

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

Σ' αυτήν την εργασία μελετάται η λειτουργία του Τελεστικού Ενισχυτή (Operational Amplifier).

**ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ**

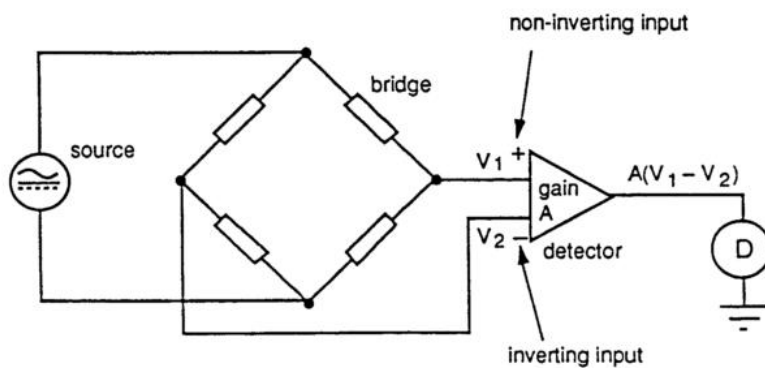
Περιγραφή	Ποσότητα
Μονάδα μετρήσεων TK2941M	1
Τροφοδοτικό, $\pm 15V$ dc	1
Ψηφιακά πολύμετρα ( DMM)	2

**ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ**

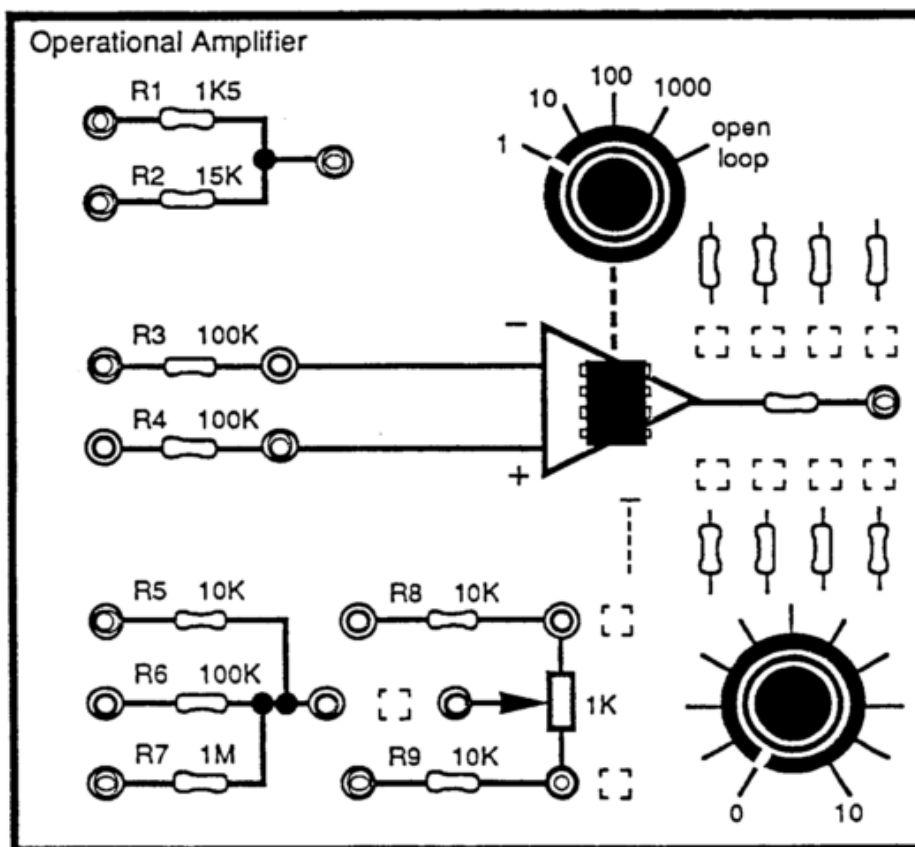
- 5.1 Ο Βασικός Τελεστικός Ενισχυτής
- 5.2 Ενίσχυση Κοινής Εισόδου

**ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

- Να κατανοήσουμε τη λειτουργία του βασικού τελεστικού ενισχυτή.
- Να μάθουμε πως να συνδεσμολογούμε έναν τελεστικό ενισχυτή για να λειτουργεί σαν ενισχυτής τάσης.
- Να καταλάβουμε τους όρους «διαφορική ενίσχυση» και «ενίσχυση κοινού σήματος».



Εικ. 4.5.1



Εικ. 4.5.2 Η μονάδα του Τελεστικού Ενισχυτή

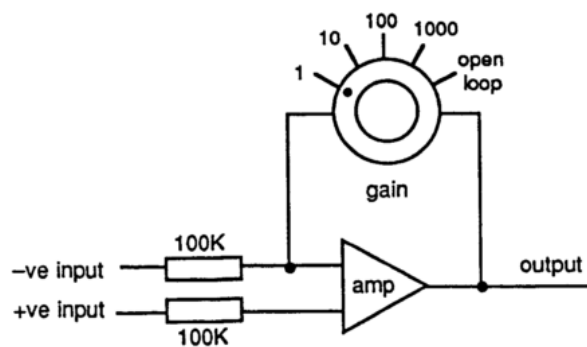
## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έξοδος ενός κυκλώματος Γέφυρας Wheatstone είναι η τάση μεταξύ της επαφής των κλάδων του λόγου και της επαφής της πρότυπης με την άγνωστη αντίσταση. Όταν συνδέεται ένας ανιχνευτής μεταξύ αυτών των δύο σημείων, ένα ρεύμα ρέει από μέσα του, του οποίου η ένταση εξαρτάται από το πόσο η γέφυρα είναι εκτός ισορροπίας και από τους παράγοντες που καθορίζουν την ευαισθησία.

Για να πάρουμε μεγαλύτερη ευαισθησία με μια ορισμένη γέφυρα και έναν ορισμένο ανιχνευτή, είναι δυνατόν να ενισχύσουμε την τάση εξόδου της γέφυρας, χρησιμοποιώντας έναν ενισχυτή με διαφορική είσοδο<sup>1</sup> και, στη συνέχεια, να εφαρμόσουμε αυτήν την ενισχυμένη τάση στον ανιχνευτή. Ο ενισχυτής θα μετατρέπει τις μικρές τάσεις εισόδου σε μια πολύ μεγαλύτερη τάση στα άκρα του ανιχνευτή, οπότε, η ευαισθησία του συστήματος θα αυξηθεί σημαντικά. Αυτό δείχνεται στην Εικ. 4.5.1.

Πρώτα, ας εξετάσουμε τον Τελεστικό Ενισχυτή στη Μονάδα TK2941A, που δείχνεται στην Εικ. 4.5.2.

Το κύριο τμήμα του κυκλώματος, που κάνει την ενίσχυση, είναι αυτό που δείχνεται στην Εικ. 4.5.3. Περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή με διαφορική είσοδο. Η ενίσχυση (gain) καθορίζεται από εξαρτήματα που βρίσκονται εξωτερικά του ολοκληρωμένου κυκλώματος και ρυθμίζεται από τον περιστροφικό διακόπτη πάνω στην πλακέτα.



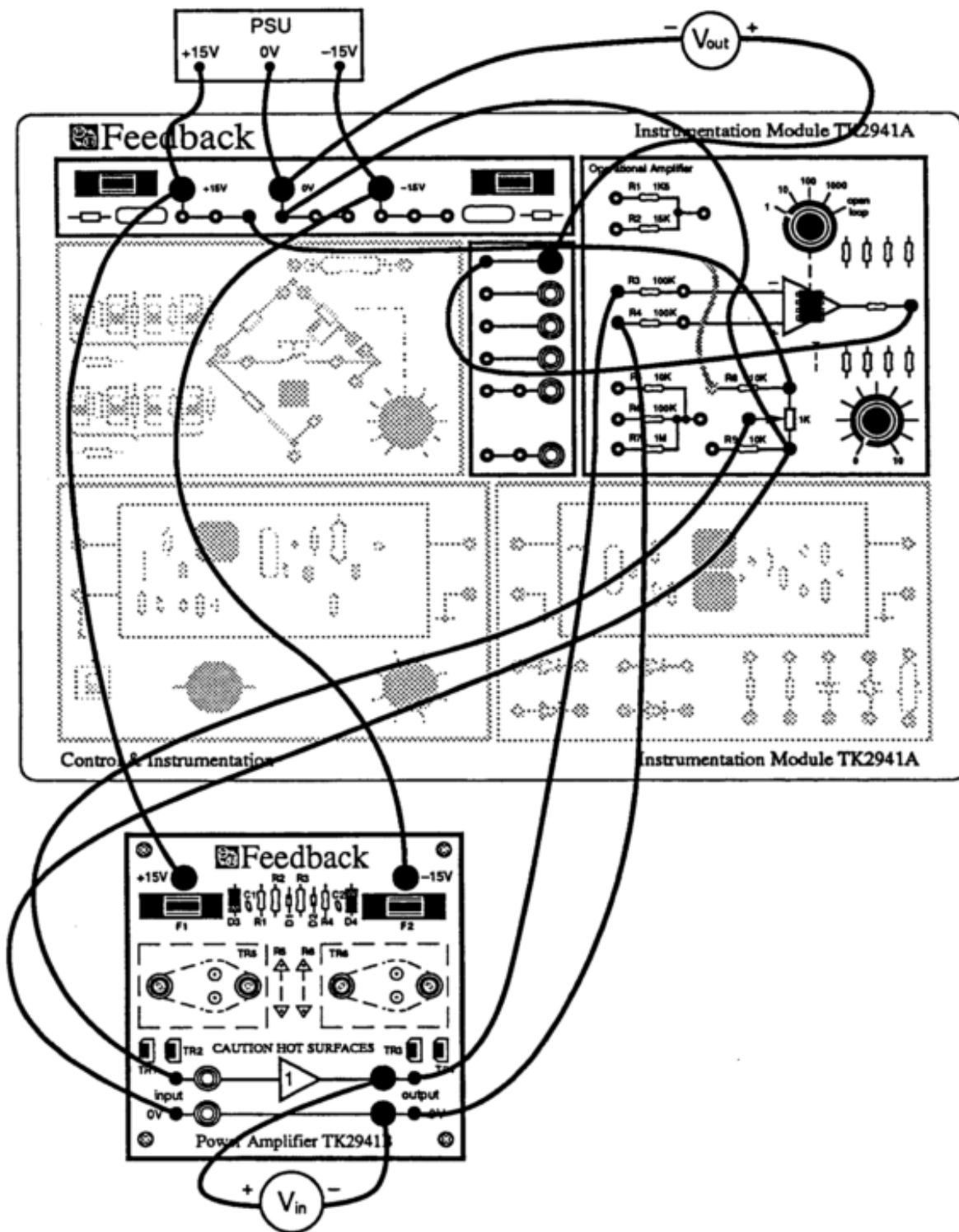
Εικ. 4.5.3 Το κύριο τμήμα του ενισχυτή

<sup>1</sup> Διαφορική είσοδος σημαίνει τη διαφορά της τάσης μεταξύ δύο ακροδεκτών της εισόδου του ενισχυτή.

ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 5.1

Ο Βασικός Τελεστικός Ενισχυτής (Operational Amplifier ή Op Amp)

Συνδεσμολογήστε το κύκλωμα, όπως φαίνεται στην Εικ. 4.5.4.



Εικ. 4.5.4 Διάγραμμα συνδέσεων

Γυρίστε τον περιστροφικό διακόπτη του ποτενσιόμετρου στο μηδέν.

Βάλτε τον περιστροφικό διακόπτη της ενίσχυσης του ενισχυτή στην θέση 1.

Ανάψτε το τροφοδοτικό.

Με τη μεταβλητή dc τάση εισόδου στον ενισχυτή στο μηδέν, μετρήστε την τάση εξόδου του ενισχυτή. Καταγράψτε την τιμή που παρατηρείτε σε ένα δικό σας αντίγραφο του πίνακα της Εικ. 4.5.5.

Αργά, αυξήστε τη μεταβλητή dc τάση μεταξύ των δύο ακροδεκτών εισόδου στο 1V. Καταγράψτε την τάση εξόδου του ενισχυτή.

Επαναλάβετε για τάσεις 2, 3 και 4V dc στην είσοδο.

Ξαναφέρετε το διακόπτη του ποτενσιόμετρου στο μηδέν και αντιστρέψτε τις συνδέσεις στους ακροδέκτες εισόδου του ενισχυτή για να επιτευχθούν αρνητικές τιμές τάσης εισόδου.

Επαναλάβετε το πείραμα και καταγράψτε τα αποτελέσματά σας στον πίνακά σας.

Τάση στους ακροδέκτες εισόδου $V_{in}$ (V)	Θέση διακόπτη ενίσχυσης (Gain)	Τάση στους ακροδέκτες εξόδου $V_{out}$ (V)
0	1	
1	1	
2	1	
3	1	
4	1	
-1	1	
-2	1	
-3	1	
-4	1	

Εικ. 4.5.5 Καταγραφή των αποτελεσμάτων

**Ερώτηση 5.1** Ποιά είναι η σχέση μεταξύ των τάσεων εισόδου και εξόδου;

**Ερώτηση 5.2** Τι συμβαίνει στην τάση εξόδου, όταν αντιστρέφεται η τάση εισόδου;

Σβήστε το τροφοδοτικό, μηδενίστε το ποτενσιόμετρο δίπλα στο τελεστικό ενισχυτή και μεταφέρετε τη σύνδεση από τον ακροδέκτη +15V, που φαίνεται γκρι στην Εικ. 4.5.4, στο άλλο άκρο της R8. Επίσης, επαναφέρετε τις συνδέσεις στους ακροδέκτες εισόδου του ενισχυτή για να επιτευχθούν θετικές τιμές τάσης εισόδου.

Ανοίξτε το τροφοδοτικό.

Βάλτε τον περιστροφικό διακόπτη της ενίσχυσης του ενισχυτή στο 10.

Με το ποτενσιόμετρο γυρισμένο να δίνει είσοδο 0V, μετρήστε την τάση εξόδου. Καταγράψτε την ένδειξη σε ένα δικό σας αντίγραφο του πίνακα, όπως της Εικ. 4.5.6.

Τάση εισόδου (V)	Θέση διακόπτη ενίσχυσης (Gain)	Τάση εξόδου (V)
0	10	
0.5	10	
1.0	10	
0	10	
-0.5	10	
-1.0	10	
0	100	
0.05	100	
0.1	100	
0	100	
-0.05	100	
-0.1	100	

Εικ. 4.5.6 Καταγραφή των αποτελεσμάτων

Βάλτε το ποτενσιόμετρο να δίνει 0.5V τάση εισόδου και μετρήστε την τάση εξόδου.

Επαναλάβετε για 1V και, επίσης, για 0, 0.5V και 1V με τις συνδέσεις εισόδου αντεστραμμένες.

Επαναλάβετε την προηγούμενη διαδικασία με τάσεις εισόδου 0, 0.05 και 0.1V, με τον περιστροφικό διακόπτη της ενίσχυσης στο 100.

**Ερώτηση 5.3 Έχει η τάση εξόδου την ίδια σχέση με την τάση εισόδου, όπως πριν;**

**Ερώτηση 5.4 Πως σχετίζονται;**

Πρέπει να βρείτε ότι η τάση μεταξύ του ακροδέκτη εξόδου και της γείωσης είναι ανάλογη της τάσης μεταξύ των δύο ακροδεκτών εισόδου και ότι η σταθερά αναλογίας τίθεται από τη θέση του περιστροφικού διακόπτη ενίσχυσης του ενισχυτή.

Θα πρέπει, επίσης, να έχετε βρει ότι αντιστρέφοντας τις δύο εισόδους, αντιστρέφεται η πολικότητα της τάσης εξόδου.

**Ερώτηση 5.5 Ποιά τάση μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου δίνει τάση εξόδου μηδέν volts;**

**Ερώτηση 5.6 Αν ένας τέτοιος ενισχυτής χρησιμοποιηθεί με μια γέφυρα σε ένα κύκλωμα, όπως αυτό της Εικ. 4.5.1, ποιά θα είναι η ένδειξη του οργάνου, όταν ισορροπήσει η γέφυρα;**

**Ερώτηση 5.7** Αν, ας πούμε, η ενίσχυση στον ενισχυτή είναι 10 και η γέφυρα είναι ελαφρά εκτός ισορροπίας, ούτως ώστε η τάση μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου στον ενισχυτή είναι 10mV, ποιά θα είναι η τιμή της τάσης στα άκρα του οργάνου;

**Ερώτηση 5.8** Ο ενισχυτής αυξάνει ή μειώνει την ευαισθησία της γέφυρας;

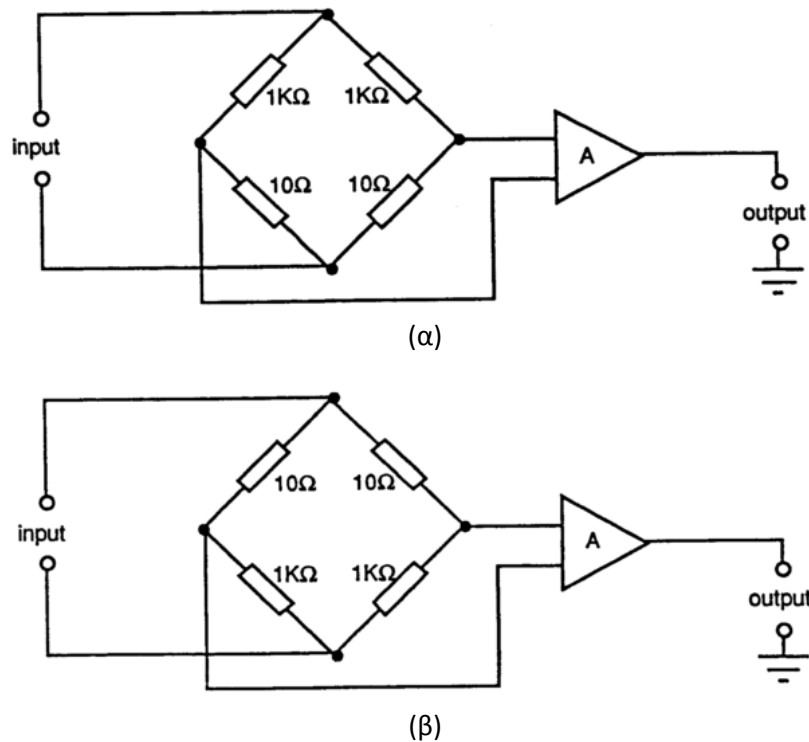
Επομένως, ένας ενισχυτής, που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί με ένα κύκλωμα γέφυρας, πρέπει να έχει διαφορικές εισόδους. Η ευαισθησία του κυκλώματος γέφυρας-ενισχυτή, σαν σύνολο, θα είναι μεγαλύτερη από την ευαισθησία της γέφυρας μόνης της κατά τον παράγοντα της διαφορικής ενίσχυσης του ενισχυτή.

Ας δούμε, τώρα, αν υπάρχουν άλλες απαιτήσεις γι' αυτόν τον ενισχυτή.

Θεωρήστε το κύκλωμα της Εικ. 4.5.7(α). Αυτό αντιπροσωπεύει μια πιθανή κατάσταση για ένα κύκλωμα γέφυρας.

**Ερώτηση 5.9** Είναι η γέφυρα ισορροπημένη;

**Ερώτηση 5.10** Ποιά θα είναι η τάση εξόδου (output);



Εικ. 4.5.7

**Ερώτηση 5.11** Αν και η τάση μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου του ενισχυτή είναι μηδέν, ποια είναι η διαφορά τάσης μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου του ενισχυτή και της γείωσης αν, για παράδειγμα, η τάση εισόδου της γέφυρας (input) είναι 10V;

Τώρα, θεωρήστε το κύκλωμα της Εικ. 4.5.7(β).

**Ερώτηση 5.12** Είναι ισορροπημένη αυτή η γέφυρα;

**Ερώτηση 5.13** Ποιά θα είναι η τάση εξόδου (output);

**Ερώτηση 5.14** Ποιά είναι η τάση μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου του ενισχυτή και της γείωσης για μια τάση εισόδου στη γέφυρα των 10 Volts;

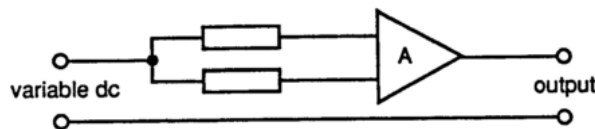
Επομένως, βλέπουμε ότι η τάση εξόδου του ενισχυτή πρέπει να παραμένει σταθερή, ανεξάρτητη από την τιμή της κοινής τάσης<sup>2</sup> στους ακροδέκτες εισόδου του. Η δυνατότητα αυτή του τελεστικού ενισχυτή καθορίζεται από τον παράγοντα που καλείται «ενίσχυση κοινής εισόδου»<sup>3</sup> και πρέπει, σε έναν καλό ενισχυτή, να είναι πολύ μικρή (δηλαδή, πρέπει ο ενισχυτής να ενισχύει μόνο τη διαφορά των τάσεων μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου του και όχι την τάση που είναι κοινή και στους δύο ακροδέκτες, η οποία πάντα συνδέεται με ανεπιθύμητες πηγές του κυκλώματος).

## ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 5.2

### Ενίσχυση Κοινής Εισόδου (Common Mode Gain)

Ας εξετάσουμε την ενίσχυση κοινής εισόδου του τελεστικού ενισχυτή μας.

Βεβαιωθείτε ότι η μεταβλητή dc τάση είναι μηδέν και συνδεσμολογήστε το κύκλωμα της Εικ. 4.5.8. Βάλτε την ενίσχυση του ενισχυτή στο 1. Επαναφέρετε το γκρι καλώδιο στο δεξιό άκρο της R8.



Εικ. 4.5.8 Ενισχυτής κοινής εισόδου

Μετρήστε την τάση εξόδου και καταχωρήστε την σε ένα δικό σας αντίγραφο ενός πίνακα, όπως αυτός της Εικ. 4.5.9.

Επαναλάβετε τη διαδικασία για μεταβλητές dc εισόδους των 2V, 4V, 6V, 8V και 10V.

Ξαναβάλτε τη μεταβλητή dc τάση στο μηδέν και αλλάξτε την ενίσχυση στο 10. Επαναλάβετε την παραπάνω διαδικασία για μια είσοδο των 10V και καταχωρήστε τα αποτελέσματά σας.

Πάρτε μετρήσεις, όπως παραπάνω, για ενισχύσεις 100 και 1000.

**Ερώτηση 5.15** Αντιστοιχούν οι μετρήσεις σας της τάσης εξόδου στις αναμενόμενες τιμές;

**Ερώτηση 5.16** Επηρεάζει η τιμή της ενίσχυσης την έξοδο;

**Ερώτηση 5.17** Βρίσκετε ότι ο ενισχυτής είναι καλός ή κακός όσον αφορά την ενίσχυση κοινής εισόδου;

<sup>2</sup> Η τάση, που είναι κοινή στους δύο ακροδέκτες του τελεστικού ενισχυτή, ονομάζεται «common mode».

<sup>3</sup> Ενίσχυση κοινής εισόδου (ή ενίσχυση κοινού τρόπου) = common mode gain.



Ενίσχυση	Τάση κοινής εισόδου (V)	Τάση εξόδου (V)
1	0	
	2	
	4	
	6	
	8	
	10	
10	0	
	10	
100	0	
	10	
1000	0	
	10	

Επειδή η μεταβολή της τάσης εξόδου είναι πολύ μικρή για μεγάλες μεταβολές της κοινής τάσης στην είσοδο, ο τελεστικός ενισχυτής είναι κατάλληλος για χρήση σαν ενισχυτής γέφυρας. Η ιδιότητα αυτή αρκετές φορές εκφράζεται με τον αντίθετο όρο, δηλαδή, σαν «απόρριψη κοινής εισόδου» (common mode rejection). Η τιμή της, για έναν καλό ενισχυτή, πρέπει να είναι πολύ μεγάλη.

## ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ

Ένας ενισχυτής, που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα για να αυξήσει την ευαισθησία ενός μετατροπέα, πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες προδιαγραφές. Εκτός από το να παρέχει την απαιτούμενη ενίσχυση, πρέπει να έχει εξαιρετική σταθερότητα τόσο στην ενίσχυση όσο και στην τάση εξόδου, ενώ η παραμόρφωση, που εισάγει, πρέπει να αμελητέα. Πρέπει, επίσης, να έχει μια αρκετά μικρή αντίσταση εξόδου, τόσο που, να επιτρέπει τη σύνδεση κάποιου απαιτούμενου φορτίου (στην έξοδό του) χωρίς να διαταράσσεται η έξοδός του. Πρέπει, επιπλέον, να έχει ευρεία δυναμική κλίμακα<sup>4</sup> και μεγάλο λόγο απόρριψης κοινής εισόδου (Common Mode Rejection Ratio - CMRR), δηλαδή, χαμηλή ενίσχυση κοινής εισόδου.

Πολύ συχνά, χρησιμοποιείται ένας τύπος κυκλώματος τελεστικού ενισχυτή σαν ενισχυτής σήματος του μετατροπέα. Η θεωρία αυτού του τύπου κυκλώματος μπορεί να βρεθεί σε πολλά βιβλία ηλεκτρονικών. Σε γενικές γραμμές, ο ενισχυτής αυτός περιλαμβάνει μια μονάδα υψηλής ενίσχυσης με διαφορικές εισόδους. Η

<sup>4</sup> Δυναμική κλίμακα (dynamic range) ενός ενισχυτή είναι η ο λόγος της μέγιστης τάσης ( $V_{MAX}$ ), που μπορεί να δεχθεί στην είσοδό του, προς την ελάχιστη μεταβολή τάσης ( $V_{MIN}$ ), που μπορεί να ανιχνεύσει. Για παράδειγμα, ένας ενισχυτής με δυναμική κλίμακα  $10^5:1$  ή  $100000:1$  μπορεί να ενισχύσει μεταβολή ενός σήματος του 1V στην είσοδό του κατά  $10^{-5}V = 10\mu V$ . Συχνά, η δυναμική κλίμακα μετριέται σε decibel ( $dB = 20 \cdot \log \frac{V_{MAX}}{V_{MIN}}$ ): δυναμική κλίμακα  $10^5:1$  σημαίνει 100dB.

αντίσταση εισόδου (input impedance) του βασικού ενισχυτή είναι όσο γίνεται πλησιέστερα στο άπειρο και η αντίσταση εξόδου του (output impedance) πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο μηδέν.

Η διαφορική ενίσχυση του ενισχυτή πρέπει να είναι εξαιρετικά υψηλή και η ενίσχυση κοινής εισόδου του όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Με έναν τέτοιο ενισχυτή, βλ. Εικ. 4.5.10(α), η ενίσχυση μπορεί να ρυθμιστεί στην τιμή που χρειάζεται για τον κάθε μετατροπέα συνδέοντας εξωτερικές αντιστάσεις εισόδου ( $R_i$ ) και ανάδρασης ( $R_f$ ), όπως δείχνεται στην Εικ. 4.5.10(β).

Για το κύκλωμα της Εικ. 4.5.10(β), η διαφορική ενίσχυση δίνεται από την έκφραση:

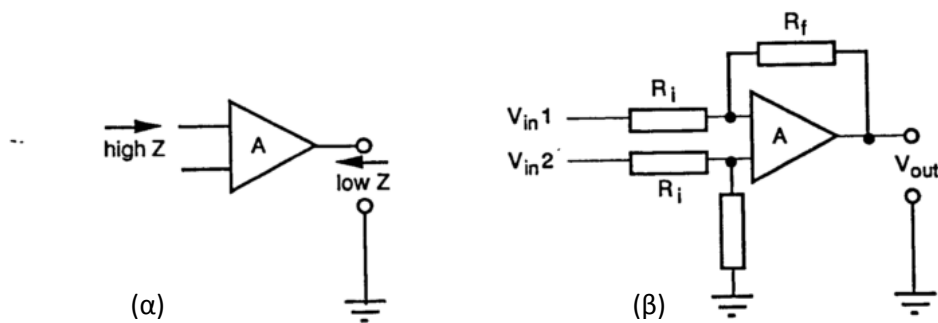
$$V_{out} = \frac{R_f}{R_i} (V_{in2} - V_{in1})$$

δηλαδή

$$\frac{V_{out}}{V_{in2} - V_{in1}} = \frac{R_f}{R_i}$$

Και, επομένως, η ενίσχυση προσδιορίζεται από την επιλογή των αντιστάσεων  $R_i$  και  $R_f$ .

Λεπτομερέστερη ανάλυση δίνεται στο Παράρτημα Δ.



Εικ. 4.5.10 Διαφορική ενίσχυση