

Στο τέλος

αυτού του κεφαλαίου

ο μαθητής θα πρέπει να:

- Έχει κατανοήσει τις διατάξεις οι οποίες ονομάζονται **τελεστικοί ενισχυτές** και την αρχή λειτουργίας τους
- Γνωρίζει τις αρχές λειτουργίας και τη χρήση ενός τελεστικού ενισχυτή
- Διακρίνει τα όρια του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή από τον πραγματικό τελεστικό ενισχυτή
- Είναι σε θέση να αποφασίζει πότε χρησιμοποιεί την προσέγγιση του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή
- Διαβάζει και να κατανοεί τα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών
- Γνωρίζει τις βασικές αρχές ανατροφοδότησης στα βασικά κυκλώματα με τελεστικό ενισχυτή
- Διακρίνει τη λειτουργία του αναστρέφοντος από αυτή του μη αναστρέφοντος τελεστικού ενισχυτή
- Είναι σε θέση να σχεδιάζει απλά κυκλώματα με αναστρέφοντα και μη αναστρέφοντα ενισχυτή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ



8.1 Χαρακτηριστικά του Τελεστικού Ενισχυτή

8.1.1 Γενικά περί ενισχυτών

Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής είναι κατ' αρχήν ένας ενισχυτής. Αυτό σημαίνει ότι, για να γίνει κατανοητή η λειτουργία του θα πρέπει πρώτα να έχουν κατανοηθεί τα βασικά χαρακτηριστικά και οι αρχές λειτουργίας των ενισχυτών. Έτσι ξεκινάμε με μια συνοπτική παρουσίαση αυτών, έστω και για απλή υπενθύμιση.

Ο **ενισχυτής** (amplifier) είναι μια από τις σημαντικότερες βαθμίδες ή δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα αναλογικά ηλεκτρονικά. Στην απλούστερη μορφή έχει στην είσοδο δύο ακροδέκτες, στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται η τάση (σήμα) εισόδου. Έχει, επίσης, στην έξοδο δύο ακροδέκτες, στα άκρα των οποίων λαμβάνεται η τάση (σήμα) εξόδου.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο ενισχυτής αντιμετωπίζεται σαν ένα **μαύρο κουτί** (black box), το οποίο περιγράφεται από ένα περιορισμένο σύνολο παραμέτρων. Μια από αυτές είναι η εξάρτηση του σήματος εξόδου από το σήμα εισόδου. Στην απλούστερη περίπτωση θεωρούμε ότι η σχέση μεταξύ τους είναι γραμμική, δηλαδή ότι το σήμα εξόδου είναι ανάλογο του σήματος εισόδου.

Μια άλλη αντιμετώπιση των ενισχυτών βασίζεται στον τρόπο απόκρισης τους σε σήματα τα οποία αντιστοιχούν σε συνεχείς ή εναλλασσόμενες τάσεις. Όντως, κάποιοι ενισχυτές αποκρίνονται με διαφορετικό τρόπο όταν στην είσοδο τους εφαρμοστεί μια συνεχής ή μια εναλλασσόμενη τάση. Κάποιοι άλλοι ενισχυτές αποκρίνονται διαφορετικά σε διαφορετικές συχνότητες της εναλλασσόμενης τάσης η οποία εφαρμόζεται στην είσοδό τους.

Από το σύνολο των παραμέτρων ενός ενισχυτή, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η απολαβή τάσης ή ρεύματος, η σύνθετη αντίσταση εισόδου, η σύνθετη αντίσταση εξόδου και η απόκριση συχνότητας.

Η **απολαβή ή κέρδος τάσης** (voltage gain) ορίζεται ως το πηλίκο της τάσης εξόδου u_o προς την τάση εισόδου u_i , ήτοι

$$A_V = \frac{u_o}{u_i} \quad 8.1.1$$

Η τάση εισόδου μπορεί να είναι απλή ή διαφορική. Οι τάσεις εξόδου u_o και εισόδου u_i αναφέρονται μόνο στα αντίστοιχα σήματα εισόδου και εξόδου και δεν περιλαμβάνουν τυχόν πολώσεις ή τάσεις αντιστάθμισης.

Εκτός από την απολαβή τάσης υπάρχει και η **απολαβή ή κέρδος ρεύματος** (current gain) καθώς και η **απολαβή ή κέρδος ισχύος** (power gain) οι οποίες ορίζονται αντίστοιχα.

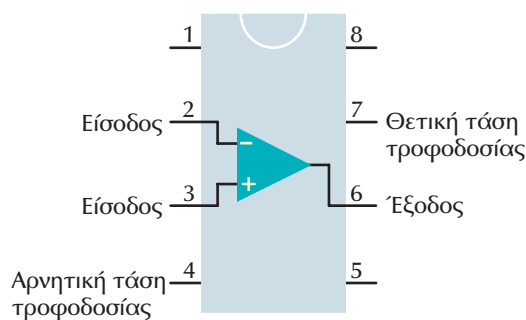
Η **σύνθετη αντίσταση εισόδου** (input impedance), ή απλώς αντίσταση εισόδου, είναι η αντίσταση την οποία παρουσιάζει στην είσοδό του ο ενισχυτής. Η σύνθετη αντίσταση εισόδου συμπεριφέρεται ως αντίσταση φόρτου σε οποιαδήποτε πηγή σήματος συνδεθεί στην είσοδο του ενισχυτή και επηρεάζει τη μεταφορά σήματος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

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

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

Πέρα από αυτές τις τέσσερις βασικές παραμέτρους υπάρχουν και πολλές άλλες, οι οποίες απαιτούνται όταν θέλουμε να προδιαγραφεί πλήρως ένας ενισχυτής. Επιπλέον, πέρα από αυτό τον απλό ενισχυτή υπάρχουν και ενισχυτές με περισσότερες εισόδους, όπου το σήμα εξόδου είναι ανάλογο του αθροίσματος ή της διαφοράς των σημάτων των εισόδων, ή και ενισχυτές με περισσότερες από μια εξόδους.

Αντιμετωπίζοντας τον ενισχυτή ως ένα μαύρο κουτί, με τις παραπάνω βασικές παραμέτρους και λειτουργίες και λαμβάνοντας υπόψη την αρχή της ανατροφοδότησης, είναι δυνατή μια πρώτη κατανόηση και συνοπτική μελέτη του τελεστικού ενισχυτή, όπως ακολουθεί.



Σχήμα 8.1.1 Κυκλωματικό σύμβολο τελεστικού ενισχυτή, τοποθετημένο στο κέλυφος (package) αυτού

8.1.2 Τελεστικός Ενισχυτής (ΤΕ)

Ένας σημαντικός αριθμός ενισχυτικών κυκλωμάτων βασίζονται σε μια από τις βασικότερες μονάδες των σύγχρονων ηλεκτρονικών. Η μονάδα αυτή ονομάζεται **τελεστικός ενισχυτής** (operational amplifier ή, συντομευμένα, op-amp). Το «τελεστικός» (operational) πηγάζει από το γεγονός ότι αυτός ο ενισχυτής, αρχικά χρησιμοποιούταν στους αναλογικούς υπολογιστές για να εκτελεί μαθηματικές πράξεις, όπως πρόσθεση, αφαίρεση, ολοκλήρωση, παραγωγή, κ.α.

Ο τελεστικός ενισχυτής έχει δύο εισόδους και μία έξοδο. Απαιτούνται επίσης δύο επιπλέον ακροδέκτες για την τροφοδοσία του. Η τροφοδοσία ενός τελεστικού ενισχυτή μπορεί να γίνει είτε με τη βοήθεια μιας μόνο πηγής τάσης είτε με τη βοήθεια δύο πηγών, οπότε οι τάσεις οι οποίες τροφοδοτούν τους αντίστοιχους ακροδέκτες θα είναι συμμετρικές ως προς τη «γη» του κυκλώματος. Επιπλέον, μπορεί να υπάρχουν και άλλοι ακροδέκτες οι οποίοι να επιτρέπουν την προσπέλαση στο εσωτερικό κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή. Έτσι στην ελάχιστη μορφή του ένας τελεστικός απαιτεί πέντε ακροδέκτες και τοποθετείται σε ένα κέλυφος οκτώ ακροδεκτών, οι οποίοι είναι διατεταγμένοι σε δύο σειρές (Dual In Line, DIL8), κατά την κάτοψη που φαίνεται στο σχ.8.1.1.

Στα ηλεκτρονικά διαγράμματα, για να αποφευχθεί η πολυπλοκότητα τους, συνήθως δεν παρουσιάζονται όλες οι παραπάνω λεπτομέρειες όπως οι ακροδέκτες τροφοδοσίας και το κέλυφος στο οποίο είναι τοποθετημένος ένας τελεστικός ενισχυτής.

Διαφορά τάσεων εισόδου	Πολικότητα τάσης εξόδου
$V_{(+)} > V_{(-)}$	$V_Q > 0$
$V_{(-)} > V_{(+)}$	$V_Q < 0$

Πίνακας 8.1.1. Πολικότητα της τάσης εξόδου συναρτήσει των τάσεων εισόδου

Ο τελεστικός ενισχυτής ενισχύει και επεξεργάζεται τη διαφορά των σημάτων που εφαρμόζεται στις δύο εισόδους και γι' αυτό το λόγο λέμε ότι ο τελεστικός ενισχυτής έχει **διαφορική είσοδο** (differential input), βλέπε σχ.8.1.1. Επειδή ο τελεστικός ενισχυτής επεξεργάζεται τη διαφορά των σημάτων των εισόδων πρέπει ο χρήστης να γνωρίζει ποία είσοδος αντιστοιχεί στον αφαιρέτη και ποία στον αφαιρετέο, δηλαδή ποίο σήμα

αφαιρείται από ποιο. Γι' αυτό το λόγο οι είσοδοι ξεχωρίζουν μεταξύ τους με τα σημεία (+), που συμβολίζει τη λεγόμενη **μη-αναστρέφουσα είσοδο** (non-inverting input, NI) και (-), που συμβολίζει τη λεγόμενη **αναστρέφουσα είσοδο** (inverting input, I). Επειδή οι όροι μη-αναστρέφουσα και αναστρέφουσα είσοδος μπορεί να προκαλούν σύγχυση, ως προς το όνομά τους, θα δοθεί αμέσως παρακάτω εκτενέστερη επεξήγηση τους.

Αν η μη-αναστρέφουσα είσοδος είναι πιο θετική από την αναστρέφουσα τότε η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή είναι θετική. Αν η αναστρέφουσα είσοδος είναι πιο θετική από την μη-αναστρέφουσα τότε η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή είναι αρνητική. Χρησιμοποιώντας το σύμβολο $V_{(+)}$ για την τάση που εφαρμόζεται στη μη-αναστρέφουσα είσοδο και το $V_{(-)}$ για την τάση που εφαρμόζεται στην αναστρέφουσα είσοδο, τα παραπάνω συνοψίζονται στον πιν. 8.1.1.

Τα παραπάνω εκφράζονται ακριβέστερα με τη διατύπωση ότι το σήμα εξόδου παρουσιάζει *διαφορά φάσης* $\Delta\varphi = 0^\circ$, δηλ. είναι συμφασικό, με το σήμα της μη-αναστρέφουσας εισόδου και παρουσιάζει *διαφορά φάσης* $\Delta\varphi = 180^\circ$, με την αναστρέφουσα είσοδο.

8.1.2.1 Ιδανικός Τελεστικός Ενισχυτής

Η χρησιμοποίηση ενός τελεστικού ενισχυτή, ακόμα και αν αυτός αντιμετωπίζεται ως μαύρο κουτί, απαιτεί κατ' ελάχιστον τη γνώση λίγων βασικών παραμέτρων του. Για να διευκολυνθεί ακόμα περισσότερο στους υπολογισμούς του ο σχεδιαστής ή ο συντηρητής των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, καταφεύγει συχνά στη χρήση του απλούστερου δυνατού μοντέλου του, που είναι ο **ιδανικός τελεστικός ενισχυτής**.

Χαρακτηριστική παράμετρος	Σύμβολο	Μέγεθος
Αντίσταση εισόδου	R_i	∞
Αντίσταση εξόδου	R_o	0
Απολαβή τάσης	A_v	∞
Απόκριση συχνότητας (εύρος ζώνης)	BW	∞
Τέλεια ισοστάθμιση	$V_Q = 0$ όταν $V_+ = V_-$	
Τα χαρακτηριστικά δεν μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία		

Πίνακας 8.1.2. Χαρακτηριστικές παράμετροι ιδανικού τελεστικού ενισχυτή

Οι χαρακτηριστικές του πίν. 8.1.2 ορίζονται ως εξής:

- **Αντίσταση εισόδου:** Ορίζεται ως το πηλίκο της τάσης, σήματος, η οποία εφαρμόζεται στην είσοδο, προς το ρεύμα το οποίο αυτή επάγει.
- **Αντίσταση εξόδου:** Ορίζεται από το κατά Thevenin κύκλωμα εξόδου, δηλαδή είναι η αντίσταση η οποία συνδέεται σε σειρά με τη «γεννήτρια» σήματος εξόδου.
- **Απολαβή τάσης:** Ορίζεται ως το πηλίκο της τάσης εξόδου προς τη διαφορά των τάσεων των εισόδων.
- **Απόκριση συχνότητας ή εύρος ζώνης:** Ορίζει την εξάρτηση της απολαβής από τη συχνότητα και καθορίζει την περιοχή συχνοτήτων (εύρος ζώνης) στην οποία ο τελεστικός ενισχυτής είναι πρακτικά χρήσιμος.

Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής έχει τις χαρακτηριστικές παραμέτρους που παρουσιάζονται στον πιν. 8.1.2. Αν και στην πράξη δεν υπάρχουν τέτοιοι τελεστικοί ενισχυτές, το σημερινό επίπεδο τεχνολογίας επιτρέπει την κατασκευή ενισχυτών, των οποίων αρκετά χαρακτηριστικά πλησιάζουν σημαντικά αυτά του πίν. 8.1.2. Αυτό εξαρτάται άμεσα από το πεδίο των εφαρμογών για τις οποίες ο κατασκευαστής έχει σχεδιάσει το συγκεκριμένο τελεστικό ενισχυτή. Έτσι υπάρχουν τελεστικοί ενισχυτές των οποίων η αντίσταση εισόδου είναι $1\text{T}\Omega$ ήτοι $10^{12}\Omega$ (κωδικός LF351), άλλοι οι οποίοι μπορούν να παρέχουν στην έξοδο τους ρεύματα της τάξης των 13A (κωδικός LM12), άρα η αντίσταση εξόδου να θεωρείται αμελητέα, και άλλοι οι οποίοι έχουν ένα πολύ μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων, π.χ 1200MHz (κωδικός CLC449).

Χαρακτηριστική παράμετρος	Σύμβολο	Μέγεθος
Αντίσταση εισόδου	R_i	2MΩ
Αντίσταση εξόδου	R_o	~ 75Ω
Απολαβή τάσης	A_v	200. 000
Απόκριση συχνότητας (εύρος ζώνης)	BW	1,5MHz
Τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται λίγο με τη θερμοκρασία		

Πίνακας 8.1.3. Χαρακτηριστικές παράμετροι ενός πραγματικού τελεστικού ενισχυτή (π.χ. του 741)

8.1.2.2 Πραγματικός Τελεστικός Ενισχυτής

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

Τα χαρακτηριστικά του πραγματικού τελεστικού ενισχυτή ποικίλουν σημαντικά από τύπο σε τύπο (δηλ. από κωδικό σε κωδικό) ανάλογα με την έμφαση την οποία έχει δώσει σε ορισμένα από αυτά ο κατασκευαστής. Γενικά, σε ένα πραγματικό τελεστικό ενισχυτή η απολαβή είναι πεπερασμένη, όπως και η αντίσταση εισόδου, το εύρος ζώνης και όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του, όπως φαίνεται στον πιν. 8.1.3, που αναφέρεται σε ένα συνηθισμένο τελεστικό ενισχυτή ο οποίος έχει τον κωδικό 741.

Για τους παραπάνω λόγους όταν χρησιμοποιείται ένας πραγματικός τελεστικός ενισχυτής, η υπόθεση ότι προσεγγίζει τον ιδανικό πρέπει να γίνεται με βάση τις απαιτήσεις του κυκλώματος στο οποίο πρόκειται να τοποθετηθεί και να λειτουργήσει. Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται η γνώση και άλλων χαρακτηριστικών παραμέτρων του τελεστικού ενισχυτή, εκτός από αυτές του πιν. 8.1.3, καθώς και ορισμένων χαρακτηριστικών διαγραμμάτων τα οποία περιέχονται στα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών. Οι σημαντικότερες χαρακτηριστικές παράμετροι ενός **πραγματικού** τελεστικού ενισχυτή, πέρα από αυτές που περιλαμβάνονται στον πιν 8.1.3, είναι:

- Το **ρεύμα πόλωσης εισόδων** (input bias current) I_B Αυτό ισούται με το ημίθροισμα των ρευμάτων πόλωσης των δύο εισόδων του τελεστικού.
- Το **ρεύμα αποστάθμισης εισόδων** (input offset current) I_O Αυτό ισούται με τη διαφορά των ρευμάτων πόλωσης των δύο εισόδων.
- Η **τάση αποστάθμισης εισόδου** (input offset voltage) V_O , Εκφράζεται από το μέτρο της τάσης που πρέπει να εφαρμοστεί μεταξύ των εισόδων για να μηδενιστεί η τάση εξόδου.
- Ο **λόγος απόρριψης κοινού τρόπου** (CMRR), (Common Mode Rejection Ratio) Μετράται από την απολαβή τάσης που εκδηλώνεται όταν ένα σήμα εφαρμόζεται ταυτόχρονα και στις δύο εισόδους. Δηλαδή, εκφράζει έμμεσα το κατά πόσο απέχει ο τελεστικός ενισχυτής από τη συνθήκη $V_o = 0$ όταν $V_+ = V_-$.

- Ο **ρυθμός μεταβολής** της τάσης εξόδου (slew rate). Δηλώνει τη μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να μεταβάλλεται η τάση εξόδου.

Μία σύγκριση μεταξύ των ομοειδών χαρακτηριστικών παραμέτρων ενός πραγματικού και ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή παρουσιάζεται στον πιν. 8.1.4

Χαρακτηριστική παράμετρος	Ιδανικός	Πραγματικός	Μονάδες
Αντίσταση εισόδου	∞	2	MΩ
Αντίσταση εξόδου	0	75	Ω
Απολαβή τάσης	∞	200.000	–
Απόκριση συχνότητας (εύρος ζώνης)	∞	1,5	MHz
Ρεύμα πόλωσης εισόδου	0	80	nA
Ρεύμα αποστάθμισης εισόδου	0	20	nA
Τάση αποστάθμισης εισόδου	0	2	mV
Λόγος απόρριψης κοινού τρόπου	∞	90	dB
Ρυθμός μεταβολής τάσης εξόδου	∞	0,5	V/ μ s

Πίνακας 8.1.4. Σύγκριση των χαρακτηριστικών παραμέτρων ιδανικού και πραγματικού τελεστικού ενισχυτή (π.χ. του 741)

Η πλήρης περιγραφή ενός πραγματικού τελεστικού ενισχυτή περιλαμβάνει και άλλες χαρακτηριστικές παραμέτρους. Αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν από έναν έμπειρο τεχνολόγο όταν απαιτείται λεπτομερής υπολογισμός για εκμετάλλευση όλων των δυνατοτήτων του τελεστικού ενισχυτή.

Κλείνουμε με την παρατήρηση ότι η απολαβή τάσης A_v ενός πραγματικού τελεστικού ενισχυτή είναι **διαφορική** απολαβή τάσης. Έτσι, με βάση την εξ.8.1.1, το σήμα εξόδου θα είναι ανάλογο της διαφοράς των σημάτων εισόδου, δηλαδή

$$V_o = A_v(V_+ - V_-) \quad 8.1.2$$

όπου οι δείκτες (+) και (–) αναφέρονται στη μη αναστρέφουσα και την αναστρέφουσα είσοδο, αντίστοιχα.

Παράδειγμα 8.1.1

Στη μη-αναστρέφουσα είσοδο ενός τελεστικού ενισχυτή εφαρμόζεται τάση $2 \mu\text{V}$ στη δε αναστρέφουσα $1 \mu\text{V}$. Αν η (διαφορική) απολαβή τάσης είναι 80 000 να υπολογιστεί η τάση στην έξοδό του ενισχυτή.

Λύση

Χρησιμοποιούμε την Εξ. (8.1.2), όπου τώρα έχουμε

$$V_i = V_+ - V_- = 1 \mu\text{V}$$

Άρα

$$V_0 = A_v \times V_i = 80000 \times 1 \mu\text{V} = 8 \times 10^4 \times 10^{-6}\text{V} = 8 \times 10^{-2}\text{V} = 80 \text{ mV}$$

Παράδειγμα 8.1.2

Μεταξύ των δύο εισόδων ενός τελεστικού ενισχυτή εφαρμόζεται τάση $V_i = 20 \mu\text{V}$ και στην έξοδό του εμφανίζεται τάση 4 V . Να υπολογιστεί τη (διαφορική) απολαβή τάσης του τελεστικού ενισχυτή.

Λύση

Ξεκινώντας από την Εξ. (8.1.2), έχουμε

$$A_v = \frac{V_0}{V_i} = \frac{4\text{V}}{20\mu\text{V}} = \frac{4\text{V}}{2 \cdot 10^{-5}\text{V}} = 2 \cdot 10^5 = 200.000$$

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η 8.1

- Ο **τελεστικός ενισχυτής** έχει διαφορική είσοδο και το σήμα εξόδου είναι ανάλογο της διαφοράς των δύο σημάτων εισόδου.
- Ο **ιδανικός τελεστικός ενισχυτής** χρησιμοποιείται ως μια συνήθως ικανοποιητική προσέγγιση για το σχεδιασμό και την κατασκευή απλών κυκλωμάτων
- Η χρησιμοποίηση των **πραγματικών τελεστικών ενισχυτών** προαπαιτεί την κατανόηση της διαφοράς τους από τους ιδανικούς.
- Η πλήρης αξιοποίηση των πραγματικών τελεστικών ενισχυτών απαιτεί τη γνώση όλων των χαρακτηριστικών παραμέτρων τους.

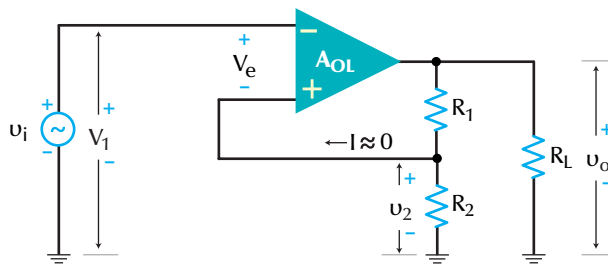
ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ – ΑΣΚΗΣΕΙΣ 8.1

- 8.1.1 Πόσα είδη απολαβής συναντώνται σε έναν ενισχυτή, απλό ή τελεστικό;
- 8.1.2 Σε τι διαφέρουν μεταξύ τους οι είσοδοι ενός τελεστικού ενισχυτή;
- 8.1.3 Γιατί χρησιμοποιείται η έννοια του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή;
- 8.1.4 Ποια είναι τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή;
- 8.1.5 Ποιες είναι οι βασικές διαφορές μεταξύ των ιδανικών και των πραγματικών τελεστικών ενισχυτών;
- 8.1.6 Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε τελεστικός ενισχυτής του εμπορίου σε οποιαδήποτε εφαρμογή;
- 8.1.7 Ένας τελεστικός ενισχυτής έχει απολαβή τάσης 100 000. Αν η τάση στην έξοδο του είναι 1 V, η τάση εισόδου είναι
- α. 10 μ V
- β. 2 mV
- γ. 10 mV
- δ. 1 V
- 8.1.8 Ο τελεστικός ενισχυτής 741 έχει
- α. απολαβή τάσης 100 000
- β. σύνθετη αντίσταση εισόδου 2 M Ω
- γ. σύνθετη αντίσταση εξόδου 75 Ω
- δ. όλα τα παραπάνω
- Σημειώστε τη σωστή απάντηση.
- 8.1.9 Ένας τελεστικός ενισχυτής έχει απολαβή τάσης 200.000. Αν στην είσοδο του εφαρμοστεί μια τάση 12 μ V να υπολογιστεί η τάση εξόδου.
- 8.1.10 Ο τελεστικός ενισχυτής 741 έχει απολαβή τάσης 100.000. Ποία είναι οι τάσεις εισόδου αν στην έξοδο μετρώνται τάσεις 0,1 V, 1 V και 10 V;

8.2 Βασικά κυκλώματα με τελεστικό ενισχυτή

Η υψηλή απολαβή τάσης (ανοικτού βρόχου), η άπειρη αντίσταση εισόδου και η μηδενική αντίσταση εξόδου ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή επιτρέπουν τη σχεδίαση μεγάλης ποικιλίας κυκλωμάτων για την επίτευξη διαφόρων ηλεκτρονικών λειτουργιών.

Τα περισσότερα από τα κυκλώματα αυτά βασίζονται στην εφαρμογή αρνητικής ανασύζευξης ή ανατροφοδότησης μεταξύ εξόδου και της αναστρέφουσας εισόδου του ΤΕ. Αφού οι τελεστικοί ενισχυτές έχουν δύο εισόδους, την αναστρέφουσα και τη μη-αναστρέφουσα, ο συνδυασμός εφαρμογής σήματος εισόδου και ανατροφοδότησης του σήματος εξόδου δίνουν τη δυνατότητα σχεδίασης δυο βασικών κατηγοριών κυκλωμάτων, που είναι τα κυκλώματα με **μη-αναστρέφουσα ανατροφοδότηση** (non inverting feedback) και κυκλώματα με **αναστρέφουσα ανατροφοδότηση** (inverting feedback). Οι τυπικοί ενισχυτές οι οποίοι κατασκευάζονται με αυτόν τον τρόπο ονομάζονται αντίστοιχα **μη-αναστρέφων ενισχυτής** (-non inverting amplifier) και **αναστρέφων ενισχυτής** (inverting amplifier) και θα περιγραφούν αναλυτικά αμέσως παρακάτω.



Σχήμα 8.2.1 Κύκλωμα μη-αναστρέφοντος ενισχυτή
 A_{OL} = Απολαβή τάσης ανοικτών βρόχου (Open loop)

8.2.1 Μη αναστρέφων ενισχυτής

Το κύκλωμα ενός μη-αναστρέφοντος ενισχυτή παρουσιάζεται στο σχ. 8.2.1 Βασικό χαρακτηριστικό αυτού του κυκλώματος είναι η εφαρμογή του προς ενίσχυση σήματος στη μη-αναστρέφουσα είσοδο και η ανατροφοδότηση ποσοστού του σήματος εξόδου στην αναστρέφουσα είσοδο. Η ανατροφοδότηση είναι αρνητική διότι το ανατροφοδοτούμενο σήμα αφαιρείται από τη σήμα εισόδου. Ο όρος μη-αναστρέφων ενισχυτής

(non inverting amplifier) προκύπτει από το ότι η διαφορά φάσης μεταξύ σήματος εξόδου και σήματος εισόδου είναι 0° , άρα η κυματομορφή εισόδου δεν αναστρέφεται στην έξοδο. Επίσης, η εφαρμοζόμενη ανατροφοδότηση ονομάζεται μη-αναστρέφουσα (non inverting feedback) κατ' αυτή την ανατροφοδότηση η διαφορά φάσης μεταξύ σήματος εξόδου και σήματος εισόδου είναι $0A$.

Όπως είδαμε στα προηγούμενα, η απολαβή τάσης ανοικτού βρόχου, δηλ. χωρίς ανατροφοδότηση, ενός τελεστικού ενισχυτή είναι πολύ μεγάλη (τυπικά, $A_{OL} \approx (100\ 000)$). Για τον προσδιορισμό της **απολαβής τάσης** του μη-αναστρέφοντος ενισχυτή, η οποία είναι ίση με τη λεγόμενη **απολαβή κλειστού βρόχου** A_{CL} του τελεστικού, μπορούμε να ακολουθήσουμε τη μεθοδολογία που συνηθίζεται στους ενισχυτές με ανατροφοδότηση εργαζόμενοι ως εξής: Αφού η τάση της μιας εισόδου u_1 είναι ίση με το σήμα εισόδου (V_i) και η τάση της άλλης εισόδου u_2 είναι ίση με την τάση ανατροφοδότησης, η τάση μεταξύ των δύο εισόδων του τελεστικού ενισχυτή είναι η $u_e = u_1 - u_2$. Η τάση αυτή ονομάζεται **τάση ή σήμα σφάλματος** (error voltage ή signal). Η τάση εξόδου u_o είναι ανάλογη αυτής.

Άρα στη μη-αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή (σχ. 8.2.1) η τάση θα είναι

$$u_1 = u_i \quad 8.2.1$$

ενώ, βάσει του διαιρέτη τάσης (R_1, R_2), στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή η τάση θα είναι:

$$u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_o \quad 8.2.2$$

Από τις Εξ (8.2.1) και (8.2.2) προκύπτει ότι η απολαβή τάσης του αναστρέφοντος ενισχυτή θα είναι:

$$A_V = A_{CL} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad 8.2.3$$

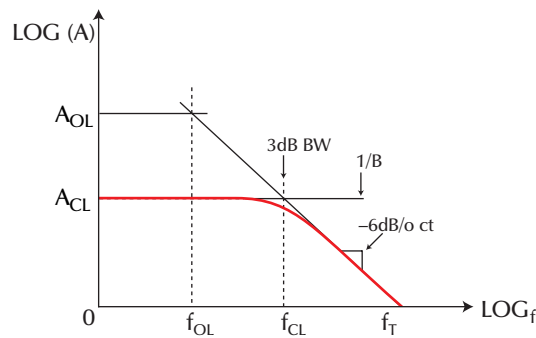
- A_{CL} = Απολαβή τάσης κλειστού βρόχου (Closed Loop)

Ένα σημαντικό συμπέρασμα που εξάγεται από την εξ. 8.2.3 είναι ότι στο μη-αναστρέφοντα ενισχυτή η απολαβή τάσης αυτού, A_V , είναι **μεγαλύτερη ή** το πολύ **ίση της μονάδας**. Η A_V θα προσεγγίζει τη μονάδα μόνο αν η R_2 είναι πολύ μεγαλύτερη από την R_1 και θα γίνει ίση προς τη μονά-

δα αν η R_2 απομακρυνθεί ή αποσυνδεθεί από το κύκλωμα ($R_2 = \infty$ ή η R_1 βραχυκυκλωθεί ($R_1=0$)). Όταν η απολαβή τάσης είναι ίση με τη μονάδα το κύκλωμα ονομάζεται **ακολουθητής τάσης** (voltage follower), διότι η τάση εξόδου παρακολουθεί συνεχώς σε τιμή την τάση εισόδου.

Τέλος σημειώνουμε ότι ο μη-αναστρέφων ενισχυτής έχει όλες τις ιδιότητες που οφείλονται στη μη-αναστρέφουσα ανατροφοδότηση. Αυτό σημαίνει:

- Μείωση της απολαβής (από A_{OL} σε A_{CL})
- Αύξηση της σύνθετης αντίστασης εισόδου
- Ελάττωση της σύνθετης αντίστασης εξόδου
- Αύξηση του εύρους ζώνης



Σχήμα 8.2.2 Απόκριση κατά συχνότητα και εύρος ζώνης τελεστικού ενισχυτή για την απολαβή ανοικτού βρόχου (A_{OL}) και κλειστού βρόχου (A_{CL})

Η αυξημένη τιμή του εύρους ζώνης συχνοτήτων ενός αναστρέφοντος ενισχυτή οφείλεται στην επίδραση της ανατροφοδότησης στο εύρος ζώνης του τελεστικού ενισχυτή, όπως φαίνεται στο σχ. 8.2.2. Σημειώστε ότι η απολαβή τάσης ανοικτού βρόχου ενός τελεστικού ενισχυτή παραμένει σταθερή έως μια συχνότητα f_{OL} , στη συνέχεια δε αρχίζει να ελαττώνεται με ρυθμό περίπου 6dB/oct. Αυτό σημαίνει ότι **η απολαβή υποδιπλασιάζεται για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας**. Η f_{OL} ονομάζεται συχνότητα κατωφλίου ή αποκοπής (cutoff frequency) και εκφράζει περίπου το εύρος ζώνης της απολαβής ανοικτού βρόχου του TE. Σ' αυτήν τη συχνότητα η απολαβή έχει ελαττωθεί στο 0.707 (-3dB) της αρχικής τιμής της. Η συχνότητα για την οποία η απολαβή γίνεται ίση με τη μονάδα συμβολίζεται με f_T . Όταν εφαρμόζεται ανατροφοδότηση η απολαβή κλει-

στού βρόχου ελαττώνεται ενώ αυξάνεται η αντίστοιχη συχνότητα αποκοπής, f_{CL} , ήτοι το εύρος ζώνης της απολαβής. Σε κάθε περίπτωση το γινόμενο της απολαβής \times την συχνότητα αποκοπής είναι ίσο με f_T , δηλ.

$$A_{OL} \cdot f_{OL} = A_{CL} \cdot f_{CL} = f_T \quad 8.2.4$$

Αυτό αποτελεί κανόνα εκτίμησης της επίδρασης της επιλογής κάποιας απολαβής στο εύρος ζώνης του κυκλώματος.

Παράδειγμα 8.2.1

Στον κύκλωμα του σχ 8.2.1 η τάση εισόδου είναι 10 mV, ενώ $R_1=9$ ΚΩ και $R_2=1$ ΚΩ. Να υπολογιστεί η απολαβή τάσης κλειστού βρόχου και η τάση εξόδου του κυκλώματος.

Λύση

Από την Εξ.8.2.3 έχουμε

$$A_V = A_{CL} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{9\text{ΚΩ} + 1\text{ΚΩ}}{1\text{ΚΩ}} = \frac{10\text{ΚΩ}}{1\text{ΚΩ}} = 10$$

Άρα η τάση εξόδου θα είναι

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

Παράδειγμα 8.2.2

Σε ένα μη-αναστρέφοντα ενισχυτή με ΤΕ (σχ. 8.2.1) εφαρμόζεται στην είσοδο του σήμα 10 mV. Αν στην έξοδο του το σήμα πρέπει να είναι 1V, και $R_2=1\text{ΚΩ}$ να υπολογιστεί η R_1 .

Λύση

Από την Εξ.8.2.3 έχουμε

$$A_{CL} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1\text{V}}{0,01\text{V}} = 100$$

Άρα

$$A_{CL} = 1 + \frac{R_1}{R_2} = 100$$

και συνεπώς

$$R_1 = 99 \times R_2 = 99 \text{ K}\Omega$$

Παράδειγμα 8.2.3

Ένας τελεστικός ενισχυτής (π.χ. 741) έχει απολαβή τάσης ανοικτού βρόχου 100000 και συχνότητα $f_T = 1,5 \text{ MHz}$. Αν μέσω ανατροφοδότησης (σε κύκλωμα μη-αναστρέφοντα ενισχυτή) ελαττωθεί η απολαβή και γίνει 100, να υπολογιστούν η συχνότητα αποκοπής της απολαβής ανοικτού βρόχου και η συχνότητα αποκοπής της απολαβής κλειστού βρόχου.

Λύση

Είναι γνωστό ότι

$$A_{OL} \cdot f_{OL} = A_{CL} \cdot f_{CL} = f_T$$

Άρα:

$$f_{CT} = \frac{f_T}{A_{OL}} = \frac{1,5 \times 10^6 \text{ Hz}}{10^5} = 15 \text{ Hz}$$

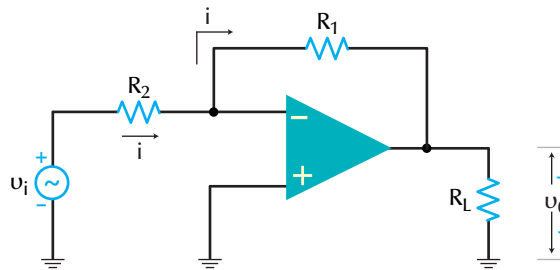
και

$$f_{CL} = \frac{f_T}{A_{CL}} = \frac{1,5 \times 10^6 \text{ Hz}}{10^2} = 15000 \text{ Hz} = 15 \text{ KHz}$$

8.2.2 Αναστρέφων ενισχυτής

Το κύκλωμα ενός αναστρέφοντος ενισχυτή παρουσιάζεται στο σχ.8.2.3. Βασικό χαρακτηριστικό αυτού του κυκλώματος είναι η εφαρμογή του σήματος στη αναστρέφουσα είσοδο μέσω μιας αντίστασης R_2 (αντίσταση εισαγωγής). Η ανατροφοδότηση από το σήμα εξόδου μεταφέρεται και αυτή στην αναστρέφουσα είσοδο μέσω μιας άλλης αντίστασης R_1 (αντίσταση ανατροφοδότησης). Η ανατροφοδότηση και σ' αυτήν την περίπτωση είναι αρνητική.

Ο όρος *αναστρέφων ενισχυτής* (inverting amplifier) προκύπτει από το ότι η διαφορά φάσης μεταξύ σήματος εξόδου και σήματος εισόδου είναι 180° μοίρες. Στο κύκλωμα ασκείται αναστρέφουσα ανατροφοδότηση (-inverting feedback). Ο όρος αυτός προκύπτει από το ότι κατ' αυτή την ανατροφοδότηση η διαφορά φάσης μεταξύ σήματος εξόδου και σήματος ανατροφοδότησης εισόδου είναι 180° μοίρες.



Σχήμα 8.2.3 Κύκλωμα αναστρέφοντος ενισχυτή

Η απολαβή τάσης στον αναστρέφοντα ενισχυτή (απολαβή κλειστού βρόχου) υπολογίζεται πολύ εύκολα με βάση την παρατήρηση ότι με την (αρνητική) ανατροφοδότηση ο τελεστικός ενισχυτής προσπαθεί να μηδενίζει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο εισόδων του. Άρα επειδή η μη-αναστρέφουσα είσοδος είναι γειωμένη, θα πρέπει και η αναστρέφουσα είσοδος να συμπεριφέρεται σαν να βρίσκεται στο δυναμικό της γης.

Ο υπολογισμός της απολαβής γίνεται ως εξής: Αν εφαρμοστεί μια τάση εισόδου, u_i , μεταξύ του ελεύθερου άκρου της R_2 και της γης, θα διέλθει από την R_2 ένα ρεύμα i . Το ρεύμα θα δίδεται από τη σχέση

$$i = \frac{u_i - 0}{R_2} = \frac{u_i}{R_2} \quad 8.2.5$$

Επειδή η αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή είναι πολύ μεγάλη (θεωρητικά άπειρη), ο πρώτος κανόνας του Kirchhoff επιβάλλει ότι το ρεύμα το οποίο θα διέλθει από την R_1 θα είναι ίσο με αυτό το οποίο διέρχεται από την R_2 . Συνεπώς η τάση εξόδου V_0 θα πρέπει να έχει τέτοια τιμή ώστε να ικανοποιεί την εξίσωση

$$i = \frac{0 - u_0}{R_1} = \frac{u_0}{R_1} \quad 8.2.6$$

Αφού το ρεύμα i στις Εξ. 8.2.5 και εξ. 8.2.6 είναι το ίδιο, τα δεύτερα μέλη θα είναι ίσα, οπότε προκύπτει ότι η απολαβή κλειστού βρόχου του αναστρέφοντος ενισχυτή θα δίδεται από την έκφραση

$$A_{CL} = \frac{v_0}{v_i} = - \frac{R_1}{R_2} \quad 8.2.7$$

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει διαφορά φάσης 180° μεταξύ τάσης εισόδου και τάσης εξόδου.

Προσεκτική παρατήρηση της Εξ. 8.2.7 μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο αναστρέφων ενισχυτής έχει απολαβή τάσης η οποία, κατ' απόλυτη τιμή μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερη της μονάδας ή και μικρότερη της μονάδας. Με άλλα λόγια, ο αναστρέφων ενισχυτής μπορεί να ενισχύει το σήμα ή να εξασθενίζει το σήμα, ανάλογα με την επιλογή των αντιστάσεων R_1 και R_2 . Τέλος, η απολαβή τάσης μπορεί να γίνει μηδενική αν έχουμε $R_1=0\Omega$.

Αυτή η συμπεριφορά είναι αρκετά διαφορετική από εκείνη του μη-αναστρέφοντος ενισχυτή, στον οποίο η απολαβή τάσης είναι μεγαλύτερη ή ίση της μονάδας, δηλαδή ο ενισχυτής δεν μπορεί να εξασθενίσει το σήμα.

Τέλος σημειώνουμε ότι ο αναστρέφων ενισχυτής έχει όλες τις ιδιότητες που οφείλονται στην αναστρέφουσα ανατροφοδότηση. Αυτό σημαίνει:

- Σύνθετη αντίσταση εισόδου ίση με την R_2 .
- Ελάττωση της σύνθετης αντίστασης εξόδου.
- Αύξηση του εύρους ζώνης.

Παράδειγμα 8.2.4

Στο ενισχυτικό κύκλωμα του σχ 8.2.3 η τάση εισόδου είναι 10mV, ενώ έχουμε $R_1=10\text{ K}\Omega$ και $R_2=1\text{ K}\Omega$. Να υπολογιστεί η απολαβή (κλειστού βρόχου) του ενισχυτή και η τάση εξόδου.

Λύση

Από την εξ.8.2.7 έχουμε

$$A_{CL} = \frac{R_1}{R_2} = - \frac{10\text{K}\Omega}{1\text{K}\Omega} = -10$$

Άρα η τάση εξόδου θα είναι

$$u_0 = A_{CL} \cdot u_i = 10 \times 10 \text{ mV} = 100 \text{ mV}$$

με αλλαγή φάσης 180° .

Παράδειγμα 8.2.5

Σε έναν αναστρέφοντα ενισχυτή με Τ.Ε. (σχ.8.2.3) εφαρμόζεται στην είσοδο του σήμα 20 mV . Αν στην έξοδο του το σήμα είναι 1 V και $R_2 = 1 \text{ K}\Omega$, να υπολογιστεί η R_1 .

Λύση

Από την Εξ. 8.2.7 έχουμε

$$A_{CL} = \frac{u_0}{u_i} = \frac{1\text{V}}{0.02\text{V}} = 50$$

με αλλαγή φάσης 180° . Επίσης έχουμε

$$A_{CL} = \frac{R_1}{R_2} = 50$$

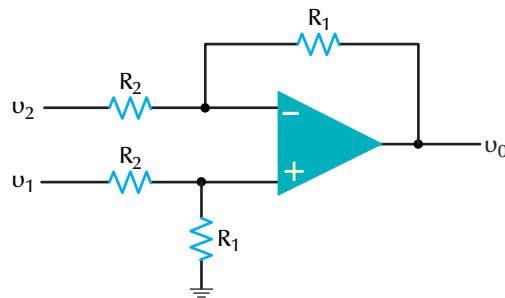
Συνεπώς

$$R_1 = 50 \times R_2 = 50 \text{ K}\Omega$$

8.2.3 Άλλα κυκλώματα με τελεστικούς ενισχυτές

Στις προηγούμενες παραγράφους αναλύθηκαν τα κυκλώματα τελεστικού ενισχυτή που λειτουργεί ως αναστρέφων ή ως μη-αναστρέφων ενισχυτής. Κοινό στοιχείο αυτών των δύο κυκλωμάτων ήταν η χρησιμοποίηση μόνο της μιας εισόδου για την εφαρμογή του σήματος. Πέραν αυτών των δύο βασικών κυκλωμάτων υπάρχουν και πολλά άλλα τα οποία εκτελούν μαθηματικές πράξεις (operations) και δικαιολογούν την ονομασία αυτής της βασικής μονάδας των αναλογικών ηλεκτρονικών, κ.α. Όπως προαναφέρθηκε αλλού, ο τελεστικός ενισχυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση μαθηματικών πράξεων, όπως άθροιση, αφαίρεση, ολοκλήρωση, διαφόριση, κ.α. Στο παρόν κεφάλαιο θα σταθούμε σε δύο μόνο από αυτές τις πράξεις και θα εξετάσουμε τα αντίστοιχα κυκλώματα. Η πρώτη περίπτωση που θα εξεταστεί είναι εκείνη

στην οποία ο τελεστικός ενισχυτής εκτελεί αφαίρεση. Η δεύτερη είναι εκείνη στην οποία ο τελεστικός ενισχυτής εκτελεί πρόσθεση. Τα σχετικά κυκλώματα ονομάζονται αφαιρέτης και αθροιστής, αντίστοιχα, έχουν δε ως εξής:



Σχήμα 8.2.4 Κύκλωμα αφαιρέτη ενισχυτή

A. Το κύκλωμα του **αφαιρέτη ενισχυτή** (difference amplifier) παρουσιάζεται στο σχ. 8.2.4.

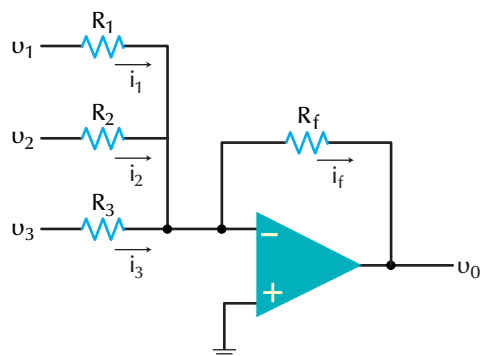
Όπως φαίνεται από το σχήμα, το κύκλωμα αυτό προκύπτει από το συνδυασμό ενός αναστρέφοντος ενισχυτή (άνω τμήμα του κυκλώματος) και ενός μη-αναστρέφοντος ενισχυτή (κάτω τμήμα του κυκλώματος). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν δύο εισοδοί στις οποίες εφαρμόζονται αντίστοιχα σήματα u_1 και u_2 . Η τάση εξόδου στο κύκλωμα του αφαιρέτη ενισχυτή δίνεται από την εξίσωση:

$$u = A_{CL} \cdot (u_1 - u_2) \quad 8.2.8$$

όπου η απολαβή κλειστού βρόχου δίδεται από την εξίσωση

$$A_{CL} = \frac{R_1}{R_2} \quad 8.2.9$$

Σε έναν αφαιρέτη ενισχυτή οι δύο αντιστάσεις στις εισόδους (R_2) πρέπει να είναι ίδιες καθώς και οι άλλες δύο (R_1), για να αποφεύγονται τα προβλήματα τα οποία προκύπτουν με την τάση αντιστάθμισης και το ρεύμα εισόδου. Η απολαβή τάσης δεν επηρεάζεται αν χρησιμοποιούνται διαφορετικές αντιστάσεις σε κάθε είσοδο αρκεί όμως ο λόγος R_1/R_2 να είναι ο ίδιος.



Σχήμα 8.2.5 Κύκλωμα αθροιστή ενισχυτή τριών εισόδων

Ο αφαιρέτης ενισχυτής κατ' αρχήν λειτουργεί όπως ένας **διαφορικός ενισχυτής**, δηλαδή η τάση εξόδου είναι ανάλογη της διαφοράς των τάσεων που εφαρμόζονται στις εισόδους του. Παρόμοια είναι και η εσωτερική λειτουργία του τελεστικού ενισχυτή Εξ. 8.1.2, ο οποίος έχει ενσωματωμένο στην είσοδό του έναν διαφορικό ενισχυτή. Παρ' όλα αυτά ο ενισχυτής του σχ.8.2.4 δεν ονομάζεται **διαφορικός ενισχυτής** (differential amplifier) αλλά **αφαιρέτης ενισχυτής** (difference amplifier). Η διαφοροποίηση αυτή προκύπτει από το ίδιο το κύκλωμα, στο οποίο γίνεται χρήση ανατροφοδότησης και διαιρέτη τάσης στις εισόδους, και από το ότι η αντίσταση των εισόδων καθορίζεται από τις χρησιμοποιούμενες αντιστάσεις. Ένα άλλο κύκλωμα, ο λεγόμενος **συντελεστικός ή οργανολογικός ενισχυτής** (instrumentation amplifier) χρησιμοποιείται ως κοινός διαφορικός ενισχυτής. Σ' αυτόν η ανατροφοδότηση συντελείται εσωτερικά και η αντίσταση των εισόδων του προσεγγίζει αυτή των ιδανικών τελεστικών ενισχυτών.

Β. Το κύκλωμα του **αθροιστή ενισχυτή** (summing amplifier) παρουσιάζεται στο σχ. 8.2.5. Ο αθροιστής ενισχυτής του σχήματος αυτού έχει τρεις εισόδους και η λειτουργία του βασίζεται στον αναστρέφοντα ενισχυτή. Αθροιστές ενισχυτές μπορούν να κατασκευαστούν και με μη-αναστρέφοντες ενισχυτές. Ο αριθμός των εισόδων και στις δύο περιπτώσεις είναι απεριόριστος.

Στο συγκεκριμένο κύκλωμα εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι η αναστρέφουσα είσοδος συμπεριφέρεται σαν να έχει το δυναμικό της μη-αναστρέφουσας, δηλαδή μηδέν. Έτσι, από τον πρώτο κανόνα του Kirchhoff

προκύπτει ότι το άθροισμα των ρευμάτων των εισόδων πρέπει να είναι ίσο με το ρεύμα του βρόχου ανατροφοδότησης ($i_1 + i_2 + i_3 + \dots = i_f$). Εφαρμόζοντας αυτά υπολογίζεται η τάση εξόδου, η οποία δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$u_0 = - \left(\frac{R_f}{R_1} \cdot u_1 + \frac{R_f}{R_2} \cdot u_2 + \frac{R_f}{R_3} \cdot u_3 \right) \quad 8.2.10$$

Επειδή οι λόγοι των αντιστάσεων της παραπάνω σχέσης καθορίζουν τις αντίστοιχες απολαβές τάσης στην αναστρέφουσα ανατροφοδότηση, συμπεραίνουμε ότι στο κύκλωμα του σχ. 8.2.5 είναι δυνατή η επιλογή ξεχωριστής απολαβής τάσης για κάθε είσοδο χωριστά. Έτσι η εξ. 8.2.10 μπορεί να γραφεί πιο παραστατικά ως εξής:

$$u_0 = - (A_{u1} \cdot u_1 + A_{u2} \cdot u_2 + A_{u3} \cdot u_3) \quad 8.2.11$$

Το αρνητικό πρόσημο απλά δηλώνει αναστροφή φάσης κατά 180° (αναστροφή πολικότητας) στο τελικό αποτέλεσμα της άθροισης.

Παράδειγμα 8.2.6

Σε έναν αφαιρέτη ενισχύτη (σχ. 8.2.4) οι αντιστάσεις του κυκλώματος είναι $R_1 = 100 \text{ K}\Omega$. Αν στη μη-αναστρέφουσα είσοδο εφαρμόζεται τάση $u_1 = 25 \text{ mV}$ και στην αναστρέφουσα τάση $u_2 = 10 \text{ mV}$ να υπολογίσετε την τάση στην έξοδο.

Λύση

Βάσει της Εξ. 8.2.9, η ζητούμενη απολαβή τάσης του αφαιρέτη ενισχυτή θα είναι

$$A_{CL} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{100 \text{ K}\Omega}{10 \text{ K}\Omega} = 10$$

Άρα, κατά την Εξ. 8.2.8, η τάση εξόδου θα είναι

$$u_0 = A_{CL} \cdot (u_1 - u_2) = 10 \times (25 \text{ mV} - 10 \text{ mV}) = 10 \times 15 \text{ mV} = 150 \text{ mV}$$

Παράδειγμα 8.2.7

Σε έναν αθροιστή ενισχυτή (σχ. 8.2.5.) οι αντιστάσεις του κυκλώματος είναι $R_1=100\text{ K}\Omega$, $R_2=56\text{ K}\Omega$, $R_3=22\text{ K}\Omega$ και $R_f=220\text{ K}\Omega$. Αν στις εισόδους του εφαρμόζονται τάσεις $u_1=25\text{ mV}$, $u_2=-15\text{ mV}$ και $u_3=10\text{ mV}$ αντίστοιχα, να υπολογίσετε την τάση εξόδου.

Λύση

Η τάση εξόδου ενός αθροιστή με αναστρέφουσα ανατροφοδότηση δίδεται από την εξ. 8.2.10. Άρα η τάση εξόδου θα είναι

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

ή

$$V_0 = -\left(\frac{220\text{K}\Omega}{100\text{K}\Omega} \times 25\text{ mV} + \frac{220\text{K}\Omega}{56\text{K}\Omega} \times (-15\text{ mV}) + \frac{220\text{K}\Omega}{22\text{K}\Omega} \times 10\text{ mV}\right)$$

ή

$$u_0 = -(2,2 \times 25\text{ mV} + 3,93 \times (-15\text{ mV}) + 10 \times 10\text{ mV}) = \\ = -(55\text{ mV} - 58,95\text{ mV} + 100\text{ mV})$$

άρα τελικά:

$$V_0 = 96,05\text{ mV}$$

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 8.2

- Υπάρχουν **δύο** βασικά **είδη** αρνητικής **αναστρέφουσας** ανατροφοδότησης, τα οποία χρησιμοποιούνται στους τελεστικούς ενισχυτές: Η **μη-αναστρέφουσα** ανατροφοδότηση και η **αναστρέφουσα** ανατροφοδότηση.
- Οι αντίστοιχοι ενισχυτές παίρνουν το όνομά τους από το είδος της ανατροφοδότησης, δηλαδή έχουμε τους **μη-αναστρέφοντες ενισχυτές** και τους **αναστρέφοντες ενισχυτές**.
- Η **αρνητική ανατροφοδότηση μειώνει την απολαβή τάσης** αλλά αυξάνει την αντίσταση εισόδου και το εύρος ζώνης του ενισχυτή.
- Η **αρνητική ανατροφοδότηση μειώνει την αντίσταση εξόδου** του τελεστικού ενισχυτή.
- Σε έναν τελεστικό ενισχυτή (με ή χωρίς ανατροφοδότηση) το γινόμενο **απολαβή x εύρος ζώνης** αποτελεί βασική παράμετρο του (f_T) και επι-

τρέπεται να προσδιορίζουμε το εύρος ζώνης για κάθε τιμή της απολαβής κλειστού βρόχου.

- Στον **μη-αναστρέφοντα** ενισχυτή το σήμα εξόδου είναι **συμφασικό** με το σήμα εισόδου.
- Στον **μη-αναστρέφοντα** ενισχυτή η **αντίσταση εισόδου** του ενισχυτή είναι **ίση με την αντίσταση** εισόδου του τελεστικού ενισχυτή.
- Στον **αναστρέφοντα ενισχυτή** το σήμα εξόδου έχει **διαφορά φάσης** 180° με το σήμα εισόδου.
- Στον **αναστρέφοντα ενισχυτή** η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή είναι ίση με την αντίσταση εισαγωγής (αντίσταση η οποία παρεμβάλλεται στην είσοδο (-) του τελεστικού ενισχυτή), άρα συνήθως είναι μικρή σε σύγκριση με την αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ 8.2

- 8.2.1. Τι είναι ο μη-αναστρέφων ενισχυτής και ποιά είναι τα χαρακτηριστικά του
- 8.2.2. Τι είναι ο αναστρέφων ενισχυτής και ποιά είναι τα χαρακτηριστικά του
- 8.2.3. Τι είναι το γινόμενο απολαβής τάσης επί το εύρος ζώνης και σε τι χρησιμεύει.
- 8.2.4. Τι είναι ο αφαιρέτης ενισχυτής και ποιά είναι τα κύρια χαρακτηριστικά του.
- 8.2.5. Τι είναι ο αθροιστής ενισχυτής και ποιά είναι τα κύρια χαρακτηριστικά του.
- 8.2.6. Πόσοι τύποι αρνητικής ανατροφοδότησης χρησιμοποιούνται στους τελεστικούς ενισχυτές:
α. ένας
β. δύο
γ. τρεις
δ. τέσσερις
- 8.2.7. Με τη μη-αναστρέφουσα ανατροφοδότηση, η ελάττωση της απολαβής τάσης προκαλεί μια αύξηση στην:
α. τάση εξόδου
β. τάση σφάλματος
γ. τάση ανατροφοδότησης
δ. τάση εισόδου
- 8.2.8. Ένας αθροιστής είναι ένα κύκλωμα στο οποίο:
α. η τάση εξόδου είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων των εισόδων
β. η τάση εξόδου είναι ίση με τη διαφορά των τάσεων των εισόδων
γ. είναι δυνατόν κάθε είσοδος να έχει διαφορετική απολαβή τάσης
δ. η τάση εξόδου είναι πάντα θετική

- 8.2.9. Ένας αφαιρέτης είναι ένα κύ κλωμα στο οποίο:
- η τάση εξόδου είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων των εισόδων
 - η τάση εξόδου είναι ίση με τη διαφορά των τάσεων των εισόδων
 - είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τυχαίοι συνδυασμοί αντιστάσεων στο κύ κλωμα του
 - η τάση εξόδου είναι πάντα αρνητική
- 8.2.10. Ο μη-αναστρέφων ενισχυτής του σχ. 8.2.1 έχει $R_1=19,8 \text{ K}\Omega$, $R_2=200 \text{ }\Omega$ και $R_L=10 \text{ K}\Omega$. Αν η απολαβή τάσης ανοικτού βρόχου του Τ.Ε. είναι 40.000 να υπολογίσετε την απολαβή τάσης κλειστού βρόχου.
- 8.3.11. Στον ενισχυτή της προηγούμενης άσκησης να υπολογίσετε το ρεύμα το οποίο διαρρέει την αντίσταση φόρτου αν εφαρμοστεί στην είσοδο του ενισχυτή μια τάση 1mV.
- 8.3.12. Ο αναστρέφων ενισχυτής του σχ. 8.2.3 έχει $R_1=49,8 \text{ K}\Omega$ και $R_2=200 \text{ }\Omega$. Αν η απολαβή τάσης ανοικτού βρόχου είναι 20000 να υπολογίσετε την απολαβή τάσης κλειστού βρόχου.
- 8.3.13. Ο μη-αναστρέφων ενισχυτής του σχ. 8.2.1 έχει $R_1=9,8 \text{ K}\Omega$ και $R_2=200 \text{ }\Omega$. Αν η απολαβή τάσης κλειστού βρόχου είναι 8000 να υπολογίσετε την απολαβή τάσης ανοικτού βρόχου.
- 8.3.14. Δίδεται πηγή τάσης 10mV και θέλουμε να κατασκευάσουμε ενισχυτή ο οποίος θα δίνει στην έξοδο του τάση -200 mV. Να προσδιορίσετε το είδος του ενισχυτή και την απολαβή τάσης κλειστού βρόχου.
- 8.3.15. Ένας τελεστικός ενισχυτής έχει γινόμενο απολαβής τάσης επί εύρος ζώνης 10^6 Hz . Αν η απολαβή τάσης κλειστού βρόχου είναι 125 να υπολογίσετε το εύρος ζώνης του ενισχυτή.
- 8.3.16. Ο αναστρέφων ενισχυτής του σχ. 8.2.3 έχει $R_1=12 \text{ K}\Omega$ και $R_2=120 \text{ K}\Omega$. Αν στην είσοδό του εφαρμοστεί τάση 100 mV να υπολογίσετε την τάση εξόδου.
- 8.3.17. Σε έναν αθροιστή ενισχυτή (σχ. 8.2.5) οι αντιστάσεις του κυκλώματος είναι $R_1=80 \text{ K}\Omega$, $R_2=64 \text{ K}\Omega$, $R_3=20 \text{ K}\Omega$ και $R_f=400 \text{ K}\Omega$. Αν στις εισόδους του εφαρμόζονται τάσεις $V_1=15 \text{ mV}$, $V_2=-25 \text{ mV}$ και $V_3=8 \text{ mV}$ αντίστοιχα, να υπολογίσετε την τάση εξόδου.
- 8.3.18. Σε έναν αθροιστή ενισχυτή (σχ. 8.2.5) οι αντιστάσεις του κυκλώματος είναι $R_1=40 \text{ K}\Omega$, $R_2=64 \text{ K}\Omega$, $R_3=80 \text{ K}\Omega$ και $R_f=400 \text{ K}\Omega$. Αν στις εισόδους του εφαρμόζονται τάσεις $V_1=15 \text{ mV}$ και $V_3=8 \text{ mV}$,

να υπολογίσετε την τάση, V_2 ώστε η τάση εξόδου να μη-δενιστεί.

8.3.19. Σε έναν αφαιρέτη ενισχυτή (σχ. 8.2.4) οι αντιστάσεις του κυκλώματος είναι $R_1=150\text{ K}\Omega$ και $R_2=12\text{ K}\Omega$. Αν στη μη αναστρέφουσα είσοδο εφαρμόζεται τάση $V_1=40\text{ mV}$ και στην αναστρέφουσα τάση $V_2=22\text{ mV}$ να υπολογίσετε την τάση στην έξοδο.

8.3.20. Σε έναν αφαιρέτη ενισχυτή (σχ. 8.2.4) οι αντιστάσεις του κυκλώματος είναι $R_1=100\text{ K}\Omega$ και R_2 . Αν στη μη-αναστρέφουσα είσοδο εφαρμόζεται τάση $V_1=15\text{ mV}$ και στην αναστρέφουσα τάση $V_2=12\text{ mV}$ να υπολογίσετε την R_2 ώστε η τάση στην έξοδο να είναι 0.3 mV .

Ιστορική αναδρομή:

Τα πρώτα βήματα τα οποία οδήγησαν στη σύλληψη της ιδέας του τελεστικού ενισχυτή ανάγονται στο 1928, όταν ο H. S. Black προσπάθησε να κατοχυρώσει με πατέντα «Έναν ενισχυτή με αρνητική ανατροφοδότηση» και η ιδέα του θεωρήθηκε ως μια άλλη ανέφικτη τρέλα της εποχής του.

Ο όρος τελεστικός ενισχυτής δόθηκε από τον J. R. Ragazzini και τους συνεργάτες του σε μια κατηγορία ενισχυτών το 1947. Στην εργασία που δημοσίευσαν περιέγραφαν τη λειτουργία τέτοιων ενισχυτών, οι οποίοι χρησιμοποιούσαν διάφορους τύπους ανατροφοδότησης. Τη εργασία τους είχαν βασίσει σε μελέτες οι οποίες είχαν γίνει το 1943 και 1944 για το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας και Άμυνας (NDRC).

Το πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση της υλοποίησης των τελεστικών ενισχυτών έγινε στις αρχές της δεκαετίας του 1950 από την G. A. Philbrick Researches Inc, η οποία κατασκεύασε τον πρώτο εμπορικά διαθέσιμο «ολοκληρωμένο» τελεστικό ενισχυτή με τριόδους λυχνίες. Ο συγκεκριμένος τελεστικός ενισχυτής χρησιμοποιούσε δύο διπλές τριόδους λυχνίες.

Ο πρώτος τελεστικός ενισχυτής με διακριτά ημιαγωγικά στοιχεία (τρανζίστορ και διόδους) κατασκευάστηκε από την Burr-Brown Research Corporation και την G. A. Philbrick Researches Inc το 1962.

Κεφάλαιο 1^ο:

- 1 (α) ψηφιακό, (β) αναλογικό, (γ) ψηφιακό,
- 2 $T=1\mu\text{sec}$,
- 5 Αναλογικό σήμα - Ημίτονο, Ψηφιακό σήμα -bit-παλμός, Ψηφιακό κύκλωμα - Ηλεκτρονικός Υπολογιστής, Αναλογικό κύκλωμα - Κύκλωμα τάσης.

Κεφάλαιο 2^ο:

- 2.1 (β), (δ)
- 2.2 (α), (δ)
- 2.3 (δ)

Κεφάλαιο 3^ο:

- 3.1.4 $R_F = 20\text{K}$, $R_R = 10\text{M}\Omega$,
- 3.1.5 (γ)
- 3.1.8 5V,
- 3.1.9 (γ),
- 3.1.10 (γ)
- 3.1.11 $I_Q \chi 25\text{mA}$, $V_Q \chi 55\text{V}$.
- 3.4.5 $I_{z\text{max}} = 22,2\text{ mA}$ $I_{z\text{MIN}} = 9,7\text{ mA}$, $I_L = 6,8\text{mA}$,
- 3.4.6 $C_T = 33,3\text{pF}$,
- 3.4.7 (γ),
- 3.4.9 $76\text{pF} < C < 116\text{ pF}$
- 3.4.10 $I_Z = 1\text{mA}$
- 3.7.2 $V_{\text{dc}} = 18\text{V}$, $I_{\text{dc}} = 225\text{mA}$,
- 3.7.3 $V_m = 45\text{V}$,
- 3.7.4 $V_{C2} = 440\text{V}$.

Κεφάλαιο 4:

- 4.1 (α)
- 4.2 (β), (γ)
- 4.3 (β)

4.4 –

- 4.5 Ορίζεται από τα σημεία (20 V, 0 mA) και (0 V, 16.7 mA)
- 4.6 Ορίζεται από τα σημεία (20 V, 0 mA) και (0 V, 8.3 mA)
- 4.7 Ορίζεται από τα σημεία (20 V, 0 mA) και (0 V, 8.3 mA)
- 4.8 (α)
- 4.9 (δ)
- 4.10 (α)
- 4.5.1 (α), (δ)
- 4.5.2 (α), (β), (γ)
- 4.5.3 (β)
- 4.5.4 (γ)
- 4.5.5 $7,5 \times 10^9 \Omega$ ή 7,5 GΩ
- 4.5.6 $7,5 \times 10^6 \Omega$ ή 7,5 MΩ
- 4.5.7 Ελάχιστο ρεύμα τομέα απαγωγού 0 mA
Μέγιστο ρεύμα απαγωγού 20 mA
Τάση αποκοπής πύλης-πηγής -5 V
- 4.6.1 (α), (β)
- 4.6.2 (γ), (δ)
- 4.6.3 (β)
- 4.6.4 7,5 V
- 4.6.5 V_{DSSAT}
- 4.8.1 18,4 V
- 4.8.2 Όταν $\beta=25$ τότε $V_{\text{CE}}=19,6\text{ V}$ και όταν $\beta=300$ τότε $V_{\text{CE}}=15\text{ V}$
- 4.8.3 $\beta=100$, $V_{\text{BE}}=135,7\text{ V}$
- 4.8.4 $V_E=2,97\text{ V}$
- 4.8.5 $V_C=13,47\text{ V}$

- 4.8.6 Q (13,47V, 0,36 mA)
 4.8.7 Επειδή υπάρχει η R_E το σημείο λειτουργίας δεν θα μετακινηθεί.
 4.8.8 Προς τα δεξιά (υψηλότερα V_{CE}).
 4.8.9 $A_v=2,2$, $V_o=22$ mV.
 4.8.10 $A_v=251$, $V_o=2,51$ V.
 4.8.11 400 Ω
 4.8.12 0,92 mA, 3,67 mA, 8,27 mA, 14,7 mA, 23 mA, 33,1 mA αντίστοιχα.
 4.8.13 13,8 V
 4.8.14 10,1 V
 4.8.15 14 V
 4.8.16 10,4 V
 4.8.17 6,7 V
 4.8.18 20 V
 4.8.19 20 V
 4.8.20 20 V
 4.8.21 3,9 V
 4.8.22 0,1 V
 4.8.23 0,15 V

Κεφάλαιο 5°:

- 5.1 (γ)
 5.2 (γ)
 5.3 (α), (β)
 5.4 4,7 V
 5.5 15 V, 6,1 V, 0,81 V
 5.6 2,7 V
 5.7 4,9 A
 5.8 1,6 V

Κεφάλαιο 6°:

- 6.7 $I_{F1}=2$ mA, $I_{F2}=1$ mA, $I_o=3$ mA,
 6.8 $I=10$ mA
 6.9 (A)
 6.11 TPS708

Κεφάλαιο 7°:

- 7.2.10 236_8 , 123_8 , 640_8 ,
 7.2.11 $10,375_{10}$, 38_{10} ,
 7.2.12 01100100, 001010,1001₂,
 7.2.13 1011001, 0100111,
 1101110
 7.2.14 101000011, 00011001111,
 7.2.15 11, 357_{10}
 7.2.16 875, 68, 8644
 7.3.2 $A \bullet (B + C)$,
 7.3.3 $B + \bar{A}$
 7.3.4 $A \bullet B + \bar{A} \bullet \bar{B}$
 7.5.6 $F = \bar{X} \bullet Y \bullet \bar{Z} +$
 $+ X \bullet \bar{Y} \bullet Z + X \bullet Y \bullet Z$
 7.5.8 $Y = A + B + C + D + E$
 7.5.14 $F = A \bullet B \bullet C + \bar{A} \bullet \bar{C}$

Κεφάλαιο 8°:

- 8.2.1 (α)
 8.2.2 (δ)
 8.2.3 2,4 V
 8.2.4 1 μ V, 10 μ V, 100 μ V
 8.2.5 150 μ V
 8.2.1 (β)
 8.2.2 (α)
 8.2.3 (α), (γ)
 8.2.4 (β)
 8.2.5 99,8
 8.2.6 0,01 mA
 8.2.7 249
 8.2.8 49,7
 8.2.9 Αναστρέφων ενισχυτής,
 -20
 8.2.10 8000 Hz
 8.2.11 1 V
 8.2.12 -78,75 mV
 8.2.13 -30,4 mV
 8.2.14 225 mV
 8.2.15 1 M Ω

– ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ –

Βιβλία

1. Βαφειάδη Π., *Μαθήματα Ψηφιακών Υπολογιστών, Δεύτερη Έκδοση, 1982.*
2. Faissler, W.L., *An Introduction to Modern Electronics, 1991*
3. Jay F., Goetz J.A. *IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms, ANSI/ IEEE Std 100-1984*
4. Κοσσίδα Α., *Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά, Αθήνα 1978*
5. Κανελλόπουλου Χ. και άλλοι, *Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά, Ίδρυμα Ευγενιδίου, 1997*
6. Κ.Κούλα - Γ.Μουστάκα, *Ψηφιακά Ηλεκτρονικά, Τόμος Α, Εκδόσεις «ΙΩΝ», 1998*
7. Κ.Κούλα *Αναλογική Μικροηλεκτρονική, Εκδόσεις «ΙΩΝ», 1994*
8. Μπρακατσούλα Ε., *τεχνολογία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, Αθήνα 1993*
9. Millman - Halkias, *Integrated Electronics, McGraw-Hill, Kogakusha, 1972.*
10. Malvino A. P., *Βασική Ηλεκτρονική, τέταρτη έκδοση, Εκδόσεις Α.Τζιόλα Ε., Θεσσαλονίκη 1998,*
11. Malvino A.P., *Electronic Principles, 1993*
12. Nashelsky, L., *Θεωρία Αριθμητικών Υπολογιστών, 1968.*
13. Sedra /Smith, *Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα, Παπασσωτηρίου, 1994.*
14. Tokheim R.L., *Ψηφιακά Ηλεκτρονικά, Τρίτη έκδοση, Τζιόλα Ε. Θεσσαλονίκη, 1991.*
15. Τσαγάκη Ε., *Γενικά Ηλεκτρονικά, Ίδρυμα Ευγενιδίου 1995.*
16. Χατζαράκη, *Ηλεκτρολογία, Παιδαγωγικό Ινστιτούτο 1999.*
17. Ηλεκτρονικές κατασκευές Δ.Ρήγα, 1966.

Τεχνικά Φυλλάδια (Databooks)

18. General Instruments, *Databook, Power Semiconductor, 11th Edition.*
19. Harris Semiconductors, *MCT / IGBTs / Diodes.*
20. Harris Semiconductors, *CMOS Logic Ics, CD4000B Series.*
21. Hewlett Packard, *Optoelectronics Designer's Catalog.*
22. IXYS, *Data Book.*
23. Motorola Semiconductors, *The European Master Selection, 1982.*
24. National Semiconductors, *Logic Databook, Volume 1, 1984.*
25. National Semiconductors, *Semiconductor Master Selection Guide, 1987.*
26. Philips, *Discrete Semiconductors Catalog, 1989.*
27. Siemens, *Optoelectronics Data Book.*
28. Siemens, *Semiconductors SDC.*
29. SGS-Thomson, *Shortform Catalog, 1988/89, 1995.*
30. Texas Instruments, *The TTL Databook, Volume 1, 2.*
31. Toshiba, *Optoelectronic Semiconductors.*
32. Temic, *Technical Library.*
33. Εκδόσεις IDEAL KIT.

Φωτογραφικό Υλικό

- Η φωτογραφία του ψηφιακού πολυμέτρου στο σχήμα 1.5, της σελίδας 12 ανατυπώθηκε με την άδεια της εταιρείας Hewlett Packard.
- Οι φωτογραφίες των οργάνων μέτρησης που περιλαμβάνονται στο Β' Μέρος του βιβλίου ανατυπώθηκαν με την άδεια της εταιρείας Leader.
- Ορισμένα από τα σχήματα προέρχονται από πηγές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.
- Οι φωτογραφίες της σελίδας 165, 226, 227, δείχνουν τις ιδιότητες του laser φωτός, ορατού φωτός, μήκη 32 Mbit και ανατυπώθηκαν κατόπιν αδείας του Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE).