

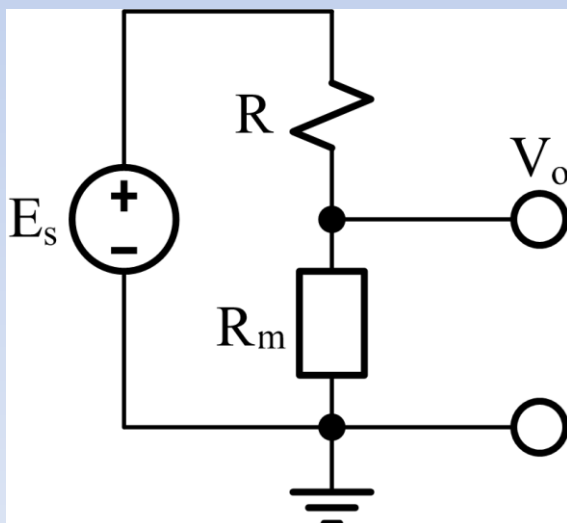
Μέρος 2^ο (*)

ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

(*) Αντιστοιχεί στο κεφάλαιο 15 του βιβλίου των Κ. Καλαϊτζάκη και Ε. Κουτρούλη
“Ηλεκτρικές μετρήσεις και αισθητήρες: Αρχές λειτουργίας και σχεδιασμός των
ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης” „

Διαιρέτης τάσης για αισθητήρες αντίστασης

- Πολλοί αισθητήρες, όπως οι αισθητήρες αντίστασης, δεν βγάζουν άμεσα τάση στην έξοδό τους.
- Η τιμή της αντίστασής τους μεταβάλλεται ανάλογα με το μέγεθος που μετρούν (π.χ., θερμοκρασία)
- Χρησιμοποιούμε ένα κύκλωμα **διαιρέτη τάσης (voltage divider)** για να μετατρέψουμε την αντίσταση (R_m) του αισθητήρα σε ηλεκτρικό σήμα (V_o συμβολίζει την τάση εξόδου)

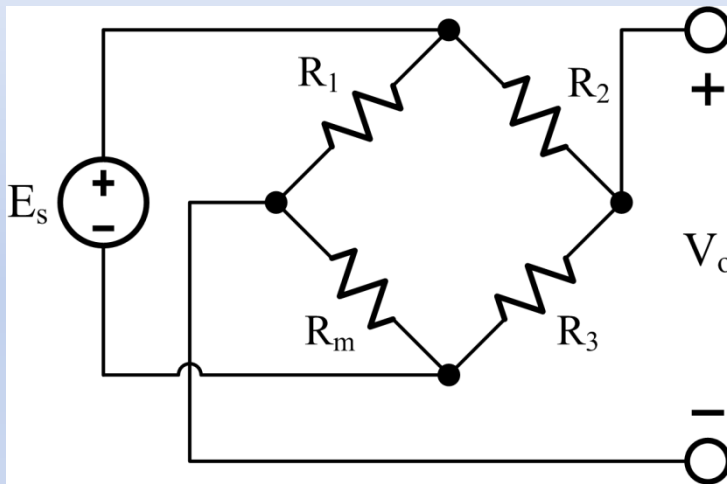


$$V_o = \frac{R_m}{R + R_m} E_s$$

$$\text{Αν } R \gg R_m, \quad V_o = \frac{R_m}{R} E_s$$

Γέφυρα Wheatstone γενικά

- Η **γέφυρα Wheatstone (Wheatstone bridge)** συνιστά μια βελτιωμένη τεχνική (σε σχέση με το διαιρέτη τάσης) για τη μέτρηση της ωμικής αντίστασης ενός αισθητήρα.



$$V_o = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{R_m}{R_m + R_1} \right) E_s$$

Πρόβλημα: Αποδείξτε την παραπάνω σχέση για την τάση εξόδου V_o της γέφυρας Wheatstone.

Γέφυρα Wheatstone για αισθητήρες αντίστασης

- Συνδέουμε τον αισθητήρα (π.χ., RTD ή πιεζοαντίσταση) με αντίσταση R_m στον ένα κλάδο της γέφυρας

- $R_m = R_0 + \Delta R$

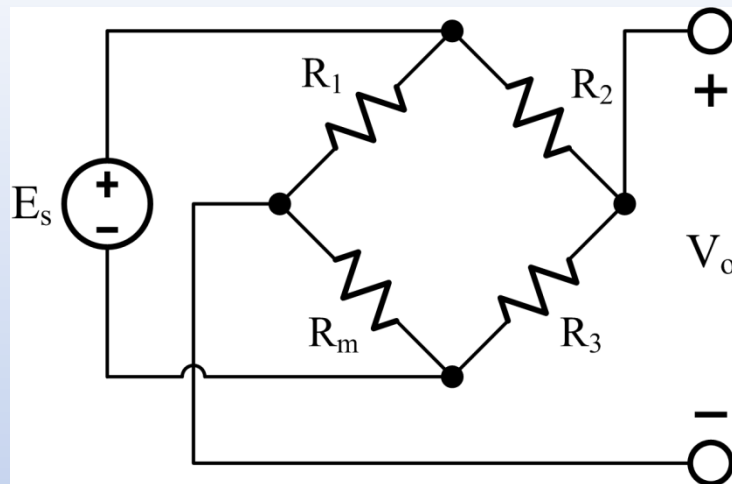
όπου, R_0 η (αρχική) τιμή της αντίστασης του αισθητήρα (π.χ., η αντίσταση σε $\theta = 0^\circ\text{C}$)

και ΔR η μεταβολή της αντίστασης (π.χ., με τη μεταβολή της θερμοκρασίας)

- Επιλέγοντας $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$, η τάση εξόδου V_o της γέφυρας δίνεται από τη σχέση

$$V_o = -\frac{E_s}{4} \cdot \delta$$

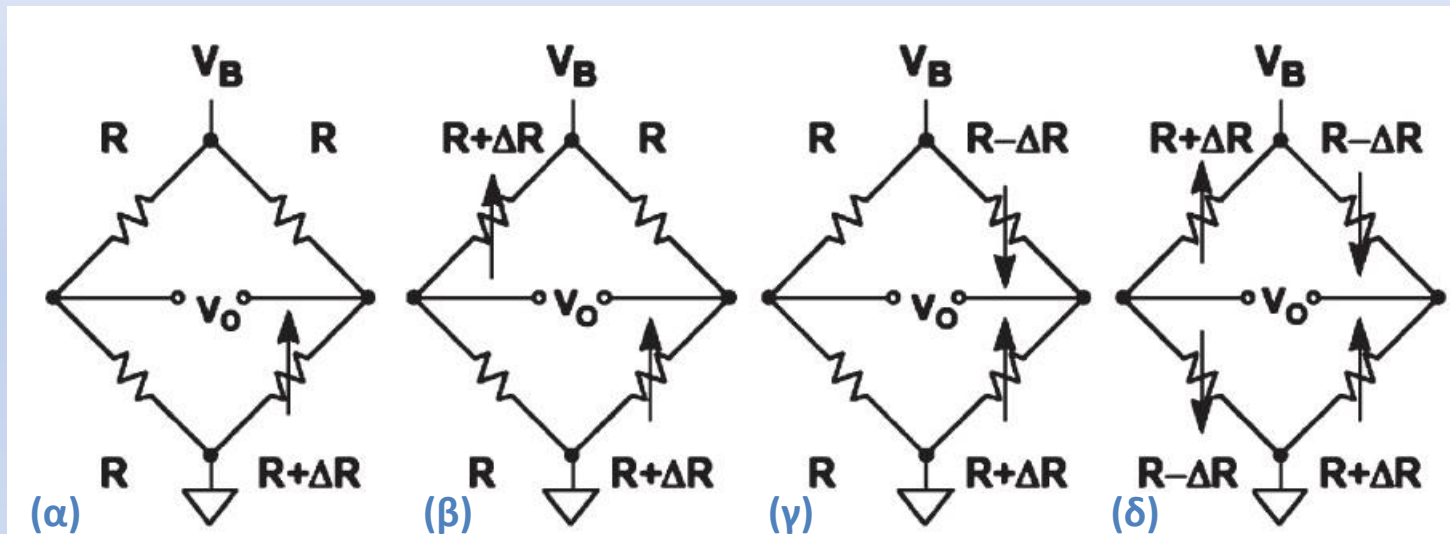
όπου $\delta = \frac{\Delta R}{R_0}$ είναι η σχετική μεταβολή της αντίστασης του αισθητήρα (π.χ., $\delta = 0.385\%/^\circ\text{C}$ για αισθητήρα θερμοκρασίας RTD πλατίνας)



Πρόβλημα: Αποδείξτε την παραπάνω σχέση για την τάση εξόδου V_o της γέφυρας Wheatstone με αισθητήρα αντίστασης.

Διατάξεις Γέφυρας με Τροφοδοσία Τάσης (V_B)

- Σε πολλές εφαρμογές γεφυρών, μπορεί να υπάρχουν δύο ή τέσσερις αισθητήρες συνδεδεμένοι των οποίων η αντίσταση μεταβάλλεται.
- Οι τέσσερις πιο συνηθισμένες διατάξεις φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (“Sensor Technology Handbook”, ed. J.S. Wilson)



Πρόβλημα: Αποδείξτε ότι η τάση εξόδου στις περιπτώσεις γεφυρών (β)-(δ) είναι:

$$(\beta) \quad V_o \cong -\frac{V_B}{2} \cdot \delta$$

$$(\gamma) \quad V_o = -\frac{V_B}{2} \cdot \delta$$

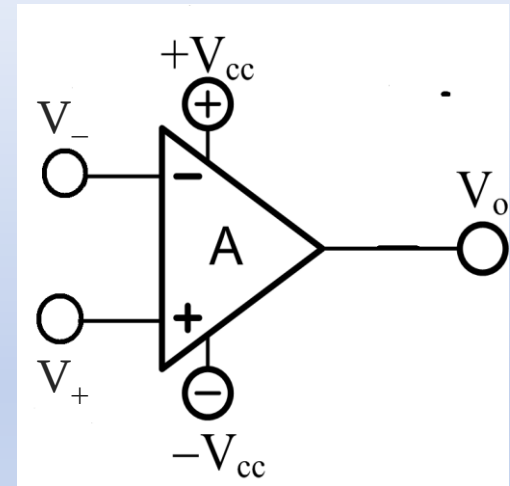
$$(\delta) \quad V_o = -V_B \cdot \delta$$

Τελεστικοί ενισχυτές

- Οι **τελεστικοί ενισχυτές (operational amplifiers ή, op-amps)** είναι ηλεκτρονικές συσκευές γενικής χρήσης στην επεξεργασία σήματος των αισθητήρων.
- Ένας τελεστικός ενισχυτής είναι μια συσκευή δύο εισόδων (V_+ και V_-) και μίας εξόδου (V_o).
- Η είσοδος V_- (σημειώνεται με -) ονομάζεται αναστρέφουσα είσοδος (inverting input).
- Η είσοδος V_+ (σημειώνεται με +) ονομάζεται μη-αναστρέφουσα είσοδος (non-inverting input)
- Η τάση εξόδου (V_o) ισούται με τη διαφορά μεταξύ της μη-αναστρέφουσας εισόδου (V_+) και της αναστρέφουσας εισόδου (V_-) πολλαπλασιασμένη επί έναν πολύ μεγάλο αριθμό A (περίπου 10^5), το κέρδος (gain) του ενισχυτή

$$V_o = A \cdot (V_+ - V_-)$$

- $+V_{cc}$ και $-V_{cc}$ είναι η διπολική τάση τροφοδοσίας του ενισχυτή (π.χ., $+V_{cc} = +15\text{ V}$ και $-V_{cc} = -15\text{ V}$).



Τελεστικοί ενισχυτές με ανάδραση

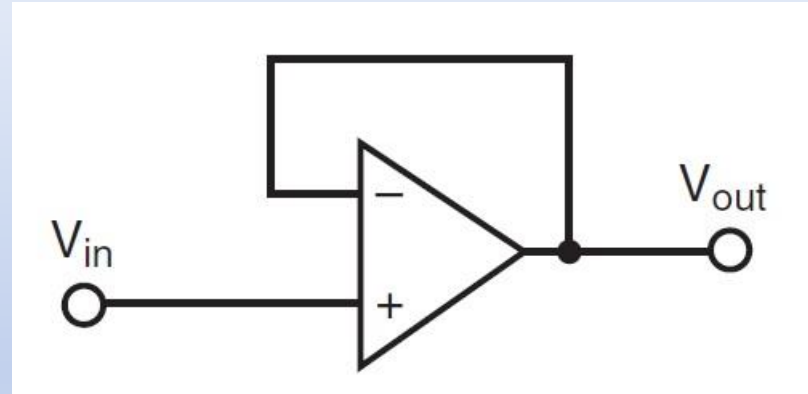
- Η **ανάδραση (feedback)**, δηλαδή η σύνδεση της εξόδου με μία από τις εισόδους, είναι μια ιδιαίτερα χρήσιμη τεχνική που χρησιμοποιείται στην πράξη στις εφαρμογές των τελεστικών ενισχυτών.
- **Ακόλουθος τάσης (voltage follower)** είναι ένα κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή στην οποία η αναστρέφουσα είσοδος συνδέεται άμεσα στην έξοδο.
- Στον ακόλουθο τάσης, η έξοδος γίνεται πάντα ίση (ακολουθεί) την είσοδο,

$$V_{out} = V_{in}$$

Απόδειξη: $V_{out} = A \cdot (V_+ - V_-) \Rightarrow V_{out} = A \cdot (V_+ - V_{out}) \Rightarrow V_{out} + A \cdot V_{out} = A \cdot V_+$
 $\Rightarrow (1 + A)V_{out} = A \cdot V_+ \Rightarrow V_{out} = \frac{A}{(1 + A)} V_+$

Επειδή, $1 + A \cong A$ (π.χ., $1 + 100000 \cong 100000$), έχουμε $V_{out} = V_+$

- Ο ακολουθητής τάσης χρησιμεύει για την απομόνωση μιας βαθμίδας ενός κυκλώματος με μεγάλη αντίσταση εξόδου από άλλη βαθμίδα με μικρή αντίσταση εισόδου.

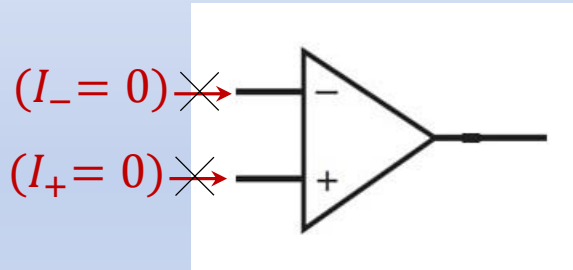


Τελεστικοί ενισχυτές με ανάδραση

Ένα κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή μπορεί να αναλυθεί εύκολα χρησιμοποιώντας τους δύο 'χρυσούς' κανόνες των τελεστικών ενισχυτών.

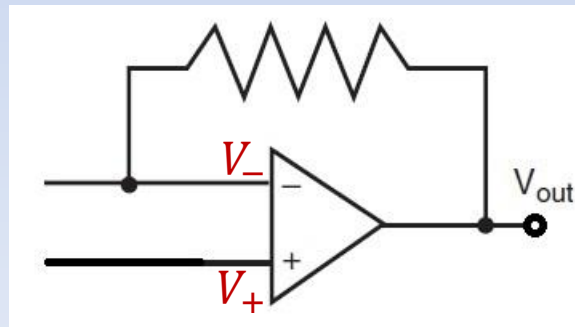
1. Λόγω της πολύ μεγάλης αντίστασης εισόδου, καθόλου ρεύμα δεν ρέει μέσα στις εισόδους του τελεστικού ενισχυτή,

$$I_+ = I_- = 0.$$



2. Όταν ο τελεστικός ενισχυτής είναι διαμορφωμένος για αρνητική ανάδραση, η έξοδος έχει εκείνη την τιμή που κάνει τις τάσεις των δύο εισόδων να είναι ίσες,

$$V_- = V_+$$



Αντιστρέφων ενισχυτής

Ο αναστρέφων ενισχυτής (inverting amplifier) είναι ένα κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή συνδεσμοποιημένου όπως στο κύκλωμα παρακάτω, όπου

- R_i η αντίσταση εισόδου
- R_f η αντίσταση ανάδρασης (feedback resistor)

Σε έναν αναστρέφοντα ενισχυτή: $V_o = -\frac{R_f}{R_i} \cdot V_i$

Απόδειξη: Η είσοδος V_+ είναι γειωμένη, επομένως, $V_+ = 0$

Οπότε, $V_- = V_+ = 0$ (2^{ος} χρυσός κανόνας)

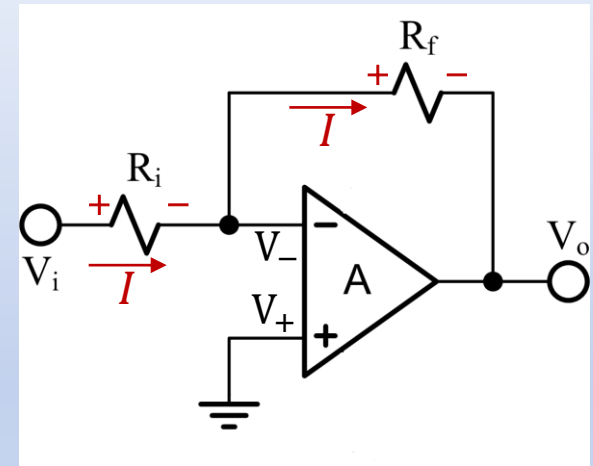
Έστω I το ρεύμα στην αντίσταση εισόδου R_i .

Εφόσον, ρεύμα δεν περνάει στην αναστρέφουσα είσοδο (1^{ος} χρυσός κανόνας), το ίδιο ρεύμα I θα διαρρέει και την αντίσταση ανάδρασης R_f

Από το νόμο του Ohm στην R_i έχουμε $I = \frac{V_i - (V_-)}{R_i} = \frac{V_i}{R_i}$

και στην R_f , $I = \frac{(V_-) - V_o}{R_f} = -\frac{V_o}{R_f}$

Επομένως, $-\frac{V_o}{R_f} = \frac{V_i}{R_i}$ ή $V_o = -\frac{R_f}{R_i} \cdot V_i$



Μη-αντιστρέφων ενισχυτής

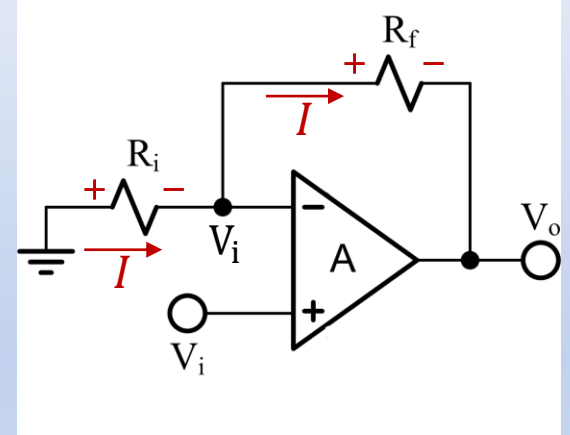
Ο **μη-αντιστρέφων ενισχυτής** (non-inverting amplifier) είναι η συνδεσμολογία τελεστικού ενισχυτή στην οποία το σήμα εισόδου (V_i) εφαρμόζεται στη μη-αναστρέφουσα είσοδο (είσοδος +).

Στον μη-αναστρέφοντα ενισχυτή : $V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \cdot V_i$

Απόδειξη: $V_+ = V_i$

Οπότε, $V_- = V_+ = V_i$ (2^{ος} χρυσός κανόνας)

Έστω I το ρεύμα στην αντίσταση εισόδου R_i .



Εφόσον, ρεύμα δεν περνάει στην αναστρέφουσα είσοδο (1^{ος} χρυσός κανόνας), το ίδιο ρεύμα I θα διαρρέει και την αντίσταση ανάδρασης R_f

Από το νόμο του Ohm στην R_i έχουμε $I = \frac{0 - V_i}{R_i} = -\frac{V_i}{R_i}$

και στην R_f , $I = \frac{V_i - V_o}{R_f}$

Εξισώνοντας, έχουμε, $\frac{V_i - V_o}{R_f} = -\frac{V_i}{R_i} \Rightarrow V_i - V_o = -\frac{R_f}{R_i} \cdot V_i \Rightarrow V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \cdot V_i$

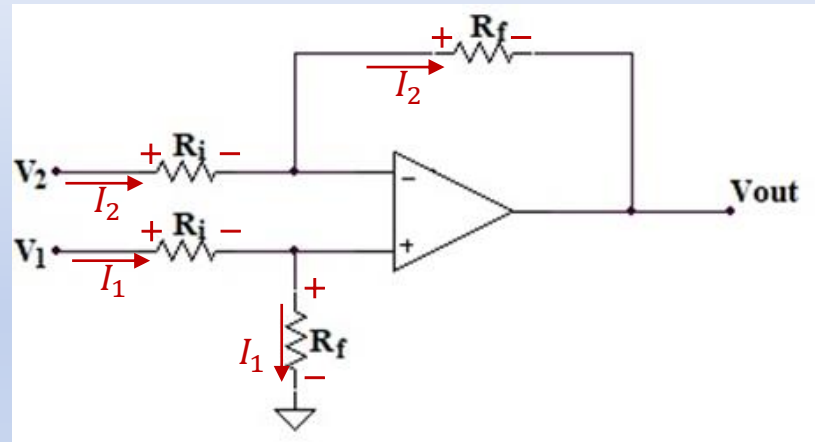
Διαφορικός Ενισχυτής

Ο διαφορικός ενισχυτής (differential amplifier) ή ενισχυτής διαφοράς (difference amplifier) χρησιμοποιείται συχνά στα συστήματα μετρήσεων όταν υπάρχει ανάγκη ενίσχυσης μιας τάσης που δεν έχει κοινό σημείο με τη γείωση (π.χ., η τάση εξόδου μιας γέφυρας)

Τάση εξόδου διαφορικού ενισχυτή:

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_i} \cdot (V_1 - V_2)$$

Απόδειξη: Έστω I_1 και I_2 τα ρεύματα εισόδου στην μη-αναστρέφουσα και στην αναστρέφουσα είσοδο, αντίστοιχα.



Γράφοντας τον νόμο των τάσεων του Kirchhoff μεταξύ V_1 και V_2 έχουμε

$$V_1 - I_1 R_i + I_2 R_i = V_2 \Rightarrow V_1 - V_2 = I_1 R_i - I_2 R_i$$

Από το νόμο του Ohm έχουμε: $I_1 = \frac{V_1}{R_i + R_f}$ και $I_2 = \frac{V_2 - V_{out}}{R_i + R_f}$

Και αντικαθιστώντας παίρνουμε: $V_1 - V_2 = \frac{V_1}{R_i + R_f} R_i - \frac{V_2 - V_{out}}{R_i + R_f} R_i$

(συνεχίζεται...)

Διαφορικός Ενισχυτής

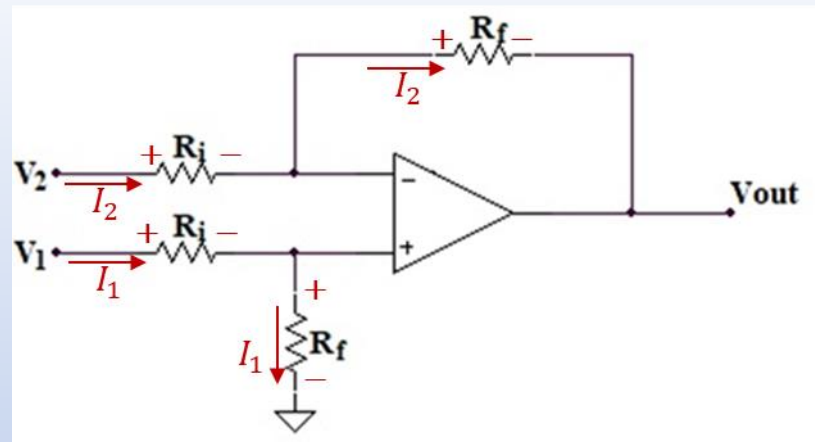
Απόδειξη (. . . συνέχεια)

$$V_1 - V_2 = \frac{V_1}{R_i + R_f} R_i - \frac{V_2 - V_{out}}{R_i + R_f} R_i$$

$$\left(\frac{R_i + R_f}{R_i} \right) (V_1 - V_2) = V_1 - V_2 - V_{out}$$

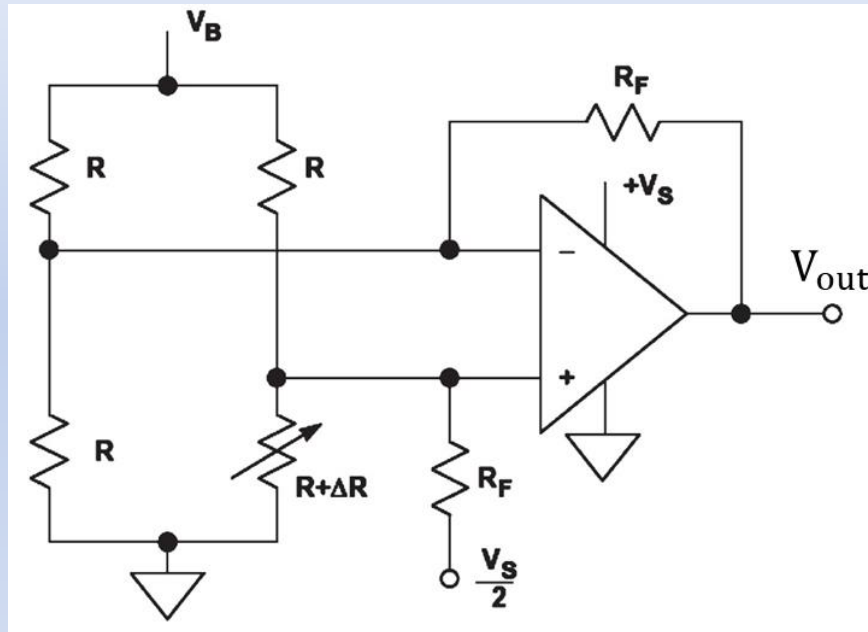
$$\left(1 - \frac{R_i + R_f}{R_i} \right) (V_1 - V_2) = V_{out}$$

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_i} \cdot (V_1 - V_2)$$



Ενίσχυση της τάσης εξόδου μιας γέφυρας με τελεστικό ενισχυτή

- Ο τελεστικός ενισχυτής στα συστήματα μέτρησης χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μια γέφυρα (bridge) για να ενισχύσει την τάση εξόδου της γέφυρας και να αυξήσει έτσι την ευαισθησία της.



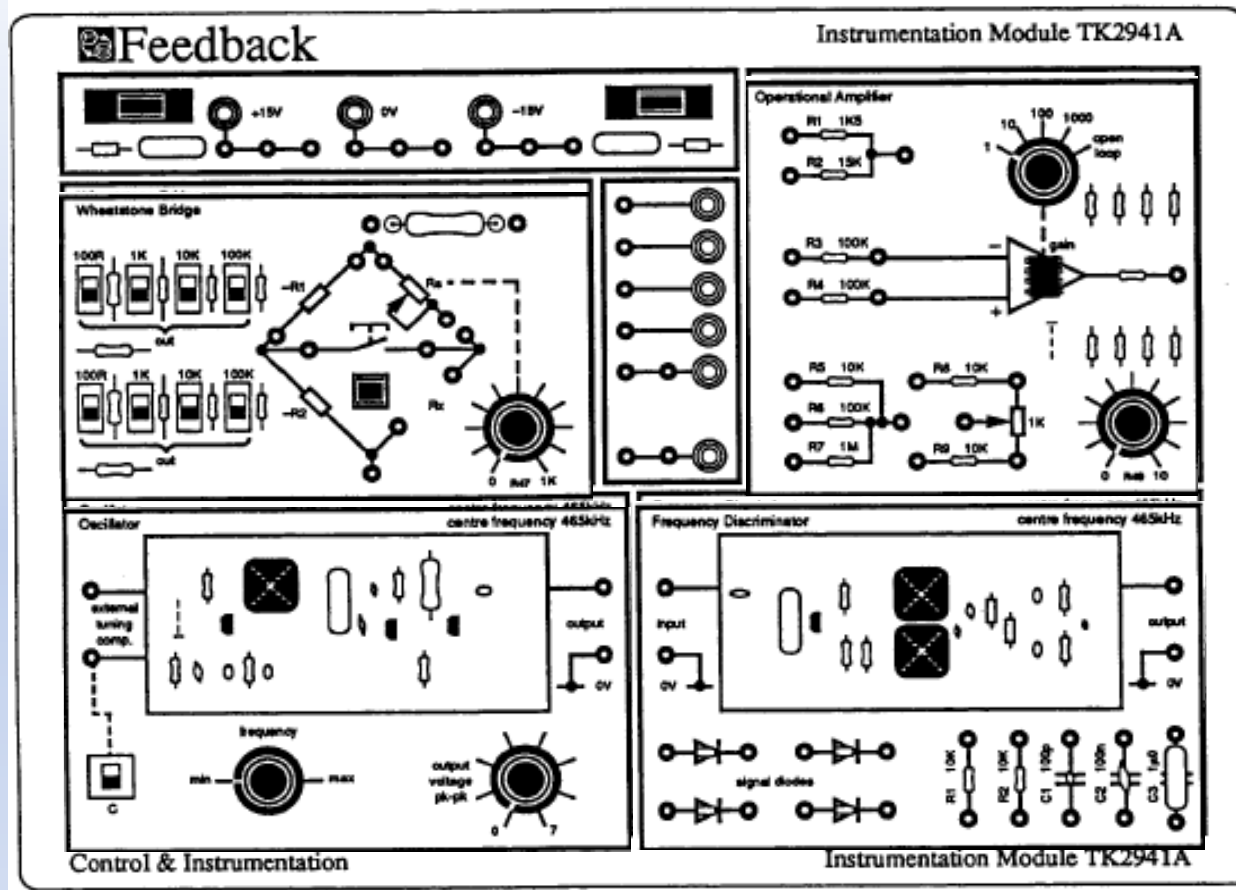
Πρόβλημα: Αποδείξτε ότι η τάση εξόδου V_{out} του τελεστικού ενισχυτή της εικόνας, με $R = R_F$ και $V_B = V_S/2$, δίνεται από τη σχέση

$$V_{out} = \frac{V_S}{2} + \frac{V_S}{2} \cdot \delta$$

όπου, $\delta = \frac{\Delta R}{R}$ ("Sensor Handbook Technology", ed. Jon S. Wislon, Newnes)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

Η Μονάδα Οργάνων (Instrumentation Module) TK2941A



Περιλαμβάνει:

1. Γέφυρα Wheatstone (Wheatstone Bridge)
2. Τελεστικό Ενισχυτή (Operational Amplifier)
3. Ταλαντωτή (Oscillator)
4. Διαχωριστή Συχνοτήτων (Frequency Discriminator)

Εργαστηριακή άσκηση 1^η

Ο Τελεστικός Ενισχυτής

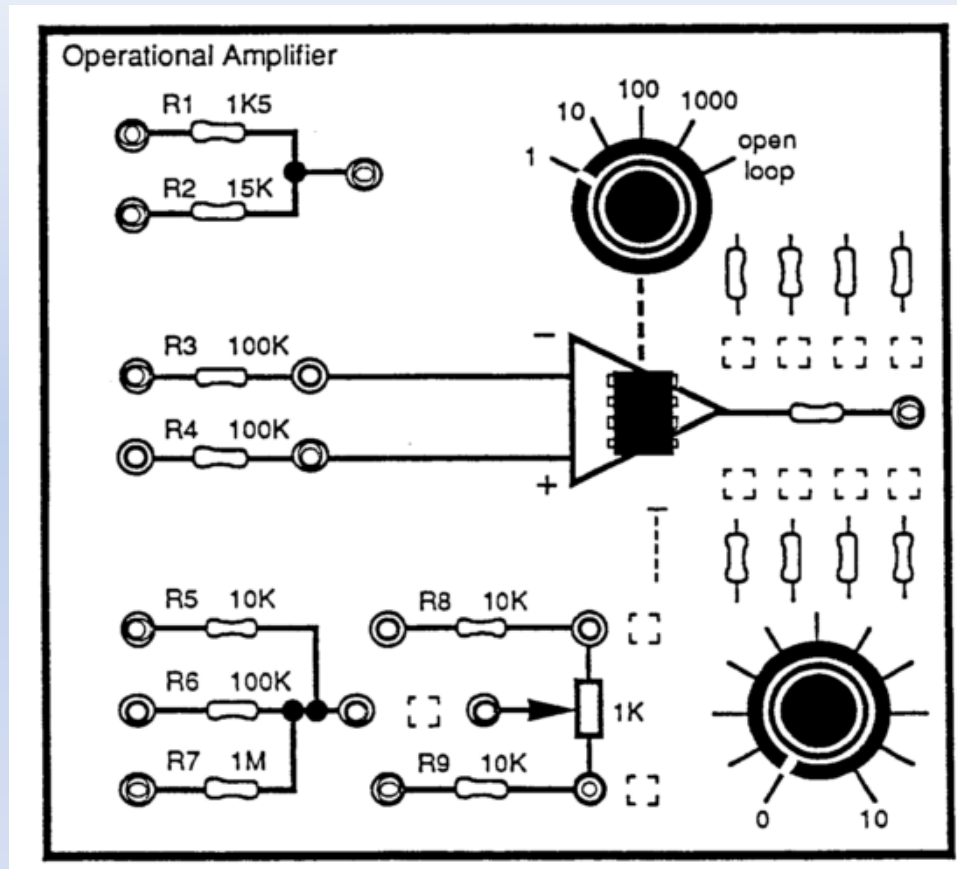
ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

- Να κατανοήσουμε τη λειτουργία του βασικού τελεστικού ενισχυτή.
- Να μάθουμε πως να συνδεσμοποιούμε έναν τελεστικό ενισχυτή για να λειτουργεί σαν ενισχυτής τάσης.
- Να καταλάβουμε τους όρους «διαφορική ενίσχυση» και «ενίσχυση κοινού τρόπου» (ή «ενίσχυση κοινής εισόδου»).

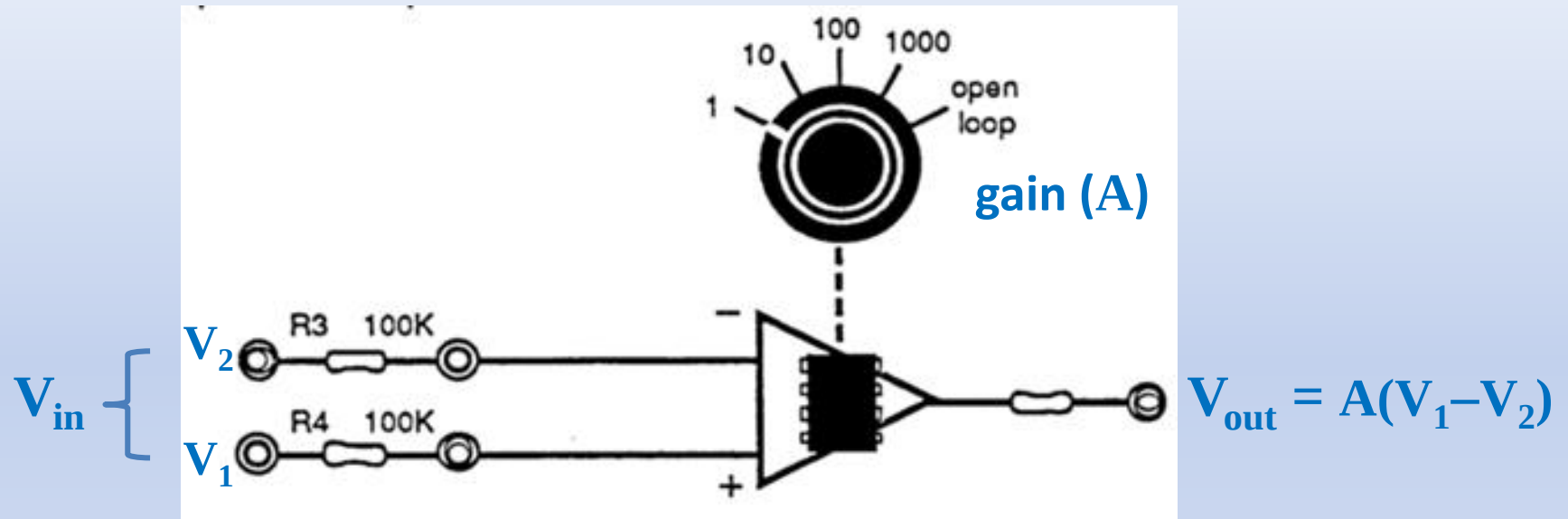
ΤΑ ΜΕΡΗ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

1. Ο Βασικός Τελεστικός Ενισχυτής
2. Ενίσχυση Κοινής Εισόδου

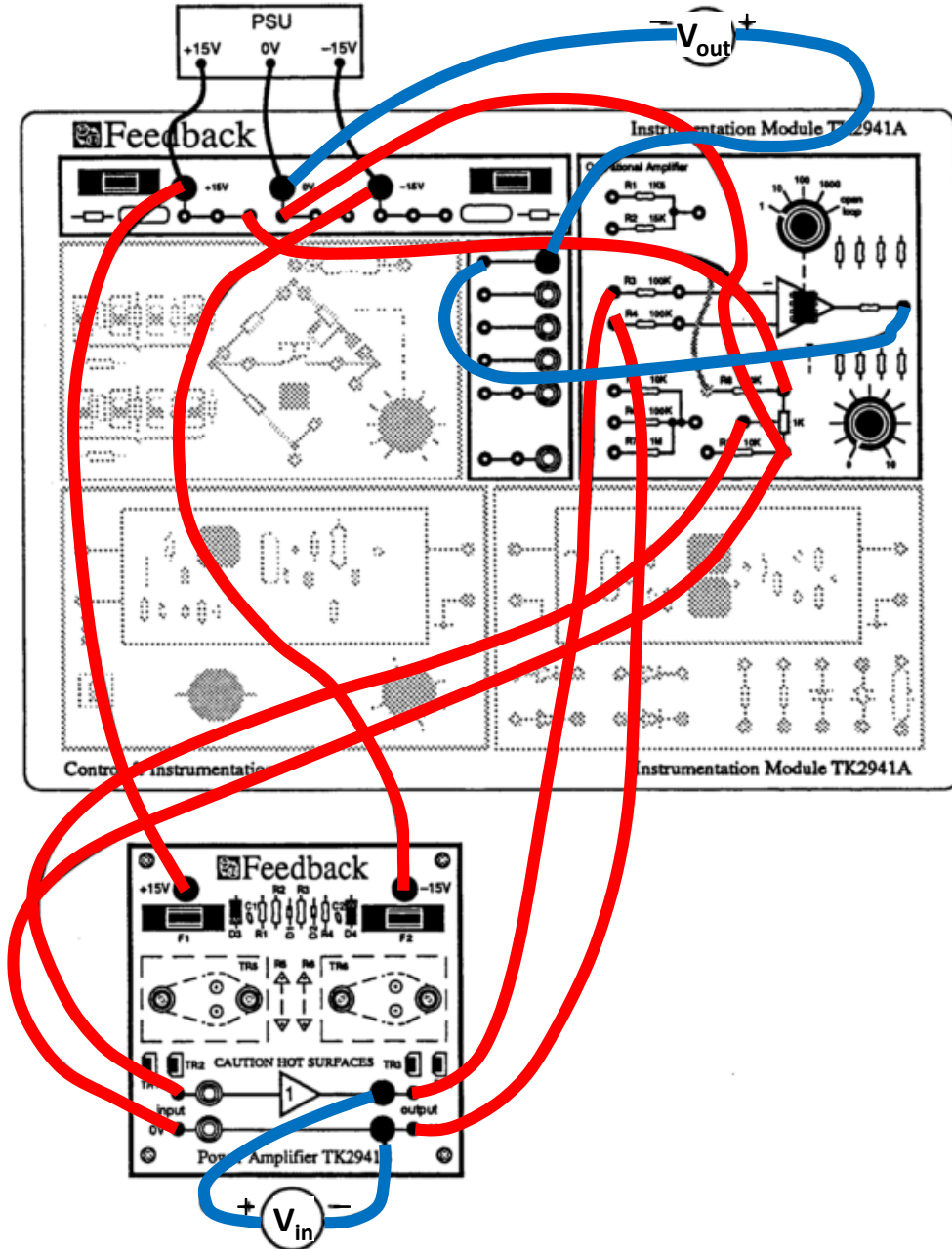
Ο Τελεστικός Ενισχυτής στη Μονάδα TK2941A



Το κύριο τμήμα του ενισχυτή



Μέρος 1: Ο Βασικός Τελεστικός Ενισχυτής (Op Amp) – Η συνδεσμολογία



1. Τροφοδοτήστε τον ενισχυτή ισχύος TK22941B με +15V και -15V
2. Τροφοδοτήστε τα άκρα του ποτενσιομέτρου με 15V (+15V και 0V).
3. Από το δρομέα και το ένα άκρο του ποτενσιομέτρου οδηγήστε στην είσοδο του ενισχυτή ισχύος TK22941B.
4. Την έξοδο του ενισχυτή ισχύος TK22941B οδηγήστε την στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή.
5. Συνδέστε ένα βολτόμετρο (V_{in}) για να μετράτε την τάση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή.
6. Την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή οδηγήστε την στο βολτόμετρο V_{out} .
7. Συνδέστε τον άλλο ακροδέκτη του βολτομέτρου V_{out} στη γείωση.

Μέρος 1: Ο Βασικός Τελεστικός Ενισχυτής (Op Amp)

Εκτέλεση των μετρήσεων

- Βάλτε $\text{gain} = 1$
- Με το ποτενσιόμετρο, ρυθμίστε την τάση εισόδου στον τελεστικό ενισχυτή στις τιμές της στήλης V_{in} .
- Μετρήστε την τάση εξόδου V_{out} του ενισχυτή και καταγράψτε τις τιμές στον πίνακα 4.5.5.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5.5

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

Μέρος 1: Ο Βασικός Τελεστικός Ενισχυτής (Op Amp)

Εκτέλεση των μετρήσεων (συνέχεια)

- Βάλτε gain = 10 και μετά 100.
- Συμπληρώστε τον Πίνακα 4.5.6

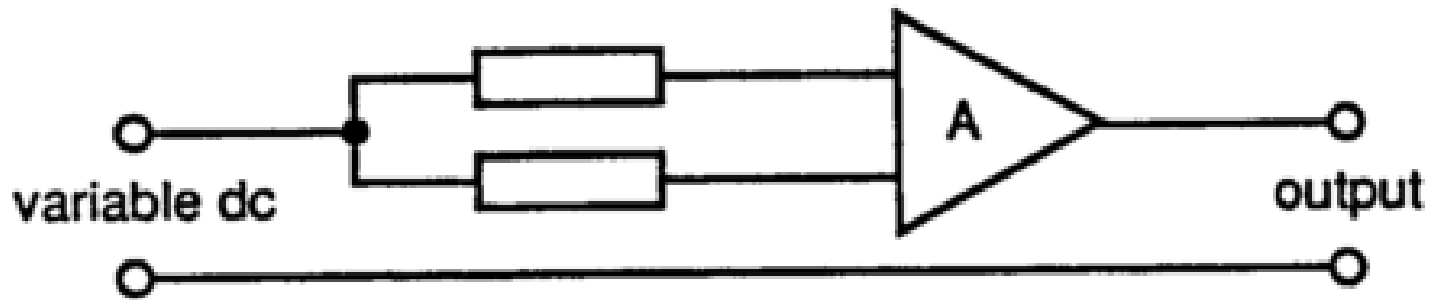
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5.6

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

Μέρος 2: Ενίσχυση Κοινής Εισόδου (Common Mode Gain)

Η συνδεσμολογία (σηματικό διάγραμμα)

- Πραγματοποιήστε το κύκλωμα της παρακάτω Εικόνας



Μέρος 2: Ενίσχυση Κοινής Εισόδου (Common Mode Gain)

Εκτέλεση των μετρήσεων

Χρησιμοποιήστε $gain = 1, 10, 100$ και 1000 και συμπληρώστε τον Πίνακα 4.5.9

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5.9

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

Με βάση τις τιμές του Πίνακα 4.5.9, θα πρέπει να απαντήσετε στις ερωτήσεις:

- Επηρεάζει η τιμή της ενίσχυσης την έξοδο;
- Βρίσκετε ότι ο ενισχυτής είναι καλός ή κακός όσον αφορά την ενίσχυση κοινής εισόδου;