

Τελεστικοί ενισχυτές

Οι τελεστικοί σαν γραμμικοί ενισχυτές

Οι τελεστικοί ενισχυτές χρησιμοποιούνται σε πολλά ηλεκτρονικά κυκλώματα. Πολλοί όμως, δεν γνωρίζουν τη λειτουργία τους, με αποτέλεσμα να δυσκολεύονται να τους χρησιμοποιήσουν στα δικά τους κυκλώματα. Στο παρακάτω άρθρο θα αναφερθούμε στη λειτουργία και στον τρόπο σχεδίασης απλών κυκλωμάτων με τελεστικούς ενισχυτές.

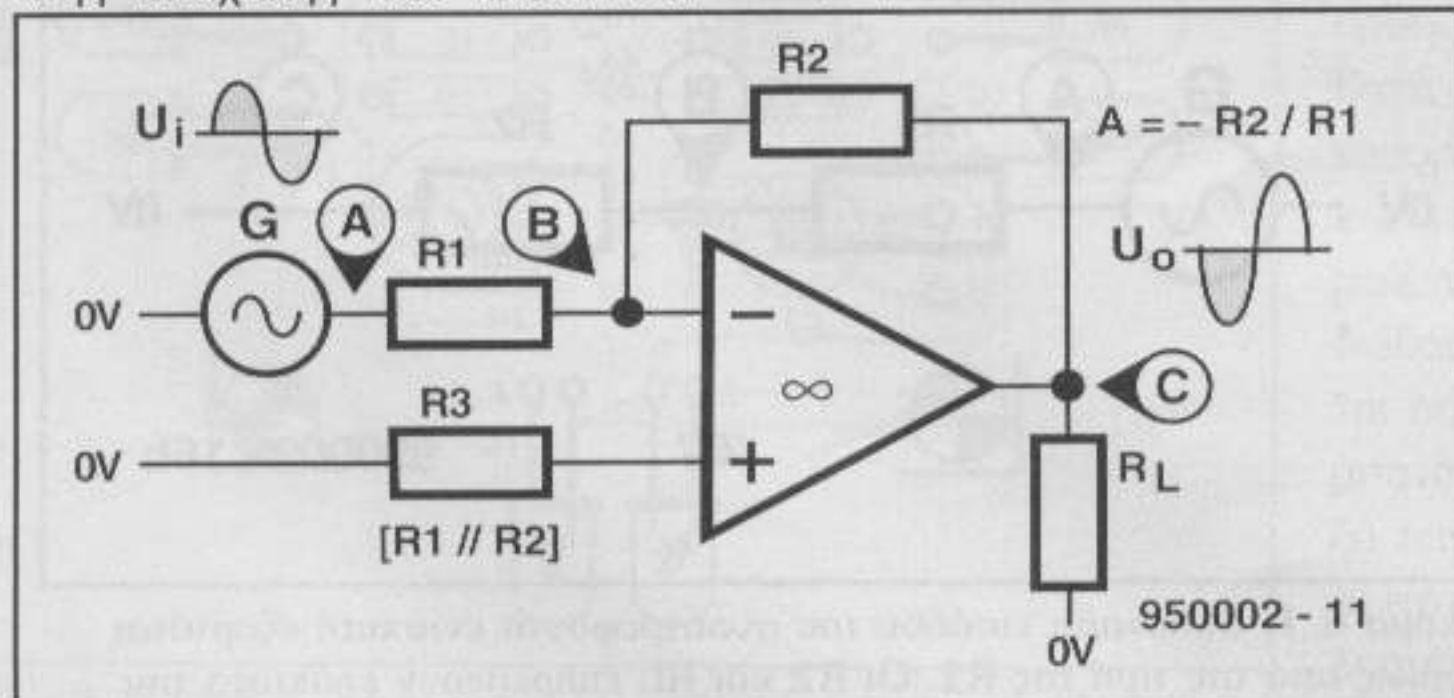
Οι τελεστικοί ενισχυτές συγκαταλέγονται, μαζί με τις αντιστάσεις και τους πυκνωτές, στα πιο κοινά ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Στο εμπόριο υπάρχουν πολλοί τύποι τελεστικών ενισχυτών που ξεχωρίζουν για τα χαρακτηριστικά τους, το είδος της ανάδρασης (τάσης ή ρεύματος) και την τιμή τους.

Σε ένα ολοκληρωμένο μπορεί να υπάρχουν ένας, δύο ή τέσσερις τελεστικοί ενισχυτές. Οι τελεστικοί ενισχυτές αποτελούνται από ένα διαφορικό ενισχυτή και μία τελική βαθμίδα εξόδου. Ο διαφορικός ενισχυτής έχει δύο συμπληρωματικές εισόδους (μία αναστρέφουσα και μία μη αναστρέφουσα). Ο ανασυζευγμένος τελεστικός ενισχυτής προσπαθεί να διατηρεί το δυναμικό των δύο εισόδων σταθερό. Στην περίπτωση που υπάρχει διαφορά δυναμικού, εμφανίζεται στην έξοδο μία τάση που αντιστοιχεί στην ενισχυμένη διαφορά δυναμικού. Ο συντελεστής ενίσχυσης του τελεστικού

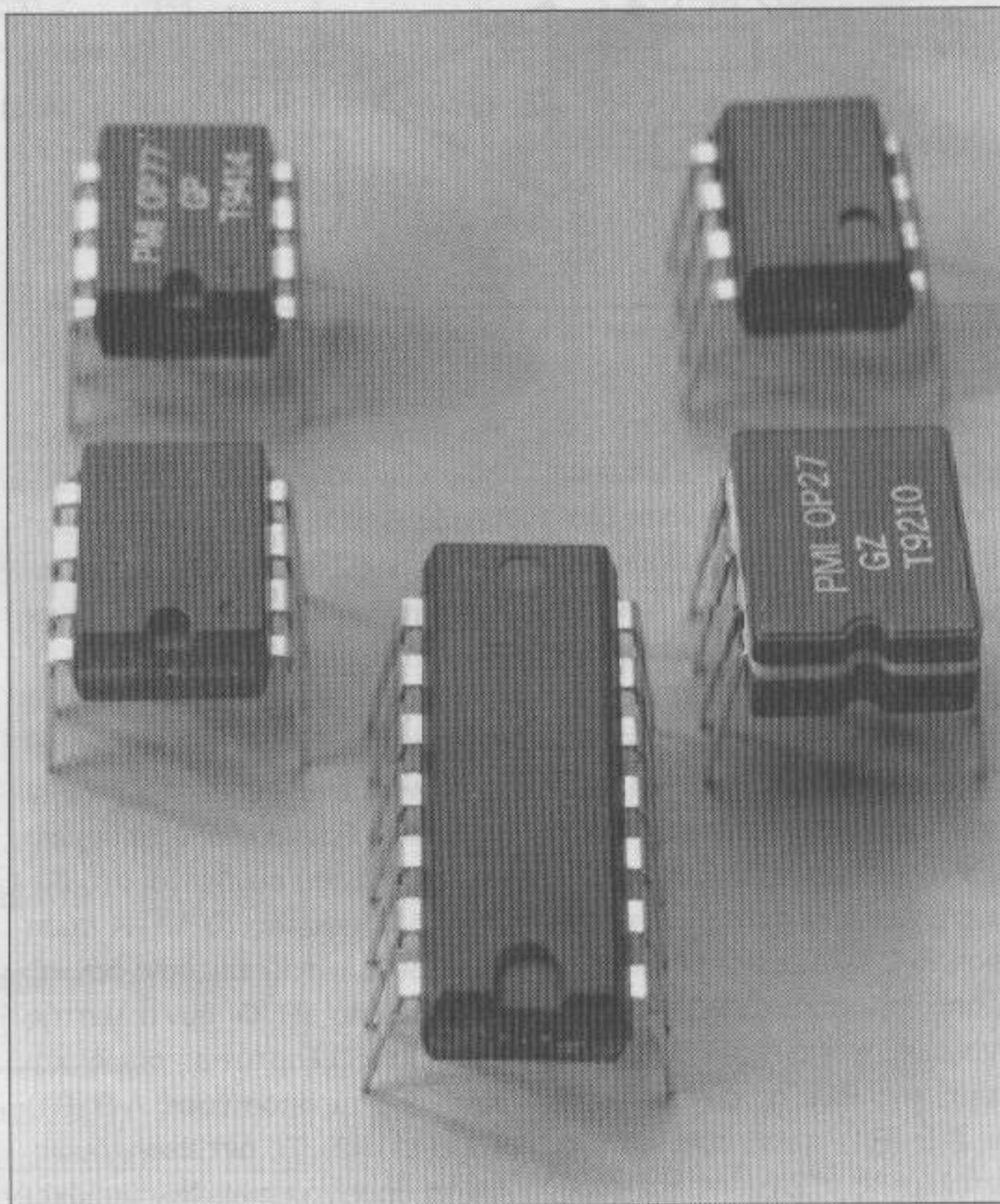
καθορίζεται από τις εξωτερικές αντιστάσεις, που σχηματίζουν το βρόχο αρνητικής ανάδρασης. Ο βρόχος ανάδρασης συνδέει την έξοδο με την αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού.

Αναστρέφων ενισχυτής

Ο τελεστικός του σχήματος 1 είναι συνδεσμοποιημένος σαν αναστρέφων ενισχυτής. Το σήμα εισόδου, από την πηγή εναλλασσόμενης τάσης G , συνδέεται, μέσω της $R1$, στην αναστρέφουσα είσοδο. Η ανάδραση του σήματος εξόδου πραγματοποιείται μέσω της $R2$. Η δεύτερη, μη αναστρέφουσα είσοδος, συνδέεται, μέσω της $R3$, στην τάση αναφοράς. Τις περισσότερες φορές, η τάση αναφοράς είναι ίση με τη μισή τιμή της τάσης τροφοδοσίας. Αν ο τελεστικός τροφοδοτείται με συμμετρική τάση, η τάση αναφοράς θα είναι 0 V . Σε πολλά κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών, η μη αναστρέφουσα είσοδος συνδέεται απευθείας (χωρίς την $R3$) στα 0 V . Η $R3$ πρέπει να ισούται με τον παράλληλο συνδυασμό των αντιστάσεων $R1$ και $R2$. Στην περίπτωση που η τιμή των $R1$ και $R2$ είναι χαμηλή, η $R3$ μπορεί να παραληφθεί. Αυτό γίνεται εφικτό, καθώς η $R3$ συνδέεται σε σειρά με την υψηλή αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή. Ο συντελεστής ενίσχυσης του αναστρέφοντα τελεστικού ενισχυτή



Σχήμα 1. Στον αναστρέφοντα ενισχυτή, η πηγή σήματος G συνδέεται στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού.

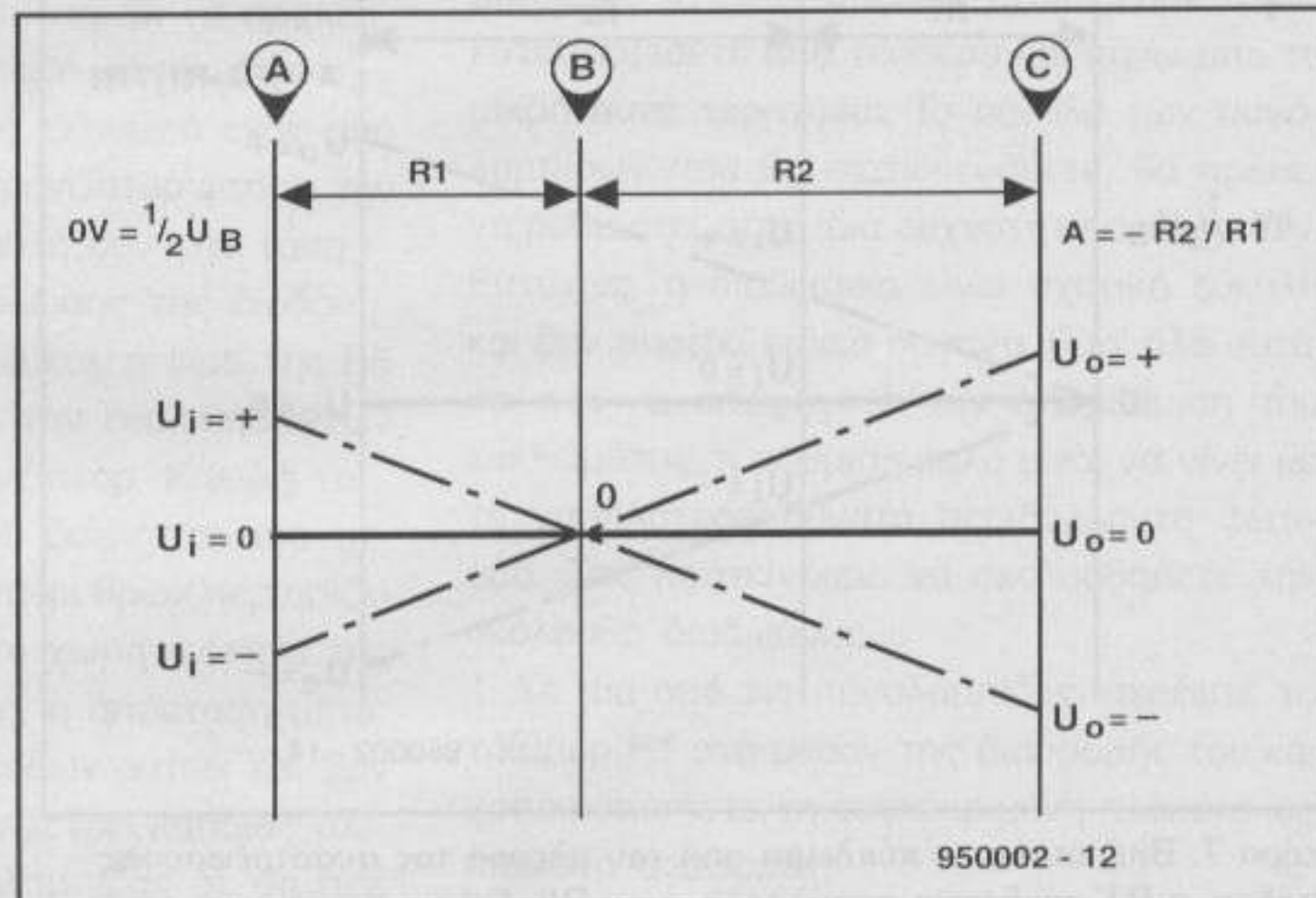


υπολογίζεται από τον τύπο:

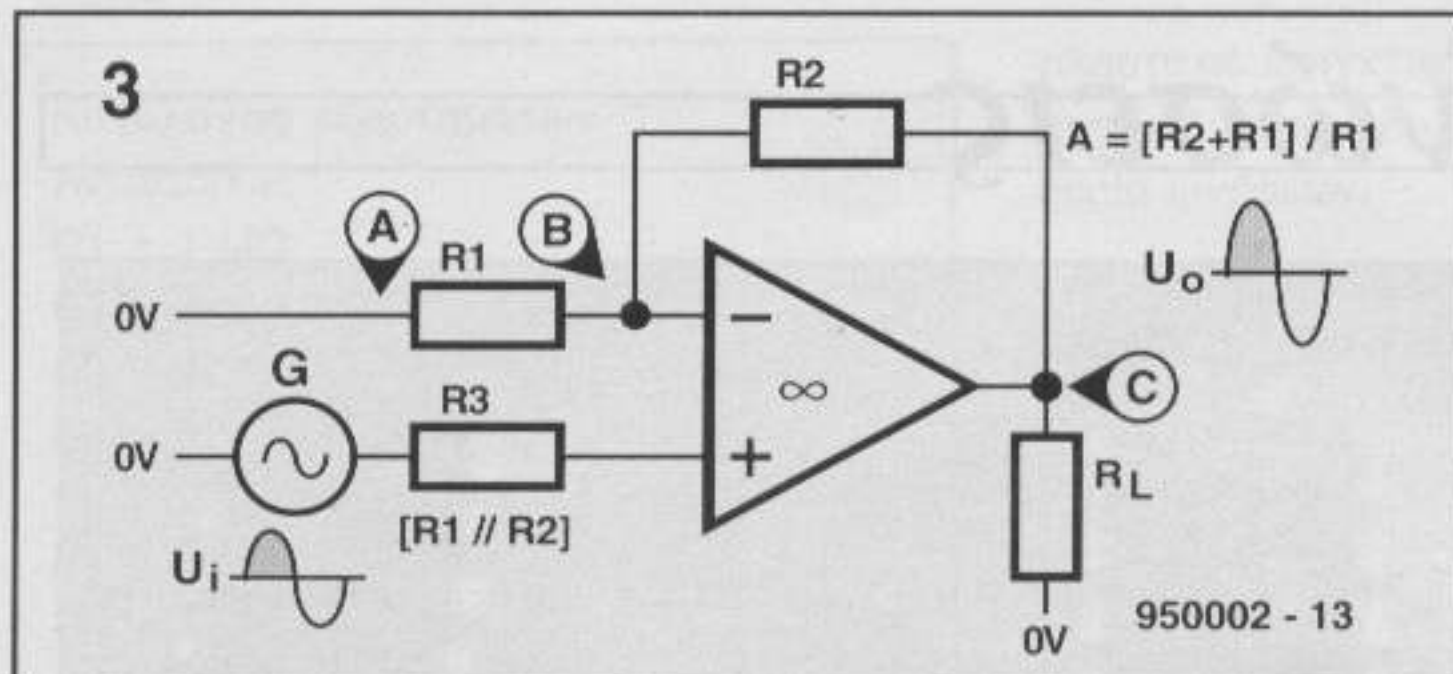
$$A = -(R2/R1)$$

Στο σχήμα 2 απεικονίζεται γραφικά η σχέση ανάμεσα στην τάση εισόδου και στην τάση εξόδου του τελεστικού. Τα σημεία A, B και C αντιστοιχούν σ' αυτά του σχήματος 1. Σ' έναν τελεστικό ενισχυτή, η τάση στην αναστρέφουσα είσοδο είναι πάντα ίση με την τάση στη μη αναστρέφουσα είσοδο. Η μη αναστρέφουσα είσοδος είναι συνδεδεμένη με την τάση

αναφοράς, με αποτέλεσμα η τάση στο σημείο B να είναι πάντα 0 V . Αυτό φαίνεται και από το σχήμα 2. Παρόλη τη μεταβολή των τάσεων εισόδου και εξόδου, όλες οι καμπύλες τέμνουν στο ίδιο σημείο την ευθεία B. Από τις καμπύλες του σχήματος 2 μπορούμε να διακρίνουμε δύο πράγματα: πρώτον, φαίνεται αμέσως πως πρόκειται για έναν αναστρέφοντα ενισχυτή. Όσο αυξάνεται η τάση εισόδου, τόσο μειώνεται η τάση



Σχήμα 2. Η μεταβολή της τάσης εξόδου του αναστρέφοντα ενισχυτή. Τα σημεία A, B, C αντιστοιχούν σ' αυτά του σχήματος 1.



Σχήμα 3. Η συνδεσμολογία του μη αναστρέφοντα τελεστικού ενισχυτή μοιάζει μ' αυτή του αναστρέφοντα.

εξόδου και ανάστροφα. Όταν ο ενισχυτής τροφοδοτείται με συμμετρική τροφοδοσία, η τάση εξόδου έχει αντίστροφο πρόσημο από την τάση εισόδου. Από το σχήμα μπορούμε να μετρήσουμε, επίσης, το συντελεστή ενίσχυσης της βαθμίδας. Οι αποστάσεις των γραμμών A-B και B-C αντιστοιχούν στο λόγο των αντιστάσεων R1 και R2. Στην περίπτωση του σχήματος 2, η απόσταση B-C είναι λόγο μεγαλύτερη από την απόσταση A-B. Όσο μεγαλώνει η απόσταση B-C (δηλ. η τιμή της R2), σε σύγκριση με την A-B (R1), τόσο αυξάνεται ο συντελεστής ενίσχυσης και τόσο απομακρύνεται περισσότερο η ευθεία της τάσης εξόδου C από την ευθεία B (0 V).

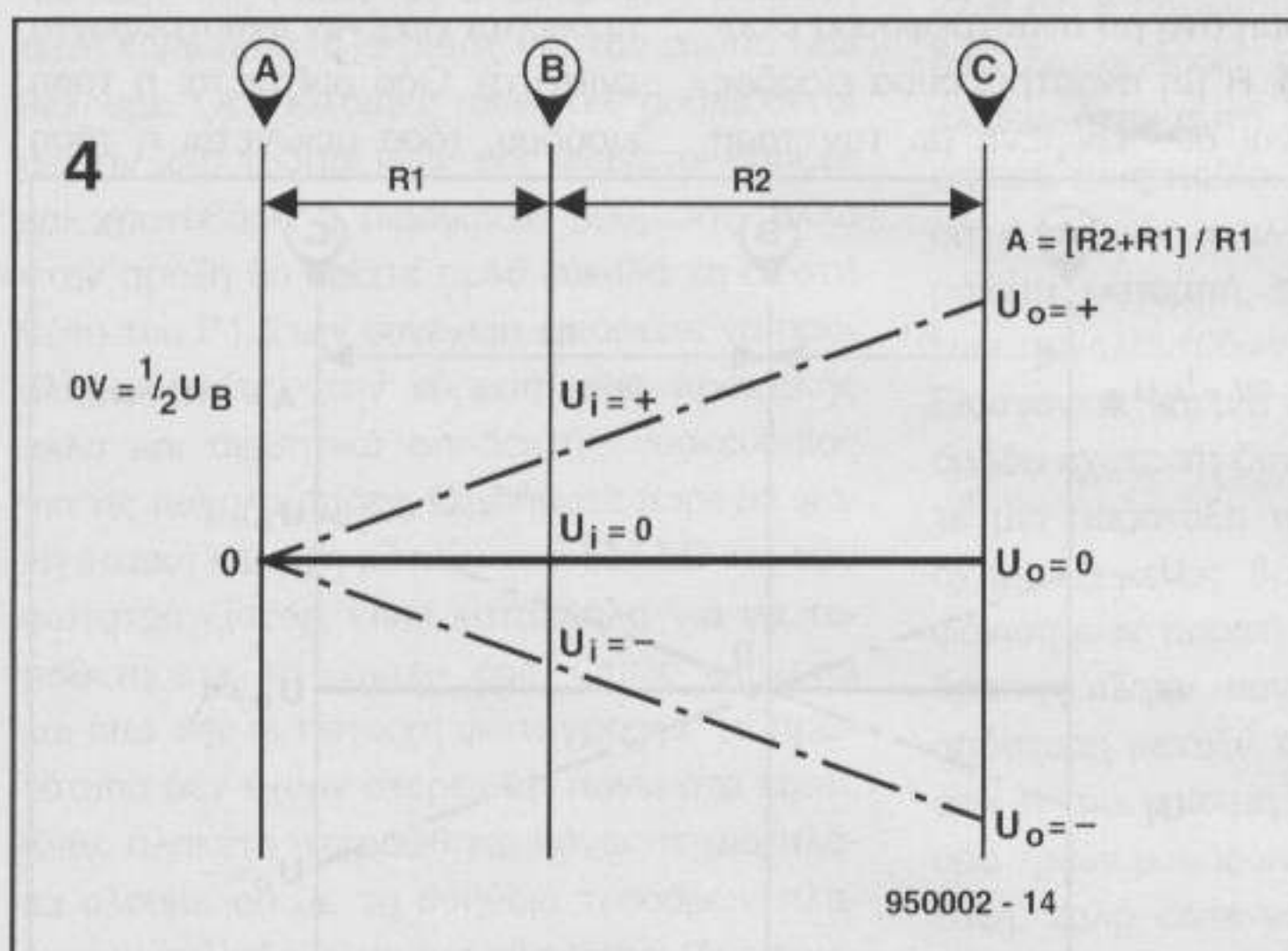
Μη αναστρέφων ενισχυτής

Το κύκλωμα του σχήματος 3 μοιάζει μ' αυτό του αναστρέφοντα ενισχυτή. Η μόνη διαφορά βρίσκε-

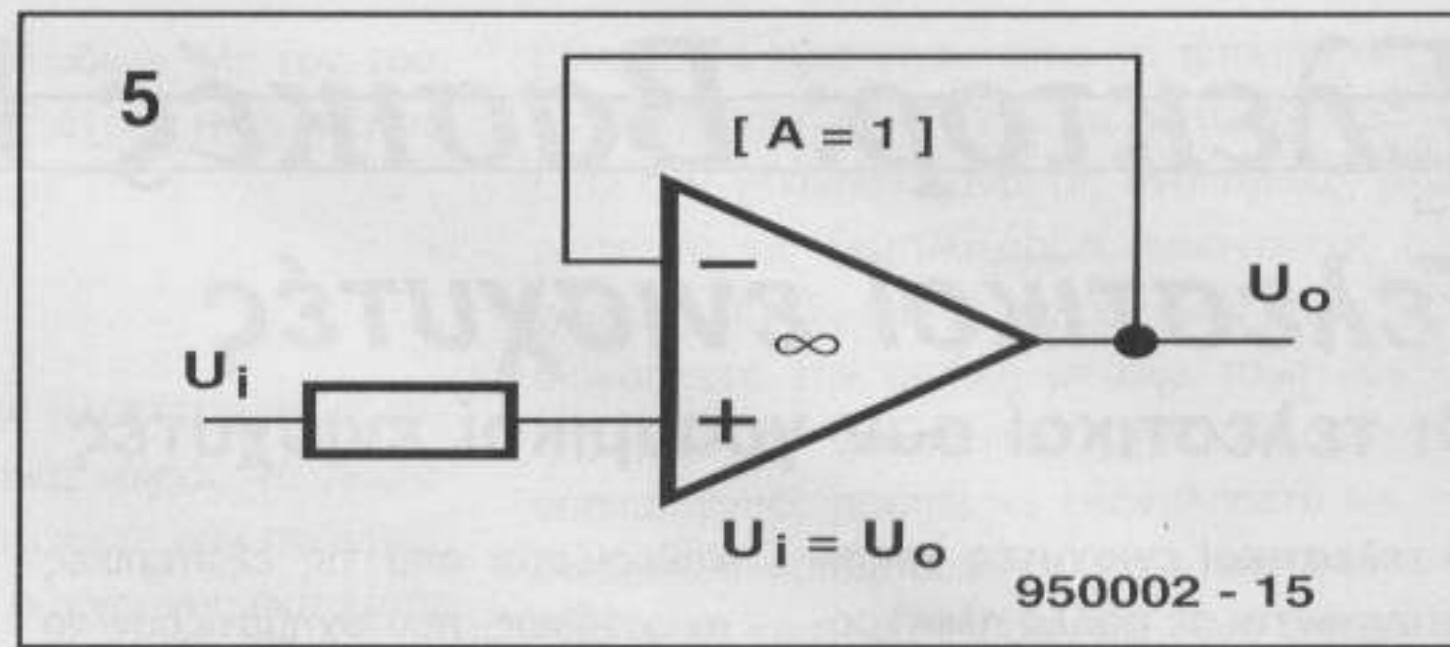
ται στη συνδεσμολογία των εισόδων του τελεστικού. Η πηγή σήματος G άλλαξε θέση με τη τάση αναφοράς. Ετσι, το σήμα συνδέεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού, μέσω της R3. Οι αλλαγές στην χαρακτηριστική εισόδου / εξόδου του ενισχυτή φαίνονται στο σχήμα 4. Όλες οι καμπύλες ξεκινούν από το σημείο A, καθώς αυτό συνδέεται στο δυναμικό αναφοράς (0 V). Η τάση εισόδου εμφανίζεται, συγχρόνως, στο σημείο B. Ο συντελεστής ενίσχυσης εξαρτάται, όπως και πριν, από τις αποστάσεις A-B (R1) και B-C (R2). Σε αντίθεση, όμως, με τα προηγούμενα, δεν υπάρχει αλλαγή στο πρόσημο της τάσης εξόδου. Η τάση εξόδου έχει την ίδια πολικότητα με την τάση εισόδου. Από αυτό καταλαβαίνουμε ότι πρόκειται για έναν μη αναστρέφοντα ενισχυτή. Ο συντελεστής ενίσχυσης υπολογίζεται από τον τύπο

$$A = (R1+R2)/R1 = 1+(R2/R1)$$

Χρησιμοποιώντας τις ίδιες τιμές



Σχήμα 7. Βλέποντας το κύκλωμα από την πλευρά της αναστρέφουσας εισόδου, η R1 συνδέεται παράλληλα στην R2. Για να πετύχουμε συμμετρία στο κύκλωμα, η τιμή της R3 πρέπει να ισούται με τον παράλληλο συνδυασμό των R1 και R2.



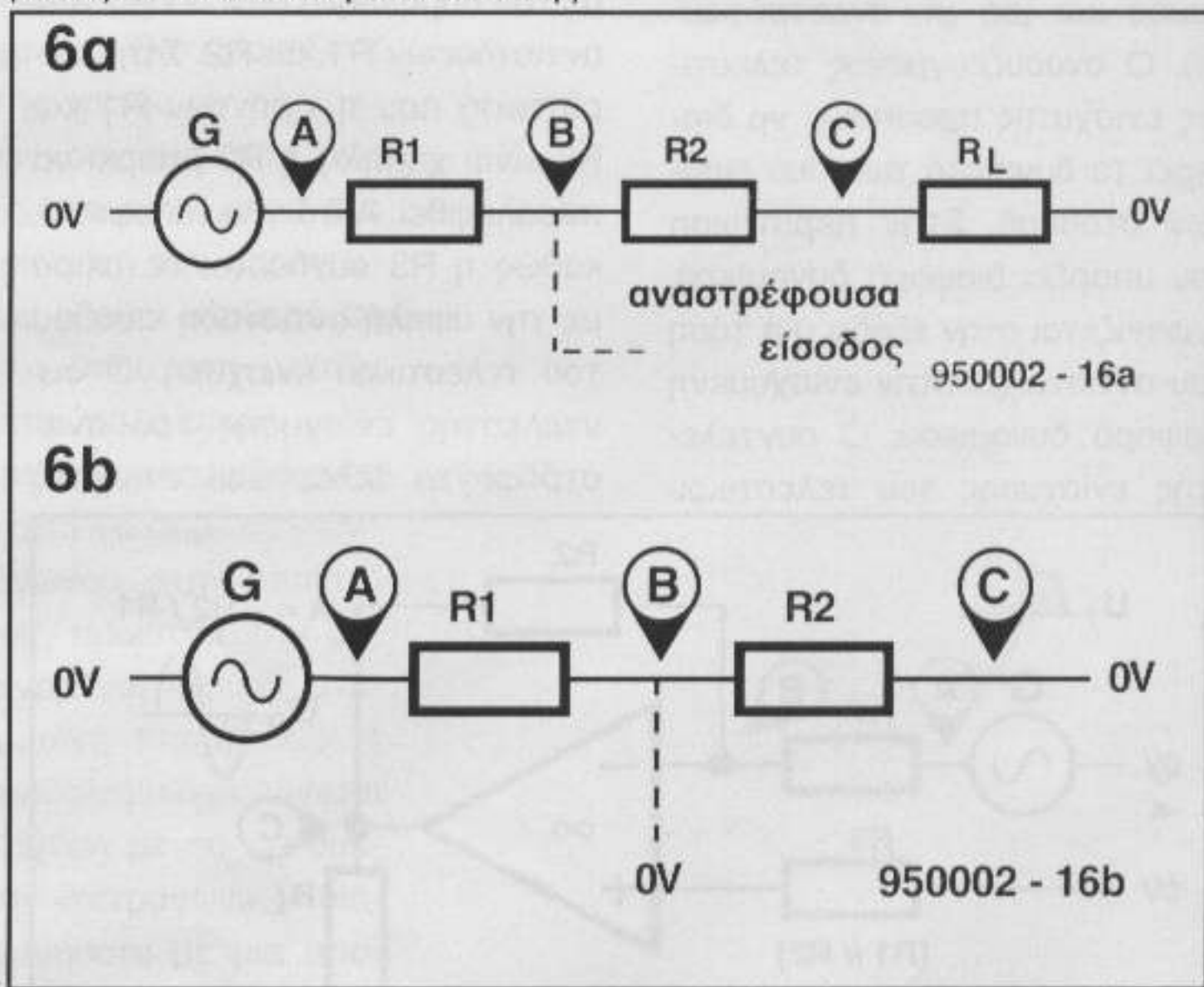
Σχήμα 4. Η χαρακτηριστική του μη αναστρέφοντα τελεστικού ενισχυτή και οι τύποι υπολογισμού της ενίσχυσης διαφέρουν, από αυτούς του αναστρέφοντα ενισχυτή. Το σημείο αναφοράς (0 V) είναι πλέον το A.

αντιστάσεων, όπως σ' έναν αναστρέφοντα ενισχυτή, ο μη αναστρέφον ενισχυτής έχει υψηλότερο συντελεστή ενίσχυσης. Η βαθμίδα είναι αδύνατο να λειτουργήσει σαν εξασθενητής ($A < 1$), γιατί ο συντελεστής ενίσχυσης είναι πάντα $A \geq 1$. Στο σχήμα 5 φαίνεται το τρίτο κύκλωμα με τελεστικό ενισχυτή. Πρόκειται για μία ειδική συνδεσμολογία μη αναστρέφοντα ενισχυτή, που λειτουργεί σαν πηγή ρεύματος. Η αντίσταση R3 έχει τιμή 0 Ω, καθώς η έξοδος συνδέεται απευθείας με την αναστρέφουσα είσοδο. Η τάση στην αναστρέφουσα είσοδο είναι ίση με την τάση εξόδου. Η βαθμίδα συμπεριφέρεται σαν ένα κύκλωμα τρανζίστορ κοινού συλλέκτη.

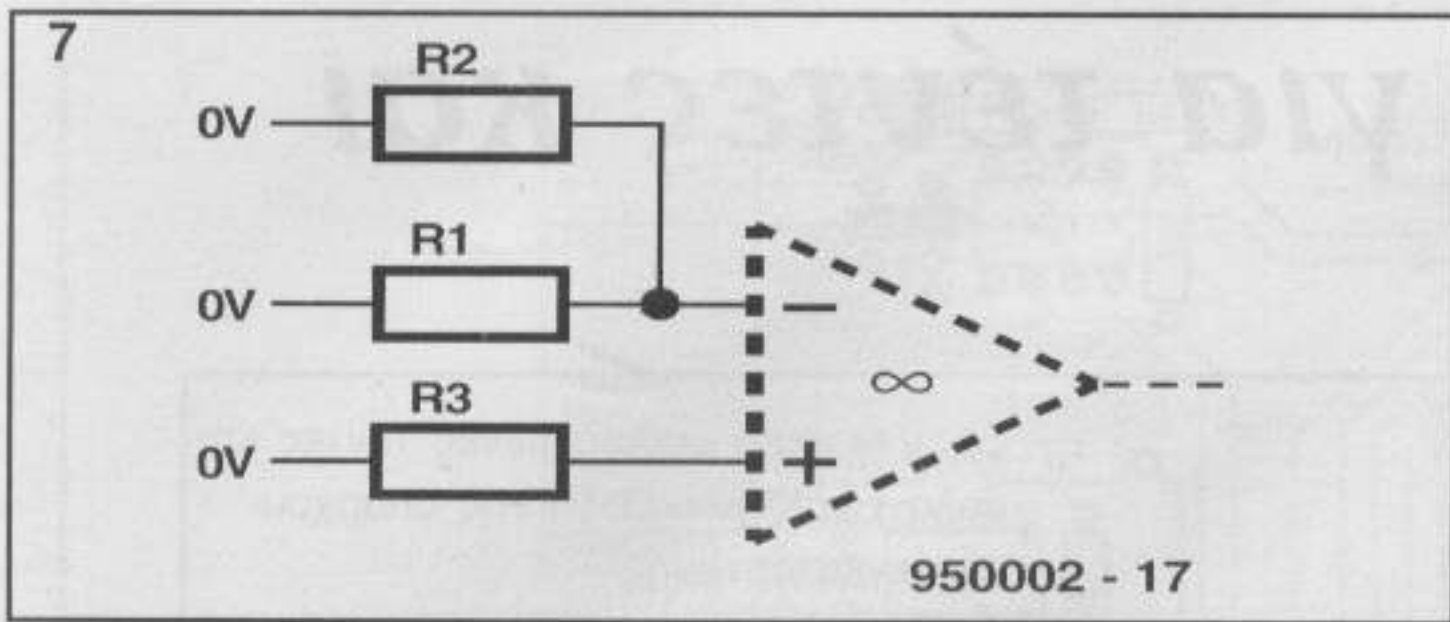
Αντίσταση εξόδου

Ο τελεστικός ενισχυτής εκτελεί χρέη φορτίου για την πηγή σήματος. Η αντίσταση εισόδου της

ενισχυτικής βαθμίδας εξαρτάται από τον τύπο του τελεστικού ενισχυτή και από τη συνδεσμολογία του. Σαν παράδειγμα θα πάρουμε το κύκλωμα του αναστρέφοντα ενισχυτή του σχήματος 1. Η γεννήτρια σήματος G συνδέεται στην τάση αναφοράς (0 V) μέσω των αντιστάσεων R1, R2 και RL (αντίσταση φορτίου του τελεστικού ενισχυτή). Οι αντιστάσεις αυτές συνδέονται σε σειρά, όπως φαίνεται στο σχήμα 6a. Η αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή είναι πολύ υψηλή σε σύγκριση με τις R1, R2 και RL. Η αντίσταση αυτή αφήνει ανεπηρέαστη την αντίσταση φορτίου και γιαυτό μπορεί να παραληφθεί. Το ίδιο ισχύει και για την αντίσταση φορτίου RL. Τις περισσότερες φορές, η RL είναι πολύ μικρότερη από την R2 και ως εκ τούτου το σφάλμα στους υπολογισμούς θα είναι αμελητέο. Αν δεν λάβουμε υπόψιν τα χαρακτηριστι-



Σχήμα 6. Η αντίσταση εισόδου του αναστρέφοντα ενισχυτή εξαρτάται κυρίως από την τιμή της R1. Οι R2 και RL επηρεάζουν ελάχιστα την αντίσταση, καθώς η αναστρέφουσα είσοδος συμπεριφέρεται σαν (εικονική) γείωση.



Σχήμα 5. Στον ενισχυτή ρεύματος η τάση εξόδου είναι ίση με την τάση εισόδου.

κά του τελεστικού ενισχυτή, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η αντίσταση εισόδου της ενισχυτικής βαθμίδας ισούται με $R1+R2+RL$. Αυτό, όμως, είναι λάθος, καθώς η αναστρέφουσα είσοδος συμπεριφέρεται σα γείωση. Ο τελεστικός ενισχυτής προσπαθεί να κρατήσει την τάση στην αναστρέφουσα είσοδο ίση με την τάση της αναστρέφουσας εισόδου - δηλαδή στα 0 V. Το σχήμα 6b είναι η απλοποίηση του σχήματος 6a. Όπως βλέπετε, η αντίσταση εισόδου εξαρτάται, κυρίως, από την τιμή της $R1$. Ο υπολογισμός είναι ευκολότερος στην περίπτωση του μη αναστρέφοντα ενισχυτή του σχήματος 3. Η πηγή σήματος "βλέπει" την αντίσταση $R3$ σε σειρά με την υψηλή αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή (μερικά MΩ). Έτσι, η αντίσταση $R3$ δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της αντίστασης εισόδου και του συντελεστή ενίσχυσης. Στην πράξη, όμως, δεν μπορούμε να την παραλείψουμε. Οι τελεστικοί ενισχυτές δεν συμπεριφέρονται τόσο ιδανικά, όσο θα θέλαμε. Αυτή η συμπεριφορά τους προκαλεί ορισμένα σφάλματα στο σήμα εξόδου, τα οποία ελαχιστοποιούνται όταν η $R3$ είναι ίση με τον παράλληλο συνδυασμό των αντιστάσεων $R1$ και $R2$. Παρατηρώντας το κύκλωμα από τη μεριά της γεννήτριας σήματος G, οι $R1$ και $R2$ φαίνονται συνδεδεμένες σε σειρά (όπως στο σχήμα 6b). Βλέποντάς το όμως από την πλευρά της αναστρέφουσας εισόδου (σημείο B), οι δύο αντιστάσεις είναι παράλληλες. Συνήθως, η εσωτερική αντίσταση της πηγής σήματος είναι πολύ χαμηλή, σε σύγκριση με την $R1$. Έτσι, οι $R1$ και $R2$ συνδέονται παράλληλα ως προς την τάση αναφοράς 0 V (σχήμα

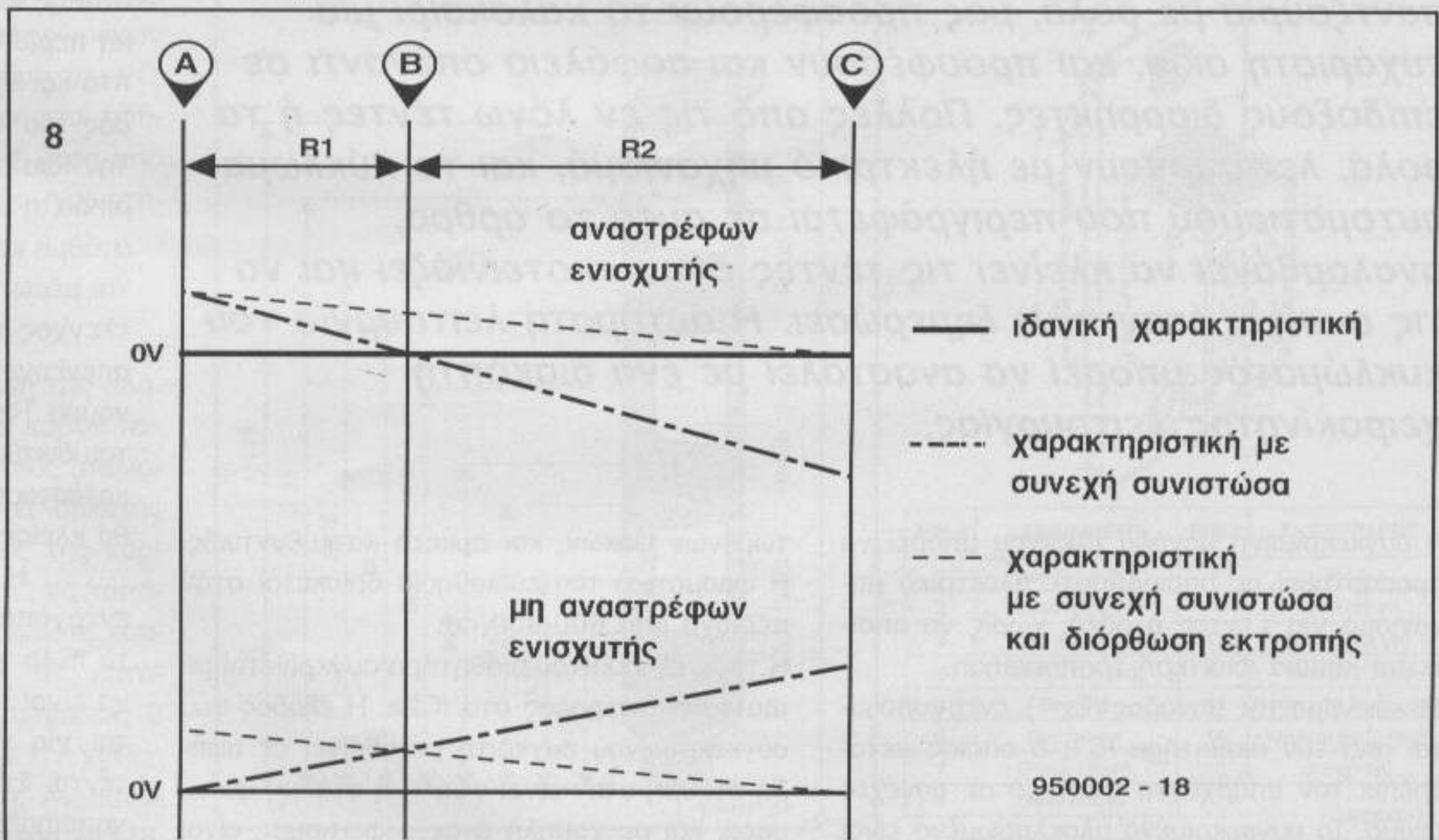
7). Για να διατηρήσουμε τη συμμετρικότητα του ενισχυτή, η $R3$ πρέπει να ισούται με το συνδυασμό $R1//R2$.

Τάση εκτροπής

Για χάρη ευκολίας, δεχτήκαμε, μέχρι σ' αυτό το σημείο ότι η τάση αναφοράς του σήματος εισόδου είναι ίση με την τάση αναφοράς του τελεστικού ενισχυτή (0 V). Στην πράξη, όμως, υπάρχουν φορές που η εναλλασσόμενη τάση συνοδεύεται και από μία συνεχή συνιστώσα. Η μεταβολή της τάσης εξόδου φαίνεται στο σχήμα 8. Πάνω απεικονίζεται η καμπύλη ενός αναστρέφοντα ενισχυτή και από κάτω η καμπύλη ενός μη αναστρέφοντα ενισχυτή. Με συνεχή γραμμή απεικονίζουμε την ιδανική χαρακτηριστική του ενισχυτή και με έντονη διακεκομμένη τη συμπεριφορά του στην πράξη. Μπορείτε να διακρίνετε μία ασυμμετρία, ανάμεσα στις τάσεις εισόδου και εξόδου. Λόγω

της ασυμμετρίας περιορίζεται ο μέγιστος συντελεστής ενίσχυσης του τελεστικού. Στην περίπτωση του αναστρέφοντα ενισχυτή, το σήμα εισόδου έχει μεγαλύτερα περιθώρια να ενισχυθεί ως προς τη θετική τάση εξόδου, αλλά μικρότερα περιθώρια ως προς την αρνητική. Αν προσπαθήσουμε να ενισχύσουμε ένα θετικό σήμα, ο ενισχυτής θα φτάσει πολύ γρήγορα στον κορεσμό. Η στάθμη του σήματος εξόδου θα περιοριστεί από το όριο, που καθορίζεται από την αρνητική τάση τροφοδοσίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραμόρφωση του σήματος. Αντίστοιχη είναι και η συμπεριφορά του μη αναστρέφοντα ενισχυτή. Η συνεχής συνιστώσα του σήματος εισόδου μπορεί να αντισταθμιστεί με μία άλλη συνεχή τάση, που ονομάζεται τάση εκτροπής. Η τάση εκτροπής προστίθεται στο σήμα εισόδου (σημείο B), έτσι ώστε, η συνεχής τάση στην έξοδο να γίνει 0 V. Μ' αυτό τον τρόπο αναιρούμε την επίδραση της ανεπιθύμητης συνεχούς συνιστώσας, που βρίσκεται στο σήμα εισόδου. Η τάση εκτροπής μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο που βρίσκουμε το συντελεστή ενίσχυσης. Στην πράξη, όμως, έχει επικρατήσει η πειραματική μέθοδος. Γιαυτό το σκοπό χρησιμοποιούμε ένα μεταβλητό διαιρέτη τάσης. Η αντίσταση του διαιρέτη τάσης μεταβάλλει την αντίσταση εισό-

δου του τελεστικού ενισχυτή. Αυτό σημαίνει μεταβολή στο συντελεστή ενίσχυσης και στη συμμετρία του κυκλώματος. Η μόνη λύση στο πρόβλημα είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα διαιρέτη τάσης με μηδενική εσωτερική αντίσταση. Αυτό μπορεί πχ. να επιτευχθεί με τη βοήθεια ενός ενισχυτή ρεύματος. Η ιδιαιτερότητα αυτού του κυκλώματος είναι ότι έχει υψηλή αντίσταση εισόδου και χαμηλή αντίσταση εξόδου. Ο ενισχυτής ρεύματος λειτουργεί σαν μετασχηματιστής αντιστάσεων και μπορεί να παρεμβληθεί ανάμεσα στην πηγή ρεύματος και στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Το κύκλωμα είναι απαραίτητο όταν θέλουμε να επιβαρύνουμε ελάχιστα την πηγή σήματος, ενώ παράλληλα επιθυμούμε να έχουμε χαμηλή αντίσταση εξόδου. Η τάση εκτροπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα από το αν το σήμα εισόδου έχει ή δεν έχει συνεχή συνιστώσα. Μ' αυτό τον τρόπο μπορούμε να προσθέσουμε μία συνεχή συνιστώσα στο εναλλασσόμενο σήμα εξόδου. Η τάση εκτροπής δεν πρέπει να ρυθμίζεται από την είσοδο εκτροπής, που έχουν ορισμένοι τελεστικοί ενισχυτές. Αυτή η είσοδος χρησιμεύει μόνο για να αντισταθμίσουμε τυχόν ανεπιθύμητες συνεχείς τάσεις στην έξοδο, που οφείλονται στην ασυμμετρία του τελεστικού.



Σχήμα 8. Μία ανεπιθύμητη συνεχής τάση στην είσοδο μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση του σημείου αναφοράς (0 V) στην έξοδο C. Για να διορθώσουμε το πρόβλημα, προσθέτουμε στην είσοδο την τάση εκτροπής.