

Έξοδος τάσης ή ρεύματος;

Πως επιλέγεται ένας τελεστικός ενισχυτής

Σε πολλές εφαρμογές οι κλασικοί τελεστικοί ενισχυτές υστερούν κατά κάποιον τρόπο σε σχέση με άλλες όχι τόσο συνηθισμένες συγγενικές τους διατάξεις

Από τους Von Thomas Ussmüller και Ulrich Tietze

Υπάρχουν άλλες τρεις συνδεσμολογίες τελεστικών ενισχυτών πέρα από την κλασική, η οποία ως γνωστό παρουσιάζει υψηλή αντίσταση εισόδου και χαμηλή αντίσταση εξόδου. Στο άρθρο αυτό ο Ulrich Tietze (συγγραφέας ομάδας γνωστού βιβλίου σχετικά με την σχεδίαση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων) και ο Thomas Ussmüller ανακαλύπτουν τι μπορούν να προσφέρουν αυτές οι επιπλέον συνδεσμολογίες σε ότι αφορά το εύρος ζώνης με την βοήθεια μερικών βασικών κυκλωματικών διατάξεων.

Ποια θα ήταν άραγε η εικόνα της σύγχρονης ηλεκτρονικής χωρίς τους τελεστικούς ενισχυτές; Σχεδόν κάθε ηλεκτρονική συσκευή που περιλαμβάνει αναλογικά κυκλώματα, αυτά με την σειρά τους περιέχουν έναν ή περισσότερους τελεστικούς. Ακούγεται ίσως απίστευτο αλλά είναι αλήθεια ότι οι πρώτοι τελεστικοί ενισχυτές κατασκευάζονταν με κλασικές λυχνίες: Όπως συμβαίνει σε πολλά πράγματα, η ανάπτυξη κάποιων πρωτοποριακών συστημάτων κατευθύνονταν σε πολύ μεγάλο βαθμό από στρατιωτικές προδιαγραφές, για παράδειγμα σε εφαρμογές συστημάτων ελέγ-

χου σκόπευσης κατά την διάρκεια ενός πολέμου. Το πρώτο μοντέλο εμφανίστηκε στην ευρεία αγορά το 1952. Ένα μοντέλο τέτοιου ενισχυτή με λυχνίες, που σχεδιάστηκε από την Ερευνητική εταιρία George A. Philbrick, τοποθετήθηκε σε μια οκταπολική θήκη (βλ. φωτογραφία).

Σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα μετά την παραπάνω χρονολογία εμφανίστηκαν στην παραγωγή οι πρώτοι τελεστικοί ενισχυτές κατασκευασμένοι από διακριτά τρανζίστορ. Ο πρώτος τελεστικός ενισχυτής σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος ήταν ο μΑ702, προϊόν σχεδίασης της εταιρίας

Φωτογραφία: Χορηγία της Analog Devices

Fairchild από τον Robert Widlar. Το συγκεκριμένο εξάρτημα κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 1962. Έξι χρόνια αργότερα έκανε την εμφάνισή του ο τελεστικός μΑ741, ο οποίος επεκράτησε στην αγορά από τότε και έπειτα. Αυτές οι πολύ σημαντικές διατάξεις παράγονται σήμερα σε ποσότητες εκατομμυρίων και χρησιμοποιούνται σε μια πολύ ευρεία γκάμα εφαρμογών από ενισχυτές ήχου και video έως διατάξεις ενεργών φίλτρων και κυκλώματα μορφοποίησης σημάτων από αισθητήρες.

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι τελεστικών ενισχυτών. Μια τέτοια διάταξη μπο-



ρεί να παρουσιάζει υψηλή ή χαμηλή αντίσταση αναστρέφουσας εισόδου και μια χαμηλή ή υψηλή αντίσταση εξόδου (Σχήμα 1). Ο πλέον χρησιμοποιούμενος τύπος διάταξης τελεστικού ενισχυτή και γνωστός από τους περισσότερους ηλεκτρονικούς είναι ο ενισχυτής τάσης (τύπος V-V).

Ο τύπος αυτός παρουσιάζει υψηλή αντίσταση εισόδου και χαμηλή αντίσταση εξόδου (η μη-αναστρέφουσα είσοδος παρουσιάζει υψηλή αντίσταση σε όλες σχεδόν τις διαφορετικές εκδόσεις της ίδιας διάταξης). Σε πολλά κυκλώματα ωστόσο εμφανίζονται τρεις εναλλακτικοί τύποι τελεστικών ενισχυτών, ο ενισχυτής ρεύματος (CC ή current mode), ο μετατροπέας τάσης σε ρεύμα ή ενισχυτής διαγωγιμότητας (VC ή transconductance) και ο μετατροπέας ρεύματος σε τάσης ή ενισχυτής διαντίστασης (CV ή transimpedance), οι οποίοι παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες τιμές εύρους ζώνης. Στην συνέχεια θα εξετάσουμε με περισσότερη λεπτομέρεια τα παραπάνω, κάνοντας χρήση μερικών απλών κυκλωμάτων.

Ας κατασκευάσουμε έναν τελεστικό ενισχυτή

Αρχικά θα δείξουμε με ποιον τρόπο μπορεί να κατασκευαστεί κάποιος από τους τέσσερις βασικούς τύπους τελεστικών ενισχυτών από στοιχειώδεις κυκλωματικές βαθμίδες. Για να μπορεί να γίνει μια όσο το δυνατό πιο ακριβής σύγκριση μεταξύ των ίδιων στοιχείων σε κάθε περίπτωση. Για τους τύπους των ενισχυτών διαντίστασης και ρεύματος αποφασίσαμε να υιοθετήσουμε την τεχνική του ενισχυτή push pull σε λειτουργία τάξης AB.

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2, δύο είναι τα βασικά κυκλώματα που χρειαζόμαστε: ένας ακόλουθος τάσης και μια διάταξη ίσων ρευμάτων (καθρέφτης ρεύματος). Τα στοιχεία από τα οποία αποτελούνται τα κυκλώματα αυτά φαίνονται στο Σχήμα 3.

Οι δύο ακόλουθοι τάσης συμπληρωματικής συμμετρίας σχηματίζουν τον απαραίτητο διαφορικό ενισχυτή στην βαθμίδα εισόδου του τελεστικού ενισχυτή.

Το σήμα λαμβάνεται υπό την μορφή ρεύματος που προέρχεται από το τροφοδοτικό με φορά από τους ακόλουθους τάσης στους καθρέφτες ρεύματος. Το πλεονέκτημα της διάταξης push pull (συμπληρωματική συμμετρία) σε τάξη AB συγκριτικά με μια κλασική διάταξη διαφορικού ενισχυτή είναι ότι παρά το χαμηλό ρεύμα ηρεμίας

μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν οποιαδήποτε μεγάλη τιμή ρεύματος. Συνεπεία αυτού του γεγονότος είναι ότι δεν υπάρχει ουσιαστικά όριο στον ρυθμό μεταβολής (slew rate). Ο κόμβος υψηλής σύνθετης αντίστασης του κυκλώματος είναι η έξοδος των δύο καθρέφτων ρεύματος. Αν είναι απαραίτητο, στο σημείο αυτό συνδέεται ένας πυκνωτής ('πυκνωτής αντιστάθμισης') μέχρι την γραμμή γείωσης. Το τελευταίο τμήμα του κυκλώματος του τελεστικού ενισχυτή είναι ένας ακόλουθος τάσης ο οποίος και μας παρέχει την έξοδο χαμηλής αντίστασης.

Η λειτουργία με έξοδο τάσης στο μικροσκόπιο...

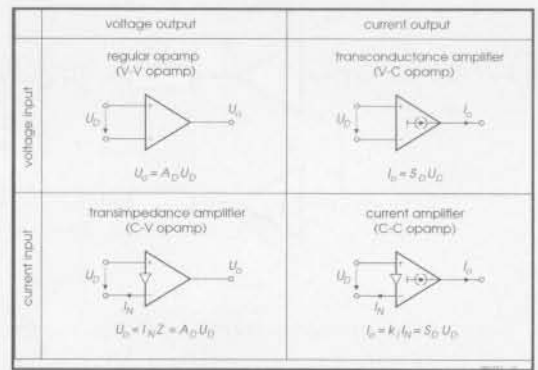
Ένας τελεστικός ενισχυτής με έξοδο τάσης χαρακτηρίζεται από υψηλή αντίσταση εισόδου και χαμηλή αντίσταση εξόδου. Μια τέτοια διάταξη λειτουργεί ουσιαστικά ως πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση. Ένας ιδανικός τελεστικός ενισχυτής παρουσιάζει κέρδος (ανοικτού βρόχου)

$$AD = U_o / U_D = \text{άπειρο.}$$

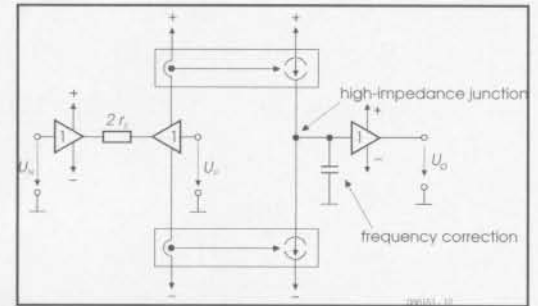
Οι πραγματικοί τελεστικοί ενισχυτές παρουσιάζουν τιμές κέρδους ανοικτού βρόχου μεταξύ 103 και 106. Παρατηρώντας το μοντέλο ενός πραγματικού ενισχυτή (Σχήμα 4) βλέπουμε ότι το διαφορικό κέρδος καθορίζεται από τις αντιστάσεις διαγωγιμότητας $r_s = 1/S$ στην βαθμίδα του μετατροπέα σύνθετης αντίστασης καθώς επίσης και από την αντίσταση που 'φαίνεται' στον κόμβο υψηλής σύνθετης αντίστασης. Για να διερευνήσουμε το εύρος ζώνης του, ο τελεστικός ενισχυτής συνδέεται με την μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 5.

Οι αντιστάσεις ανάδρασης έχουν τιμή $RN = R1 = 100 \Omega$. Έτσι προκύπτει ένας συντελεστής κέρδους (κλειστού βρόχου) $A = 1 + RN/R1 = 1 + 100\Omega/100 \Omega = 2$.

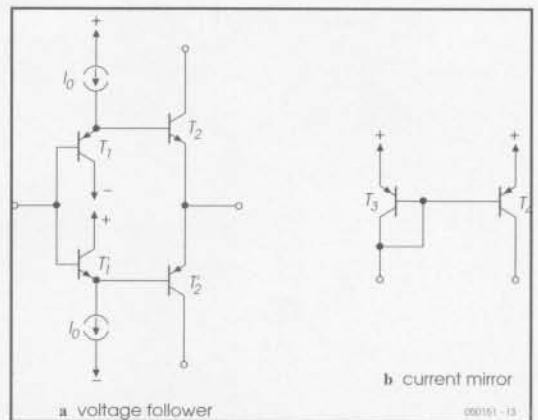
Χωρίς τον πυκνωτή αντιστάθμισης κατά την εξέταση της βηματικής απόκρισης του ενισχυτή θα εμφανιστεί ένα σημαντικό ποσοστό υπερύψωσης (overshoot), οπότε ένας τέτοιος πυκνωτής πρέπει να συνδεθεί στον κόμβο υψηλής σύνθετης αντίστασης. Με την προσθήκη αυτή επιτυγχάνεται η εξασθένιση της υπερύψωσης αλλά ταυτόχρονα περιορίζεται το εύρος ζώνης του ενισχυτή. Η απόκριση συχνότητας του κυκλώματος φαίνεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 1. Σχηματική παράσταση των τεσσάρων διαφορετικών τύπων τελεστικών ενισχυτών.



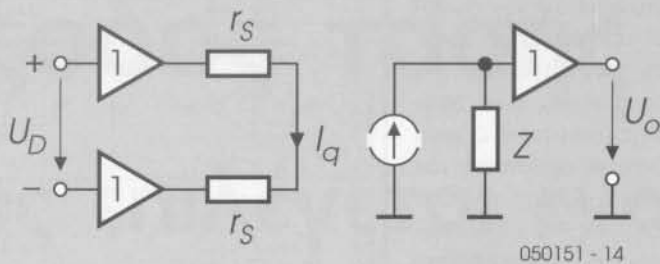
Σχήμα 2. Η διάταξη ενίσχυσης τάσης ενός ενισχυτή push pull σε λειτουργία τάξης AB χρησιμοποιεί δύο διαφορετικές βαθμίδες: έναν ακόλουθο τάσης και έναν καθρέφτη ρεύματος.



Σχήμα 3. Διάταξη του εσωτερικού κυκλώματος ενός ακόλουθου τάσης και ενός καθρέφτη ρεύματος.

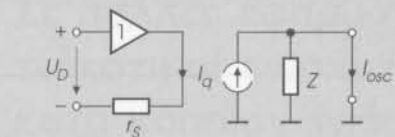
...και η λειτουργία με έξοδο ρεύματος

Ένας τελεστικός ενισχυτής με έξοδο ρεύματος παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση στην αναστρέφουσα είσοδό του και ταυτόχρονα, υψηλή αντίσταση εξόδου. Όπως ισχύει και σε άλλους τύπους τελεστικών ενισχυτών, η μη-αναστρέφουσα είσοδος παρουσιάζει υψηλή αντίσταση. Το αντίστοιχο μοντέλο ενός τέτοιου ενισχυτή φαίνεται στο Σχήμα

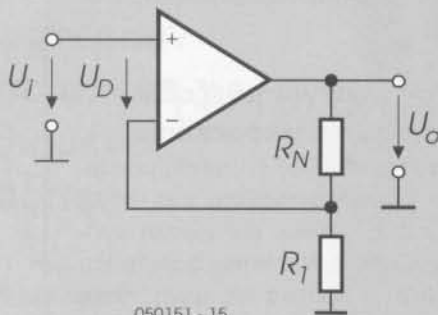


050151 - 14

Σχήμα 4. Τελεστικός ενισχυτής με έξοδο τάσης. Το διαφορικό κέρδος προσαδιορίζεται από τις αντιστάσεις r_s στον μετατροπέα σύνθετης αντίστασης στην είσοδο καθώς και από την αντίσταση στον κόμβο υψηλής σύνθετης αντίστασης.

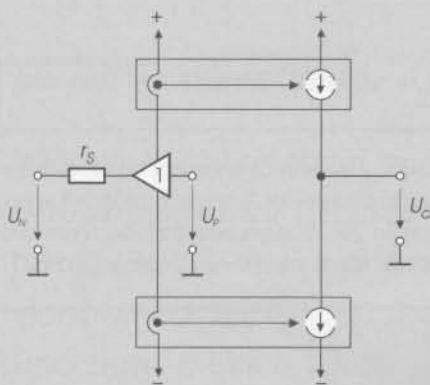


a model

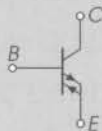


050151 - 15

Σχήμα 5. Συνδεσμολογία ενός τελεστικού ενισχυτή τάσης για μετρήσεις εύρους ζώνης ($R_N = R_1 = 100 \Omega$).



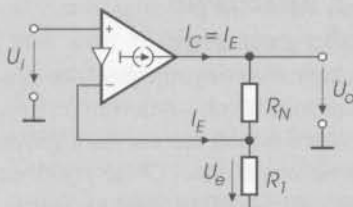
b equivalent diagram



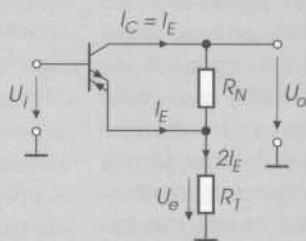
c circuit symbol

050151 - 16

Σχήμα 6. Μοντέλο ενός τελεστικού ενισχυτή με έξοδο ρεύματος.



a with opamp symbol



b with transistor symbol

050151 - 17

Σχήμα 7. Ένας τελεστικός ενισχυτής με έξοδο ρεύματος που χρησιμοποιείται ως μη-αναστρέφον ενισχυτής με αρνητική ανάδραση (απευθείας ανάδραση): $R_N = 200 \Omega$, $R_1 = 100 \Omega$.

6. Μια επίσης κοινή ονομασία αυτού του τύπου ενισχυτή είναι και 'πολύτιμο τρανζίστορ', εξαιτίας της ομοιότητας της συμπεριφοράς του με εκείνη ενός ιδανικού διπολικού τρανζίστορ. Τελεστικοί ενισχυτές με έξοδο ρεύματος κυκλοφορούν στο εμπόριο και μεταξύ άλλων αναφέρονται και οι MAX435 και MAX436 από την Maxim. Ο πολύ γνωστός τελεστικός ενισχυτής OPA660 από την Burr Brown δυστυχώς δεν παράγεται πλέον, αλλά υπάρχουν πολύ καλές πηγές πληροφόρησης και τεκμηρίωσης στο διαδίκτυο: δείτε τις διευθύνσεις που δίνονται στο τέλος του άρθρου. Για να χρησιμοποιήσουμε έναν τελεστικό ενισχυτή με έξοδο ρεύματος ως μη-αναστρέφοντα ενισχυτή, μπορούμε να τον συνδέσουμε με τον ίδιο τρόπο που συνδέουμε και έναν ενισχυτή με έξοδο τάσης με χρήση αρνητικής ανάδρασης τάσης: δείτε το **Σχήμα 7**. Η συγκεκριμένη κυκλωματική διάταξη καλείται επίσης και 'άμεση ανάδραση'. Κατά την διαδικασία εξομοίωσης που εκτελέσαμε, λάβαμε τις τιμές $R_N = 200 \Omega$ και $R_1 = 100 \Omega$. Ο συντελεστής κέρδους δίνεται και πάλι από την σχέση

$$A = 1 + R_N/2R_1 = 1 + 200 \Omega / (2 \times 100 \Omega) = 2.$$

Η συχνότητα αποκοπής του ενισχυτή τάσης μπορεί να προσδιοριστεί από το **Σχήμα 8**.

Μια εναλλακτική υλοποίηση ενός μη-αναστρέφοντα ενισχυτή με τελεστικό ενισχυτή ρεύματος κάνει χρήση των ιδιοτήτων του τελεστικού ως ιδανικού τρανζίστορ. Μπορεί να συνδεθεί ως ακόλουθος εκπομπού με εφαρμογή αρνητικής ανάδρασης ρεύματος (**Σχήμα 9**). Εδώ οι τιμές των αντιστάσεων είναι $R_C = 200 \Omega$ και $R_E = 100 \Omega$. Το κέρδος που προκύπτει είναι

$$A = R_C/R_E = 200 \Omega / 100 \Omega = 2.$$

Η συγκεκριμένη κυκλωματική σύνδεση καλείται με τον όρο 'ανάδραση ρεύματος'. Το εύρος ζώνης της διάταξης αυτής προκύπτει περίπου ίδιο με εκείνο που επιτυγχάνεται με εφαρμογή αρνητικής ανάδρασης τάσης (δείτε το **Σχήμα 8**).

Όπως και με τους ενισχυτές που περιγράψαμε μέχρι εδώ, εκτελέσαμε διαδικασία εξομοίωσης και με τους τελεστικούς ενισχυτές σε διάταξη ενισχυτή διαγωγιμότητας και διαντίστασης, τους οποίους μπορούμε να κατασκευάσουμε με τις ίδιες βασικές κυκλωματικές βαθμίδες. Εξετάσαμε και πάλι το εύρος ζώνης κάθε ενός κυκλώματος. Τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα. Όπως διαπιστώνεται υπάρχουν μόνον μερικές πολύ

μικρές διαφορές στο εύρος ζώνης ανάμεσα σε όλα αυτά τα διαφορετικά κυκλώματα. Ο τελεστικός ενισχυτής με έξοδο τάσης καθώς και ο ενισχυτής διαγωγιμότητας απαιτούν την προσθήκη ενός πυκνωτή για την διόρθωση της απόκρισης συχνότητας και επομένως για την εξασφάλιση ευσταθούς λειτουργίας.

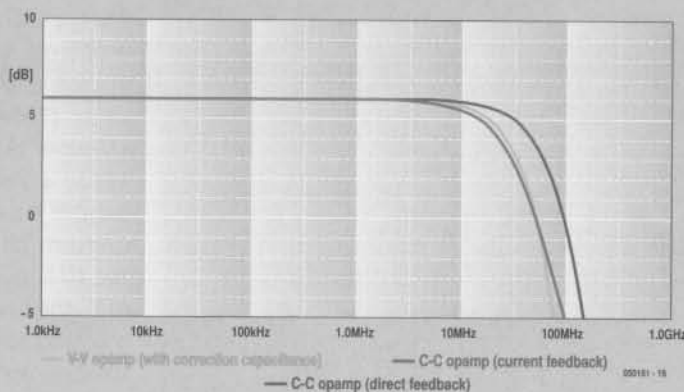
Ποιος είναι ο καλύτερος τελεστικός ενισχυτής για έναν ολοκληρωτή;

Μια πολύ σημαντική εφαρμογή των τελεστικών ενισχυτών είναι η διάταξη του ολοκληρωτή (integrator). Το κύκλωμα αυτό έχει διάφορες πρακτικές εφαρμογές, μια εκ των οποίων είναι και στα κυκλώματα φίλτρων. Στο **Σχήμα 10** φαίνεται το κύκλωμα ενός ολοκληρωτή στο οποίο χρησιμοποιείται ένας τελεστικός ενισχυτής τάσης, ο οποίος μπορεί να λειτουργεί σε συχνότητες μέχρι και 2 MHz. Πέρα από αυτήν την οριακή συχνότητα εντοπίζεται μια περιοχή στην οποία το κέρδος αυξάνεται και πάλι (**Σχήμα 11**). Ο λόγος για τον οποίον συμβαίνει αυτό μπορεί να αναζητηθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα (**Σχήμα 12**). Οι πυκνωτές παρουσιάζουν στις υψηλές συχνότητες σχεδόν μηδενική χωρητική αντίδραση, όπου μπορούν πρακτικά να θεωρηθούν ως βραχυκυκλώματα. Σχηματίζεται έτσι, ένας διαιρέτης τάσης από τις αντιστάσεις R και r_o , δίνοντας μια τάση εξόδου

$$U_o = r_o / (R + r_o) U_i$$

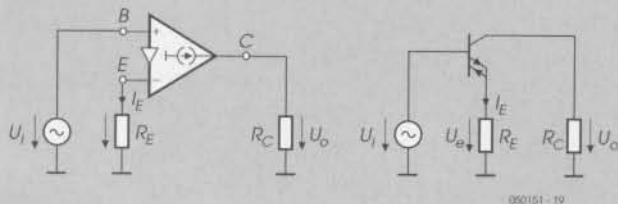
Ο τελεστικός ενισχυτής με έξοδο ρεύματος μπορεί να σχηματίσει ένα κύκλωμα ολοκληρωτή όπως φαίνεται στο **Σχήμα 13**. Όπως γίνεται φανερό από το διάγραμμα της απόκρισης συχνότητας του κυκλώματος, το εύρος ζώνης που προκύπτει για την συγκεκριμένη συνδεσμολογία είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του ολοκληρωτή με τελεστικό ενισχυτή με έξοδο τάσης. Το όριο της ανώτατης συχνότητας εντοπίζεται στους 24 MHz (**Σχήμα 11**). Επίσης δεν υπάρχει κάποια περιοχή συχνότητας εντός της οποίας η συγκεκριμένη διάταξη να παρουσιάζει συμπεριφορά μονάδας διαφόρισης. Αυτό οφείλεται στο ότι η παρασιτική χωρητικότητα που υπάρχει στον κόμβο υψηλής αντίστασης του κυκλώματος του τελεστικού ενισχυτή με έξοδο ρεύματος, παραλληλίζεται ουσιαστικά με τον πυκνωτή ολοκλήρωσης και έτσι δεν δημιουργείται ένας επιπλέον παρασιτικός 'πόλος' στην συνάρτηση της απόκρισης συχνότητας.

Ανακεφαλαιώνοντας, ο τελεστικός ενισχυ-

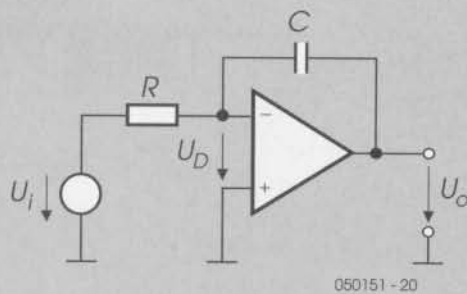


Σχήμα 8. Διαγράμματα απόκρισης συχνότητας των ενισχυτών. Η χαρακτηριστική του τελεστικού ενισχυτή με έξοδο τάσης και με προσθήκη πυκνωτή αντιστάθμισης (κεντρική καμπύλη), η χαρακτηριστική του τελεστικού ενισχυτή με έξοδο ρεύματος και με άμεση ανάδραση (εξωτερική καμπύλη) και η χαρακτηριστική τελεστικού ενισχυτή με έξοδο ρεύματος και με ανάδραση ρεύματος (εσωτερική καμπύλη).

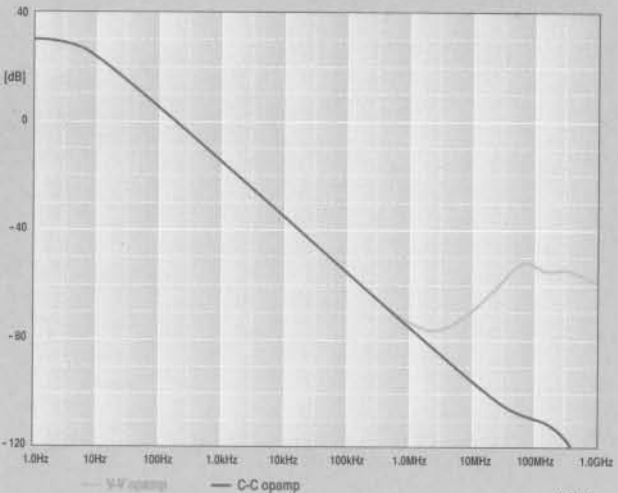
Σχήμα 9. Ένας τελεστικός ενισχυτής εξόδου ρεύματος συνδεδεμένος ως 'ιδανικό' τρανζίστορ σε τοπολογία κυκλώματος ακόλουθου εκπομπού και με εφαρμογή αρνητικής ανάδρασης ρεύματος: $R_C = 200 \Omega$, $R_E = 100 \Omega$.



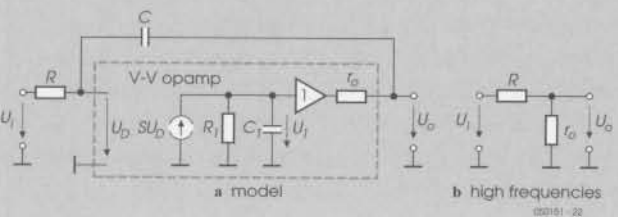
Σχήμα 10. Κύκλωμα ενός ολοκληρωτή με ένα τελεστικό ενισχυτή με έξοδο τάσης.

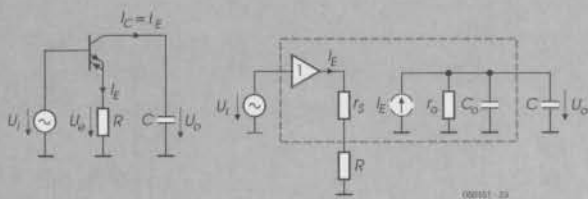


Σχήμα 11. Χαρακτηριστικές απόκρισης των ολοκληρωτών, με τελεστικούς ενισχυτές με έξοδο τάση (μη ευθεία πτώση) και ρεύμα (ευθεία πτώση). Είναι εμφανές ότι το κύκλωμα με τοπολογία εξόδου ρεύματος υπερτερεί σημαντικά.

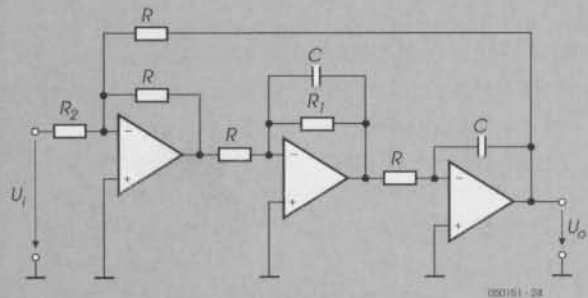


Σχήμα 12. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ολοκληρωτή με τελεστικό ενισχυτή με έξοδο τάσης. Οι πυκνωτές C και C1 θεωρούνται ουσιαστικά βραχυκυκλώματα στις υψηλές συχνότητες.

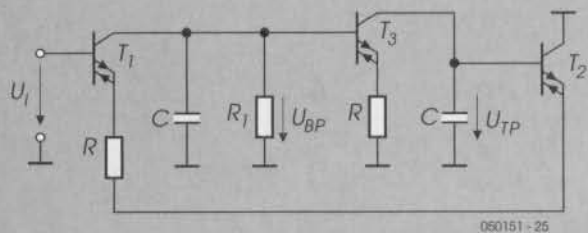




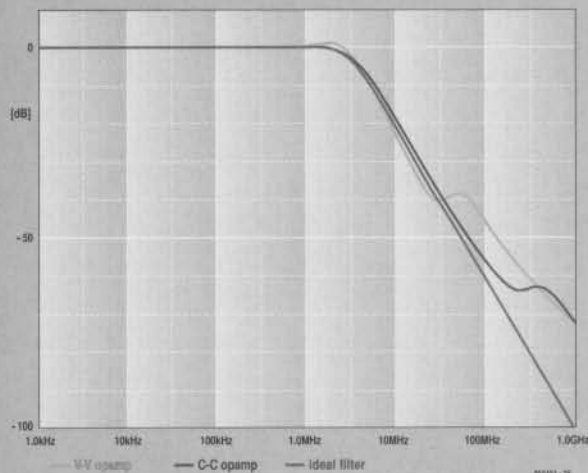
Σχήμα 13. Το κύκλωμα και το αντίστοιχο μοντέλο ενός ολοκληρωτή με τελεστικό ενισχυτή εξόδου ρεύματος.



Σχήμα 14. Ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών δεύτερης τάξης τύπου Butterworth με χρήση ολοκληρωτών με έξοδο τάσης.



Σχήμα 15. Ένα φίλτρο χαμηλών δεύτερης τάξης τύπου Butterworth με χρήση ολοκληρωτών με έξοδο ρεύματος.



Σχήμα 16. Χαρακτηριστικές φίλτρων διέλευσης χαμηλών. Η διάταξη φίλτρου με ολοκληρωτές εξόδου ρεύματος (ενδιάμεση καμπύλη) αποκλίνει πολύ λιγότερο από την ιδανική χαρακτηριστική (εσωτερική καμπύλη) σε σχέση με εκείνη του φίλτρου με ολοκληρωτές με χρήση τελεστικών εξόδου τάσης (εξωτερική καμπύλη) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί έως και τους 100 MHz.

τής με έξοδο ρεύματος υπερτερεί σημαντικά έναντι του τελεστικού ενισχυτή με έξοδο τάσης σε κυκλώματα ολοκληρωτών. Ο λόγος είναι αφενός μεν διότι το εύρος ζώνης ενός ενισχυτή με έξοδο ρεύματος είναι έως και δέκα φορές περίπου μεγαλύτερο και αφετέρου διότι ένας τέτοιος ενισχυτής δεν παρουσιάζει συμπεριφορά διαφύρισης σε περιοχές υψηλότερων συχνοτήτων.

Και τέλος: μια βαθμίδα φίλτρου

Ολοκληρώνοντας την αναφορά αυτή, θα εξετάσουμε την απόκριση συχνότητας ενός φίλτρου διέλευσης χαμηλών δεύτερης τάξης τύπου Butterworth. Το φίλτρο αυτό υλοποιήθηκε με χρήση βαθμίδων ολοκληρωτών με έξοδο τάσης (δείτε το κύκλωμα στο Σχήμα 14) καθώς επίσης και με βαθμίδες ολοκληρωτών με έξοδο ρεύματος (δείτε το κύκλωμα στο Σχήμα 15). Ως διάταξη αναφοράς των μετρήσεων και ελέγχων ελήφθη μια διάταξη ιδανικού φίλτρου. Η συχνότητα αποκοπής που επιλέχθηκε είναι $F_c = 3 \text{ MHz}$.

Παρατηρώντας τις παραστάσεις των αποκρίσεων συχνότητας (Σχήμα 16) διαπιστώνουμε εύκολα ότι το φίλτρο το οποίο υλοποιήθηκε με ολοκληρωτές εξόδου τάσης (εξωτερική καμπύλη), αποκλίνει σχετικά σύντομα από την χαρακτηριστική του ιδανικού φίλτρου (εσωτερική καμπύλη). Για συχνότητες πάνω από 30 MHz το φίλτρο αυτό δεν είναι πλέον σε θέση να χρησιμοποιηθεί. Αντίθετα, το φίλτρο που υλοποιήθηκε με τελεστικούς ενισχυτές εξόδου ρεύματος (αντιστοιχεί στην μεσαία καμπύλη), παρακολουθεί πιο πιστά την

Σύγκριση τιμών εύρους ζώνης

Ενισχυτές βασισμένοι σε διαφορετικούς τελεστικούς ενισχυτές

Τύπος ενισχυτή	Εύρος ζώνης
Ενισχυτής Τάσης	32,1 MHz
Ενισχυτής Διαγωγιμότητας	49,4 MHz
Ενισχυτής Διαντίστασης	59,1 MHz
Ενισχυτής Ρεύματος (άμεση ανάδραση)	58,1 MHz
Ενισχυτής Ρεύματος (ανάδραση ρεύματος)	29,5 MHz

ιδανική χαρακτηριστική σε σχέση με εκείνο που υλοποιείται με ολοκληρωτές με έξοδο τάσης. Η βαθμίδα αυτή είναι κατάλληλη για να λειτουργήσει μέχρι τους 100 MHz.

Συμπεράσματα

Συμπερασματικά αναφέρουμε ότι ένας 'τυπικός' τελεστικός ενισχυτής με έξοδο τάσης θεωρείται επαρκής για τις περισσότερες εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα, όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως απλός ενισχυτής, οι διαφορές που προκύπτουν μεταξύ των κυκλωμάτων που υλοποιούνται με διαφορετικούς τύπους τελεστικών ενισχυτών δεν είναι και τόσο αξιοσημείωτες, με την προϋπόθεση ότι η τοπολογία του κυκλώματος είναι πάντοτε η ίδια.

Εντούτοις στην περίπτωση υλοποίησης κυκλωμάτων ολοκλήρωσης και φίλτρων, υπερτερεί σαφέστατα ο τελεστικός ενισχυτής με έξοδο ρεύματος έναντι εκείνου με έξοδο τάσης, σε ότι αφορά το εύρος ζώνης που επιτυγχάνεται κατά έναν συντελεστή περίπου ίσο με δέκα.

(050151-1)

Αναφορά

Tietze, U. και Schenk, C.:
Electronic Circuits: Handbook for Design and Application, Springer, ISBN 3-540-50608-X / 0-387-50608-X

Διευθύνσεις στο διαδίκτυο

www.eetimes.com/anniversary/designclassics/op-amp.html
http://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier
<http://www.uoguelph.ca/~antoon/gadgets/741/741.html>
<http://focus.ti.com/lit/an/sboa071/sboa071.pdf>