

## Βασικές αρχές τελεστικών ενισχυτών

Οι τελεστικοί ενισχυτές είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα, που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία αναλογικών σημάτων. Με τα κυκλώματα αυτά ο χρήστης μπορεί να επιτύχει όχι μόνο την αλλαγή της στάθμης ενός σήματος, αλλά την ταυτόχρονη εκτέλεση πολλών επεξεργασιών ακόμα και σε περισσότερα από δύο σήματα, ανάλογα με την εφαρμογή.

Πίνακας 1. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του LM 324.

<b>Ενίσχυση DC</b>	<b>100dB</b>
Unity gain bandwidth	1 MHz
Περιοχή τάσης τροφοδοσίας	3 - 30V (single) +/- 1.5 ~ +/- 15 (dual)
Ρεύμα τροφοδοσίας	0.8 mA
Ρεύμα πόλωσης εισόδων	45nA DC
Ρεύμα απόκλισης εισόδων	5nA
Τάση απόκλισης εισόδων	2mV DC
Περιοχή τάσεων εξόδου	Τροφοδοσία - 1.5 (3V)
Διάφορα	Εσωτερική αντιστάθμ. συχνότητας θερμοκρασιακή αντιστάθμιση

### Γενικά

Ο ενισχυτής είναι μια διάταξη με ηλεκτρονικά εξαρτήματα, που επιτρέπει τη μεταβολή της στάθμης του σήματος εισόδου. Εξετάζοντας τη διάφορα φάσης του σήματος εξόδου σε σχέση με το σήμα εισόδου, μπορεί κανείς να χωρίσει τους ενισχυτές σε δύο κατηγορίες: Αυτούς που το σήμα εξόδου είναι με διαφορά φάσης 180 μοιρών ως προς το σήμα εισόδου (*ανεστραμμένο, αναστρέφοντες ή αναστροφικοί ενισχυτές*) και αυτούς που το σήμα εξόδου έχει διαφορά φάσης 0 μοιρών σε σχέση με το σήμα εισόδου (*συμφασικό, μη αναστρέφοντες*).

*ή μη αναστροφικοί ή συμφασικοί ενισχυτές*). Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, όπως η αφαίρεση δύο σημάτων μεταξύ τους, που είναι επιθυμητός ο συνδυασμός ενός αναστρέφοντος και ενός μη αναστρέφοντος ενισχυτή. Για αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται οι τελεστικοί ενισχυτές (*operational amplifiers, op-amps*). Η ονομασία προκύπτει από το ότι η λειτουργία τους είναι πρακτικά η τέλεση κάποιας (*αναλογικής*) πράξης, όπως πρόσθεση, αφαίρεση, πολ/μός, ολοκλήρωση κλπ. στα σήματα εισόδου. Παλιότερα σχεδιάζονταν με διακριτά εξαρτήματα. Σήμερα βέβαια υ-

πάρχει μια τεράστια ποικιλία σε ολοκληρωμένα κυκλώματα που ικανοποιούν κάθε απαίτηση.

### Ο τελεστικός ενισχυτής

Στο Σχ. 1 δίνεται το βασικό σύμβολο του τελεστικού ενισχυτή. Παρατηρούμε ότι διαθέτει δύο εισόδους, την αναστρέφουσα (-) και την μη αναστρέφουσα (+) και μία έξοδο. Εδώ θα πρέπει να διευκρινίσουμε κάποιες διαφορές σε σχέση με έναν ενισχυτή πολλών εισόδων:

- Το δικτύωμα εισόδων του τελεστικού ενισχυτή, αμέσως δημιουργεί τη διαφορά (αφαίρεση) των δύο σημάτων, πριν αυτά υποστούν οποιαδήποτε ενίσχυση. Το κύκλωμα ενίσχυσης που ακολουθεί δεν βλέπει λοιπόν δύο σήματα, αλλά κατευθείαν τη διαφορά τους. Αν βέβαια η μία είσοδος είναι σταθερά στα 0V, τότε μπορούμε να πούμε ότι ο τελεστικός ενισχύει το σήμα της άλλης εισόδου.
- Για λόγους πρακτικής, αν και οι δύο εισόδους θεωρούνται ως μία διαφορική είσοδος, η έξοδος στις περισσότερες περιπτώσεις δίνεται σε ένα σημείο (και όχι επίσης διαφορικά). Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο υπάρχει εσωτερικά στον ενισχυτή κατάλληλο κύκλωμα μετατροπής διαφορικού σήματος σε **single ended**. Πάντως, πολλά ολοκληρωμένα διαθέτουν διαφορική έξοδο για ειδικές περιπτώσεις.
- Τα κυκλώματα εισόδου εμφανίζουν μια ιδιομορφία. Ενώ έχουν θεωρητικά άπειρη αντί-

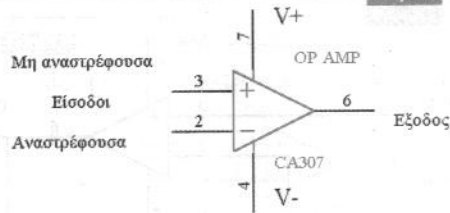
σταση (πρακτικά της τάξης των αρκετών MΩ) εμφανίζονται σαν "**Βραχυκυκλώματα προς common**". Αυτή η ιδιομορφία δεν επιτρέπει τη μέτρηση της στάθμης των σημάτων εισόδου πάνω στους ακροδέκτες.

Στο Σχ. 2 δίνεται το πραγματικό κύκλωμα ενός από τους τέσσερις ίδιους τελεστικούς ενισχυτές του **LM324**. Σύμφωνα με τα όσα αναφέραμε, παρατηρήστε αριστερά επάνω το τμήμα εισόδου, αριστερά κάτω το τμήμα μετατροπής διαφορικού σήματος σε **single ended** και δεξιά το τμήμα ενίσχυσης (προενίσχυση και τελικός ενισχυτής). Ο πυκνωτής από την έξοδο της προενίσχυσης στην είσοδο της προορίζεται για βελτίωση της σταθερότητας λειτουργίας. Σε πολλά ολοκληρωμένα μπορεί αυτός ο πυκνωτής να συνδέεται εξωτερικά, με τιμή ανάλογη της σχεδιαζόμενης εφαρμογής.

Οι διάφοροι τύποι τελεστικών ενισχυτών που κυκλοφορούν, μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες. Μερικά από τα κριτήρια κατηγοριοποίησης είναι τα ακόλουθα:

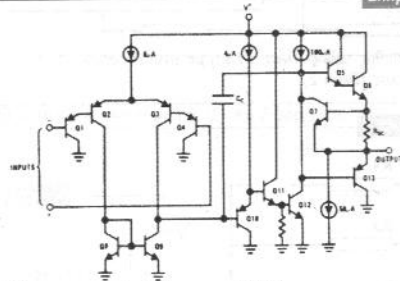
- **Τάση τροφοδοσίας.** Υπάρχουν ενισχυτές που απαιτούν διπλή τάση τροφοδοσίας (π.χ. +/- 15V) και άλλοι που μπορούν να λειτουργήσουν ή μόνο με μονή ή με μονή/διπλή. Η διπλή τάση λειτουργίας επιτρέπει τη λειτουργία με θετικές και αρνητικές στάθμες εισόδου και την παροχή εξόδου ακριβώς 0V. Σε περίπτωση ενισχυτή με μονή τροφοδοσία (πλεονέκτημα

Σχήμα 1



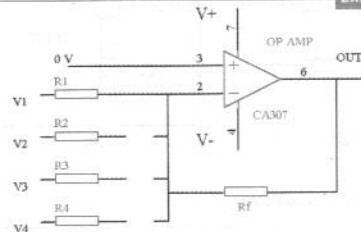
1 Το βασικό σύμβολο του τελεστικού ενισχυτή.

Σχήμα 2



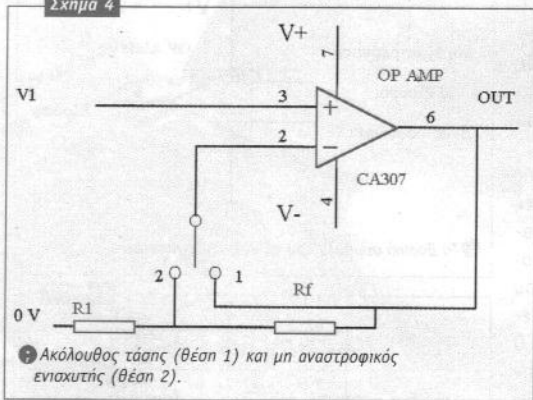
2 Το πραγματικό κύκλωμα του LM324.

Σχήμα 3

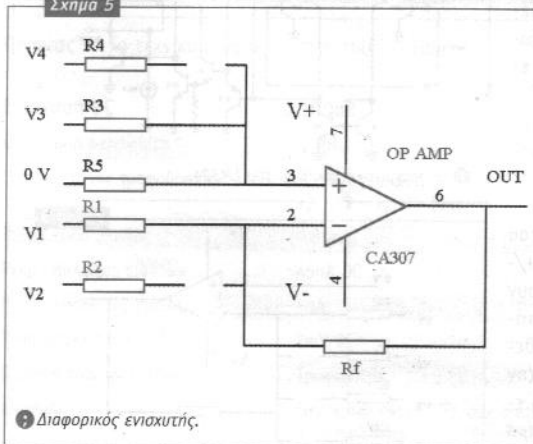


3 Αναστροφικός ενισχυτής και αθροιστής.

Σχήμα 4



Σχήμα 5



στην κατασκευή τροφοδοτικού), η λειτουργία κοντά στο 0 θέλει προσοχή.

- Ρεύμα λειτουργίας.** Αν και το ρεύμα που καταναλώνουν οι τελεστικοί ενισχυτές είναι γενικά μικρό, υπάρχουν τελεστικοί με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση, ειδικά σχεδιασμένοι για τροφοδοσία από μπαταρίες. Από την άλλη πλευρά, το μεγαλύτερο ρεύμα κατανάλωσης επιτρέπει στον ενισχυτή γρηγορότερη ανταπόκριση.
- Ρεύμα εξόδου.** Οι περισσότεροι τελεστικοί έχουν δυνατότητα για ρεύμα εξόδου **10 – 20 mA**. Υπάρχουν βέβαια και τύποι με δυνατότητα μεγαλύτερου ρεύματος, αν και για πάνω από **100mA** θα λέγαμε ότι πρόκειται για εξαιρετικά εξειδικευμένες περιπτώσεις. Πάντως, η αύξηση της δυνατότητας είναι κάτι άπλο (βλ. Εφαρμογές).
- Συχνότητα λειτουργίας.** Υπάρχουν ειδικοί τελεστικοί για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως για σήματα video, υψίσουχνα κλπ.
- Είσοδοι.** Εδώ οι διαφορές εστιάζονται κύρια στην ευαισθησία, δηλαδή στο με πόσο μικρό ρεύμα μπορεί να οδηγηθεί ο ενισχυτής. Πάντως, η μεγάλη ευαισθησία δημιουργεί πολλές φορές προβλήματα από απειροελάχιστες διαρροές (στην πλακέτα) μεταξύ των ακροδεκτών, για αυτό και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, τόσο στο σχεδιασμό όσο και στην κατασκευή.

Ο ευρύτερα γνωστός τελεστικός ενισχυτής είναι χωρίς αμφισβήτηση ο **741**, σε βαθμό μάλιστα που για πολλούς να θεωρείται ως μέτρο σύγκρισης. Με την πάροδο των χρόνων πολλοί κατασκευαστές σχεδίασαν - παρουσίασαν ίδιους με τον **741** ως προς τα χαρακτηριστικά ενισχυτές όπως ο **AD 741** (Analog Devices), **MC1741** (Motorola), **SG1741** (Signetics) κλπ. Ο **741** εμφανίστηκε επίσης και σε άλλες μορφές, όπως στο **LM 747** (τετραπλό 741). Σήμερα βέβαια για νέους επαγγελματικούς σχεδιασμούς ο **741** μπορεί να θεωρηθεί ξεπερασμένος, αν και ποτέ δε θα πάψει να υπάρχει στο συρτάρι κάθε ερασιτέχνη ή ασχολούμενου με τα ηλεκτρονικά. Άλλοι ενισχυτές που έχουν γίνει γνωστοί είναι οι **080, 082, 084, 101, 307, 324, 358, 503, 515, 748, 777, 2702, 2902, 4136** κλπ. Η ποικιλία πάντως σήμερα είναι τεράστια και θα πρέπει να κυκλοφορούν περισσότεροι από **1000** τύποι. Από την εμφάνισή τους οι τελεστικοί ενισχυτές προορίζονταν για διπολικά σήματα, δηλαδή για σήματα με θετική και αρνητική τιμή. Για να υπάρχει λοιπόν σωστή λειτουργία απαιτείτο ο σχεδιασμός με χρήση διπλής τροφοδοσίας η οποία μάλιστα επεκράτησε να είναι **+/- 15V**. Πάνω σε αυτό στηρίχτηκε και κάποια ορολογία, (η οποία πιθανότατα προκαλεί σύγχυση αν χρησιμοποιεί σε ενισχυτή

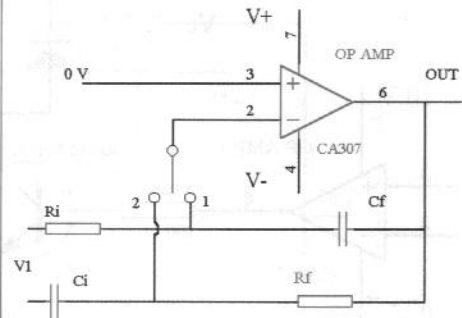
με μονή τροφοδοσία). Για παράδειγμα, όταν λέμε εξισορροπημένος ενισχυτής εννοούμε τον ενισχυτή που οι εισόδους του έχουν τέτοια σήματα ώστε η έξοδος να είναι **0V**. Αυτό όμως, όπως αντιλαμβάνεστε, έχει τελείως διαφορετική έννοια αν ο ενισχυτής έχει διπλή τροφοδότηση (το **0** αντιστοιχεί στο μέσον της (+) και (-) τάσης) ή μονή (το **0** αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή). Όταν στη συνέχεια του άρθρου αναφερόμαστε σε εξισορροπημένο ενισχυτή ή σε μηδενική έξοδο αναφερόμαστε πάντα για διπλή τροφοδοσία.

Ας δούμε τώρα ποια είναι τα μεγέθη τα οποία έχουν σχέση με τους τελεστικούς ενισχυτές και τι εκφράζει το καθένα:

- Ως ρεύμα πόλωσης εισόδου ορίζεται το μισό του αθροίσματος των διακεκριμένων ρευμάτων, που εισέρχονται στις εισόδους, όταν ο ενισχυτής είναι εξισορροπημένος, (δηλαδή όταν η έξοδος του είναι **0V** σε διπλή τροφοδοσία).
- Ρεύμα απόκλισης εισόδου είναι η διαφορά των διακεκριμένων ρευμάτων στις εισόδους ενός εξισορροπημένου τελεστικού ενισχυτή. Αν, δηλαδή, ενώ έχουμε **100 nA** στην (-) είσοδο απαιτούνται **105 nA** στη (+) είσοδο (αντί **100**) για να μηδενιστεί η έξοδος, τότε έχουμε ρεύμα απόκλισης **5nA**.
- Ολίσθηση ρεύματος απόκλισης εισόδου είναι ο λόγος της μεταβολής του ρεύματος απόκλισης εισόδου προς τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

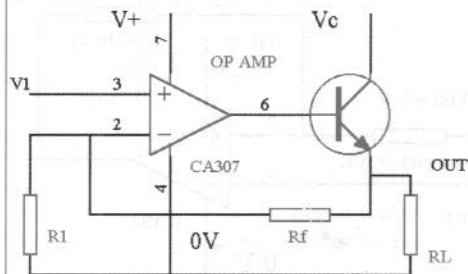
- Τάση απόκλισης εισόδου είναι η διαφορική τάση που πρέπει να εφαρμοστεί στις εισόδους ώστε να μηδενιστεί η έξοδος.
- Ολίσθηση τάσης απόκλισης εισόδου είναι ο λόγος της μεταβολής της τάσης απόκλισης εισόδου προς τη μεταβολή της θερμοκρασίας.
- Τάση απόκλισης εξόδου είναι η τάση εξόδου όταν οι εισόδους του ενισχυτή είναι γειωμένες (οπότε ο ενισχυτής έπρεπε να έχει έξοδο **0V**).
- Περιοχή τάσης εξόδου είναι η περιοχή τιμών που μπορεί να δώσει η έξοδος του ενισχυτή. Συνήθως τα όρια είναι κατά **1~1.5 V** μικρότερα από τις τιμές της τάσης τροφοδοσίας, αν και πολλά σύγχρονα μοντέλα μπορούν να φτάσουν εξαιρετικά κοντά στις τάσεις τροφοδοσίας.
- Λόγος απόρριψης τροφοδοτικής διάταξης **PSRR** είναι ο λόγος μεταβολής της τάσης απόκλισης εισόδου προς την αντίστοιχη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας.
- Ρυθμός ανταπόκρισης **slew rate** είναι ο χρονικός ρυθμός μεταβολής της τάσης εξόδου του ενισχυτή (σε διάταξη κλειστού βρόχου), κάτω από συνθήκες μεγάλου σήματος. Μετριέται σε **V/μsec**.
- Αν συνδεθεί το ίδιο (κοινό) σήμα και στις δύο εισόδους ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή, είναι προφανές ότι η έξοδος θα είναι **0V**. Πρακτικά όμως, λόγω μικροδιαφορών στα κυκλώματα των δύο εισόδων, αυτό δε συμβαίνει. Ως

Σχήμα 6



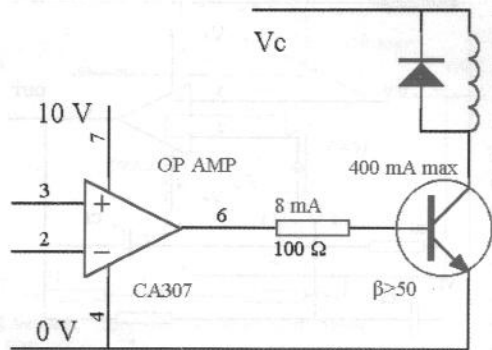
• Αναλογικός ολοκληρωτής (1) και διαφοριστής (2).

Σχήμα 7



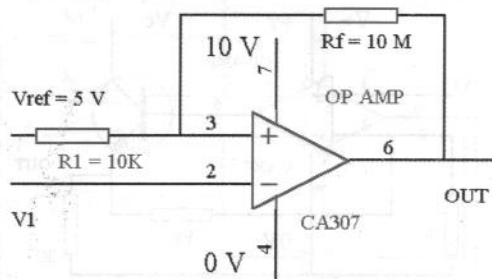
• Ενισχυτής ισχύος με εξωτερικό τρανζίστορ.

Σχήμα 8



➊ Οδήγηση ρελέ από τελεστικό ενισχυτή.

Σχήμα 9



➋ Τελεστικός ενισχυτής σε ρόλο συγκριτή τάσεων.

λόγος απόρριψης κοινού σήματος ορίζεται ο λόγος της απολαβής του ενισχυτή σε διαφορετικό σήμα προς την απολαβή σε κοινό σήμα. Μετριέται σε **dB** και μια τυπική τιμή είναι τα **100dB**.

- Εύρος ζώνης (*συχνοτήτων*) μοναδιαίας ενίσχυσης (*unity gain bandwidth*) ονομάζεται η μέγιστη συχνότητα στην οποία ο ενισχυτής μπορεί να δώσει ενίσχυση **1**. Πολλές φορές αντί για αυτό το μέγεθος δίνεται το γινόμενο ενίσχυσης \* **bandwidth**. Πρακτικά είναι το ίδιο και λαμβάνονται υπό όψη στο σχεδιασμό για τον υπολογισμό της μέγιστης δυνατής ενίσχυσης στη συχνότητα λειτουργίας. Για παράδειγμα, αν ένας ενισχυτής έχει **unity gain bandwidth 1MHz**, τότε στα **100KHz** δεν μπορεί να δώσει ενίσχυση μεγαλύτερη από 10.
- Κέρδος ανοικτού βρόχου ονομάζεται η ενίσχυση που μπορεί να δώσει ο ενισχυτής, όταν δεν υπάρχει ανάδραση. Σε ένα ιδανικό ενισχυτή το κέρδος ανοικτού βρόχου είναι άπειρο, ενώ σε ένα πραγματικό έχει μια τιμή της τάξης του **100000**.

### Βασικά κυκλώματα

Πριν αναπτύξουμε τα διάφορα κυκλώματα, ας πούμε δύο λόγια για το τι περιμένουμε από τη λειτουργία ενός τελεστικού ενισχυτή. Αν εφαρμόσουμε ένα σήμα στη μία είσοδο

(και *γειώσουμε την άλλη*), τότε το σήμα αυτό θα εμφανιστεί στην έξοδο ενισχυμένο κατά ένα λόγο (*κέρδος ή ενίσχυση ή απολαβή*) που ορίζεται από δύο αντιστάσεις.

Ανάλογα με την είσοδο στην οποία θα εφαρμοστεί το σήμα, η έξοδος θα είναι ανεστραμμένη ή συμφασική.

Αν εφαρμοστούν σήματα και στις δύο εισόδους, τότε ο ενισχυτής θα ενισχύσει τη διαφορά των δύο σημάτων.

Αν σε μία ή και στις δύο εισόδους εφαρμοστούν περισσότερα από ένα σήματα, το "**Βάρος**" κάθε σήματος θα είναι αντίστροφα ανάλογο της τιμής της αντίστασης με την οποία εισάγεται το σήμα στον ενισχυτή.

Ας δούμε τώρα τα πράγματα πιο αναλυτικά.

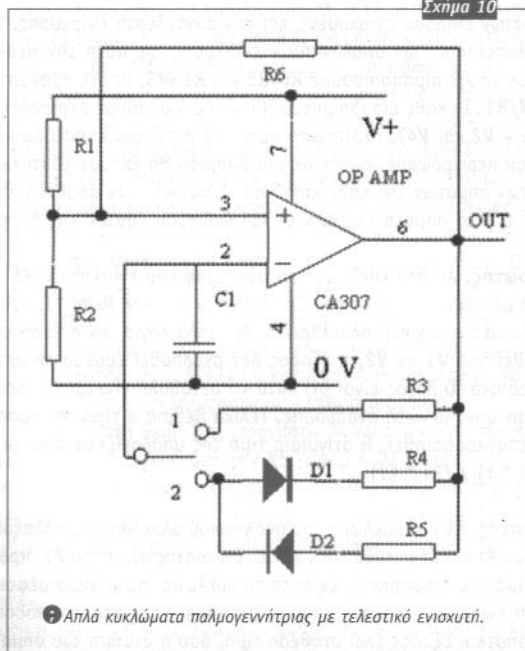
**Αναστροφικός ενισχυτής:** Στο Σχ. 3 δίνεται το τυπικό κύκλωμα ενός αναστροφικού ενισχυτή. Το σήμα εισόδου **V1** εισάγεται στην αναστρέφουσα είσοδο μέσα από την αντίσταση **R1**. Από την έξοδο υπάρχει μία ανάδραση στην αναστρέφουσα είσοδο με τη **Rf**. Η μη αναστρέφουσα είσοδος "**γειώνεται**" (*αναφορά σήματος εισόδου ως προς γη*). Η ενίσχυση σε αυτή τη διάταξη είναι  $Rf/R1$ , η τάση εξόδου  $V_o = V1 * Rf / R1$  και φυσικά η έξοδος είναι ανεστραμμένη, δηλαδή στη μέγιστη τιμή της εισόδου, η έξοδος έχει την ελάχιστη. Με σύνδεση περισσότερων σημάτων στην αναστρέφουσα είσοδο, μέσα από

αντίστοιχες αντιστάσεις ( $R_2, R_3$  κλπ), προκύπτει ο αναστροφικός αθροιστής. Σε αυτή την περίπτωση η ενίσχυση μπορεί να είναι διαφορετική για κάθε σήμα, ανάλογα με το λόγο  $R_f$  προς αντίστοιχη  $R_{in}$ . Η έξοδος θα είναι το άθροισμα των τάσεων εισόδου επί την αντίστοιχη ενίσχυση δηλαδή  $V_o = (V_1 * R_f/R_1) + (V_2 * R_f/R_2) + \dots$ . Στην ειδική περίπτωση που  $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R$  τότε  $V_o = R_f/R * (V_1 + V_2 + \dots)$ . Παρατηρήστε ότι η ενίσχυση δίνεται από το λόγο  $R_f/R_1$ , πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να είναι και μικρότερη από 1 (όταν η  $R_f$  είναι μικρότερη από την  $R_1$ ), δηλαδή ο ενισχυτής να κάνει εξασθένηση και όχι ενίσχυση.

### Ακόλουθος τάσης

Είναι πολλές οι εφαρμογές που απαιτούν την χρησιμοποίηση μιας βαθμίδας απομόνωσης (*buffer*) μεταξύ της πηγής του σήματος και της εφαρμογής μας, ώστε η εφαρμογή να μη "φορτώνει" την πηγή. Για τέτοια απομόνωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας τελεστικός ενισχυτής σε συνδεσμολογία "ακόλουθου τάσης". Όπως βλέπετε και στο Σχ. 4 (θεωρήστε το διακόπτη στη θέση 1), το σήμα εφαρμόζεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο και η ανάδραση είναι μηδενική (η έξοδος συνδέεται στην αναστρέφουσα είσοδο). Ο ενισχυτής έχει ενίσχυση 1 και η έξοδος του είναι συμφασική με την είσοδο, οπότε μπορούμε άφοβα να επεξεργαστούμε το σήμα χωρίς να φορτώνεται η πηγή του.

**Μη αναστροφικός ενισχυτής.** Στο Σχ. 4, θεωρήστε τώρα τον διακόπτη στη θέση 2. Το σήμα εισόδου εξακολουθεί να συνδέεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο, από την έξοδο όμως υπάρχει μία ανάδραση προς την αναστρέφουσα είσοδο, η οποία παρέχεται από το διαιρέτη τάσης  $R_f, R_1$ . Η ενίσχυση αυτού του κυκλώματος δίνεται από τη σχέση  $(R_f + R_1)/R_1$ . Παρατηρήστε ότι η ενίσχυση είναι πάντα μεγαλύτερη από 1 (αφού υποχρεωτικά  $R_f + R_1 > R_1$ ), πράγμα που σημαίνει ότι σε αυτό το κύκλωμα δεν μπορούμε να έχουμε εξασθένηση (όπως στον αναστροφικό ενισχυτή). Η ελάχιστη ενίσχυση



ση προκύπτει όταν η  $R_f$  πάρει τιμή 0, οπότε η ενίσχυση γίνεται 1. Αυτή όμως η περίπτωση δεν είναι τίποτα άλλο από το κύκλωμα ακόλουθου τάσης.

**Διαφορικός ενισχυτής.** Αν συνδέσουμε δύο σήματα  $V_1$  και  $V_3$ , ένα σε κάθε είσοδο του τελεστικού ενισχυτή, όπως στο Σχ. 5, έχουμε ένα διαφορικό ενισχυτή. Στην έξοδό του θα εμφανίζεται ένα σήμα από τη διαφορά των

δύο σημάτων εισόδου ενισχυμένο επί τον συντελεστή ενίσχυσης. Για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών ενίσχυσης, σε αυτή την περίπτωση προτιμάμε να χρησιμοποιήσουμε  $R_f=R_5$  και  $R_1=R_3$ , οπότε προκύπτει ενίσχυση  $R_f/R_1$ . Σε κάθε είσοδο μπορούμε να εφαρμόσουμε περισσότερα σήματα (Σχ.4  $V_2$  και  $V_4$ ), περίπτωση όμοια με αυτή του αναστροφικού ενισχυτή που περιγράψαμε, οπότε σε μία βαθμίδα θα έχουμε ταυτόχρονα άθροιση των σημάτων της κάθε εισόδου), διαφορά (των σημάτων της μιας εισόδου από τα σήματα της άλλης) και ενίσχυση (αυτής της διαφοράς).

**Ολοκληρωτής.** Αν στο κύκλωμα του αναστροφικού ενισχυτή η  $R_f$  αντικατασταθεί με πυκνωτή, όπως στο Σχ. 6 (διακόπτης στη θέση 1), προκύπτει ένα κύκλωμα αναλογικού ολοκληρωτή. Με απλά λόγια, αν η τάση εισόδου μεταβληθεί από  $V_1$  σε  $V_2$ , η έξοδος δεν ακολουθεί έμμεσα τη μεταβολή αλλά σταδιακά. Ο λόγος είναι ότι κατά τη μεταβολή γίνεται και φόρτιση - εκφόρτιση του πυκνωτή ανάδρασης. Τελικά βέβαια η τιμή της τάσης εξόδου θα σταθεροποιηθεί. Η στιγμιαία τιμή της υπολογίζεται από τη σχέση  $V_o = (V_i * t) / (R_i * C_f)$ .

**Διαφοριστής.** Αν στο κύκλωμα του αναλογικού ολοκληρωτή, αλλάξουμε τις θέσεις των  $R_i$  και  $C_f$  μεταξύ τους (Σχ.6, διακόπτης στη θέση 2), προκύπτει το κύκλωμα του διαφοριστή. Σε αυτό το κύκλωμα, στην αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή, περνάνε μόνο οι μεταβολές της τάσης εισόδου λόγω του  $C_i$ , οπότε η έξοδος έχει σταθερή τιμή, όσο η στάθμη του σήματος εισόδου είναι σταθερή, μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της μεταβολής και επανέρχεται στη σταθερή της τιμή. Αν δηλαδή στην είσοδο εφαρμοστεί τετραγωνικός παλμός, στην έξοδο θα έχουμε αιχμές, που θα αντιστοιχούν στα μέτωπα του τετραγωνικού παλμού. Στη **HI** και **LOW** στάθμη του παλμού η έξοδος θα έχει την ίδια τιμή.

Υπάρχουν πολλά κυκλώματα ακόμα που μπορούν να θεωρηθούν βασικά, όπως φίλτρα, προσθήκες για βελτίωση της ευστάθειας κλπ, η ανάλυσή τους

όμως απαιτεί χρήση χαρακτηριστικών καμπυλών, κάτι που ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτού του άρθρου.

## Πρακτικές εφαρμογές

Στη συνέχεια θα δούμε μερικές πρακτικές εφαρμογές των τελεστικών ενισχυτών, που χρησιμοποιούν τα παραπάνω βασικά κυκλώματα.

**Ενισχυτής ισχύος.** Για να αυξήσουμε τη δυνατότητα σε ρεύμα εξόδου του τελεστικού ενισχυτή, χρησιμοποιούμε το βασικό κύκλωμα που απαιτεί η εφαρμογή μας (π.χ. μη αναστροφικός ενισχυτής) και στην έξοδο συνδέουμε ένα τρανζίστορ, όπως στο Σχ. 7. Την αντίσταση ανάδρασης τη συνδέουμε στην τελική έξοδο (τρανζίστορ). Με τη σύνδεση αυτή ισορροπούμε τις εισόδους κατ' ευθείαν από το φορτίο ενώ με το τρανζίστορ αποφεύγουμε την καταπόνηση του ενισχυτή.

**Οδήγηση ρελέ ή ενδεικτικής λυχνίας.** Η οδήγηση ρελέ γίνεται πάντα με εξωτερικό τρανζίστορ όπως στο Σχ. 8. Χρησιμοποιείται τρανζίστορ για δύο λόγους: Πρώτον για να απομονώσουμε τον ενισχυτή από τα επαγωγικά ρεύματα του ρελέ και δεύτερον για να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ότι ρελέ θέλουμε, ανεξάρτητα από την τάση τροφοδοσίας του ενισχυτή και τη δυνατότητά του σε ρεύμα. Το τι σήμα και σε ποια είσοδο θα εφαρμοστεί εξαρτάται από το ίδιο το σήμα (υψηλή ή χαμηλή στάθμη) και από το σε ποια από τις δύο ακραίες στάθμες του θέλουμε την ενεργοποίηση του ρελέ ή της ενδεικτικής λυχνίας.

Συγκριτής τάσης. Η ιδιότητα του τελεστικού ενισχυτή να έχει δύο εισόδους, μας επιτρέπει να έχουμε στην έξοδό του την πληροφορία για το ποια από τις τάσεις στις εισόδους είναι μεγαλύτερη ή (αν η μία τάση θεωρείται ως αναφορά) για το αν η άλλη τάση είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη. Αυτό γίνεται με το κύκλωμα του Σχ. 9. Συνδέοντας στη μη αναστρέφουσα είσοδο την

τάση αναφοράς και στην αναστρέφουσα είσοδο την τάση-δείγμα, έχουμε το ακόλουθο αποτέλεσμα. Όταν η τάση δείγμα είναι μικρότερη από την τάση αναφοράς τότε η έξοδος του ενισχυτή έχει μεγάλη τιμή (σχεδόν  $V+$  όπως είπαμε στα γενικά χαρακτηριστικά). Αντίθετα όταν η τάση - δείγμα είναι μεγαλύτερη, τότε στην έξοδο έχουμε την ελάχιστη τιμή. Η αντίσταση "**ανάδρασης**" σε αυτή την περίπτωση έχει σκοπό να αλλοιώνει ελαφρά (κατά λίγα  $mV$ ) την τιμή της τάσης αναφοράς (υστέρηση), έτσι ώστε στην περίπτωση που οι δυο τάσεις είναι σχεδόν ίδιες, το κύκλωμα να μπορεί να προσανατολιστεί στη σωστή κατάσταση και να μην ταλαντεύεται. Για τις συγκεκριμένες τιμές του Σχ. 9, έστω ότι η τάση στην είσοδο είναι  $0V$ . Αφού η  $V_{ref}$  είναι μεγαλύτερη, η έξοδος θα γίνει περίπου  $V+$  (το κύκλωμα θα συμπεριφερθεί ως διαφορικός ενισχυτής με πολύ μεγάλη ενίσχυση). Η μεγάλη στάθμη της εξόδου θα αλλοιώσει την τάση που "**βλέπει**" η μη αναστρέφουσα είσοδος κατά  $5mV$  (εξαρτάται από τις τιμές των αντιστάσεων), φαινομενικά δηλαδή θα είναι  $5.005V$ . Αυτή η κατάσταση θα διατηρείται όσο η τάση εισόδου παραμένει κάτω από τα  $5.005V$ . Μόλις η τάση εισόδου γίνει  $5.005V$ , τότε η έξοδος γίνεται περίπου  $0V$ . Αυτό με τη σειρά του προκαλεί την αντίστοιχη φαινομενική πώση της  $V_{ref}$  κατά περίπου  $5mV$ , την κάνει δηλαδή  $4.995V$ , δημιουργώντας έτσι ένα περιθώριο ασφαλείας  $10mV$  ανάμεσα στις δυο τάσεις εισόδου, ικανό να διατηρήσει τη σταθερότητα. Για να αλλάξει λοιπόν και πάλι η κατάσταση θα πρέπει η τάση εισόδου να πέσει κάτω από  $4.995V$ , οπότε η έξοδος θα γίνει  $V+$  και η τάση που θα βλέπει η (+) είσοδος  $5.005V$ .

**Γεννήτρια τετραγωνικών παλμών.** Στο κύκλωμα του Σχ. 10 ο τελεστικός ενισχυτής χρησιμοποιείται ως γεννήτρια παραγωγής τετραγωνικού παλμού σε δύο παραλλαγές. Το κύκλωμα μοιάζει στη λειτουργία με αυτό του συγκριτή τάσης, για αυτό και η κατανόησή του δεν θα είναι δύσκολη.

Έστω κατ' αρχήν ότι ο διακόπτης είναι στη θέση 1, η  $V+=10V$  και η  $V-=0V$ . Τη στιγμή που τροφοδοτείται το κύκλωμα, ο πυκνωτής είναι ξεφόρτι-

στος, οπότε η τάση στην (-) είσοδο είναι  $0$ . Η τάση στην (+) είσοδο προκύπτει από το διαιρέτη τάσης  $R1$  και  $R2$ , έχει λοιπόν κάποια τιμή  $>0V$  (Αν  $R1=R2$  η τάση είναι  $5V$ ). Η έξοδος επομένως (σύμφωνα με τα όσα είπαμε για τον συγκριτή), έχει μεγάλη στάθμη. Αυτό προκαλεί μια πρόσθετη αύξηση της τάσης στην (+) είσοδο λόγω της  $R6$  που είναι στη μεγάλη στάθμη της εξόδου (Αν  $R6=R1=R2$  η τιμή από  $5V$  θα είναι  $6.66V$ ). Η έξοδος όμως μέσα από την αντίσταση  $R3$  φορτίζει σταδιακά τον πυκνωτή και η τάση στην (-) είσοδο αρχίζει να ανεβαίνει (ο ρυθμός φόρτισης εξαρτάται από τις τιμές του πυκνωτή  $C1$  και της αντίστασης  $R3$ ). Όταν η τάση του πυκνωτή φτάσει την  $V_{ref}$  (π.χ.  $6.66V$ ) τότε η έξοδος πέφτει στο  $0$  και η  $R6$  μειώνει την τάση στη (+) είσοδο (για  $R6=R1=R2$  η νέα τιμή είναι  $3.33V$ ). Έτσι η νέα κατάσταση διατηρείται σταθερή. Ο πυκνωτής τώρα αρχίζει να εκφορτίζεται μέσα από την  $R3$ . Όταν η τάση του πέσει στη στάθμη της τάσης της (+) εισόδου (π.χ.  $3.33V$ ) η κατάσταση αντιστρέφεται και πάλι για να αρχίσει ένας νέος κύκλος φόρτισης - εκφόρτισης κοκ.

Με τον διακόπτη στη θέση 2 τα πράγματα γίνονται πιο ενδιαφέροντα. Τώρα η φόρτιση γίνεται μέσα από την  $R5$  (αφού η  $D1$  "**κόβει**" το δρόμο από την  $R4$ ), η εκφόρτιση όμως γίνεται από την  $R4$ , λόγω και πάλι της ύπαρξης των διόδων. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να έχουμε διαφορετικούς χρόνους φόρτισης - εκφόρτισης, δηλαδή διαφορετικό **duty cycle**.

## Επίλογος

Πιστεύουμε ότι με την ανάλυση, τα βασικά κυκλώματα και τις εφαρμογές που αναπτύχθηκαν, έγινε απόλυτα κατανοητός τόσο ο τρόπος λειτουργίας όσο και η χρησιμότητα και ποικιλία εφαρμογών των τελεστικών ενισχυτών. Ως τελική παρότρυνση αξίζει να σημειωθεί ότι οι τελεστικοί ενισχυτές "**α-ντέχουν**", όσο δεν ξεπερνά κανείς τα όρια τάσης τροφοδοσίας και ρεύματος εξόδου, οπότε προσφέρονται για κάθε είδους πειραματισμούς. **12**