

ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ

ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ
ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥ



Μπισδούνης
Λάμπρος

Πετρίδης
Κώστας

Σίμος
Χρήστος

Κολλάτου
Θεοφανώ

Βουρνά
Πολυξένη

Χαριτάντης
Γιάννης

Κυμάκης
Εμμανουήλ

Τσακιρίδης
Οδυσσεύς

Βουδούκης
Νίκος

Αγγελόπουλος
Σπύρος

SPICE
MATLAB
PYTHON



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΑΡΑΚΥΝΘΟΣ

ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ

ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥ

SPICE, MATLAB, PYTHON

**Γ. Χαριτάντης, Λ. Μπισδούνης, Κ. Πετρίδης, Ε.
Κυμάκης, Χ. Σίμος, Ο. Τσακιρίδης, Θ. Κολλάτου, Ν.
Βουδούκης, Π. Βουρνά, Σ. Αγγελόπουλος**

ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΔΙΟΔΟΣ

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΙΟΔΩΝ

ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΔΙΠΟΛΙΚΗΣ ΕΠΑΦΗΣ

ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΔΙΠΟΛΙΚΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΩΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ

ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΣΤΙΣ ΥΨΗΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ

ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΕΥΡΕΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΠΟΛΛΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ

ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

ΕΝΕΡΓΑ ΦΙΛΤΡΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

ΑΡΜΟΝΙΚΟΙ ΤΑΛΑΝΤΩΤΕΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ

ΑΡΑΚΥΝΘΟΣ

2026

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Αγωγοί – Ημιαγωγοί – Μονωτές	15
1.3 Ενεργειακές στάθμες – Ενεργειακές ζώνες	15
1.4. Φορείς αγωγιμότητας σε στερεά	17
1.5 Ημιαγώγιμα στοιχεία	18
1.6 Φορείς αγωγιμότητας σε ενδογενή ημιαγωγό	19
1.7 Επίδραση της θερμοκρασίας στη συγκέντρωση ενδογενών φορέων	20
1.8 Μηχανισμοί ηλεκτρικής αγωγής σε στερεά	22
1.8.α Αγωγή στα μέταλλα	22
1.8.β Αγωγή σε ημιαγωγούς	22
1.8.γ Ρεύματα ολίσθησης ημιαγωγού	23
1.9 Εξωγενείς ημιαγωγοί	24
1.9.α Ημιαγωγοί τύπου n	24
1.9.β Αγωγιμότητα εξωγενούς ημιαγωγού τύπου n	25
1.9.γ Ημιαγωγοί τύπου p	25
1.9.δ Αγωγιμότητα εξωγενούς ημιαγωγού τύπου p	26
1.10. Η επαφή p - n	27
1.11 Σχηματισμός επαφής pn: Ποιοτική μελέτη	28
1.11.α Ηλεκτρικό πεδίο επαφής pn	29
1.11.β Δυναμικό επαφής pn	29
1.12 Εξήγηση του σχηματισμού επαφής pn με βάση τις ζώνες ενέργειας των ημιαγωγών	29
1.13 Η επαφή pn σε ορθή και ανάστροφη πόλωση	32
1.14 $I - V$ χαρακτηριστική ημιαγωγού διόδου επαφής pn	32
1.15 Κατάρρευση ανάστροφα πολωμένης επαφής pn	33
1.16 Χωρητικότητες επαφής pn	34
1.16.α Χωρητικότητα περιοχής έλλειψης φορέων	34
1.16.β Χωρητικότητα διάχυσης	34
1.16.γ Η δίοδος varactor	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ ΔΙΟΔΟΣ

2.1 Εισαγωγή	55
2.2 Περιγραφή ημιαγωγού διόδου	55
2.2.α Ημιλογαριθμική χαρακτηριστική ημιαγωγού διόδου	56
2.3 Η δίοδος σε κύκλωμα	57
2.4 Γραμμική χαρακτηριστική διόδου	58
2.5 Ιδανική δίοδος	58
2.6 Ηλεκτρικό ισοδύναμο της διόδου στο συνεχές	58
2.7 Ηλεκτρικό ισοδύναμο μικρών σημάτων της διόδου	61

2.8 Χρόνος ανάκτησης ανάστροφης πόλωσης	62
2.9 Η δίοδος Schottky – Επαφή μετάλλου – ημιαγωγού	63
2.10 Υπολογιστικές τεχνικές ανάλυσης κυκλωμάτων με διόδους	64
2.11 Λήψη χαρακτηριστικής της διόδου με το πρόγραμμα SPICE	65
2.12 Δίοδοι εκπομπής φωτός - LEDs	67
2.13 Φωτοδιόδοι – φωτοβολταϊκά κύτταρα – οπτοζεύκτες – φωτοαντιστάτες	69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΙΟΔΩΝ

3.1 Εισαγωγή	93
3.2 Κυκλώματα ψαλιδιστών με διόδους	93
3.3 Σταθεροποίηση τάσης με δίοδο Zener	97
3.4 Κύκλωμα ημιανόρθωσης	98
3.5 Κύκλωμα ανόρθωσης πλήρους κύματος	99
3.6 Τροφοδοτικές διατάξεις	102
3.6.α Τροφοδοτική διάταξη με φίλτρο πυκνωτή	103
3.6.β Τροφοδοτική διάταξη με LC φίλτρο τύπου – π	106
3.7 Κυκλώματα σταθεροποίησης τάσης	108
3.8 Διακοπτικές βαθμίδες ελέγχου	111
3.8.α Δίοδος τεσσάρων περιοχών	111
3.8.β Diac	113
3.8.γ Thyristor	113
3.9.δ Triac	116

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΔΙΠΟΛΙΚΗΣ ΕΠΑΦΗΣ

4.1 Εισαγωγή	139
4.2 Δομή του διπολικού τρανζίστορ	139
4.3 Φυσική λειτουργία του διπολικού τρανζίστορ	140
4.4 Ρεύματα στο τρανζίστορ	141
4.4.α Συσχέτιση ρευμάτων σε διπολικό τρανζίστορ	143
4.4.β Ενίσχυση ρεύματος διπολικού τρανζίστορ στο συνεχές	143
4.5 Μοντέλο μεγάλων σημάτων του διπολικού τρανζίστορ	144
4.6 Προσεγγιστική λειτουργία του τρανζίστορ στο συνεχές	145
4.7 Τρόποι σύνδεσης του τρανζίστορ σε κύκλωμα	146
4.8 Χαρακτηριστικές καμπύλες τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού	147
4.9 Φαινόμενο Early	148
4.10 Χαρακτηριστική μεταφοράς διπολικού τρανζίστορ	149
4.11 Μοντέλο μικρών σημάτων του διπολικού τρανζίστορ	150
4.12 Μοντέλα του BJT στις τρεις βασικές συνδέσεις του	152
4.12.α Σύνδεση με κοινή τη βάση	152
4.12.β Σύνδεση με κοινό το συλλέκτη	153
4.13 Επίδραση της θερμοκρασίας στη λειτουργία του τρανζίστορ	156
4.14 Κατασκευή ολοκληρωμένων διπολικών τρανζίστορ	156

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΤΟ ΔΙΠΟΛΙΚΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΩΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

5.1 Εισαγωγή	173
5.2 Ο πιο απλός ενισχυτής	173
5.3 Ποια είναι τα βήματα στη μελέτη ενισχυτών;	176
5.4 Πόλωση του διπολικού τρανζίστορ	177
5.4.α Κύκλωμα σταθερής πόλωσης διπολικού τρανζίστορ	178
5.4.β Ευστάθεια του σημείου λειτουργίας	180
5.5 Κυκλώματα πόλωσης διπολικού τρανζίστορ	180
5.5.α Κύκλωμα πόλωσης διπολικού τρανζίστορ με αυτοπόλωση εκπομπού	182
5.6 Πόλωση rnp τρανζίστορ	184
5.7 Γραμμή φορτίου στο συνεχές	185
5.8 Λειτουργία ενισχυτών στο εναλλασσόμενο	186
5.9 Ισοδύναμο μοντέλο μικρών σημάτων του BJT	187
5.10 Ανάλυση απλού ενισχυτή στο εναλλασσόμενο	188
5.11 Γραμμή φορτίου ενισχυτή στο εναλλασσόμενο	190
5.12 Ισοδύναμα κυκλώματα ενισχυτών	197
5.13 Ενισχυτές μιας βαθμίδας με BJT	198
5.13.α Ενισχυτής κοινού εκπομπού	198
5.13.β Ο ενισχυτής κοινού εκπομπού ως ελεγχόμενη πηγή	200
5.13.γ Ενισχυτής κοινής βάσης	202
5.13.δ Ενισχυτής κοινού συλλέκτη	205
5.14 Σταθεροποιητής συνεχούς τάσης με τρανζίστορ	209
5.15 Φωτοτρανζίστορ	210
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	
ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ	
6.1 Εισαγωγή	231
6.2 Δομή του MOSFET	231
6.3 Φυσική λειτουργία του MOSFET	233
6.4 Τύποι τρανζίστορ MOSFET	235
6.4.1 MOSFET προσαύξησης και εκκένωσης	235
6.4.2 Συμπληρωματικά MOSFET	235
6.5 Λειτουργία του MOSFET στο συνεχές	236
6.6 Λειτουργία του MOSFET στο εναλλασσόμενο	238
6.7 Ενισχυτές διαφορικής εισόδου	241
6.7.1 Διαφορικός ενισχυτής τάσης με MOS τρανζίστορ	242
6.8 Ενισχυτές ρεύματος – Καθρέφτης ρεύματος	246
6.9 JFET – Δομή και λειτουργία	251
6.10 Λειτουργία του JFET στο εναλλασσόμενο	256
6.11 MESFET – Δομή και λειτουργία	258
6.12 Οργανικά τρανζίστορ OTFT	261
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	
ΤΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΣΤΙΣ ΥΨΗΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ	
7.1 Εισαγωγή	275
7.2 Ανασκόπηση λειτουργίας του BJT στην ενεργό περιοχή	275
7.2.α Λειτουργία στο συνεχές	275

7.2.β Λειτουργία στο εναλλασσόμενο	276
7.3 Μοντέλα και παράμετροι του BJT	276
7.3.α Ισοδύναμο μοντέλο διπολικού τρανζίστορ	276
7.3.β Χωρητικότητες επαφών	277
7.3.γ Παράμετροι ισοδύναμου μοντέλου	278
7.4 Το π-ισοδύναμο μοντέλο του BJT	279
7.4.α Τροποποιημένο κατά Miller π-ισοδύναμο μοντέλο του BJT	279
7.4.β Το π-ισοδύναμο μοντέλο του BJT στις χαμηλές συχνότητες	280
7.5 Ενίσχυση ρεύματος του τρανζίστορ	281
7.6 Ανασκόπηση λειτουργίας του MOSFET	285
7.6.α Λειτουργία στο συνεχές	285
7.7 Μοντέλα και παράμετροι του MOSFET	286
7.7.α Ισοδύναμο μοντέλο του MOSFET	286
7.7.β Λειτουργία του MOSFET στο εναλλασσόμενο	287
7.7.γ Ισοδύναμα μοντέλα εναλλασσόμενου του MOSFET	288

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΕΥΡΕΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

8.1 Εισαγωγή	301
8.2 Αποκρίσεις συχνότητας και χρόνου ενισχυτών	301
8.2.α Απόκριση συχνότητας	301
8.2.β Μεταβατική απόκριση	302
8.3 Αποκρίσεις RC κυκλωμάτων πρώτου βαθμού	303
8.3.α Απόκριση συχνότητας RC κυκλωμάτων πρώτου βαθμού	304
8.4 Αποκρίσεις συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού	307
8.5 Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής βάσης	319
8.5.α Περιοχή χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων	319
8.5.β Περιοχή υψηλών συχνοτήτων	320
8.6 Διεύρυνση της ανώτερης συχνότητας λειτουργίας ενισχυτών	324
8.7 Αποκρίσεις χρόνου ενισχυτών	326
8.8 Εύρος ενισχυμένων συχνοτήτων-χρόνος ανόδου	328

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΠΟΛΛΩΝ ΒΑΘΜΙΔΩΝ

9.1 Εισαγωγή	343
9.2 Ενισχυτές με βαθμίδες σε διαδοχή	343
9.3 Τρόποι σύζευξης βαθμίδων ενισχυτών	346
9.3.α Ενισχυτές με σύζευξη βαθμίδων μέσω πυκνωτή	346
9.3.β Ενισχυτές με απ' ευθείας σύζευξη	347
9.3.γ Ενισχυτές με επαγωγική σύζευξη	348
9.4 Σύνθετοι ενισχυτές	349
9.4.α Σύνθετος ενισχυτής κοινού συλλέκτη - κοινού συλλέκτη	349
9.4.β Σύνθετος ενισχυτής κοινού συλλέκτη-κοινού εκπομπού	350
9.4.γ Κασκωδικός ενισχυτής	350
9.5 Διαφορικός ενισχυτής τάσης	356
9.5.α Λειτουργία του διαφορικού ενισχυτή με διπλή είσοδο	357

9.5.β Ανάλυση διαφορικού ενισχυτή στο εναλλασσόμενο	358
9.5.γ Ο διαφορικός ενισχυτής ως ενισχυτής διαγωγιμότητας	363
9.6 Χαρακτηριστικές αποκρίσεις διαφορικού ενισχυτή	363
9.7 Διαφορικός ενισχυτής με MOS τρανζίστορ	366
9.8 Συμπεριφορά του διαφορικού ενισχυτή ως συνόλου	369

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

10.1 Εισαγωγή	383
10.2 Πυκνωτής και επαγωγός στο χώρο των συχνοτήτων	383
10.3 Κυκλώματα δευτέρου βαθμού	386
10.3.α Αναλυτική μελέτη του κυκλώματος	387
10.3.β Αποκρίσεις συχνότητας κυκλωμάτων δευτέρου βαθμού	388
10.3.γ Εκτέλεση παραμετρικής ανάλυσης	390
10.4 Αποκρίσεις χρόνου κυκλωμάτων δευτέρου βαθμού	391
10.5 Εμπεδήσεις LC κυκλωμάτων συντονισμού	393
10.6 Αποκρίσεις συχνότητας LC κυκλωμάτων συντονισμού	396
10.7 Ενισχυτές απλού συντονισμού	403
10.8 Ενισχυτής συντονισμού κοινού εκπομπού	404
10.9 Επαγωγική σύζευξη ενισχυτών συντονισμού	407
10.10 Εναλλακτικοί τρόποι σύζευξης ενισχυτών συντονισμού	409
10.10.α Σύζευξη ενισχυτών συντονισμού μέσω επαγωγού με μεσαία λήψη	410
10.10.β Σύζευξη ενισχυτών συντονισμού μέσω χωρητικού αυτομετασηματιστή	411
10.11 Ενισχυτές διπλού συντονισμού	413

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ

11.1 Εισαγωγή	423
11.2 Ανατροφοδότηση σε ενισχυτές	423
11.3 Καθορισμός του τύπου ανατροφοδότησης - Διαγράμματα Nyquist	425
11.4 Επίδραση της ανατροφοδότησης στη σταθερότητα της ενίσχυσης	426
11.4.α Ευαισθησία ενίσχυσης	426
11.5 Τρόποι ανατροφοδότησης	427
11.5.α Τοπολογίες ενισχυτών αρνητικής ανατροφοδότησης	428
11.6 Επίδραση ανατροφοδότησης στο εύρος ζώνης συχνοτήτων ενισχυτή	433
11.7 Αυτόματος έλεγχος απολαβής AGC	437
11.8 Σταθεροποίηση λειτουργίας ενισχυτών συντονισμού	439
11.9 Δημιουργία συζυγών μιγαδικών πόλων με χρήση ανατροφοδότησης	439
11.10 Το φαινόμενο Miller με θετική ανατροφοδότηση	442
11.11 Επίδραση αρνητικής ανατροφοδότησης στην παραμόρφωση ενισχυτών	442
11.12 Επίδραση της ανατροφοδότησης στο θόρυβο ενισχυτών	446

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

12.1 Εισαγωγή	463
12.2 Φυσική απόκριση κυκλωμάτων	463
12.3 Ευστάθεια κυκλωμάτων	464

12.4 Ευστάθεια κυκλωμάτων με ανατροφοδότηση	468
12.5 Περιθώριο κέρδους και φάσης	471

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13

ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ

13.1 Εισαγωγή	485
13.2 Ενισχυτές σε τάξη Α	485
13.2.α Ενισχυτής κοινού εκπομπού σε τάξη Α με απευθείας σύνδεση του φορτίου στο συλλέκτη	486
13.2.β Ενισχυτής κοινού συλλέκτη σε τάξη Α με απευθείας σύνδεση του φορτίου στον εκπομπό	490
13.2.γ Ενισχυτής κοινού εκπομπού σε τάξη Α με χωρητική σύνδεση του φορτίου	491
13.2.δ Ενισχυτής κοινού εκπομπού σε τάξη Α με σύνδεση του φορτίου μέσω μετασχηματιστή	492
13.3 Ενισχυτές σε τάξη Β	495
13.3.α Λειτουργία ενισχυτή ισχύος push-pull με μετασχηματιστή	497
13.4 Ενισχυτές push-pull με συμπληρωματικά τρανζίστορ	498
13.5 Βαθμίδες εξόδου ολοκληρωμένων κυκλωμάτων	501
13.5.α Ο αντιστροφέας τάσης ως βαθμίδα εξόδου	501
13.5.β Ακολουθητής πηγής σε τάξη ως βαθμίδα εξόδου	503
13.6 Ολοκληρωμένοι ενισχυτές ισχύος	505

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

14.1 Εισαγωγή	521
14.2 Ο Τελεστικός Ενισχυτής	522
14.3 Βασικά χαρακτηριστικά τελεστικών ενισχυτών	522
14.3.α Ιδανικός Τελεστικός Ενισχυτής	522
14.4 Εφαρμογές τελεστικού ενισχυτή	523
14.5 Ενισχυτής θετικής ενίσχυσης	524
14.6 Ενισχυτής αρνητικής ενίσχυσης	525
14.7 Ανάλυση κυκλωμάτων με ΤΕ	528
14.8 Κυκλώματα αθροιστών	529
14.9 Μετατροπείς αρνητικής εμπίδησης	530
14.10 Κυκλώματα ολοκληρωτών	531
14.11 Κύκλωμα διαφοριστή	533
14.12 Ενισχυτές διαφορικής εισόδου	533
14.13 Ενισχυτές διαφορικής εισόδου – διαφορικής εξόδου	534
14.14 Ενισχυτές οργανολογίας	535
14.15 Μετατροπείς ρεύματος σε τάση	537
14.16 Μετατροπείς εμπεδήσεων	538
14.16.α Εξομοιωμένος επαγωγός	539
14.17 Ενεργά RC φίλτρα	540
14.18 Μη γραμμικά κυκλώματα με τελεστικούς ενισχυτές	540
14.18.α Λογαριθμικός ενισχυτής	541
14.18.β Κυκλώματα ανορθωτών μικρών σημάτων	542
14.19 Συγκριτές τάσης	544
14.20 Χαρακτηριστικά συγκριτών τάσης	547
14.21 Πόλωση τελεστικών ενισχυτών	547

14.22 Επαύξηση του ρεύματος τελεστικών ενισχυτών	548
14.23 Απόκριση συχνότητας τελεστικών ενισχυτών	549
14.24 Ρυθμός μεταβολής σήματος εξόδου-Slew rate	551
14.25 Τελεστικοί ενισχυτές ανατροφοδότησης ρεύματος, CFOA	553
14.25.α Μεταφορέας ρεύματος	553
14.25.β Ενισχυτής CFOA	554

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 15

ΕΝΕΡΓΑ ΦΙΛΤΡΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

15.1 Εισαγωγή	581
15.2 Περιγραφή κυκλωμάτων φίλτρων	581
15.3 Το ιδανικό βαθυπερατό φίλτρο	583
15.4 Προσέγγιση αποκρίσεων ιδανικού LP φίλτρου	584
15.5 Συναρτήσεις προσέγγισης	585
15.5.α Προσέγγιση κατά Butterworth	585
15.5.β Προσέγγιση κατά Chebyshev	589
15.5.γ Προσέγγιση κατά Cauet	592
15.6 Άλλοι τύποι αποκρίσεων	595
15.7 Μέθοδοι σχεδιασμού ενεργών φίλτρων	598
15.8 Ενεργά φίλτρα με σύζευξη βαθμίδων δεύτερης τάξης	599
15.9 Ζωνοδιαβατά κυκλώματα δεύτερης τάξης	600
15.10 Παθητικά RLC κυκλώματα φίλτρων	604
15.11 Εξομοίωση των παθητικών LC φίλτρων	606
15.12 Μέθοδοι εξομοίωσης LC κυκλωμάτων	606
15.13 Κυκλώματα μετασχηματισμού εμπεδήσεων	607
15.13.α Μετατροπείς εμπεδήσεων	608
15.13.β Πρακτικά κυκλώματα μετατροπών εμπεδήσεων	609
15.13.γ Εξομοιωμένος επαγωγός	610
15.14 Λειτουργική εξομοίωση παθητικών LC φίλτρων	612
15.15 Ενεργά ολοκληρωμένα φίλτρα	617
15.16 Απλός τρόπος δημιουργίας εξομοιωμένου επαγωγού	621

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 16

ΑΡΜΟΝΙΚΟΙ ΤΑΛΑΝΤΩΤΕΣ

16.1 Εισαγωγή	631
16.2 Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικών ταλαντωτών	631
16.3 Ταλαντωτές ανατροφοδότησης – Κριτήριο Barkhausen	633
16.4 Εξομοιωμένοι LC ταλαντωτές	634
16.5 Κριτήρια ταλάντωσης βρόχου ανατροφοδότησης	636
16.6 Τεχνικές ανάλυσης ταλαντωτών	637
16.7 Ταλαντωτής βαθυπερατού-υψηπερατού βρόχου	638
16.8 Ταλαντωτής γέφυρας του Wien	639
16.9 Ταλαντωτής ολοδιαβατού βρόχου	640
16.10 LC ταλαντωτές	644
16.10.α Ταλαντωτής του Armstrong	644
16.10.β Ταλαντωτής του Colpitts	645

16.11 Σταθερότητα του πλάτους ταλαντώσεων	647
16.12 Σταθερότητα της συχνότητας ταλαντώσεων	647
16.13 Ταλαντωτές με κρύσταλλο	648
16.14 Ταλαντωτές αρνητικής αντίστασης	649
16.15 Γεννήτριες κυματομορφών	650
16.15.α Ασταθής πολυδονητής	650
16.15.β Γεννήτρια τριγωνικών παλμών	652
16.15.γ Γεννήτρια ημιτονικού σήματος	652
16.15.δ Ταλαντωτής Pierce	654
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 17	
ΓΕΝΙΚΕΣ ΛΥΜΕΝΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	667
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 18	
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ	
ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΡΥΘΜΟΝ	775
Παράρτημα 1	856
Συναρτήσεις μεταφοράς - Μιγαδική συχνότητα	
Παράρτημα 2	860
Διαγράμματα Bode	
Παράρτημα 3	868
Στοιχεία θεωρίας κυκλωμάτων	
Παράρτημα 4	875
Ηλεκτρικός Θόρυβος	
Παράρτημα 5	878
Translinear Κυκλώματα	
Ολική Βιβλιογραφία	883

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

- 14.1 Εισαγωγή
- 14.2 Ο Τελεστικός Ενισχυτής
- 14.3 Βασικά χαρακτηριστικά τελεστικών ενισχυτών
 - 14.3.α Ιδανικός Τελεστικός Ενισχυτής
- 14.4 Εφαρμογές τελεστικού ενισχυτή
- 14.5 Ενισχυτής θετικής ενίσχυσης
- 14.6 Ενισχυτής αρνητικής ενίσχυσης
- 14.7 Ανάλυση κυκλωμάτων με ΤΕ
- 14.8 Κυκλώματα αθροιστών
- 14.9 Μετατροπéας αρνητικής εμπέδησης
- 14.10 Κυκλώματα ολοκληρωτών
- 14.11 Κύκλωμα διαφοριστή
- 14.12 Ενισχυτές διαφορικής εισόδου
- 14.13 Ενισχυτές διαφορικής εισόδου – διαφορικής εξόδου
- 14.14 Ενισχυτές οργανολογίας
- 14.15 Μετατροπéας ρεύματος σε τάση
- 14.16 Μετατροπéες εμπεδήσεων
 - 14.16.α Εξομοιωμένος επαγωγός
- 14.17 Ενεργά RC φίλτρα
- 14.18 Μη γραμμικά κυκλώματα με τελεστικούς ενισχυτές
 - 14.18.α Λογαριθμικός ενισχυτής
 - 14.18.β Κυκλώματα ανορθωτών μικρών σημάτων
- 14.19 Συγκριτές τάσης
- 14.20 Χαρακτηριστικά συγκριτών τάσης
- 14.21 Πόλωση τελεστικών ενισχυτών
- 14.22 Επαύξηση του ρεύματος τελεστικών ενισχυτών
- 14.23 Απόκριση συχνότητας τελεστικών ενισχυτών
- 14.24 Ρυθμός μεταβολής σήματος εξόδου-Slew rate
- 14.25 Τελεστικοί ενισχυτές ανατροφοδότησης ρεύματος, CFOA
 - 14.25.α Μεταφορέας ρεύματος
 - 14.25.β Ενισχυτής CFOA

Σκοπός

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά ο ολοκληρωμένος διαφορικός ενισχυτής τάσης, operational amplifier, (op-amp), ο τρόπος λειτουργίας του και οι διάφορες γραμμικές και μη γραμμικές εφαρμογές του. Ο τελεστικός ενισχυτής παρουσιάζεται μέσω του πλήθους των εφαρμογών του ως μια από τις πλέον βασικές βαθμίδες αναλογικής επεξεργασίας σήματος. Επίσης, παρουσιάζεται ο τελεστικός ενισχυτής α-νατροφοδότησης ρεύματος CFOA που είναι κατάλληλος για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Προσδοκώμενα αποτελέσματα

Η κατανόηση της λειτουργίας των ολοκληρωμένων ενισχυτών και των εφαρμογών τους

Όταν θα έχετε μελετήσει το κεφάλαιο αυτό θα μπορείτε

Να σχεδιάσετε άμεσα έναν απλό ενισχυτή μικρών σημάτων που να λειτουργεί ως θετικός ενισχυτής τάσης ή ως αναστροφέας τάσης.

Να κατανοήσετε ένα πλήθος εφαρμογών με τελεστικούς ενισχυτές, όπως, ολοκληρωτές, διαφοριστές, λογαριθμικός ενισχυτής, ενισχυτές οργανολογίας, φίλτρα συχνοτήτων, κ.α.

Να δημιουργήσετε έναν RC επαγωγό και να κατανοήσετε την λειτουργία του.

Έννοιες κλειδιά

- Ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου,
- Αντίσταση εισόδου,
- Αντίσταση εξόδου, εικονική γη,
- Λόγος απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου,
- Αντιγραφή τάσεων,
- Λογαριθμικός ενισχυτής,
- Ανορθωτής τάσεως,
- Ψαλιδιστής κορυφών,
- Κύκλωμα απόλυτης τιμής,
- Ενεργά RC φίλτρα.

14.1 Εισαγωγή

Ο τελεστικός ενισχυτής, **TE**, (operational amplifier, ή op-amp), είναι μία από τις χρησιμότερες βαθμίδες αναλογικών κυκλωμάτων. Πρωτοεμφανίστηκε ως ολοκληρωμένο κύκλωμα το 1965. Η ονομασία του χρονολογείται από τη δεκαετία το 50, όπου χρησιμοποιείτο σε αναλογικούς υπολογιστές για την τέλεση γραμμικών μαθηματικών πράξεων, όπως πρόσθεση, αφαίρεση, ολοκλήρωση και διαφύριση σημάτων.

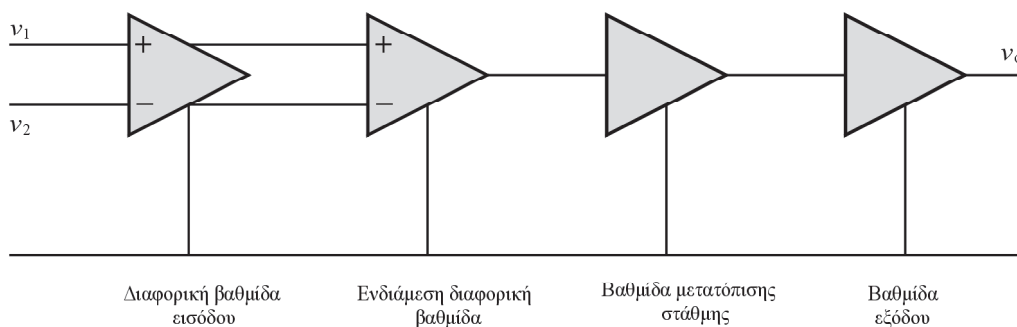
Σήμερα, ο **TE**, με ένα πλήθος παραλλαγών, δικαιολογημένα κατέχει δεσπόζουσα θέση στους καταλόγους όλων των εταιρειών κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Ο **TE** είναι ένας ενισχυτής τάσης, απ' ευθείας σύζευξης (direct coupled amplifier), με πολύ μεγάλη τιμή ενίσχυσης τάσης. Η δομή ενός τυπικού **TE** τεσσάρων βαθμίδων διπολικής τεχνολογίας δεικνύεται στο σχηματικό διάγραμμα του σχ.14.1. Πρόκειται για δομή ενισχυτή πολλών βαθμίδων, που του εξασφαλίζουν την υψηλή ενίσχυση.

Η βαθμίδα εισόδου και η ενδιάμεση βαθμίδα είναι, συνήθως, βαθμίδες διαφορικού ενισχυτή. Η διαφορική βαθμίδα εισόδου καθορίζει τα χαρακτηριστικά εισόδου του **TE**. Η βαθμίδα εξόδου είναι μια βαθμίδα ισχύος, η οποία προσδίδει στον ενισχυτή χαμηλή αντίσταση εξόδου.

Τελεστικοί ενισχυτές τεχνολογίας **CMOS**, που σχεδιάζονται για λειτουργία με χαμηλή τάση τροφοδοσίας και με μικρή κατανάλωση, έχουν πολύ απλούστερη δομή. Οι τελεστικοί ενισχυτές κατασκευάζονται ως πλήρως ολοκληρωμένα κυκλώματα, (monolithic integrated circuits), έχοντας όλα τα στοιχεία, που τους απαρτίζουν, πάνω στην ίδια ψηφίδα (chip).

Με την κατασκευή όλων των στοιχείων πάνω στην ίδια ψηφίδα επιτυγχάνεται το ταίριασμα των τιμών των στοιχείων, που είναι απαραίτητο για τη συμμετρική λειτουργία κυρίως των διαφορικών βαθμίδων.



Σχήμα 14.1 Τυπικό σχηματικό διάγραμμα δομής **TE** τεχνολογίας **BJT**.

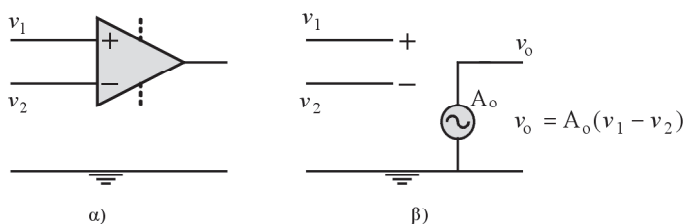
14.2 Ο Τελεστικός Ενισχυτής

Το καθιερωμένο ηλεκτρονικό σύμβολο του τελεστικού ενισχυτή δεικνύεται στο σχ.14.2.α, το δε ισοδύναμο μοντέλο μικρών σημάτων, χαμηλών συχνοτήτων, δεικνύεται στο σχ.14.2.β. Παρατηρούμε ότι, πρόκειται για μια πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση, (Voltage Controlled Voltage Source, VCVS), με δυνατότητα ενίσχυσης και του συνεχούς σήματος.

Η είσοδος του ΤΕ είναι διαφορική. Διακρίνονται ο αντιστρέφων και ο μη αντιστρέφων ακροδέκτης εισόδου. Εκτός από την αρχική ενίσχυση τάσης, η διαφορική βαθμίδα εισόδου εξασφαλίζει στον ΤΕ υψηλή αντίσταση εισόδου. Στην έξοδό του ο ΤΕ εμφανίζει χαμηλή αντίσταση, που επιτυγχάνεται από κατάλληλες βαθμίδες εξόδου.

Η διαφορική ενίσχυση ανοικτού βρόχου, (ενίσχυση τάσης χωρίς ανατροφοδότηση), του ΤΕ είναι πολύ υψηλή. Ωστόσο, με ανοικτό το βρόχο, ο ενισχυτής είναι ασταθής, έχοντας την έξοδό του σταθερά σε κόρο. Το μεγαλύτερο μέρος της ενίσχυσης τάσης εξασφαλίζεται από τις δύο πρώτες βαθμίδες εισόδου.

Στο σύμβολο του ΤΕ του σχ.14.2.α, διακρίνονται και οι ακροδέκτες τροφοδοσίας συνεχούς,



Σχήμα 14.2 Τελεστικός ενισχυτής. α) Σύμβολο, β) Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού ΤΕ.

που, συνήθως, στα κυκλώματα δεν δεικνύονται διότι ενδιαφερόμαστε για τη συμπεριφορά των ενισχυτών στο εναλλασσόμενο, όπως πράξαμε για όλους τους ενισχυτές, που εξετάσαμε μέχρι τώρα. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού θα γνωρίσουμε διάφορους τρόπους πόλωσης του ΤΕ.

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες κατασκευής ολοκληρωμένων ενισχυτών, η κάθε μία με τα δικά της ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Ωστόσο, οι περισσότεροι τελεστικοί ενισχυτές, που διατίθενται στο εμπόριο, δεικνύουν, στις χαμηλές συχνότητες, συμπεριφορά, που πλησιάζει τη συμπεριφορά ιδανικού ενισχυτή τάσης. Για το λόγο αυτό, αλλά και για διδακτικούς λόγους, αρχικά, θα μελετήσουμε τα κυκλώματα με τελεστικούς ενισχυτές θεωρώντας τον ΤΕ ως ιδανικό, όπως θα αναλύσουμε στα επόμενα.

14.3 Βασικά χαρακτηριστικά τελεστικών ενισχυτών

Σύμφωνα με όσα αναφέραμε στο πέμπτο κεφάλαιο, τα βασικά χαρακτηριστικά, που καθορίζουν τη συμπεριφορά ενός ενισχυτικού στοιχείου, είναι ο παράγοντας ενίσχυσης και οι αντιστάσεις εισόδου και εξόδου. Εξειδικεύοντας για τον ΤΕ, που είναι ένας ενισχυτής τάσης, η συμπεριφορά του στο συνεχές και τις χαμηλές συχνότητες καθορίζεται από την **ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου A_o , (open-loop gain)**, την **αντίσταση εισόδου** και την **αντίσταση εξόδου**.

14.3.α Ιδανικός Τελεστικός Ενισχυτής

Σ' έναν **ιδανικό ΤΕ ενισχυτή η ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου**, θεωρείται ότι, έχει τιμή άπειρη, καθώς επίσης είναι ανεξάρτητη της συχνότητας.

Σε γραμμικές εφαρμογές, ο ΤΕ ουδέποτε χρησιμοποιείται με ανοικτό το βρό-

χο ανατροφοδότησης, γιατί είναι ασταθής. Άπειρη ενίσχυση ανοικτού βρόχου σημαίνει ότι, η ενίσχυση κυκλωμάτων ενισχυτών με ανατροφοδότηση εξαρτάται αποκλειστικά από το κύκλωμα ανατροφοδότησης και όχι από την ενίσχυση του ενισχυτή, (βλ. 11.11).

Σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα ΤΕ, που δεικνύεται στο σχ.14.2.β, η τάση εξόδου του ενισχυτή προσδιορίζεται από τη σχέση,

$$v_o = A_o(v_1 - v_2) \quad (14.1)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι,

$$(v_1 - v_2) = \frac{1}{A_o} \cdot v_o \quad (14.2)$$

Συνεπώς, σύμφωνα με την (14.2), για έναν ιδανικό ΤΕ με άπειρη ενίσχυση ανοικτού βρόχου, η διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες εισόδου είναι μηδενική, ή άλλως, η τάση στον ένα ακροδέκτη εισόδου ισούται με την τάση στον άλλο ακροδέκτη,

$$v_1 \approx v_2 \quad (14.3)$$

Η ιδιότητα αυτή του ιδανικού ΤΕ, που μπορεί να θεωρηθεί ως **αντιγραφή τάσεων**, (voltage copying), διευκολύνει στην ανάλυση κυκλωμάτων με ΤΕ και στην κατανόηση της λειτουργίας τους.

Η αντίσταση εισόδου ιδανικού τελεστικού ενισχυτή θεωρείται άπειρη. Αυτό σημαίνει, ότι, το ρεύμα, στους ακροδέκτες εισόδου του ενισχυτή, είναι μηδενικό και συνεπώς, ο τελεστικός ενισχυτής δεν "φορτώνει" τα κυκλώματα, προς τα οποία συνδέεται.

Η αντίσταση εξόδου ιδανικού ενισχυτή είναι μηδενική. Αυτό σημαίνει, ότι, ο ενισχυτής συμπεριφέρεται ως ιδανική πηγή τάσης. Δηλαδή, η τάση στην έξοδο του ενισχυτή δεν επηρεάζεται, οποιοδήποτε και αν είναι το φορτίο, προς το οποίο συνδέεται.

14.4 Εφαρμογές τελεστικού ενισχυτή

Ο τελεστικός ενισχυτής έχει βρει αναρίθμητο πλήθος εφαρμογών στο χώρο της ηλεκτρονικής. Οι εφαρμογές αυτές εντάσσονται, κυρίως, στο πεδίο της επεξεργασίας αναλογικών σημάτων. Στα πλαίσια αυτά, ο ΤΕ καλείται να τελέσει βασικές μαθηματικές λειτουργίες, με μεγάλη ακρίβεια. Τα κυκλώματα, που υπάρχουν, για την τέλεση αυτών των λειτουργιών, είναι κυκλώματα με ανατροφοδότηση.

Με γραμμικά στοιχεία στο κύκλωμα ανατροφοδότησης τελούνται οι βασικές γραμμικές μαθηματικές λειτουργίες, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω, μαζί με την αντίστοιχη ορολογία τους στα ηλεκτρονικά. Στις λειτουργίες αυτές τα σήματα εξόδου δηλώνονται ως ψ , (εξαρτημένη μαθηματική μεταβλητή) και τα σήματα εισόδου ως χ , (ανεξάρτητη μεταβλητή).

Οι παραπάνω λειτουργίες, καθώς και συνδυασμοί αυτών, μπορεί να πραγματοποιηθούν, είτε ανεξάρτητα, είτε ενσωματωμένες σε πολυπλοκότερα κυκλώματα, για την πραγματοποίηση σύνθετων λειτουργιών.

Με μη γραμμικά στοιχεία στο κύκλωμα ανατροφοδότησης, όπως π.χ. διόδους και τρανζίστορ, ο ΤΕ ενισχυτής μπορεί να λειτουργήσει ως **λογαριθμικός ενισχυτής**, **ανορθωτής**, **ψαλιδιστής κορυφών** (clipper), **κύκλωμα απόλυτης τιμής**, κ.α.

Τα βασικότερα από τα μη γραμμικά κυκλώματα, όπου ο ΤΕ χρησιμοποιείται, είτε

1) Πολλαπλασιασμός σήματος με θετική σταθερά	Ενισχυτής θετικής ενίσχυσης $\Psi = \kappa \chi \quad \kappa > 0$
2) Πολλαπλασιασμός σήματος με αρνητική σταθερά	Ενισχυτής αρνητικής ενίσχυσης Αντιστροφέας $\Psi = -\kappa \chi \quad \kappa > 0$
3) Πρόσθεση σημάτων	Κύκλωμα αθροιστή $\Psi = \chi_1 + \chi_2 + \dots + \chi_n$
4) Αφαίρεση σημάτων	Κύκλωμα αφαιρέτη $\Psi = \chi_1 - \chi_2$
5) Ολοκλήρωση σήματος	Ολοκληρωτής $\Psi(t) = (1/T) \cdot \int \chi(t) dt$
6) Διαφόριση σήματος	Διαφοριστής $\Psi(t) = T \cdot dx(t)/dt$
7) Επίλυση διαφορικών εξισώσεων	Αναλογικός υπολογιστής

με ανοικτό το βρόχο ανατροφοδότησης, είτε με θετική ανατροφοδότηση, είναι **οι ταλαντωτές** (oscillators), **οι συγκριτές** (comparators), και **οι μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό**, (Analog to Digital converters, A/D).

14.5 Ενισχυτής θετικής ενίσχυσης

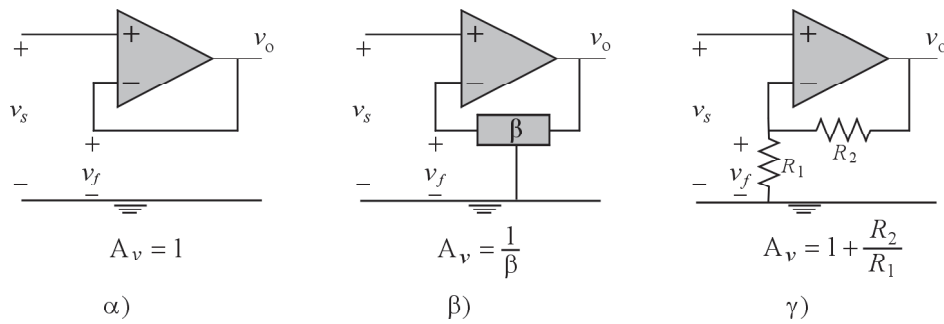
Θα μελετήσουμε έναν ενισχυτή θετικής ενίσχυσης, (μη αναστρέφοντα ενισχυτή), που πραγματοποιείται με ιδανικό **TE**.

Ενισχυτής θετικής ενίσχυσης με **TE** πραγματοποιείται με εφαρμογή αρνητικής ανατροφοδότησης τάσης σε σειρά προς την είσοδο του τελεστικού ενισχυτή.

Ας θεωρήσουμε αρχικά την απλούστερη σε κατανόηση, αλλά ακραία περίπτωση, όπου, **όλο** το σήμα εξόδου τροφοδοτείται πίσω στην αντιστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή, όπως δεικνύεται στο σχ.14.3.α. Προφανώς, πρόκειται για ολική αρνητική ανατροφοδότηση, με ποσοστό ανατροφοδότησης $\beta = 1$. Επειδή θεωρούμε τον **TE** ιδανικό, σύμφωνα με τη σχέση (14.3), η τάση v_s , στη μη αντιστρέφουσα είσοδο, είναι ίση με την τάση στην αντιστρέφουσα είσοδο, που είναι, στην περίπτωση αυτή, η τάση εξόδου, $v_+ = v_- = v_o$. Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι, η τάση εξόδου ακολουθεί την τάση εισόδου, (voltage follower), $v_o = v_s$, ή,

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = 1 \quad (14.4)$$

Παρατηρούμε, λοιπόν, πόσο απλά, ένας τελεστικός ενισχυτής, με την ιδιότητά του ως αντιγραφέα τάσης, μετατρέπεται σε έναν θετικό ενισχυτή με ενίσχυση μονάδα. Έναν τέτοιο ενισχυτή γνωρίσαμε, στην παράγρ.5.13.δ, ως α-



Σχήμα 14.3 Ενισχυτές θετικής ενίσχυσης. α) Ακολουθητής τάσης, β) Γενική τοπολογία ενισχυτή θετικής ενίσχυσης, γ) Ενισχυτής θετικής ενίσχυσης.

πομονωτή τάσης, (buffer).

Θα μπορούσαμε, επίσης, να καταλήξουμε απευθείας στη σχέση (14.4), αν κάναμε χρήση της (11.11), δηλαδή,

$$A_v = \frac{1}{\beta} = 1 \quad (14.5)$$

Η σχέση (14.5) ισχύει και για το κύκλωμα του σχ.14.3.β, όπου, το ποσοστό ανατροφοδότησης β , λόγω του υποκυκλώματος ανατροφοδότησης, μπορεί να είναι οποιοσδήποτε θετικός αριθμός. Εάν δεχθούμε ότι, το κύκλωμα ανατροφοδότησης δημιουργείται από έναν ωμικό διαιρέτη τάσης, όπως δεικνύεται στο σχ.14.3.γ, τότε, είναι,

$$\beta = \frac{v_f}{v_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (14.6)$$

οπότε,

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (14.7)$$

Συνεπώς, το κύκλωμα του σχ.14.3.γ είναι ένας ενισχυτής τάσης, θετικής ενίσχυσης, η οποία καθορίζεται αποκλειστικά από το κύκλωμα ανατροφοδότησης. Η ενίσχυση του ενισχυτή αυτού δεν μπορεί να γίνει μικρότερη της μονάδας, τιμή, που προκύπτει, εάν μηδενίσουμε την R_2 , ή, εάν απειρίσουμε την R_1 .

Με ανάλογο τρόπο προκύπτει ότι, στην περίπτωση, που οι αντιστάσεις R_1 και R_2 αντικατασταθούν αντίστοιχα από εμπεδήσεις Z_1 και Z_2 , η ενίσχυση του κυκλώματος παύει να είναι καθαρός αριθμός και καθίσταται συνάρτηση της συχνότητας. Δηλαδή,

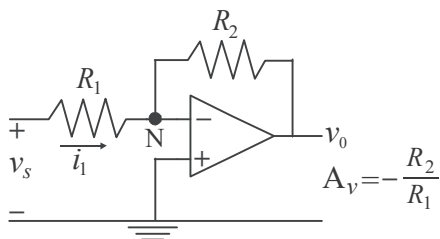
$$A_v(s) = \frac{V_o}{V_s} = 1 + \frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} \quad (14.8)$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζει ουσιαστικά τη συνάρτηση μεταφοράς του όλου κυκλώματος με ιδανικό ενισχυτή.

Η **αντίσταση εισόδου**, ενισχυτή θετικής ενίσχυσης, είναι πρακτικά άπειρη η δε **αντίσταση εξόδου** αμελητέα.

14.6 Ενισχυτής αρνητικής ενίσχυσης

Το κύκλωμα ενισχυτή αρνητικής ενίσχυσης, ή αντιστροφέα, (inverter), με ΤΕ δεικνύεται στο σχ.14.4. Πρόκειται ουσιαστικά για την ίδια τοπολογία με τον ενισ-



Σχήμα 14.4 Ενισχυτής αρνητικής ενίσχυσης.

χυτή θετικής ενίσχυσης, του σχ.14.3, με τη διαφορά ότι, η τροφοδοσία σήματος επιτυγχάνεται, μέσω του αντιστρέφοντα ακροδέκτη του **ΤΕ**, ενώ ο μη αντιστρέφον ακροδέκτης γειώνεται.

Ο προσδιορισμός της ενίσχυσης του ενισχυτή μπορεί να γίνει σύμφωνα με τη θεωρία της ανατροφοδότησης, (βλ. παρ.11.2). Θα χρησιμοποιηθεί, εντούτοις, η κλασσική ανάλυση του κυκλώματος, που οδηγεί ευκολότερα στο αποτέλεσμα. Αυτή η τεχνική θα ακολουθηθεί σε όλα τα επόμενα κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών.

Η τάση στον κόμβο **N** του αντιστρέφοντα ακροδέκτη προσδιορίζεται, γράφοντας απευθείας τον κανόνα των ρευμάτων του Kirchhoff για τον κόμβο **N**.

$$(G_1 + G_2) \cdot v_- = G_1 \cdot v_s + G_2 \cdot v_o \quad (14.9)$$

όπου, G_1 και G_2 είναι οι αγωγιμότητες των αντιστατών R_1 και R_2 .

Λόγω του ότι, ο ενισχυτής είναι ιδανικός, η τάση στον μη αντιστρέφοντα ακροδέκτη, που είναι μηδενική, αντιγράφεται από τον αντιστρέφοντα ακροδέκτη, δηλαδή,

$$v_- = v_+ = 0 \quad (14.10)$$

Θεωρούμε, δηλαδή, ότι, ο αντιστρέφον ακροδέκτης του **ΤΕ**, (κόμβος **N** στο κύκλωμα του σχ.14.4), συμπεριφέρεται, στην ιδανική κατάσταση, ως **εικονική γη**, (virtual earth).

Από τις (14.9) και (14.10), προσδιορίζεται η ενίσχυση του ενισχυτή ως,

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (14.11)$$

Στη γενική περίπτωση, όπου οι αντιστάσεις R_1 και R_2 μπορεί να αντικατασταθούν από εμπεδήσεις Z_1 και Z_2 , η συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή θα δίνεται από τη σχέση,

$$A(s) = \frac{V_o}{V_s} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (14.12)$$

Η **αντίσταση εισόδου** του αρνητικού ενισχυτή είναι,

$$R_i = \frac{v_s}{i_1} = R_1 \quad (14.13)$$

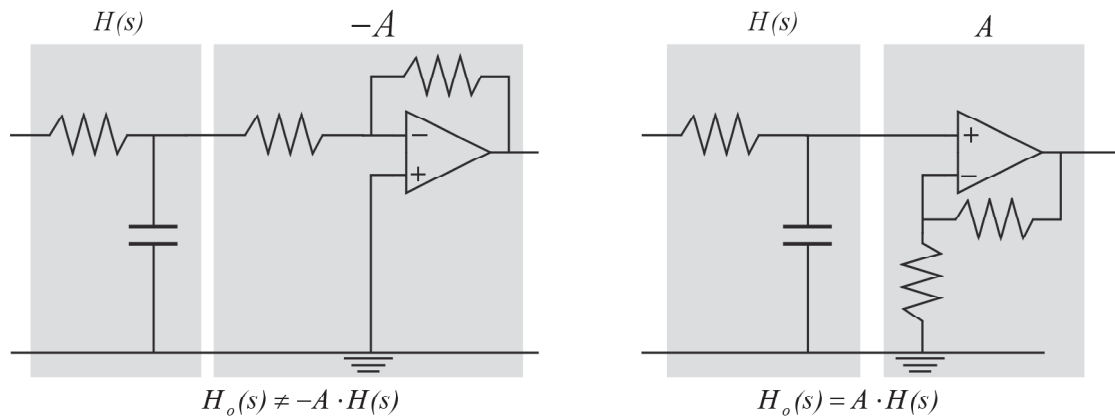
αφού, ο κόμβος **N** συμπεριφέρεται ως εικονική γη.

Η **αντίσταση εξόδου** είναι πρακτικά αμελητέα, όπως και στην περίπτωση του ενισχυτή θετικής ενίσχυσης.

Παρατηρήσεις

α) Το γεγονός ότι, ο αρνητικός ενισχυτής έχει πεπερασμένη αντίσταση εισόδου, σε αντίθεση με τον ενισχυτή θετικής ενίσχυσης, που έχει άπειρη αντίσταση εισόδου, μας προειδοποιεί να είμαστε προσεκτική στη χρήση του, διότι "φορτώνει" την έξοδο του κυκλώματος, προς το οποίο συνδέεται. Ας προσέξουμε τα δύο κυκλώματα, που απεικονίζονται στο σχ.14.5.

Στο κύκλωμα του σχ.14.5.β η συνάρτηση μεταφοράς του όλου κυκλώματος είναι το γινόμενο της συνάρτησης μεταφοράς του υποκυκλώματος εισόδου $H(s)$ και της ενίσχυσης A του ενισχυτή, διότι ο ενισχυτής "δεν φορτώνει", ("δεν κλέβει ρεύμα από"), το υποκύκλωμα εισόδου. Αυτό δεν συμβαίνει και στο κύκλωμα του σχ.14.5.α,



Σχήμα 14.5 Σύνδεση θετικού και αρνητικού ενισχυτή σε κύκλωμα.

όπου ο αρνητικός ενισχυτής "φορτώνει" το υποκύκλωμα εισόδου, αλλοιώνοντας, έτσι, τη συνάρτηση μεταφοράς του υποκυκλώματος εισόδου.

β) Θα μπορούσε κανείς να σκεφθεί να δημιουργήσει έναν θετικό ενισχυτή με διαδοχή δύο βαθμίδων αρνητικού ενισχυτή. Ένα τέτοιο κύκλωμα θα ήταν ισοδύναμο προς έναν θετικό ενισχυτή μόνον ως προς το μέγεθος της ενίσχυσης και τη συμπεριφορά εξόδου.

Η διαφορά ως προς την συμπεριφορά εισόδου εξακολουθεί να υφίσταται, αφού ο ενισχυτής θετικής ενίσχυσης εμφανίζει άπειρη αντίσταση εισόδου. Εδώ, μπορεί να γίνει περισσότερο κατανοητό γιατί στο πέμπτο κεφάλαιο επιμέναμε να τονίζουμε, ότι, η βασική συμπεριφορά ενός ενισχυτή δεν καθορίζεται μόνον από την ενίσχυση του, αλλά και από τη συμπεριφορά εισόδου και εξόδου. Η ενίσχυση ενός ενισχυτή έχει νόημα μόνον όταν καθοριστεί κάτω από ποιές συνθήκες εισόδου και φορτίου προσδιορίστηκε.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ενίσχυση θετικού ενισχυτή, που δίνεται από τη σχέση (14.8), ισχύει για οποιαδήποτε συνθήκη πηγής και φορτίου. Αντίθετα, η ενίσχυση αρνητικού ενισχυτή, που καθορίζεται από τη σχέση (14.12), ισχύει για ιδανική πηγή εισόδου και οποιοδήποτε φορτίο. Τα παραπάνω ισχύουν με την προϋπόθεση ότι, θεωρούμε τον ΤΕ ως ιδανικό.

γ) Όπως θα εξετάσουμε σε επόμενο κεφάλαιο, διαφοροποίηση υφίσταται μεταξύ θετικού και αρνητικού ενισχυτή και ως προς την απόκριση συχνότητας.

δ) Από τις (14.7) και (14.11) προκύπτει ότι, η ενίσχυση τάσης καθορίζεται από το λόγο των αντιστάσεων του βρόχου ανατροφοδότησης και όχι από την απόλυτη τους τιμή. Αυτό σημαίνει ότι, θεωρητικά, η στάθμη των αντιστάσεων μπορεί να είναι αυθαίρετη.

Στην πράξη, ωστόσο, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, αφ' ενός μεν, το μέγιστο ρεύμα, που μπορεί να παράσχει ο ενισχυτής, διότι, ο ΤΕ δεν είναι, εν γένει, βαθμίδα ισχύος, αφ' ετέρου ο θόρυβος.

Το ρεύμα στο βρόχο ανατροφοδότησης πρέπει να είναι κατά πολύ μικρότερο από το μέγιστο ρεύμα εξόδου του ενισχυτή, ($i_{out,max} \ll 15 \text{ mA}$ για ενισχυτές τύπου 741). Πρέπει, δηλαδή να είναι,

$$\frac{v_{o,max}}{R_1 + R_2} \ll i_{out,max} \quad (14.14)$$

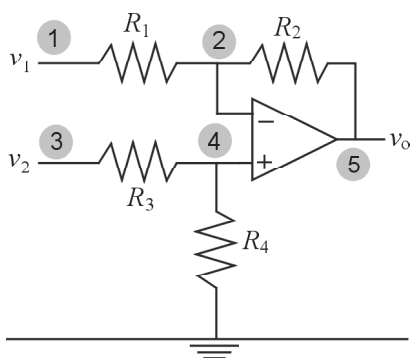
Η παραπάνω συνθήκη ισχύει καλύτερα όσο μεγαλύτερη στάθμη αντιστάσεων επιλέξουμε. Μεγάλες τιμές αντιστάσεων, όμως, συνεισφέρουν πολύ στην αύ-

ξηση του θερμικού θορύβου. Έτσι λοιπόν, η επιλογή των αντιστάσεων του βρόχου ανατροφοδότησης είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ της επιλογής χαμηλής κατανάλωσης και χαμηλού θορύβου.

14.7 Ανάλυση κυκλωμάτων με ΤΕ

Για την ανάλυση κυκλωμάτων με ΤΕ ακολουθούνται διάφορες τεχνικές, τις βασικότερες από τις οποίες θα γνωρίσουμε παρακάτω. Ως χαρακτηριστικό κύκλωμα για την εφαρμογή των μεθόδων αυτών έχει επιλεγεί ο ενισχυτής διαφοράς, που δεικνύεται στο σχ.14.6.

Το κύκλωμα του σχ.14.6 είναι κύκλωμα, που τελεί την πράξη της διαφοράς δύο σημάτων τάσης. Το κύκλωμα αυτό αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη των ενισχυτών οργανολογίας, (Instrumentation amplifiers). Θα μελετήσουμε τον τρόπο λειτουργίας του κυκλώματος αναπτύσσοντας με λεπτομέρεια την τεχνική ανάλυσης του.



Σχήμα 14.6 Ενισχυτής διαφοράς τάσεων.

α) Ανάλυση του κυκλώματος με τη μέθοδο των κόμβων

Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα ακόλουθα:

- 1) Αριθμούμε όλους τους κόμβους του κυκλώματος
- 2) Γράφουμε για κάθε κόμβο, εκτός από τους κόμβους εισόδου και εξόδου, απ'ευθείας τον κανόνα των ρευμάτων του Kirchhoff, ως εξής: Το άθροισμα των αγωγιμοτήτων, που εκκινούν από τον κόμβο, για τον οποίο γράφεται η εξίσωση, πολλαπλασιασμένο επί την τάση του κόμβου αυτού, ισούται με το επιμέρους άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών πολλαπλασιασμένων επί την τάση των κόμβων στους οποίους απολήγουν.
- 3) Θεωρούμε τη διαφορά δυναμικού στην είσοδο του ΤΕ μηδενική, $v_+ - v_- = 0$, (μόνον όταν ο ενισχυτής είναι ιδανικός).
- 4) Επιλύουμε το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω τεχνική ανάλυσης στον ενισχυτή του σχ.14.6, έχουμε

$$(G_1 + G_2)v_3 = G_1v_1 + G_2v_o \Rightarrow v_3 = \frac{G_1}{G_1 + G_2}v_1 + \frac{G_2}{G_1 + G_2}v_o$$

$$(G_3 + G_4)v_4 = G_3v_2 \Rightarrow v_4 = \frac{G_3}{G_3 + G_4}v_2$$

$$v_3 = v_4 \Rightarrow v_o = \frac{G_3}{G_2} \left(\frac{G_1 + G_2}{G_3 + G_4} \right) v_2 - \frac{G_1}{G_2} v_1$$

Εάν επιλέξουμε, $R_1 = R_3$ και $R_2 = R_4$
τότε, προκύπτει ότι,

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1) \quad (14.15)$$

Η τάση στην έξοδο του κυκλώματος ισούται με τη διαφορά των τάσεων στις

δύο εισόδους πολλαπλασιασμένη με μια σταθερά. Επίσης, αν θεωρήσουμε ότι μηδενίζεται η v_1 , το κύκλωμα λειτουργεί ως θετικός ενισχυτής, με τιμή ενίσχυσης, που μπορεί να γίνει μικρότερη της μονάδας, αλλά, με πεπερασμένη αντίσταση εισόδου.

β) Ανάλυση του κυκλώματος με βάση την αρχή της επαλληλίας

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, που ισχύει, αφού το κύκλωμα θεωρείται γραμμικό, η απόκριση του κυκλώματος είναι ίση με το άθροισμα των αποκρίσεων, που προκύπτουν, όταν κάθε μια από τις εισόδους επενεργήσει ανεξάρτητα. Μηδενίζοντας την πηγή v_1 , το κύκλωμα λειτουργεί ως θετικός ενισχυτής, του οποίου η έξοδος, σύμφωνα με την (14.7), προσδιορίζεται ως,

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_4 \quad \text{όπου} \quad v_4 = \frac{R_4}{R_3 + R_4}v_2$$

Συνεπώς,

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2 \quad (14.16)$$

Εάν τώρα μηδενίσουμε την είσοδο v_2 και δεχθούμε ως μοναδική διέγερση την είσοδο v_1 , το κύκλωμα λειτουργεί ως ενισχυτής αρνητικής ενίσχυσης, του οποίου η έξοδος προσδιορίζεται, σύμφωνα με την (14.11), ως,

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1}v_1 \quad (14.17)$$

Όταν και οι δύο πηγές εισόδου επενεργούν ταυτόχρονα, τότε, η έξοδος είναι το άθροισμα των εξόδων, που προσδιορίζονται από τις σχέσεις (14.16) και (14.17), δηλαδή,

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1 \quad (14.18)$$

Εάν επιλέξουμε, $R_1 = R_3$ και $R_2 = R_4$, τότε, προκύπτει ότι,

$$v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1) \quad (14.19)$$

Η αρχή της επαλληλίας αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη, ιδιαίτερα, όταν επιχειρείται σύνθεση κυκλωμάτων με τελεστικούς ενισχυτές, όπως θα γνωρίσουμε στα επόμενα.

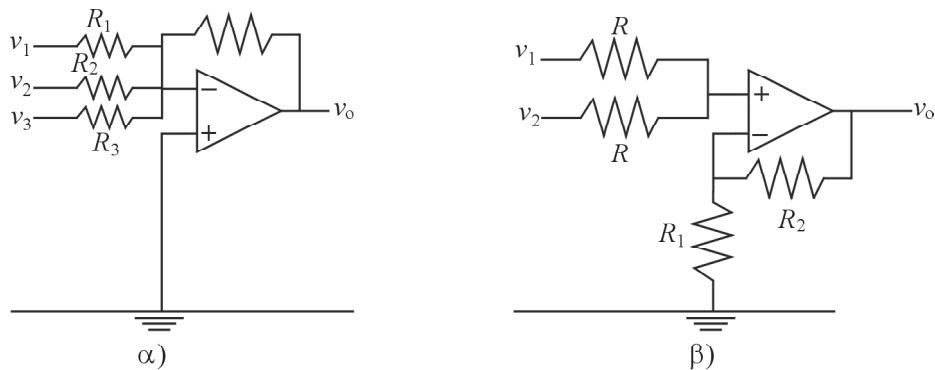
γ) Ανάλυση του κυκλώματος με βάση τα διαγράμματα ροής σήματος

Για την ανάλυση κυκλωμάτων με τελεστικούς ενισχυτές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα ροής σήματος. Με μια τέτοια ανάλυση, πέραν από τον προσδιορισμό της τελικής σχέσης, γίνεται εμφανέστερη η ροή των σημάτων στο κύκλωμα.

14.8 Κυκλώματα αθροιστών

α) Αντιστρέφων αθροιστή

Το κύκλωμα αντιστρέφοντα αθροιστή σημάτων, (inverting summing amplifier), που δεικνύεται στο σχ.14.7.α, είναι από τα χρησιμότερα κυκλώματα στις εφαρμογές.



Σχήμα 14.7 α) Κύκλωμα αντιστρέφοντος αθροιστή, β) Κύκλωμα μη αντιστρέφοντος αθροιστή.

Πρόκειται στην πραγματικότητα για κύκλωμα αρνητικού ενισχυτή, στην είσοδο του οποίου συνδέονται περισσότερα του ενός σήματα. Η σύνδεση αυτή είναι δυνατή, διότι, καθένας από τους αντιστάτες εισόδου συνδέεται στην εικονική γη του κυκλώματος, χωρίς, με τον τρόπο αυτό, να επηρεάζει τη λειτουργία των άλλων δρόμων.

Κάνοντας χρήση της αρχής της επαλληλίας, εύκολα προσδιορίζεται η τάση εξόδου συναρτήσει των τάσεων εισόδου, ως,

$$v_o = - \left(\frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \frac{R_f}{R_3} v_3 + \dots \right) \quad (14.20)$$

Εξυπακούεται ότι, οι αντιστάτες $R_1, R_2, \dots, R_n$, μπορεί να αντικατασταθούν από εμπεδήσεις, οπότε, το κύκλωμα μετατρέπεται σε αθροιστή επιμέρους λειτουργιών.

β) Μη αντιστρέφων αθροιστής

Το κύκλωμα του σχ.14.7.β είναι ένας μη αντιστρέφων αθροιστής. Με επαλληλία προσδιορίζεται η έξοδος του κυκλώματος ως,

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{v_1}{2} + \frac{v_2}{2} \right) \quad (14.21)$$

Εδώ, πρέπει να προσέξουμε ότι, αν επιχειρήσουμε να αυξήσουμε τον αριθμό των εισόδων, κάθε νέα είσοδος επηρεάζει το ποσοστό των άλλων εισόδων και αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.

14.9 Μετατροπéας αρνητικής εμπεδήσης

Στην παράγραφο 11.10 γνωρίσαμε πως μπορούμε να δημιουργήσουμε αρνητικές εμπεδήσεις με χρήση θετικής ανατροφοδότησης. Το κύκλωμα, που προκύπτει αν αντικαταστήσουμε την ενισχυτική βαθμίδα του σχ.11.22 με έναν **TE**, δεικνύεται στο σχ.14.8.

Η εμπεδήση εισόδου του κυκλώματος προσδιορίζεται από τη σχέση,

$$Z_i = \frac{v_+}{i_1} \quad (14.22)$$

όπου,

$$i_1 = \frac{v_+ - v_o}{Z} \quad (14.23)$$

και

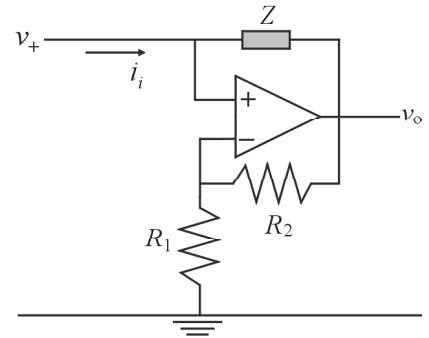
$$v_+ = v_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o \Rightarrow v_o = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) v_+ \quad (14.24)$$

Αντικαθιστώντας στην (14.22), προκύπτει,

$$Z_i = -\frac{R_1}{R_2} Z \quad (14.25)$$

Η (14.25) δηλώνει ότι, η εμπέδηση εισόδου του κυκλώματος του σχ.14.8 είναι αρνητική και ότι, το κύκλωμα λειτουργεί ως **μετατροπέας αρνητικής εμπέδησης**, (negative impedance converter). Στην περίπτωση, που η εμπέδηση αντικατασταθεί με αντιστάτη, τότε, η είσοδος του κυκλώματος του σχ.14.8, συμπεριφέρεται ως **αρνητικός αντιστάτης**, δηλαδή, ως κύκλωμα παροχής ενέργειας. Η φυσική αιτία αυτής της συμπεριφοράς είναι η θετική ανατροφοδότηση, που εφαρμόζεται μέσω της εμπέδησης Z .

Το κύκλωμα του σχ.14.8, αποτελεί το απλούστερο μέλος μιας οικογένειας παρόμοιων κυκλωμάτων. Τέτοια κυκλώματα χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση πολυπλοκότερων κυκλωμάτων αναλογικής επεξεργασίας σήματος.



Σχήμα 14.8 Μετατροπέας αρνητικής εμπέδησης.

14.10 Κυκλώματα ολοκληρωτών

α) Αντιστρέφων ολοκληρωτής

Το κλασικό κύκλωμα ενός αναστρέφοντα ολοκληρωτή, (inverting integrator), δεικνύεται στο σχ.14.9.

Η ανάλυση του κυκλώματος έχει ως εξής:

Επειδή στην είσοδο του ΤΕ δεν περνάει ρεύμα, (ιδανικός ενισχυτής),

ισχύει ότι,

$$i_i(t) = i_c(t)$$

ή

$$\frac{v_1(t)}{R} = -C \frac{dv_o(t)}{dt}$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει,

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_1(t) dt + C \quad (14.26)$$

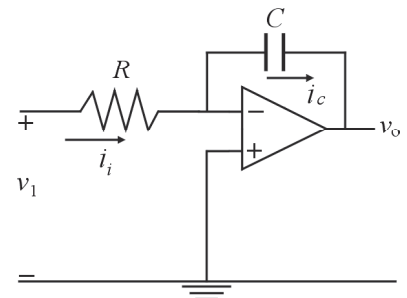
Η (14.26) εκφράζει την έξοδο του κυκλώματος συναρτήσει της εισόδου στο πεδίο των χρόνων.

Αν θέλουμε να προσδιορίσουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος, ανατρέχουμε στην (10.12), που δίνει την ενίσχυση αρνητικού ενισχυτή.

$$H(s) = \frac{V_o}{V_1} = -\frac{Z_C}{R} = -\frac{1}{RCs} \quad (14.27)$$

Η (14.27) προκύπτει επίσης από την (14.26), αν λάβουμε τον μετασχηματισμό Laplace αυτής, για μηδενικές αρχικές συνθήκες.

Ο ολοκληρωτής Miller δεν μπορεί να λειτουργήσει σε ανοικτό βρόχο, (όπως δεικνύεται στο σχ.14.9), διότι, ο πυκνωτής ανατροφοδότησης δεν επιτρέπει την ανατροφοδότηση συνεχούς. Στις περιπτώσεις αυτές τίθεται παράλληλα προς τον πυκνωτή μια αντίσταση πολύ μεγάλης τιμής. Το πρόβλημα αυτό δεν υφίσταται, όταν ο αντιστρέφων ολοκληρωτής βρίσκεται μέσα σε βρόχο, όπου υ-



Σχήμα 14.9 Ολοκληρωτής Miller.

πάρχει δρόμος ανατροφοδότησης του συνεχούς, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις ενεργών RC φίλτρων.

Πλήθος βελτιωμένων κυκλωμάτων ολοκληρωτών υπάρχει σήμερα στη βιβλιογραφία.

β) Μη αντιστρέφων ολοκληρωτής

Από τη θεωρία κυκλωμάτων γνωρίζουμε ότι, το βαθυπερατό κύκλωμα πρώτου βαθμού, που δεικνύεται στο σχ. 14.10.α, μπορεί να λειτουργήσει, προσεγγιστικά, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, ως κύκλωμα ολοκλήρωσης, (lossy integrator). Η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος του σχ.14.10.α, δίνεται από τη σχέση,

$$H_a(s) = \frac{1}{RCs + 1} \quad (14.28)$$

Συγκρίνοντας την (14.28) με την (14.27), που δίνει τη συνάρτηση πραγματικού ολοκληρωτή, παρατηρούμε ότι, υπάρχει στον παρονομαστή ο σταθερός όρος 1, που εκφράζει την κατανάλωση στο κύκλωμα. Για να αποφύγουμε την κατανάλωση αυτή, που δημιουργείται από την αντίσταση R , εισάγουμε μια αρνητική αντίσταση τιμής $-R$, όπως δεικνύεται στο σχ.14.10.β. Μετά την εισαγωγή της αντίστασης $-R$, ισχύει ότι,

$$i_R = i_C + i_{-R}$$

$$\text{ή} \quad \frac{v_s - v_o}{R} = i_C + \frac{v_o}{-R}$$

$$\text{οπότε,} \quad i_c = \frac{v_s}{R} \quad \text{όπου} \quad i_c = C \frac{dv_o}{dt}$$

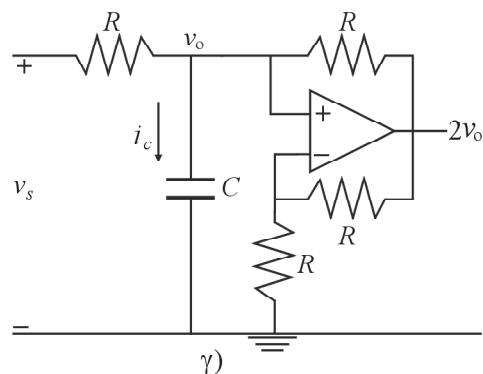
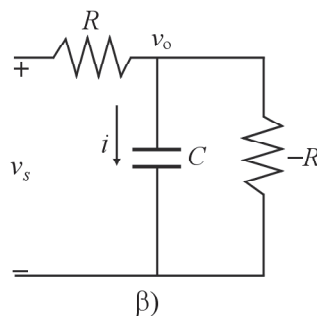
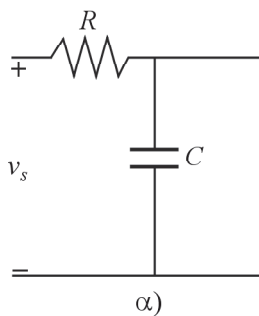
Επομένως, το ρεύμα δια του πυκνωτή καθίσταται ανάλογο της τάσης εισόδου, δηλαδή, έχουμε έναν **μετατροπέα τάσης σε ρεύμα**.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει,

$$v_o = \frac{1}{RC} \int v_s dt$$

Επομένως, η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος του σχ.14.10.β, θα δίνεται από τη σχέση,

$$H_b(s) = \frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{RCs} \quad (14.29)$$



Σχήμα 14.10 α) Παθητικός RC ολοκληρωτής με απώλειες, β) RC ολοκληρωτής χωρίς απώλειες, γ) Ενεργός RC μη αναστρέφων ολοκληρωτής Deboo.

Υλοποιώντας την αρνητική αντίσταση με το κύκλωμα μετατροπέα αρνητικής αντίστασης, που παρουσιάσαμε στην παράγραφο 14.9, δημιουργούμε τον ενεργό μη αντιστρέφοντα ολοκληρωτή, που δεικνύεται στο σχ.14.10.γ.

Το κύκλωμα του θετικού ολοκληρωτή δεν έχει το πρόβλημα της λειτουργίας στο συνεχές, όπως ο αντιστρέφον ολοκληρωτής, απαιτεί όμως ταίριασμα των τιμών των στοιχείων του. Για το λόγο αυτό, όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, η θετική ολοκλήρωση πραγματοποιείται με ένα αντιστρέφοντα ολοκληρωτή σε διαδοχή με έναν αντιστρέφοντα ενισχυτή.

14.11 Κύκλωμα διαφοριστή

Στο σχ.14.11 δεικνύεται το κύκλωμα του αντιστρέφοντα διαφοριστή, που πραγματοποιείται με ΤΕ.

Για να προσδιορίσουμε τη λειτουργία του κυκλώματος στο πεδίο των χρόνων, ξεκινάμε από τη σχέση των ρευμάτων στον πυκνωτή και τον αντιστάτη. Θεωρώντας τον ΤΕ ιδανικό, ισχύει ότι,

$$i_R = i_C \Rightarrow -\frac{v_o}{R} = C \frac{dv_s}{dt}$$

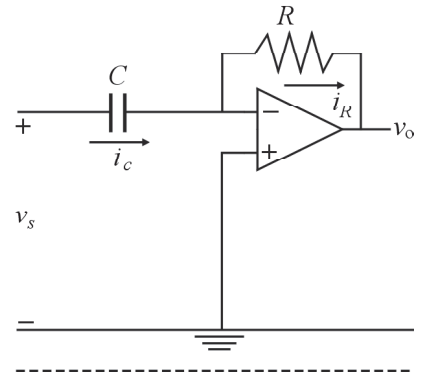
οπότε,

$$v_o = -RC \frac{dv_s}{dt} \quad (14.30)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος προκύπτει, σύμφωνα με τη σχέση (10.12), ως,

$$H(s) = \frac{V_o}{V_s} = -\frac{R}{Z_C} = -RCs \quad (14.31)$$

Η (14.31) προκύπτει επίσης αν λάβουμε το μετασχηματισμό Laplace της (14.30). Το κύκλωμα του διαφοριστή του σχ.14.11 παρουσιάζει προβλήματα στη λειτουργία του, σε σχέση με τη λειτουργία του στις υψηλές συχνότητες αλλά και τον θόρυβο.



Σχήμα 14.11 Κύκλωμα διαφοριστή.

14.12 Ενισχυτές διαφορικής εισόδου

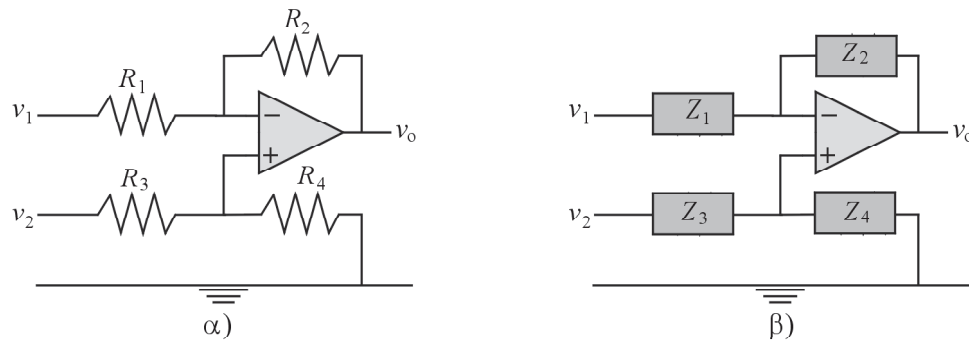
Σε προηγούμενη παράγραφο μελετήσαμε τον ενισχυτή διαφοράς, (differential input to single output converter), που απεικονίζεται ξανά στο σχ.14.12.α. Το χαρακτηριστικό αυτού του κυκλώματος είναι ότι, το κύκλωμα αντιστατών ανατροφοδότησης, που συνδέεται στον αντιστρέφοντα ακροδέκτη είναι ακριβώς όμοιο με το κύκλωμα, που συνδέεται στον μη αντιστρέφοντα ακροδέκτη. Την τοπολογία αυτή μπορούμε να τη γενικεύσουμε αντικαθιστώντας τους αντιστάτες με εμπεδήσεις, όπως δεικνύεται στο σχ.14.12.β.

Σύμφωνα με τη σχέση (14.18), η τάση εξόδου του ενισχυτή δίνεται από τη σχέση,

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1 \quad (14.32)$$

από την οποία, θεωρώντας,

$$R_1 = R_3 \text{ και } R_2 = R_4 \quad (14.33)$$



Σχ.14.12 Ενισχυτές διαφορικής εισόδου.

προκύπτει,
$$v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1) \quad (14.34)$$

Η ενίσχυση σημάτων κοινού τρόπου προσδιορίζεται, σύμφωνα με την (10.32), ως,

$$A_{CM} = \left. \frac{v_o}{v_1} \right|_{v_2=v_1} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)} \quad (14.35)$$

Αν δεχθούμε απόλυτο ταίριασμα των τιμών των στοιχείων, τότε, σύμφωνα με την (14.35), η ενίσχυση σημάτων κοινού τρόπου, θεωρητικά, μηδενίζεται. Επομένως, ο λόγος απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου γίνεται άπειρος.

Η **αντίσταση εισόδου** του ενισχυτή του σχ.14.12 έχει, γενικώς, μικρή τιμή. Με τον ενισχυτή του σχ.14.12.β. μπορούμε να πραγματοποιήσουμε διάφορες λειτουργίες, χρησιμοποιώντας διαφορικά ή απλά σήματα εισόδου. Οι απλούστερες αυτών των λειτουργιών, όταν $Z_1 = Z_3$ και $Z_2 = Z_4$, είναι:

α) Ενίσχυση διαφοράς τάσεων:

$$Z_1, Z_2 \text{ αντιστάτες } v_o = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1)$$

β) Ολοκλήρωση διαφοράς τάσεων:

$$Z_1 \text{ αντιστάτης, } Z_2 \text{ πυκνωτής, } v_o = \frac{1}{RC} \int (v_2 - v_1) dt$$

γ) Παραγωγή διαφοράς τάσεων:

$$Z_1 \text{ πυκνωτής, } Z_2 \text{ αντιστάτης, } v_o = RC \frac{d(v_2 - v_1)}{dt}$$

Εξυπακούεται ότι, γειώνοντας τη μια από τις δύο εισόδους, σύμφωνα με τις προηγούμενες σχέσεις, μπορούμε να επιτελέσουμε τη θετική ή την αρνητική λειτουργία.

Η τοπολογία του κυκλώματος του σχ.14.12.β είναι χρησιμότετη για την πραγματοποίηση ενισχυτών οργανολογίας καθώς και στη σύνθεση κυκλωμάτων, που πραγματοποιούν διάφορες συναρτήσεις.

14.13 Ενισχυτές διαφορικής εισόδου – διαφορικής εξόδου

Ο ενισχυτής του σχ.14.13 έχει τη δυνατότητα να ενισχύσει διαφορικά σήματα εισόδου και να παράσχει διαφορική έξοδο, (differential input to differential output converter). Επίσης η **αντίσταση εισόδου** της βαθμίδας είναι πολύ υψηλή, όπως

επίσης, ψηλός είναι και ο **λόγος απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου**. Το σήμα εξόδου της βαθμίδας δίνεται από τη σχέση,

$$v_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_3}{R_1}\right)v_2 - \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_3}{R_1}\right)v_1 \quad (14.36)$$

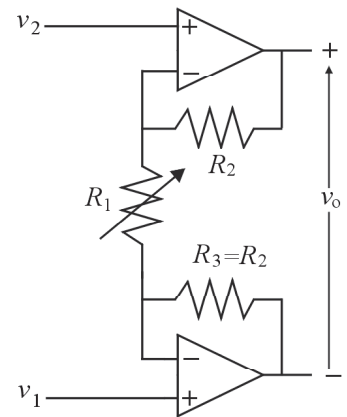
Σύμφωνα με την (14.36) και για $R_2 = R_3$, προσδιορίζεται η διαφορική ενίσχυση της βαθμίδας, ως,

$$A_d = \frac{v_o}{v_2 - v_1} = \left(1 + 2\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (14.37)$$

Επίσης, σύμφωνα με την (14.36), η ενίσχυση κοινού τρόπου του ενισχυτή είναι,

$$A_{CM} = \left.\frac{v_o}{v_1}\right|_{v_2=v_1} = 0 \quad (14.38)$$

Από την (14.38) συμπεραίνουμε ότι, η ενίσχυση κοινού τρόπου της βαθμίδας είναι μηδενική, ανεξάρτητα του αν υπάρχει ταίριασμα των τιμών των αντιστατών. Επομένως, θεωρητικά, ο λόγος απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου CMRR δεν επηρεάζεται από τις τιμές των αντιστατών και επομένως, δεν εξαρτάται από την διαφορική ενίσχυση του ενισχυτή, που ρυθμίζεται από την R_1 . Στην πράξη, ωστόσο, ο λόγος CMRR είναι της ίδιας τάξεως με το CMRR των τελεστικών ενισχυτών.



Σχήμα 14.13 Ενισχυτής διαφορικής εισόδου μεταβλητής ενίσχυσης.

14.14 Ενισχυτές οργανολογίας

Σε ορισμένες εφαρμογές, βιομηχανικές, βιοϊατρικές, σεισμολογικές κ.λ.π., όπου απαιτείται η ανάπτυξη διαφόρων οργάνων για τη μέτρηση ή καταγραφή φυσικών παραμέτρων, χρησιμοποιούνται ειδικοί ενισχυτές τάσης, γνωστοί ως ενισχυτές οργανολογίας (instrumentation amplifiers), οι οποίοι διαθέτουν σύνολο από ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Τα βασικά χαρακτηριστικά των ενισχυτών οργανολογίας είναι:

- α) Σταθερή διαφορική ενίσχυση τάσης, που συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 50 ~ 1000,
- β) Πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου,
- γ) Υψηλός λόγος απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου, CMRR, που κυμαίνεται μεταξύ 80~150 dB,
- δ) Χαμηλός θόρυβος.

Οι ενισχυτές οργανολογίας χρησιμοποιούνται, συνήθως, για την ενίσχυση και προετοιμασία σημάτων, (signal conditioning), που λαμβάνονται από αισθητήρες (sensors) διαφόρων τύπων, έτσι ώστε, αυτά να γίνουν κατάλληλα να τροφοδοτήσουν την είσοδο ψηφιακών μετατροπών αναλογικών σημάτων A/D. Η σημερινή τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων παρέχει, επίσης, τη δυνατότητα ενσωμάτωσης ορισμένου τύπου αισθητήρων στην ίδια ψηφίδα με τον ενισχυτή, δημιουργώντας, έτσι, τους ενεργούς αισθητήρες (active microsensors). Η υψηλή αντίσταση εισόδου των ενισχυτών οργανολογίας είναι απαραίτητη, ώστε, να μη

“φορτώνει” ο ενισχυτής τον αισθητήρα. Επίσης, επειδή τα παρεχόμενα από τους αισθητήρες σήματα είναι, συνήθως, εγκλωβισμένα σε ανεπιθύμητα σήματα παρεμβολών και θόρυβο, είναι απαραίτητο οι ενισχυτές οργανολογίας να έχουν υψηλό λόγο απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου.

Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι, τα βιοϊατρικά σήματα, που δημιουργούνται από την ηλεκτρική δραστηριότητα της καρδίας, είναι σε πλάτος μικρότερα των 50 μV , ενώ συνοδεύονται από σήματα παρεμβολών, που συχνά ξεπερνούν τα 100 mV. Αυτά τα σήματα μπορούν να αναδειχθούν εύκολα, για τη λήψη του ηλεκτροκαρδιογραφήματος, αν ως προενισχυτής χρησιμοποιηθεί ένας ενισχυτής οργανολογίας.

Στο σχ. 14.14 δεικνύεται ένας ενισχυτής οργανολογίας τριών τελεστικών ενισχυτών. Ο ενισχυτής συνίσταται από ακολουθία δύο βαθμίδων, που ήδη γνωρίσαμε προηγουμένως, χωρίς ολική ανατροφοδότηση μεταξύ τους. Η βαθμίδα εισόδου είναι ένας ενισχυτής διαφορικής ενίσχυσης και η βαθμίδα εξόδου είναι ένας ενισχυτής διαφοράς.

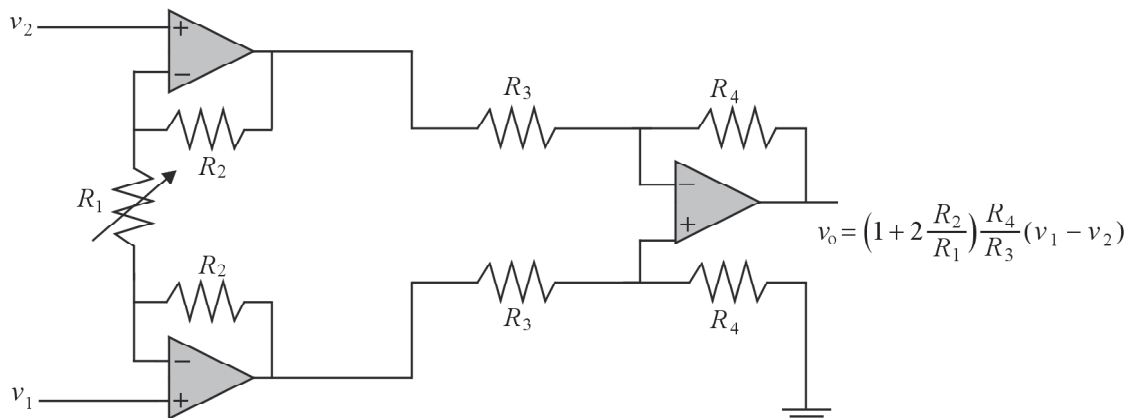
Η βαθμίδα εισόδου εξασφαλίζει στον ενισχυτή υψηλή αντίσταση εισόδου, υψηλό CMRR και δυνατότητα ρύθμισης της διαφορικής ενίσχυσης με μια μόνο αντίσταση. Η βαθμίδα εξόδου παρέχει τη δυνατότητα λήψης απλής εξόδου, (μη διαφορικής), και συνεισφέρει στην διαφορική ενίσχυση τάσης του ενισχυτή και στον λόγο CMRR.

Η έξοδος του ενισχυτή προσδιορίζεται από τη σχέση,

$$v_o = \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3} (v_1 - v_2) \quad (14.39)$$

Ο λόγος απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου καθορίζεται τόσο από το CMRR των δύο TE ενισχυτών εισόδου όσο και από το ταίριασμα των τιμών των αντιστατών της βαθμίδας εξόδου. Οι τιμές CMRR, που μπορεί να επιτευχθούν με ενισχυτές οργανολογίας τριών TE, κυμαίνονται μεταξύ 90~100 dB, εφόσον χρησιμοποιηθούν κατάλληλα επιλεγμένοι TE. Στους καταλόγους, που παρέχουν οι κατασκευαστές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, μπορεί επίσης, να βρει κανείς ειδικούς ενισχυτές οργανολογίας, που δεν βασίζονται σε δομές τελεστικών ενισχυτών.

Οι ενισχυτές αυτοί εμφανίζουν λόγο απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου μέχρι 150 dB.



Σχήμα 14.14 Ενισχυτής οργανολογίας τριών TE.

Παράδειγμα 14.1

Ενισχυτής οργανολογίας.

Το κύκλωμα του σχ.14.15 είναι ένας ενισχυτής οργανολογίας, σχεδιασμένος για να πραγματοποιεί διαφορική ενίσχυση, με χρήση τριών TE uA741.

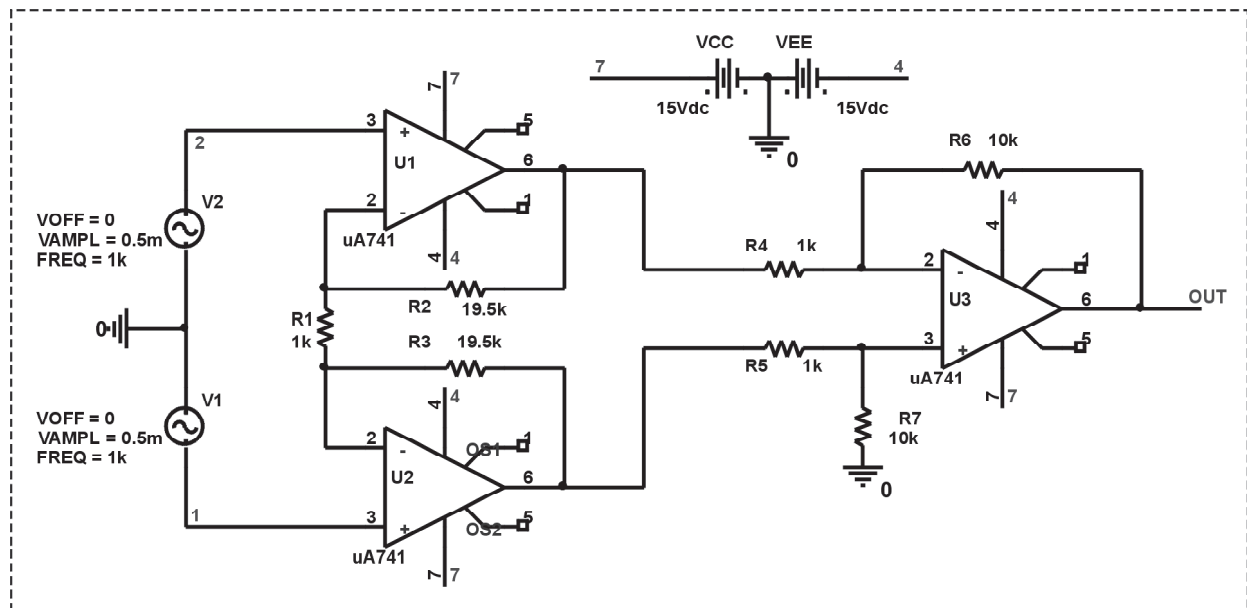
$$A_d = \frac{V_{OUT}}{V_1 - V_2} \bigg|_{V_1=V_2} = 400$$

Ο σχεδιασμός του ενισχυτή έγινε με βάση τη σχέση (14.39). Μετά από εξομοίωση με το SPICE, βρέθηκε να πραγματοποιείται η επιθυμητή ενίσχυση με μεγάλη ακρίβεια. Ταυτόχρονα, προσδιορίστηκε η ενίσχυση κοινού τρόπου του ενισχυτή και βρέθηκε,

$$A_{CM} = \frac{V_{OUT}}{V_1 - V_2} \bigg|_{V_1=V_2} = 150 \cdot 10^{-6}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προσδιορίζεται ο λόγος απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου, ως,

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{CM}} = 128 \text{ dB}$$



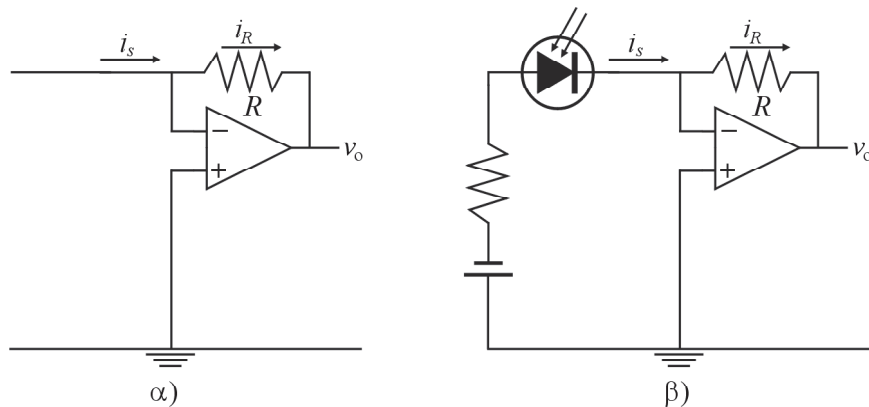
Σχήμα 14.15 Ενισχυτής οργανολογίας.

14.15 Μετατροπéας ρεύματος σε τάση

Το κύκλωμα του σχ.14.16.α μετατρέπει μια πηγή ρεύματος με μεγάλη εσωτερική αντίσταση, σε μια πηγή τάσης, με μικρή εσωτερική αντίσταση. Πρόκειται, δηλαδή, για έναν ενισχυτή διεμπέδησης, (transimpedance amplifier), που λειτουργεί ως μετατροπéας ρεύματος σε τάση, (current to voltage converter). Η τάση στην έξοδο του κυκλώματος είναι,

$$v_o = -i_R R \quad \Rightarrow \quad v_o = -i_s R \quad (14.40)$$

Με άλλα λόγια, η τάση, στην έξοδο του κυκλώματος, είναι ανάλογη του ρεύ-



Σχήμα 14.16 α) Μετατροπέας ρεύματος σε τάση, β) Ενισχυτής ρεύματος φωτοδιόδου.

ματος στην είσοδο, ενώ η αντίσταση εξόδου είναι σχεδόν μηδενική.

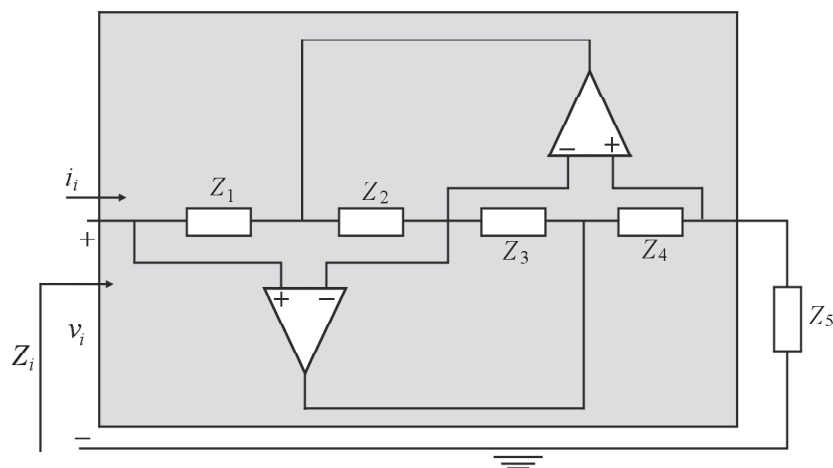
Ένα τέτοιο κύκλωμα συχνά χρησιμοποιείται για την ενίσχυση του ρεύματος φωτοδίοδων, όπως δεικνύεται στο σχ.14.16.β.

Με βάση την τοπολογία του κυκλώματος του σχ.14.16.α, μπορούμε να επανεξετάσουμε τον ενισχυτή διαφοράς του σχ.14.11 και να συμπεράνουμε ότι, όταν το ρεύμα εισόδου ενισχυτή διεμπέδησης διέρχεται μέσω πυκνωτή, τότε, η τάση στην έξοδο είναι το διαφορικό της τάσης εισόδου.

14.16 Μετατροπείς εμπεδήσεων

Στην παράγραφο 14.9 γνωρίσαμε τον μετατροπέα αρνητικής εμπεδήσης. Υπάρχει μια τεράστια οικογένεια κυκλωμάτων στη βιβλιογραφία, κάτω από τον τίτλο **γενικοί μετατροπείς εμπεδήσεων**, (General Impedance Converters, GIC's).

Τα κυκλώματα αυτά χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως υποκυκλώματα για την πραγματοποίηση πιο σύνθετων κυκλωμάτων κατάλληλων για την επεξεργασία αναλογικών σημάτων, όπως κυκλωμάτων επιλογής συχνοτήτων, (filters) και ισοσταθμιστών σήματος, (equalisers). Στο σχ.14.17, στο πλαίσιο, δεικνύεται το κλασικότερο κύκλωμα μετατροπέα θετικής εμπεδήσης, (Positive Impedance Converter), που τερματίζεται στην εμπεδήση Z_5 .



Σχήμα 14.17 Μετατροπέας θετικής εμπεδήσης, Αντωνίου.

