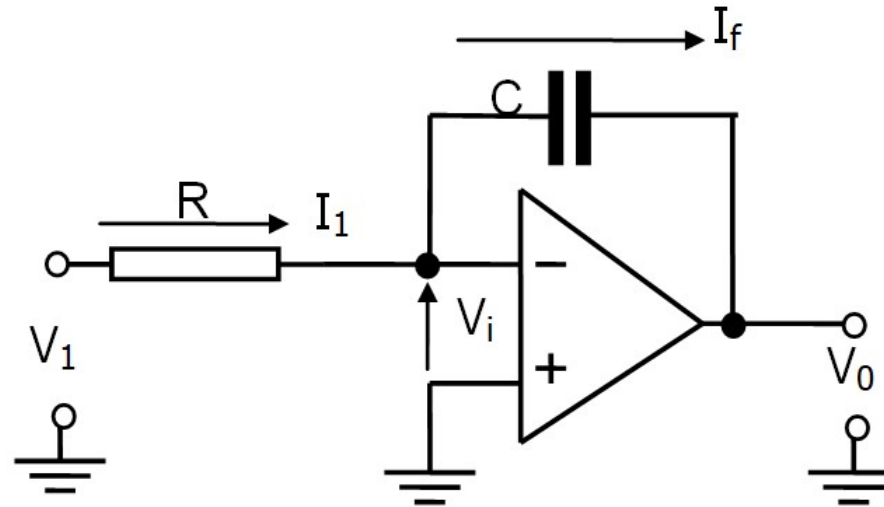
$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{V_{OUT}}{V+} = 1 + \frac{R_A}{R_B}$$

$$\therefore V_{OUT} = \left[1 + \frac{R_A}{R_B} \right] V+$$

$$V_{OUT} = \left[1 + \frac{R_A}{R_B} \right] \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών

ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΗΣ



Από τις προηγούμενες αναλύσεις είναι γνωστό ότι $I_1 = I_f$ και
άρα $[(V_1 - V_i) / R] = C d(V_i - V_0) / dt$ αλλά εφ' όσον $V_i \rightarrow 0$

$$V_1 / R = -C d(V_0) / dt$$

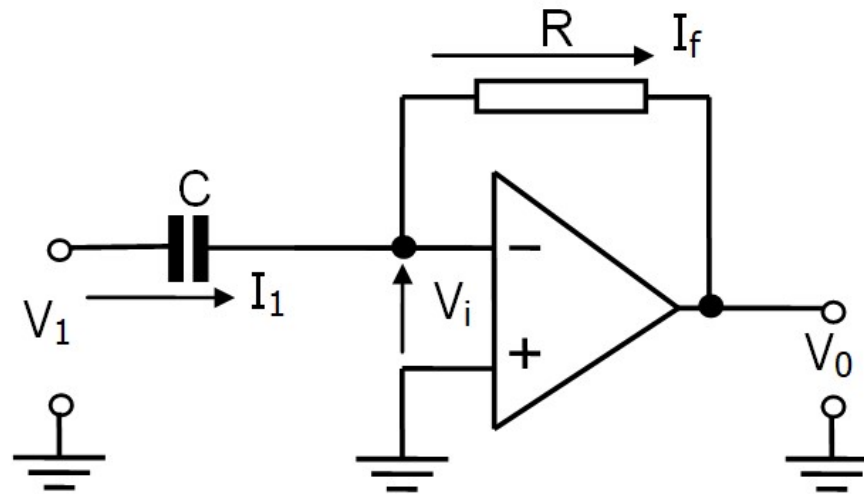
$$d(V_0) / dt = -(1 / RC) V_1$$

και άρα

$$V_0 = - \int_0^t RC | V_1 | dt$$

Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών

ΑΠΛΟΣ ΔΙΑΦΟΡΙΣΤΗΣ



Όπως έχει αναφερθεί προηγούμενα $I_1 = I_f$ οπότε

$$I_1 = C \frac{dV_1}{dt}, \quad I_f = \frac{V_i - V_0}{R}.$$

Αλλά εφ' όσον $V_i \rightarrow 0$ τότε το $I_f = -V_0/R$.

Από τα παραπάνω λοιπόν προκύπτει ότι :

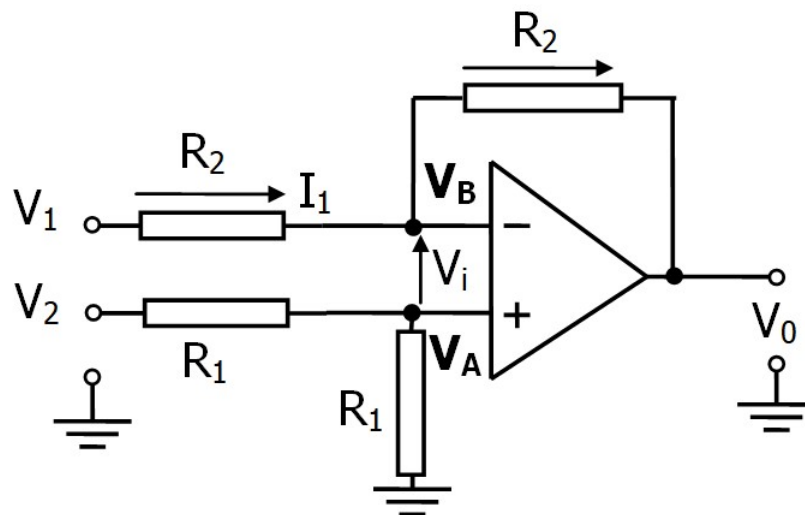
$$C \frac{dV_1}{dt} = -V_0/R$$

$$V_0 = -C R \frac{dV_1}{dt}$$

$$\text{και άρα } V_0 = -j\omega CR$$

Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών

ΑΦΑΙΡΕΤΗΣ ή ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ



Με την προϋπόθεση ότι οι τάσεις στις εισόδους του Τ.Ε. είναι αντίστοιχα V_A στη μη αναστρέφουσα και V_B στην αναστρέφουσα έχουμε :

$$V_A = V_2 * R_1 / (R_1 + R_1) = V_2 / 2 \text{ ----(1)}$$

Αλλά $I_1 = I_f \Rightarrow (V_1 - V_B) / R_2 = (V_B - V_0) / R_2$ ή $(V_1 - V_B) = (V_B - V_0)$

$$\Rightarrow V_1 + V_0 = 2 V_B \Rightarrow V_B = (V_1 + V_0) / 2 \text{ ----(2)}$$

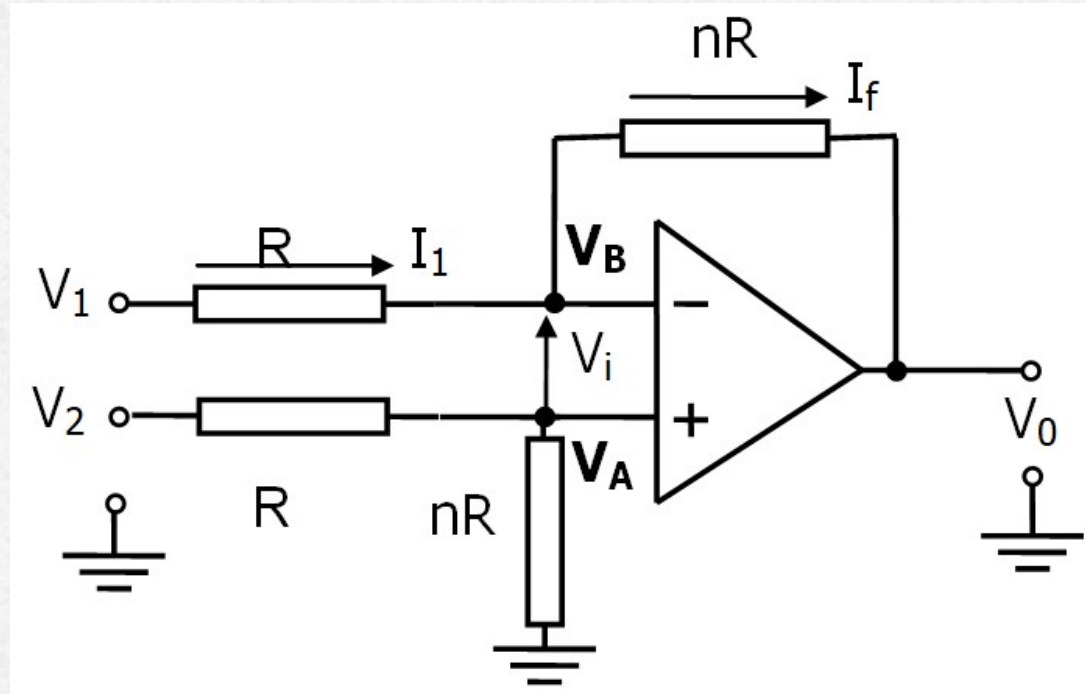
Για τις εισόδους του Τ.Ε. γνωρίζουμε ότι

$$V_i = V_A - V_B = 0 \Rightarrow V_A = V_B$$

από τις εξισώσεις (1) και (2) έχουμε: $V_2 / 2 = (V_1 + V_0) / 2$

$$V_0 = V_2 - V_1$$

Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών



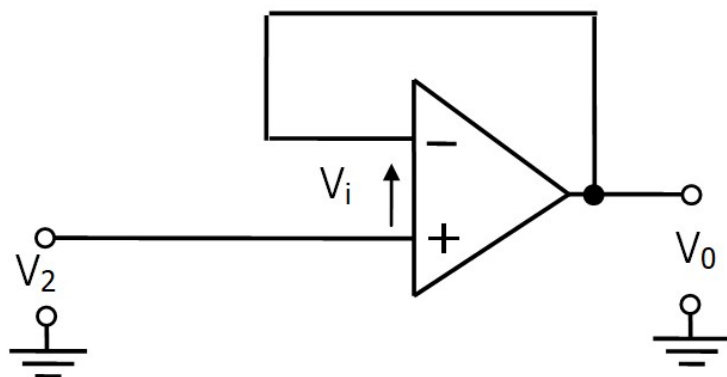
Παραλλαγή του προηγούμενου κυκλώματος είναι ο **αφαιρέτης με κέρδος**, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Η έξοδός του δίνεται από τη σχέση :

$$V_0 = n(V_2 - V_1)$$

Κυκλώματα Τελεστικών Ενισχυτών

ΑΚΟΛΟΥΘΟΣ ΤΑΣΗΣ ή Buffer



Ο ρόλος του ακόλουθου τάσης είναι να απομονώνει μια πηγή από το φορτίο της. Στο κύκλωμα που περιλαμβάνει τον ακόλουθο τάσης, η πηγή δεν παρέχει καθόλου ρεύμα με αποτέλεσμα να έχει μηδενική κατανάλωση ισχύος. Το ρεύμα και η ισχύς που καταναλώνει το όποιο φορτίο συνδέσουμε στην έξοδο του Τ.Ε., παρέχεται από τον ίδιο τον Τ.Ε., ο οποίος το παίρνει από τις γραμμές τροφοδοσίας του. Έτσι με τη χρήση του ακόλουθου τάσης απαλλάσσεται η πηγή από το να παρέχει ρεύμα και το φορτίο να λαμβάνει όλο το σήμα που παρέχεται από την πηγή.

Παραλλαγή του μη αναστρέφοντος ενισχυτή είναι ο ακόλουθος τάσης ή Buffer. Αν επιλέξουμε $R_f=0$ (βραχυκύκλωμα) και $R_1=\infty$ (ανοιχτό κύκλωμα), τότε θα έχουμε το διπλανό κύκλωμα με κέρδος τάσης 1. Δηλαδή $V_0 = V_2$ και άρα η έξοδος του ενισχυτή ακολουθεί την είσοδό του. Θεωρώντας ότι ο Τ.Ε. είναι ιδανικός, έχουμε :

- α) Αντίσταση εισόδου άπειρη, οπότε η πηγή V_s που παρέχει την τάση V_2 , δεν διαρρέεται από ρεύμα και η τάση εισόδου V_2 του Τ.Ε. είναι ίση με V_0 .
- β) Αντίσταση εξόδου μηδέν, οπότε $V_s = V_2 = V_0$. Άρα το όποιο φορτίο συνδεθεί στη έξοδο λαμβάνει το σήμα της πηγής χωρίς απώλειες.