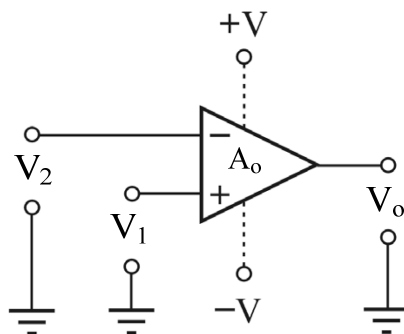


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Τελεστικός ενισχυτής

Ο τελεστικός ενισχυτής, TE (operational amplifier, op-amp) είναι ένα από τα πιο χρήσιμα αναλογικά κυκλώματα. Κατασκευάζεται ως ολοκληρωμένο κύκλωμα (integrated circuit) και αποτελείται από μερικές δεκάδες τρανζίστορ. Πρόκειται για ενισχυτή τάσης άμεσης σύζευξης με πολύ μεγάλη τιμή ενίσχυσης τάσης ($\geq 5 \cdot 10^4$), πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου ($\geq 0.5 \text{ M}\Omega$) και πολύ χαμηλή αντίσταση εξόδου ($\leq 100 \Omega$). Η ονομασία του οφείλεται στη δυνατότητα που έχει να πραγματοποιεί (τελεί) μαθηματικές πράξεις μεταξύ σημάτων τάσης, όπως θα δούμε στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Το καθιερωμένο σύμβολο του τελεστικού ενισχυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1.

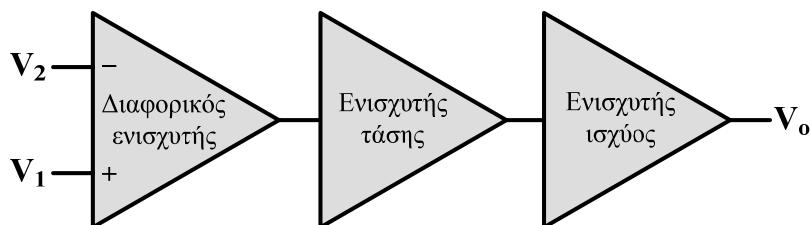


Σχήμα 7.1 – Σύμβολο του τελεστικού ενισχυτή

Ο τελεστικός ενισχυτής διαθέτει δύο εισόδους, τη μη αναστρέφουσα (+) και την αναστρέφουσα (-), μία έξοδο, καθώς και συμμετρική τροφοδοσία συνεχούς τάσης (+V, -V). Οι ονομασίες των εισόδων προκύπτουν από το γεγονός ότι εάν συνδέσουμε ένα σήμα τάσης στη μη αναστρέφουσα είσοδο (+) και γειώσουμε την αναστρέφουσα είσοδο, τότε το σήμα της εξόδου θα είναι συμφασικό με εκείνο της εισόδου, ενώ εάν συνδέσουμε ένα σήμα τάσης στην αναστρέφουσα είσοδο (-) και γειώσουμε τη μη αναστρέφουσα είσοδο, τότε το σήμα της εξόδου θα έχει διαφορά φάσης 180° σε σχέση με το σήμα εισόδου. Εάν θέσουμε δύο σήματα εισόδου V_1 και V_2 , τότε:

$$V_o = A_o \cdot (V_1 - V_2), \quad (7.1)$$

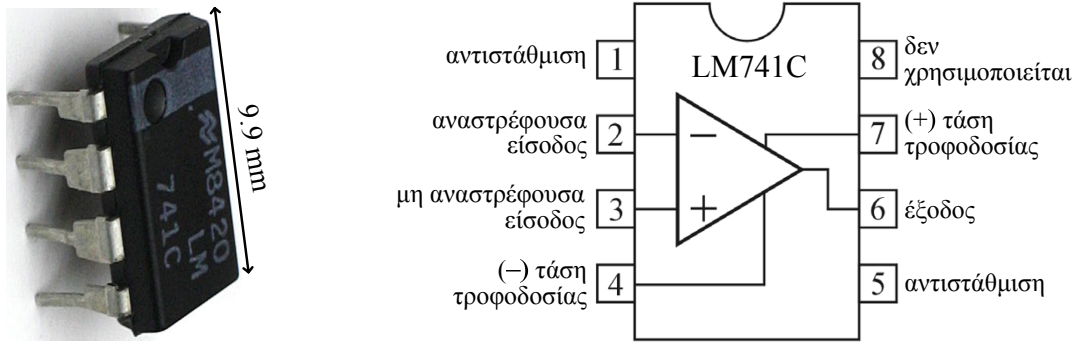
όπου A_o είναι η ενίσχυση τάσης ανοιχτού βρόχου του τελεστικού ενισχυτή, η οποία όπως προαναφέρθηκε λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές. Αυτό βέβαια δε σημαίνει ότι η τάση εξόδου του τελεστικού ενισχυτή μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλές τιμές, αφού το πλάτος της περιορίζεται από την τιμή της συμμετρικής τάσης τροφοδοσίας, την οποία δεν μπορεί να υπερβεί.



Σχήμα 7.2 – Συνοπτικό διάγραμμα τελεστικού ενισχυτή

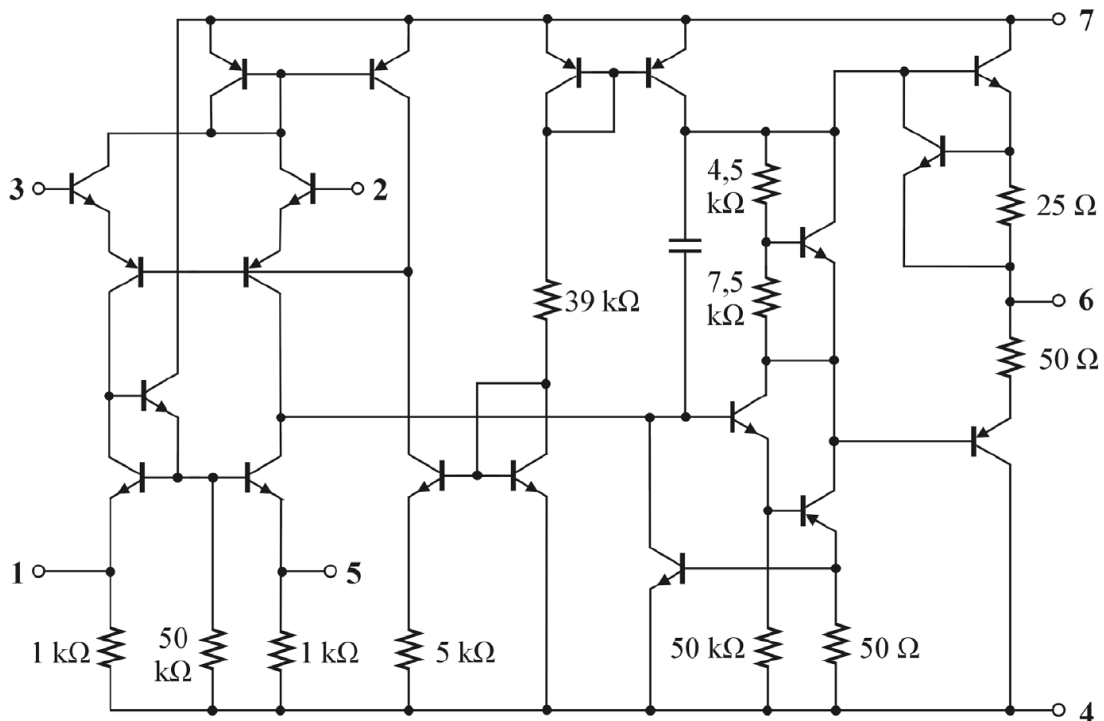
Όπως παρουσιάζεται στο συνοπτικό διάγραμμα του Σχήματος 7.2, ένας τυπικός τελεστικός ενισχυτής αποτελείται από τρεις βασικές λειτουργικές βαθμίδες. Η βαθμίδα εισόδου είναι ένας διαφορικός ενισχυτής, ο οποίος δίνει τη δυνατότητα ύπαρξης της αναστρέφουσας και της μη αναστρέφουσας εισόδου και προσφέρει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για ένα ποιοτικό τελεστικό ενισχυτή, όπως: υψηλή αντίσταση εισόδου και υψηλό λόγο απόρριψης κοινού σήματος. Η ενδιάμεση βαθμίδα ενισχυτή τάσης, προσδίδει, σε συνδυασμό με τη βαθμίδα εισόδου, την απαιτούμενη υψηλή ενίσχυση τάσης, ενώ η βαθμίδα εξόδου παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση εξόδου και προσφέρει απομόνωση του τελεστικού

ενισχυτή από την επίδραση του φορτίου, καθώς και την αναγκαία ενίσχυση ισχύος που απαιτείται για να οδηγηθεί το φορτίο.



Σχήμα 7.3 – Συσκευασία ολοκληρωμένου κυκλώματος τυπικού τελεστικού ενισχυτή (LM741C)

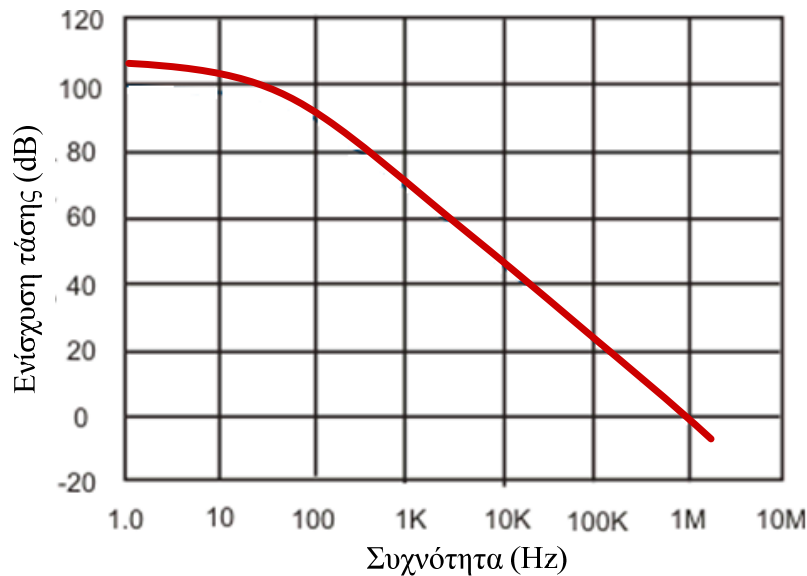
Η συσκευασία του ολοκληρωμένου κυκλώματος ενός τυπικού τελεστικού ενισχυτή (LM741C), παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.3. Οι ακροδέκτες 2 και 3 αποτελούν την αναστρέφουσα και τη μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή, αντίστοιχα. Ο ενισχυτής τροφοδοτείται με συμμετρική συνεχή τάση (τυπικής τιμής $\pm 15V$) στους ακροδέκτες 4 και 7, ενώ η έξοδος λαμβάνεται στον ακροδέκτη 6. Ο ακροδέκτης 8 δε χρησιμοποιείται. Λόγω κατασκευαστικής ασυμμετρίας στη διαφορική βαθμίδα εισόδου των τελεστικών ενισχυτών, εμφανίζεται μεταξύ των δύο εισόδων παρασιτική διαφορά δυναμικού, η οποία προστίθεται στο σήμα εισόδου, με αποτέλεσμα για μηδενικό σήμα εισόδου να εμφανίζεται σήμα μικρού πλάτους (μερικών mV) στην έξοδο. Για να μηδενιστεί το σφάλμα αυτό, είναι απαραίτητη η εισαγωγή μιας αντισταθμιστικής τάσης (offset voltage), μέσω μιας μεταβλητής αντίστασης (nulling potentiometer), η οποία συνδέεται μεταξύ των ακροδεκτών 1 και 5 του τελεστικού ενισχυτή και ρυθμίζεται έτσι ώστε για μηδενικό σήμα εισόδου να λαμβάνεται μηδενικό σήμα στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή.



Σχήμα 7.4 – Κυκλωματικό διάγραμμα τυπικού τελεστικού ενισχυτή (LM741C)

Στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζεται το κυκλωματικό διάγραμμα ενός τυπικού τελεστικού ενισχυτή (LM741C). Στο διαφορικό ενισχυτή εισόδου περιλαμβάνεται και το απαιτούμενο κύκλωμα αντιστάθμισης. Οι καθρέπτες ρεύματος (που συνίστανται από τρανζίστορ με συνδεδεμένες τις βάσεις τους), χρησιμοποιούνται ως πηγές σταθερού ρεύματος για την πόλωση των βασικών ενισχυτικών βαθμίδων του

τελεστικού ενισχυτή. Η ενδιάμεση βαθμίδα είναι ένας σύνθετος ενισχυτής δύο υποβαθμίδων (κοινού συλλέκτη – κοινού εκπομπού), ο οποίος προσδίδει στο κύκλωμα την απαιτούμενη υψηλή ενίσχυση τάσης. Τέλος, η βαθμίδα εξόδου είναι ένα ενισχυτής ισχύος τύπου push-pull. Με αυτήν την κατηγορία ενισχυτικών βαθμίδων θα ασχοληθούμε στο επόμενο κεφάλαιο.



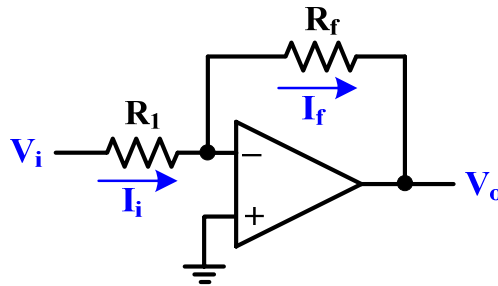
Σχήμα 7.4 – Απόκριση συχνότητας τυπικού τελεστικού ενισχυτή (LM741C)

Στους τελεστικούς ενισχυτές, η **ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου**, η οποία είναι πολύ υψηλή, μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας. Όπως γνωρίζουμε στους ενισχυτές το εύρος **ζώνης ενισχυμένων συχνοτήτων (bandwidth, BW)** ορίζεται ως η ζώνη συχνοτήτων στην οποία το κέρδος του ενισχυτή είναι μέγιστο και περιορίζεται μεταξύ δυο οριακών συχνοτήτων (συχνοτήτων αποκοπής), στις οποίες η ενίσχυση πέφτει περίπου στο 70% της μέγιστης τιμής της ή κατά 3dB. Επειδή ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένας ενισχυτής άμεσης σύζευξης, η κατώτερη συχνότητα αποκοπής είναι $f_L = 0\text{Hz}$. Επομένως, το εύρος ζώνης ενισχυμένων συχνοτήτων για ένα τελεστικό ενισχυτή καθορίζεται από την ανώτερη συχνότητα αποκοπής f_H . Το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.4, αφορά έναν τυπικό τελεστικό ενισχυτή (LM741C) με ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου ίση με 200.000 (ή 106dB) και με $f_H = 10\text{Hz}$, στην οποία η ενίσχυση τάσης πέφτει κατά 3dB. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερο εύρος ενισχυμένων συχνοτήτων, στα κυκλώματα των τελεστικών ενισχυτών, χρησιμοποιούμε αρνητική ανατροφοδότηση, όπως θα δούμε στα κυκλώματα εφαρμογών με τα οποία θα ασχοληθούμε στη συνέχεια. Στα κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών με αρνητική ανατροφοδότηση, το εύρος ενισχυμένων συχνοτήτων αυξάνεται κατά τον ίδιο παράγοντα που μειώνεται η ενίσχυση τάσης. Ένα από τα χαρακτηριστικά ποιότητας των τελεστικών ενισχυτών είναι η **συχνότητα μοναδιαίας ενίσχυσης** (δηλαδή, η συχνότητα στην οποία η ενίσχυση τάσης γίνεται 1 ή 0dB), η οποία αναφέρεται και ως **εύρος ζώνης μοναδιαίας ενίσχυσης** και για τον τυπικό τελεστικό ενισχυτή LM741C, ανέρχεται σε 1MHz, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 7.4.

Για την ανάλυση κυκλωμάτων με τελεστικό ενισχυτή και την κατανόηση της λειτουργίας τους, χρησιμοποιούμε τον **ιδανικό τελεστικό ενισχυτή**. Σε αυτόν θεωρείται ότι η ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου είναι άπειρη, καθώς επίσης και ανεξάρτητη της συχνότητας, με αποτέλεσμα το εύρος ζώνης ενισχυμένων συχνοτήτων και το εύρος ζώνης μοναδιαίας ενίσχυσης να θεωρείται ότι έχουν επίσης άπειρη τιμή. Η άπειρη τιμή της ενίσχυσης τάσης ανοικτού βρόχου, έχει ως αποτέλεσμα (όπως θα δούμε σε διάφορα κυκλώματα εφαρμογής του τελεστικού ενισχυτή), η ενίσχυση τάσης κυκλωμάτων με τελεστικό ενισχυτή και αρνητική ανατροφοδότηση να εξαρτάται αποκλειστικά από το κύκλωμα ανατροφοδότησης. Από την σχέση (7.1) προκύπτει εύκολα ότι: $V_1 - V_2 = V_o / A_o$ και επειδή στον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή ισχύει ότι $A_o = \infty$, προκύπτει ότι η **διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες εισόδου ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή είναι μηδενική, δηλαδή η τάση της μη αναστρέφουσας εισόδου (+) ισούται με την τάση της αναστρέφουσας εισόδου (-)**. Η ιδιότητα αυτή που αναφέρεται και ως

ιδιότητα αντιγραφής των τάσεων εισόδου, διευκολύνει την ανάλυση κυκλωμάτων με τελεστικό ενισχυτή. Η αντίσταση εισόδου του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή θεωρείται άπειρη. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα στους ακροδέκτες εισόδου του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή είναι μηδενικό και συνεπώς ο τελεστικός ενισχυτής δε «φορτώνει» τα κυκλώματα στα οποία συνδέεται. Η αντίσταση εξόδου του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή θεωρείται μηδενική. Αυτό σημαίνει ότι η τάση εξόδου του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή δεν επηρεάζεται από το φορτίο προς το οποίο συνδέεται.

Μια βασική εφαρμογή του τελεστικού ενισχυτή αποτελεί ο πολλαπλασιασμός ενός σήματος τάσης με σταθερό αρνητικό αριθμό. Το κύκλωμα που εκτελεί την πράξη αυτή αναφέρεται ως **ανάστροφος ενισχυτής** (ή **ενισχυτής αρνητικής ενίσχυσης**) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.5.

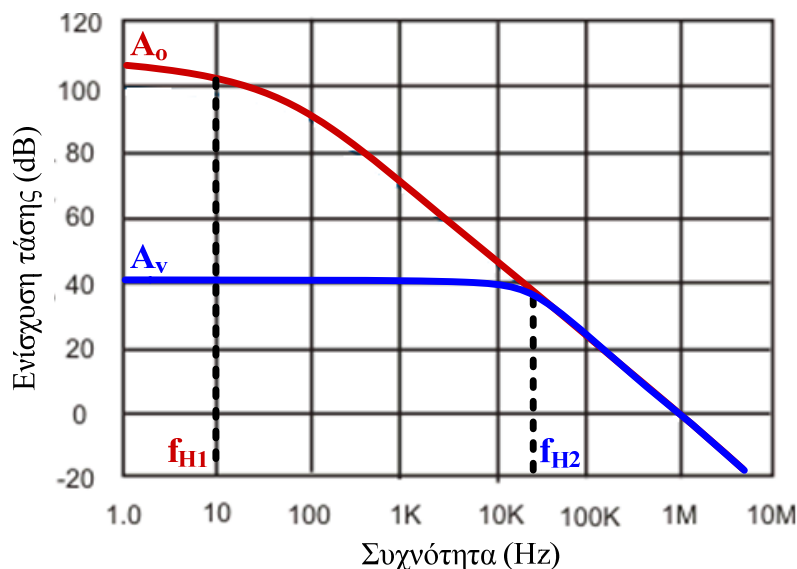


Σχήμα 7.5 – Βασικό κύκλωμα ανάστροφου ενισχυτή

Θεωρώντας ότι το κύκλωμα περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ιδιότητα αντιγραφής των τάσεων εισόδου που προαναφέρθηκε, καθώς και το ότι το ρεύμα στους ακροδέκτες εισόδου είναι μηδενικό. Οι δύο αυτές θεωρήσεις έχουν ως αποτέλεσμα η τάση στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή να είναι μηδενική ($V_- = V_+ = 0$) και το ρεύμα I_i να ισούται με το ρεύμα I_f . Έτσι έχουμε:

$$I_i = I_f \Rightarrow \frac{V_i - V_-}{R_1} = \frac{V_- - V_o}{R_f} \Rightarrow \frac{V_i - 0}{R_1} = -\frac{V_o}{R_f} \Rightarrow V_o = -\frac{R_f}{R_1} \cdot V_i \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1} \Rightarrow A_v = -\frac{R_f}{R_1} \quad (7.2)$$

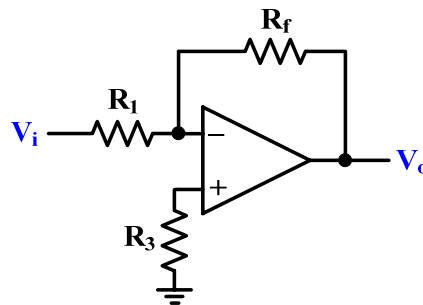
Προκύπτει λοιπόν ότι το σήμα εισόδου πολλαπλασιάζεται με τον αρνητικό αριθμό $-R_f / R_1$ και το αποτέλεσμα της πράξης αυτής λαμβάνεται στην έξοδο του κυκλώματος. Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι τα σήματα εισόδου και εξόδου έχουν διαφορά φάσης 180° . Η ενίσχυση τάσης του ανάστροφου ενισχυτή ισούται με τον λόγο της αντίστασης ανατροφοδότησης προς την αντίσταση εισόδου. Είναι προφανές ότι η ενίσχυση τάσης είναι ανεξάρτητη από την ενίσχυση ανοιχτού βρόχου του ενισχυτή και καθορίζεται από το κύκλωμα ανατροφοδότησης, δηλαδή από την αντίσταση R_f .



Σχήμα 7.6 – Απόκριση συχνότητας τελεστικού ενισχυτή ανοιχτού βρόχου και ανάστροφου ενισχυτή

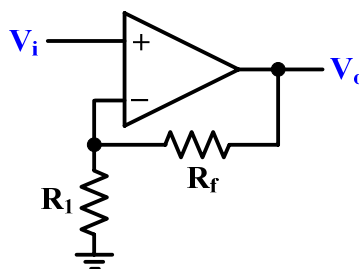
Σε κυκλώματα ανάστροφου ενισχυτή με πραγματικό τελεστικό ενισχυτή, η ενίσχυση τάσης στις υψηλές συχνότητες δεν είναι σταθερή, αλλά μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας του σήματος εισόδου. Στο Σχήμα 7.6, παρουσιάζονται η απόκριση συχνότητας ενός τελεστικού ενισχυτή ανοιχτού βρόχου, καθώς και η απόκριση συχνότητας ενός ανάστροφου ενισχυτή. Οι τυπικές τιμές για την A_o είναι της τάξης των 100.000, ενώ η A_v λαμβάνει τυπικές τιμές μεταξύ 10 και 1000, οι οποίες καθορίζονται από το κύκλωμα ανατροφοδότησης. Η ανώτερη συχνότητα αποκοπής του τελεστικού ενισχυτή ανοιχτού βρόχου (f_{H1}) είναι μερικά Hz, ενώ η ανώτερη συχνότητα αποκοπής του ανάστροφου ενισχυτή (f_{H2}) είναι τουλάχιστον μερικές δεκάδες kHz. Η μεγάλη πτώση της ενίσχυσης τάσης λόγω της εφαρμογής της ανατροφοδότησης δεν αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα, λόγω του ότι ενισχύσεις της τάξης των 100.000 δεν είναι χρήσιμες στα πρακτικά κυκλώματα. Ωστόσο, η εφαρμογή αρνητικής ανατροφοδότησης προσδίδει στα πρακτικά κυκλώματα όλα τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 5.

Μολονότι στον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή θεωρούμε ότι οι ακροδέκτες εισόδου δεν διαρρέονται από ρεύμα, στην πράξη υφίσταται ένα πολύ μικρό ρεύμα (της τάξης των 10 έως 100 nA), ώστε να πολώνονται ορθά τα τρανζίστορ της μονάδας εισόδου του τελεστικού ενισχυτή. Το ρεύμα αυτό μπορεί να αλλοιώσει την τάση εξόδου του ενισχυτή και για να το περιορίσουμε δραστικά ή να το εξαλείψουμε θα πρέπει να μεριμνούμε ώστε οι δύο ακροδέκτες εισόδου του τελεστικού ενισχυτή να «βλέπουν προς τη γείωση» την ίδια αντίσταση εισόδου. Έτσι, στο κύκλωμα του ανάστροφου ενισχυτή θα πρέπει, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.7, να προσθέσουμε μια αντίσταση R_3 με τιμή $R_3 = R_1 \cdot R_f / (R_1 + R_f)$.



Σχήμα 7.7 – Κύκλωμα ανάστροφου ενισχυτή με περιορισμό επίδρασης του ρεύματος πόλωσης εισόδου

Εάν επιθυμούμε το σήμα εισόδου να πολλαπλασιάζεται με θετικό αριθμό και το αποτέλεσμα της πράξης αυτής να λαμβάνεται στην έξοδο του κυκλώματος, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το κύκλωμα του **μη ανάστροφου ενισχυτή** (ή ενισχυτή θετικής ενίσχυσης) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.8.



Σχήμα 7.8 – Κύκλωμα μη ανάστροφου ενισχυτή

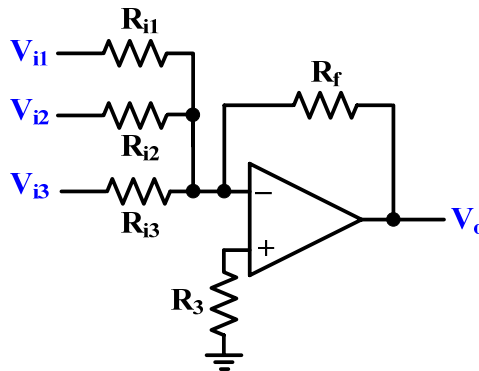
Θεωρώντας ότι το κύκλωμα περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ιδιότητα αντιγραφής των τάσεων εισόδου που προαναφέρθηκε ($V_- = V_+ = V_i$), καθώς και τον διαιρέτη της τάσης εξόδου που δημιουργείται από τις δύο αντιστάσεις του κυκλώματος. Έτσι έχουμε:

$$V_- = \frac{R_1}{R_1 + R_f} \cdot V_o \Rightarrow V_i = \frac{R_1}{R_1 + R_f} \cdot V_o \Rightarrow V_o = \frac{R_1 + R_f}{R_1} \cdot V_i \Rightarrow$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \cdot V_i \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \Rightarrow A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1}.$$

Ένα από τα χρησιμότερα κυκλώματα με τελεστικό ενισχυτή είναι ο **αθροιστής τάσεων** (Σχήμα 7.9). Πρόκειται στην ουσία για κύκλωμα ανάστροφου ενισχυτή, στην είσοδο του οποίου συνδέονται περισσότερα του ενός σήματα τάσης. Καθεμία από τις αντιστάσεις εισόδου συνδέεται στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή, χωρίς να επηρεάζει τη λειτουργία των υπόλοιπων διαδρομών εισόδου. Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, η έξοδος ενός κυκλώματος ισούται με το άθροισμα των εξόδων, όταν καθεμία από τις εισόδους εφαρμοστεί ανεξάρτητα. Κάνοντας χρήση της αρχής αυτής και με βάση τη σχέση (7.2), μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε την τάση εξόδου του κυκλώματος αθροιστή τάσεων ως εξής:

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_{i1}} \cdot V_{i1} + \frac{R_f}{R_{i2}} \cdot V_{i2} + \frac{R_f}{R_{i3}} \cdot V_{i3}\right) \Rightarrow V_o = -(A_{v1} \cdot V_{i1} + A_{v2} \cdot V_{i2} + A_{v3} \cdot V_{i3}).$$

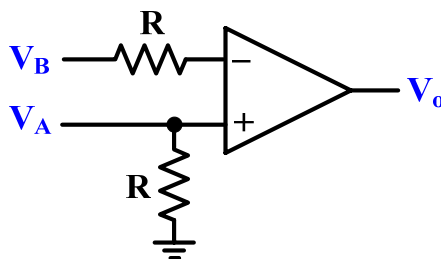


Σχήμα 7.9 – Κύκλωμα αθροιστή τάσεων

Με στόχο τον περιορισμό της επίδρασης του ρεύματος πόλωσης εισόδου, η τιμή της αντίστασης R_3 , στο κύκλωμα του αθροιστή τάσεων, θα πρέπει να είναι:

$$R_3 = \frac{R_{o\lambda} \cdot R_f}{R_{o\lambda} + R_f}, \quad R_{o\lambda} = \frac{1}{\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{R_{i3}}}.$$

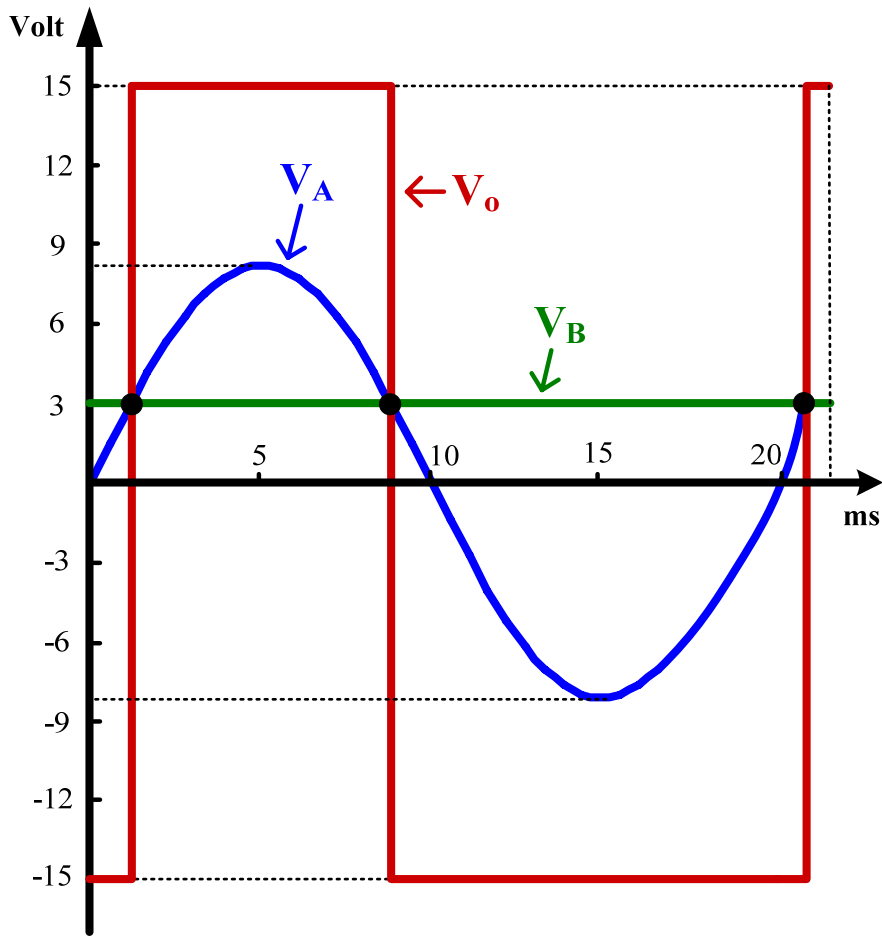
Ένα κύκλωμα που χρησιμοποιεί τελεστικό ενισχυτή με ανοιχτό βρόχο είναι το κύκλωμα του **συγκριτή τάσεων**, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.10. Όταν ένας τελεστικός ενισχυτής λειτουργεί με ανοιχτό βρόχο (δηλαδή, χωρίς ανατροφοδότηση), τότε λόγω της πολύ υψηλής ενίσχυσης που εμφανίζει και σύμφωνα με τη σχέση (7.1), η έξοδος του ενισχυτή θα οδηγηθεί σε κατάσταση θετικού ή αρνητικού κόρου (δηλαδή σε θετική ή αρνητική τιμή λίγο μικρότερη από την τάση τροφοδοσίας), ανάλογα με τον αν η διαφορά δυναμικού ($V_A - V_B$) στους ακροδέκτες εισόδου είναι θετική ή αρνητική. Εάν οι τάσεις εισόδου είναι ίσες, τότε η έξοδος του ενισχυτή μηδενίζεται.



Σχήμα 7.10 – Κύκλωμα συγκριτή τάσεων

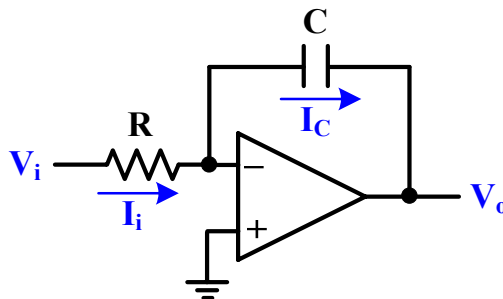
Επομένως, οι δύο καταστάσεις εξόδου του τελεστικού ενισχυτή δίνουν πληροφορία για τη σύγκριση των δυναμικών στους δύο ακροδέκτες εισόδου του, με αποτέλεσμα ο τελεστικός ενισχυτής να λειτουργεί ως συγκριτής τάσεων. Συνήθως επιδιώκουμε σύγκριση μεταξύ μίας τάσης μεταβλητού μεγέθους και μίας τάσης σταθερού μεγέθους (τάση αναφοράς). Για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου η τάση V_A είναι ημιτονικό σήμα με πλάτος 8 V και περίοδο 20 ms και η τάση V_B είναι σταθερή με τιμή 3 V, τότε σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, η τάση εξόδου του συγκριτή θα είναι ο τετραγωνικός παλμός με

πλάτος πολύ κοντά στην τάση τροφοδοσίας του τελεστικού ενισχυτή ($\pm 15 \text{ V}$), που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.11.



Σχήμα 7.11 – Τάσεις εισόδου και εξόδου του κυκλώματος συγκριτή

Ο τελεστικός ενισχυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση και άλλων εφαρμογών που αφορούν μαθηματικές πράξεις σημάτων, όπως η αφαίρεση σημάτων, η ολοκλήρωση σήματος, η διαφοράση σήματος κ.ά., αλλά και για την υλοποίηση εφαρμογών όπως ανόρθωση ασθενών σημάτων, μετατροπή ρεύματος σε ανάλογη τάση και αντιστροφή. Για παράδειγμα, μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί το κύκλωμα του ολοκληρωτή τάσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.12.



Σχήμα 7.12– Κύκλωμα ολοκληρωτή τάσης

Θεωρώντας ότι ο τελεστικός ενισχυτής που περιλαμβάνεται στο κύκλωμα είναι ιδανικός και ακολουθώντας ανάλυση παρόμοια με εκείνη που ακολουθήσαμε στην περίπτωση του ανάστροφου ενισχυτή, προκύπτει εύκολα η τάση εξόδου του ολοκληρωτή, η οποία ισούται με το ολοκλήρωμα της τάσης εισόδου ως προς το χρόνο, πολλαπλασιασμένο με έναν σταθερό αρνητικό αριθμό:

$$I_i = I_C \Rightarrow \frac{V_i - V_-}{R} = C \cdot \frac{d(V_- - V_o)}{dt} \Rightarrow \frac{V_i}{R} = -C \cdot \frac{dV_o}{dt} \Rightarrow dV_o = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot V_i \cdot dt \Rightarrow V_o = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int V_i \cdot dt .$$

Εάν εναλλάξουμε τις θέσεις της αντίστασης και του πυκνωτή, προκύπτει κύκλωμα διαφοριστή τάσης, στην έξοδο του οποίου λαμβάνουμε την παράγωγο του σήματος εισόδου, πολλαπλασιασμένη με έναν σταθερό αρνητικό αριθμό που εξαρτάται από την αντίσταση και τον πυκνωτή του κυκλώματος.

Στο πλαίσιο της έβδομης εργαστηριακής άσκησης θα χρησιμοποιήσουμε τον τυπικό τελεστικό ενισχυτή LM741C για να υλοποιήσουμε και να μελετήσουμε τα κυκλώματα του ανάστροφου ενισχυτή τάσης, του αθροιστή τάσεων, του συγκριτή τάσεων και του ολοκληρωτή τάσης.

Στον Πίνακα 7.1 που ακολουθεί, καταγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά του τελεστικού ενισχυτή LM741C, μαζί με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή που χρησιμοποιήθηκε για την θεωρητική ανάλυση των κυκλωμάτων.

Βασικά χαρακτηριστικά	Ιδανικός τελεστικός ενισχυτής	Τελεστικός ενισχυτής LM741C
Αντίσταση εξόδου	0	75 Ω
Αντίσταση εισόδου	∞	2 MΩ
Ρεύμα πόλωσης εισόδου	0	80 nA
Ενίσχυση ανοιχτού βρόχου	∞	200.000 ή 106 dB
Λόγος απόρριψης κοινού σήματος	∞	31.500 ή 90 dB
Εύρος ζώνης ενισχυμ. συχνοτήτων	∞	10 Hz
Εύρος ζώνης μοναδιαίας ενίσχυσης	∞	1 MHz

Πίνακας 7.1 – Βασικά χαρακτηριστικά τελεστικών ενισχυτών