

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

4

4.1 Εισαγωγή

Ο **Τελεστικός ενισχυτής** (TE) είναι ένα από τα πιο χρήσιμα ηλεκτρονικά ενεργά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα στις χαμηλές και μέσες συχνότητες. Οι τελεστικοί ενισχυτές οφείλουν το όνομά τους στο γεγονός ότι συνδυαζόμενοι με έναν ελάχιστο αριθμό εξωτερικών στοιχείων (αντιστάσεις, πυκνωτές, κτλ.) μπορούν να τελούν δηλ. να πραγματοποιούν μια ποικιλία γραμμικών και μη γραμμικών λειτουργιών. Βρίσκουν εφαρμογές σε διατάξεις σημάτων όπως ενισχυτές, φίλτρα, περιοριστές, συνθέτες [synthesizers], κτλ., σε κυκλώματα τηλεπικοινωνιών (ταλαντωτές, διαμορφωτές, αποδιαμορφωτές, βρόχοι κλειδώσης φάσης, κτλ.), μετατροπείς αναλογικών και ψηφιακών σημάτων (τόσο A/D όσο και D/A) και κυκλώματα που εκτελούν διάφορες μαθηματικές πράξεις (ολοκληρωτές, πολλαπλασιαστές, προσθετές, αφαιρέτες, κτλ.).

Τυπικά, ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένας ενισχυτής *dc* μεγάλης ενίσχυσης που συνήθως αποτελείται από έναν ή περισσότερους διαφορικούς ενισχυτές που ακολουθούνται από μια βαθμίδα μετατροπής στάθμης και τέλος από τη βαθμίδα εξόδου. Το Σχ.4.1 δείχνει το δομικό διάγραμμα ενός τελεστικού ενισχυτή. Η πρώτη βαθμίδα είναι διαφορικός ενισχυτής με διπλή είσοδο και παρέχει την περισσότερη ενίσχυση του TE. Στους περισσότερους ενισχυτές η ενδιάμεση βαθμίδα είναι κι' αυτή με διπλή είσοδο, αλλά ασύμμετρη στην έξοδο (δηλ. με μια έξοδο). Επειδή είναι ενισχυτής *dc*, η *dc* τάση ηρεμίας στην έξοδο της βαθμίδας αυτής είναι πολύ πάνω από το δυναμικό της γης και γι' αυτό ο μετατροπέας στάθμης χρησιμοποιείται για να επαναφέρει αυτή την τάση στο μηδέν ως προς τη γη.

Μη αναισρέφουσα
είσοδος



Αναστρέφουσα
είσοδος

Διαφ. Ενισχυτής
διπλής εισόδου
συμμετρικής εξόδου

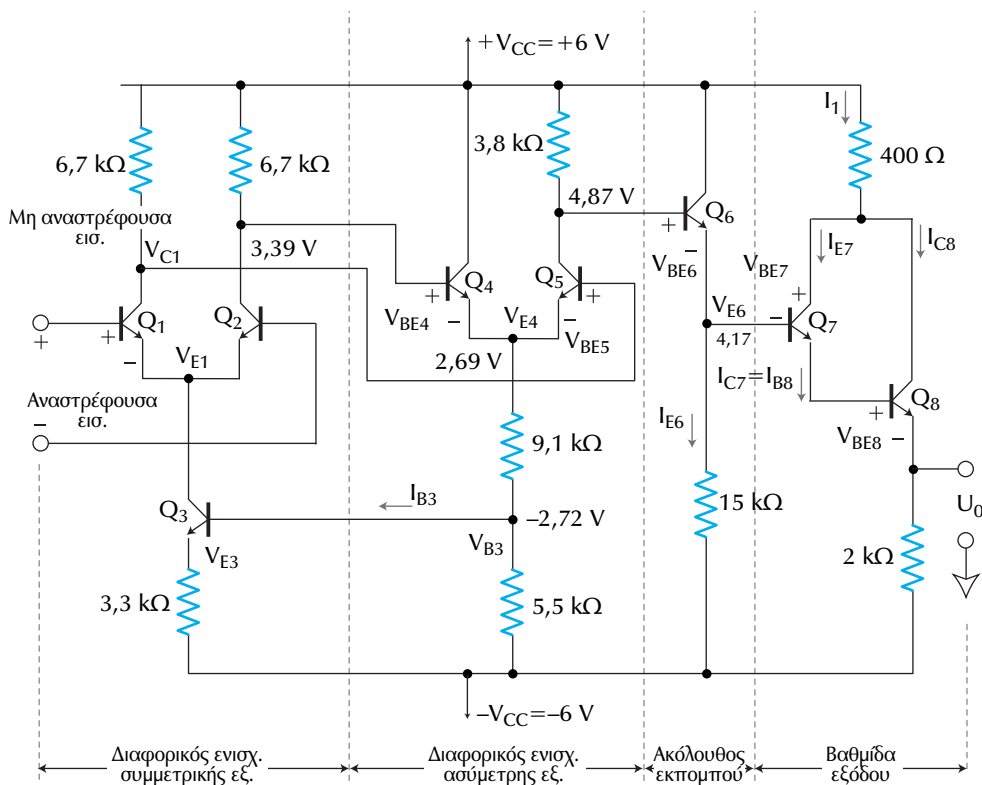
Διαφ. Ενισχυτής
διπλής εισόδου
με ασύμμετρη έξοδο

Ακόλουθος εκπομπού
με γεννήτρια σταθερού
ρεύματος

Ενισχυτής push-pull
συμπληρωματικής
συμμετρίας

Σχήμα 4.1. Δομικό διάγραμμα ενός τυπικού TE

Όλες οι παραπάνω βαθμίδες είναι κατασκευασμένες σε μικροποιημένη δομή, με αρκετά τρανζίστορ, ο δε ΤΕ έχει τη μορφή μικροκυκλώματος (τσιπ) με διάφορες ακροληψίες ή ακροδέκτες που καταλήγουν σε αντίστοιχα “ποδαράκια”.

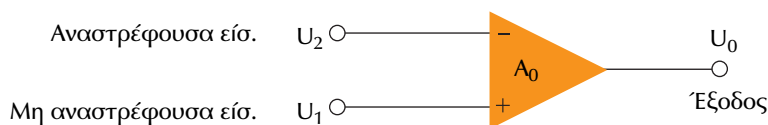


Σχήμα 4.2. Εικόνα εμφάνισης και ισοδύναμο κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή MC1435

4.2 Συμβολισμοί - Ιδανικός τελεστικός ενισχυτής

Το Σχ.4.3 εικονίζει το σύμβολο ενός ΤΕ, που έχει δύο εισόδους και μία έξοδο. Στο σχήμα δε δείχνονται οι ακροδέκτες της τάσης τροφοδοσίας ούτε οι υπόλοιποι ακροδέκτες. Επειδή η πρώτη βαθμίδα του ΤΕ είναι διαφορικός ενισχυτής, οι διαφορικές εισόδους συμβολίζονται η μία με το (+) και η άλλη με το (-). Η (+) είσοδος είναι η μη αναστρέφουσα είσοδος. Αν στην είσοδο αυτή εφαρμόζεται ένα ac σήμα (ή μία dc τάση), στην έξοδο

εμφανίζεται ένα ενισχυμένο σήμα που έχει την ίδια φάση (την ίδια πολικότητα) με την τάση εισόδου. Αν όμως το ίδιο αυτό σήμα εφαρμόζεται στην είσοδο (-), άρα στην έξοδο εμφανίζεται σήμα ξόδου ενισχυμένο και με διαφορά φάσης 180° (αντίθετη πολικότητα) ως προς την είσοδο.



Σχήμα 4.3. Σχηματικό σύμβολο του TE

Όπου:

u_1 = η τάση στη μη αναστρέφουσα είσοδο

u_2 = η τάση στην αναστρέφουσα είσοδο

u_0 = η τάση εξόδου

(Όλες αυτές οι τάσεις μετρώνται ως προς γη).

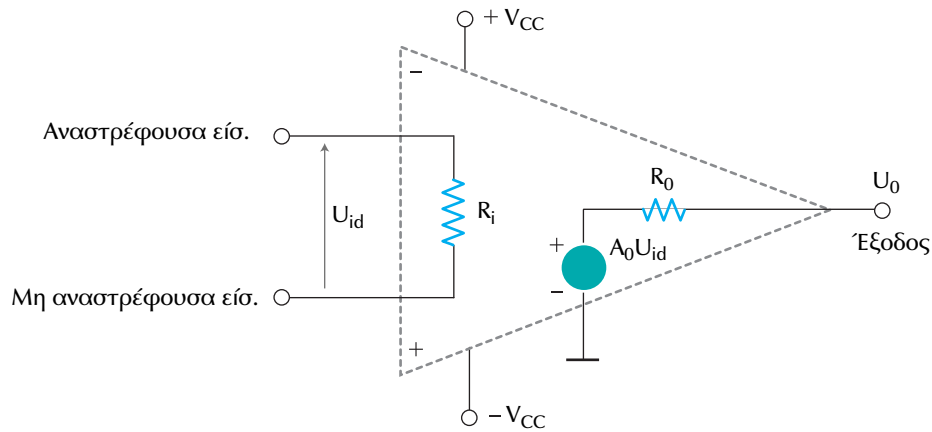
A_0 = η διαφορική ενίσχυση μεγάλων σημάτων του TE,
η οποία καθορίζεται από τον κατασκευαστή.

Ο ιδανικός TE είναι ένα (εξιδανικευμένο) θεωρητικό μοντέλο TE με τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Άπειρη διαφορική ενίσχυση A_0 .
2. Άπειρη αντίσταση εισόδου R_i , ώστε οποιοδήποτε σήμα να ενισχύεται κανονικά, χωρίς να υπάρχει πρόβλημα προσαρμογής με την προηγούμενη βαθμίδα.
3. Μηδενική αντίσταση εξόδου R_o , ώστε η έξοδος να μπορεί να οδηγήσει χωρίς πρόβλημα προσαρμογής οποιαδήποτε επόμενη βαθμίδα.
4. Μηδενική τάση εξόδου για μηδενική τάση εισόδου.
5. Άπειρο εύρος διέλευσης συχνοτήτων, ώστε να ενισχύεται οποιοδήποτε σήμα συχνότητας από 0 έως ∞ Hz χωρίς υποβιβασμό.
6. Άπειρο λόγο κοινού τρόπου, ώστε ο θόρυβος της τάσης εξόδου κοινού τρόπου να είναι μηδέν.
7. Άπειρο ρυθμό κλίσης (slew rate), ώστε η αλλαγή της τάσης εξόδου να γίνεται ταυτόχρονα με την αλλαγή της τάσης εισόδου.

Υπάρχουν πάντως πρακτικοί ΤΕ που μπορούν να προσεγγίσουν αρκετά όλα τα χαρακτηριστικά του ιδανικού ΤΕ χρησιμοποιώντας αρνητική ανασύζευξη. Ιδιαίτερα η αντίσταση εισόδου, εξόδου και το εύρος διέλευσης συχνοτήτων μπορούν να προσεγγίσουν πολύ τις ιδανικές αυτές τιμές.

Το Σχ.4.4 δείχνει το απλό **ισοδύναμο κύκλωμα** ενός πραγματικού ΤΕ. Το κύκλωμα περιλαμβάνει σημαντικά στοιχεία από τα δεδομένα του κατασκευαστή: A_0 , R_i και R_o . Η $A_0 u_{id}$ είναι η ισοδύναμη τάση της πηγής Thevenin και R_o είναι η αντίστοιχη ισοδύναμη αντίσταση που βλέπουμε στην έξοδο του ΤΕ.



Σχήμα 4.4. Ισοδύναμο κύκλωμα ΤΕ

4.2.1 Πραγματικός Τελεστικός Ενισχυτής

Στην πράξη, οι πραγματικοί τελεστικοί ενισχυτές πλησιάζουν προσεγγιστικά τα χαρακτηριστικά που ισχύουν για τον ιδανικό ΤΕ. Δηλαδή έχουν μεγάλη (αντί ∞) διαφορική ενίσχυση A_0 μεγάλη (αλλά όχι ∞), αντίσταση εισόδου R_i μεγάλη (αλλά όχι ∞) αντίσταση εξόδου, R_o μικρή (αλλά όχι 0) εύρος διέλευσης συχνοτήτων BW μικρό (αλλά όχι ∞).

Άρα η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$u_o = A_0 u_{id} = A_0 (u_2 - u_1) \quad (4.2.1)$$

όπου A_0 = η ενίσχυση τάσης ή διαφορική απολαβή ανοικτού βρόχου

u_{id} = η διαφορική τάση εισόδου

u_1 = η τάση της μη αναστρέφουσας εισόδου ως προς τη γη

u_2 = η τάση της αναστρέφουσας εισόδου ως προς τη γη

Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι η τάση εξόδου u_0 είναι ανάλογη της (αλγεβρικής) διαφοράς των δύο τάσεων εισόδου. Δηλαδή ο ΤΕ ενισχύει τη διαφορά μεταξύ των δύο τάσεων εισόδου και όχι τις ίδιες τις τάσεις αυτές. Για το λόγο αυτό η πολικότητα της τάσης εξόδου εξαρτάται από την πολικότητα της διαφοράς των τάσεων εισόδου.

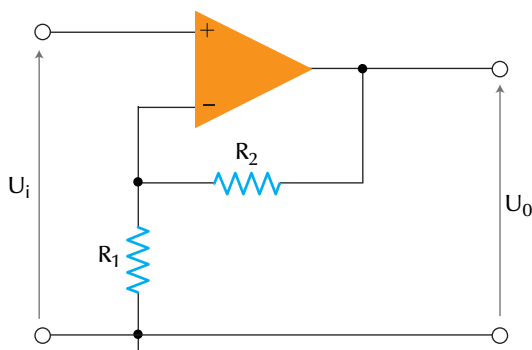
4.3 Μη αναστρέφων ενισχυτής

Η ενίσχυση ανοικτού βρόχου A_0 του πραγματικού ΤΕ είναι πολύ μεγάλη. Για αυτό το λόγο τα πολύ μικρά σήματα (της τάξης του μV ή και μικρότερα) με χαμηλή συχνότητα μπορούν να ενισχύονται άνετα χωρίς παραμόρφωση. Τα σήματα όμως αυτά είναι πολύ επιδεκτικά στο θόρυβο.

Εκτός αυτού, η ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου του ΤΕ δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και την τάση τροφοδοσίας λόγω της μεγάλης παραγωγής των ΤΕ από τους κατασκευαστές.

Επιπλέον, το εύρος διέλευσης συχνοτήτων (δηλ. η ζώνη των συχνοτήτων για την οποία η ενίσχυση διατηρείται σταθερή) για τους περισσότερους ΤΕ είναι σχεδόν αμελητέα (πολύ μικρή). Για το λόγο αυτό πρακτικά οι ΤΕ με ανοικτό βρόχο δε χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές ac. Π.χ. το εύρος διέλευσης του 741C είναι περίπου 5 Hz, πράγμα που σημαίνει ότι αυτός ο ΤΕ δεν είναι χρήσιμος για καμιά ουσιαστικά πρακτική εφαρμογή.

Για τους πιο πάνω λόγους εφαρμόζεται συνήθως στον ΤΕ αρνητική ανασύζευξη, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές εφαρμογές ac. Το Σχ.4.5 δείχνει τον ΤΕ με συνδεσμολογία μη αναστρέφουσα και ανασύζευξη.



Σχήμα 4.5. Μη αναστρέφων ενισχυτής με ΤΕ

Τότε αποδεικνύονται, ότι ισχύουν οι σχέσεις:

$$A_f = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (4.3.2)$$

$$R_{if} = R_i (1 + \beta A_o) \quad (4.3.3)$$

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + \beta A_o} \quad (4.3.4)$$

όπου A_f = η ενίσχυση τάσης κλειστού βρόχου

R_{if} = η ολική αντίσταση εισόδου του ενισχυτή με ανασύζευξη

R_{of} = η ολική αντίσταση εξόδου του ενισχυτή με ανασύζευξη

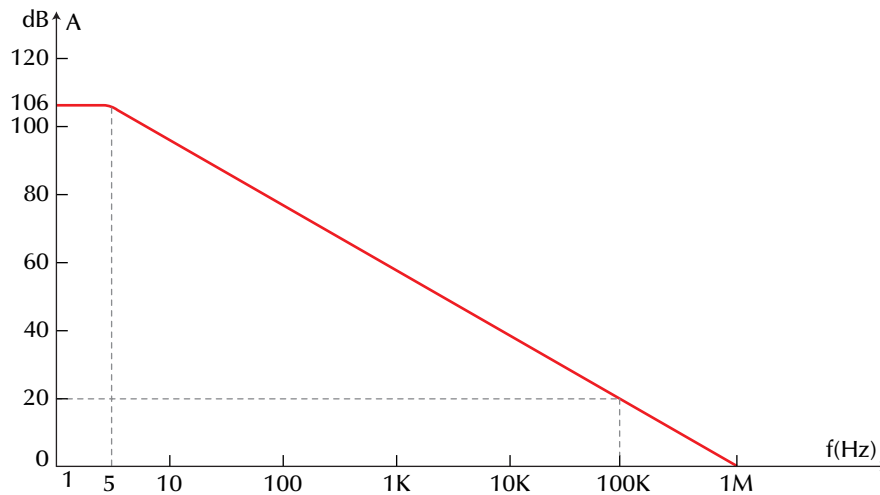
και β = το ποσοστό ή συντελεστής ανασύζευξης, που είναι ίσο με

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (4.3.5)$$

4.3.1 Εύρος Διέλευσης Συχνοτήτων με Ανασύζευξη

Το **εύρος διέλευσης** συχνοτήτων (BW) ενός ενισχυτή, ορίζεται ως η ζώνη (περιοχή) συχνοτήτων για την οποία η ενίσχυση παραμένει σταθερή. Οι κατασκευαστές γενικά είτε καθορίζουν το γινόμενο ενίσχυση \times εύρος διέλευσης είτε δίνουν την καμπύλη απόκρισης της ενίσχυσης ανοικτού βρόχου A_o ως προς τη συχνότητα f . Το Σχ.4.6 δείχνει την εξάρτηση της ενίσχυσης ανοικτού βρόχου ως προς τη συχνότητα για τον TE 741C. Από την καμπύλη αυτή φαίνεται ότι η ενίσχυση (A_o) είναι 200 000 (106 dB) και το εύρος διέλευσης περίπου 5 Hz, άρα το γινόμενο ενίσχυση \times εύρος διέλευσης είναι 1 MHz (200 000 \times 5 Hz). Στο άλλο άκρο της καμπύλης η ενίσχυση είναι 1 και η συχνότητα 1 MHz, άρα το εύρος διέλευσης είναι πάλι 1 MHz. Επομένως, το γινόμενο ενίσχυση \times εύρος διέλευσης είναι σταθερό. Για τον TE 741, η **συχνότητα αποκοπής** f_i , στην οποία η ενίσχυση A_o είναι 3 dB κάτω από την τιμή της στα 0 Hz είναι ίση με 5 Hz. Αποδεικνύεται ότι η συχνότητα αποκοπής δίνεται από τη σχέση:

$$f_{if} = (1 + \beta A_o) f_i \quad (4.3.6)$$



Σχήμα 4.6. Καμπύλη απόκρισης κατά συχνότητα για τον TE 741

Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι το εύρος διέλευσης μη-αναστρέφοντα ενισχυτή με TE και ανασύζευξη αυξάνει πολλαπλασιαζόμενο επί το συντελεστή $(1 + \beta A_0)$.

⇒ Παράδειγμα 4-1

Το κύκλωμα μη-αναστρέφοντα ενισχυτή του Σχ.4.5 έχει $R_1 = 4.7 \text{ K}\Omega$ και $R_2 = 12 \text{ K}\Omega$ Να βρεθεί η ολική απολαβή τάσης του ενισχυτή, η αντίσταση εισόδου, η αντίσταση εξόδου και το εύρος διέλευσής του. Δίνεται για τον 741, $R_i = 2 \text{ M}\Omega$ και $R_o = 75 \Omega$

Λύση

Έχουμε:

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{12}{4.7} = 1 + 2.6 = 3.6$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{4.7}{4.7 + 12} = \frac{4.7}{16.7} = 0.28$$

$$1 + \beta A_0 = 1 + 0.28 \times 2 \times 10^5 \approx 5600$$

Άρα,

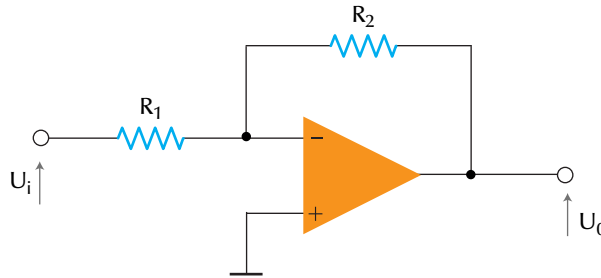
$$R_{if} = R_i (1 + \beta A_0) = 2 \text{ M}\Omega \times 56000 = 112000 \text{ M}\Omega = 112 \text{ G}\Omega$$

$$R_{of} = \frac{R_0}{1 + \beta A_0} = \frac{75 \Omega}{56000} = 1.34 \times 10^{-3} \Omega = 1.34 \text{ m}\Omega$$

$$f_{if} = (1 + \beta A_0) f_1 = 56000 \times 5 \text{ Hz} = 280 \text{ kHz}$$

4.4 Ενισχυτής με αναστροφή

Το Σχ.4.7 δείχνει το κύκλωμα του (κλειστού βρόχου) ΤΕ συνδεσμο-
γημένος ως αναστρέφων ενισχυτής. Το κύκλωμα αυτό δημιουργεί διαφο-
ρά φάσης 180° μεταξύ του σήματος της εισόδου και της εξόδου, άρα
αντιστρέφει την πολικότητα της τάσης εισόδου. Αποδεικνύεται, ότι
ισχύουν οι εξής σχέσεις:



Σχήμα 4.7. ΤΕ συνδεσμολογίας ως αναστρέφων ενισχυτής

$$A_f = \frac{u_0}{u_i} = - \frac{R_2}{R_1} \quad (4.4.7)$$

$$R_{if} = R_1 + \frac{R_2}{1 + A_0} // R_i \cong R_1 \quad (4.4.8)$$

$$R_{of} = \frac{R_0}{1 + \beta A_0} \quad (4.4.9)$$

$$f_{if} = (1 + \beta A_0) f_1 \quad (4.4.10)$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (4.4.11)$$

⇒ Παράδειγμα 4-2

Ο ενισχυτής του Σχ.4.7 αποτελείται από τον ΤΕ 741, με $R_1=1\text{ K}\Omega$ και $R_2=10\text{ K}\Omega$. Να υπολογισθεί η ενίσχυση, η αντίσταση εισόδου, η αντίσταση εξόδου και το εύρος διέλευσης συχνοτήτων του.

Λύση

Είναι:

$$A_f = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{10}{1} = -10$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{11} = 0.09$$

Άρα,

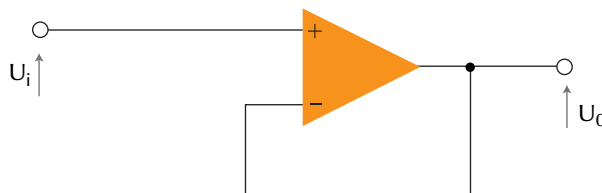
$$R_{if} \cong 1\text{ K}\Omega$$

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + \beta A_o} = \frac{75}{1 + 0.09 \times 2 \times 10^5} \cong \frac{75}{18000} = 4.2 \times 10^{-3} \Omega = 4.2\text{ m}\Omega$$

$$f_{if} = (1 + \beta A_o) f_i = 18000 \times 5\text{ Hz} = 90\text{ kHz}$$

4.5 Ακόλουθος τάσης

Όπως φαίνεται από την Εξ.(4.3.2) η μικρότερη ενίσχυση που μπορεί να επιτευχθεί με το μη-αναστρέφοντα ενισχυτή και είναι ίση με 1. Αυτή η περίπτωση, που συμβαίνει, όταν $R_2=0$, ο ενισχυτής όμως αυτός έχει την ικανότητα να κάνει καλή προσαρμογή αντιστάσεων. Όταν ο ενισχυτής συνδεσμοποιείται με ενίσχυση μονάδα, όπως στο Σχ.4.8, ονομάζεται **ακόλουθος τάσης**, επειδή η τάση εξόδου είναι τότε ίση και συμφασική με την τάση εισόδου, δηλαδή η τάση εξόδου “ακολουθεί” συνεχώς και επακριβώς την τάση εισόδου του.



Σχήμα 4.8. Ο ΤΕ συνδεσμοποιούμενος ως ακόλουθος τάσης

Αποδεικνύεται, ότι ισχύουν οι πιο κάτω σχέσεις:

$$A_i = \frac{A_0}{1 + A_0} \cong 1 \quad (4.5.12)$$

$$R_{if} = (1 + A_0) R_i \cong A_0 R_i \quad (4.5.13)$$

$$R_{of} = \frac{R_0}{1 + A_0} \cong \frac{R_0}{A_0} \quad (4.5.14)$$

$$f_{if} = (1 + A_0) f_i \cong A_0 f_i \quad (4.5.15)$$

Παρατηρήστε, από τις Εξ.(4.5.13) και (4.5.15), ότι (αφού πάντα $R_i \gg R_0$) η αντίσταση εισόδου του ακόλουθου τάσης θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση εξόδου του. Άρα, ο ακόλουθος τάσης απομονώνει μια μεγάλη αντίσταση από μια μικρή. Γι' αυτό ο ακόλουθος τάσης ονομάζεται και **απομονωτής** (*buffer*). Έτσι, όταν παρεμβάλλεται μεταξύ δύο κυκλωμάτων, εξουδετερώνει τη μεγάλη αντίσταση εξόδου του πρώτου κυκλώματος και επιτρέπει τη φόρτωσή του με πολύ μικρή αντίσταση φόρτου.

⇒ Παράδειγμα 4-3

Για τον TE 741 συνδεσμολογημένο ως ακόλουθο τάσης, βρείτε τα χαρακτηριστικά του μεγέθη.

Λύση

$$A_i = 1$$

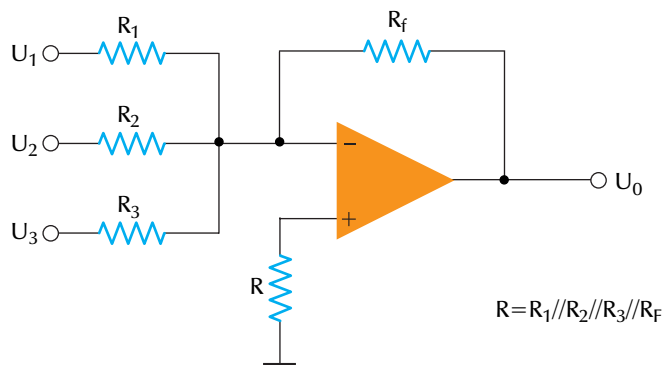
$$R_{if} = A_0 R_i = 2 \times 10^5 \times 2 \text{ M}\Omega = 400 \text{ G}\Omega$$

$$R_{of} = \frac{R_0}{A_0} = \frac{75}{2 \times 10^5} = 0.38 \text{ m}\Omega$$

$$f_{if} = A_0 f_i = 2 \times 10^5 \times 5 \text{ Hz} = 1 \text{ MHz}$$

4.6 Αθροιστής

Η ανεξαρτησία που υπάρχει μεταξύ των δύο εισόδων, (+) και (-), ενός ΤΕ επιτρέπει τη χρησιμοποίησή του σε κύκλωμα που εκτελεί άθροιση τάσεων και γι' αυτό ονομάζεται **αθροιστής**. Το Σχ.4.9 δείχνει τον ΤΕ συνδεσμολογημένο ως αθροιστή με τρεις εισόδους, u_1 , u_2 και u_3 . Αποδεικνύεται, ότι η τάση εξόδου του δίνεται από τη σχέση:



Σχήμα 4.9. Αθροιστής με αναστροφή

$$u_0 = - \left(\frac{R_f}{R_1} u_1 + \frac{R_f}{R_2} u_2 + \frac{R_f}{R_3} u_3 \right) \quad (4.6.16)$$

Αν $R_1 = R_2 = R_3 = R$, ο τύπος αυτός γίνεται:

$$u_0 = - \frac{R_f}{R} (u_1 + u_2 + u_3) \quad (4.6.17)$$

Άρα, η τάση εξόδου του είναι το *αρνητικό άθροισμα* (το - δείχνει απλώς διαφορά φάσης 180°) των σημάτων εισόδου επί την ενίσχυση R_f / R , και γι' αυτό ο ενισχυτής ονομάζεται **αθροιστής ενισχυτής**. Αν δε $R_f = R$ προκύπτει:

$$u_0 = - (u_1 + u_2 + u_3) \quad (4.6.18)$$

Άρα, το κύκλωμα είναι τότε απλός αθροιστής.

⇒ Παράδειγμα 4-4

Το κύκλωμα του Σχ.4.9 έχει $u_1 = 0.25 \text{ V}$, $u_2 = 0.5 \text{ V}$, $u_3 = 0.75 \text{ V}$, $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ K}\Omega$ και $R_f = 6.8 \text{ K}\Omega$. Να βρεθεί η τάση εξόδου του.

Λύση

Από την Εξ.(4.6.17), θα έχουμε:

$$u_0 = -\frac{6.8}{3.3} (0.25 + 0.5 + 0.75) \cong -3.1 \text{ V}$$

4.7 Ενισχυτής διαφοράς

Αν, αντί της άθροισης δύο τάσεων, χρειάζεται να κάνουμε αφαίρεσή τους, χρησιμοποιείται ο ΤΕ σε κύκλωμα αφαιρέτη. Το Σχ.4.10 δείχνει το κύκλωμα του **αφαιρέτη**. Αποδεικνύεται, ότι στην έξοδο του κυκλώματος αυτού έχουμε:

$$u_0 = -\frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1) = -K (u_2 - u_1) \quad (4.7.19)$$

όπου,

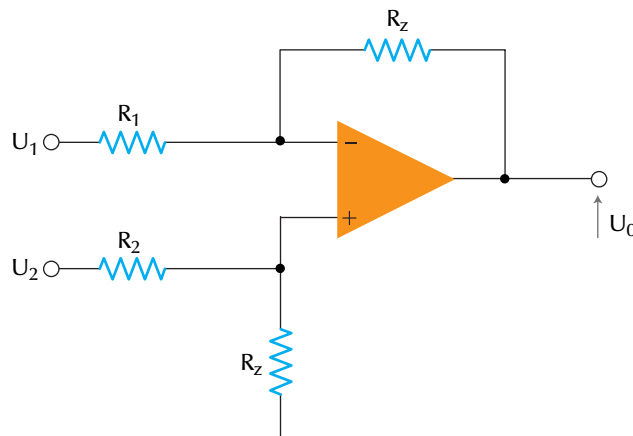
$$K = \frac{R_2}{R_1} \quad (4.7.20)$$

είναι η ενίσχυση κλειστού βρόχου. Δηλαδή το κύκλωμα αυτό στην έξοδο δημιουργεί ενισχυμένη τη διαφορά των δύο τάσεων εισόδου, άρα λειτουργεί ως **αφαιρέτης ενισχυτής**.

Φυσικά, αν $R_2 = R_1$, το $K=1$ και η Εξ.(4.7.19) δίνει:

$$u_0 = - (u_2 - u_1) \quad (4.7.21)$$

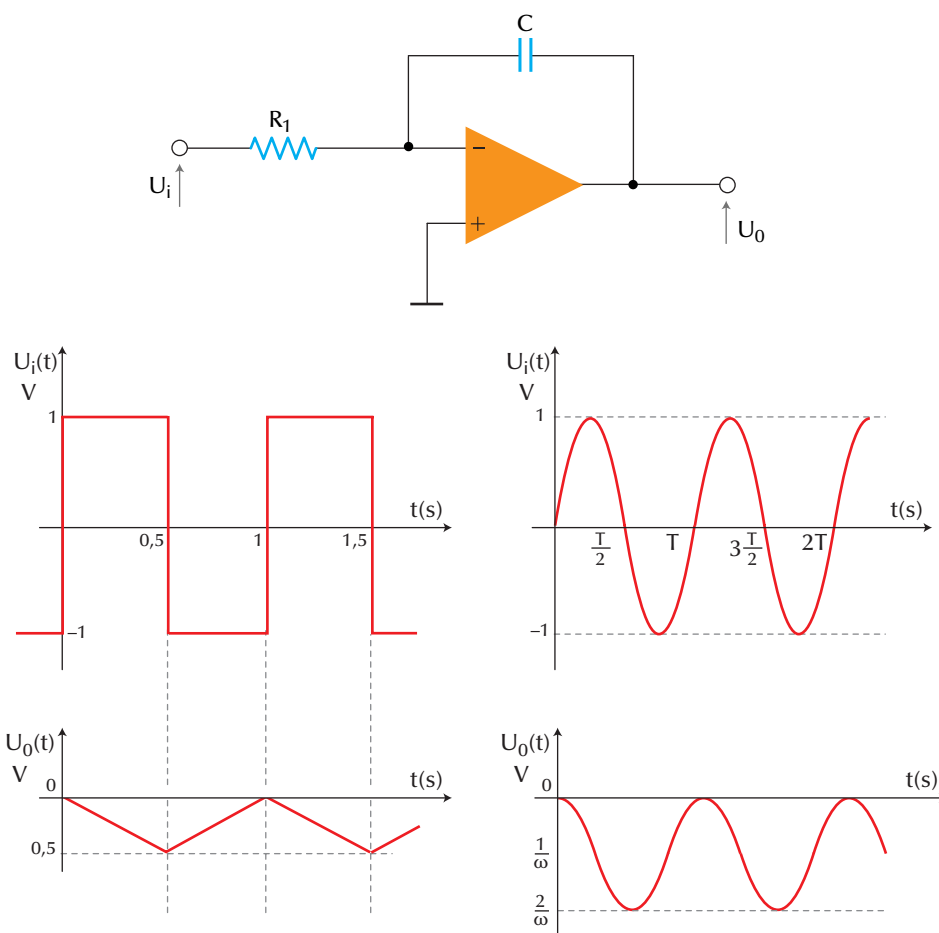
δηλαδή το κύκλωμα είναι απλός αφαιρέτης.



Σχήμα 4.10. Κύκλωμα αφαιρέτη

4.8 Ολοκληρωτής

Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως π.χ. στους αναλογικούς υπολογιστές, χρειάζεται να γίνεται (μαθηματική) ολοκλήρωση μιας κυματομορφής. Το κύκλωμα στο οποίο η κυματομορφή της τάσης εισόδου είναι το ολοκλήρωμα της κυματομορφής της τάσης εξόδου του ονομάζεται **ολοκληρωτής** ή **ολοκληρωτής ενισχυτής**. Το κύκλωμα αυτό δημιουργείται από το βασικό κύκλωμα ενίσχυσης του Σχ.4.7 αν αντικαταστήσουμε την αντίσταση ανασύζευξης R_2 με τον πυκνωτή C . Σχ.4.11.



Ολοκλήρωση τετραγωνικών παλμών

Ολοκλήρωση ημιτονικού σήματος

Σχήμα 4.11. Κύκλωμα ολοκληρωτή

Αποδεικνύεται, ότι η τάση εξόδου του ολοκληρωτή που εξετάζουμε, δίνεται από τη σχέση:

$$u_0 = -\frac{1}{\tau} \int_0^t u_i dt + c \quad (4.8.22)$$

όπου

$$\tau = R_2 C \quad (4.8.23)$$

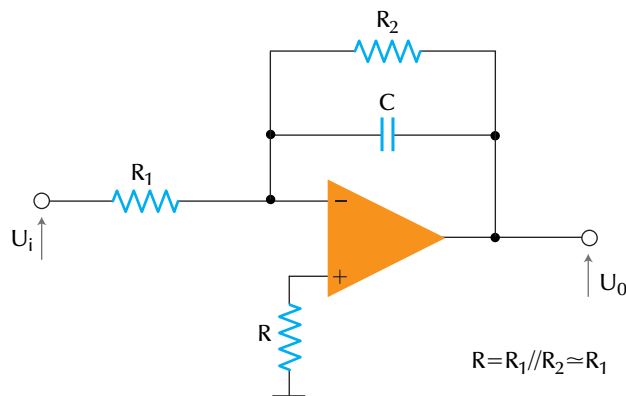
είναι η σταθερά χρόνου του ολοκληρωτή και c είναι η σταθερά ολοκλήρωσης.

Για να κάνει το κύκλωμα σωστή ολοκλήρωση της κυματομορφής εισόδου πρέπει η διάρκεια του παλμού εισόδου t_p να είναι πολύ μικρότερη από τη σταθερά χρόνου τ του ολοκληρωτή. Στην πράξη το τ πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$t_p = -\frac{\tau}{10} \quad (4.8.24)$$

Η Εξ. (4.8.22) δείχνει ότι η τάση εξόδου είναι ανάλογη του χρονικού ολοκληρώματος της τάσης εισόδου και αντιστρόφως ανάλογη της σταθερά χρόνου τ . Το μείον οφείλεται στη διαφορά φάσης 180° που δημιουργεί η αναστρέφουσα συνδεσμολογία του ΤΕ.

Σε πολύ χαμηλές συχνότητες $\omega = 2\pi f \approx 0$ ο ολοκληρωτής αυτός λειτουργεί σαν ενισχυτής ανοικτού βρόχου. Αυτό συμβαίνει, επειδή τότε ο πυκνωτής C δρα σαν ανοικτό κύκλωμα ($X_c = 1 / \omega C = \infty$). Για το λόγο αυτό, στον πρακτικό ολοκληρωτή, για να εξουδετερώσουμε το μειονέκτημα αυτό, συνδέουμε μια αντίσταση R_2 παράλληλα στη χωρητικότητα ανασύζευξης C , Σχ.4.12. Έτσι η αντίσταση αυτή περιορίζει την ενίσχυση χαμηλής συχνότητας στην τιμή R_2 / R_1 και συνεπώς ελαχιστοποιεί τις μεταβολές της τάσης εξόδου σε λογικά επίπεδα.



Σχήμα 4.12. Πρακτικό κύκλωμα ολοκληρωτή με ΤΕ

Ο ολοκληρωτής χρησιμοποιείται στους αναλογικούς υπολογιστές, στους μετατροπείς αναλογικών σημάτων προς ψηφιακά (ADC) και στα κυκλώματα μορφοποίησης παλμών.

⇒ Παράδειγμα 4-5

Θα υπολογίσουμε ολοκληρωτή, όταν αυτός διεγείρεται από συμμετρικό τετραγωνικό παλμό πλάτους 5 V και συχνότητας 1 kHz.

Λύση

Η περίοδος του σήματος εισόδου είναι:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10^3} = 10^{-3} \text{ sec} = 1 \text{ msec}$$

Άρα, η διάρκεια του παλμού εισόδου, επειδή είναι συμμετρικός, είναι:

$$t_p = \frac{T}{2} = \frac{1}{2} \text{ msec} = 0.5 \text{ msec}$$

Κατά τις Εξ.(4.8.23) και (4.8.24), η απαιτούμενη σταθερά χρόνου θα είναι:

$$\tau = 10t_p = R_1 C$$

Αν δεχθούμε $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$, έχουμε:

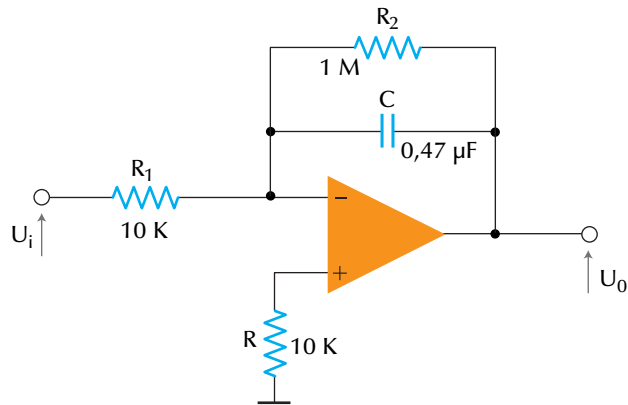
$$C = \frac{10t_p}{R_1} = \frac{10 \times 0.5 \times 10^{-3}}{10^4} \approx 0.47 \mu\text{F}$$

Εξ' άλλου, δεχόμαστε $R_2 = 100R_1 = 1 \text{ M}\Omega$, οπότε η ενίσχυση του ολοκληρωτή στις πολύ Χ.Σ. θα είναι:

$$\frac{R_2}{R_1} = 100$$

που είναι μια λογική τιμή.

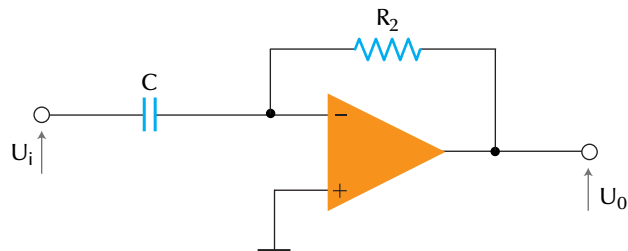
Το Σχ.4.13 δείχνει τον τελικό ολοκληρωτή που υπολογίσαμε.



Σχήμα 4.13. Πρακτικός ολοκληρωτής του παραδείγματος

4.9 Διαφοριστής

Μερικές φορές μας χρειάζεται ένα κύκλωμα το οποίο να εκτελεί παραγωγή, άρα και *διαφύριση* της κυματομορφής εισόδου του και γι' αυτό ονομάζεται **διαφοριστής**. Ένα τέτοιο κύκλωμα εικονίζεται στο Σχ.4.14. Όπως παρατηρούμε ο διαφοριστής δημιουργείται από τον αναστρέφοντα ενισχυτή, αν στη θέση της R_1 βάλουμε έναν πυκνωτή C .



Σχήμα 4.14. Κύκλωμα διαφοριστή με TE

Αποδεικνύεται, ότι σ' ένα τέτοιο κύκλωμα, η κυματομορφή της τάσης εξόδου δίνεται από τη χρονική παράγωγο της κυματομορφής εισόδου, δηλ.

$$u_0 = -\tau \frac{du_i}{dt} \quad (4.9.25)$$

όπου το τ είναι η σταθερά χρόνου

$$\tau = R_2 C \quad (4.9.26)$$

Για να έχουμε καλή διαφόριση πρέπει η διάρκεια του παλμού εισόδου t_p να είναι πολύ μεγαλύτερη από τη σταθερά χρόνου του κυκλώματος, δηλ. $t_p \gg \tau$. Στην πράξη πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη:

$$t_p = 10 \tau \quad (4.9.27)$$

Στη συνήθη πρακτική, ο διαφοριστής με ΤΕ δε είναι ακριβώς όπως δείχνει το Σχ.4.14, επειδή είναι ευαίσθητος στο θόρυβο, σ' αυτόν που οφείλεται σε μεταβατικά φαινόμενα από άνοιγμα και κλείσιμο διακοπών. Μολονότι το πλάτος του θορύβου μπορεί είναι πολύ μικρό, ο ρυθμός μεταβολής (du_i / dt) είναι συχνά μεγάλος κι έτσι στην έξοδο μπορεί να έχουμε πολύ μεγάλες και ανεπιθύμητες διακυμάνσεις.

Για να αποφύγουμε όλα αυτά, συνδέουμε μια μικρή αντίσταση R_1 (τυπικής τιμής μεταξύ 100 Ω έως 1 ΚΩ) σε σειρά με τον πυκνωτή C κι ένα μικρό πυκνωτή C_2 , τυπικής τιμής 100 pF στα άκρα της R_2 .

⇒ Παράδειγμα 4-6

Θα υπολογίσουμε κύκλωμα διαφόρισης με ΤΕ που διεγείρεται από συμμετρικό παλμό πλάτους 1 V και συχνότητας 1 kHz.

Λύση

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10^3} = 1 \text{ msec}, \text{ άρα } t_p = \frac{T}{2} = 0.5 \text{ msec}$$

Από τις Εξ.(4.9.26) και (4.9.27) έχουμε:

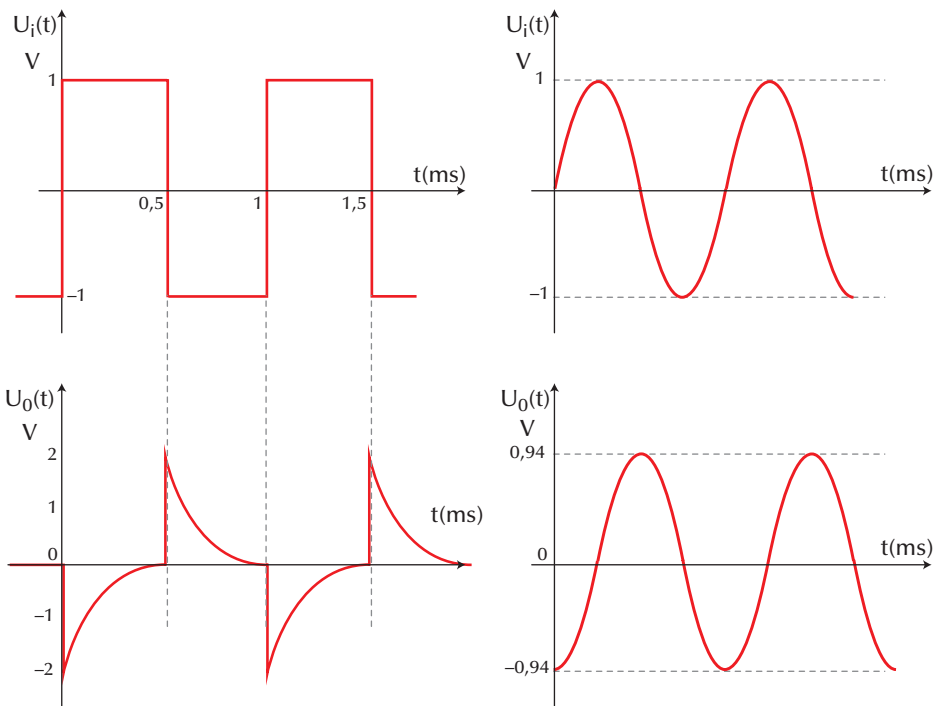
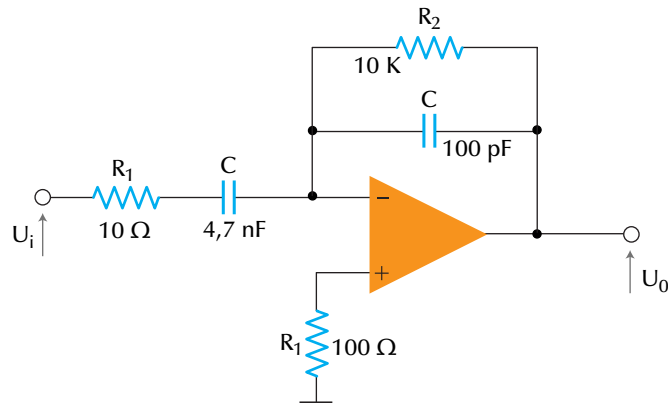
$$t_p = 10\tau = 10 R_2 C, \text{ άρα } C = \frac{t_p}{10 R_2}$$

Δεχόμαστε $R_2 = 10 \text{ K}\Omega$, επομένως

$$C = \frac{0.5 \times 10^{-3}}{10 \times 10^4} = 0.5 \times 10^{-8}, \text{ άρα } C = 4.7 \text{ nF.}$$

Τέλος, συμπληρώνουμε με $R_1 = 100 \Omega$ και $C_2 = 100 \text{ pF}$.

Το Σχ.4.15 δείχνει το διαφοριστή που υπολογίσαμε και τις κυματομορφές εξόδου του για δύο περιπτώσεις της κυματομορφής εισόδου.



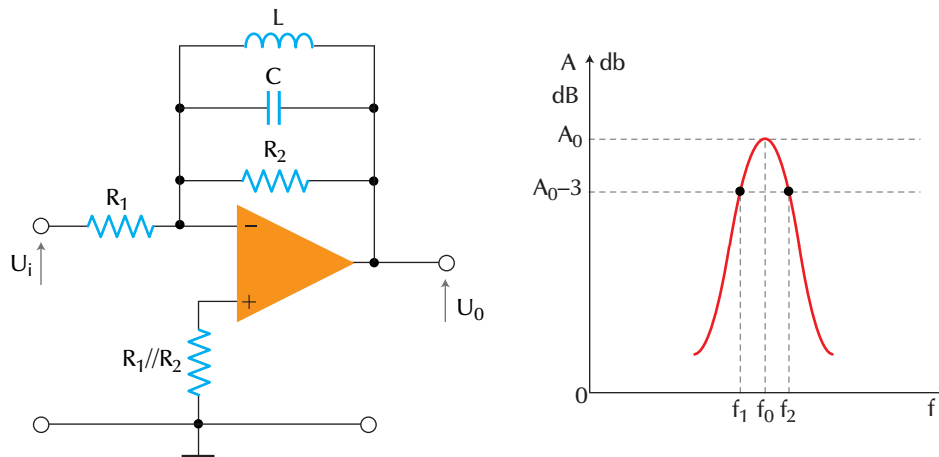
Διαφόριση
τετραγωνικών παλμών

Διαφόριση
ημιτονικού σήματος

Σχήμα 4.15. Πρακτικό κύκλωμα διαφορίσης του παραδείγματος και κυματομορφές εξόδου του

4.10 Συντονιζόμενος ενισχυτής

Ο **συντονιζόμενος ενισχυτής** είναι ένας ενισχυτής που μπορεί να συντονίζεται, άρα να έχει μέγιστη ενίσχυση, σε κάποια συχνότητα και αποτελείται από ένα παράλληλο δικτύωμα συντονισμού LC συνδυασμένο με έναν ΤΕ, όπως στο Σχ.4.16. Στο ίδιο σχήμα εικονίζεται και η καμπύλη απόκρισής του κατά συχνότητα.



Σχήμα 4.16. Συντονιζόμενος ενισχυτής

Η **συχνότητα συντονισμού** ή **συχνότητα κορυφής** που αντιστοιχεί στην κορυφή (μέγιστο) της καμπύλης απόκρισης συχνότητας, καθορίζεται από το συνδυασμό των L και C και δίνεται από τον τύπο

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.10.28)$$

Το πηνίο L στη συχνότητα συντονισμού $\omega_0 = 2\pi f_0$, χαρακτηρίζεται από ένα συντελεστή ποιότητας $Q_{\pi\eta\nu} = \omega_0 L / r$, όπου r είναι η ωμική αντίστασή του. Για να ισχύει με ακρίβεια η Εξ.(4.10.28) θα πρέπει $Q_{\pi\eta\nu} \geq 10$.

Η σύνθετη αντίσταση του παράλληλου κυκλώματος αυξάνεται όσο πλησιάζουμε στο συντονισμό και γίνεται μέγιστη στη συχνότητα συντονισμού. Επομένως, η ενίσχυση (απολαβή τάσης) του ενισχυτή στο συντονισμό θα είναι επίσης μέγιστη δίνεται και από τη σχέση:

$$A = - \frac{R_2 // R_D}{R_1} \quad (4.10.29)$$

όπου, R_D η ισοδύναμη **δυναμική αντίσταση** του παράλληλου κυκλώματος, η οποία είναι:

$$R_D = Q_{\pi\eta\nu}^2 r \quad (4.10.30)$$

Το εύρος διέλευσης συχνοτήτων του συντονιζόμενου ενισχυτή βρίσκεται από τη σχέση:

$$BW = \frac{f_0}{Q_D} \quad (4.10.31)$$

όπου Q_D είναι το λεγόμενο **δυναμικό Q** του παράλληλου κυκλώματος συντονισμού LC, που είναι

$$Q_D = \frac{R_2 // R_D // X_L}{\omega_0 L} \quad (4.10.32)$$

⇒ Παράδειγμα 4-7

Το κύκλωμα του Σχ.4.16 έχει ενίσχυση 10 και συχνότητα συντονισμού 16 kHz. Βρείτε τις τιμές των υπόλοιπων στοιχείων του αν, $C = 0.01 \mu\text{F}$, $r = 30 \Omega$, $R_1 = 1 \text{ K}\Omega$.

Λύση

Κατ' αρχή, χρησιμοποιούμε την Εξ.(4.10.28) και υπολογίζουμε το L:

$$L = \frac{1}{(2\pi \times f_0)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \times 1.6 \times 10^4)^2 \times 1 \times 10^{-8}} \approx 10 \text{ mH}$$

Ο συντελεστής $Q_{\pi\eta\nu}$ του πηνίου είναι:

$$Q_{\pi\eta\nu} = \frac{X_L}{r} = \frac{2\pi \times f_0 \times L}{r} = \frac{2\pi \times 1.6 \times 10^4 \times 10 \times 10^{-3}}{30} = 33.5$$

και

$$R_D = Q_{\pi\eta\nu}^2 r = 33.5^2 \times 30 = 33.7 \text{ K}\Omega$$

Τέλος, υπολογίζουμε την R_2 χρησιμοποιώντας την Εξ.(4.10.29), η οποία δίνει

$$R_2 // R_D = R_1 \times A_f = 1000 \times 10 = 10^4$$

$$\frac{1}{R_2} = 10^{-4} - \frac{1}{R_D} = 10^{-4} - \frac{1}{3.37 \times 10^4} = 10^{-4} - 2.98 \times 10^{-5} \approx 7 \times 10^{-5} \text{ S}$$

Συνεπώς,

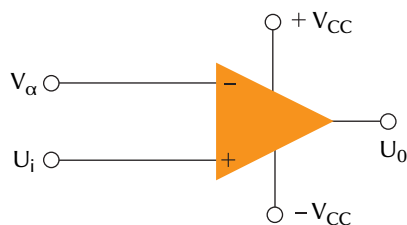
$$R_2 \approx 10 \text{ K}\Omega$$

4.11 Συγκριτής

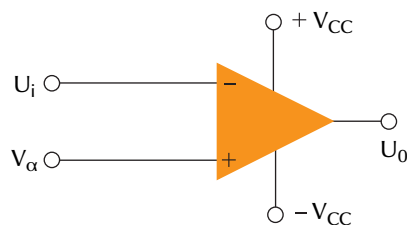
Μερικές φορές είναι απαραίτητο να συγκρίνουμε δύο τάσεις για να προσδιορίσουμε ποια είναι η μεγαλύτερη ή να καθορίσουμε ένα κατώφλι λειτουργίας. Ένα παράδειγμα είναι ο ηλεκτρονικός θερμοστάτης που μετατρέπει τη θερμοκρασία σε τάση. Όταν η τάση που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του δωματίου είναι η μικρότερη τάση της επιθυμητής θερμοκρασίας και αντιστοιχεί σε ορισμένη θέση-κατώφλιο του θερμοστάτη, το σύστημα δημιουργεί ένα σήμα διαφοράς που θέτει σε λειτουργία το καλλοριφέρ.

Η συνθετότερη περίπτωση είναι ο **συγκριτής κόρου**, που είναι ένας διαφορικός ενισχυτής με ΤΕ και εικονίζεται στο Σχ.4.17. Όταν η τάση εισόδου u_i είναι μεγαλύτερη από την τάση αναφοράς V_α ($u_i > V_\alpha$) η τάση εξόδου είναι θετική, ενώ αν $u_i < V_\alpha$, η τάση εξόδου είναι αρνητική. Επειδή ως γνωστό, ο ΤΕ έχει μεγάλη ενίσχυση η έξοδος οδηγείται αμέσως στον κόρο.

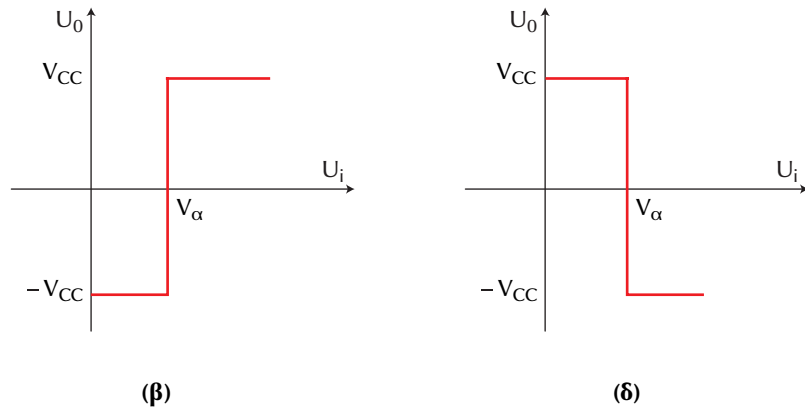
Έτσι, η τάση εξόδου παίρνει τη θετική τιμή κόρου, ίση με τη μια τάση τροφοδοσίας $+V_{CC}$, ή την αρνητική τιμή κόρου, ίση με την άλλη τάση τροφοδοσίας $-V_{CC}$, ανάλογα με το αν $u_i > V_\alpha$ ή $u_i < V_\alpha$, Σχ.4.17 β. Η αντιστοίχιση αυτή μπορεί να λειτουργεί και αντίστροφα, Σχ.4.17 γ, δ.



(α)



(γ)



Σχήμα 4.17. Συγκριτής κόρου με ΤΕ

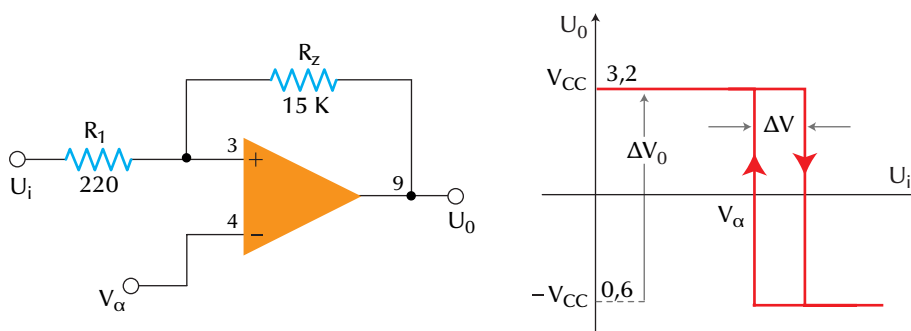
Όταν η είσοδος μεταβάλλεται περνώντας από την τάση αναφοράς V_{α} , δημιουργείται στην έξοδο μια μετάβαση από τη μια τιμή/κατάσταση στην άλλη, μόλις η τάση εισόδου u_i διέρχεται από τον άξονα της τάσης V_{α} . Δηλαδή, τη μια χρονική στιγμή η τάση εισόδου μπορεί να είναι μικρότερη από την τάση αναφοράς, ενώ την επόμενη στιγμή συμβαίνει το αντίθετο. Στην ιδανική περίπτωση, η έξοδος θα άλλαζε ακαριαία από τη θετική τιμή της τάσης κόρου, $V_+ = V_{CC}$, στην αρνητική της τιμή $V_- = -V_{CC}$. Στην πράξη όμως, απαιτείται πάντα ένας μικρός χρόνος για να αλλάξει κατάσταση ο ΤΕ. Ο χρόνος αυτός καλείται **χρόνος απόκρισης** t_r και οφείλεται στα φαινόμενα παρασηπτικής χωρητικότητας του κυκλώματος. Τυπική τιμή αυτού του χρόνου απόκρισης είναι λίγα μs . Πχ. στον ΤΕ 741 ο χρόνος αυτός είναι γύρω στα 40 μs .

Προκειμένου να επιτευχθούν ειδικές επιδόσεις, κατασκευάζονται ειδικοί συγκριτές. Τέτοιος είναι ο συγκριτής 710 που είναι ΤΕ ειδικά σχεδιασμένος για να έχει πολύ μικρό χρόνο απόκρισης, είναι μικρότερος από 40 ns και λειτουργεί με τάσεις τροφοδοσίας +12 V και -6 V. Η έξοδος του μεταπηδά μεταξύ +3.2 V και -0.6 V, ώστε να μπορεί να λειτουργεί με λογικά συστήματα TTL και DTL.

Μερικές φορές, μπορεί να υπάρχει στους συγκριτές το λεγόμενο πρόβλημα “τρέμουλου” είναι ιδιαίτερα σημαντικό αν το σήμα εισόδου έχει αρκετό θόρυβο. Στην περίπτωση αυτή αντί να έχουμε μια άμεση και απλή μετάβαση από τη μια κατάσταση στην άλλη, όταν η u_i περνάει την τάση V_{α} , μπορεί να εμφανιστεί μια γρήγορη ταλάντωση από τη μια κατά-

σταση στην άλλη. Το φαινόμενο αυτό αποφεύγεται αν δημιουργήσουμε μια **υστέρηση** ΔV στη χαρακτηριστική του συγκριτή.

Τα παραπάνω γίνονται κατανοητά με το Σχ.4.18 που δείχνει το συγκριτή 710 με υστέρηση 50 mV. Όπως παρατηρούμε στη μη αναστρέφουσα είσοδο του διαφορικού ενισχυτή, εφαρμόζεται θετική ανασύζευξη μέσω της οποίας καθορίζεται ακριβώς η επιφερόμενη υστέρηση. Όταν η έξοδος του συγκριτή αλλάζει κατάσταση, η επίδραση της θετικής ανασύζευξης προκαλεί μεταβολή της τάσης αναφοράς, τέτοια ώστε να χρειάζεται μια σχετικά μεγάλη μεταβολή του σήματος εισόδου για να αναστραφεί η κατάσταση της εξόδου. Έτσι, το πλάτος των ενδεχομένων διακυμάνσεων της τάσης εισόδου δεν επαρκεί για να εκδηλωθούν οι ταλαντώσεις «τρέμουλου».



Σχήμα 4.18. Συγκριτής υστέρησης

Η υστέρηση του συγκριτή δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Delta V_0 \quad (4.11.33)$$

όπου ΔV_0 είναι η διαφορά μεταξύ των δύο καταστάσεων της τάσης εξόδου, δηλ. $\Delta V_0 = V_+ - V_-$.

Αντικαθιστώντας τις αριθμητικές τιμές του κυκλώματος, προκύπτει:

$$\Delta V = \frac{0.220}{0.220 + 15} 3.8 \text{ V} \approx 50 \text{ mV}$$

4.12 Λόγος κοινού τρόπου

Κανονικά ο ΤΕ χρησιμοποιείται για να ενισχύει τη διαφορά μεταξύ των σημάτων των δυο εισόδων του. Επομένως, λειτουργεί με το **διαφορικό τρόπο**. Δε θα πρέπει λοιπόν να ενισχύει τα σήματα, π.χ. τάσεις θορύβου, που εμφανίζονται ταυτόχρονα και στις δύο εισόδους του και συνεπώς αυτά δεν εμφανίζονται στην έξοδό του.

Το κύκλωμα του Σχ.4.19 δείχνει τις δυο εισόδους του ΤΕ συνδεδεμένες μαζί και διεγερόμενες από το κοινό σήμα u_{cm} . Αυτός ο τρόπος σύνδεσης λέγεται “κοινός τρόπος”. Στην ιδανική περίπτωση η αντίστοιχη έξοδος θα είναι μηδέν. Στην πράξη όμως αυτό δε συμβαίνει. Ο λόγος της τάσης εξόδου κοινού τρόπου, ενός πραγματικού ΤΕ, προς την αντίστοιχη τάση εισόδου είναι η **ενίσχυση τάσης κοινού τρόπου**, $A_{cm} = u_o / u_{cm}$. Για να χαρακτηριστεί το πόσο πολύ πλησιάζει ένας πραγματικός ΤΕ τη συμπεριφορά ενός ιδανικού ΤΕ από πλευράς λειτουργίας κοινού τρόπου χρησιμοποιείται ο **λόγος κοινού τρόπου** (**Common Mode Rejection Ratio**), που ορίζεται ως ο λόγος της ενίσχυσης dc ανοικτού βρόχου, A_o , προς την ενίσχυση κοινού τρόπου, δηλ.

$$CMRR = \frac{|A_o|}{|A_{cm}|} \quad (4.12.34)$$

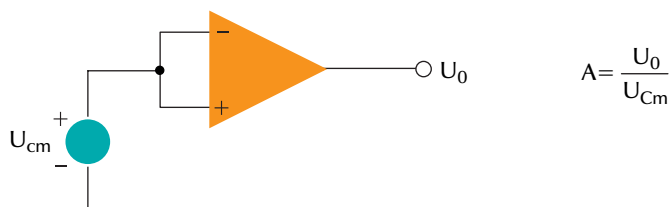
ή, σε dB,

$$CMRR = 20 \log \left(\frac{|A_o|}{|A_{cm}|} \right) \quad (4.12.35)$$

Τυπικές τιμές του CMRR είναι μεταξύ 80 έως 100 dB.

□ Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος CMRR τόσο περισσότερο ιδανικός είναι ο ΤΕ.

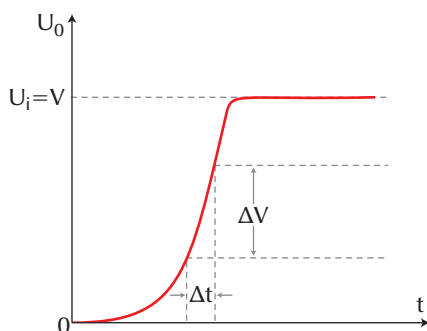
Με κατάλληλη κυκλωμάτωση είναι δυνατό να αυξηθεί πολύ ο λόγος CMRR. Τέτοια είναι η περίπτωση του διαφορικού ενισχυτή του Σχ.4.10, όπου ο λόγος κοινού τρόπου αναμένεται να είναι άπειρος. Στην πράξη όμως, επειδή οι αντιστάσεις έχουν ανοχή στις τιμές τους, ο CMRR δεν είναι άπειρος, αλλά απλώς μεγάλος.



Σχήμα 4.19. ΤΕ συνδεσμολογημένος σαν κοινού τρόπου

4.13 Ρυθμός κλίσης

Επειδή ο πρακτικός ΤΕ έχει απόκριση συχνότητας που εξαρτάται από τη συχνότητα, η έξοδός του δεν είναι βηματική τάση, όταν η είσοδός του, είναι βηματική, Σχ.4.20. Αυτό οφείλεται στη μικρή εσωτερική χωρητικότητα του ΤΕ.



Σχήμα 4.20. Ρυθμός κλίσης ΤΕ

Ο **ρυθμός κλίσης** (**Slew Rate, SR**) ορίζεται από το πιο πάνω σχήμα και είναι:

$$SR = \frac{\Delta u_0}{\Delta u_i} \quad (4.13.36)$$

Αποδεκνύεται, ότι η μέγιστη συχνότητα με την οποία δουλεύει ικανοποιητικά ο ΤΕ δίνεται από τη σχέση:

$$f_{\max} = \frac{SR}{2\pi \times K \times u_i} \quad (4.13.37)$$

όπου,

SR = είναι ο ρυθμός κλίσης

K = είναι η ενίσχυση του ενισχυτή

u_i = η τάση εισόδου από κορυφή σε κορυφή (p-p).

⇒ Παράδειγμα 4-8

Ο 741 έχει $SR = 0.5 \text{ V} / \mu\text{s}$ και διεγείρεται από τάση εισόδου 1 V και έχει ενίσχυση 5. Να βρεθεί η μέγιστη συχνότητα που μπορεί να δουλέψει σωστά ο ΤΕ.

Λύση

$$f_{\max} = \frac{0.5 \text{ V} / 10^{-6}}{2\pi \times 5 \times 1 \text{ V}} = \frac{0.5}{10\pi \times 10^{-6}} \approx 16 \text{ kHz}$$

4.14 Αντισταθμίσεις στον ΤΕ

Οι τελεστικοί ενισχυτές δεν είναι ιδανικοί και για το λόγο αυτό, όταν τους χρησιμοποιούμε σε εφαρμογές dc πρέπει να λάβουμε ορισμένα επιπρόσθετα μέτρα, όπως θα δούμε αμέσως πιο κάτω.

4.14.1 Τάση Αντιστάθμισης Εισόδου

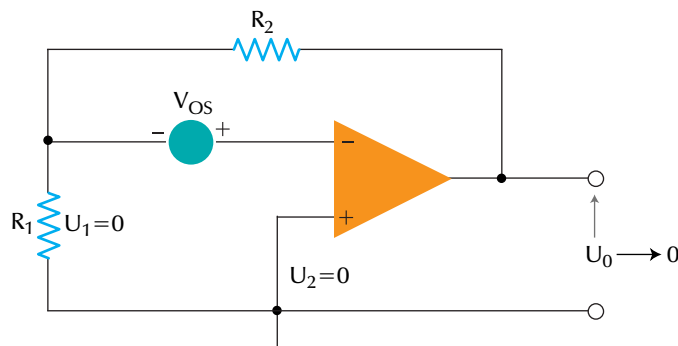
Η τάση εξόδου ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή θα πρέπει να είναι μηδέν, όταν και στις δυο εισόδους του, στην (-) και στην (+), το σήμα είναι μηδέν, δηλαδή για μηδέν τάση εισόδου να έχουμε μηδέν τάση εξόδου. Στην πράξη όμως, δεν είναι ακριβώς έτσι· η απόκλιση από τη μηδενική τιμή ονομάζεται **τάση αντιστάθμισης** εξόδου. Βασικά αυτό οφείλεται στην έλλειψη συμμετρίας των βαθμίδων εισόδου του ΤΕ. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να λάβουμε πρόνοια, ώστε να αποκατασταθεί η μηδενική τάση εξόδου για μηδενικές τάσεις εισόδου.

Στα δεδομένα του κατασκευαστή των ΤΕ αναφέρεται σαν **τάση αντιστάθμισης εισόδου** V_{offset} ή V_{os} και είναι η τάση που πρέπει να εφαρμοσθεί σε μια από τις εισόδους του ή σε κάποια άλλα καθορισμένα σημεία του ΤΕ, ώστε να αποκατασταθεί η μηδενική τάση εξόδου για μηδενικό σήμα εισόδου. Το Σχ.4.21 δείχνει την τάση αντιστάθμισης που παριστάνεται

με μια τάση στην είσοδο (-), με βραχυκυκλωμένες τις τάσεις εισόδου. Η τάση εξόδου που οφείλεται στην τάση αντιστάθμισης (offset), Σχ.4.21, είναι:

$$V_0 \cong -V_{os} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (4.14.38)$$

Η σχέση αυτή εφαρμόζεται είτε ο ενισχυτής είναι συνδεδεμένος ως αναστροφέας είτε όχι και δίνει την τάση εξόδου αντιστάθμισης από την τάση εισόδου αντιστάθμισης που δίνει ο κατασκευαστής.



Σχήμα 4.21. Τάση αντιστάθμισης εισόδου TE

Η τάση αντιστάθμισης εισόδου είναι μερικά mV. Επειδή ο ενισχυτής κάνει ενίσχυση (ενίσχυση του κλειστού βρόχου) εμφανίζεται η τάση αυτή στην έξοδο του TE ενισχυμένη. Η τάση αυτή μεταβάλλεται σε πλάτος και σε πρόσημο (- ή +) από τον ένα ενισχυτή σε άλλο, του ίδιου τύπου TE. Επίσης, το πλάτος της τάσης αντιστάθμισης εισόδου υπόκειται σε ολίσθηση, η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, του χρόνου καθώς και της τάσης τροφοδοσίας.

Η μέγιστη τάση αντιστάθμισης εισόδου για τους φθηνούς TE μΑ709, μΑ740 και μΑ741 είναι 7.5 mV, 100 mV και 6 mV, αντίστοιχα.

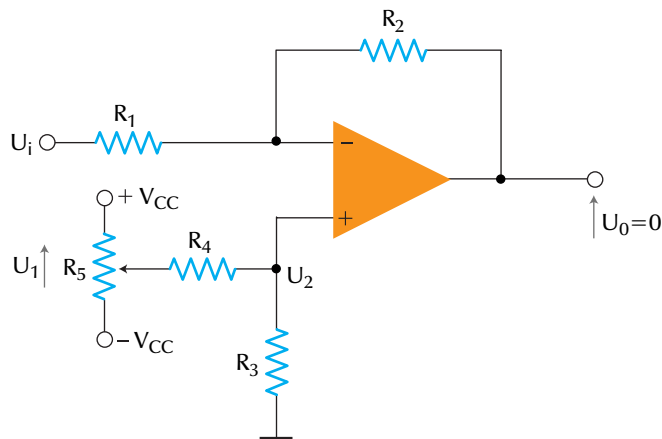
⇒ Παράδειγμα 4-9

Αν οι αντιστάσεις ενός ενισχυτή χωρίς αναστροφή είναι $R_1 = 1 \text{ K}\Omega$ και $R_2 = 100 \text{ K}\Omega$, να βρεθεί η τάση αντιστάθμισης εξόδου, αν ο TE είναι ο 741.

Λύση

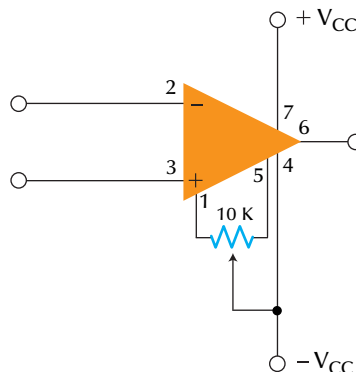
$$|V_0| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{os} = \left(1 + \frac{100}{1}\right) 6 \text{ mV} = 606 \text{ mV} \approx 0.61 \text{ V}$$

Είναι λοιπόν φανερό, ότι αν δεν αντισταθμίσουμε την τάση αντιστάθμισης θα έχουμε σοβαρό πρόβλημα στην έξοδο. Το Σχ.4.22 δείχνει τον τρόπο που κάνουμε αντιστάθμιση στον ΤΕ. Η θετική και η αρνητική τάση του ποτενσιομέτρου διορθώνει την τάση αντιστάθμισης είτε είναι αρνητική είτε θετική.



Σχήμα 4.22. Ρύθμιση τάσης αντιστάθμισης στον ΤΕ

Ο ΤΕ 741 έχει δυο ειδικούς ακροδέκτες (οι ακροδέκτες 1 και 5) για αντιστάθμιση τάσης και η αντιστάθμιση γίνεται με τον τρόπο που δείχνει το Σχ.4.23, δηλ. ρυθμίζοντας το ποτενσιόμετρο μέχρις ότου η τάση εισόδου γίνει μηδέν για μηδενικές τάσεις εισόδου.



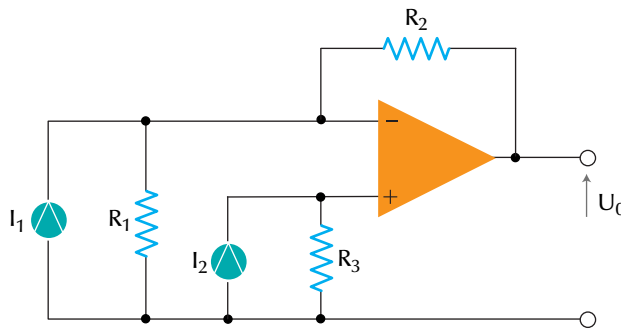
Σχήμα 4.23. Αντιστάθμιση τάσης του ΤΕ 741

4.14.2 Ρεύμα Εισόδου Πόλωσης & Ρεύμα Αντιστάθμισης Εισόδου

Όλοι οι πρακτικοί ΤΕ έχουν άλλο ένα περιορισμό· θα πρέπει και στις δυο εισόδους του να εισέρχεται ένα σταθερό ρεύμα, ώστε να δίνει τις σωστές συνθήκες πόλωσης των εσωτερικών στοιχείων του ενισχυτή. Το ρεύμα αυτό δεν πρέπει να συγχέεται με οποιοδήποτε *σήμα ρεύματος* που πιθανόν να εισέρχεται στους ακροδέκτες του ενισχυτή.

Τα ρεύματα πόλωσης I_1 και I_2 παριστάνονται στο Σχ.4.24 και εισέρχονται στις δυο εισόδους του ενισχυτή. Η διαφορά $I_2 - I_1$ ονομάζεται **ρεύμα αντιστάθμισης** I_{offset} . Αποτέλεσμα του ρεύματος πόλωσης είναι να έχουμε τάση στην έξοδο, τάση V_o . Η τάση αυτή αποτελείται από δυο συνιστώσες και δίνεται από τη σχέση:

$$|V_o| = I_2 R_3 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - I_1 R_2 \quad (4.14.39)$$



Σχήμα 4.24. Πόλωση εισόδου και ρεύματα πόλωσης

Για να είναι η τάση εξόδου μηδέν αποδεικνύεται, ότι πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.14.40)$$

Στην περίπτωση αυτή η τάση εξόδου γίνεται:

$$V_o = (I_2 - I_1) R_2 = I_{\text{offset}} R_2 \quad (4.14.41)$$

Οι τυπικές τιμές των ρευμάτων αντιστάθμισης των ΤΕ 709, 740 και 741 είναι αντίστοιχα 100 nA, 60 pA και 20 nA, αντίστοιχα.

⇒ **Παράδειγμα 4-10**

Αν η $R_2 = 1 \text{ K}\Omega$ και ο ΤΕ είναι ο 741, να βρεθεί η τάση αντιστάθμισης εξόδου, λόγω ρεύματος αντιστάθμισης.

Λύση

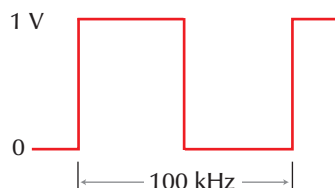
$$V_0 = I_{\text{offset}} R_2 = 20 \times 10^{-9} \times 1 \times 10^3 \text{ V} = 20 \times 10^{-6} \text{ V} = 20 \text{ }\mu\text{V}$$

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

- 4-1.** Ένας μη-αναστρέφων ενισχυτής με τον ΤΕ 741 έχει: $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ K}\Omega$. Να υπολογισθεί η ενίσχυση, η αντίσταση εισόδου και εξόδου του.
- 4-2.** Ένας αναστρέφων ενισχυτής με τον ΤΕ 741 έχει: $R_1 = 6.8 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 82 \text{ K}\Omega$. Να υπολογισθεί η ενίσχυση και η αντίσταση εισόδου και εξόδου του.
- 4-3.** Να βρεθεί η ενίσχυση και η αντίσταση εισόδου και εξόδου ενός ακόλουθου τάσης με ΤΕ που έχει $A_0 = 5000$, $R_i = 10 \text{ M}\Omega$ και $R_o = 200 \Omega$.
- 4-4.** Ένας αθροιστής τεσσάρων εισόδων έχει $u_1 = 1.25 \text{ V}$, $u_2 = 2 \text{ V}$, $u_3 = 0.5 \text{ V}$, $u_4 = 0.25 \text{ V}$ και $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_f = 39 \text{ K}\Omega$. Να υπολογισθεί η τάση εξόδου του.
- 4-5.** Να υπολογισθεί ολοκληρωτής που διεγείρεται από τον πιο κάτω παλμό και να σχεδιαστεί η κυματομορφή εξόδου του.



- 4-6.** Να υπολογισθεί διαφοριστής που διεγείρεται από τον πιο κάτω παλμό και να σχεδιαστεί η κυματομορφή εξόδου του.



- 4-7.** Να υπολογισθεί συντονιζόμενος ενισχυτής με ενίσχυση 7 και συχνότητα συντονισμού 10 kHz. Θεωρήστε $C=0.022 \mu\text{F}$ και το πηνίο που θα χρησιμοποιήσετε έχει ωμική αντίσταση ίση με $r=47 \Omega$.
- 4-8.** Συγκριτής με υστέρηση, κατά το υπόδειγμα του Σχ.4.18, έχει τάση αναφοράς 0 V. Με τη βοήθεια δύο αντιστάσεων που έχουν λόγο $R_2/R_1 = 199$ επιτυγχάνεται υστέρηση 50 mV. Μεταξύ ποιων τιμών θα μεταπηδά η τάση εξόδου του συγκριτή, αν αυτές είναι συμμετρικές ως προς το μηδέν; Επίσης, να σχεδιασθεί και το πρακτικό κύκλωμα για $R_1 = 4.7 \text{ K}\Omega$.
- 4-9.** Ο ενισχυτής του παραδείγματος 4-8 διεγείρεται από σήμα 2.5 V. Να βρεθεί η μέγιστη συχνότητα που μπορεί να ενισχύση.