

## 5. Εισαγωγή στους τελεστικούς ενισχυτές τάσης

### 5.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια δόθηκαν οι ορισμοί των βασικών χαρακτηριστικών των ηλεκτρικών στοιχείων και κυκλωμάτων και έγινε μια εκτεταμένη εισαγωγή στις μεθόδους ανάλυσης της λειτουργίας τους τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Τα όσα αναφέρθηκαν αποσκοπούσαν στην κατανόηση, πρώτον, ότι η λειτουργία ενός οποιουδήποτε κυκλώματος είναι κατ' αρχήν μια απλή φυσική διαδικασία μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, δεύτερον, ότι η διαδικασία υπόκειται σε συγκεκριμένους νόμους και, τρίτον, ότι η ποσοτική και ποιοτική αξιολόγησή της είναι αποτέλεσμα επεξεργασίας της πληροφορίας που εισάγεται στο κύκλωμα με τη διέγερσή του και αποδίδεται με την απόκρισή του. Με την έννοια αυτή, η διατύπωση των δύο κανόνων του Kirchhoff για την κατανομή της ενέργειας στα στοιχεία ενός κυκλώματος και, στη συνέχεια, της αρχής της ισοδυναμίας και των θεωρημάτων για την ισοδύναμη μελέτη της λειτουργίας στοιχείων και κυκλωμάτων αποτελούν μαζί με τα κατάλληλα πρότυπα της λειτουργίας τους το αναγκαίο σύνολο εργαλείων για την ανάλυση και κατανόηση της λειτουργίας κάθε είδους κυκλώματος.

Στο Κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την εφαρμογή των παραπάνω στη μελέτη της λειτουργίας μιας σειράς "πραγματικών" κυκλωμάτων, κύριο χαρακτηριστικό των οποίων είναι η χρήση, ως βασικού συστατικού τους στοιχείου, του **τελεστικού ενισχυτή** (operational amplifier). Όπως θα δούμε, ως *τελεστικός ενισχυτής* – ή, πληρέστερα, ως *τελεστικός ενισχυτής τάσης* – ορίζεται ένα προκατασκευασμένο και πλήρως ηλεκτρονικό κύκλωμα, που θεωρείται και χρησιμοποιείται ως αυτόνομο ηλεκτρονικό στοιχείο, με λειτουργία, η οποία στη βασική της μορφή ισοδυναμεί με αυτήν ενός ενισχυτή διαφοράς σημάτων τάσης με πολύ μεγάλο συντελεστή ενίσχυσης (απολαβή) τάσης.

Έτσι, μετά από μια σύντομη αναφορά στην εξέλιξη των τελεστικών ενισχυτών, παρουσιάζονται τα γενικά τους χαρακτηριστικά και δίνονται οι αντίστοιχοι ορισμοί της λειτουργίας και των βασικών χαρακτηριστικών του *ιδανικού* και του *πραγματικού* τελεστικού ενισχυτή *γενικής χρήσης* (general purpose operational amplifier). Στη συνέχεια, μελετάται η λειτουργία μιας σειράς απλών και βασικών, γραμμικών και μη, κυκλωμάτων, με σκοπό την ανάδειξη – έστω και σε εισαγωγικό επίπεδο – των βασικών πλεονεκτημάτων της χρήσης τελεστικών ενισχυτών στα σύγχρονα κυκλώματα, καθώς επίσης και των επιπτώσεων που έχει σε ορισμένα απ' αυτά η αναγκαία, όπως θα δούμε, χρήση *ανάδρασης*.

### 5.2 Χαρακτηριστικά των τελεστικών ενισχυτών

#### 5.2.1 Γενικά

Η έννοια του *τελεστικού ενισχυτή* (T.E.) πρωτοεμφανίστηκε κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> Παγκόσμιου Πολέμου, όταν έτοιμα κυκλώματα ηλεκτρονικών λυχνιών με μικρές σχετικά διαστάσεις χρησιμοποιήθηκαν ως δομικές μονάδες για την κατασκευή, έλεγχο και λειτουργία σύνθετων συστημάτων και διατάξεων. Η ονομασία των κυκλωμάτων αυτών περιέγραφε μια λειτουργία αντίστοιχη προς αυτήν ενός μαθηματικού τελεστή, καθώς η ίδια δομική μονάδα - κύκλωμα μπορούσε να πραγματοποιεί διαφορετικές μαθηματικές πράξεις με την απλή προσθήκη εξωτερικών στοιχείων (αντιστάσεων, πυκνωτών, κ.λπ.), γεγονός που πολύ σύντομα οδήγησε στην ανάπτυξη των πρώτων αναλογικών υπολογιστών της εποχής.

Η ανάπτυξη των T.E., από την εμφάνισή τους μέχρι τη σημερινή τους μορφή, σηματοδεύτηκε από δύο γεγονότα - ορόσημα στην ανάπτυξη της Ηλεκτρονικής. Το πρώτο ήταν η εφεύρεση, στα τέλη της δεκαετίας του 40, του διπολικού τρανζίστορ, μιας ημιαγωγικής διάταξης που άλλαξε πλήρως την κατεύθυνση ανάπτυξης της ηλεκτρονικής τεχνολογίας. Πράγματι, τα μέχρι τότε ηλεκτρονικά στοιχεία ελέγχου της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος σ' ένα κύκλωμα, δηλ. οι ηλεκτρονικές λυχνίες, άρχισαν να αντικαθίστανται από διατάξεις ημιαγωγών, όπως οι δίοδοι επαφής και τα τρανζίστορ, οπότε, με τη χρήση τέτοιων στοιχείων, οι νέοι T.E. διακρίνονταν πλέον από πολύ μικρότερες φυσικές διαστάσεις, πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία λειτουργίας και διάρκεια ζωής. Το δεύτερο και καθοριστικό γεγονός ήταν η κατασκευή το 1965 του πρώτου τελεστικού ενισχυτή μονολιθικής κατασκευής<sup>1</sup>. Το επίτευγμα αυτό άνοιξε το δρό-

<sup>1</sup> Πρόκειται για τον τελεστικό ενισχυτή μΑ709 που σχεδιάστηκε από τον B.Widlar και κατασκευάστηκε από την Fairchild Semiconductor.

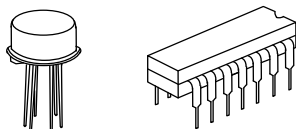
μο στην κατασκευή μεγάλης ποικιλίας ολοκληρωμένων, όπως λέγονται, *κυκλωμάτων* (Integrated Circuits) και οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνικών ολοκλήρωσης ολοένα και μεγαλύτερης κλίμακας με αποτέλεσμα, σήμερα, να κατασκευάζονται κυκλώματα εκατοντάδων χιλιάδων και εκατομμυρίων τρανζίστορ και διόδων<sup>1</sup>.

Τα τελευταία χρόνια, οι τελεστικοί ενισχυτές αποτελούν τα πιο διαδεδομένα ηλεκτρονικά εξαρτήματα για τη σχεδίαση και κατασκευή αναλογικών, αλλά και ψηφιακών κυκλωμάτων. Πράγματι, η δυνατότητα χρήσης τους σε πολλές και τελείως διαφορετικές μεταξύ τους εφαρμογές και οι επιδόσεις, που επιτυγχάνονται, σε συνδυασμό με την απλότητα, το μικρό μέγεθος και το χαμηλό κόστος, αποτελούν σημαντικότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα αντίστοιχα κυκλώματα διακριτών στοιχείων. Επί πλέον, η λειτουργία, οι επιδόσεις και τα χαρακτηριστικά κάθε κυκλώματος με Τ.Ε. καθορίζονται από τα εξωτερικά στοιχεία του, δηλ. είναι ανεξάρτητα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου Τ.Ε..

Το πλεονέκτημα αυτό είναι αποτέλεσμα των λειτουργικών χαρακτηριστικών των Τ.Ε. από την κατασκευή τους και έχει ως συνέπεια η λειτουργία κάθε κυκλώματος με Τ.Ε. να αναλύεται με απευθείας εφαρμογή των τεχνικών και κανόνων, που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, χωρίς να είναι αναγκαία η γνώση του εσωτερικού τους κυκλώματος και της λειτουργίας των διαφόρων τμημάτων του. Όπως θα δούμε παρακάτω, με τους κανόνες αυτούς και τη γνώση της μαθηματικής σχέσης, που περιγράφει τη λειτουργία του Τ.Ε., είναι δυνατόν να μελετηθεί η λειτουργία ενός μεγάλου αριθμού γραμμικών και μη γραμμικών κυκλωμάτων, δίνοντας με τον τρόπο αυτό, μια πιο "φιλική" εικόνα για την Ηλεκτρονική και τα κυκλώματά της.

## 5.2.2 Τυπική μορφή, λειτουργία και σύμβολο Τ.Ε.

Ο Τ.Ε. είναι ένα πλήρες ηλεκτρονικό κύκλωμα, το οποίο, στην τυπική του μορφή, αποτελείται από μερικές δεκάδες έως εκατοντάδες στοιχεία, όπως τρανζίστορ, διόδοι, αντιστάσεις και, λιγότερο, πυκνωτές, και έχει τη λειτουργία ενός ενισχυτή διαφοράς σημάτων τάσης με πολύ μεγάλο συντελεστή ενίσχυσης. Με κατάλληλη τεχνική, τα στοιχεία αυτά αναπτύσσονται ως ενιαίο κύκλωμα σ' ένα λεπτό φύλλο κρυστάλλου πυριτίου με διαστάσεις  $<1\text{mm}^2$  (*μονολιθική* κατασκευή) το οποίο, στη συνέχεια, τοποθετείται – μόνο του ή και με άλλα ίδια – σ' ένα μικρό πλαστικό κυλινδρικό ή παραλληλεπίπεδο περίβλημα. Από το περίβλημα αυτό, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1, προεξέχουν μεταλλικοί ακροδέκτες, κάθε ένας από τους οποίους συνδέεται εσωτερικά με ένα συγκεκριμένο σημείο του κυκλώματος, όπως, π.χ., τα άκρα εισόδου και εξόδου, τα σημεία εφαρμογής των τάσεων τροφοδοσίας, καθώς και σημεία σύνδεσης πρόσθετων εξωτερικών στοιχείων κ.λπ.



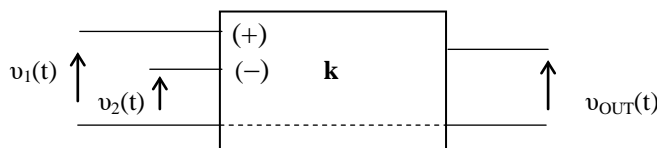
Σχήμα 5.1. Εξωτερική μορφή Τ.Ε.

Στην πράξη, ο Τ.Ε. είναι ένα αυτόνομο ηλεκτρονικό εξάρτημα, το οποίο χρησιμοποιείται ως δομική μονάδα διαφόρων τύπων απλών ή σύνθετων κυκλωμάτων και διατάξεων και, συνεπώς, για λόγους απλότητας θεωρείται σαν ένα σύνθετο ενεργό ηλεκτρονικό στοιχείο με ιδιαίτερο σύμβολο και λειτουργία, η οποία εξετάζεται στο πλαίσιο των κανόνων και τεχνικών, που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3.

Έτσι, η σχηματική παράσταση της λειτουργίας του Τ.Ε. ως ενισχυτή διαφοράς τάσεων μπορεί να έχει τη μορφή ενός σύνθετου τετράπολου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2, για το οποίο θα ισχύει:

$$v_{\text{OUT}}(t) = k \cdot [v_1(t) - v_2(t)] \quad (5.1)$$

όπου  $k$  ( $\gg 1$ ) είναι ο αντίστοιχος συντελεστής ενίσχυσης.

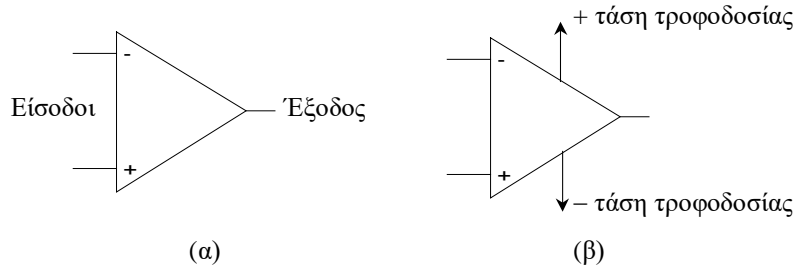


Σχήμα 5.2. Σχηματική παράσταση της λειτουργίας Τ.Ε. ως ενισχυτή διαφοράς σημάτων τάσεων.

<sup>1</sup> Ξεκινώντας από τα κυκλώματα μικρής και μέσης κλίμακας ολοκλήρωσης της δεκαετίας του 70, ήδη, από τις αρχές της δεκαετίας του 80, αναπτύχθηκαν κυρίως ψηφιακά κυκλώματα μεγάλης και, πολύ γρήγορα, πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (Large Scale και Very Large Scale Integration: LSI, VLSI).

Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.3.2.1 για την DC τάση τροφοδοσίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, είναι φανερό ότι κάθε Τ.Ε. ως αυτόνομο ηλεκτρονικό κύκλωμα εκτός από τους ακροδέκτες για τις δύο εισόδους και την έξοδο των αντίστοιχων σημάτων τάσης, που φαίνονται στο σχήμα 5.2, πρέπει να έχει και δύο πρόσθετους ακροδέκτες και για την ή τις τάσεις τροφοδοσίας του.

Στο σχήμα 5.3 φαίνονται οι δύο συνήθεις τρόποι συμβολισμού των τελεστικών ενισχυτών. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 5.3(α) δίνεται η απλή μορφή του σύμβολου ενός Τ.Ε. με τους βασικούς ακροδέκτες εισόδου και εξόδου του, ενώ η πλήρης μορφή του, που περιλαμβάνει και τους ακροδέκτες της τάσης τροφοδοσίας, φαίνεται στο σχήμα 5.3(β). Οι πέντε αυτοί ακροδέκτες αποτελούν τον ελάχιστο αριθμό ακροδεκτών ενός τυπικού Τ.Ε. γενικής χρήσης<sup>1</sup>, ενώ υπάρχουν τελεστικοί ενισχυτές με πρόσθετους ακροδέκτες, που προορίζονται για τη σύνδεση στοιχείων για τον έλεγχο και τη βελτίωση συγκεκριμένων παραμέτρων της λειτουργίας τους.

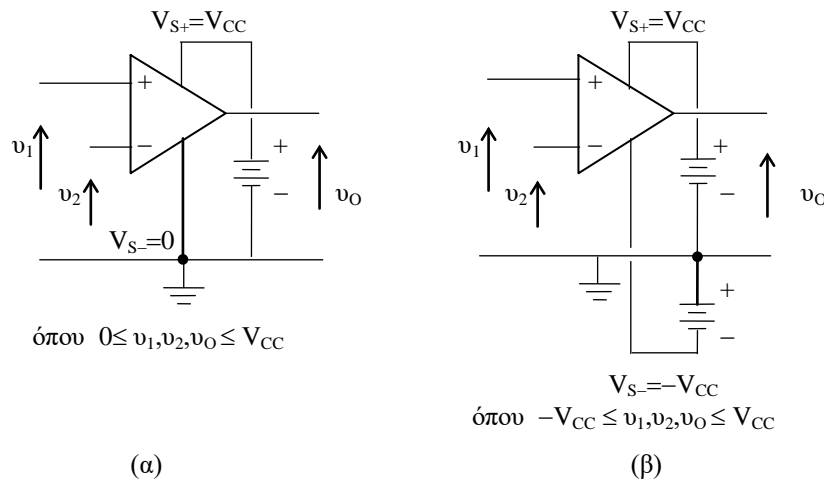


Σχήμα 5.3. Σύμβολο Τ.Ε.: (α) απλή μορφή και (β) τυπική μορφή με ακροδέκτες τροφοδοσίας.

### 5.2.3 Ορισμοί τάσεων και ρευμάτων στους Τ.Ε.

Ο προσδιορισμός της θετικής φοράς τόσο του σήματος τάσης  $v_o(t)$  στην έξοδο ενός Τ.Ε., όσο και των σημάτων τάσεων που εφαρμόζονται σε μια ή και τις δύο εισόδους του, γίνεται κατά τα γνωστά ως προς τον κόμβο αναφοράς δηλ. τη γείωση του συνολικού κυκλώματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4. Ως προς τον ίδιο κόμβο καθορίζεται επίσης και η σχετική πολικότητα των τάσεων τροφοδοσίας, κατ' αρχήν, του εσωτερικού κυκλώματος του Τ.Ε. και, τελικώς, ολόκληρου του κυκλώματος στο οποίο συμμετέχει.

Έτσι, με τις ενδείξεις ( $V_{S+}$ ) και ( $V_{S-}$ ), που στους ακροδέκτες τροφοδοσίας ενός Τ.Ε., υποδεικνύονται τα σημεία σύνδεσης της θετικότερης και της αρνητικότερης, αντιστοίχως, τάσης τροφοδοσίας του, ενώ ο τρόπος εφαρμογής, το πρόσημο και η τιμή των DC αυτών τάσεων προσδιορίζει ουσιαστικά και την επιτρεπόμενη μέγιστη (θετική ή αρνητική) στιγμιαία τιμή των σημάτων τάσης στην είσοδο και έξοδο του Τ.Ε..



Σχήμα 5.4. Ορισμός σημάτων τάσης εισόδου και εξόδου σε Τ.Ε. και σύνδεση πηγών για (α) μονοπολική και (β) διπολική τροφοδοσία.

<sup>1</sup> Σήμερα, Τ.Ε. γενικής χρήσης θεωρούνται μόνον οι Τ.Ε. τάσης, καθώς τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και οι λεγόμενοι Τ.Ε. διαγωγιμότητας (transconductance amplifiers), που χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα με λειτουργία την ενίσχυση ρευμάτων και όχι τάσεων (κυκλώματα ρεύματος ή "τρόπου" ρεύματος: current mode circuits).

Πράγματι, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4(α), στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχει μια μόνο πηγή τάσης τροφοδοσίας, δηλ. – όπως λέγεται – χρησιμοποιείται *μονοπολική* τροφοδοσία, η σύνδεση των αντίστοιχων ακροδεκτών του Τ.Ε. γίνεται σύμφωνα με την ένδειξή τους: ο ακροδέκτης ( $V_{S+}$ ) συνδέεται στο θετικό άκρο της πηγής και ο ακροδέκτης ( $V_{S-}$ ) στο αρνητικό, ενώ ένας απ' αυτούς συνδέεται υποχρεωτικά στη γείωση του κυκλώματος<sup>1</sup>. Αν υπάρχουν δύο πηγές συνδεδεμένες με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα 5.4(β), δηλ. σε σειρά μεταξύ τους και με το κοινό τους σημείο στη γείωση, η τροφοδοσία λέγεται *διπολική* και επιτρέπει την εμφάνιση θετικών και αρνητικών τιμών τάσης ως προς τη γείωση<sup>2</sup>. Στο σημείο αυτό επαναλαμβάνεται ότι οι τιμές των τάσεων τροφοδοσίας (π.χ. οι τιμές  $+V_{CC}$  και  $-V_{CC}$ ) αποτελούν τις μέγιστες επιτρεπόμενες στιγμιαίες τιμές της τάσης, που μπορεί να εμφανιστεί (ως προς τη γείωση) σε οποιοδήποτε ακραίο ή εσωτερικό σημείο του κυκλώματος κατά τη λειτουργία του.

Η ένταξη και λειτουργία ενός Τ.Ε σε οποιασδήποτε μορφής κύκλωμα έχει ως αποτέλεσμα οι ακροδέκτες του να αποτελούν κλάδους του κυκλώματος αυτού και να διαρρέονται από αντίστοιχα ρεύματα. Με την έννοια αυτή ο Τ.Ε., ως αυτόνομο ηλεκτρονικό στοιχείο ενός συνολικού κυκλώματος, μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας *κόμβος ρευμάτων* που εισέρχονται ή εξέρχονται απ' αυτόν και, συνεπώς, για τον "κόμβο" αυτό θα ισχύει ο αντίστοιχος κανόνας του Kirchhoff.

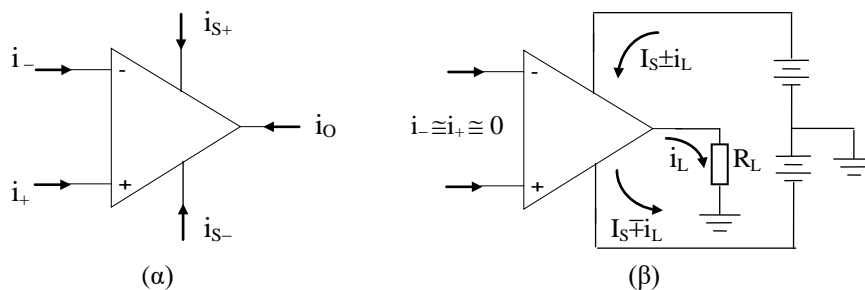
Έτσι, αν  $i_+$  και  $i_-$  είναι τα ρεύματα των δύο εισόδων,  $i_O$ , το ρεύμα εξόδου και,  $i_{S+}$  και  $i_{S-}$ , τα ρεύματα στους ακροδέκτες τροφοδοσίας ενός Τ.Ε, τότε, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.5(α), θα ισχύει:

$$i_+ + i_- + i_O + i_{S+} + i_{S-} = 0 \quad (5.2)$$

όπου, προφανώς, η φορά των ρευμάτων που εισέρχονται στον "κόμβο – Τ.Ε" λαμβάνεται ως θετική ανεξάρτητα από τη θεωρούμενη θετική τους φορά τους στο αντίστοιχο κύκλωμα. Επίσης επειδή, όπως θα δούμε παρακάτω, τα ρεύματα των δύο εισόδων είναι πρακτικώς μηδενικά, η σχέση (5.2) παίρνει τη μορφή:

$$i_O + i_{S+} + i_{S-} = 0 \quad (5.3)$$

που δείχνει ότι το ρεύμα εξόδου του Τ.Ε. ή, αλλιώς, το ρεύμα που διαρρέει ένα φορτίο  $R_L$  στην έξοδο του Τ.Ε. θα είναι ίσο προς τη διαφορά των ρευμάτων τροφοδοσίας του, καθώς στην πραγματικότητα τα ρεύματα  $i_{S+}$  και  $i_{S-}$  έχουν πάντοτε την ίδια φορά [βλ. σχήμα 5.5(β) όπου έχουν τεθεί:  $i_L = -i_O$ ,  $i_{S+} = I_S \pm i_L$  και  $i_{S-} = -I_S \pm i_L$ ].



**Σχήμα 5.5.** (α) Θεώρηση του Τ.Ε. ως κόμβου των ρευμάτων των ακροδεκτών του σ' ένα κύκλωμα (η θετική φορά ορίζεται προς τον Τ.Ε.) (β) απεικόνιση της σχέσης (5.3) όταν  $i_L = -i_O$ ,  $i_{S+} = I_S \pm i_L$  και  $i_{S-} = -I_S \pm i_L$ .

### 5.3 Βασική λειτουργία και χαρακτηριστικά των Τ.Ε..

Η γενική σχέση (5.1) που ορίζει τη λειτουργία ενός τελεστικού ενισχυτή τάσης μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$v_O = A \cdot (v_+ - v_-) \quad (5.4)$$

όπου με  $v_O$  συμβολίζεται το σήμα τάσης στην έξοδο,  $v_+$  και  $v_-$  είναι τα σήματα τάσης που εφαρμόζονται στις εισόδους με τα σημεία (+) και (-), αντίστοιχως και  $A$  είναι ο **συντελεστής ενίσχυσης τάσης** ή, απλώς, **ενίσχυση** ή **απολαβή τάσης** του Τ.Ε..

<sup>1</sup> Συνήθως, στην περίπτωση μονοπολικής τροφοδοσίας, στη γείωση συνδέεται ο αρνητικός πόλος της πηγής τροφοδοσίας με αποτέλεσμα όλες οι τάσεις στο κύκλωμα να εμφανίζονται θετικές ως προς τη γείωσή του. Αυτό όμως δεν αποκλείει και το αντίθετο, οπότε οι τάσεις θα θεωρούνται, αντίστοιχα, ως αρνητικές.

<sup>2</sup> Κατά τη διπολική τροφοδοσία των Τ.Ε. αλλά και γενικότερα κάθε ηλεκτρονικού κυκλώματος δεν απαιτείται οι πηγές να παρέχουν ίση τάση.

Οι δύο εισόδοι (+) και (-) εκτός από το πρόσημο που τις συμβολίζει έχουν και διαφορετική ονομασία που σχετίζεται με την αλλαγή ή όχι του πρόσημου του σήματος εξόδου του Τ.Ε. που εμφανίζεται κατά τη λειτουργία του, όταν η τάση που εφαρμόζεται σε μια απ' αυτές είναι μηδενική. Πράγματι, όπως φαίνεται αμέσως,

$$\begin{aligned} \text{όταν } v_+ = 0 \text{ τότε } v_o = -A \cdot v_- \\ v_- = 0 \text{ τότε } v_o = A \cdot v_+ \end{aligned} \quad (5.5)$$

οπότε η είσοδος (-) ονομάζεται **αναστρέφουσα είσοδος** ή **είσοδος αναστροφής**<sup>1</sup> (ή αλλαγής προσήμου) και η είσοδος (+), **μη αναστρέφουσα** ή **είσοδος μη αναστροφής**.

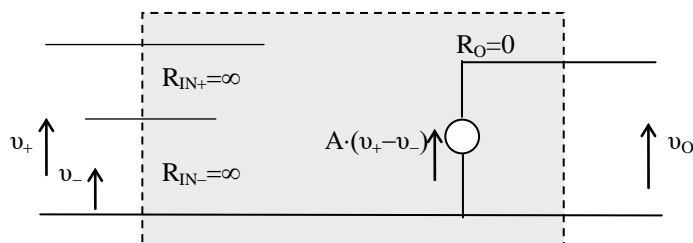
Κατά τη λειτουργία ενός Τ.Ε., κάθε μια από τις εισόδους του, όπως και η έξοδος του, χαρακτηρίζεται από μια τιμή αντίστασης, που ορίζεται κατά τα γνωστά μεταξύ των αντίστοιχων ζευγών ακροδεκτών. Αντίσταση ορίζεται επίσης και μεταξύ των δύο εισόδων του, η οποία ονομάζεται *διαφορική αντίσταση εισόδου*. Οι τιμές όλων των αντιστάσεων αυτών καθώς και η τιμή της ενίσχυσης A τόσο για τα συνεχή (DC), όσο και για τα (AC) σήματα – με την αντίστοιχη εξάρτηση από τη συχνότητά τους – αποτελούν βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός Τ.Ε. και διαφοροποιούν τις επιδόσεις των διαφόρων τύπων Τ.Ε. που κατασκευάζονται.

Γενικότερα, τώρα, η θεώρηση του τελεστικού ενισχυτή ως αυτοτελούς ηλεκτρονικού στοιχείου με συγκεκριμένη λειτουργία επιτρέπει τον ορισμό και την αντίστοιχη μελέτη – σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.6.5.1 – του *ιδανικού* και του *πραγματικού* Τ.Ε.. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζονται τα αντίστοιχα λειτουργικά χαρακτηριστικά των Τ.Ε. βάσει των οποίων ερμηνεύεται, πρώτον, η δυνατότητα χρήσης τους σε διαφορετικά κυκλώματα και, δεύτερον, το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των κυκλωμάτων αυτών θα είναι θεωρητικώς – αλλά και πρακτικώς – ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου κάθε φορά Τ.Ε..

### 5.3.1 Ιδανικός Τ.Ε.

Ο **ιδανικός Τ.Ε.** είναι ένας *ιδανικός* ενισχυτής διαφοράς σημάτων τάσης με άπειρο συντελεστή ενίσχυσης, άπειρη αντίσταση σε κάθε είσοδο και μηδενική αντίσταση εξόδου, δηλ.  $A=\infty$ ,  $R_{IN+}=\infty$ ,  $R_{IN-}=\infty$  και  $R_O=0$ .

Η λειτουργία του ιδανικού Τ.Ε. ορίζεται από τη σχέση (5.4) και ισοδυναμεί με τη λειτουργία μιας ιδανικής πηγής τάσης εξαρτημένης από τη διαφορά δύο εφαρμοζόμενων σημάτων τάσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6, και, προφανώς, ανεξάρτητη από τη συχνότητα των εφαρμοζόμενων σημάτων τάσης.



**Σχήμα 5.6.** Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού τελεστικού ενισχυτή.

Ο ορισμός των χαρακτηριστικών του ιδανικού Τ.Ε. και της λειτουργίας του διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό την ανάλυση κάθε κυκλώματος με Τ.Ε., καθώς, όπως αποδεικνύεται, η λειτουργία του Τ.Ε. σ' ένα τέτοιο κύκλωμα παραμένει ανεπηρέαστη από την παρουσία των υπόλοιπων στοιχείων του. Πράγματι, εξετάζοντας τη σημασία κάθε χαρακτηριστικού του ιδανικού Τ.Ε. και βοηθούμενοι από τη μορφή του ισοδύναμου κυκλώματος του σχήματος 5.6, προκύπτουν τα εξής απλά συμπεράσματα:

- η άπειρη αντίσταση των εισόδων του ιδανικού Τ.Ε. έχει ως συνέπεια *το ρεύμα κάθε εισόδου να είναι μηδέν*, δηλ.  $i_{IN+}=0$  και  $i_{IN-}=0$ , οπότε κάθε είσοδος του αποτελεί ιδανικό φορτίο για οποιαδήποτε πηγή ή κύκλωμα συνδέεται σ' αυτήν,
- η μηδενική αντίσταση εξόδου σημαίνει ότι υπάρχει *πλήρης ανεξαρτησία της λειτουργίας του ιδανικού Τ.Ε. και της παρεχόμενης απ' αυτόν τάσης σε οποιασδήποτε τιμής ωμική ή σύνθετη αντίσταση φορτίου που συνδέεται στην έξοδό του,*

<sup>1</sup> Στην παράγραφο 2.8.1 αναφέρθηκε ότι η πράξη της αναστροφής ενός σήματος, δηλ. της εισαγωγής διαφοράς φάσης 180° που ισοδυναμεί με αλλαγή πρόσημου, αποκαλείται συχνά και ως *αντιστροφή*, που μαθηματικώς είναι λάθος.

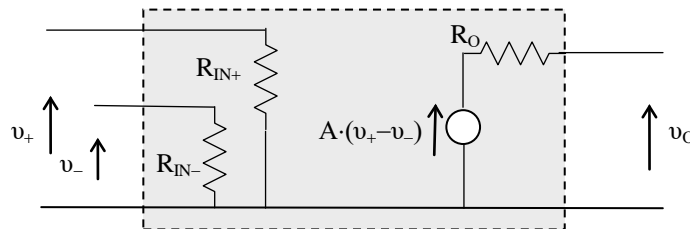
- η λειτουργία του ιδανικού Τ.Ε., όντας ανεξάρτητη από τη συχνότητα των σημάτων του (άπειρο εύρος συχνοτήτων), χαρακτηρίζεται από μηδενικό χρόνο απόκρισης και μηδενική διαφορά φάσης μεταξύ σημάτων εισόδου και εξόδου,

Συνεπώς, σε συνδυασμό των παραπάνω με την άπειρη ενίσχυση τάσης του Τ.Ε., ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών ενός κυκλώματος, στο οποίο ο χρησιμοποιούμενος Τ.Ε. θεωρείται ιδανικός, γίνεται αποκλειστικά από τα υπόλοιπα στοιχεία και τον τρόπο σύνδεσής τους στο συγκεκριμένο κύκλωμα.

### 5.3.2 Πραγματικός Τ.Ε.

Το τελικό συμπέρασμα της προηγούμενης παραγράφου αποτελεί, προφανώς, το "απόλυτο" πλεονέκτημα της χρήσης ενός Τ.Ε. ως αυτόνομου ηλεκτρονικού στοιχείου σ' ένα κύκλωμα. Βεβαίως, κάτι τέτοιο δεν είναι απολύτως υλοποιήσιμο, προσεγγίζεται όμως, σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό καθώς, ακόμα και οι πρώτοι πραγματικοί Τ.Ε. σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με ακριβώς αυτό το στόχο και σκοπό.

Σήμερα, συγκρινόμενος με τον ιδανικό Τ.Ε., ο τυπικός πραγματικός Τ.Ε. είναι ένας ενισχυτής διαφοράς τάσεων με συντελεστή ενίσχυσης τάσης  $A$  της τάξης από  $10^5$  έως  $10^6$ , αντίσταση εισόδων της τάξης των  $10^{12} \Omega$  και αντίσταση εξόδου μικρότερη των  $50 \Omega$ , χαρακτηριστικά που αποτελούν μια πολύ καλή προσέγγιση των χαρακτηριστικών του ιδανικού Τ.Ε.. Η προσέγγιση όμως αυτή ισχύει και διατηρείται μόνο για μια μικρή περιοχή χαμηλών συχνοτήτων – από 0 Hz (DC σήματα) έως π.χ. 100 Hz – καθώς υπάρχει μια σαφής εξάρτηση των τιμών τους από τη συχνότητα. Έτσι, οι τιμές των χαρακτηριστικών των πραγματικών Τ.Ε. ορίζονται συνήθως για DC σήματα και, ακριβώς, για το λόγο αυτό, οι πραγματικοί Τ.Ε. γενικής χρήσης χαρακτηρίζονται ως *DC ενισχυτές*<sup>1</sup>. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός τυπικού πραγματικού Τ.Ε. δίνεται στο σχήμα 5.7, όπου, προφανώς, με  $R_{IN+}$ ,  $R_{IN-}$ ,  $R_O$  και  $A$  συμβολίζονται οι DC τιμές των αντίστοιχων μεγεθών του.



Σχήμα 5.7. Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού τελεστικού ενισχυτή.

Εξετάζοντας την εξάρτηση των χαρακτηριστικών μεγεθών των πραγματικών Τ.Ε. από τη συχνότητα, διαπιστώνεται ότι η τιμή της ενίσχυσης τάσης  $A$  των περισσότερων πραγματικών Τ.Ε. μειώνεται κατά 20 dB ανά δεκάδα αύξησης της συχνότητας, καθώς επίσης μείωση εμφανίζουν και οι τιμές των αντιστάσεων των δύο εισόδων, ενώ, αντιστρόφως, η αντίσταση εξόδου τους αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας.

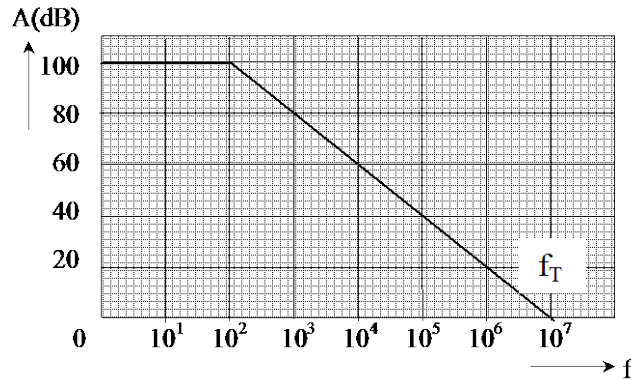
Συνήθως, η εξάρτηση των χαρακτηριστικών μεγεθών ενός πραγματικού Τ.Ε. από τη συχνότητα καθορίζεται από την τοπολογία του εσωτερικού του κυκλώματος και οφείλεται είτε στις παρασιτικές χωρητικότητες των διαφόρων (εσωτερικών) στοιχείων του που οδηγούν στην εμφάνιση αναπόφευκτων συνδυασμών ωμικών και χωρητικών αντιστάσεων με τη μορφή χαμηλοπερατών ή υψηλοπερατών φίλτρων (τυπικά κυκλώματα RC), είτε στην επιβεβλημένη χρήση πυκνωτών σε επιλεγμένα σημεία του για την εξασφάλιση ευσταθούς λειτουργίας ανεξαρτήτως των χαρακτηριστικών του όποιου εξωτερικού κυκλώματος στο οποίο συμμετέχει.

Έτσι, ο συντελεστής ενίσχυσης τάσης  $A$ , ή, αλλιώς, η *απολαβή* ή το *κέρδος τάσης*  $A$  (voltage gain), είναι μια συνάρτηση της συχνότητας που συμβολίζεται ως  $A(\omega)$  ή  $A(f)$  και παριστάνει το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς του Τ.Ε. στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας, δηλ. σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.4.2.2 θα είναι:

$$A(jf) = \frac{A_0}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

<sup>1</sup> Ο χαρακτηρισμός των Τ.Ε. ως DC ενισχυτών υποδεικνύει την δυνατότητα λειτουργίας τους με απευθείας εφαρμογή στις εισόδους του DC σημάτων τάσεων και ρευμάτων. Όμως, μια τέτοια εφαρμογή DC σημάτων στην είσοδο ενός κυκλώματος, όπως και η απευθείας σύνδεση διαφορετικών κυκλωμάτων ή τμημάτων ενός κυκλώματος, που λέγεται *DC σύνδεση* ή *ζεύξη*, θα πρέπει να έχει προβλεφθεί εξαρχής διότι αλλιώς μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή τους.

Στο σχήμα 5.8 δίνεται η τυπική μορφή του αντίστοιχου συχνοτικού διαγράμματος, όπου, όπως φαίνεται, η απολαβή τάσης διατηρείται σταθερή και ίση προς  $A$  (σε dB) για συχνότητες από 0 έως  $f_C$ , π.χ.  $f_C=100$  Hz, ενώ, για μεγαλύτερες συχνότητες, η μείωσή της κατά 20 dB/dec οδηγεί σε μια τιμή συχνότητας  $f_T$  στην οποία ισχύει<sup>1</sup>  $A(f_T)=1$ . Η συχνότητα αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος του συγκεκριμένου κάθε φορά Τ.Ε. και ονομάζεται *συχνότητα μοναδιαίας απολαβής*.



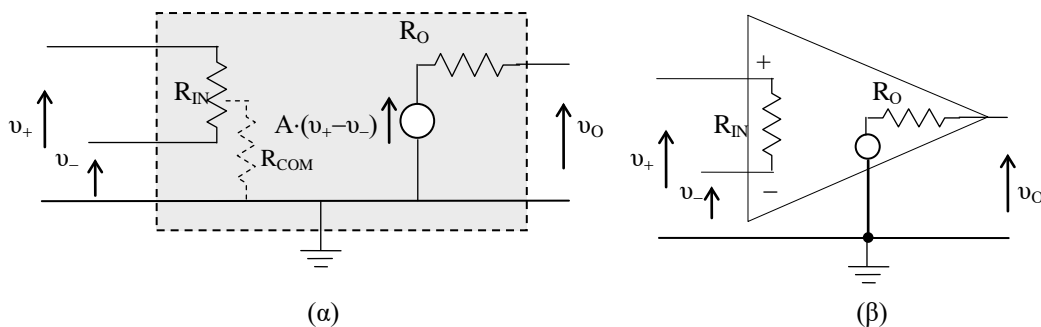
**Σχήμα 5.8.** Τυπική μορφή συχνοτικού διαγράμματος πλάτους πραγματικού τελεστικού ενισχυτή.

Στην πλειονότητα των Τ.Ε. γενικής χρήσης, η συχνότητα θάλασης  $f_C$  έχει μικρή τιμή (10-100 Hz), οπότε η συχνότητα  $f_T$  λέγεται και *εύρος ζώνης μοναδιαίας απολαβής* και είναι ίση με ένα άλλο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέγεθος που ονομάζεται *γινόμενο κέρδους-εύρους ζώνης* (Gain  $\times$  BandWidth: GBW) και από το οποίο προκύπτει ότι:

$$GBW \cong f_T = A_0 \cdot f_C = A(f) \cdot f \quad (5.6)$$

δηλ. αν  $A_0$  είναι η απολαβή του Τ.Ε. για το *εύρος διέλευσης* από 0 έως  $f_C$  τότε μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και η τιμή της απολαβής του  $A(f)$  σε μια οποιαδήποτε συχνότητα  $f$  στο διάστημα  $f_C < f < f_T$ .

Τέλος, οι δύο αντιστάσεις εισόδου  $R_{IN+}$  και  $R_{IN-}$ , που φαίνονται στο σχήμα 5.7, αποτελούν την ισοδύναμη παράσταση της αντίστασης<sup>2</sup> που "φαίνεται" μεταξύ κάθε εισόδου και γείωσης σε σχέση με το αντίστοιχο τμήμα του εσωτερικού κυκλώματος του Τ.Ε.. Για το λόγο αυτό, πολλές φορές στο ισοδύναμο κύκλωμα ενός πραγματικού Τ.Ε., ως αντίσταση εισόδου  $R_{IN}$  του θεωρείται η *διαφορική αντίσταση* μεταξύ των δύο εισόδων του, η "ύπαρξη" της οποίας σχετίζεται με μια αντίσταση  $R_{COM}$  προς τη γείωση και για την οποία, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9(α), όταν σχεδιάζεται, χρησιμοποιείται, διακεκομμένη γραμμή.



**Σχήμα 5.9.** (α) Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού τελεστικού ενισχυτή με απεικόνιση της διαφορικής αντίστασης μεταξύ των δύο εισόδων του και της κοινής τους αντίστασης προς τη γείωση και (β) αντίστοιχος συμβολισμός Τ.Ε..

### 5.3.3 Διερεύνηση της λειτουργίας των Τ.Ε..

Όπως αναφέρθηκε ήδη, στην τυπική του μορφή ο Τ.Ε. είναι ένα κύκλωμα ενίσχυσης τάσης με δύο εισόδους και μία έξοδο, η βασική λειτουργία του οποίου, όπως ορίζεται και περιγράφεται από τη γενική σχέση (5.4), είναι η ενίσχυση της διαφοράς των σημάτων τάσης των εισόδων του. Όμως, όπως είδαμε με τις σχέσεις (5.5),

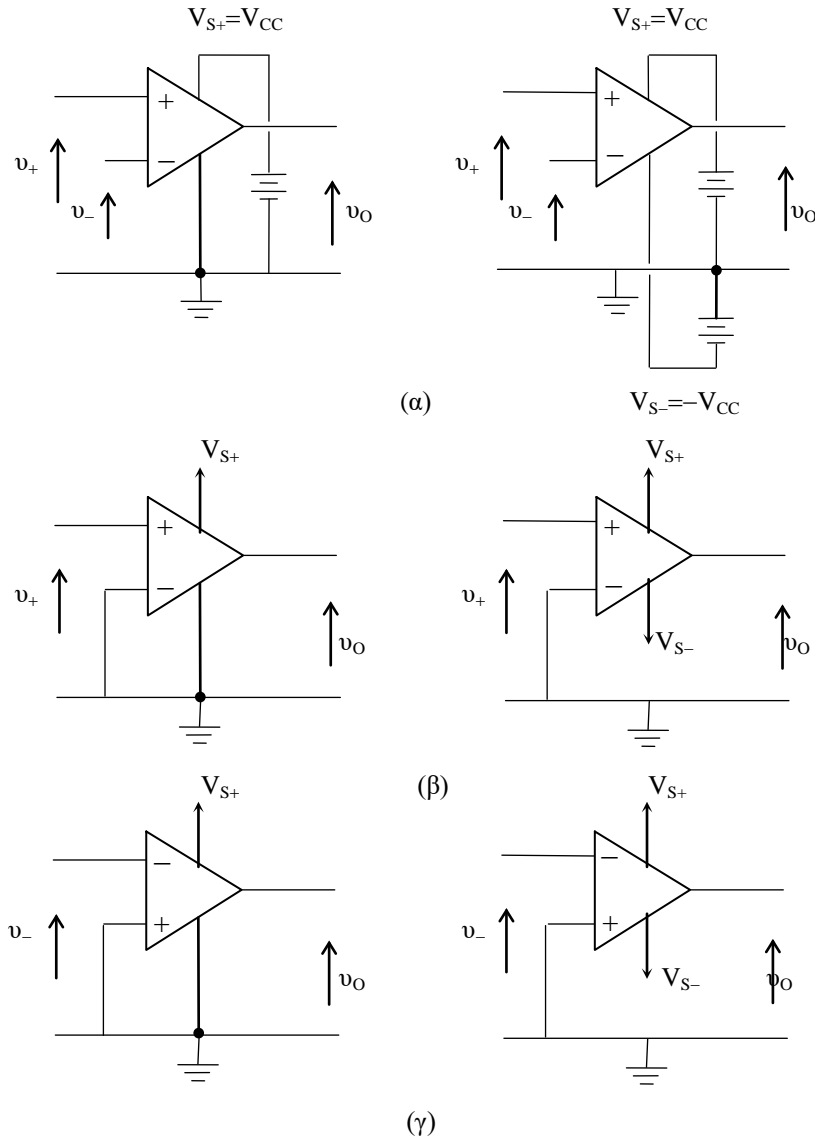
<sup>1</sup> Δηλ.  $|A(jf_T)|=1$  και αντιστοίχως  $|A(jf_C)|=A_0/\sqrt{2}$ .

<sup>2</sup> Εννοείται ότι αν ληφθεί υπόψη η συχνοτική τους εξάρτηση, τότε οι αντιστάσεις αυτές, όπως και η αντίσταση εξόδου του πραγματικού Τ.Ε. θα θεωρούνται, κατά τα γνωστά, ως μιγαδικά μεγέθη.

όταν η τάση σε μια από τις δύο εισόδους του θεωρείται ίση προς το μηδέν, π.χ. όταν μια απ' τις δύο αυτές εισόδους είναι συνδεδεμένη στη γείωση του κυκλώματος, η λειτουργία του Τ.Ε. παίρνει τη μορφή της απλής ενίσχυσης ενός σήματος τάσης.

Έτσι, υπάρχουν δύο χαρακτηριστικοί τρόποι λειτουργίας των Τ.Ε. ως αποτέλεσμα του τρόπου σύνδεσής τους σ' ένα κύκλωμα. Ο πρώτος, λέγεται **διαφορικός τρόπος** (differential mode) ή *διαφορική λειτουργία* και αναφέρεται στην ενίσχυση της διαφοράς σημάτων τάσης σύμφωνα με τη σχέση (5.4), ενώ, ο δεύτερος, που λέγεται **απλός τρόπος** (single mode), αναφέρεται στην *απλή λειτουργία* του, δηλ. την ενίσχυση – με ή χωρίς αναστροφή – ενός μόνο σήματος τάσης σύμφωνα με μια από τις σχέσεις (5.5).

Στο σχήμα 5.10 δίνονται παραστατικά οι τρόποι σύνδεσης ενός Τ.Ε. για διαφορική και απλή λειτουργία, ενώ υπενθυμίζεται ότι οι μέγιστες θετικές ή αρνητικές τιμές των σημάτων τάσης στις εισόδους και στην έξοδό του, καθορίζονται πάντοτε από τις τιμές τάσης της μονοπολικής ή διπολικής τροφοδοσίας του.



**Σχήμα 5.10.** Σύνδεση Τ.Ε. με μονοπολική (αριστερά) και διπολική τροφοδοσία (δεξιά): (α) για διαφορικό τρόπο λειτουργίας:  $v_o = A \cdot (v_+ - v_-)$ , (β) για απλό τρόπο λειτουργίας χωρίς αναστροφή:  $v_o = A \cdot v_+$  και (γ) για απλό τρόπο με αναστροφή,  $v_o = -A \cdot v_-$ .

Η βασική σχέση (5.4) γράφεται γενικώς ως:

$$v_o(t) = v_d(t) \cdot A \tag{5.7}$$

όπου με  $v_d(t)$  παριστάνεται το ουσιαστικό σήμα εισόδου στον Τ.Ε., δηλ. η διαφορά δυναμικού ( $v_+ - v_-$ ) μεταξύ των δύο εισόδων του. Από την έκφραση αυτή φαίνεται ότι ο συνδυασμός των στιγμιαίων τιμών του σήμα-



τος  $v_d(t)$  με την τάξη μεγέθους του συντελεστή ενίσχυσης τάσης  $A$  – τόσο για ιδανικό, όσο και για πραγματικό Τ.Ε. – οδηγεί στον προσδιορισμό μιας οριακής τιμής της διαφοράς των τάσεων των δύο εισόδων,  $v_{dk}$ , για την οποία, όταν  $|v_d(t)| \geq |v_{dk}|$ , το σήμα τάσης  $v_o$  στην έξοδο του Τ.Ε. θα παίρνει τη μέγιστη (θετικότερη ή αρνητικότερη) τιμή του.

Πράγματι, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 5.2.3, όταν η (θετική και αρνητική) τάση τροφοδοσίας του Τ.Ε.<sup>1</sup> είναι  $\pm V_S$ , θα ισχύει:

$$\max|v_o(t)| \leq |V_S| \quad (5.8)$$

οπότε και η σχέση (5.7) για την τυπική λειτουργία ενός Τ.Ε., είτε ιδανικού, είτε πραγματικού – για σήματα συχνοτήτων τέτοιων ώστε να ισχύει  $A(\omega) = A$  – θα εκφράζεται ως:

$$v_o(t) = \begin{cases} v_d(t) \cdot A & \text{αν } |v_d| < |v_{dk}| \\ |V_S| & \text{αν } |v_d| \geq |v_{dk}| \end{cases} \quad \text{όπου } |v_{dk}| = |V_S| / A \quad (5.9)$$

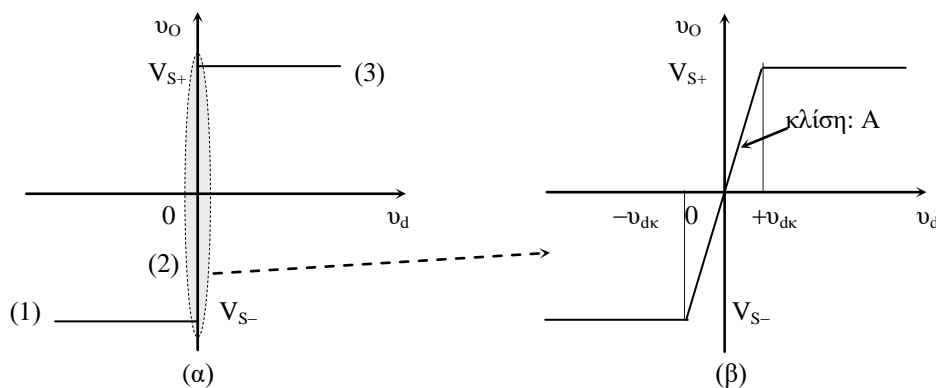
Η μαθηματική αυτή διατύπωση αποτελεί την αναλυτική έκφραση της *χαρακτηριστικής συνάρτησης τάσης εισόδου-εξόδου* ενός Τ.Ε. και, μάλιστα, οι δύο εκδοχές της περιγράφουν, αντιστοίχως, τις προϋποθέσεις *γραμμικής ή μη γραμμικής λειτουργίας* του, ανάλογα με τις τιμές της τάσης εισόδου  $v_d(t)$ .

Έτσι, όταν η διαφορά των σημάτων στις εισόδους του Τ.Ε. παίρνει τιμές  $v_d(t)$  τέτοιες ώστε  $|v_d(t)| < |v_{dk}|$  με  $|v_{dk}| = |V_S| / A$ , η τάση εξόδου του θα είναι ανάλογη της συνολικής τάσης εισόδου, δηλ.  $v_o(t) = v_d(t) \cdot A$ , και, προφανώς, μικρότερη από την τάση τροφοδοσίας, δηλ.  $|v_o(t)| < |V_S|$ . Επομένως, τα ζεύγη τιμών  $\{v_d(t), v_o(t)\}$  για τα οποία ισχύουν αυτές οι σχέσεις οριοθετούν την περιοχή *γραμμικής* λειτουργίας του Τ.Ε.

Σε αντιδιαστολή, ο Τ.Ε. θα λειτουργεί, όπως λέγεται, στη *μη γραμμική* περιοχή όταν  $|v_d(t)| \geq |v_{dk}|$ , οπότε και το σήμα εξόδου του,  $v_o$ , θα παίρνει ανάλογα με το πρόσημο της τάσης  $v_d$  είτε τη μέγιστη επιτρεπόμενη θετική, είτε τη μέγιστη αρνητική τιμή τάσης του Τ.Ε.. Οι μέγιστες αυτές τιμές της τάσης εξόδου του Τ.Ε. συμβολίζονται με  $\pm v_{ok}$  και ονομάζονται **τιμές τάσης κόρου** ή, απλώς, **τάσεις κόρου**, θεωρούνται δε περίπου ίσες με τις αντίστοιχες τιμές της τάσης τροφοδοσίας, δηλ.  $+v_{ok} \cong V_{S+}$  και  $-v_{ok} \cong V_{S-}$ .

Η γραφική παράσταση των παραπάνω αποτελεί την τυπική μορφή της χαρακτηριστικής τάσης εισόδου-εξόδου ( $v_d-v_o$ ) ενός Τ.Ε. γενικής χρήσης, η οποία, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11, αποτελείται από τρία ευθύγραμμα τμήματα, που σημειώνονται με τους αριθμούς (1), (2) και (3):

- Τα τμήματα (1) και (3) είναι παράλληλα προς τον άξονα τιμών της τάσης εισόδου  $v_d$  – δηλ. της διαφοράς των τάσεων των δύο εισόδων του Τ.Ε. – και αντιστοιχούν σε τιμές  $|v_d(t)| \geq |v_{dk}|$ , υποδεικνύοντας έτσι, δύο "περιοχές" *μη γραμμικής* λειτουργίας του Τ.Ε., μια "περιοχή" για τιμές  $v_d(t) < -v_{dk}$  και μια για τιμές  $v_d(t) > +v_{dk}$ , σύμφωνα με το δεύτερο σκέλος της σχέσης (5.9).
- Με τον ίδιο τρόπο και σύμφωνα με το πρώτο σκέλος της σχέσης (5.9), το τμήμα (2) περιγράφει την περιοχή *γραμμικής* λειτουργίας του Τ.Ε.. Η περιοχή αυτή είναι εξ ορισμού περιορισμένη και φαίνεται να ταυτίζεται με τον κάθετο άξονα, καθώς η απαίτηση  $|v_d(t)| < |v_{dk}|$  συνδυάζεται με τη διαπίστωση ότι για  $A \rightarrow \infty \Rightarrow |v_{dk}| \rightarrow 0$ . Έτσι, τα όρια της περιοχής γραμμικής λειτουργίας του Τ.Ε. θα φαίνονται μόνο εφόσον η κλίμακα βαθμονόμησης του άξονα  $x$  για τις τιμές της τάσης εισόδου  $v_d$  έχει διευρυνθεί καταλλήλως, όπως π.χ. στο σχήμα 5.11(β).



<sup>1</sup> Στο εξής, αν δεν αναφέρεται διαφορετικά, η τροφοδοσία των Τ.Ε. και των κάθε είδους κυκλωμάτων τους θα θεωρείται ως *διπολική*, όπως ακριβώς φαίνεται στο δεξί τμήμα του σχήματος 5.10.

**Σχήμα 5.11.** (α) Τυπική μορφή χαρακτηριστικής τάσης εισόδου – εξόδου Τ.Ε. (με διπολική τροφοδοσία) και (β) διευρυμένη απεικόνιση της γραμμικής περιοχής της για  $|v_d(t)| < |v_{dk}|$ .

Εδώ, θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι όλα τα παραπάνω ισχύουν ανεξάρτητα από το αν ο τρόπος λειτουργίας του Τ.Ε. θεωρείται διαφορικός ή απλός. Πράγματι, από τη σχέση (5.9), φαίνεται αμέσως ότι αν και η συνθήκη γραμμικής λειτουργίας  $|v_d(t)| < |v_{dk}|$  αναφέρεται, κατ' αρχήν, στο διαφορικό τρόπο λειτουργίας του Τ.Ε., στην περίπτωση του απλού μπορεί εύκολα να διατυπωθεί με τη μορφή:

$$\text{είτε } |v_+(t)| < |v_{dk}| \text{ όταν } v_-(t)=0, \text{ είτε } |v_-(t)| < |v_{dk}| \text{ όταν } v_+(t)=0,$$

$$\text{οπότε και θα ισχύει: } v_o(t) = \begin{cases} v_+(t) \cdot A & \text{αν } |v_+| < |v_{dk}| \\ |V_S| & \text{αν } |v_+| \geq |v_{dk}| \end{cases} \text{ και } v_-(t)=0 \quad (5.10\alpha)$$

$$\text{ή } v_o(t) = \begin{cases} -v_-(t) \cdot A & \text{αν } |v_-| < |v_{dk}| \\ -|V_S| & \text{αν } |v_-| \geq |v_{dk}| \end{cases} \text{ και } v_+(t)=0 \quad (5.10\beta)$$

όπου, και πάλι,  $|v_{dk}| = |V_S| / A$ .

## 5.4 Χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων με τελεστικούς ενισχυτές

Το σημαντικότερο ίσως πλεονέκτημα της χρήσης Τ.Ε. στα διάφορα κυκλώματα είναι το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός κυκλώματος με Τ.Ε. – όπως π.χ. οι αντιστάσεις εισόδου και εξόδου και οι απολαβές τάσης και έντασης – είναι στην πράξη ανεξάρτητα από τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου Τ.Ε.. Αυτό, βεβαίως, σε καμία περίπτωση δεν σημαίνει ότι και η λειτουργία ενός τέτοιου κυκλώματος θα είναι ανεξάρτητη από τη λειτουργία του Τ.Ε.. Το αντίθετο, μάλιστα. Η συμμετοχή ενός Τ.Ε. σ' ένα οσοδήποτε απλό ή σύνθετο κύκλωμα είναι συμμετοχή ενός αυτόνομου και αυτοτελούς στοιχείου και, συνεπώς, ο χαρακτηρισμός της συνολικής λειτουργίας του κυκλώματος θα εξαρτάται και από τον τρόπο λειτουργίας του Τ.Ε., όπως ακριβώς εξαρτάται από τη λειτουργία και των υπολοίπων στοιχείων του.

Έτσι, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.4.1, εφόσον η λειτουργία ενός κυκλώματος είναι γραμμική ή μη γραμμική ανάλογα με το αν οι χαρακτηριστικές συναρτήσεις των στοιχείων του είναι, αντιστοίχως, γραμμικές ή όχι<sup>1</sup>, είναι φανερό ότι η λειτουργία κυκλωμάτων με γραμμικά στοιχεία και έναν ή περισσότερους Τ.Ε. θα καθορίζεται από τον τρόπο λειτουργίας αυτών των Τ.Ε.. Με την έννοια αυτή, η χαρακτηριστική τάσης εισόδου-εξόδου ενός κυκλώματος, π.χ. με έναν Τ.Ε., θα έχει αντίστοιχη μορφή με τη χαρακτηριστική συνάρτηση του Τ.Ε..

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα πιο γνωστά κυκλώματα-εφαρμογές των Τ.Ε.. Τα κυκλώματα αυτά διακρίνονται σε *γραμμικά* και σε *μη γραμμικά* ανάλογα με τη γραμμικότητα ή μη της λειτουργίας του αντίστοιχου Τ.Ε., σύμφωνα με από τις αντίστοιχες προϋποθέσεις των σχέσεων (5.9) ή (5.10) και τρόπο σύνδεσης του Τ.Ε. με τα υπόλοιπα στοιχεία του κάθε κυκλώματος.

Σημειώνεται, εδώ, ότι ο χαρακτηρισμός "μη γραμμικό κύκλωμα" δεν αναφέρεται σε μια λειτουργία κυκλώματος που περιγράφεται από μια γενικώς μη γραμμική σχέση του σήματος εξόδου προς το σήμα εισόδου, αλλά σε μια λειτουργία, όπου το κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι το σήμα εξόδου παίρνει τιμές που σχετίζονται άμεσα με τις τιμές κόρου του αντίστοιχου Τ.Ε.. Έτσι, η κατανόηση της λειτουργίας των μη γραμμικών κυκλωμάτων με Τ.Ε. προκύπτει εύκολα χρησιμοποιώντας, απλώς, τη βασική σχέση ορισμού της λειτουργίας ενός Τ.Ε. με τη μορφή της σχέσης (5.4) ή (5.7) και τον περιορισμό της σχέσης (5.8).

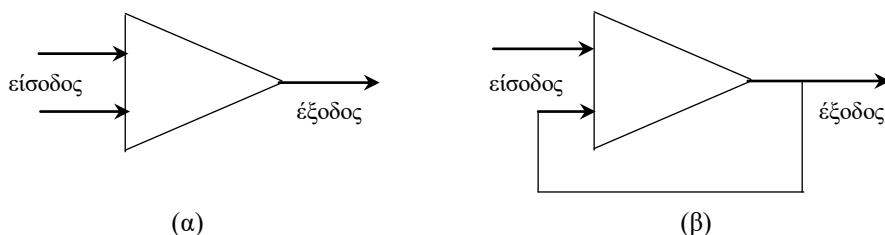
Από την άλλη πλευρά, τα γραμμικά κυκλώματα με Τ.Ε. παρουσιάζουν ειδικό ενδιαφέρον, καθώς η λειτουργία τους στηρίζεται μεν στη γραμμική λειτουργία του αντίστοιχου Τ.Ε., αυτή, όμως, αναφέρεται σε μια ιδιαίτερα περιορισμένη περιοχή τιμών της τάσης εισόδου του  $v_d$ , όπως δείχνουν οι σχέσεις (5.9) ή (5.10). Επομένως, για τη διασφάλιση επαρκούς περιοχής γραμμικής λειτουργίας τους χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές που είναι γνωστές ως τεχνικές *αρνητικής ανάδρασης* και οι οποίες, με την κατάλληλη σύνδεση του Τ.Ε.

<sup>1</sup> Η διατύπωση αυτή, αν και, γενικώς, είναι ορθή και ισχύει για κάθε ηλεκτρονικό κύκλωμα και για κάθε είδος ενεργών ή παθητικών στοιχείων, δεν πρέπει να οδηγεί σε μια "μηχανιστική" αναζήτηση των γραμμικών και μη στοιχείων για τον χαρακτηρισμό της λειτουργίας ενός κυκλώματος, καθώς, εκτός από την απαραίτητη διερεύνηση των αρχικών συνθηκών, είναι σύνηθες η παρουσία επί μέρους μη γραμμικών στοιχείων σ' ένα κύκλωμα (όπως π.χ. διόδων) να σχετίζεται με τη διασφάλιση των αναγκαίων (DC) συνθηκών για γραμμική λειτουργία (στο AC) και, συνεπώς, δεν συνδέεται αναγκαστικά με μια συνολικώς μη γραμμική λειτουργία.

με τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος, οδηγούν στον ορισμό συγκεκριμένων κάθε φορά ορίων γραμμικής λειτουργίας, που πρακτικώς είναι ανεξάρτητα από τα αντίστοιχα όρια του Τ.Ε.

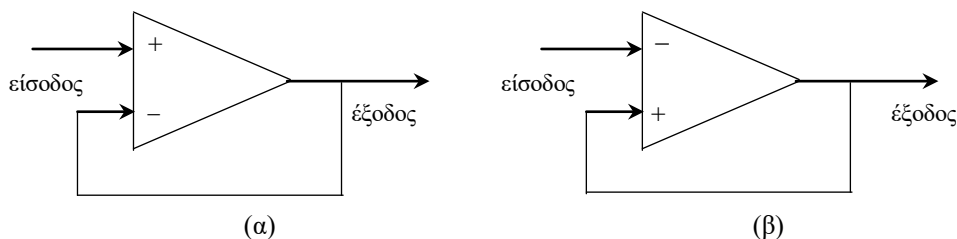
Έτσι, κάθε κύκλωμα με Τ.Ε. στο οποίο γίνεται χρήση ανάδρασης ισοδυναμεί με ένα σύνθετο τετράπολο, τα επί μέρους τμήματα του οποίου είναι συνδεδεμένα σε κλειστό βρόχο και με τέτοιο τρόπο ώστε οι μεν εισοδοί του Τ.Ε. να αντιστοιχούν στο "σημείο συμβολής", η δε έξοδος – που, συνήθως, είναι και η έξοδος ολόκληρου του κυκλώματος – στο "σημείο λήψης", που είδαμε στις παραγράφους 3.11 και 4.7 και τα σχήματα 3.81(β) και 4.39.

Στο σχήμα 5.12 δίνεται παραστατικά η μορφή ενός κυκλώματος με Τ.Ε. με και χωρίς τη χρήση ανάδρασης. Όπως φαίνεται αμέσως, με τη χρήση ανάδρασης το σήμα εξόδου του κυκλώματος – ή ένα τμήμα (κλάσμα) του – επιστρέφει στην είσοδο, ως σήμα ανάδρασης, συμβάλλει με το σήμα εισόδου – ή το ανάλογο τμήμα του – και προκαλεί μια ανάλογη μεταβολή του σήματος εξόδου. Όταν, λοιπόν, η μεταβολή αυτή είναι της ίδιας πολικότητας (φοράς) με την πολικότητα του σήματος ανάδρασης, η ανάδραση χαρακτηρίζεται ως θετική, ενώ όταν είναι αντίθετης πολικότητας χαρακτηρίζεται ως αρνητική.



**Σχήμα 5.12.** Σχηματική παράσταση κυκλώματος με Τ.Ε. (α) χωρίς ανάδραση (ανοικτή σύνδεση) και (β) με ανάδραση (σύνδεση κλειστού βρόχου).

Στο σχήμα 5.13 δίνονται οι αντίστοιχες μορφές ενός κυκλώματος με Τ.Ε. με χρήση αρνητικής και θετικής ανάδρασης, όπου είναι φανερό ότι η επιστροφή μιας εκδοχής του σήματος εξόδου στην αναστρέφουσα είσοδο του Τ.Ε. θα προκαλεί πάντοτε μια αντίθετης πολικότητας (φοράς) μεταβολή του σήματος εξόδου (αρνητική ανάδραση), ενώ, με την επιστροφή του στην μη αναστρέφουσα είσοδο, η μεταβολή αυτή θα είναι πάντοτε της ίδιας πολικότητας (θετική ανάδραση).



**Σχήμα 5.13.** Σχηματική παράσταση κυκλώματος με Τ.Ε. και χρήση (α) αρνητικής ανάδρασης και (β) θετικής ανάδρασης.

Επομένως, όπως θα δούμε και αναλυτικά παρακάτω, η χρήση αρνητικής ανάδρασης λειτουργεί περιοριστικά σε ότι αφορά τη δυνατότητα ενός κυκλώματος να οδηγηθεί στις μέγιστες τιμές του σήματος εξόδου του (δηλ. τις τιμές κόρου του αντίστοιχου Τ.Ε.) και, συνεπώς, διασφαλίζει – όσο αυτό είναι δυνατό και προβλέπεται και από την όλη σχεδίαση του κυκλώματος – μια επαρκή περιοχή γραμμικής λειτουργίας.

Στην παρουσίαση των κυκλωμάτων που ακολουθεί, οι χρησιμοποιούμενοι Τ.Ε. θεωρούνται μεν ως πραγματικοί έχοντας, κατά τα γνωστά, πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου, πολύ μικρή αντίσταση εξόδου και απολαβή τάσης που, γενικώς, ακολουθεί την τυπική μορφή του συχνотικού διαγράμματος πλάτους του σχήματος 5.8, αποφεύγεται όμως οποιαδήποτε αναφορά σε ορισμένα ειδικότερα χαρακτηριστικά, που υπάρχουν και σχετίζονται με κατασκευαστικές ή λειτουργικές ασυμμετρίες τους<sup>1</sup>. Με την έννοια αυτή, η ανάλυσή τους

<sup>1</sup> Εδώ αναφερόμαστε στην ακρίβεια με την οποία ισχύει στην πράξη η σχέση ορισμού (5.4), σύμφωνα με την οποία, η εφαρμογή κοινού σήματος (δηλ. του ίδιου σήματος) στις δύο εισόδους ενός Τ.Ε. του εμπορίου θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα ένα σήμα τάσης στην έξοδό του με μηδενικό πλάτος. Όπως είναι ευνόητο, η δυνατότητα επίτευξης του μηδενικού αυτού σήματος εξόδου προϋποθέτει την πλήρη λειτουργική συμμετρία των δύο εισόδων του Τ.Ε. και, ειδικότερα, την πλήρη ταύτιση – σε απόλυτες τιμές – όλων των αντίστοιχων τάσεων και ρευμάτων του εσωτερικού τους κυκλώ-

γίνεται υποθέτοντας ότι κάθε Τ.Ε. συμπεριφέρεται περίπου ως ιδανικός και, συνεπώς, μπορεί να λαμβάνεται με τη μορφή του ισοδύναμου κυκλώματος του σχήματος 5.6.

Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η ανάλυση κάθε κυκλώματος με Τ.Ε. διευκολύνεται σημαντικά, καθώς με την αναγνώριση της ύπαρξης ή όχι ανάδρασης και, στην περίπτωση ύπαρξης, του είδους της ανάδρασης – δηλ. αν πρόκειται για αρνητική ή θετική – ισχύει, γενικώς, ότι:

- η απουσία ανάδρασης ή η χρήση θετικής ανάδρασης προδιαγράφει τη μη γραμμική λειτουργία του κυκλώματος, όπως αυτή προσδιορίστηκε προηγουμένως, ενώ,
- η παρουσία αρνητικής ανάδρασης υποδεικνύει σαφώς τη δυνατότητα γραμμικής λειτουργίας, τα όρια της οποίας και πρέπει να προσδιοριστούν.

## 5.5 Γραμμικά κυκλώματα με Τ.Ε..

Με τη θεώρηση, στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, των κυκλωμάτων της Ηλεκτρονικής ως συστημάτων επεξεργασίας σημάτων και την ταξινόμησή τους σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τη λειτουργία τους, είναι φανερό ότι ως γραμμικά κυκλώματα θεωρούνται, γενικώς, τα κυκλώματα ενίσχυσης και άθροισης σημάτων, τα κυκλώματα διαμόρφωσης και ολοκλήρωσης, καθώς και τα κυκλώματα διέλευσης ή απόρριψης συχνοτήτων.

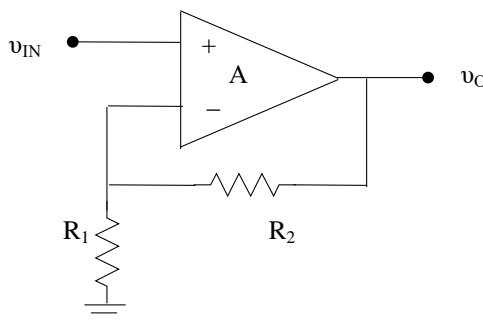
Τα κυκλώματα, που παρουσιάζονται παρακάτω, ανήκουν σ' αυτές τις κατηγορίες, η δε λειτουργία των αντίστοιχων Τ.Ε. διέπεται κατ' αρχήν από τα γενικά χαρακτηριστικά, που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Τα κυκλώματα αυτά έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό το ότι η γραμμικότητα της λειτουργίας τους – και, συνεπώς, η γραμμικότητα της λειτουργίας των αντίστοιχων Τ.Ε. – εξασφαλίζεται με τη χρήση κάποιας μορφής αρνητικής ανάδρασης<sup>1</sup>, επί πλέον δε τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά τους εξαρτώνται, κατά κύριο λόγο, από τα υπόλοιπα στοιχεία τους και τον τρόπο σύνδεσής τους, δηλ. είναι κατ' αρχήν ανεξάρτητα από τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των Τ.Ε..

### 5.5.1 Ενισχυτής τάσης χωρίς αναστροφή

Στο σχήμα 5.14 δίνεται ένα απλό κύκλωμα με Τ.Ε., το οποίο εμφανίζει τα εξής χαρακτηριστικά:

- ως σήμα εισόδου του κυκλώματος θεωρείται ένα σήμα τάσης  $v_{IN}$  που εφαρμόζεται στην μη αναστρέφουσα είσοδο του Τ.Ε.,
- ένα κλάσμα του σήματος εξόδου  $v_O$  του Τ.Ε. επιστρέφει και εφαρμόζεται στην αναστρέφουσα είσοδό του, μέσω του συνδυασμού των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$ , δηλ. σύμφωνα με όσα προκαταρκτικά έχουν αναφερθεί, υπάρχει *αρνητική ανάδραση*.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, θα δείξουμε ότι το κύκλωμα αυτό είναι ένας ενισχυτής τάσης με συντελεστή ενίσχυσης (απολαβή) τάσης,  $A_v = v_O/v_{IN}$ , που εξαρτάται μόνον από τις τιμές των δύο αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$ . Ο ενισχυτής αυτός ονομάζεται *ενισχυτής χωρίς αναστροφή* ή *μη αναστροφικός ενισχυτής* (non-inverting amplifier), επειδή η λειτουργία του δεν εισάγει διαφορά φάσης 180° (δηλ. δεν προκαλεί αλλαγή προσήμου) μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου.



Σχήμα 5.14. Κύκλωμα Τ.Ε. σε συνδεσμολογία ενισχυτή τάσης χωρίς αναστροφή.

---

ματος, κάτι που δεν είναι πρακτικώς εφικτό. Οι ορισμοί των ειδικών εκείνων μεγεθών που σχετίζονται με τη λειτουργική συμμετρία των πραγματικών Τ.Ε. ξεφεύγουν από το αντικείμενο της εισαγωγικής παρουσίασης που επιχειρείται εδώ.

<sup>1</sup> Αναφερόμαστε στα είδη ανάδρασης που είδαμε συνοπτικά στην παράγραφο 3.11.

Πράγματι, θεωρώντας κατ' αρχήν ότι ο Τ.Ε. έχει ιδανικά χαρακτηριστικά και λειτουργεί με διπολική τροφοδοσία με τάσεις  $\pm V_S$  (η απεικόνιση της οποίας συνήθως παραλείπεται), έτσι ώστε η τάση εξόδου του (άρα και του κυκλώματος) να παίρνει τιμές  $-V_S \leq v_O \leq +V_S$ , από τον τρόπο σύνδεσής του με τα υπόλοιπα στοιχεία του συγκεκριμένου κυκλώματος, παρατηρούμε ότι:

$$v_{IN} = v_+ \text{ και } v_- = v_{R1}$$

όπου, λόγω του διαιρέτη τάσεων που σχηματίζουν οι αντιστάσεις  $R_2$  και  $R_1$ , θα είναι<sup>1</sup>:

$$v_{R1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_O \quad (5.11)$$

Άρα, η βασική σχέση ορισμού της λειτουργίας του Τ.Ε., δηλ. η σχέση:

$$v_O = A v_d = A(v_+ - v_-) \quad (5.12)$$

θα έχει τη μορφή:

$$v_O = A \cdot (v_{IN} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_O) \quad (5.13)$$

δηλ. το σήμα τάσης  $v_d$  μεταξύ των δύο εισόδων του Τ.Ε. είναι η διαφορά της σήματος τάσης  $v_{IN}$  στην είσοδο του κυκλώματος και ενός κλάσματος του σήματος εξόδου  $v_O$  με τη μορφή του σήματος τάσης  $v_{R1}$  στα άκρα της αντίστασης  $R_1$ . Άρα, η λειτουργία του κυκλώματος, όπως περιγράφεται από τη σχέση (5.13), χαρακτηρίζεται από την παρουσία αρνητικής ανάδρασης που διαμορφώνει την τιμή του σήματος  $v_d$  στον Τ.Ε..

Έτσι, σύμφωνα με τη σχέση (5.9), με την οποία, η γραμμικότητα ή όχι της λειτουργίας ενός Τ.Ε. καθορίζεται ουσιαστικώς από την τιμή του σήματος  $v_d$  είναι φανερό ότι η χρήση αρνητικής ανάδρασης στο συγκεκριμένο κύκλωμα προσδιορίζει τελικώς και τη γραμμικότητα της συνολικής του λειτουργίας.

Έστω, λοιπόν, ότι ο Τ.Ε. στο κύκλωμα του σχήματος 5.14 λειτουργεί στη γραμμική του περιοχή. Στην περίπτωση αυτή, επειδή θεωρείται ιδανικός, ο συντελεστής ενίσχυσης τάσης του θα τείνει στο άπειρο ( $A \rightarrow \infty$ ), οπότε θα πρέπει η τάση  $v_d$  να έχει μια τιμή  $\varepsilon$  τέτοια ώστε  $v_d = \varepsilon \rightarrow 0$ , ή, αλλιώς, λόγω της (5.13):

$$(v_{IN} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_O) = \varepsilon \rightarrow 0$$

δηλ.:

$$v_O = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \cdot v_{IN} \quad (5.14)$$

Η σχέση (5.14) δείχνει ότι η λειτουργία του κυκλώματος του σχήματος 5.14 είναι μια τυπική λειτουργία ενίσχυσης τάσης και, μάλιστα, χωρίς αλλαγή προσήμου μεταξύ των αντίστοιχων σημάτων εισόδου και εξόδου. Επί πλέον, ο συντελεστής ενίσχυσης (απολαβή) τάσης,  $A_v$ , του κυκλώματος είναι ανεξάρτητος από τον συντελεστή  $A$  του Τ.Ε. και εξαρτάται μόνο από τις τιμές των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$ :

$$A_v = \frac{v_O}{v_{IN}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (5.15)$$

Επομένως, το κύκλωμα του σχήματος 5.14 είναι ένα κύκλωμα Τ.Ε. σε συνδεσμολογία, όπως λέγεται, *ενισχυτή τάσης χωρίς αναστροφή*, η συνολική λειτουργία του οποίου, σε συνδυασμό με την αντίστοιχη του Τ.Ε. για το σήμα τάσης  $v_d = \varepsilon$ , χαρακτηρίζεται από τη χρήση αρνητικής ανάδρασης, η οποία και εξασφαλίζει τη γραμμικότητά της ή όχι, σύμφωνα με τη σχέση:

$$v_O(t) = \begin{cases} A_v \cdot v_{IN} & \text{αν } |v_{IN}| < |v_{IN, \max}| \\ |V_S| & \text{αν } |v_{IN}| \geq |v_{IN, \max}| \end{cases} \quad \text{όπου } |v_{IN, \max}| = |V_S| / A_v \quad (5.16)$$

Στο σημείο, όμως, αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση (5.14) – και, στη συνέχεια, η (5.15) – προκύπτει με την υπόθεση ότι ο θεωρούμενος Τ.Ε. είναι ιδανικός. Έτσι, παρακάτω, διερευνώνται οι τυχόν προϋποθέσεις με τις οποίες οι συγκεκριμένες σχέσεις ισχύουν ή όχι και στην περίπτωση πραγματικού Τ.Ε.

### 5.5.1.1 Λειτουργία του ενισχυτή χωρίς αναστροφή με πραγματικό Τ.Ε.

Θεωρώντας ότι ο Τ.Ε. στο κύκλωμα του σχήματος 5.14 είναι πραγματικός, η σχέση (5.13) εξακολουθεί να ισχύει αρκεί η αντίσταση  $R_{IN(-)}$  της αναστρέφουσας εισόδου του να είναι αρκούντως μεγαλύτερη από την  $R_1$ , έτσι ώστε, ταυτόχρονα, να ισχύει και η σχέση (5.11). Γράφοντας, επομένως, τη σχέση (5.13) με τη μορφή:

$$v_O = A \cdot (v_{IN} - \beta \cdot v_O)$$

<sup>1</sup> Θυμίζουμε ότι η αντίσταση των δύο εισόδων ενός ιδανικού Τ.Ε. θεωρείται άπειρη και η αντίσταση εξόδου του μηδέν.

όπου, προφανώς, έχει τεθεί

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.17)$$

μετά από απλές πράξεις, προκύπτει η έκφραση

$$A_v = \frac{A}{1 + \beta A} \quad (5.18)$$

που συνδέει τον συντελεστή ενίσχυσης τάσης,  $A_v$ , ολόκληρου του κυκλώματος με τον αντίστοιχο συντελεστή  $A$  του Τ.Ε., αλλά και τον παράγοντα  $\beta$ .

Επομένως, αν ισχύει:

$$\beta A \gg 1 \quad (5.19)$$

τότε η έκφραση (5.18) παίρνει τη μορφή της σχέσης (5.15):

$$A_v \cong \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

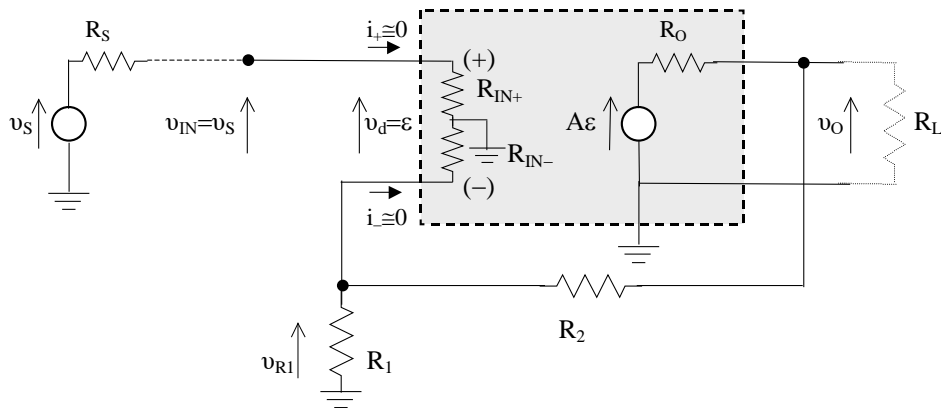
και καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η λειτουργία του κυκλώματος του ενισχυτή τάσης χωρίς αντιστροφή περιγράφεται από τη σχέση (5.14) και στην περίπτωση πραγματικού Τ.Ε., αρκεί οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  να επιλέγονται έτσι ώστε να ισχύει η σχέση (5.19) ή, αλλιώς:

$$A \gg \frac{R_2}{R_1} \quad (5.20)$$

Έτσι, αν θεωρηθεί ότι το κύκλωμα του συγκεκριμένου ενισχυτή χωρίς αναστροφή λειτουργεί σε πραγματικές συνθήκες δηλ. ότι το σήμα εισόδου  $v_{IN}$  προέρχεται από μια πραγματική πηγή τάσης  $v_S$  με αντίσταση εξόδου  $R_S$ , τότε, από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 5.15, θα ισχύουν οι προσεγγίσεις:

$$\left. \begin{array}{l} \text{αν } R_S \ll R_{IN(+)} \text{ τότε } v_S \cong v_{IN} = v_+ \\ \text{αν } R_1 \ll R_{IN(-)} \text{ τότε } v_{R1} \cong v_- \\ \text{αν } R_O \ll (R_2 + R_1) \text{ τότε } A\varepsilon \cong v_O = v_{R2} + v_{R1} \end{array} \right\} \quad (5.21)$$

από τις οποίες προκύπτει ότι για να ισχύει κανονικά η βασική σχέση (5.14), θα πρέπει οπωσδήποτε να είναι  $A \gg 1$ . Η απαίτηση όμως αυτή καλύπτεται πλήρως από την σχέσης (5.19) ή (5.20), οπότε, γενικεύοντας στην περίπτωση πραγματικών κυκλωμάτων ενισχυτών χωρίς αναστροφή, που λειτουργούν με τις προϋποθέσεις των σχέσεων (5.20) και (5.21), η συνολική τους λειτουργία είναι ουσιαστικώς ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά του αντίστοιχου Τ.Ε., όπως αυτή περιγράφεται από τη σχέση (5.14) και εξαρτάται μόνον από τις τιμές των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$ .



**Σχήμα 5.15.** Ισοδύναμο ενισχυτή χωρίς αναστροφή με πραγματικό Τ.Ε.

Ειδικότερα, τώρα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τρίτη από τις σχέσεις (5.21) δείχνει ότι οι δύο αντιστάσεις  $R_2$  και  $R_1$  αποτελούν ουσιαστικά ένα φορτίο  $R_{OL} = R_2 + R_1$  συνδεδεμένο στην έξοδο του Τ.Ε., δηλ. στην εξαρτημένη πηγή τάσης  $A\varepsilon$  του αντίστοιχου ισοδύναμου. Συνεπώς, ανατρέχοντας στα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.8, η εξάρτηση της λειτουργίας του ενισχυτή χωρίς αναστροφή από τις δύο αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$ , υποδηλώνει σαφώς τη καθοριστική συμμετοχή των αντιστάσεων αυτών και στον προσδιορισμό της ευθείας φόρτου και του σημείου λειτουργίας, κατ' αρχήν, του τμήματος εξόδου του Τ.Ε. και, τελικώς, ολόκληρου του κυκλώματος.

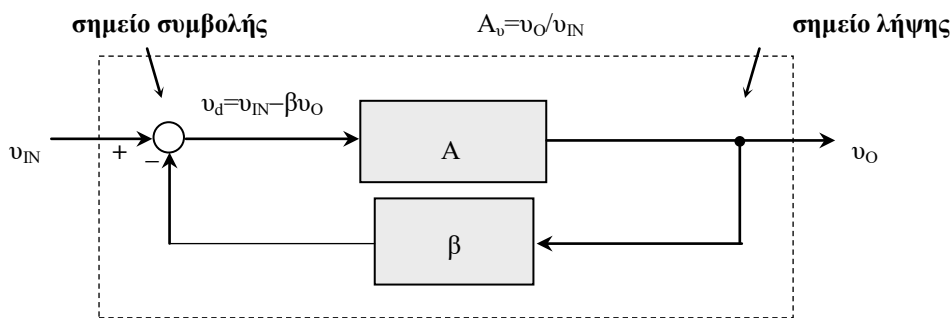
Αν, επομένως, στην έξοδο του κυκλώματος (δηλ. του Τ.Ε.) συνδεθεί, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.15, μια πρόσθετη αντίσταση φορτίου  $R_L$  (π.χ. η αντίσταση εισόδου ενός επόμενου κυκλώματος), τότε:

- αν  $R_L \gg R_2 + R_1$ , η πρόσθετη αυτή αντίσταση δεν θα έχει πρακτικώς καμιά επίπτωση στις τιμές των βασικών χαρακτηριστικών του κυκλώματος, ενώ
- αν  $R_L \cong R_{OL}$  ή  $R_L < R_{OL}$ , τότε ίσως να πρέπει οι σχέσεις (5.14) και (5.15) να διαφοροποιηθούν αναλόγως.

### 5.5.1.2 Διερεύνηση της χρήσης ανάδρασης στον ενισχυτή χωρίς αναστροφή

Είδαμε, προηγουμένως, ότι η λειτουργία του ενισχυτή χωρίς αναστροφή στηρίζεται στην ενίσχυση του σήματος  $v_d$  από τον Τ.Ε., δηλ. του σήματος διαφοράς μεταξύ του σήματος εισόδου  $v_{IN}$ , που εφαρμόζεται στην (+) είσοδο του Τ.Ε., και ενός κλάσματος  $\beta$  του σήματος εξόδου  $v_O$ , που εφαρμόζεται ως *σήμα ανάδρασης* στην (-) είσοδό του. Έτσι, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.16, η λειτουργία αυτή είναι ισοδύναμη με τη λειτουργία ενός σύνθετου κυκλώματος σε σύνδεση κλειστού βρόχου, δηλ. με ανάδραση, όπου ισχύουν οι σχέσεις:

$$\left. \begin{aligned} v_O &= A_v \cdot v_{IN} \\ v_O &= A \cdot v_d \\ v_d &= v_{IN} - \beta v_O \end{aligned} \right\} \quad (5.22)$$



**Σχήμα 5.16.** Παράσταση του ενισχυτή χωρίς αναστροφή του σχήματος 5.14 ως σύνθετου κυκλώματος σε σύνδεση κλειστού βρόχου, δηλ. με χρήση ανάδρασης.

Πράγματι, με τη σύγκριση του πλήρους κυκλώματος του ενισχυτή, είτε με τη μορφή του σχήματος 5.14, είτε με την ισοδύναμη μορφή του στο σχήμα 5.15, με το σύνθετο κύκλωμα του σχήματος 5.16, είναι φανερό ότι υπάρχει αντιστοιχία των επιμέρους τμημάτων τους. Πραγματι, στην ευθεία διαδρομή των σημάτων, το σημείο συμβολής, απ' το οποίο προκύπτει το σήμα διαφοράς  $v_d$ , η μονάδα ενίσχυσής του, όπως και το σημείο λήψης στην έξοδο του κυκλώματος, αντιστοιχούν στη λειτουργία του Τ.Ε., ενώ, στη διαδρομή επιστροφής, ο διαιρέτης του σήματος τάσης εξόδου  $v_O$ , δηλ. ο συνδυασμός των αντιστάσεων  $R_2$  και  $R_1$ , αποτελεί το τμήμα ή το βρόχο ανάδρασης, στην έξοδο του οποίου προκύπτει το σήμα ανάδρασης  $\beta v_O$ .

Επί πλέον, από τις σχέσεις (5.22), προκύπτουν τα εξής:

- ο συντελεστής  $A_v$  εκφράζει την τελική σχέση μεταξύ των σημάτων εισόδου  $v_{IN}$  και εξόδου  $v_O$  του πλήρους κυκλώματος και ονομάζεται **συντελεστής ενίσχυσης (απολαβή) τάσης κλειστού βρόχου**,
- το σήμα εξόδου  $v_O$  του κυκλώματος είναι το σήμα εξόδου του Τ.Ε., που προκύπτει με την ενίσχυση του σήματος διαφοράς  $v_d$  επί τον αντίστοιχο συντελεστή  $A$ , ο οποίος ονομάζεται πλέον **συντελεστής ενίσχυσης τάσης ανοικτού βρόχου**, και
- ο συντελεστής  $\beta$  διαμορφώνει την τιμή του *σήματος ανάδρασης*  $\beta v_O$ , δηλ. την τιμή του κλάσματος του σήματος εξόδου στο σημείο σύγκρισης ή συμβολής, και λέγεται **συντελεστής ανάδρασης** ενώ, όπως είδαμε, μεταξύ των τριών συντελεστών  $A$ ,  $\beta$ , και  $A_v$ , ισχύει η σχέση (5.18):

$$A_v = \frac{A}{1 + \beta A}$$

όπου, προφανώς:

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Σύμφωνα, λοιπόν, και με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.7, η μορφή της σχέσης (5.18) δείχνει καθαρά ότι η λειτουργία του κυκλώματος του Τ.Ε. σε συνδεσμολογία ενισχυτή τάσης χωρίς αναστροφή είναι αποτέλεσμα χρήσης **αρνητικής ανάδρασης**<sup>1</sup>. Επί πλέον, συνδυάζοντας την σχηματική παράσταση αυτής της

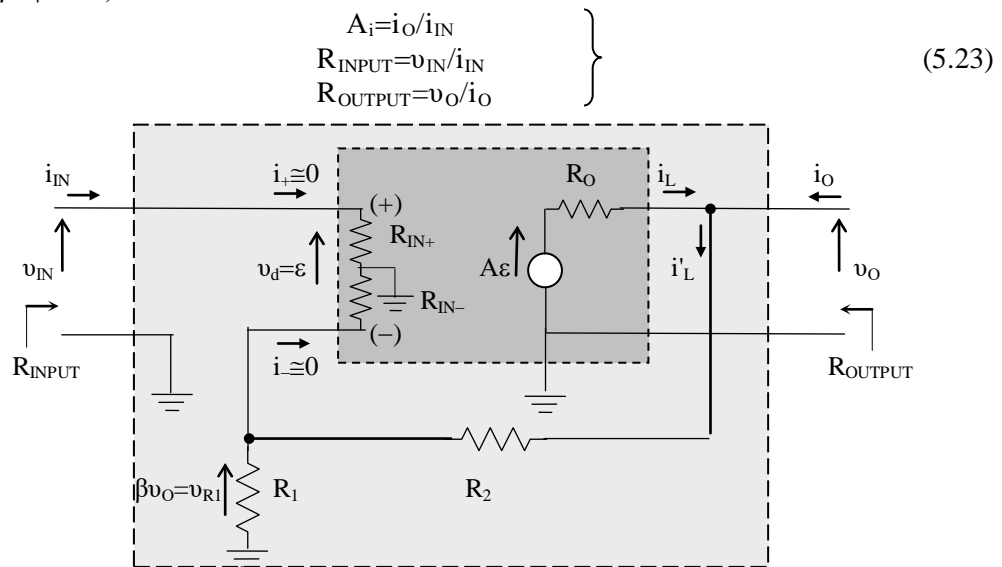
<sup>1</sup> Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής ενίσχυσης τάσης (ή ρεύματος) ενός κυκλώματος αποτελεί έκφραση της χαρακτηριστικής συνάρτησής του στο πεδίο του χρόνου ή του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς του στο πεδίο της συχνότητας.

λειτουργίας (σχήμα 5.16) με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.11 για τις τέσσερις συνδεσμολογίες ανάδρασης, μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί ότι η χρησιμοποιούμενη στο συγκεκριμένο κύκλωμα αρνητική ανάδραση είναι **ανάδραση τάσης**.

### 5.5.1.3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας του ενισχυτή χωρίς αναστροφή

Με δεδομένη την ερμηνεία της συνολικής λειτουργίας του ενισχυτή τάσης με Τ.Ε. χωρίς αναστροφή και το ρόλο της αρνητικής ανάδρασης στον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής της συνάρτησης, με τη μορφή είτε της σχέσης (5.14), είτε της σχέσης (5.15) που δίνει τον συντελεστή  $A_v$ , προχωρούμε, τώρα, στον προσδιορισμό και των υπολοίπων χαρακτηριστικών του, δηλ. του συντελεστή ενίσχυσης ρεύματος  $A_i$  και των αντιστάσεων εισόδου  $R_{INPUT}$  και εξόδου  $R_{OUTPUT}$ , με σκοπό την εύρεση της τυχόν εξάρτησης των τιμών τους από την παρουσία ανάδρασης.

Έτσι, θεωρώντας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.17, το ισοδύναμο του πραγματικού κυκλώματος του ενισχυτή χωρίς αναστροφή ως ένα απλό τετράπολο, οι ορισμοί των μεγεθών αυτών (με τη βασική μορφή που δόθηκε στη παράγραφο 3.9) θα είναι:



**Σχήμα 5.17.** Παράσταση του ισοδύναμου του ενισχυτή χωρίς αναστροφή με τη μορφή τετράπολου για τον προσδιορισμό των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου του.

οπότε, παρατηρώντας ότι:

- όταν στο κύκλωμα εφαρμόζεται ένα σήμα τάσης εισόδου  $v_{IN}$ , το αντίστοιχο ρεύμα εισόδου  $i_{IN}$  θα είναι το ρεύμα  $i_+$  της μη αναστρέφουσας εισόδου του Τ.Ε., και
- όταν η τάση εξόδου του κυκλώματος είναι  $v_o$ , το ρεύμα εξόδου  $i_o = -i_L$ , εφόσον δεν υπάρχει συνδεδεμένο εξωτερικό φορτίο  $R_L$  (οπότε θα ήταν  $i_o = -i_{RL}$ ), προσδιορίζεται συναρτήσει του ρεύματος  $i'_L$  που διαρρέει τελικά το βρόχο ανάδρασης,

με απλούς συλλογισμούς διαπιστώνεται, κατ' αρχήν, ότι ο συντελεστής ενίσχυσης ρεύματος του κυκλώματος είναι ο αντίστοιχος συντελεστής της αυτόνομης λειτουργίας του Τ.Ε.,<sup>1</sup> ο οποίος σχετίζεται με τα εκ κατασκευής τεχνικά χαρακτηριστικά του Τ.Ε. ανεξαρτήτως συνδεσμολογίας και, στη συνέχεια, βρίσκεται<sup>2</sup> ότι η αντίσταση εισόδου του κυκλώματος είναι:

$$R_{INPUT} = \frac{v_{IN}}{i_{IN}} = \frac{v_d + v_{R1}}{i_+} = \dots = R_{IN+} (1 + \beta A) \quad (5.24)$$

όπου  $R_{IN+}$  είναι η αντίσταση της (+) εισόδου του Τ.Ε., ενώ, για την αντίσταση εξόδου του, θεωρώντας ότι  $v_{IN} = 0$  και ότι  $R_o \ll R_1 + R_2$ , έτσι ώστε  $i_o \cong -i_L$ , εφαρμόζεται μια εξωτερική τάση  $v_o$ , οπότε:

<sup>1</sup> Επειδή οι Τ.Ε. ορίζονται ως ενισχυτές τάσης, η παρεχόμενη απ' αυτούς ενίσχυση ρεύματος αποτελεί παρεπόμενη μορφή λειτουργίας, καθώς, θεωρώντας - έστω και κατά προσέγγιση - το ρεύμα εισόδου τους μηδενικό, στην πράξη δεν έχει έννοια ο προσδιορισμός του αντίστοιχου συντελεστή.

<sup>2</sup> Η απόδειξη των σχέσεων (5.24) και (5.25) αφήνεται στον αναγνώστη.



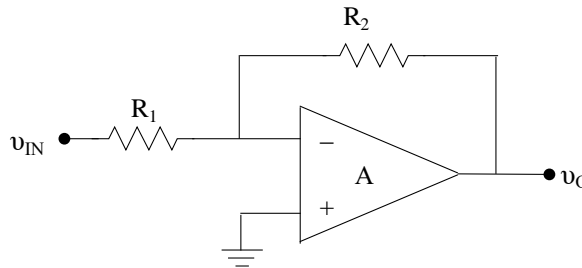
$$R_{\text{OUTPUT}} = \frac{v_o}{i_o} = \frac{v_o \cdot R_o}{v_o - A v_d} = \dots = \frac{R_o}{(1 + \beta A)} \quad (5.25)$$

### 5.5.2 Ενισχυτής τάσης με αναστροφή

Μια διαφορετική συνδεσμολογία κυκλώματος ενισχυτή τάσης με Τ.Ε. δίνεται στο σχήμα 5.18, όπου:

- η μη αναστρέφουσα είσοδος του Τ.Ε. είναι γειωμένη,
- το σήμα εισόδου του κυκλώματος, δηλ. το σήμα τάσης  $v_{\text{IN}}$ , εφαρμόζεται, μέσω μιας αντίστασης  $R_1$ , στην αναστρέφουσα είσοδο του Τ.Ε., ενώ
- η παρουσία αρνητικής ανάδρασης υποδηλώνεται, αυτή τη φορά, με την "επιστροφή" (κλάσματος) του σήματος εξόδου του Τ.Ε. στην αναστρέφουσα είσοδό του, μέσω της αντίστασης  $R_2$ .

Το κύκλωμα αυτό, όπως θα δούμε, έχει συντελεστή ενίσχυσης τάσης  $A_v$  που εξαρτάται και πάλι από τις τιμές των δύο αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$ , ενώ, επειδή με τη λειτουργία του εισάγεται διαφορά φάσης  $180^\circ$  μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου, δηλ. υπάρχει αλλαγή προσήμου, ονομάζεται **ενισχυτής αναστροφής** ή **αναστροφικός ενισχυτής** (inverting amplifier).



**Σχήμα 5.18.** Κύκλωμα Τ.Ε. σε συνδεσμολογία ενισχυτή τάσης με αναστροφή.

Για την απλοποίηση της ανάλυσης του κυκλώματος, θεωρούμε τον Τ.Ε. ιδανικό και ξανασχεδιάζουμε το κύκλωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.19, αντικαθιστώντας τον Τ.Ε. με το αντίστοιχο ισοδύναμό του, το δε σήμα εισόδου  $v_{\text{IN}}$  θεωρείται ότι παρέχεται από μια πηγή τάσης  $v_s$  με αντίσταση εξόδου  $R_s=0$  (ιδανική πηγή). Υπενθυμίζεται, επίσης, ότι τα ρεύματα και των δύο εισόδων του Τ.Ε. θεωρούνται μηδέν, δηλ.  $i_- = i_+ = 0$ , και, ακόμα, ότι η τάση εξόδου του (άρα και του κυκλώματος) παίρνει τιμές στο διάστημα  $-V_s \leq v_o \leq +V_s$ , όπου  $\pm V_s$  είναι οι τάσεις της (διπολικής) τροφοδοσίας του.

Εφόσον, τώρα, η μη αναστρέφουσα είσοδος του Τ.Ε. είναι συνδεδεμένη στη γείωση του κυκλώματος, δηλ.  $v_+ = 0$ , η βασική σχέση λειτουργίας του Τ.Ε. στο συγκεκριμένο κύκλωμα θα έχει τη μορφή:

$$v_o = A v_d = A(v_+ - v_-) = -A \cdot v_- \quad (5.26)$$

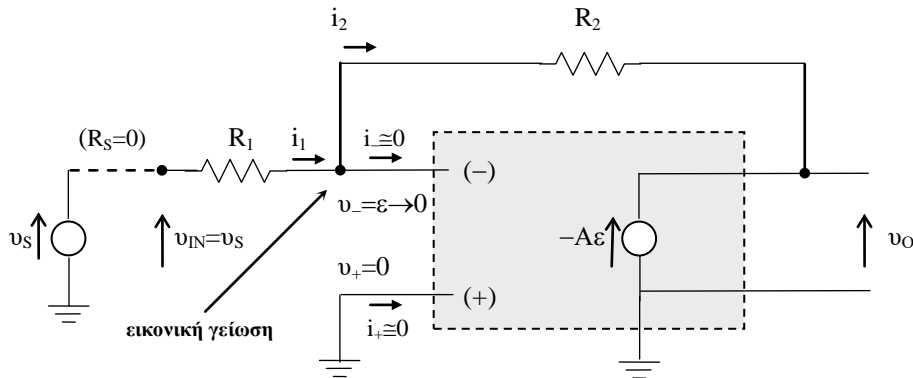
ή, αλλιώς, υποθέτοντας ότι ο Τ.Ε. λειτουργεί στη γραμμική του περιοχή:

$$v_o = -A \cdot \varepsilon \quad (5.27)$$

όπου, κατά τα γνωστά, επειδή  $A \rightarrow \infty$ , θα πρέπει  $v_- = \varepsilon \rightarrow 0$ .

Ακόμα, εφόσον  $v_- = \varepsilon \approx 0$  και  $v_+ = 0$ , θα είναι  $v_- - v_+ = \varepsilon \approx 0$ , δηλ. ο κόμβος των αντιστάσεων  $R_1$ ,  $R_2$  και της (-) εισόδου θα έχει δυναμικό περίπου ίσο με αυτό της γείωσης του κυκλώματος. Γι αυτό το λόγο, ο κόμβος αυτός ονομάζεται και **εικονική γείωση** (virtual earth).

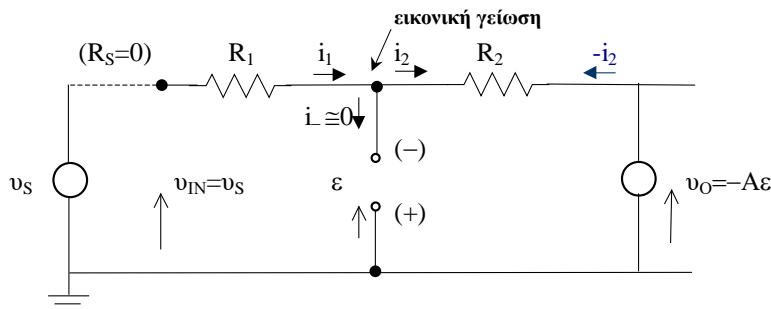
Με αυτά τα δεδομένα, η κατάλληλη επιλογή βρόχων και κόμβων και η εφαρμογή των αντίστοιχων νόμων του Kirchhoff οδηγεί εύκολα στον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ σήματος εισόδου και σήματος εξόδου, που περιγράφει τελικώς και τη συνολική λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος.



**Σχήμα 5.19.** Επανασχεδίαση του κυκλώματος του σχήματος 5.18 με χρήση του ισοδύναμου πρότυπου για τον ιδανικό Τ.Ε. και προσθήκη της πηγής τάσης  $v_s$  για το σήμα εισόδου.

Πράγματι, όπως φαίνεται καλύτερα στο απλοποιημένο ισοδύναμο του σχήματος 5.20, το κύκλωμα του σχήματος 5.19 αποτελείται από δύο τμήματα – βρόχους, όπου:

- το μεν πρώτο, αποτελεί το τμήμα εισόδου του κυκλώματος και περιλαμβάνει την πηγή τάσης  $v_s$ , την αντίσταση  $R_1$ , καθώς και την τάση  $\varepsilon$  που εμφανίζεται μεταξύ της (-) εισόδου του Τ.Ε. και της γείωσης,
- το δε δεύτερο, αποτελείται από το βρόχο που σχηματίζεται έξω – και γύρω<sup>1</sup> – από τον Τ.Ε. και περιλαμβάνει την τάση εξόδου  $v_o$ , την πτώση τάσης στην αντίσταση  $R_2$ , καθώς και την τάση  $\varepsilon$ .



**Σχήμα 5.20.** Απλοποιημένο ισοδύναμο του κυκλώματος των σχημάτων 5.18 και 5.19 για την αναγνώριση βρόχων και κόμβων και εφαρμογή των αντίστοιχων νόμων.

Έτσι, στο βρόχο που αντιστοιχεί στο τμήμα εισόδου του κυκλώματος, θα ισχύει:

$$v_s = v_{IN} = v_{R_1} + \varepsilon = i_1 \cdot R_1 + \varepsilon = i_1 \cdot R_1 \quad (5.28)$$

ενώ, στο βρόχο εξόδου, που χαρακτηρίζεται ως **βρόχος ανάδρασης** και αποτελεί γενικώς μέρος του τμήματος εξόδου του συγκεκριμένου κυκλώματος<sup>2</sup>, θα είναι:

$$v_o = -i_2 \cdot R_2 + \varepsilon \Rightarrow v_o = -i_2 \cdot R_2 \quad (5.29)$$

Θεωρώντας, τώρα, τον κόμβο σύνδεσης των δύο αντιστάσεων και της (-) εισόδου του Τ.Ε., είναι φανερό ότι μεταξύ των δύο ρευμάτων  $i_1$  και  $i_2$  θα ισχύει:

$$i_1 - i_2 + i_- \Rightarrow i_1 = i_2 \quad (5.30)$$

οπότε, συνδυάζοντας τις σχέσεις (5.28) και (5.29), μέσω της (5.30), θα προκύπτει:

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_{IN} \quad (5.31)$$

δηλ. μια σχέση, η οποία δείχνει ότι, στο επιτρεπόμενο (λόγω του Τ.Ε.) διάστημα τιμών της τάσης εξόδου του,  $v_o$ , η λειτουργία του κυκλώματος του σχήματος 5.18 είναι μια λειτουργία ενίσχυσης του σήματος εισόδου,

<sup>1</sup> Με την έννοια ότι ένας κλάδος του (αυτός με την αντίσταση  $R_2$ ) αποτελεί τη διαδρομή επιστροφής του σήματος εξόδου  $v_o$  του Τ.Ε. προς την είσοδό του.

<sup>2</sup> Συνήθως, ως κύριος βρόχος του τμήματος εξόδου ενός κυκλώματος θεωρείται κατ' αρχήν ο βρόχος που περιλαμβάνει την έξοδο του κυκλώματος και οποιοδήποτε συνδεδεμένο σ' αυτήν φορτίο ή κύκλωμα που δεν επιστρέφει στην είσοδό του. Σε περιπτώσεις, όμως, όπως αυτή του κυκλώματος του σχήματος 5.18, δηλ. όταν δεν υπάρχει τέτοιο φορτίο, ο βρόχος ανάδρασης αποτελεί ουσιαστικά τον μοναδικό βρόχο του τμήματος εξόδου του αντίστοιχου κυκλώματος.

$v_{IN}$ , με ταυτόχρονη – λόγω του αρνητικού πρόσημου – αναστροφή του σήματος εξόδου, δηλ. με ταυτόχρονη εισαγωγή διαφοράς φάσης  $180^\circ$  μεταξύ των δύο αυτών σημάτων.

Με άλλα λόγια, η σχέση (5.31) αποδεικνύει ότι το κύκλωμα του σχήματος 5.18 είναι ένας ενισχυτής τάσης με αναστροφή με συντελεστή ενίσχυσης τάσης,  $A_v$ , που δίνεται από τη σχέση:

$$A_v = \frac{v_o}{v_{IN}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (5.32)$$

ενώ, όπως και στην αντίστοιχη περίπτωση του ενισχυτή χωρίς αναστροφή, θα πρέπει παρατηρηθεί ότι η σχέση (5.31) – άρα, και η σχέση (5.32) – προκύπτει με την υπόθεση ότι ο Τ.Ε. είναι σχεδόν ιδανικός και λειτουργεί στη γραμμική του περιοχή, δηλ. ότι ισχύει η σχέση (5.27), με  $\varepsilon \rightarrow 0$ , που επιτρέπει την απλοποίηση των σχέσεων (5.28) και (5.29) με την παράλειψη της τάσης  $\varepsilon$ .

Επομένως, για την πληρότητα της ανάλυσης, θα πρέπει να ελεγχθεί κατά πόσον η συγκεκριμένη υπόθεση, αφενός μεν δεν αναιρείται από το τελικό αποτέλεσμα, αφετέρου δε, ισχύει και για τη λειτουργία ενισχυτή αναστροφής με πραγματικό Τ.Ε.. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει η τάση  $\varepsilon$  να είναι αρκούντως μικρή, όχι μόνον ως προς την τάση εξόδου  $v_o$  [κάτι που ουσιαστικά εξαρτάται απ' την τιμή του συντελεστή  $A$  και επιβεβαιώνεται από τη σχέση (5.27)], αλλά και ως προς την τάση εισόδου, δηλ. να ισχύει, επί πλέον,  $\varepsilon \ll v_{IN}$ .

Πράγματι, από το συνδυασμό των σχέσεων (5.31) και (5.27) φαίνεται αμέσως ότι για να ισχύει η απαίτηση  $\varepsilon \ll v_{IN}$ , θα πρέπει:

$$A \gg \frac{R_2}{R_1} \quad (5.33)$$

Συμπεραίνεται, επομένως, ότι τόσο η σχέση (5.31), όσο και η (5.32), θα ισχύουν ανεξαρτήτως του αν ο Τ.Ε. θεωρείται ιδανικός ή είναι πραγματικός, αρκεί να ισχύει η σχέση (5.33) και, βεβαίως, ο Τ.Ε. να λειτουργεί στη γραμμική του περιοχή<sup>1</sup>.

### 5.5.2.1 Ερμηνεία της λειτουργίας της ανάδρασης στον ενισχυτή με αναστροφή

Επιστρέφοντας στο κύκλωμα του σχήματος 5.18 και τη σχέση (5.32), είναι φανερό ότι ο συντελεστής  $A_v$  είναι ανεξάρτητος από τον αντίστοιχο συντελεστή  $A$  του Τ.Ε., αφού εξαρτάται μόνο από τις δύο αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$ . Επί πλέον, εφόσον η αντίσταση  $R_2$  ανήκει στο σχηματιζόμενο βρόχο ανάδρασης, η λειτουργία που περιγράφεται από τη σχέση αυτή – ή την (5.31) – είναι, προφανώς, αποτέλεσμα της παρουσίας αυτής της ανάδρασης και η οποία ουσιαστικά αποτελεί μηχανισμό ελέγχου της γραμμικότητας της λειτουργίας του Τ.Ε. και, τελικώς, ολόκληρου του κυκλώματος.

Έτσι, με απλά λόγια, ο Τ.Ε. λειτουργεί βάσει της σχέσης (5.7) για ένα σήμα τάσης  $v_d=(v_+-v_-)$ , το οποίο, στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι το σήμα τάσης  $v_d=-\varepsilon$  που προκύπτει στην (-) είσοδο του Τ.Ε. από τη "συμβολή" του σήματος εισόδου  $v_{IN}$  του κυκλώματος (μέσω της  $R_1$ ) και του σήματος εξόδου του,  $v_o$ , (μέσω της  $R_2$ ). Όμως, επειδή τα δύο αυτά σήματα έχουν πάντοτε διαφορετικό πρόσημο, κάθε μεταβολή του  $v_{IN}$  θα προκαλεί μια ανάλογη μεταβολή του  $v_o$  αλλά με αντίθετο πρόσημο, η οποία, "επιστρέφοντας" στο σημείο συμβολής, δηλ. στην (-) είσοδο του Τ.Ε., τείνει να αντισταθμίσει την αρχική μεταβολή του  $v_{IN}$ , κ.ο.κ.. Συνεπώς, εάν, παράλληλα με την κατάλληλη επιλογή των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$ , ισχύει και:

$$|v_{IN}| \leq |v_{IN,max}| \quad \text{όπου} \quad |v_{IN,max}| = |v_{O,max}|/|A_v| \quad (5.34)$$

τότε η τάση  $\varepsilon$ , αν και μεταβαλλόμενη, θα παραμένει μέσα στα όρια γραμμικής λειτουργίας του Τ.Ε., δηλ.  $|\varepsilon| \leq |v_{dc}|$ , με αποτέλεσμα και το κύκλωμα να λειτουργεί σύμφωνα με τη σχέση (5.31).

Βάσει, λοιπόν, των παραπάνω, είναι φανερό ότι εφόσον ο συντελεστής  $A_v$  αναφέρεται στη λειτουργία ενίσχυσης τάσης ολόκληρου του κυκλώματος, θα είναι ο **συντελεστής ενίσχυσης (ή απολαβή) τάσης κλειστού βρόχου** ή, όπως αλλιώς λέγεται, ο **συντελεστής ενίσχυσης τάσης του κυκλώματος**, ενώ ο συντελεστής  $A$ , ως **χαρακτηριστικό μέγεθος του Τ.Ε.**, θα είναι, όπως και στην περίπτωση του ενισχυτή χωρίς αναστροφή, ο **συντελεστής ενίσχυσης τάσης ανοικτού βρόχου**.

Για τον προσδιορισμό, τώρα, του **συντελεστή ανάδρασης**  $\beta$  στο συγκεκριμένο κύκλωμα, παρατηρούμε ότι η τάση  $\varepsilon$  μεταξύ των δύο εισόδων του Τ.Ε. εμφανίζεται να αποτελείται από δύο συνιστώσες,  $\varepsilon_{IN}$  και  $\varepsilon_o$ , που οφείλονται, αντιστοίχως, στα σήματα εισόδου  $v_{IN}$  και εξόδου  $v_o$ , δηλ.:

<sup>1</sup> Προφανώς, στην περίπτωση πραγματικού Τ.Ε., επειδή ο συντελεστής  $A$  εξαρτάται από τη συχνότητα  $f$  των σημάτων, η συνθήκη, που εκφράζει η σχέση (5.34), αναφέρεται στην τιμή  $A(f)$  όπως αυτή προσδιορίζεται π.χ. από το αντίστοιχο συχνοτικό διάγραμμα, [βλ. σχήμα 5.8].

$$\varepsilon = \varepsilon_{IN} + \varepsilon_O \quad (5.35)$$

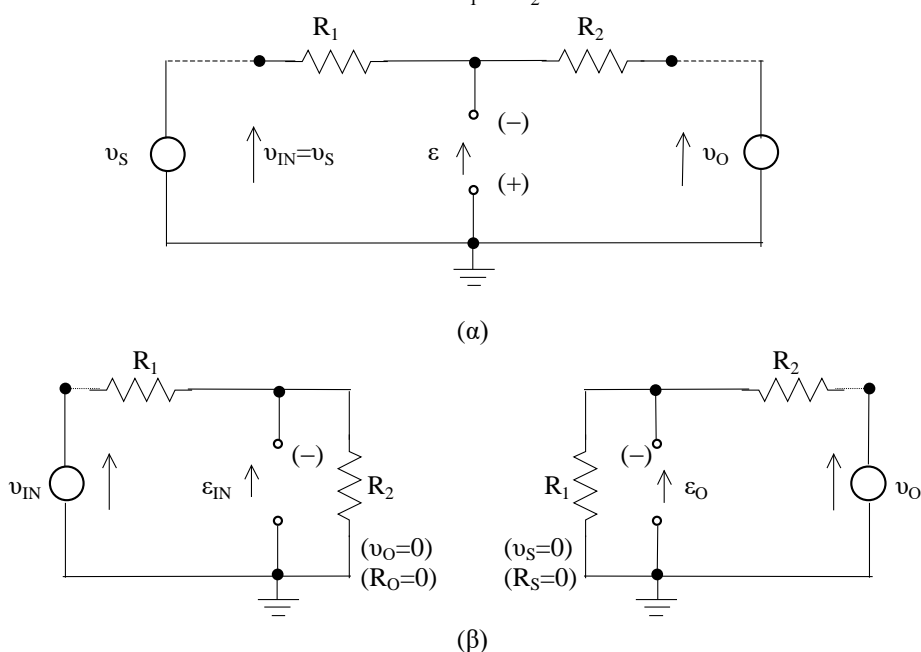
θεωρώντας δε ότι  $\varepsilon_O = \beta v_O$ , οι τιμές των δύο αυτών συνιστωσών μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα αν υποθέσουμε για λίγο ότι αυτές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, δηλ. ότι είναι αποτέλεσμα δράσης ανεξάρτητων μεταξύ τους πηγών.

Έτσι, όπως φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα 5.21, θεωρώντας ότι στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 5.20, υπάρχει και δρα, εκτός της πηγής  $v_S = v_{IN}$ , μια ανεξάρτητη πηγή τάσης  $v_O$ , τότε, εφαρμόζοντας κατά τα γνωστά την αρχή της επαλληλίας, διαπιστώνεται ότι:

$$\varepsilon_{IN} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_{IN} \quad \text{και} \quad \varepsilon_O = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_O \quad (5.36)$$

και, συνεπώς:

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.37)$$



**Σχήμα 5.21.** (α) "Ισοδύναμο" του κυκλώματος του σχήματος 5.20 (χωρίς τον T.E.) με χρήση εξωτερικής πηγής για την τάση  $v_O$  και (β) προσδιορισμός των συνιστωσών τάσης  $\varepsilon_{IN}$  και  $\varepsilon_O$  με εφαρμογή της αρχής της επαλληλίας.

Βεβαίως, η υπόθεση ότι οι δύο τάσεις  $\varepsilon_{IN}$  και  $\varepsilon_O$  είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους χρησιμοποιείται μόνο για την εύρεση της εξάρτησής τους από τα εκτός του T.E. στοιχεία του κυκλώματος, δηλ. τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$ , και τις τάσεις  $v_{IN}$  και  $v_O$ . Για το λόγο αυτό και η εφαρμογή της  $v_O$  από μια εξωτερική και ανεξάρτητη πηγή τάσης στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 5.21(α) έχει έννοια μόνον εφόσον ο T.E. θεωρείται ότι έχει αφαιρεθεί<sup>1</sup> απ' αυτό, ενώ, οι σχέσεις (5.36), που προκύπτουν με τον τρόπο αυτό, θα ισχύουν και στην περίπτωση ολόκληρου του κυκλώματος.

Πράγματι, επαναφέροντας τον T.E. στο κύκλωμα και θεωρώντας την πολικότητα της τάσης  $\varepsilon$  με τη φορά που φαίνεται στο σχήμα 5.21(α), θα ισχύει η σχέση (5.27):

$$-v_O = A v_\varepsilon = A \varepsilon$$

οπότε, με την αρχική υπόθεση-απαίτηση για γραμμική λειτουργία του T.E., δηλ. να είναι  $\varepsilon \rightarrow 0$ , θα πρέπει:

$$\varepsilon_{IN} \cong -\varepsilon_O \quad (5.38)$$

και, συνεπώς, λόγω των σχέσεων (5.36), θα ισχύει:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_{IN} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_O$$

<sup>1</sup> Εδώ ο αναγνώστης πρέπει να συνδυάσει τα παραπάνω με τις παρατηρήσεις της παραγράφου 3.8.1.1, καθώς η παρουσία ενός T.E. σ' ένα κύκλωμα με αρνητική ανάδραση δεν εξασφαλίζει από μόνη της τη γραμμικότητα της λειτουργίας του.

ή, αλλιώς, η σχέση (5.31), δηλ.:

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_{IN}$$

Με τον τρόπο αυτό επιβεβαιώνεται ότι η λειτουργία του ενισχυτή με αναστροφή του σχήματος 5.18, όπως περιγράφεται από τη σχέση (5.31), είναι αποτέλεσμα "συμβολής" ή "σύγκρισης" στην (-) είσοδο του Τ.Ε. των κλασμάτων  $\varepsilon_{IN}$  και  $\varepsilon_o$  των σημάτων εισόδου  $v_{IN}$  και εξόδου  $v_o$ , αντιστοίχως. Όμως, όπως δείχνουν οι σχέσεις (5.28) και (5.29), η συμβολή των δύο αυτών τάσεων επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του ρεύματος  $i=i_1=i_2$ , που διαρρέει τις δύο αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$ , καθώς μια μεταβολή του σήματος εισόδου  $v_{IN}$  ως προς την τάση  $\varepsilon=\varepsilon_{IN}+\varepsilon_o$  της (-) εισόδου του Τ.Ε. προκαλεί ίδιας φοράς μεταβολή του ρεύματος  $i$ , η οποία, με τη σειρά της, προκαλεί αντίθετης φοράς μεταβολή του σήματος εξόδου  $v_o$  (διότι  $v_o=\varepsilon-iR_2$ ), κ.ο.κ., έτσι ώστε, τελικώς, να ισχύουν οι εκφράσεις:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{IN} &= (1-\beta)v_{IN} \\ \varepsilon_o &= \beta v_o \\ \varepsilon_{IN} &\cong -\varepsilon_o \end{aligned} \right\} \quad (5.39)$$

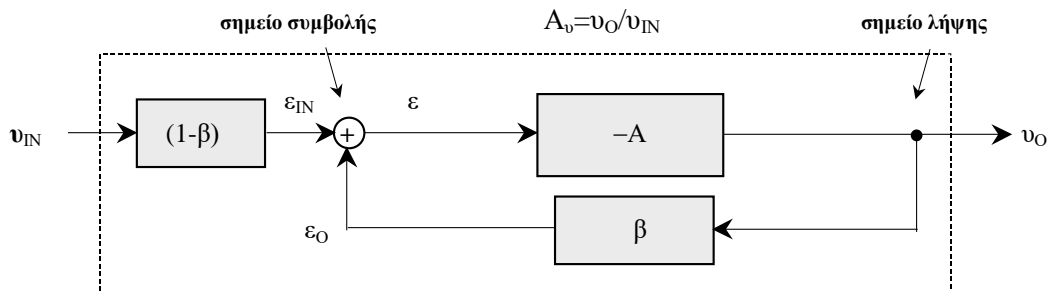
όπου  $\beta$  είναι ο **συντελεστής ανάδρασης** που δίνεται από τη σχέση (5.37).

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι στο κύκλωμα του ενισχυτή με αναστροφή, η ανάδραση είναι ανάδραση τάσης εξόδου - ρεύματος εισόδου, η δε σχηματική παράσταση της συνολικής λειτουργίας του κυκλώματος είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5.22, όπου από τις σχέσεις (5.27), (5.35) και (5.39), προκύπτει ότι:

$$\frac{v_o}{\varepsilon_{IN}} = -\frac{A}{1+A\beta} \quad (5.40)$$

και, τελικώς:

$$\frac{v_o}{v_{IN}} = A_v = -\frac{A(1-\beta)}{1+A\beta} \quad (5.41)$$



**Σχήμα 5.22.** Παράσταση της λειτουργίας<sup>1</sup> του ενισχυτή αναστροφής όπως περιγράφεται από τη σχέση (5.41).

Τέλος, από την σχέση (5.40) ή την (5.41) φαίνεται αμέσως ότι η συμβολή των σημάτων  $\varepsilon_o$  και  $\varepsilon_{IN}$  έχει ως αποτέλεσμα τη λειτουργία του κυκλώματος με συντελεστή ενίσχυσης τάσης  $|A_v|$  που είναι μικρότερος από τον συντελεστή  $|A|$  της ευθείας διαδρομής και, συνεπώς, η ανάδραση είναι αρνητική.

### 5.5.2.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας του ενισχυτή με αναστροφή

Για τον προσδιορισμό, τώρα, των αντιστάσεων εισόδου,  $R_{INPUT}$ , και εξόδου,  $R_{OUTPUT}$ , του ενισχυτή αναστροφής με Τ.Ε., χρησιμοποιούμε και πάλι τις γενικές σχέσεις ορισμού τους, ενώ, όπως και στην περίπτωση του ενισχυτή χωρίς αναστροφή, ο προσδιορισμός του συντελεστή ενίσχυσης ρεύματος,  $A_i=i_o/i_{IN}$ , δεν έχει έννοια.

Έτσι, με τη βοήθεια του κυκλώματος του σχήματος 5.23, θα είναι:

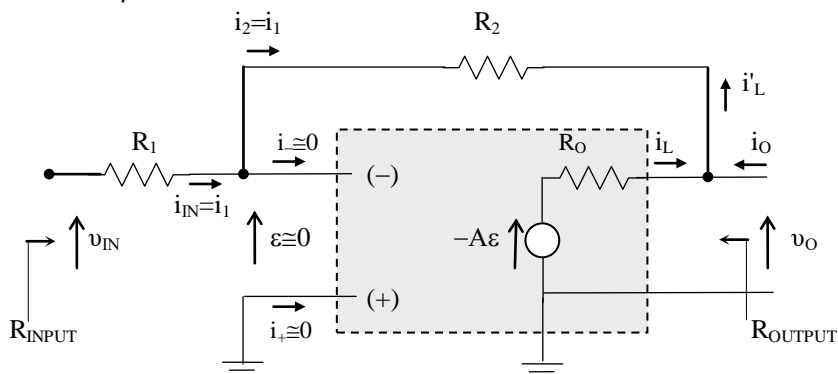
$$R_{INPUT} = \frac{v_{IN}}{i_{IN}} = \frac{v_{IN}}{i_2} = \frac{v_{IN}R_2}{\varepsilon - v_o} = \dots = R_1 \quad (5.42)$$

ενώ, με τον ίδιο τρόπο, όπως και στην περίπτωση του ενισχυτή χωρίς αναστροφή, προκύπτει ότι:

<sup>1</sup> Η μορφή της λειτουργίας του ενισχυτή αναστροφής του σχήματος 5.18 αντιστοιχεί στην ισοδύναμη περιγραφή της με τις συνιστώσες τάσης  $\varepsilon_{IN}$  και  $\varepsilon_o$  και όχι με τη θεώρηση του ρεύματος  $i=i_1=i_2$ . Στην περίπτωση αυτή, ανατρέχοντας κανείς στο σχήμα 3.82, θα έπρεπε αντί άθροισης στο σημείο συμβολής να υπάρχει ένας απλός κόμβος ρευμάτων, η τάση του οποίου θα ήταν η  $\varepsilon$ , καθώς επίσης και οι μονάδες διαίρεσης τάσης  $(1-\beta)$  και  $\beta$  να έχουν αντικατασταθεί από δύο αντίστοιχες μονάδες διαγωγιμότητας  $(1/R_1)$  και  $(1/R_2)$ .

$$R_{\text{OUTPUT}} = \frac{v_o}{i_o} = \frac{v_o \cdot R_o}{v_o + A\varepsilon} = \dots = \frac{R_o}{(1 + \beta A)} \quad (5.43)$$

καθώς, για  $v_{\text{IN}}=0$ , θα είναι  $\varepsilon=\varepsilon_o=\beta v_o$ .



**Σχήμα 5.23.** Ισοδύναμο του κυκλώματος του σχήματος 5.18 για την εύρεση των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου του.

Τέλος, σημειώνεται ότι το τμήμα του ισοδύναμου κυκλώματος του σχήματος 5.23 χωρίς την αντίσταση  $R_1$ , αντιστοιχεί στις προϋποθέσεις εφαρμογής του 1<sup>ου</sup> Θεωρήματος Miller (παράγραφος 3.10.1) και, μάλιστα, η εφαρμογή<sup>1</sup> του οδηγεί τόσο στην επαλήθευση της τιμής της αντίστασης εισόδου, που δίνεται απ' τη σχέση (5.42), όσο και της σχέσης (5.32) για το συντελεστή ενίσχυσης τάσης  $A_v$  του κυκλώματος.

Θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι δεν ισχύει το ίδιο για την αντίσταση εξόδου, καθώς ο τρόπος προσδιορισμού της που είδαμε παραπάνω και οδηγεί στη σχέση (5.43), αν και γίνεται με την υπόθεση ότι  $v_{\text{IN}}=0$ , εμπεριέχει την εξάρτηση λόγω ανάδρασης μεταξύ της τάσης στην (-) είσοδο και της εφαρμοζόμενης εξωτερικής τάσης  $v_o$ , κάτι που δεν είναι δυνατόν να συμβεί με τη χρήση του θεωρήματος Miller<sup>2</sup>.

### 5.5.3 Παρατηρήσεις

Τα δύο κυκλώματα ενισχυτών τάσης με Τ.Ε. που παρουσιάστηκαν αποτελούν τις δύο μοναδικές μορφές συνδεσμολογίας με την οποία μπορεί ένας Τ.Ε. να χρησιμοποιηθεί σε γραμμικά κυκλώματα. Κοινό χαρακτηριστικό των κυκλωμάτων αυτών είναι η χρήση αρνητικής ανάδρασης, με διαφορετική όμως μορφή στο καθένα λόγω της διαφορετικής συνδεσμολογίας τους.

Πράγματι, στον ενισχυτή χωρίς αναστροφή, η συνδεσμολογία του Τ.Ε. υποδεικνύει ξεκάθαρα ότι αυτός λειτουργεί σύμφωνα με το διαφορικό τρόπο λειτουργίας που περιγράφεται από τη βασική σχέση (5.4), ενώ, στον ενισχυτή με αναστροφή, ο Τ.Ε. είναι συνδεδεμένος για απλή λειτουργία, έχοντας γειωμένο τον ακροδέκτη της μη αναστρέφουσας εισόδου του.

Συμπεραίνεται, επομένως, ότι όταν πρόκειται για κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών, που εν δυνάμει έχουν γραμμική λειτουργία, τότε:

- θα υπάρχει οπωσδήποτε **αρνητική ανάδραση**, και
- η μορφή της ανάδρασης αυτής θα καθορίζεται από τον τρόπο λειτουργίας του αντίστοιχου Τ.Ε.,

οπότε, με βάση την ερμηνεία της λειτουργίας των δύο κυκλωμάτων:

- στην περίπτωση διαφορικής λειτουργίας (ή συνδεσμολογίας) ενός Τ.Ε. σε γραμμικό κύκλωμα, η αρνητική ανάδραση που χρησιμοποιείται είναι **ανάδραση τάσης** ή, αλλιώς, **ανάδραση τάσης εξόδου – τάσης εισόδου**, σύμφωνα με τη σχηματική παράσταση του σχήματος 5.16, ενώ
- στην περίπτωση απλής λειτουργίας του αντίστοιχου Τ.Ε., η χρησιμοποιούμενη (αρνητική) ανάδραση είναι **ανάδραση τάσης – ρεύματος** ή, αλλιώς, **ανάδραση τάσης εξόδου – ρεύματος εισόδου**, με ισοδύναμη παράσταση όπως αυτή του σχήματος 5.22.

Σε σχέση, τώρα, με τη χρήση αρνητικής ανάδρασης στις δύο αυτές συνδεσμολογίες, θα πρέπει να σημειωθεί ότι με δεδομένη την εξ' ορισμού πολύ μεγάλη τιμή του συντελεστή  $A$  των Τ.Ε., η δυνατότητα γραμμι-

<sup>1</sup> Για την εφαρμογή του θεωρήματος Miller αρκεί στη θέση του συντελεστή ενίσχυσης τάσης του αρχικού τετράπολου, που στις σχέσεις (3.92) και (3.93) συμβολίζεται με  $A_v$ , να τεθεί ο συντελεστής  $A$  του Τ.Ε. δηλ. ο συντελεστής ενίσχυσης τάσης ανοικτού βρόχου του κυκλώματος.

<sup>2</sup> Γενικώς και τα δύο θεωρήματα Miller, αν και διατυπώνονται για τετράπολα με ανάδραση, εφαρμόζονται μόνο κατά την "ορθή" φορά λειτουργίας του κυκλώματος, δηλ. από την είσοδο προς την έξοδο (μονόδρομη εφαρμογή).

κής λειτουργίας είτε σε διαφορική, είτε σε απλή σύνδεσή τους, είναι πολύ περιορισμένη και αυτό φαίνεται με τις σχέσεις (5.9) και (5.10). Η κατάσταση αυτή, λοιπόν, αλλάζει, όταν μέρος του σήματος εξόδου χρησιμοποιείται έτσι ώστε να αντιτάσσεται στην παραπέρα αύξησή του. Όπως είδαμε, αυτό ισοδυναμεί με την επαναφορά του σε εκείνη την είσοδο του Τ.Ε., που θα προκαλέσει αντίθετης φοράς μεταβολή, δηλ. στην (-) είσοδο, και, τελικά, λειτουργία του αντίστοιχου κυκλώματος με συντελεστή ενίσχυσης τάσης  $A_v \ll A$ .

Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται μια "απευαισθητοποίηση" της λειτουργίας του Τ.Ε., καθώς, αντί σε κάθε χρονική στιγμή να ενισχύεται το σήμα τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του κυκλώματος, ενισχύεται η τρέχουσα μεταβολή του, όπως αυτή καταγράφεται ως διαφορά (στο σημείο συμβολής ή σύγκρισης) της τρέχουσας τιμής του και ενός κλάσματος του σήματος εξόδου που ήδη έχει παραχθεί<sup>1</sup>.

Η "απευαισθητοποίηση" αυτή συντελείται αποκλειστικά στο πλαίσιο του πλήρους κυκλώματος που συμμετέχει ο Τ.Ε., οπότε ο μεν Τ.Ε. λειτουργεί με απολαβή τάσης  $A$  για την τρέχουσα μεταβολή του σήματος εισόδου, το δε κύκλωμα, με απολαβή τάσης  $A_v$ , αλλά για το ίδιο το σήμα εισόδου του.

Επί πλέον, όπως δείχνουν οι σχέσεις (5.15) και (5.32), που αντιστοιχούν στα κυκλώματα ενίσχυσης χωρίς και με αναστροφή, ο κάθε συντελεστής ενίσχυσης τάσης κλειστού βρόχου  $A_v$  είναι, κατ' αρχήν, πολύ μικρότερος από τον αντίστοιχο συντελεστή  $A$  (ανοικτού βρόχου) και, τελικώς, ανεξάρτητος από τον  $A$ , καθώς εξαρτάται μόνον από εκείνα τα στοιχεία του κυκλώματος, που καθορίζουν το μέτρο του κλάσματος του σήματος εξόδου που επιστρέφεται στην είσοδο του Τ.Ε., δηλ. από τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  του αντίστοιχου συντελεστή ανάδρασης  $\beta$  [βλ. σχέσεις (5.17) και (5.37)].

Βεβαίως, οι σχέσεις (5.15) και (5.32) προκύπτουν με την παραδοχή ότι  $\beta A \gg 1$ , που απλοποιεί την μαθηματική περιγραφή της λειτουργίας της χρησιμοποιούμενης ανάδρασης. Επομένως, αν πάρουμε τις αντίστοιχες πλήρεις εκφράσεις, δηλ. τις σχέσεις (5.18) για τον ενισχυτή χωρίς αναστροφή και (5.41) για τον ενισχυτή με αναστροφή, διαπιστώνουμε αμέσως ότι η επίπτωση της ανάδρασης, δηλ. της παρουσίας διαδρομής επιστροφής από την έξοδο προς της είσοδο του βασικού τμήματος του κάθε κυκλώματος, περιγράφεται από τον παράγοντα  $(1+\beta A)$ , που εμφανίζεται στον παρονομαστή κάθε μιας απ' τις σχέσεις αυτές<sup>2</sup>.

Ο παράγοντας αυτός ονομάζεται **παράγοντας ανάδρασης** του κυκλώματος ή **παράγοντας απευαισθητοποίησης** του Τ.Ε. στο αντίστοιχο κύκλωμα και αποτελεί ένα μέτρο ποσοτικής περιγραφής της επίπτωσης της ανάδρασης στα χαρακτηριστικά λειτουργίας του<sup>3</sup>. Με την έννοια αυτή, ο παράγοντας ανάδρασης ενός κυκλώματος με ανάδραση αποτελεί ουσιαστικά χαρακτηριστικό μέγεθος του συγκεκριμένου κυκλώματος.

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (5.24), (5.25) και (5.42), (5.43) για τις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου και των δύο συνδεσμολογιών ενισχυτών τάσης με Τ.Ε., και συνδυάζοντάς τες με το είδος της χρησιμοποιούμενης αρνητικής ανάδρασης συμπεραίνονται τα εξής:

- όταν η ανάδραση ενός κυκλώματος αναφέρεται στην τάση εξόδου του, τότε η αντίσταση εξόδου του κυκλώματος **μειώνεται** κατά τον αντίστοιχο παράγοντα ανάδρασης,
- όταν η ανάδραση αυτή αναφέρεται στην τάση εισόδου, η αντίστοιχη αντίσταση εισόδου **αυξάνεται** κατά τον παράγοντα ανάδρασης, ενώ
- όταν η ανάδραση αναφέρεται στο ρεύμα εισόδου, η αντίστοιχη αντίσταση **μειώνεται** κατά τον παράγοντα ανάδρασης του κυκλώματος<sup>4</sup>.

Επίσης, αναφερόμενοι στο συχνοτικό διάγραμμα του σχήματος 5.8 και την εξάρτηση του συντελεστή  $A$  από τη συχνότητα, θα πρέπει να τονιστεί ότι απ' τη στιγμή που η χρήση αρνητικής ανάδρασης στις δύο συνδεσμολογίες ενισχυτών τάσης με Τ.Ε. έχει ως αποτέλεσμα η λειτουργία των αντίστοιχων κυκλωμάτων να χαρακτηρίζεται από ένα νέο συντελεστή ενίσχυσης τάσης,  $A_v$ , για τον οποίο ισχύει, γενικώς,  $A_v \ll A$ , ο νέος αυτός συντελεστής θα διατηρεί σταθερή – και ανεξάρτητη από τη συχνότητα – την τιμή του για μια αντιστοιχώς διευρυμένη περιοχή των συχνοτήτων.

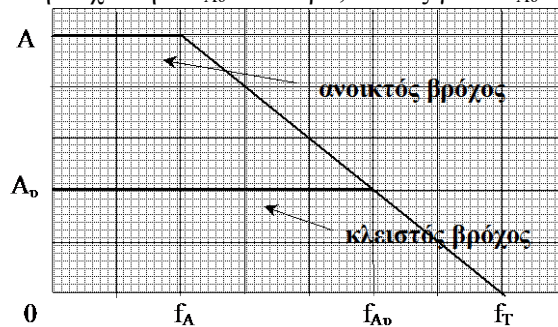
<sup>1</sup> Είναι δηλ. φανερό ότι βασική παράμετρος για την επιτυχία αυτής της τεχνικής είναι ο χρόνος, με την έννοια ότι η σύγκριση αυτή στηρίζεται στον πραγματικό χρόνο που απαιτείται μεταξύ διέγερσης και απόκρισης του Τ.Ε.. Χωρίς να επεκταθούμε περισσότερο, σημειώνουμε ότι όταν ο χρόνος αυτός είναι ανεξάρτητος από τη συχνότητα των αντίστοιχων σημάτων τότε και ο συντελεστής  $A$  διατηρεί σταθερή τιμή.

<sup>2</sup> Προκύπτει εύκολα ότι όταν  $(1+\beta A) > 1$ , η ανάδραση χαρακτηρίζεται ως αρνητική.

<sup>3</sup> Ο ορισμός του παράγοντα ανάδρασης ενός κυκλώματος ισχύει γενικότερα για κάθε ενεργό κύκλωμα με ανάδραση και όχι μόνο για κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών.

<sup>4</sup> Παρά το γεγονός ότι η σχέση (5.42) δείχνει ότι η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή αναστροφής με Τ.Ε. είναι ίση απλώς με την τιμή της αντίστασης  $R_1$ , γενικώς, αποδεικνύεται ότι η τιμή αυτή είναι πράγματι μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή της αντίστασης εισόδου χωρίς ανάδραση κατά τον παράγοντα ανάδρασης του συγκεκριμένου κυκλώματος.

Επί πλέον, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.24, με δεδομένη τη σχέση μεταξύ  $A$  και  $f$  στους πραγματικούς Τ.Ε., δηλ.  $A=A(f)$ , η παρουσία του παράγοντα ανάδρασης, με τη μορφή  $[1+\beta A(f)]$ , στον παρονομαστή των σχέσεων (5.15) και (5.41) και η επακόλουθη επίδρασή του στη διαμόρφωση της τιμής του  $A_v$  μειώνεται για συχνότητες  $f > f_A$  και λήγει από τη συχνότητα  $f_{Av}$  και πέρα, καθώς για  $f \geq f_{Av}$  θα ισχύει  $\beta A(f) \ll 1$ .



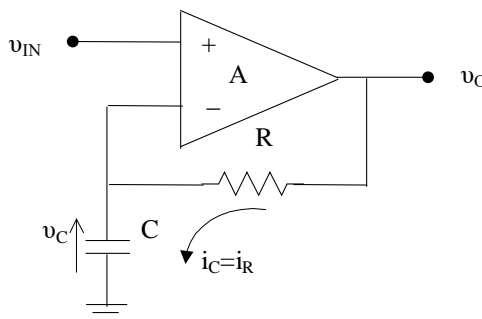
**Σχήμα 5.24.** Συχνотικό διάγραμμα για τον συντελεστή ενίσχυσης τάσης  $A_v$  (κλειστού βρόχου) κυκλώματος ενισχυτή με πραγματικό Τ.Ε. σε σχέση με το αντίστοιχο για το συντελεστή  $A$  (ανοικτού βρόχου) του Τ.Ε.. Είναι φανερό ότι  $f_{Av} \gg f_A$ .

Τέλος, θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι όλα τα παραπάνω δεν ισχύουν μόνο στην περίπτωση κυκλωμάτων με Τ.Ε. και ωμικά στοιχεία (αντιστάσεις), αλλά – σε πλήρη ταύτιση με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.3 – και στις περιπτώσεις κυκλωμάτων τελεστικών ενισχυτών με μη ωμικά (μιγαδικά) στοιχεία, όπως πυκνωτές και, σπανιότερα, πηνία<sup>1</sup>. Επομένως, για την ανάλυση ενός οποιουδήποτε τέτοιου κυκλώματος αρκεί να γίνει εφαρμογή μιας από τις αντίστοιχες τεχνικές που παρουσιάστηκαν στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε την περίπτωση της μη αναστρέψουσας συνδεσμολογίας του Τ.Ε. στον ενισχυτή χωρίς αναστροφή, όπου η αντίσταση  $R_1$  έχει αντικατασταθεί από ένα πυκνωτή  $C$ . Όπως φαίνεται αμέσως από το αντίστοιχο σχήμα 5.25, η σχέση λειτουργίας του Τ.Ε. διατηρεί τη βασική μορφή της, προσαρμοσμένη, όμως, στα δεδομένα του συγκεκριμένου κυκλώματος, δηλ. θα ισχύει:

$$v_o = A(v_+ - v_-) = A(v_{IN} - v_C)$$

και, συνεπώς, ανάλογα με τη ζητούμενη ανάλυση, είτε θα προσδιορίζεται η αντίστοιχη (λόγω πυκνωτή) διαφορική εξίσωση, είτε θα γίνεται απλή χρήση μιγαδικών εκφράσεων.



**Σχήμα 5.25.** Μη αναστρέψουσα συνδεσμολογία Τ.Ε. σε κύκλωμα με αντίσταση και πυκνωτής.

Έτσι, για γραμμική λειτουργία θα πρέπει, κατά τα γνωστά, να είναι:  $v_+ \cong v_-$ , δηλ.  $v_{IN} \cong v_C$ , οπότε επειδή:

$$v_o = v_{IN} + v_R \quad \text{και} \quad v_R = R \cdot i_C = RC \frac{dv_{IN}}{dt}$$

στη μεν πρώτη περίπτωση, η πλήρης απόκριση του κυκλώματος του σχήματος 5.25 θα δίνεται από την διαφορική εξίσωση:

$$v_o = v_{IN} + RC \frac{dv_{IN}}{dt} \quad (5.44)$$

στη δε δεύτερη περίπτωση, με τη βοήθεια μιγαδικών εκφράσεων, θα είναι:

<sup>1</sup> Γενικώς η χρήση πηνίων αποφεύγεται, κυρίως, λόγω των μεγάλων συγκριτικά διαστάσεών τους, ενώ, όπου αυτή είναι απολύτως αναγκαία, χρησιμοποιούνται και τεχνικές προσομοίωσης της αντίστοιχης ηλεκτρικής συμπεριφοράς τους.



$$\mathbf{V}_{\text{IN}} = \mathbf{V}_C = \frac{\mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_R + \mathbf{Z}_C} \mathbf{V}_O$$

ή, αλλιώς

$$v_{\text{IN}} = v_C = \frac{|Z_C|}{|Z_R + Z_C|} v_O$$

οπότε, η μόνιμη απόκριση του κυκλώματος (για ημιτονική διέγερση) θα δίνεται από την έκφραση:

$$v_O = \frac{|Z_R + Z_C|}{|Z_C|} v_{\text{IN}} \quad (5.45\alpha)$$

ή, μετά από πράξεις,

$$v_O = v_{\text{IN}} \sqrt{(\omega CR)^2 + 1} \quad (5.45\beta)$$

όπου  $\omega = 2\pi f$ .

Από τα παραπάνω, συμπεραίνονται τα εξής:

- η παρουσία μη ωμικών (μιγαδικών) στοιχείων σε κυκλώματα με Τ.Ε. δεν επηρεάζει τις βασικές σχέσεις ορισμού της λειτουργίας του αντίστοιχου Τ.Ε. και, κατ' ακολουθίαν, τον προσδιορισμό των αντίστοιχων σχέσεων μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου,
- η εξάρτηση του μέτρου των μιγαδικών αντιστάσεων από τη συχνότητα των εφαρμοζόμενων σημάτων έχει ως αποτέλεσμα, τόσο η συνολική λειτουργία κάθε τέτοιου κυκλώματος, όσο και τα βασικά χαρακτηριστικά και επιδόσεις του, να εξαρτώνται από τη συχνότητα αυτή.

Αρα, γραμμικά κυκλώματα με Τ.Ε. που περιλαμβάνουν αντιστάσεις και πυκνωτές προσφέρονται για την υλοποίηση ενεργών, όπως λέγονται, φίλτρων, δηλ. κυκλωμάτων, που με τη μόνιμη απόκρισή τους στο πεδίο της συχνότητας επιτυγχάνουν την ενίσχυση ή τον υποβιβασμό ενός ή περισσότερων τμημάτων του φάσματος συχνοτήτων των αντίστοιχων σημάτων.

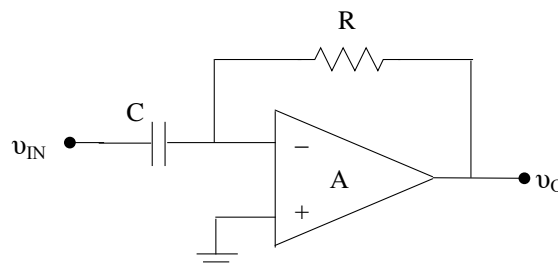
Επί πλέον, εφόσον, όπως είδαμε, η περιγραφή στο πεδίο του χρόνου της πλήρους λειτουργίας κυκλωμάτων τελεστικών ενισχυτών με αντιστάσεις και πυκνωτές γίνεται με τη διατύπωση των αντίστοιχων διαφορικών εξισώσεων, είναι φανερό ότι κυκλώματα τέτοιας μορφής προσφέρονται, όπως δείχνει και η σχέση (5.44), για την υλοποίηση κυκλωμάτων σχετικών με πράξεις διαφορίσης ή ολοκλήρωσης επί σημάτων.

#### 5.5.4 Κυκλώματα διαφορίσης και ολοκλήρωσης με Τ.Ε..

Σε εφαρμογή της τελευταίας παρατήρησης, αποδεικνύεται εύκολα ότι η παρουσία πυκνωτή στη θέση οποιασδήποτε από τις δύο αντιστάσεις της αναστρέφουσας συνδεσμολογίας του Τ.Ε. οδηγεί, αντιστοίχως, στον ορισμό των λεγόμενων κυκλωμάτων διαφορίσης και ολοκλήρωσης με Τ.Ε., με χαρακτηριστικά λειτουργίας ανάλογα με αυτά των απλών κυκλωμάτων αντίστασης – πυκνωτή, που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Πράγματι, στο σχήμα 5.26 δίνεται ένα κύκλωμα με ένα Τ.Ε. σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία, στο οποίο το σήμα εισόδου εφαρμόζεται στην (-) είσοδό του μέσω ενός πυκνωτή C, ενώ στον κλάδο ανάδρασης υπάρχει η ωμική αντίσταση R. Το κύκλωμα αυτό είναι γνωστό ως **κύκλωμα διαφορίσης με Τ.Ε.** καθώς, χρησιμοποιώντας τις βασικές σχέσεις που είδαμε κατά την ανάλυση του ενισχυτή με αναστροφή, δηλ. ότι  $v_- = v_+ = 0$  και  $i_{\text{IN}} = i_C = i_R$ , προκύπτει αμέσως ότι η συνολική λειτουργία του περιγράφεται από τη σχέση:

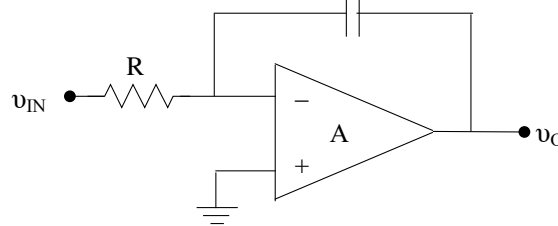
$$v_O = -v_C = -RC \frac{dv_{\text{IN}}}{dt} \quad (5.46)$$



**Σχήμα 5.26.** Κύκλωμα διαφορίσης με Τ.Ε..

Με τον ίδιο τρόπο αποδεικνύεται ότι το κύκλωμα του σχήματος 5.27, όπου ο πυκνωτής C βρίσκεται συνδεδεμένος μεταξύ της εξόδου και της (-) εισόδου του Τ.Ε., αποτελεί ένα **κύκλωμα ολοκλήρωσης με Τ.Ε.**, η σχέση λειτουργίας του οποίου θα έχει τη μορφή:

$$v_o = -v_R = -\frac{1}{RC} \int v_{IN} dt \quad (5.47)$$



Σχήμα 5.27. Κύκλωμα ολοκλήρωσης με Τ.Ε..

### 5.5.4.1 Παρατηρήσεις

Είναι προφανές ότι η ονομασία των δύο αυτών κυκλωμάτων ως κυκλωμάτων διαφόρισης και ολοκλήρωσης οφείλεται στην αντίστοιχη μορφή των σχέσεων (5.46) και (5.47). Από τη σύγκριση των σχέσεων αυτών με τις σχέσεις (4.24) και (4.25), των απλών κυκλωμάτων αντίστασης - πυκνωτή του σχήματος 4.12, προκύπτει ότι η λειτουργία του Τ.Ε. (μόνο όμως με τη συγκεκριμένη συνδεσμολογία) οδηγεί σε καθαρές σχέσεις μεταξύ των σημάτων τάσης εισόδου και εξόδου.

Έτσι, εφόσον η εξαγωγή των σχέσεων (5.46) και (5.47) γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και η ανάλυση της λειτουργίας του κυκλώματος ενισχυτή τάσης με αναστροφή, η ισχύς της βασικής σχέσης (5.4) για τη λειτουργία του Τ.Ε. σε συνδυασμό με την παρουσία αρνητικής ανάδρασης και τις γνωστές πλέον προϋποθέσεις γραμμικής λειτουργίας των κυκλωμάτων με Τ.Ε. δείχνει ότι τα κυκλώματα διαφόρισης και ολοκλήρωσης με Τ.Ε. είναι ουσιαστικά **γραμμικά κυκλώματα ενίσχυσης με αναστροφή της παραγώγου ή του ολοκληρώματος του σήματος τάσης** στην είσοδό τους.

Τέλος, θα πρέπει, να επισημανθούν τα εξής:

- Η ανάλυση της πλήρους λειτουργίας των κυκλωμάτων αυτών στο πεδίο του χρόνου οδηγεί, κατά τα γνωστά, σε κατάλληλες εκφράσεις τόσο για τη μεταβατική, όσο και για τη μόνιμη λειτουργία τους, με μόνο περιορισμό το ότι η τάση εξόδου δεν μπορεί να έχει τιμή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη (θετική ή αρνητική) τάση τροφοδοσίας.
- Όσα αναφέρθηκαν για τη διαφορά φάσης (προήγηση ή καθυστέρηση) που συνοδεύει τη λειτουργία των κυκλωμάτων RC διαφόρισης και ολοκλήρωσης ισχύουν, λαμβάνοντας υπόψη την εξ ορισμού αλλαγή προσήμου, δηλ. την εισαγωγή της διαφοράς φάσης  $180^\circ$ , μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου.
- Ομοίως, η απεικόνιση στα αντίστοιχα διαγράμματα Bode της συχνοτικής συμπεριφοράς των κυκλωμάτων διαφόρισης και ολοκλήρωσης με Τ.Ε. δείχνει ότι η ισοδύναμη υπερπερατή ή χαμηλοπερατή λειτουργία τους συνοδεύεται από την αύξηση ή, αντιστοίχως, μείωση του συντελεστή ενίσχυσης τάσης με τη συχνότητα. Αυτό φαίνεται καθαρά απ' το ότι και στις δύο αυτές περιπτώσεις κυκλωμάτων, ο αντίστοιχος συντελεστής ανάδρασης  $\beta$  είναι συνάρτηση του μέτρου της σύνθετης αντίστασης του πυκνωτή και, συνεπώς, κατ' αναλογία προς τη σχέση (5.31), ισχύουν:

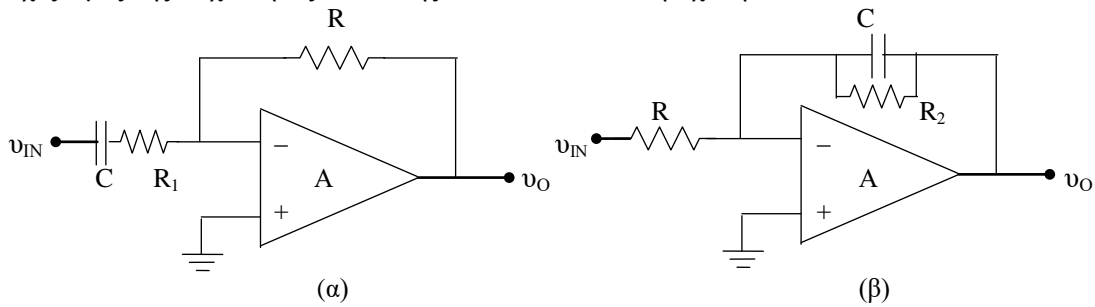
$$v_o = -(\omega RC)v_{IN} \quad (\text{για το κύκλωμα διαφόρισης})$$

$$v_o = -\frac{1}{\omega RC} v_{IN} \quad (\text{για το κύκλωμα ολοκλήρωσης})$$

Για την τελευταία αυτή περίπτωση, αναφέρεται μόνο ότι η λειτουργία κυκλωμάτων διαφόρισης ή ολοκλήρωσης με καθορισμένη συχνοτική συμπεριφορά, δηλ. με καθορισμένη περιοχή διέλευσης συχνοτήτων και σταθερό συντελεστή ενίσχυσης τάσης, ισοδυναμεί με τη λειτουργία ενός κανονικού υπερπερατού ή χαμηλοπερατού ενεργού φίλτρου, όπου, όμως, απαιτείται ένα άνω όριο στην τιμή του αντίστοιχου συντελεστή ενίσχυσης  $A_v(f) = v_o/v_{IN}$ .

Έτσι, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.28 και χωρίς να επεκταθούμε περισσότερο, αυτό επιτυγχάνεται με τη σύνδεση μιας πρόσθετης αντίστασης σε σειρά ή, αντιστοίχως, παράλληλα προς τον πυκνωτή, οπότε η σταθερά χρόνου του συνδυασμού τους θα ορίζει μια αντίστοιχη τιμή συχνότητας αποκοπής, πάνω ή κάτω από την οποία, η λειτουργία κάθε κυκλώματος θα εμφανίζει πλέον σταθερό συντελεστή ενίσχυσης. Πράγματι, μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι σε κάθε ένα από τα κυκλώματα αυτά η μέγιστη τιμή του αντίστοιχου συντε-

λεστή ενίσχυσης θα είναι ίση προς  $A_{v(max)} = -(R/R_1)$ , για  $\omega \gg (1/CR_1)$ , ή  $A_{v(max)} = -(R_2/R)$ , για  $\omega \ll (1/CR_1)$ , ενώ οι αντίστοιχες τιμές της συχνότητας αποκοπής θα δίνονται από τη σχέση:  $\omega_c = 1/RC$



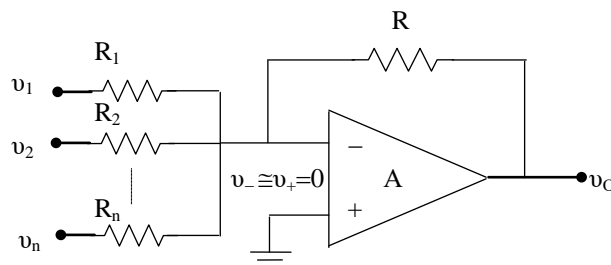
**Σχήμα 5.28.** Κυκλώματα με Τ.Ε. (α) διαφόρισης και (β) ολοκλήρωσης με λειτουργία υπερπερατού και χαμηλοπερατού φίλτρου, αντιστοίχως.

### 5.5.5 Κυκλώματα ενισχυτών άθροισης και διαφοράς σημάτων τάσης

Η μελέτη των δύο βασικών συνδεσμολογιών του Τ.Ε. σε κυκλώματα ενίσχυσης τάσης επιτρέπει την κατανόηση της λειτουργίας κάθε κυκλώματος που θα είναι παραλλαγή αυτών των συνδεσμολογιών.

Έτσι, το κύκλωμα του Τ.Ε. του σχήματος 5.29, είναι γνωστό ως **κύκλωμα ενισχυτή άθροισης σημάτων τάσης** και αποτελεί ένα απλό παράδειγμα του πώς το βασικό κύκλωμα του ενισχυτή με αναστροφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση μαθηματικών πράξεων για ένα πλήθος σημάτων / συνιστωσών με διαφορετικό για το καθένα συντελεστή βάρους (ενίσχυσης). Επομένως, εφαρμόζοντας τις βασικές προϋποθέσεις γραμμικής λειτουργίας, που είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους, και, προφανώς, σε συνδυασμό με την αρχή της επαλληλίας για τα διαφορετικά σήματα τάσης στις αντίστοιχες εισόδους του κυκλώματος, η σχέση που περιγράφει τη συνολική λειτουργία του προκύπτει ότι έχει τη μορφή:

$$v_O = - \left( \frac{R}{R_1} v_1 + \frac{R}{R_2} v_2 + \dots + \frac{R}{R_n} v_n \right) \quad (5.48)$$



**Σχήμα 5.29.** Κύκλωμα ενισχυτή άθροισης σημάτων τάσης με Τ.Ε..

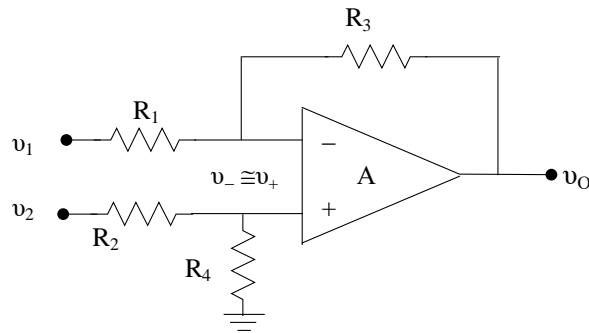
Με παρόμοιο τρόπο διαπιστώνεται ότι το κύκλωμα του σχήματος 5.30, που είναι γνωστό ως **κύκλωμα ενισχυτή διαφοράς σημάτων τάσης**, αποτελεί συνδυασμό και των δύο συνδεσμολογιών γραμμικής λειτουργίας ενός Τ.Ε. σε κύκλωμα με εξωτερικά στοιχεία, η δε λειτουργία του αποδεικνύεται εύκολα ότι περιγράφεται από τη γενική σχέση:

$$v_O = \left( \frac{R_1 + R_3}{R_1} \right) \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \cdot v_2 - \left( \frac{R_3}{R_1} \right) \cdot v_1 \quad (5.49)$$

και, μάλιστα, αν τεθεί  $R_1 = R_2$  και  $R_3 = R_4$ , τότε:

$$v_O = \frac{R_3}{R_1} (v_2 - v_1) \quad (5.50)$$

ενώ, αν τεθεί  $R_1 = R_3$  και  $R_2 = R_4$ , προφανώς:  $v_O = v_2 - v_1$



Σχήμα 5.30. Κύκλωμα ενισχυτή διαφοράς σημάτων τάσης με Τ.Ε..

Σημειώνεται, τέλος, ότι τα δύο αυτά κυκλώματα μπορούν προφανώς να συνδυασθούν και με τα κυκλώματα διαφορίσης και ολοκλήρωσης, έτσι ώστε να υλοποιούνται κυκλώματα με σήμα τάσης στην εξόδο, που να είναι μια σύνθετη μαθηματική έκφραση των σημάτων συνιστωσών στις αντίστοιχες εισόδους τους.

### 5.5.6 Κυκλώματα ειδικών εφαρμογών με Τ.Ε..

Όπως αναφέρθηκε στις πρώτες παραγράφους του Κεφαλαίου αυτού και φάνηκε από τα κυκλώματα που έχουν παρουσιαστεί, η χρήση των Τ.Ε. ως αυτοτελών ενεργών στοιχείων στα διάφορα κυκλώματα έχει ως βασικό πλεονέκτημα τη δυνατότητα υλοποίησης κυκλωμάτων με διαφορετική λειτουργία και χαρακτηριστικά, ως αποτέλεσμα συνδυασμού ενός μικρού αριθμού διαφορετικών εξωτερικών ωμικών ή μη στοιχείων.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τρία απλά κυκλώματα Τ.Ε., η μορφή και η λειτουργία των οποίων στηρίζεται στις δύο βασικές συνδεσμολογίες γραμμικής λειτουργίας των Τ.Ε. και χρησιμοποιούνται ως κυκλώματα ειδικών εφαρμογών.

#### 5.5.6.1 Κύκλωμα απομόνωσης ή προσαρμογής – Ακολουθητής τάσης

Όπως είδαμε, ένας τυπικός πραγματικός Τ.Ε. χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου και, ταυτόχρονα, από πολύ μικρή αντίσταση εξόδου. Με τα χαρακτηριστικά αυτά, η αντίσταση εισόδου ενός Τ.Ε. αποτελεί το ιδανικό φορτίο για το οποιοδήποτε κύκλωμα ή τμήμα κυκλώματος παρέχει το σήμα τάσης εξόδου του οποίου σ' αυτήν. Αντιστοίχως, το σήμα τάσης στην έξοδο του Τ.Ε. μπορεί να αναπτυχθεί σε κάθε είδους φορτίο, η τιμή αντίστασης του οποίου, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν π.χ. στην παράγραφο 3.3.5.1, είναι αρκούντως μεγαλύτερη από την ισοδύναμη αντίσταση εξόδου του Τ.Ε..

Αναφερόμενοι, τώρα, στις δύο συνδεσμολογίες γραμμικής λειτουργίας του Τ.Ε. (όπου υπάρχει αρνητική ανάδραση), είδαμε ότι στην περίπτωση της αναστρέφουσας συνδεσμολογίας, η χρησιμοποιούμενη ανάδραση οδηγεί μεν στη μείωση της αντίστασης εξόδου του Τ.Ε., παράλληλα όμως – και σε αντιδιαστολή προς την μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία – προκαλεί μείωση και της αντίστοιχης αντίστασης εισόδου.

Επομένως, ένα κύκλωμα ενισχυτή χωρίς αναστροφή με Τ.Ε. αποτελεί την κατάλληλη μορφή γραμμικού κυκλώματος για εφαρμογές που απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη αντίσταση εισόδου και, ταυτόχρονα, ιδιαίτερα μικρή αντίσταση εξόδου. Τέτοιες εφαρμογές αναφέρονται σε περιπτώσεις σύνδεσης είτε τμημάτων του ίδιου κυκλώματος, είτε ανεξάρτητων κυκλωμάτων ή, ακόμα, σύνδεσης ενός φορτίου σ' ένα κύκλωμα, όπου, , ένα σήμα τάσης πρέπει να αναπτυχθεί στα άκρα μιας μικρής σχετικά (ωμικής ή όχι) αντίστασης εισόδου ή φορτίου, αλλά δεν υπάρχει η δυνατότητα παροχής της απαιτούμενης για αυτό έντασης ρεύματος.

Άρα, με την παρεμβολή ενός κυκλώματος με Τ.Ε. σε μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία, επιτυγχάνεται λειτουργική απομόνωση των επί μέρους αυτών τμημάτων ή, αλλιώς, "προσαρμογή" – όπως λέγεται – της εξόδου του ενός στην είσοδο του άλλου, μέσω του συγκεκριμένου κυκλώματος του Τ.Ε., με αποτέλεσμα τη δυνατότητα ανάπτυξης της απαιτούμενης τάσης στα άκρα της μικρής αντίστασης εισόδου ή φορτίου.

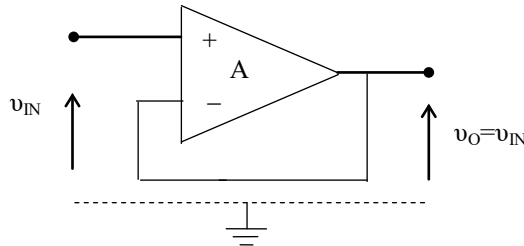
Βεβαίως, σε κάθε τέτοια περίπτωση, η ίδια η λειτουργία ενίσχυσης τάσης του κυκλώματος δεν είναι ούτε απαραίτητη – και πολλές φορές – ούτε επιθυμητή. Αντιθέτως, μειώνοντας τον αντίστοιχο συντελεστή ενίσχυσης τάσης, δηλ. αυξάνοντας τον αντίστοιχο παράγοντα ανάδρασης, αυξάνεται η αντίσταση εισόδου και μειώνεται η αντίσταση εξόδου του κυκλώματος και, μάλιστα, όπως δείχνουν οι σχέσεις (5.24) και (5.25), όταν ο συντελεστής  $A_v$  πάρει την ελάχιστη τιμή του,  $A_{v,\min}=1$ , τότε η μεν αντίσταση εισόδου θα τείνει προς τη θεωρητικώς μέγιστη τιμή της,  $R_{\text{INPUT}} \rightarrow \infty$ , η δε αντίσταση εξόδου προς την αντίστοιχη ελάχιστη,  $R_{\text{OUTPUT}} \rightarrow 0$ .

Με βάση, λοιπόν, τα παραπάνω, το κύκλωμα που θα έχει σχεδόν ιδανικά χαρακτηριστικά για τη χρήση του ως κυκλώματος ή βαθμίδας, όπως λέγεται, απομόνωσης θα είναι ένα κύκλωμα ενισχυτή τάσης χωρίς αναστροφή με ενίσχυση  $A_v=1$ . Άρα η λειτουργία αυτού του κυκλώματος θα είναι απλώς η "μεταφορά" ή η προσαρμογή του όποιου σήματος τάσης στην είσοδό του (δηλ. στα άκρα της αντίστασης εισόδου του), κατ' ευθείαν στα άκρα του όποιου φορτίου στην έξοδό του. Δηλ., η τάση εξόδου του κυκλώματος ακολουθεί απλώς την τάση εισόδου του ( $A_v=1$ ) και για το λόγο αυτό, το κύκλωμα ονομάζεται **ακολουθητής τάσης**<sup>1</sup>.

Το κύκλωμα ενός ακολουθητή τάσης με Τ.Ε., προκύπτει εύκολα ως ειδική περίπτωση του ενισχυτή τάσης χωρίς αναστροφή θέτοντας στη σχέση (5.14)  $R_2=0$ , οπότε είναι  $A_v=1$ . Τότε, παραλείποντας και την  $R_1$ , το κύκλωμα παίρνει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 5.31 για το οποίο θα ισχύουν οι σχέσεις:

$$v_o = A(v_+ - v_-) = A(v_{IN} - \beta v_o) \quad \text{όπου} \quad \beta = R_1 / (R_1 + 0) = 1$$

δηλ. για γραμμική λειτουργία θα είναι:  $v_{IN} - v_o \approx \varepsilon \rightarrow 0$  ή  $v_{IN} \approx v_o$ .



**Σχήμα 5.31.** Κύκλωμα ακολουθητή τάσης με Τ.Ε..

### 5.5.6.2 Κύκλωμα μετατροπής ρεύματος σε τάση – Ενισχυτής διαντίστασης

Από τη μελέτη του ενισχυτή τάσης με αναστροφή, που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.5.2, είδαμε ότι εκτός από τη βασική σχέση λειτουργίας του Τ.Ε. και την αντίστοιχη υπόθεση γραμμικής λειτουργίας του, διατύπωση της τελικής σχέσης μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου στηρίζεται στην εφαρμογή του νόμου των ρευμάτων στον κόμβο της (-) εισόδου του Τ.Ε., όπου, κατά τα γνωστά, ισχύει:  $i_- \approx 0$ .

Έτσι, στο κύκλωμα του σχήματος 5.32, εφόσον, προφανώς, ισχύει  $v_o = v_- + R(-i_R)$ , ο συνδυασμός των σχέσεων  $i_{IN} \approx i_R$  και  $v_- \approx v_+ = 0$  θα οδηγήει στη σχέση:

$$v_o = -i_{IN}R \quad (5.51)$$

Η σχέση (5.51) δείχνει, με απλό τρόπο, ότι η λειτουργία του κυκλώματος αυτού είναι η μετατροπή του ρεύματος εισόδου σε ανάλογη τάση εξόδου. Επομένως, σύμφωνα και με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.6.5.3, το κύκλωμα του σχήματος 5.32 θα είναι ένα (γραμμικό) κύκλωμα **ενισχυτή διαντίστασης με αναστροφή**, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- συντελεστής διαντίστασης:  $A_{mm} = \frac{v_o}{i_{IN}} = -R \quad (5.52)$

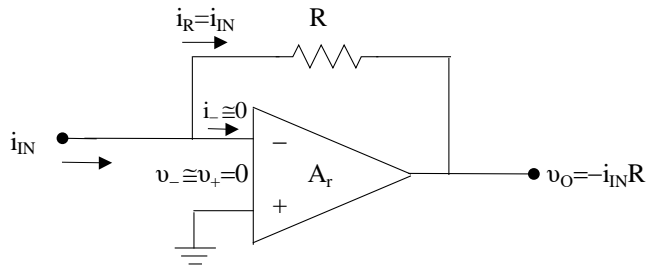
- αντίσταση εισόδου:  $R_{INPUT} = \frac{v_{IN}}{i_{IN}} = \frac{\varepsilon}{i_{IN}} \rightarrow 0 \quad (5.53)$

- αντίσταση εξόδου:  $R_{OUTPUT} = \frac{v_o}{i_o} = \frac{v_o R_o}{v_o - (-A_r i_-)} = \frac{R_o}{1 + A_r \beta_{gm}} \quad (5.54)$

όπου  $A_r = (v_o / i_-)$  είναι ο ισοδύναμος συντελεστής διαντίστασης ανοικτού βρόχου (δηλ. του Τ.Ε.),  $\beta_{gm} = (-i_R / v_o)$  ο αντίστοιχος συντελεστής ανάδρασης με διαστάσεις αγωγιμότητας και  $R_o$  η αντίσταση εξόδου του Τ.Ε.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Κυκλώματα ακολουθητών τάσης μπορούν να υλοποιηθούν και με χρήση άλλων στοιχείων, όπως τρανζίστορ και FET.

<sup>2</sup> Εδώ, για τον προσδιορισμό της  $R_{OUTPUT}$ , εφαρμόζεται εξωτερική τάση  $v_o$ , οπότε, θεωρώντας  $i_{IN}=0$  και, ακόμη, ότι στο ισοδύναμο του Τ.Ε. η πηγή της τάσης εξόδου του είναι  $(-A_r i_-)$  καθώς και ότι  $R_o \ll R$ , στη σχέση (5.54) θα είναι  $i_- = -i_R$ .



Σχήμα 5.32. Κύκλωμα ενισχυτή διαντίστασης με T.E..

### 5.5.6.3 Κυκλώματα μετατροπής τάσης σε ρεύμα – Ενισχυτές διαγωγιμότητας

Ομοίως, εξετάζοντας το κύκλωμα του απλού ενισχυτή με αναστροφή ως προς το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση  $R_2$  διαπιστώνουμε ότι από τις αντίστοιχες σχέσεις (5.29) και (5.31) προκύπτει ότι:

$$-i_2 = \frac{v_O}{R_2} = -\frac{1}{R_1} v_{IN} \quad (5.55)$$

Έτσι, αν στο κύκλωμα του σχήματος 5.18, για το οποίο γράφεται και ισχύει η σχέση (5.55), τεθούν  $R_1=R$  και  $R_2=R_L$  τότε, όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.33, η σχέση αυτή παίρνει τη μορφή:

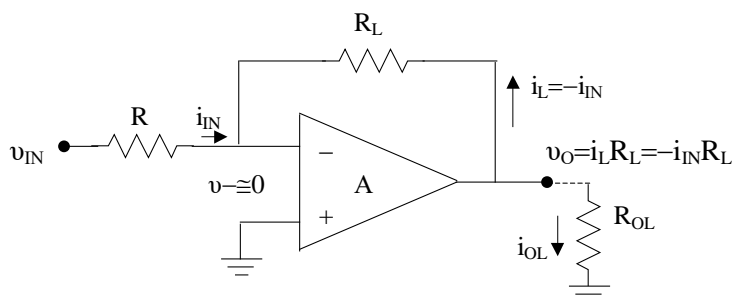
$$i_L = -\frac{1}{R} v_{IN} \quad (5.56)$$

που δείχνει ότι αν ως σήμα εξόδου θεωρηθεί το ρεύμα  $i_L$  που διαρρέει την αντίσταση  $R_L$  στο βρόχο ανάδρασης, τότε η λειτουργία του κυκλώματος είναι η μετατροπή της τάσης εισόδου  $v_{IN}$  σε ρεύμα  $i_L$ . Στην περίπτωση αυτή, η αντίσταση  $R_L$  έχει τη θέση ενός *επιπλέοντος*<sup>1</sup> (floating) φορτίου, η δε λειτουργία μετατροπής της τάσης εισόδου  $v_{IN}$  στο ρεύμα  $i_L$  είναι λειτουργία **ενισχυτή διαγωγιμότητας**, με αντίστοιχο συντελεστή:

$$A_{gm} = \frac{i_L}{v_{IN}} = -\frac{1}{R} \quad (5.57)$$

Η λειτουργία αυτή είναι, ουσιαστικώς, ανεξάρτητη τόσο από την τιμή του φορτίου  $R_L$ , όσο και από τη τυπική λειτουργία ενίσχυσης τάσης, που έτσι κι αλλιώς ορίζεται ως προς την τάση εξόδου  $v_O$  στα άκρα ενός άλλου φορτίου  $R_{OL}$  συνδεδεμένου κανονικά στην έξοδο του κυκλώματος και για την οποία θα ισχύει:

$$v_O = R_{OL} i_{OL} = -\frac{R_L}{R} v_{IN} \quad \text{αλλά και} \quad v_O \approx v_L$$



Σχήμα 5.33. Κύκλωμα αναστρέφοντος ενισχυτή τάσης με λειτουργία μετατροπής τάσης σε ρεύμα.

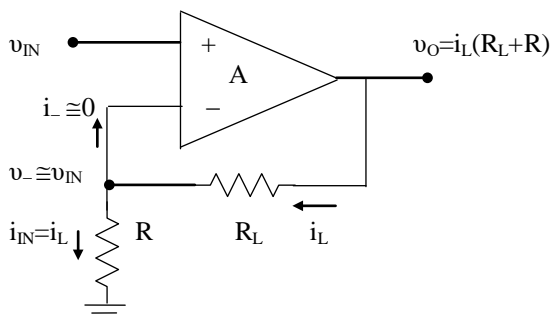
Λειτουργία μετατροπής τάσης σε ρεύμα μπορεί επίσης να διαπιστωθεί και στο κύκλωμα του ενισχυτή χωρίς αναστροφή, όπου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.34, ως *επιπλέον* φορτίο θεωρείται και πάλι η αντίσταση  $R_L$  που συνδέει την έξοδο με την (-) είσοδο του αντίστοιχου T.E.. Στην περίπτωση αυτή ισχύουν οι σχέσεις:

$$v_O = \left(1 + \frac{R_L}{R}\right) v_{IN} \quad \text{και} \quad v_O = i_L (R_L + R)$$

<sup>1</sup> Ως *επιπλέονσα* συνδεσμολογία ενός φορτίου (*επιπλέον* φορτίο) θεωρείται ο τρόπος σύνδεσής του μεταξύ δύο σημείων κανένα απ' τα οποία δεν είναι η γείωση (η κοινή στάθμη αναφοράς των τάσεων) του αντίστοιχου κυκλώματος

που οδηγούν κατ' ευθείαν στη σχέση  $i_L = \frac{v_{IN}}{R} \cong i_{IN}$ , οπότε και ο συντελεστής διαγωγιμότητας, ως προς το επιπλέον φορτίο  $R_L$ , θα είναι:

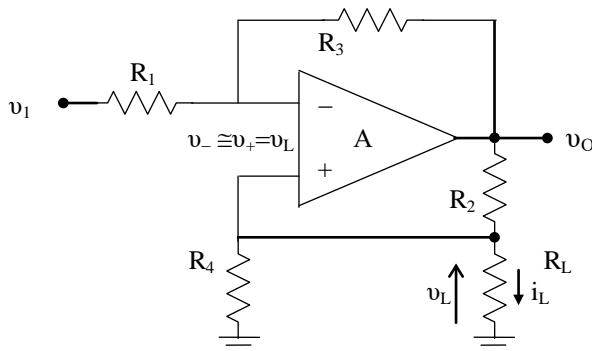
$$A_{gm} = \frac{i_L}{v_{IN}} = \frac{1}{R} \quad (5.59)$$



Σχήμα 5.34. Κύκλωμα μη αναστρέφοντος ενισχυτή τάσης για τη μετατροπή τάσης σε ρεύμα.

Τέλος, αποδεικνύεται ότι από τον ενισχυτή διαφοράς του σχήματος 5.30, όπως δίνεται στο σχήμα 5.35, υπάρχει λειτουργία μετατροπής της τάσης εισόδου  $v_{IN}$  σε ρεύμα  $i_L$  ως προς ένα φορτίο  $R_L$  συνδεδεμένο κανονικά στη γείωση του κυκλώματος, οπότε, αν  $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ , τότε θα ισχύει  $2v_L=v_{IN}+v_O$  και, τελικώς:

$$i_L = -\frac{v_{IN}}{R} \quad (5.60)$$



Σχήμα 5.35. Κύκλωμα μετατροπής της τάσης εισόδου σε ρεύμα στο γειωμένο φορτίο  $R_L$ .

## 5.6 Μη γραμμικά κυκλώματα με Τ.Ε..

Αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.4 ότι η λειτουργία κυκλωμάτων με τελεστικούς ενισχυτές χαρακτηρίζεται ως γραμμική ή μη ανάλογα με την ισχύ ή όχι της περιοριστικής σχέσης (5.8) για τη μέγιστη τιμή της τάσης εξόδου  $v_O$  ως προς την αντίστοιχη θετική και αρνητική τιμή της τάσης τροφοδοσίας τους (άρα και του Τ.Ε.).

Έτσι, γενικεύοντας όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.4.1, υπάρχουν δύο περιπτώσεις για τις οποίες η λειτουργία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη γραμμικής:

- η πρώτη, εξαρτάται από τη μαθηματική σχέση μεταξύ των σημάτων εισόδου – εξόδου του αντίστοιχου κυκλώματος, δηλ. τη μορφή της χαρακτηριστικής συνάρτησης (στο πεδίο του χρόνου) ή της συνάρτησης μεταφοράς (στο πεδίο της συχνότητας), στην κανονική περιοχή λειτουργίας του, δηλ. την περιοχή εκείνη των σημάτων εισόδου και εξόδου για τις οποίες δεν υπάρχει περιορισμός από τις αντίστοιχες τιμές της τάσης τροφοδοσίας,
- η δεύτερη, είναι ουσιαστικώς ανεξάρτητη από τη μορφή της σχέσης μεταξύ των αντίστοιχων σημάτων εισόδου και εξόδου, καθώς το σήμα εξόδου έχει ως επιτρεπτές τιμές μόνον τις τιμές κόρου, όπως αυτές καθορίζονται από τις αντίστοιχες τιμές της τάσης τροφοδοσίας του κυκλώματος.

Στα κυκλώματα με Τ.Ε., η πρώτη περίπτωση αντιστοιχεί σε μια χαρακτηριστική λειτουργίας (χαρακτηριστική εισόδου-εξόδου), όπως αυτή του σχήματος 3.9(α), προϋπόθεση της οποίας είναι η διεύρυνση της κανονικής περιοχής λειτουργίας, δηλ. είναι αναγκαία η παρουσία κάποιας μορφής αρνητικής ανάδρασης.

Αντιθέτως, στη δεύτερη περίπτωση, η απουσία αρνητικής ή η παρουσία θετικής ανάδρασης περιορίζει τόσο πολύ την περιοχή κανονικής λειτουργίας του αντίστοιχου κυκλώματος (με ή χωρίς Τ.Ε.), ώστε η τάση εξόδου να μεταπίπτει αναμασά στην κατάσταση θετικού και αρνητικού κόρου [βλ. σχήμα 5.11(α)].

Κυκλώματα με τέτοια μορφή μη γραμμικής λειτουργίας ονομάζονται γενικώς **δισταθή (bistable) κυκλώματα** και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές διάκρισης ή σύγκρισης καταστάσεων (σημάτων) αποτελώντας πολλές φορές το "συνδετικό κρίκο" μεταξύ αναλογικών και ψηφιακών κυκλωμάτων.

### 5.6.1 Κυκλώματα Τ.Ε. με παρουσία μη γραμμικών στοιχείων

Εφόσον, σύμφωνα με τα προηγούμενα, μη γραμμική λειτουργία ενός κυκλώματος με Τ.Ε. μπορεί να διαπιστωθεί από τη μορφή της σχέσης μεταξύ σήματος εισόδου και εξόδου και, μάλιστα, με την προϋπόθεση της παρουσίας αρνητικής ανάδρασης, είναι φανερό ότι για τη λειτουργία του ίδιου του Τ.Ε. θα ισχύει η βασική σχέση (5.4) με τον περιορισμό, κατά τα γνωστά, της σχέσης (5.8).

Έτσι, η ανάλυση του αντίστοιχου κυκλώματος γίνεται με τις παραδοχές ότι:

$$v_+ \cong v_- \quad \text{ή} \quad v_+ - v_- = \varepsilon \rightarrow 0$$

και, ταυτόχρονα,

$$i_+ \cong i_- \cong 0,$$

ενώ η συνδεσμολογία του αντίστοιχου Τ.Ε. σ' ένα τέτοιο μη γραμμικό κύκλωμα μπορεί να είναι είτε η αναστρέφουσα, είτε η μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία των γραμμικών κυκλωμάτων με Τ.Ε..

Επομένως – και χωρίς να επεκταθούμε περισσότερο – αν, έστω και ένα, από τα εξωτερικά ωμικά ή μη στοιχεία των γραμμικών κυκλωμάτων, που είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους, αντικατασταθεί από ένα στοιχείο, στο οποίο η σχέση τάσης-ρεύματος είναι μη γραμμική, τότε η ανάλυση της λειτουργίας του κυκλώματος που προκύπτει οδηγεί αναπόφευκτα στη διατύπωση μιας αντιστοίχως μη γραμμικής σχέσης μεταξύ π.χ. των σημάτων τάσης εισόδου – εξόδου του. Από κει και πέρα, ανάλογα με την επιζητούμενη χρήση του κυκλώματος, η σχέση αυτή μπορεί να προσεγγισθεί είτε ολόκληρη, είτε κατά τμήματα, από κατάλληλες γραμμικές εκφράσεις.

Χαρακτηριστικές εφαρμογές, που απαιτούν τέτοιας μορφής μη γραμμική λειτουργία των αντίστοιχων κυκλωμάτων, αποτελούν διατάξεις επεξεργασίας σημάτων που αποσκοπούν π.χ. στο διαχωρισμό θετικών και αρνητικών τιμών των σημάτων ή τον προσδιορισμό της απόλυτης τιμής ενός σήματος, στον πολλαπλασιασμό μεταξύ σημάτων ή τον πολλαπλασιασμό της συχνότητας ενός σήματος, καθώς, επίσης, στη μετατροπή συνεχών σημάτων σε διακριτά, κ.λπ.. Ειδικότερα, θεωρώντας ως ενδεικτική την περίπτωση της λειτουργίας της δειγματοληψίας, όπως δόθηκε συνοπτικά με τη σχηματική παράστασή της στα σχήματα 2.27 και 2.28, είναι φανερό ότι η μη γραμμικότητα της λειτουργίας αυτής – με τα συγκεκριμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της – είναι αποτέλεσμα χρήσης διακόπτη.

### 5.6.2 Δισταθή κυκλώματα με Τ.Ε..

Από τη διερεύνηση της λειτουργίας ενός Τ.Ε., όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.3.3, είναι εύκολο να συμπεράνει κανείς ότι η μορφή της σ' ένα κύκλωμα, η τάση εξόδου του οποίου παίρνει μια από τις δύο αντίστοιχες τιμές κόρου, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, περιγράφεται πλήρως από το δεύτερο σκέλος της σχέσης (5.9) και, βεβαίως, είναι αποτέλεσμα της βασικής σχέσης (5.4) για τη λειτουργία του Τ.Ε..

Με άλλα λόγια, η συγκεκριμένη μορφή μη γραμμικής λειτουργίας των δισταθών κυκλωμάτων με Τ.Ε. αναφέρεται γενικώς στη σχέση (5.4), όπου, όμως, – και αυτό πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερος – αν και ισχύει η παραδοχή ότι:

$$i^+ \cong i^- \cong 0$$

σε καμιά περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι  $v_+ \cong v_-$ , καθώς είναι ακριβώς το πρόσημο της διαφοράς  $v_d = v_+ - v_-$  που καθορίζει και το πρόσημο της τάσης κόρου  $v_{OK}$  στην έξοδο του αντίστοιχου κυκλώματος, δηλ.:

$$v_O = \begin{cases} +v_{OK} = V_{S+} & \text{όταν } v_d > 0 \\ -v_{OK} = V_{S-} & \text{όταν } v_d < 0 \end{cases} \quad (5.61)$$

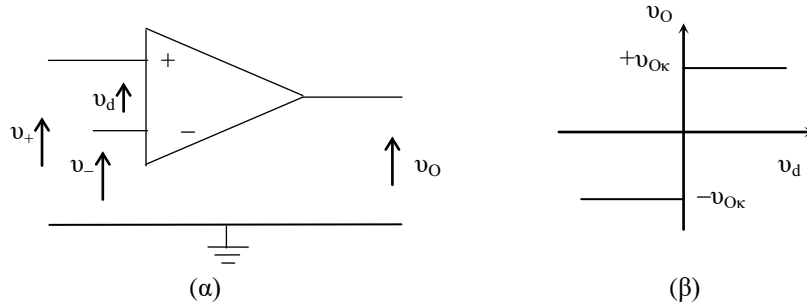
όπου  $V_{S+}$ ,  $V_{S-}$  είναι οι αντίστοιχες τιμές των τάσεων τροφοδοσίας, ενώ  $v_d = (v_+ - v_-)$  και, προφανώς,  $|v_d| > |v_{dK}|$  [υπενθυμίζεται ότι  $|v_{dK}| = |V_S|/A$ ].

Παρακάτω, τα παραδείγματα δισταθών κυκλωμάτων με Τ.Ε. που δίνονται, είναι αντιπροσωπευτικά των δύο κατηγοριών, στις οποίες διακρίνονται αυτά τα κυκλώματα, ανάλογα με την απουσία ανάδρασης ή τη χρήση θετικής ανάδρασης.



### 5.6.2.1 Κυκλώματα σύγκρισης τάσεων

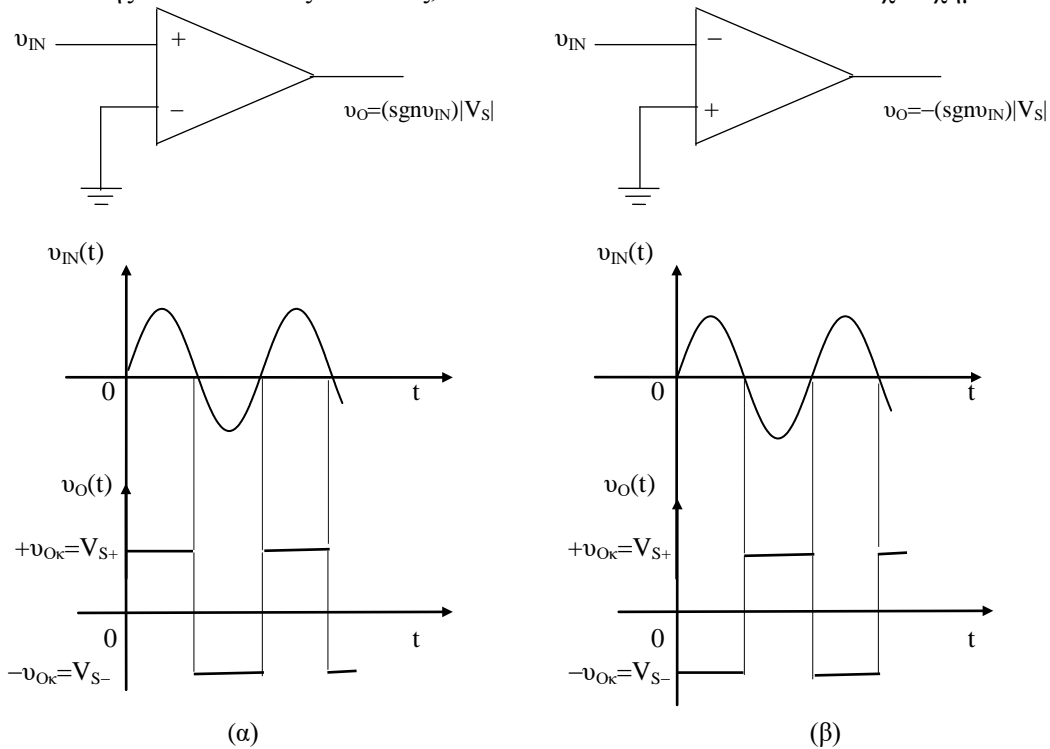
Στο κύκλωμα του σχήματος 5.36(α) ο Τ.Ε. χρησιμοποιείται χωρίς εξωτερικά στοιχεία – και, συνεπώς, χωρίς ανάδραση – η δε τιμή της τάσης εξόδου του,  $v_o$ , καθορίζεται σε κάθε στιγμή από το πρόσημο της διαφοράς των αντίστοιχων τιμών τάσης στις δύο εισόδους του,  $v_d$ , σύμφωνα με τη γενική σχέση (5.61). Στο σχήμα 5.36(β) δίνεται, επίσης, η χαρακτηριστική τάσης εισόδου-εξόδου του κυκλώματος αυτού, η μορφή της οποίας δείχνει καθαρά τον *δισταθή* χαρακτήρα της μη γραμμικής λειτουργίας του.



**Σχήμα 5.36.** (α) Τυπική μορφή δισταθούς κυκλώματος με Τ.Ε. και (β) χαρακτηριστική εισόδου – εξόδου.

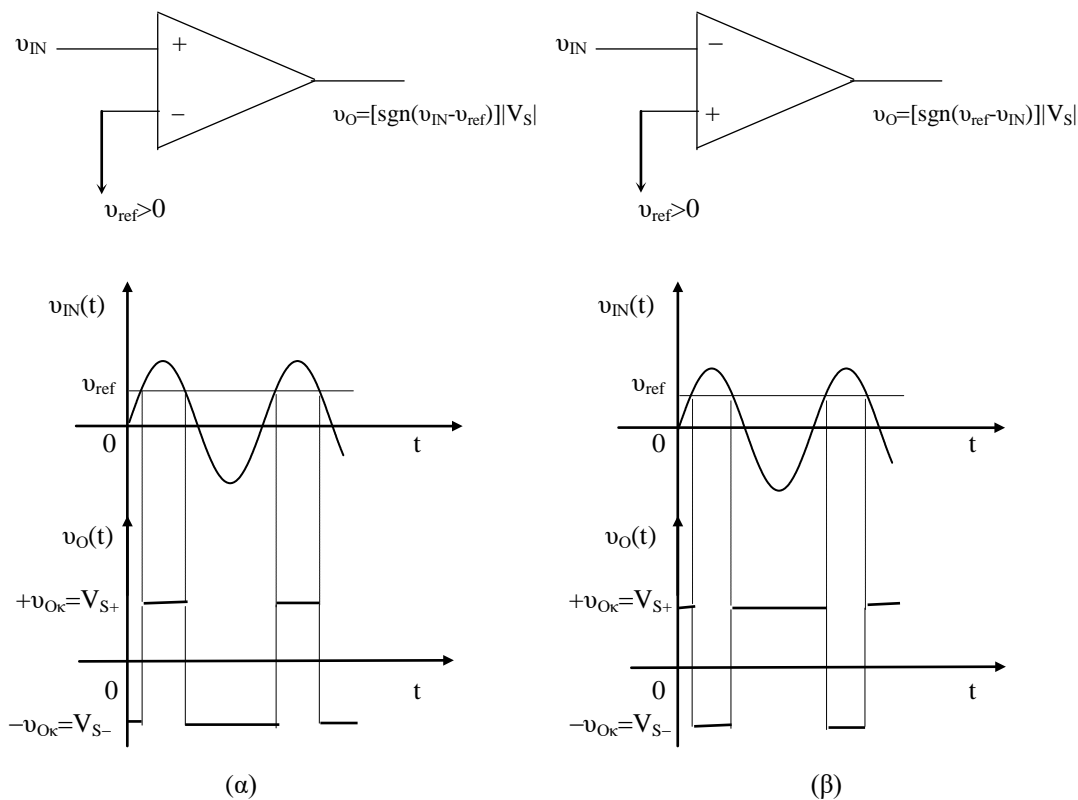
Από τα παραπάνω, διαπιστώνεται εύκολα ότι κυκλώματα αυτής της μορφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλήθος εφαρμογών, κύριο και κοινό χαρακτηριστικό των οποίων είναι ότι κάθε μια από τις επιτρεπτές στάθμες (τιμές) της τάσης εξόδου τους θα υποδεικνύει το αποτέλεσμα της σύγκρισης των τάσεων στις εισόδους του Τ.Ε. η, αλλιώς, το πρόσημο της τάσης  $v_d$ .

Έτσι, ως χαρακτηριστικά παραδείγματα αναφέρονται τα κυκλώματα *αναγνώρισης (διάκρισης) προσήμου* ή *σύγκρισης ως προς το μηδέν*<sup>1</sup> (σχήμα 5.37) και τα κυκλώματα *σύγκρισης ως προς μια τάση αναφοράς*  $v_{ref}$  (σχήμα 5.38), η λειτουργία των οποίων γίνεται αμέσως κατανοητή από την αντιστοίχιση των κυματομορφών των σημάτων τάσης εισόδου και εξόδου τους, που δίνονται ενδεικτικά στα αντίστοιχα σχήματα.



**Σχήμα 5.37.** Κυκλώματα Τ.Ε. αναγνώρισης του προσήμου του σήματος εισόδου  $v_{IN}(t)$  ή σύγκρισής του προς το μηδέν και αντίστοιχες κυματομορφές εισόδου και εξόδου : (α) όταν  $v_{IN}(t) > 0 \Rightarrow v_o(t) = +v_{O_k}$  και (β) όταν  $v_{IN}(t) < 0 \Rightarrow v_o(t) = -v_{O_k}$ .

<sup>1</sup> Βλέπε και παράγραφο 2.8.6.

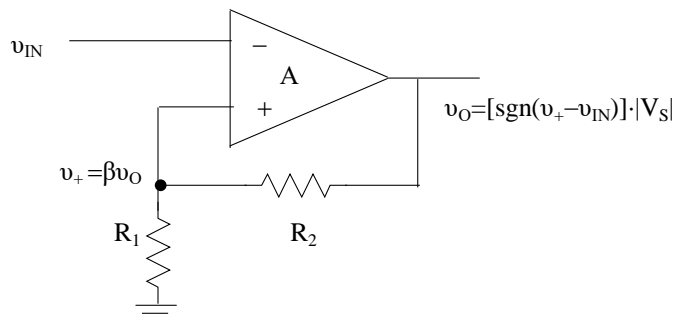


**Σχήμα 5.38.** Κυκλώματα Τ.Ε. για τη σύγκριση του σήματος εισόδου  $v_{IN}(t)$  ως προς μια τάση αναφοράς  $v_{ref} > 0$  και αντίστοιχες κυματομορφές εισόδου και εξόδου: (α) όταν  $v_{IN}(t) > v_{ref} \Rightarrow v_O(t) = +v_{Oκ}$  και (β) όταν  $v_{IN}(t) < v_{ref} \Rightarrow v_O(t) = -v_{Oκ}$ .

### 5.6.2.2 Κύκλωμα Schmitt trigger

Στο σχήμα 5.39 δίνεται ένα κύκλωμα Τ.Ε., στο οποίο υπάρχει *θετική ανάδραση*, καθώς, μέσω του διαιρέτη τάσης που σχηματίζουν οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$ , ένα κλάσμα της τάσης εξόδου του εφαρμόζεται στην μη αναστρέφουσα (+) είσοδό του.

Το κύκλωμα αυτό είναι γνωστό ως **κύκλωμα Schmitt trigger** και αποτελεί παραλλαγή των κυκλωμάτων σύγκρισης τάσεων, που είδαμε παραπάνω, διότι, όπως μπορεί να δει κανείς αμέσως, η λειτουργία του στηρίζεται, κατ' αρχήν, στη σύγκριση των τάσεων των δύο εισόδων του Τ.Ε. και η τάση εξόδου του παίρνει δύο συγκεκριμένες τιμές, σύμφωνα με τη σχέση (5.61). Όμως, λόγω της παρουσίας θετικής ανάδρασης, η λειτουργία αυτή εμφανίζει ένα χαρακτηριστικό "μνήμης", αποτέλεσμα του οποίου είναι: **κάθε μια απ' τις δύο επιτρεπτές στάθμες της τάσης εξόδου του να αντιστοιχεί και να υποδεικνύει μια συγκεκριμένη φορά μεταβολής του σήματος εισόδου.**



**Σχήμα 5.39.** Κύκλωμα Schmitt trigger.

Πράγματι, αν ληφθεί υπόψη ότι η τάση που ουσιαστικά εφαρμόζεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο του Τ.Ε. δίνεται από την έκφραση:

$$\left. \begin{aligned} v_+ &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_O = \beta v_O \\ v_O &= \begin{cases} +v_{OK} = V_{S+} & \text{όταν } v_d > 0 \\ -v_{OK} = V_{S-} & \text{όταν } v_d < 0 \end{cases} \\ v_d &= v_+ - v_- \end{aligned} \right\} \quad (5.62)$$

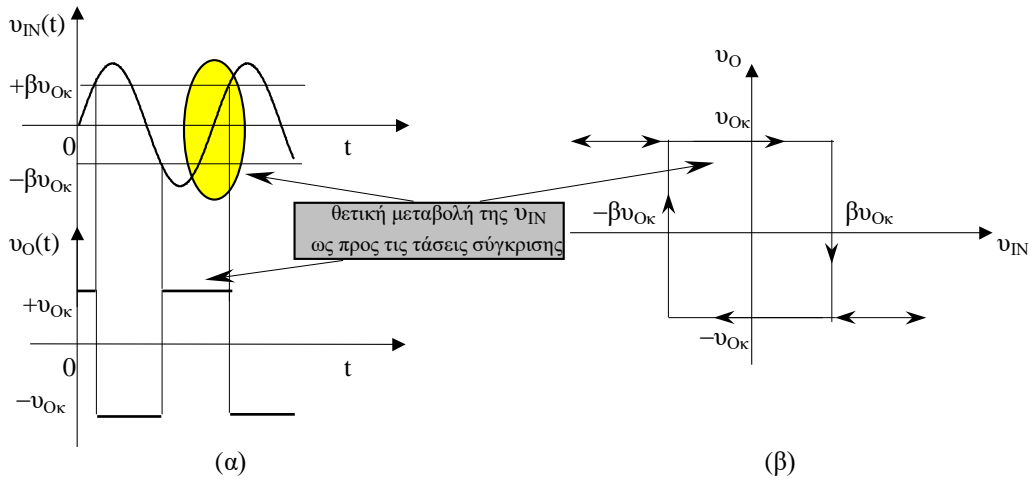
και, βεβαίως

τότε, αν στην (-) είσοδο εφαρμόζεται ένα σήμα τάσης  $v_{IN}$ , η λειτουργία του κυκλώματος θα περιγράφεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} v_O &= [\text{sgn}(v_+ - v_{IN})] \cdot |V_S| \\ \text{ή, αλλιώς, } v_O &= \begin{cases} +v_{OK} = V_{S+} & \text{όταν } |v_{IN}| < |\beta v_O| \\ -v_{OK} = V_{S-} & \text{όταν } |v_{IN}| > |\beta v_O| \end{cases} \end{aligned} \quad (5.63)$$

Στο σχήμα 5.40(α) δίνονται οι κυματομορφές τάσης εισόδου και εξόδου κατά τη λειτουργία του Schmitt trigger για ένα ημιτονικό σήμα εισόδου  $v_{IN}(t)$ , ενώ, στο σχήμα 5.40(β), δίνεται η χαρακτηριστική εισόδου-εξόδου, όπου ο βρόχος υστέρησης, που αναπτύσσεται ακολουθώντας τη φορά των βελών, αναδεικνύει το χαρακτηριστικό "μνήμης" του κυκλώματος με το οποίο και γίνεται δυνατή η αναγνώριση της φοράς μεταβολής του αντίστοιχου σήματος εισόδου.

Έτσι, όπως φαίνεται και από τις σχέσεις (5.63), υποθέτοντας για ευκολία ότι, με την εφαρμογή της τάσης εισόδου, η έξοδος του κυκλώματος βρίσκεται ήδη – όπως λέγεται – στο θετικό κόρο, δηλ.  $v_O = +v_{OK}$ , το πρόσημο της διαφοράς  $\beta v_{OK} - v_{IN} = v_d$  θα διατηρήσει την τάση εξόδου στην αρχική της τιμή  $+v_{OK}$  μέχρις ότου, αυξανόμενη η  $v_{IN}$  μεταβάλλει το πρόσημο της τάσης  $v_d$  και η έξοδος βρεθεί στον αρνητικό κόρο, οπότε, στη συνέχεια, η νέα σύγκριση της  $v_{IN}$  θα γίνει με την τιμή  $v_+ = -\beta v_{OK}$ , κ.ο.κ.. Με άλλα λόγια, σε κάθε χρονική στιγμή, η στάθμη της τάσης εξόδου θα δείχνει τη φορά μεταβολής της τάσης εισόδου σε σχέση προς τις δύο συγκεκριμένες τιμές σύγκρισής της, δηλ. τις τιμές  $\pm \beta v_{OK}$ .

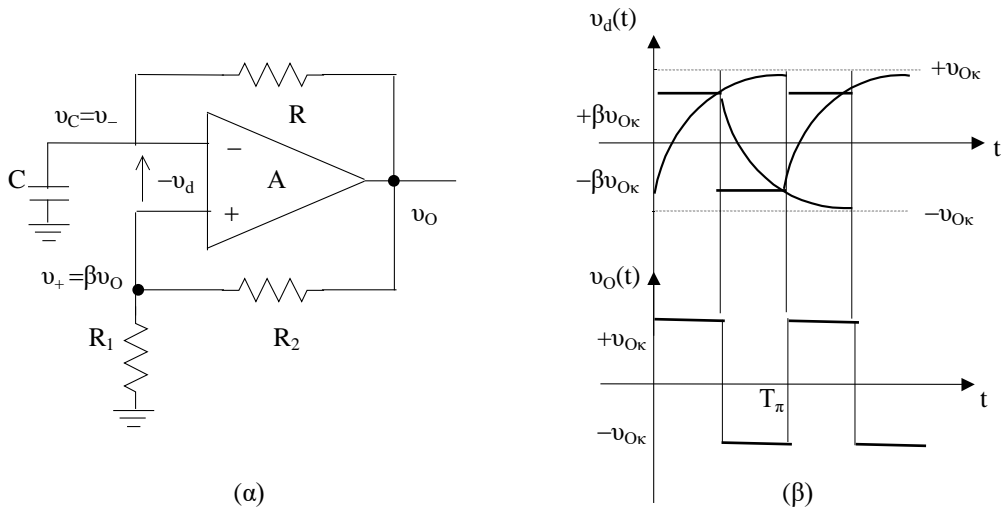


**Σχήμα 5.40.** (α) Κυματομορφές εισόδου-εξόδου κατά τη λειτουργία του κυκλώματος Schmitt trigger για ημιτονικό σήμα εισόδου και (β) χαρακτηριστική τάσης εισόδου-εξόδου με ανάδειξη του βρόχου υστέρησης.

**5.6.2.3 Γεννήτρια ορθογώνιων παλμών με Τ.Ε..**

Το κύκλωμα του σχήματος 5.41(α) είναι ένα κύκλωμα γεννήτριας ορθογώνιων παλμών με Τ.Ε. που μπορεί να θεωρηθεί ως εφαρμογή της αρχής λειτουργίας του κυκλώματος Schmitt trigger.

Η ερμηνεία της λειτουργίας του προκύπτει εύκολα από τις κυματομορφές τάσης στις δύο εισόδους και την έξοδο του Τ.Ε., όπως δίνονται στο σχήμα 5.41(β), και αφήνεται ως άσκηση για τον αναγνώστη. Σημειώνεται μόνον ότι η περίοδος  $T_\pi$  των παραγόμενων ορθογώνιων παλμών προσδιορίζεται συναρτήσει της χωρητικότητας σταθεράς χρόνου  $T=RC$ , της τάσης εξόδου  $|v_O|=|V_S|$  και των αντιστάσεων  $R_1, R_2$ .



**Σχήμα 5.41.** (α) Γεννήτρια ορθογώνιων παλμών με T.E. και (β) κυματομορφές τάσης.