

Κεφάλαιο Δυο: Τελεστικοί Ενισχυτές

2.1 Γενικά περί ενισχυτών

Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής είναι κατά αρχήν ένας ενισχυτής (amplifier).

Ο ενισχυτής είναι από τα σημαντικότερα δομικά υλικά των αναλογικών ηλεκτρονικών. Στην πιο απλή του μορφή η είσοδος του αποτελείται από δυο ακροδέκτες ανάμεσα στους οποίους εφαρμόζεται μια τάση (σήμα) εισόδου ενώ η έξοδος του αποτελείται από δυο ακροδέκτες ανάμεσα στους οποίους εμφανίζεται το σήμα εξόδου.

Ο ενισχυτής μπορεί να αντιμετωπιστεί σαν ένα μαύρο κουτί όπου το σήμα εξόδου εξαρτάται από το σήμα εισόδου. Στην απλούστερη μορφή της η εξάρτηση αυτή είναι γραμμική, δηλαδή το σήμα εξόδου είναι ανάλογο του σήματος εισόδου.

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των ενισχυτών βασίζεται στον τρόπο απόκριση τους σε σήματα τα οποία αντιστοιχούν σε συνεχείς ή εναλλασσόμενες τάσεις. Κάποιοι ενισχυτές αποκρίνονται διαφορετικά από κάποιους άλλους στο συνεχές ή το εναλλασσόμενο ρεύμα. Επίσης κάποιοι ενισχυτές έχουν διαφορετική απόκριση από άλλους ενισχυτές σε διαφορετικές συχνότητες του εναλλασσόμενου σήματος που εφαρμόζεται στην είσοδο τους.

Θα περιγράψουμε τώρα κάποιες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τους ενισχυτές όπως την απολαβή ή κέρδος τάσης, την σύνθετη τάση εισόδου, την σύνθετη αντίσταση εξόδου, και την απόκριση συχνότητας.

Η **απολαβή** ή **κέρδος τάσης** (voltage gain) ορίζεται ως το πηλίκο της τάσης εξόδου v_o προς την τάση εισόδου v_i , δηλαδή:

$$A = \frac{v_o}{v_i} \quad (2.1)$$

Το κέρδος τάσης μπορεί να εκφραστεί και σε μονάδες dB οπότε η σχέση (2.1) γράφεται ως εξής:

$$A_v = 20 \log |A| \quad (2.2)$$

*Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές*

Εκτός από την απολαβή τάσης υπάρχει και η απολαβή ή κέρδος ρεύματος (current gain) καθώς και η απολαβή ή κέρδος ισχύος (power gain) οι οποίες σε μονάδες dB ορίζονται ως εξής :

$$\text{Κέρδος ρεύματος σε decibels} = 20 \log |A_i| \quad (2.3)$$

$$\text{Κέρδος ισχύος σε decibels} = 10 \log A_p \quad (2.4)$$

Όπου A_i και A_p ορίζονται ομοίως, για τα αντίστοιχα μεγέθη, με την (2.1). Οι απόλυτες τιμές των κερδών τάσης και ρεύματος στις σχέσεις (2.2), (2.3) χρησιμοποιούνται διότι σε μερικές περιπτώσεις τα A_v , A_i είναι αρνητικοί αριθμοί. Αρνητικό κέρδος A_v σημαίνει ότι υπάρχει φασική διαφορά 180 μοίρες μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου. Δεν σημαίνει ότι ο ενισχυτής αποσβένει το σήμα. Ενισχυτής βέβαια με κέρδος -20dB στην πράξη αποσβένει το σήμα εισόδου κατά ένα συντελεστή 10. Επίσης να τονιστεί ότι ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$A_p = A_i A_v \quad (2.5)$$

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου (input impedance) ή απλώς αντίσταση εισόδου, είναι η αντίσταση την οποία παρουσιάζει στην είσοδο του ο ενισχυτής. Η σύνθετη αντίσταση εισόδου συμπεριφέρεται ως αντίσταση φόρτου σε οποιαδήποτε πηγή σήματος συνδεθεί στην είσοδο του ενισχυτή και επηρεάζει τη μεταφορά σήματος από την πηγή προς τον ενισχυτή.

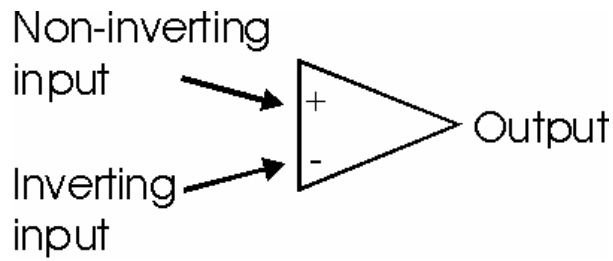
Η σύνθετη αντίσταση εξόδου (output impedance) ή απλώς αντίσταση εξόδου, είναι η αντίσταση την οποία εκδηλώνει στην έξοδο του ο ενισχυτής όταν συνδέεται με μια αντίσταση φορτίου ή επόμενη βαθμίδα. Η σύνθετη αντίσταση εξόδου επηρεάζει την δυνατότητα διοχέτευσης ρεύματος στο κύκλωμα εξόδου.

Η απόκριση συχνότητας (frequency response) περιγράφει την απολαβή τάσης του ενισχυτή συναρτήσει της συχνότητας του σήματος εισόδου.

Πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι πέρα από τον απλό ενισχυτή υπάρχουν και ενισχυτές με περισσότερες εισόδους, όπου το σήμα εξόδου είναι ανάλογο του αθροίσματος ή της διαφοράς των σημάτων εισόδων, ή και ενισχυτές με περισσότερες από μια εξόδους.

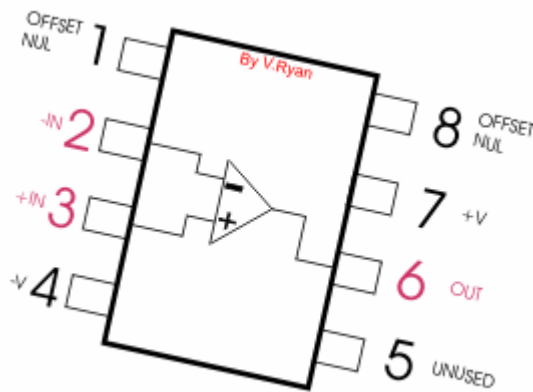
2.2 Τελεστικός Ενισχυτής (TE)

Το κυκλωματικό σύμβολο ενός τελεστικού ενισχυτή είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 1: Κυκλωματικό σύμβολο Τελεστικού Ενισχυτή

Πολλές φορές βέβαια σε εργαστηριακά φυλλάδια ή σε φύλλα προδιαγραφών ο τελεστικός ενισχυτής απεικονίζεται με ένα παρόμοιο με το παρακάτω διάγραμμα σχήμα:



Σχήμα 2: Ακροδέκτες ενός τύπου τελεστικού ενισχυτή

Στην πραγματικότητα ένας τελεστικός ενισχυτής είναι το εξάρτημα που απεικονίζεται στο σχήμα 3:



Σχήμα 3: Ένας τελεστικός ενισχυτής (εξάρτημα)

*Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές*

Μια από τις αιτίες της μεγάλης δημοτικότητας των τελεστικών ενισχυτών είναι η ευελιξία τους. Μπορεί κανείς να κάνει τα πάντα με τους τελεστικούς ενισχυτές. Τα κυκλώματα με τελεστικούς ενισχυτές λειτουργούν σε επίπεδα πολύ κοντά στην προβλεπόμενη θεωρητική τους συμπεριφορά.

Το εσωτερικό κύκλωμα ενός τελεστικού ενισχυτή αποτελείται από μεγάλο αριθμό transistor, αντιστάσεων, και μερικές φορές επίσης από ένα πυκνωτή σε μια μάλλον πιο πολύπλοκη συνδεσμολογία. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε τον τελεστικό σαν βασική δομική μονάδα, και θα μελετήσουμε την συμπεριφορά του και τις εφαρμογές του.

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες του τελεστικού ενισχυτή, ο τελευταίος έχει δυο εισόδους (π.χ. για τον TE741 ακροδέκτες 2,3) και μια έξοδο (π.χ. για τον TE741 ακροδέκτης 6). Η τροφοδοσία ενός τελεστικού ενισχυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με την βοήθεια μιας μόνο πηγής τάσης είτε με την βοήθεια δύο πηγών, οπότε οι τάσεις οι οποίες τροφοδοτούν τους αντίστοιχους ακροδέκτες (για τον TE741 ακροδέκτες 4,7) του κυκλώματος είναι συμμετρικές ως προς την γη του. Επιπλέον μπορούν να υπάρχουν και άλλοι ακροδέκτες οι οποίοι επιτρέπουν την προσπέλαση στο εσωτερικό κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή (π.χ. για τον TE741 ακροδέκτες 1,8).

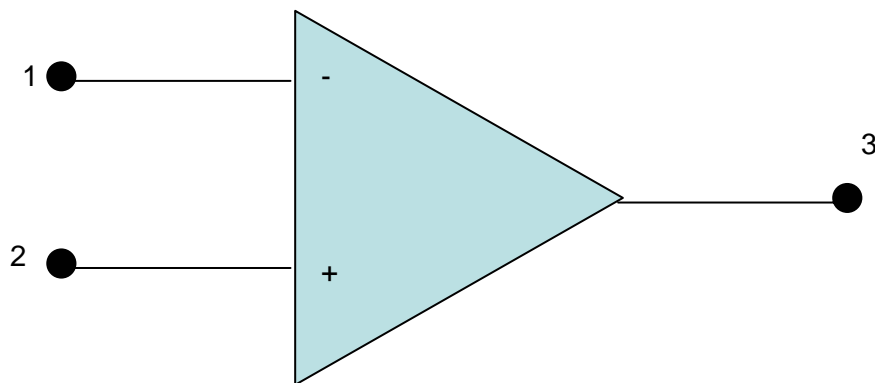
Ο τελεστικός ενισχυτής ενισχύει και επεξεργάζεται τη διαφορά των σημάτων που εφαρμόζεται στις δυο εισόδους και για αυτό το λόγο λέμε ότι ο τελεστικός ενισχυτής έχει διαφορική είσοδο (differential input). Επειδή ο τελεστικός ενισχυτής επεξεργάζεται την διαφορά των σημάτων στις εισόδους του ο χρήστης πρέπει να γνωρίζει ποια είσοδος αντιστοιχεί στον αφαιρέτη και ποια στον αφαιρετέο. Για αυτό το λόγο οι δυο είσοδοι του τελεστικού ενισχυτή ξεχωρίζουν μεταξύ τους με τα σύμβολα (+) που συμβολίζει την μη – αναστρέφουσα είσοδο (non inverting input) και (-) που συμβολίζει την αναστρέφουσα είσοδο (inverting input).

Αν η μη-αναστρέφουσα είσοδος είναι πιο θετική από την αναστρέφουσα τότε η έξοδος του ΤΕ είναι θετική. Αν συμβαίνει το αντίθετο η έξοδος είναι αρνητική.

Όταν το σήμα εξόδου παρουσιάζει διαφορά φάσης $\Delta\phi = 0^\circ$, δηλαδή είναι συμφασικό, με το σήμα της μη αναστρέφουσας εισόδου ενώ παρουσιάζει διαφορά φάσης $\Delta\phi = 180^\circ$ με το σήμα της αναστρέφουσας εισόδου.

2.3 Ο Ιδανικός Τελεστικός Ενισχυτής

Όπως ειπώθηκε στην παράγραφο 2.2 ο ΤΕ είναι κατασκευασμένος για να (α) αισθάνεται την διαφορά μεταξύ των σημάτων τάσης που εφαρμόζονται στους ακροδέκτες εισόδου του (δηλαδή $v_1 - v_2$), (β) να πολλαπλασιάζει αυτήν την διαφορά με έναν αριθμό A , και (γ) να προκαλεί την εμφάνιση του αποτελέσματος, δηλαδή κάποιας τάσης με τιμή $A(v_2 - v_1)$, στον ακροδέκτη εξόδου.



Σχήμα 4: Βασικοί ακροδέκτες ενός τελεστικού ενισχυτή

Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής δεν επιτρέπεται να τραβάει ρεύμα από την είσοδο του. Επομένως το ρεύμα που μπαίνει στην είσοδο 1 και 2 του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή είναι μηδέν. Με άλλα λόγια η σύνθετη αντίσταση εισόδου ενός ιδανικού ΤΕ είναι άπειρη.

Ο ακροδέκτης εξόδου 3 σε έναν ιδανικό τελεστικό ενισχυτή δρα σαν ακροδέκτης εξόδου μιας ιδανικής πηγής τάσης. Αυτό σημαίνει ότι η τάση εξόδου θα είναι πάντα ίση με $A(v_2 - v_1)$ και ανεξάρτητη από το ρεύμα που μπορεί να τραβήξει από τον ακροδέκτη αυτό ένα φορτίο με κάποια σύνθετη αντίσταση. Η σύνθετη αντίσταση εξόδου ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή δηλαδή είναι μηδέν.

Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής αισθάνεται μόνο την διαφορά τάσης $v_2 - v_1$ ανάμεσα στους ακροδέκτες 1,2 και αγνοεί οποιοδήποτε σήμα κοινό στις δυο εισόδους του. Αυτό σημαίνει ότι εάν $v_2 = v_1 = IV$, τότε η έξοδος θα γίνει ιδανικά μηδέν.

Ονομάζουμε την ιδιότητα αυτή απόρριψη κοινού σήματος και συμπεραίνουμε ότι ένας ιδανικός τελεστικός ενισχυτής έχει άπειρη απόρριψη κοινού σήματος. Αυτό είναι το μεγάλο πλεονέκτημα του ενισχυτή αυτού έναντι αυτών με transistor μια και

*Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές*

απορρίπτει πλήρως βάση της απόρριψης του κοινού σήματος τον θόρυβο στους ακροδέκτες εισόδου του (Γιατί;).

Το κέρδος A που παρουσιάζει ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής ονομάζεται διαφορικό κέρδος ή κέρδος ανοικτού βρόχου. Η τιμή του A είναι πολύ μεγάλη, ιδανικά άπειρη. Για αυτό το λόγο ο τελεστικός ενισχυτής ποτέ δεν χρησιμοποιείται σε συνδεσμολογία ανοικτού βρόχου.

Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής έχει ένα κέρδος A που μένει σταθερό από την συχνότητα μηδέν μέχρι την συχνότητα άπειρο. Αυτό σημαίνει πως οι ιδανικοί τελεστικοί ενισχυτές ενισχύουν σήματα οποιασδήποτε συχνότητας, με το ίδιο κέρδος. Στην πράξη θα δούμε ότι ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένα βαθυπερατό φίλτρο.

Ο πίνακας ένα ανακεφαλαιώνει τις βασικές ιδιότητες του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή.

Χαρακτηριστική παράμετρος	Σύμβολο	Μέγεθος
<i>Αντίσταση εισόδου</i>	R_i	∞
<i>Αντίσταση εξόδου</i>	R_o	0
<i>Απολαβή τάσης</i>	A_v	∞
<i>Απόκριση συχνότητας (εύρος ζώνης)</i>	BW	∞
<i>Τέλεια ισοστάθμιση</i>	$V_{out}=0$ όταν $V_1=V_2$	
<i>Τα χαρακτηριστικά δεν μεταβάλλονται με την θερμοκρασία</i>		

Πίνακας 1: Βασικά χαρακτηριστικά ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή

Υπάρχουν ΤΕ που έχουν αντιστάσεις εισόδου της τάξης του $1T\Omega$ ήτοι $10^{12} \Omega$ (κωδικός LF351), άλλοι οι οποίοι παρέχουν στην έξοδο τους ρεύματα της τάξης των 13 A (κωδικός LM12), άρα η αντίσταση εξόδου τους θεωρείται αμελητέα, και άλλοι οι οποίοι έχουν ένα μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων π.χ. 1200 MHz (κωδικός CLC449).

2.4 Πραγματικός Τελεστικός Ενισχυτής

Ο πραγματικός τελεστικός ενισχυτής είναι αυτός που χρησιμοποιείται στην πράξη. Είναι συνήθως ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο λέγεται και μονολιθικό, επειδή είναι εξ ολοκλήρου κατασκευασμένο σε μια ψηφίδα πυριτίου, στην οποία δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός των επιμέρους στοιχείων.

*Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές*

Ένας αντίστοιχος πίνακας με τον πίνακα 1 που περιέγραψε τον ιδανικό TE , δίνεται παρακάτω και δείχνει τα χαρακτηριστικά του πιο κοινά χρησιμοποιούμενου TE του 741 .

Χαρακτηριστική παράμετρος	Σύμβολο	Μέγεθος
<i>Αντίσταση εισόδου</i>	R_i	2 MΩ
<i>Αντίσταση εξόδου</i>	R_o	~75 MΩ
<i>Απολαβή τάσης</i>	A_v	200.000
<i>Απόκριση συχνότητας (εύρος ζώνης)</i>	BW	1.5 MHz
<i>Τέλεια ισοστάθμιση</i>	$V_{out}=0$ όταν $V_1=V_2$	
<i>Τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται λίγο με την θερμοκρασία</i>		

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά TE 741

Σε πολλές εφαρμογές είναι αναγκαίο να έχουμε γνώση και άλλων χαρακτηριστικών πέρα από αυτά που περιγράφει ο παραπάνω πίνακας για ένα πραγματικό TE. Οι σημαντικότεροι παράμετροι πέρα από αυτούς που περιέχει ο παραπάνω πίνακας είναι:

- Το **ρεύμα πόλωσης εισόδων** (input bias current) I_B . Αυτό ισούται με το ημιάθροισμα των ρευμάτων πόλωσης των 2 εισόδων του TE.
- Το **ρεύμα αποστάθμισης εισόδων** (input offset current) I_o . Αυτό ισούται με τη διαφορά των ρευμάτων πόλωσης των 2 εισόδων.
- Η **τάση αποστάθμισης εισόδου** (input offset voltage) V_o . Εκφράζεται από το μέτρο της τάσης που πρέπει να εφαρμοστεί μεταξύ των εισόδων για να μηδενιστεί η τάση εξόδου.
- Ο **λόγος απόρριψης κοινού τρόπου (CMRR) (Common Mode Rejection Ratio)**. Μετράτε από την απολαβή τάσης που εκδηλώνεται όταν το ίδιο σήμα εφαρμόζεται ταυτόχρονα και στις 2 εισόδους. Δηλαδή εκφράζει το κατά πόσο απέχει ο τελεστικός ενισχυτής από την ιδανική συμπεριφορά του δηλαδή την συνθήκη $V_o=0$ V όταν $V_+ = V_-$.
- Ο **ρυθμός μεταβολής** της τάσης εξόδου (slew rate). Δηλώνει τη μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να μεταβάλλεται η τάση εξόδου όταν μεταβάλλεται η είσοδος για να λαμβάνουμε μη παραμορφωμένο σήμα.

Μια σύγκριση μεταξύ των ομοειδών χαρακτηριστικών ενός πραγματικού και ενός ιδανικού TE παρουσιάζεται στον πίνακα 3.

Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές

Χαρακτηριστική Παράμετρος	Ιδανικός	Πραγματικός	Μονάδες
Αντίσταση εισόδου	∞	2	MΩ
Αντίσταση εξόδου	0	75	Ω
Απολαβή τάσης	∞	200.000	-
Απόκριση συχνότητας (εύρος ζώνης)	∞	1.5	MHz
Ρεύμα πώλωσης εισόδου	0	80	nA
Ρεύμα αποστάθμισης εισόδου	0	20	nA
Λόγος απόρριψης κοινού τρόπου	∞	90	dB
Ρυθμός μεταβολής τάσης εισόδου	∞	0.5	V/ μ s

Πίνακας 3: Σύγκριση τεχνικών χαρακτηριστικών ιδανικού με πραγματικό τελεστικό ενισχυτή.

Η απολαβή τάσης ενός πραγματικού ΤΕ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$A_v = \frac{V_o}{V_+ - V_-} \quad (2.6)$$

όπου οι δείκτες (+) και (-) αναφέρονται στη μη αναστρέφουσα και στη αναστρέφουσα είσοδο αντίστοιχα.

Παράδειγμα 1

Στη μη αναστρέφουσα είσοδο ενός τελεστικού ενισχυτή εφαρμόζεται μια τάση 2 μ V στη δε αναστρέφουσα 1 μ V. Αν η (διαφορική) απολαβή τάσης είναι 80000 να υπολογιστεί η τάση στην έξοδο του ενισχυτή.

Λύση

Χρησιμοποιώντας την σχέση (2.6), όπου τώρα έχουμε $V_i = V_+ - V_- = 1\mu V$.

Άρα η τάση στην έξοδο του ενισχυτή είναι $V_o = A_v \times V_i = 80000 \times 1\mu V = 80mV$.

Παράδειγμα 2

Μεταξύ των 2 εισόδων ενός τελεστικού ενισχυτή εφαρμόζεται τάση $V_i = 20 \mu V$ και στην έξοδο του εμφανίζεται τάση 4 V. Να υπολογίσετε τη (διαφορική) απολαβή τάσης του τελεστικού ενισχυτή.

Λύση

Ξεκινώντας από την (2.6) έχουμε

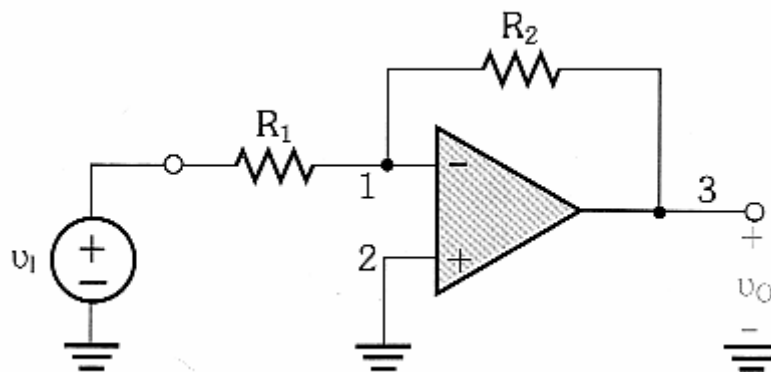
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{4V}{20\mu V} = 200.000$$

2.5 Βασικά κυκλώματα με τελεστικό ενισχυτή

Τα περισσότερα από τα κυκλώματα με Τ.Ε. βασίζονται στην εφαρμογή αρνητικής ανασύζευξης ή ανατροφοδότησης μεταξύ εξόδου και της αναστρέφουσας εισόδου του Τ.Ε. Αφού οι Τ.Ε. έχουν δυο εισόδους, την αναστρέφουσα και τη μη αναστρέφουσα, ο συνδυασμός εφαρμογής σήματος εισόδου και ανατροφοδότησης του σήματος εξόδου δίνουν την δυνατότητα σχεδίασης δυο βασικών κατηγοριών κυκλωμάτων που είναι κυκλώματα με μη αναστρέφουσα ανατροφοδότηση και κυκλώματα με αναστρέφουσα ανατροφοδότηση. Οι τυπικοί ενισχυτές οι οποίοι κατασκευάζονται με αυτόν τον τρόπο ονομάζονται αντίστοιχα μη αναστρέφων ενισχυτής και αναστρέφων ενισχυτής και θα περιγράψουν αναλυτικά στην συνέχεια των εργαστηριακών αυτών σημειώσεων.

2.5.1 Αναστρέφουσα Συνδεσμολογία και ο Αναστρέφων Ενισχυτής

Έστω το κύκλωμα του σχήματος 5 (Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα Sedra / Smith). Αποτελείται από έναν Τ.Ε. και 2 αντιστάσεις R_1 και R_2 . Η αντίσταση R_2 συνδέεται με την έξοδο του Τ.Ε., δηλαδή τον ακροδέκτη 3, πίσω με την αναστρέφουσα είσοδο (ακροδέκτης 1). Λέμε τότε για την R_2 ότι προκαλεί αρνητική ανάδραση (ή αρνητική ανατροφοδότηση).



Σχήμα 5: Αναστρέφουσα συνδεσμολογία

*Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές*

Η R_2 βλέπουμε ότι κλείνει το βρόχο γύρω από τον Τ.Ε. Εκτός του ότι προσθέσαμε την R_2 γειώσαμε επίσης τον ακροδέκτη 2 και συνδέσαμε την R_1 μεταξύ του ακροδέκτη και μιας πηγής σήματος εισόδου με τάση V_1 . Την έξοδο του κυκλώματος την παίρνουμε από τον ακροδέκτη 3. Ο ακροδέκτης 3 είναι ένα βολικό σημείο να πάρουμε έξοδο επειδή το επίπεδο της σύνθετης αντίστασης είναι μηδέν. Η συνδεσμολογία αυτή είναι γνωστή ως αναστρέφουσα συνδεσμολογία. Ο ενισχυτής που προκύπτει αντίστοιχα ονομάζεται αναστρέφων ενισχυτής.

Θα αναλύσουμε το κύκλωμα της αναστρέφουσας συνδεσμολογίας προκειμένου να υπολογίσουμε το κέρδος κλειστού βρόχου G . Το G ορίζεται ως

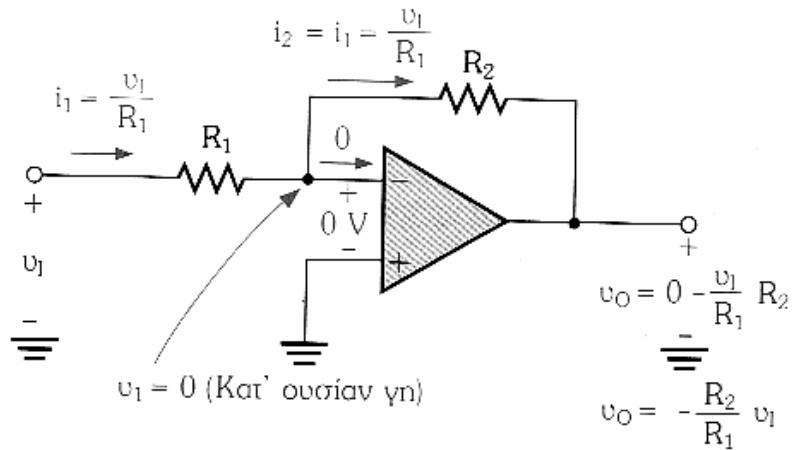
$$G = \frac{v_o}{v_i} \quad (2.7)$$

Έστω ότι μετράμε μια τάση στα άκρα του ακροδέκτη εξόδου 3. Λόγω του ότι ο Τ.Ε. θεωρείται ιδανικός το κέρδος ανοικτού βρόχου A τείνει στο άπειρο άρα:

$$v_2 - v_1 = \frac{v_o}{A} = 0 \Leftrightarrow v_2 = v_1 \quad (2.8)$$

Η (2.8) μας ενημερώνει ότι η τάση στον αναστρέφοντα ακροδέκτη είναι ίση με $v_1 \cong v_2$. Δηλαδή το δυναμικό του ενός ακροδέκτη παρακολουθεί το δυναμικό του άλλου. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως «κατ' ουσίαν βραχυκύκλωμα» μεταξύ των δύο ακροδεκτών εισόδου. Το κατ' ουσίαν βραχυκύκλωμα ισχύει για τι στάσεις άλλα όχι για τα ρεύματα. Επομένως μια και ο ακροδέκτης 2 του Τ.Ε. είναι γειωμένος τότε μέσω της (2.8) $v_1 = 0$ V. Αναφερόμαστε στον ακροδέκτη 1 κατ' ουσίαν γη, δηλαδή το σημείο που έχει μεν τάση μηδέν, αλλά δεν είναι συνδεδεμένο στην γη. Στο σχήμα 6 απεικονίζονται τα ρεύματα (πραγματική φορά) (*Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα Sedra / Smith*) που διαρρέουν την αναστρέφουσα συνδεσμολογία του σχήματος 5.

Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές



Σχήμα 6: Ρεύματα (ορθή φορά) που διαρρέουν την αναστρέφουσα συνδεσμολογία

Εάν εφαρμόσουμε τον νόμο του Ohm μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα I_1 που περνάει μέσα από την R_1 και είναι ίσο με

$$I_1 = \frac{v_i - v_1}{R_1} \cong \frac{v_i}{R_1} \quad (2.9)$$

Λόγω του ότι ο ιδανικός ΤΕ έχει άπειρη αντίσταση εισόδου το ρεύμα (2.9) δεν μπορεί να πάει μέσα στον ΤΕ. Προφανώς λοιπόν το I_1 πρέπει να περάσει μέσα από την R_2 προς τον ακροδέκτη 3, που έχει χαμηλή αντίσταση εξόδου. Εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm στην R_2 μπορούμε να υπολογίσουμε την v_o . Έτσι έχουμε :

$$v_o = v_1 - I_1 R_2 = 0 - \frac{v_1}{R_1} R_2 \Rightarrow \frac{v_o}{v_1} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.10)$$

Η έκφραση (2.10) περιγράφει το κέρδος κλειστού βρόχου της αναστρέφουσας συνδεσμολογίας.

Το πρόσημο μείον μπροστά από την (2.10) μας πληροφορεί πως ο ΤΕ σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία προκαλεί αναστροφή του σήματος. Το σήμα εξόδου έχει διαφορά φάσης σε σχέση με αυτό της εισόδου (από τον ακροδέκτη 1) ίση με 180° . Επίσης λόγω αυτού του μείον η παραπάνω συνδεσμολογία πήρε και το όνομα αναστρέφουσα συνδεσμολογία.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι στην αναστρέφουσα συνδεσμολογία το κέρδος του ενισχυτή εξαρτάται από τον λόγο δυο εξωτερικών παθητικών στοιχείων. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να σχεδιάσουμε το κέρδος του κλειστού βρόχου της αναστρέφουσας συνδεσμολογίας με όση ακρίβεια θέλουμε, επιλέγοντας παθητικά

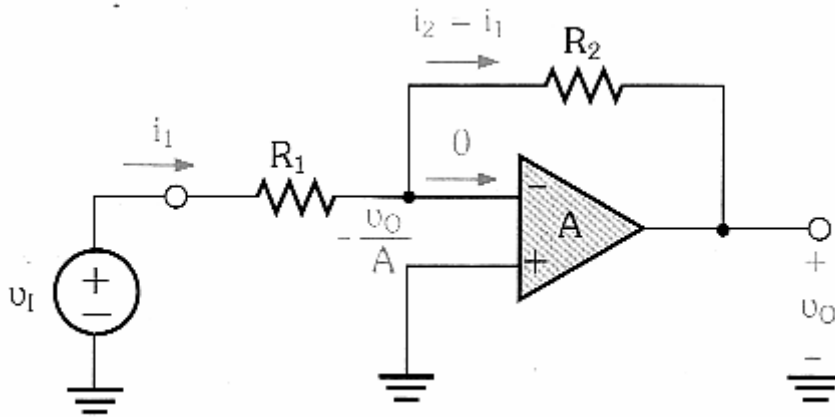
*Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές*

στοιχεία ακριβείας. Επίσης το κέρδος κλειστού βρόχου είναι ανεξάρτητο από το κέρδος του ανοικτού βρόχου του ΤΕ.

Στην αναστρέφουσα συνδεσμολογία η απολαβή τάσης μπορεί να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη της μονάδος. Με άλλα λόγια ο αναστρέφων ενισχυτής μπορεί να ενισχύει το σήμα ή να εξασθενίζει το σήμα εισόδου ανάλογα με την επιλογή των αντιστάσεων. Επίσης η απολαβή τάσης μπορεί να γίνει και μηδέν εάν $R_2 = 0 \Omega$.

Έστω τώρα ότι ο ΤΕ που χρησιμοποιούμε σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία δεν είναι ιδανικός. Αυτό σημαίνει ότι το κέρδος ανοικτού βρόχου δεν είναι άπειρο άλλα πεπερασμένο.

Το σχήμα 7 (*Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα Sedra / Smith*) θα μας βοηθήσει στην ανάλυση που ακολουθεί.



Σχήμα 7: Αναστρέφουσα συνδεσμολογία που κάνει χρήση μη ιδανικό τελεστικό ενισχυτή

Αν η τάση εξόδου είναι v_o , τότε η τάση μεταξύ των 2 ακροδεκτών θα είναι v_o/A . Εφόσον ο θετικός ακροδέκτης είναι γειωμένος το δυναμικό στον αρνητικό ακροδέκτη εισόδου, σύμφωνα με το κατ' ουσίαν βραχυκύκλωμα θα πρέπει να είναι ίσο με $-v_o/A$.

Το ρεύμα που διαπερνά την R_1 μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση

$$I_1 = \frac{v_i - \left(-\frac{v_o}{A}\right)}{R_1} = \frac{v_i + v_o/A}{R_1} \quad (2.11)$$

Η άπειρη σύνθετη αντίσταση εισόδου του ΤΕ αναγκάζει το ρεύμα I_1 να περάσει αξ' ολοκλήρου από την R_2 . Η τάση εξόδου v_o μπορεί λοιπόν να υπολογιστεί από την σχέση

$$v_o = -\frac{v_o}{A} - I_1 R_2 = -\frac{v_o}{A} - \left(\frac{v_i + v_o/A}{R_1} \right) R_2 \quad (2.12)$$

Επομένως το κέρδος κλειστού βρόχου στην περίπτωση που ο ΤΕ έχει πεπερασμένο κέρδος είναι ίσο με

$$G = \frac{-R_2/R_1}{1 + \frac{\left(1 + R_2/R_1\right)}{A}} \quad (2.13)$$

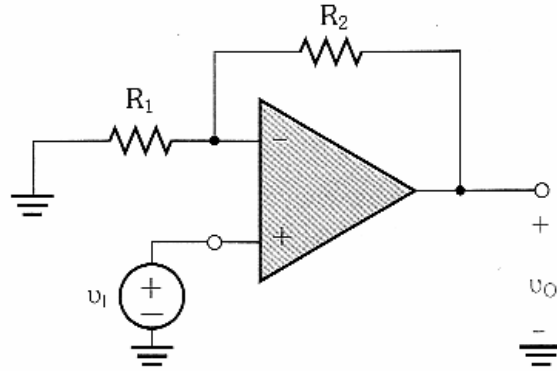
Από την (2.13) είναι εύκολο κανείς να δει πως καταλήγουμε στην (2.10) εάν το κέρδος του ΤΕ είναι άπειρο. Επίσης από την σχέση (2.13) παρατηρούμε ότι για να ελαχιστοποιήσουμε την εξάρτηση του κέρδους κλειστού βρόχου από το κέρδος ανοικτού βρόχου A , θα πρέπει να φροντίσουμε έτσι ώστε $1 + \frac{R_2}{R_1} \ll A$.

Έστω ότι ο ΤΕ έχει κέρδος ανοικτού βρόχου A που τείνει στο άπειρο. Από το κύκλωμα της αναστρέφουσας συνδεσμολογίας βλέπουμε ότι η αντίσταση εισόδου του κλειστού βρόχου είναι ίση με R_1 . Αυτό επίσης φαίνεται και από τον ορισμό της αντίστασης εισόδου (πηλίκο της τάσης η οποία εφαρμόζεται στην είσοδο προς το ρεύμα το οποίο αυτή επάγει) οπότε $R_{in} = \frac{v_i}{i_1} = \frac{v_i}{v_i/R_1} = R_1$. Συνεπώς για να μεγαλώσουμε την R_{in} πρέπει να διαλέξουμε μια μεγάλη τιμή για την R_1 . Ωστόσο αυτό δεν είναι το ιδανικό μια και το κέρδος του ΤΕ δίνεται από την (2.10) όπου για μεγάλο κέρδος πρέπει να πάρουμε μικρή R_1 . Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε ότι η αναστρέφουσα συνδεσμολογία έχει εγγενές πρόβλημα χαμηλής αντίστασης εισόδου.

2.5.2 Μη αναστρέφων ενισχυτής

Η δεύτερη βασική συνδεσμολογία ενός τελεστικού ενισχυτή που θα μελετήσουμε είναι αυτή που απεικονίζεται στο σχήμα 8 (*Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα Sedra / Smith*). Είναι γνωστή με την ονομασία μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία.

Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές



Σχήμα 8: Μη ανατρέφουσα συνδεσμολογία

Το σήμα εισόδου εφαρμόζεται απ' ευθείας στον μη αναστρέφων ακροδέκτη εισόδου του τελεστικού ενισχυτή ενώ ο άλλος ο ακροδέκτης συνδέεται με την γή μέσω μιας αντίστασης R_1 . Μέρος του σήματος εξόδου ανατροφοδοτείται στην αναστρέφουσα είσοδο. Η ανατροφοδότηση είναι αρνητική διότι το ανατροφοδοτούμενο σήμα αφαιρείται από το σήμα εισόδου. Ο όρος μη αναστρέφων ενισχυτής προκύπτει από το ότι η διαφορά φάσης μεταξύ σήματος εξόδου και σήματος εισόδου είναι 0° , άρα η κυματομορφή εισόδου δεν αναστρέφεται στην έξοδο.

Υποθέτοντας ότι ο ΤΕ είναι ιδανικός με άπειρο κέρδος, έχουμε κατ' ουσίαν βραχυκύκλωμα μεταξύ των εισόδων του. Συνεπώς το διαφορικό σήμα εισόδου είναι

$$v_2 - v_1 = \frac{v_o}{A} = \frac{v_o}{\infty} = 0 \quad (2.14)$$

Άρα η τάση στον αναστρέφοντα ακροδέκτη θα ισούται με την τάση στον μη αναστρέφοντα ακροδέκτη που είναι η εφαρμοζόμενη τάση v_i . Εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm βγαίνει ότι το ρεύμα που ρέει μέσω της R_1 είναι ίσο με $\frac{v_i}{R_1}$. Εξαιτίας της άπειρης σύνθετης αντίστασης εισόδου του ΤΕ το ρεύμα θα περάσει από την R_2 . Εφαρμόζοντας τον 2^ο κανόνα του Kirchhoff βρίσκουμε ότι η τάση εξόδου είναι ίση με

$$v_o = v_i + \left(\frac{v_i}{R_1}\right)R_2 \Leftrightarrow \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.15)$$

Το κέρδος της μη αναστρέφουσας συνδεσμολογίας έχει θετικό πρόσημο γεγονός που δικαιολογεί και την ονομασία του. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που

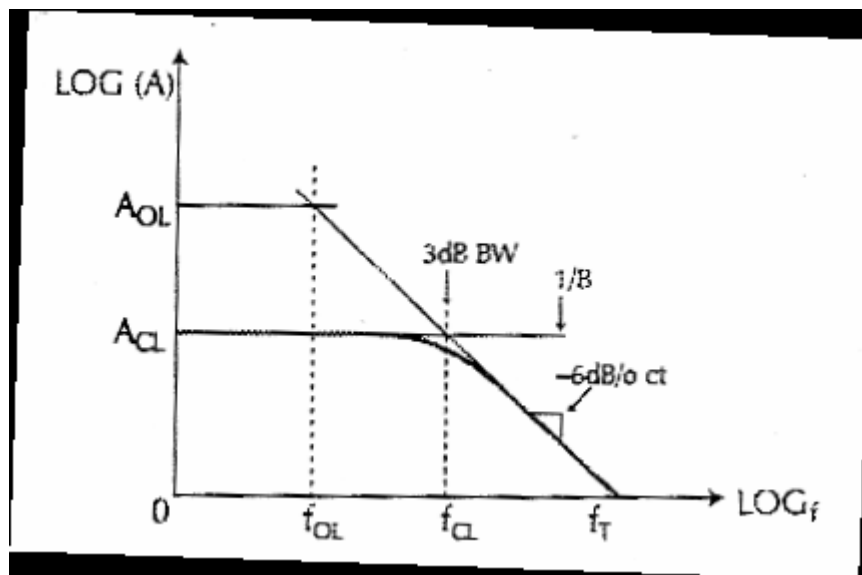
Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές

προκύπτει από την (2.15) είναι το ότι το κέρδος κλειστού βρόχου της μη αναστρέφουσας συνδεσμολογίας είναι μεγαλύτερο ή το πολύ ίσο με την μονάδα. Το κέρδος θα γίνει ίσο με την μονάδα εάν η R_2 είναι πολύ μεγαλύτερη από την R_1 . Θα γίνει πολύ μεγαλύτερο από την μονάδα εφόσον η R_2 απομακρυνθεί ή αποσυνδεθεί από το κύκλωμα ($R_2 = \infty$; ή $R_1 = 0$). Όταν η απολαβή τάσης γίνει ίση με την μονάδα το κύκλωμα ονομάζεται ακολουθητής τάσης (buffer), διότι η τάση εξόδου παρακολουθεί συνεχώς την τάση εισόδου.

Η ιδιότητα της πολύ μεγάλης αντίστασης εισόδου είναι κάτι πολύ επιθυμητό χαρακτηριστικό της μη αναστρέφουσας συνδεσμολογίας.

Ο μη αναστρέφων ενισχυτής έχει όλες τις ιδιότητες που οφείλονται στη μη-αναστρέφουσα ανατροφοδότηση. Αυτό σημαίνει:

- Μείωση της απολαβής
- Αύξηση της σύνθετης αντίστασης εξόδου
- Ελάττωση της σύνθετης αντίστασης εξόδου
- Αύξηση του εύρους ζώνης (δες παρακάτω σχήμα)



Σχήμα 9: Φασματική απόκριση ενός πραγματικού τελεστικού ενισχυτή σε συνδεσμολογία ανοικτού βρόχου

Από το παραπάνω σχήμα (Γενικά Ηλεκτρονικά Ασημάκης Ν) η απολαβή του ανοικτού βρόχου ενός ΤΕ παραμένει σταθερή έως μια συχνότητα f_{OL} , στην συνέχεια δε αρχίζει να ελαττώνεται με ρυθμό περίπου 6 dB/oct.. Αυτό σημαίνει ότι η απολαβή υποδιπλασιάζεται για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας. Η f_{OL} ονομάζεται

*Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές*

συχνότητα κατωφλίου και εκφράζει περίπου το εύρος ζώνης της απολαβής ανοικτού βρόχου του ΤΕ. Σε αυτήν την συχνότητα η απολαβή έχει μειωθεί στο 0.707 της αρχικής τιμής της. Η συχνότητα για την οποία η απολαβή γίνεται ίση με την μονάδα συμβολίζεται με f_T . Όταν εφαρμόζεται ανατροφοδότηση η απολαβή κλειστού βρόχου ελαττώνεται ενώ αυξάνεται η αντίστοιχη συχνότητα αποκοπής f_{CL} . Σε κάθε περίπτωση το γινόμενο της απολαβής επί την συχνότητα αποκοπής είναι ίσο με f_T δηλ.

$$A_{OL} \times f_{OL} = A_{CL} \times f_{CL} = f_T \quad (2.16)$$

Παράδειγμα 6

Σε ένα μη αναστρέφων ενισχυτή η τάση εισόδου είναι 10 mV , ενώ $R_1 = 9\text{ k}\Omega$ και $R_2 = 1\text{ k}\Omega$. Να υπολογιστεί η απολαβή τάσης κλειστού βρόχου και η τάση εξόδου του κυκλώματος.

Λύση

Από την (2.15) έχουμε

$$A_v = A_{CL} = \frac{R_2 + R_1}{R_2} = 10$$

Άρα η τάση εξόδου είναι

$$v_o = A_{CL} \times v_i = 10 \times 10\text{ mV} = 100\text{ mV}$$

2.6 Ερωτήσεις Ασκήσεις

1. Ποια είναι τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή;
2. Ένας ΤΕ έχει απολαβή $A_v = 100.000$. Αν η τάση στην έξοδο του είναι 1 V , η τάση στην έξοδο του είναι 1 V , η τάση εισόδου του είναι
(α) $10\text{ }\mu\text{V}$ (β) 2 mV (γ) 10 mV (δ) 1 V

*Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές*

3. Ο ΤΕ 741 έχει
- (α) απολαβή τάσης 100.000
 - (β) σύνθετη αντίσταση εισόδου 2 ΜΩ
 - (γ) σύνθετη αντίσταση εξόδου 75 Ω
 - (δ) όλα τα παραπάνω
4. Ένας ΤΕ έχει απολαβή τάσης 200.000. Αν στην είσοδο του εφαρμοστεί μια τάση 12 μV να υπολογιστεί η τάση εξόδου
5. Τι είναι ο μη αναστρέφων ενισχυτής και ποια είναι τα χαρακτηριστικά του;
6. Τι είναι ο αναστρέφων ενισχυτής και ποια είναι τα χαρακτηριστικά του ;
7. Τι είναι το γινόμενο απολαβής τάσης επί το εύρος ζώνης και σε τι χρησιμεύει;
8. Τι είναι ο αφαιρέτης ενισχυτής και ποια τα χαρακτηριστικά του;
9. Πόσοι τύποι αρνητικής ανάδρασης χρησιμοποιούνται στους τελεστικούς ενισχυτές
- (α) ένας
 - (β) δύο
 - (γ) τρεις
 - (δ) τέσσερις
10. Ένας αθροιστής είναι ένα κύκλωμα στο οποίο
- (α) η τάση εξόδου είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων εισόδων.
 - (β) η τάση εξόδου είναι ίση με τη διαφορά των τάσεων των εισόδων
 - (γ) είναι δυνατόν κάθε είσοδος να έχει διαφορετική απολαβή τάσης
 - (δ) η τάση εξόδου είναι πάντα θετική
11. Ένας αφαιρέτης είναι ένα κύκλωμα
- (α) η τάση εξόδου είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων των εισόδων
 - (β) η τάση εξόδου είναι ίση με την διαφορά των τάσεων των εισόδων
 - (γ) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τυχαίοι συνδυασμοί αντιστάσεων στο κύκλωμα του
 - (δ) η τάση εξόδου είναι πάντα αρνητική
12. Ο μη αναστρέφων ενισχυτής έχει $R_1 = 19.8 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 200 \text{ }\Omega$ και $R_L = 10 \text{ k}\Omega$. Αν η απολαβή τάσης ανοικτού βρόχου είναι 40.000 να υπολογιστεί η απολαβή τάσης κλειστού βρόχου.

*Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές*

13. Ο αναστρέφων ενισχυτής έχει $R_1 = 49.8 \text{ k}\Omega$ και $R_2 = 200 \text{ }\Omega$. Αν η απολαβή τάσης ανοικτού βρόχου είναι 20.000 να υπολογίσετε την απολαβή τάσης κλειστού βρόχου.
14. Ο μη αναστρέφων ενισχυτής έχει $R_1 = 9.8 \text{ k}\Omega$ και $R_2 = 200 \text{ }\Omega$. Αν η απολαβή τάσης κλειστού βρόχου είναι 8000 να υπολογίσετε την απολαβή τάσης ανοικτού βρόχου.
15. Δίδεται πηγή τάσης 10 mV και θέλουμε να κατασκευάσουμε ενισχυτή ο οποίος θα δίνει στην έξοδο του τάση -200 mV. Να προσδιορίσετε το είδος του ενισχυτή και την απολαβή τάσης κλειστού βρόχου.
16. Ένας τελεστικός ενισχυτής έχει γινόμενο απολαβής τάσης επί εύρος ζώνης 10^6 Hz. Αν η απολαβή τάσης κλειστού βρόχου είναι 125 να υπολογίσετε το εύρος ζώνης του ενισχυτή.
17. Σε έναν αθροιστή ενισχυτή οι αντιστάσεις του κυκλώματος είναι $R_1 = 80 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 64 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 20 \text{ k}\Omega$ και $R_f = 400 \text{ k}\Omega$. Αν στις εισόδους του εφαρμόζονται τάσεις $V_1 = 15 \text{ mV}$, $V_2 = -25 \text{ mV}$, $V_3 = 8 \text{ mV}$ αντίστοιχα, να υπολογίσετε την τάση εξόδου.
18. Σε ένα αθροιστή ενισχυτή οι αντιστάσεις του κυκλώματος είναι $R_1 = 40 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 64 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 80 \text{ k}\Omega$, και $R_f = 400 \text{ k}\Omega$. Αν στις εισόδους του εφαρμόζονται τάσεις $V_1 = 15 \text{ mV}$, $V_3 = 8 \text{ mV}$, να υπολογίσετε την τάση, V_2 ώστε η τάση εξόδου να μηδενιστεί.
19. Σε ένα αφαιρέτη ενισχυτή οι αντιστάσεις του κυκλώματος είναι $R_1 = 150 \text{ k}\Omega$ και $R_2 = 12 \text{ k}\Omega$. Αν στη μη αναστρέφουσα είσοδο εφαρμόζεται τάση $V_1 = 40 \text{ mV}$ και στην αναστρέφουσα συνδεσμολογία τάση $V_2 = 22 \text{ mV}$ να υπολογίσετε την τάση στην έξοδο.

Θεωρητικό Μέρος
Τελεστικοί Ενισχυτές

20. Το κέρδος τάση ενός ΤΕ είναι ίσο με μονάδα στη/στο

- (α) Κρίσιμη συχνότητα
- (β) Συχνότητα μοναδιαίου κέρδους
- (γ) Συχνότητα της γεννήτριας
- (δ) Εύρος ζώνης ισχύος