

Μέρος 3^β

ΠΙΕΖΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (STRAIN GAGE)

Αισθητήρες για τη μέτρηση μικρών μετατοπίσεων, δύναμης, φορτίου, πίεσης και ροής

Το αντικείμενο αυτής της διάλεξης αντιστοιχεί στα Κεφάλαια 6 (πργ. 6.3) και 9 (πργ. 9.1 – 9.2) του βιβλίου των Κ. Καλαϊτζάκη και Ε. Κουτρούλη “Ηλεκτρικές μετρήσεις και αισθητήρες: Αρχές λειτουργίας και σχεδιασμός των ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης”

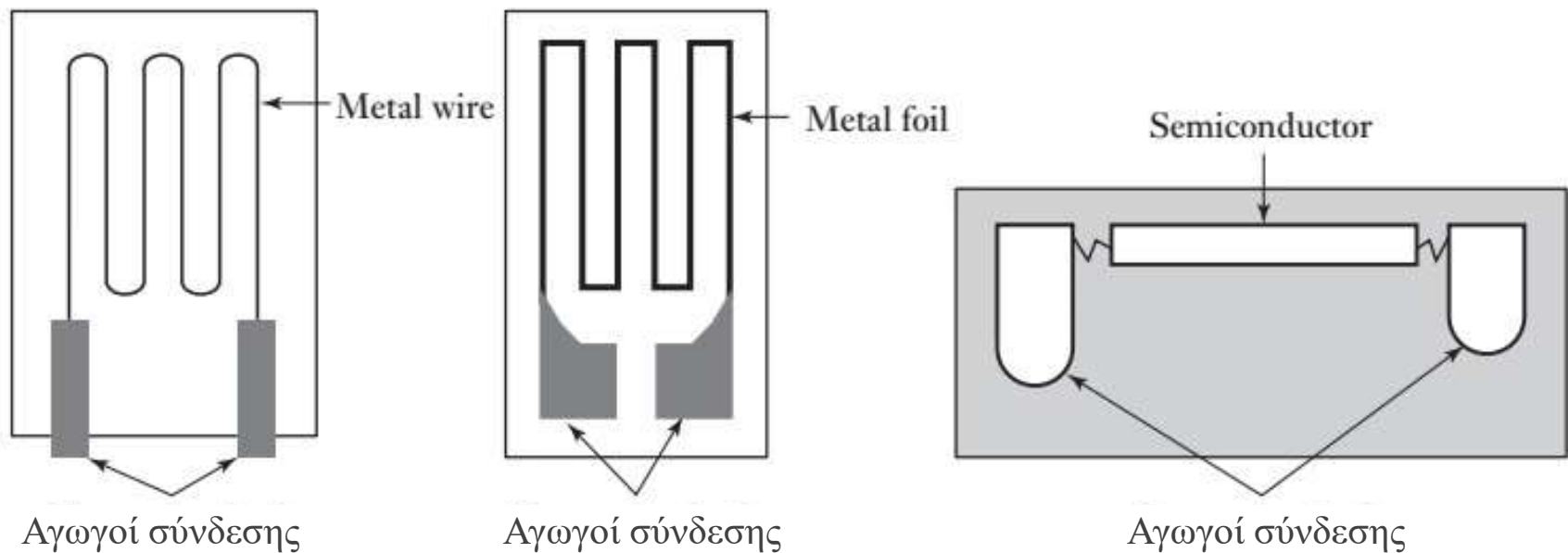
Βιβλιογραφία

1. Jon S. Wilson, “Sensor Technology Handbook”, Newnes, Κεφάλαια 11 και 19
<https://www.sciencedirect.com/science/book/9780750677295>
2. Bolton, W., “Mechatronics: Electronic control systems in mechanical and electrical engineering”, Pearson, Κεφ. 2 παράγραφοι 2.3 και 2.5

Ο μετρητής μηχανικής τάσης ηλεκτρικής αντίστασης (electrical resistance strain gauge) ή, απλά, πιεζοαντίσταση (strain gauge) είναι

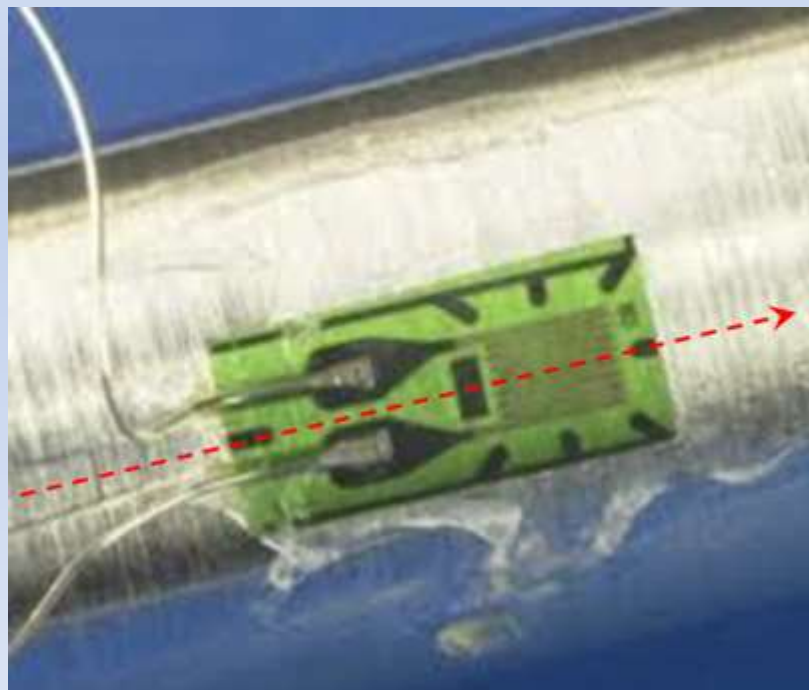
- μεταλλικό σύρμα (metal wire),
- ή μεταλλικό φύλο (metal foil)
- ή ταινία ημιαγωγού (semiconductor)

κολλημένο πάνω σε μια επιφάνεια σε μέγεθος γραμματοσήμου.



Μια εφαρμογή αισθητήρων πιεζοαντίστασης για τη μέτρηση της παραμόρφωσης

- Οι πιεζοαντιστάτες εφαρμόζονται σταθερά με κόλλα (ή ειδικό τσιμέντο) πάνω στο σώμα στο οποίο ασκούνται εκτατικές ή συμπιεστικές δυνάμεις.
- Τοποθετούνται παράλληλα στη διεύθυνση στην οποία θέλουμε να μετρήσουμε την παραμόρφωση (επιμήκυνση ή συμπίεση).



Παραμόρφωση
(Επιμήκυνση
ή
συμπίεση)

Μηχανική τάση

- Μηχανική τάση (stress), σ , είναι η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που ασκείται σε ένα σώμα:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

- F είναι η δύναμη που ασκείται στο σώμα και
- A το εμβαδόν της διατομής του σώματος



- Η μηχανική τάση έχει μονάδες πίεσης,

$$\frac{N}{m^2} = \text{Pa, bar, atm, κ.λπ.})$$

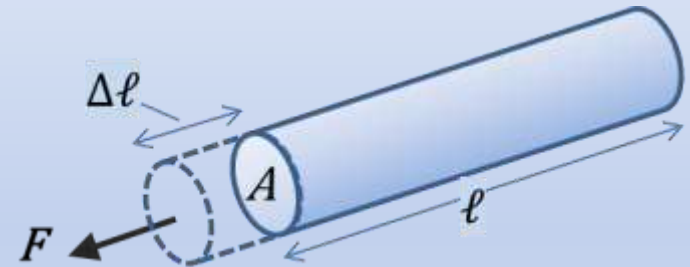
- Σχέση μεταξύ των μονάδων πίεσης

$$\text{Pa} = 10^{-5} \text{ bar} = 7.5 \times 10^{-3} \text{ Torr} = 1.45 \times 10^{-4} \text{ psi}$$

Παραμόρφωση: το αποτέλεσμα της μηχανικής τάσης

- Αποτέλεσμα της μηχανικής τάσης, $\sigma = F/A$, είναι η (μηχανική) παραμόρφωση του σώματος (επιμήκυνση ή συμπίεση)
- Παραμόρφωση (strain), ε , είναι η σχετική μεταβολή του μήκους του σώματος

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}$$



- Η μηχανική παραμόρφωση ε είναι αδιάστατο μέγεθος (δεν έχει μονάδες)
- εκφράζεται σε **ppm** (parts per million = εκατομμυριοστά) ή **microstrains** ($\mu\varepsilon$)

$$1\mu\varepsilon = 1 \text{ ppm} = 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \quad \text{ή} \quad 10^{-6} \frac{\text{cm}}{\text{cm}} \quad \text{ή} \quad = 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{m}} \quad \text{κ.ο.κ.}$$

Παράδειγμα

Παραμόρφωση $\varepsilon = 300\mu\epsilon$ (προφέρεται 300 microstrain) σημαίνει ότι το μήκος του σώματος έχει μεταβληθεί κατά 300 εκατομμυριοστά ($300 \cdot 10^{-6} = 3 \times 10^{-4} = 0.0003$) του αρχικού του μήκους,

- Π.χ.: αν το αρχικό μήκος του σώματος είναι 45cm, η παραμόρφωσή του θα είναι

$$0,0003 \times 45 \text{ cm} = 0.0135 \text{ cm} = 0.135 \text{ mm} \text{ ή } 135 \mu\text{m}$$

δηλαδή, το μήκος του σώματος θα γίνει

$$45.0135 \text{ cm} \quad (\text{αν επιμηκυνθεί})$$

$$\text{ή } 44.9865 \text{ cm} \quad (\text{αν συμπιεστεί})$$

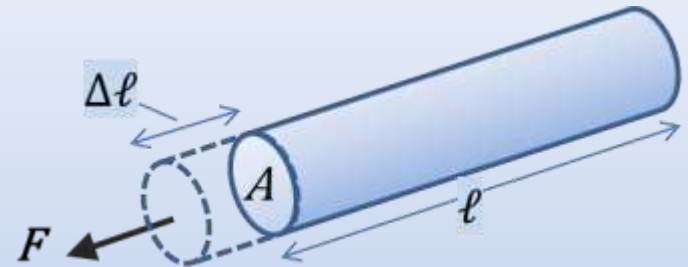
Σχέση μηχανικής τάσης και του αποτελέσματός της, της παραμόρφωσης

- Η μηχανική τάση, σ , και το αποτέλεσμα της, η μηχανική παραμόρφωση (strain), ε , συνδέονται με τη σχέση:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

όπου E είναι ένας συντελεστής που

- ονομάζεται **μέτρο ελαστικότητας του Young (Young's modulus)** του υλικού
- έχει διαστάσεις πίεσης (όπως η μηχανική τάση)
- μετριέται, συνήθως, σε GPa ή Mpsi.

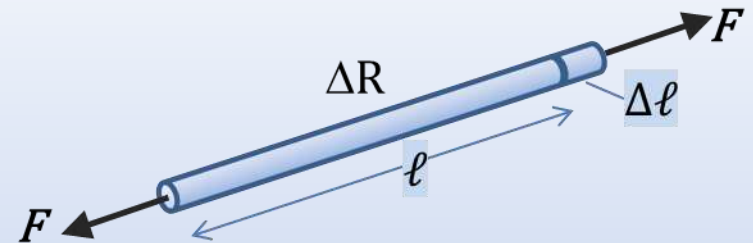


Το φαινόμενο της πιεζοαντίστασης

- **Φαινόμενο πιεζοαντίστασης** (piezoresistive effect) ονομάζεται η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης R ενός υλικού όταν αυτό παραμορφώνεται μηχανικά (π.χ., συμπιέζεται ή επιμηκύνεται).
- Η μεταβολή ΔR της ηλεκτρικής αντίστασης λόγω μηχανικής παραμόρφωσης

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \varepsilon$$

- GF ένας συντελεστής (αριθμός) που ονομάζεται **συντελεστής μετατροπής (Gauge Factor)** και εξαρτάται από το υλικό.



$$R = \rho \frac{l}{A}$$

- l το μήκος
- A η διατομή και
- ρ η ειδική αντίσταση του υλικού

Παράδειγμα

Μια πιεζοαντίσταση έχει αντίσταση $100\ \Omega$ και συντελεστή 2.0 . Πόση είναι η μεταβολή της αντίστασής της αν υποστεί παραμόρφωση 0.001 ;

Απάντηση

Η παραμόρφωση είναι $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = 0.001$

οπότε, η κλασματική μεταβολή της αντίστασής της είναι

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \varepsilon = 2 \cdot 0.001 = 0.002$$

Επομένως, η απόλυτη μεταβολή της αντίστασης (ΔR) είναι

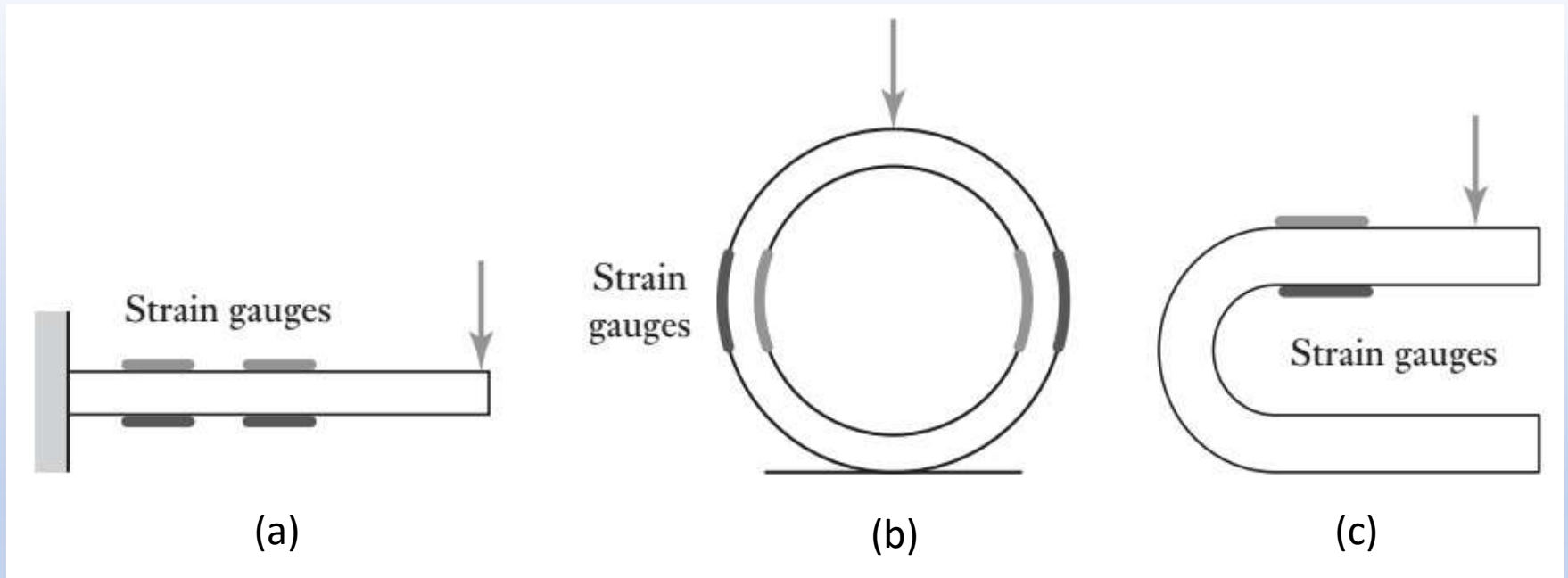
$$\Delta R = 0.002 \cdot R = 0.002 \cdot (100\ \Omega) = 0.2\ \Omega$$

Πίνακας τιμών του συντελεστή GF για διάφορα υλικά*

Υλικό	GF
Λευκόχρυσος (Pt 100%)	6.1
Λευκόχρυσος-Ιρίδιο (Pt 95%, Ir 5%)	5.1
Λευκόχρυσος-Βολφράμιο (Pt 92%, W 8%)	4.0
Isoelastic (Fe 55.5%, Ni 36%, Cr 8%, Mn 0.5%)	3.6
Constantan (Ni 45%, Cu 55%)	2.1
Νικέλιο-Χρώμιο (Ni 80%, Cr 20%)	2.1
Karma (Ni 74%, Cr 20%, Al 3%, Fe 3%)	2.0
Armour D (Fe 70%, Cr 20%, Al 10%,)	2.0
Monel (Ni 67%, Cu 33%)	1.9
Manganin (Cu 55%, Mn 12%, Ni 4%)	0.47
Νικέλιο (Ni 100%)	-12.1
Karma (Ni 74%, Cr 20%, Al 3%, Fe 3%)	2.0

* Σ.Ι. Λουτρίδης, «Τεχνολογία Μετρήσεων και Αισθητήρων», εκδόσεις ΙΩΝ

Τύποι αισθητήρων μετατόπισης με πιεζοαντιστάσεις



Bolton, W., "Mechatronics: Electronic control systems in mechanical and electrical engineering", Pearson

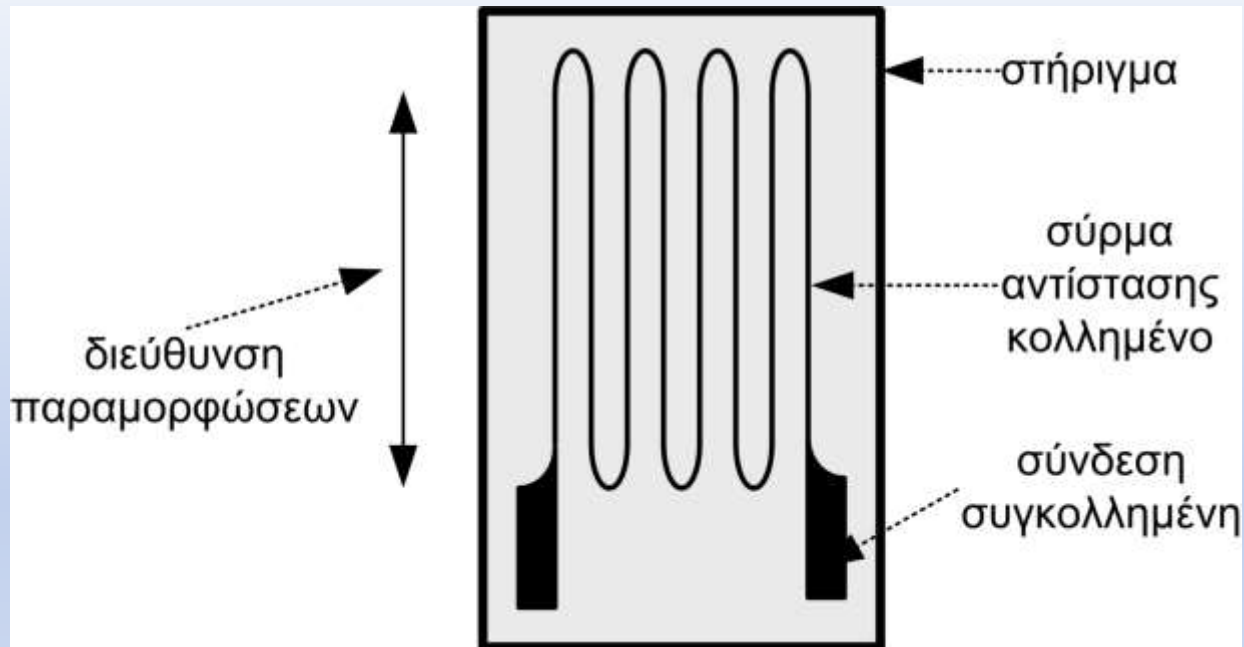
(a) Πιεζοαντιστάσεις προσαρμοσμένες σε εύκαμπτη ράβδο (cantilever)

(b) Πιεζοαντιστάσεις προσαρμοσμένες σε εύκαμπτο δακτύλιο (ring)

(c) Πιεζοαντιστάσεις προσαρμοσμένες σε εύκαμπτη γοκα (U-shape)

- Τυπικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για μέτρηση μετατοπίσεων της τάξης 1 ως 30mm
- Έχουν σφάλμα μη-γραμμικότητας περίπου 61% της πλήρους κλίμακας.

Αισθητήρες πιεζοαντίστασης



- Χρειάζονται αντιστάθμιση θερμοκρασίας (βλ. Παρακάτω)
- Καλή δυναμική συμπεριφορά (συχνότητα παραμορφώσεων μερικών δεκάδων kHz)

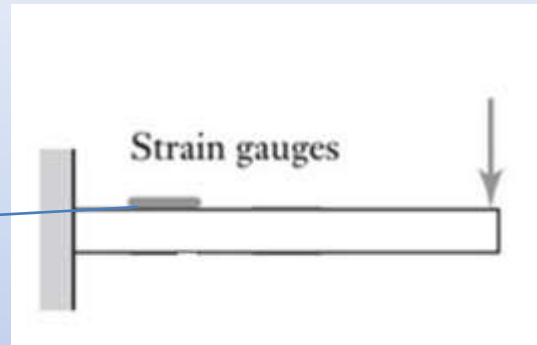
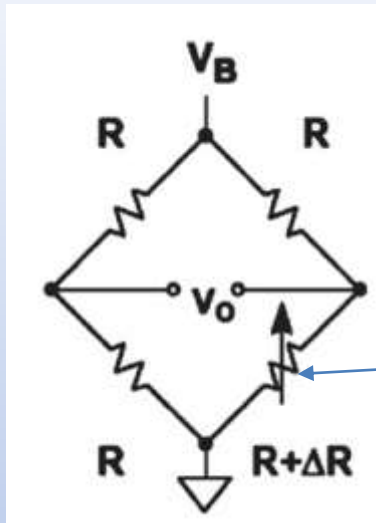
Χαρακτηριστικά ορισμένων αισθητήρων πιεζοαντίστασης*

Υλικό	GF	Αντίσταση Ω	Θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης ($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$)	Παρατηρήσεις
57% Cu – 43% Ni	2.0	100	10.8	• Η τιμή του CF είναι σταθερή σε μεγάλη κλίμακα τιμών του ε • Για χρήση κάτω από 260°C
Κράματα Λευκοχρύσου (Platinum alloys)	4.0 – 6.0	50	2160	• Για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες
Πυρίτιο (Silicon)	-100 ως +150	200	90000	• Υψηλές θερμοκρασίες • Κατάλληλο για μέτρηση μεγάλων παραμορφώσεων

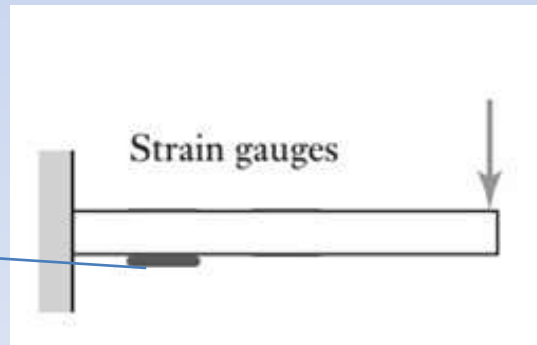
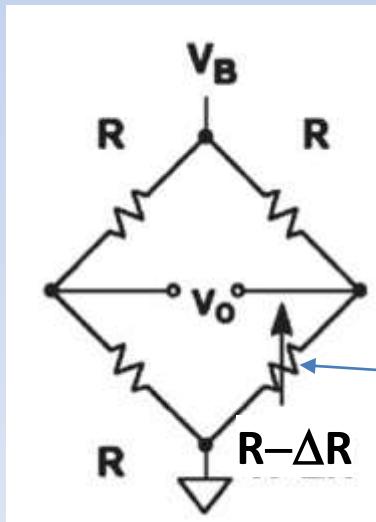
* Jacob Fraden, “Handbook of Modern Sensors”, 3rd ed., AIP Press, Springer.

Διάταξη μέτρησης γέφυρας με απλό αισθητήρα πιεζοαντίστασης

$$V_o \cong \frac{V_B}{4} \cdot \delta, \quad \delta = \frac{\Delta R}{R}$$

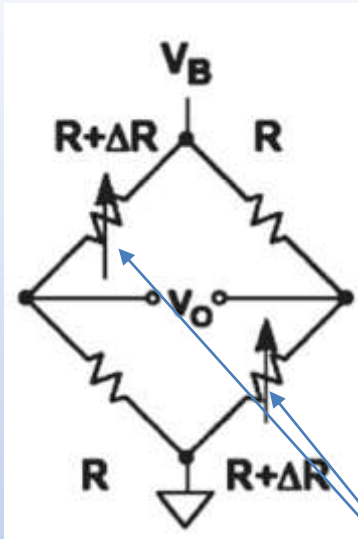


$$\delta > 0 \Rightarrow V_o < 0$$

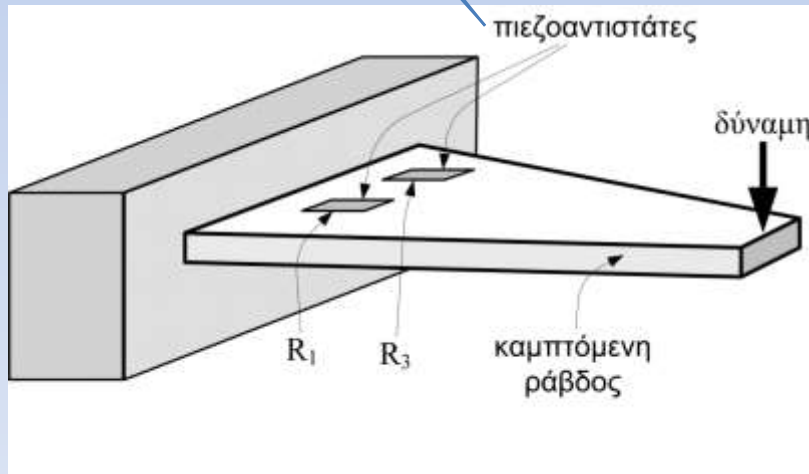


$$\delta < 0 \Rightarrow V_o > 0$$

Διάταξη μέτρησης γέφυρας με διπλή πιεζοαντίσταση: 1^η περίπτωση

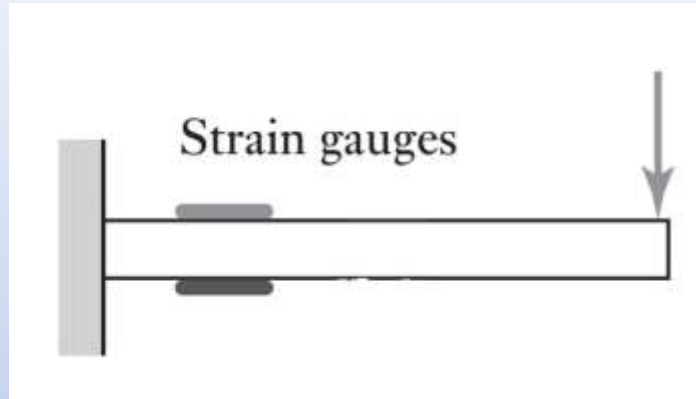
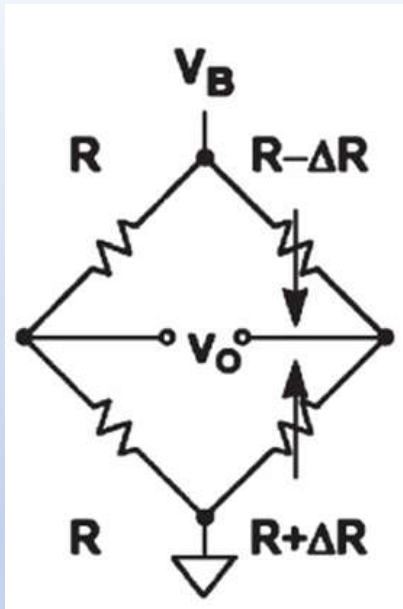


$$V_o \cong \frac{V_B}{2} \cdot \delta$$



- $\delta > 0 \Rightarrow V_o < 0$
- Διπλάσια τάση εξόδου σε σχέση με τη διάταξη απλής πιεζοαντίστασης

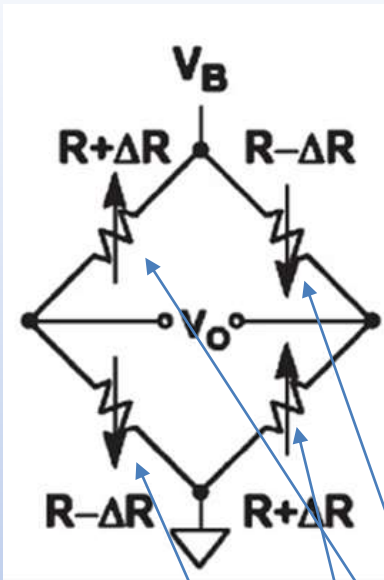
Διάταξη μέτρησης γέφυρας με διπλή πιεζοαντίσταση: 2^η περίπτωση



$$V_o = \frac{V_B}{2} \cdot \delta$$

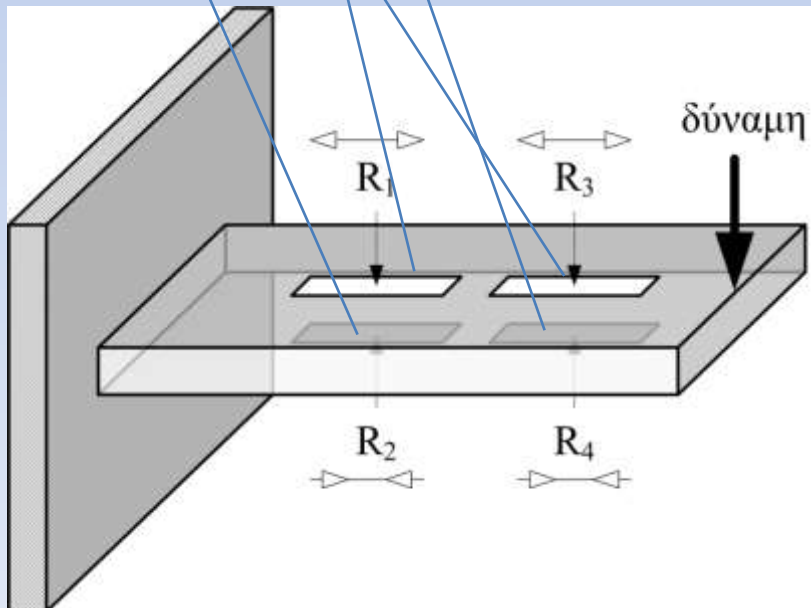
- $\delta_{upper} > 0, \delta_{lower} > 0$
- Διπλάσια τάση εξόδου σε σχέση με τη διάταξη απλής πιεζοαντίστασης

Διάταξη μέτρησης πλήρους γέφυρας (τετραπλή πιεζοαντίσταση)



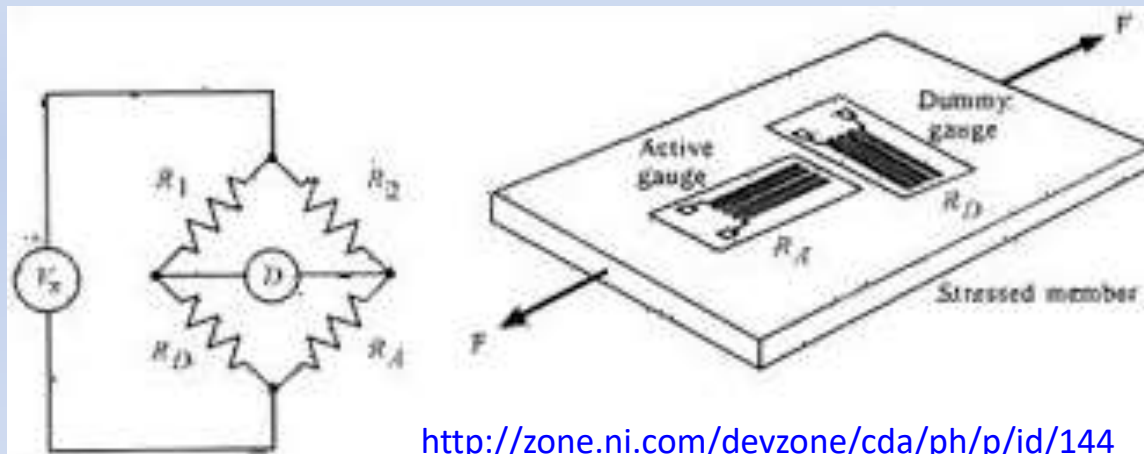
$$V_o = V_B \cdot \delta$$

- Διπλάσια τάση εξόδου σε σχέση με τη διάταξη διπλής πιεζοαντίστασης και τετραπλάσια σε σχέση με την απλή.



Αντιστάθμιση θερμοκρασίας

- Οι τιμή της αντίστασης των **ημιαγωγικών** πιεζοαντιστατών επηρεάζεται πολύ από τη θερμοκρασία.
- Οι ημιαγωγιμικοί πιεζοαντιστάτες με γέφυρα Wheatstone χρειάζονται **αντιστάθμιση θερμοκρασίας**.
- Κάνουμε αντιστάθμιση θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας ένα **βοηθητικό αισθητήρα (dummy gauge), R_D** .



- Ο R_D τοποθετείται κοντά και κάθετα στον R_A (Active gauge), τον ενεργό αισθητήρα.
- Αμφότεροι οι αισθητήρες αλλάζουν το ίδιο με τη θερμοκρασία, αλλά μόνο η τιμή του R_A μεταβάλλεται με την παραμόρφωση.

3^η Εργαστηριακή άσκηση

Αισθητήρες Μηχανικής Τάσης (Πιεζοαντιστάσεις)

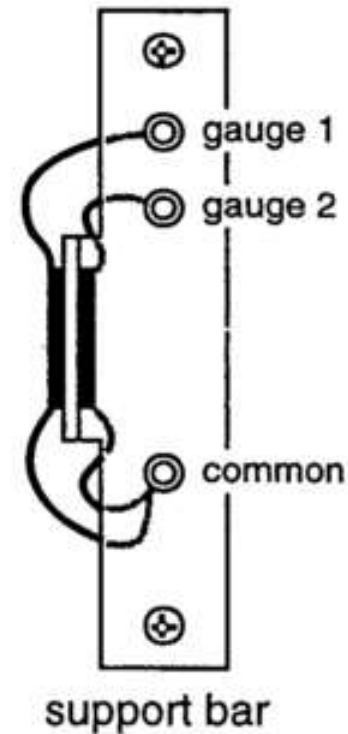
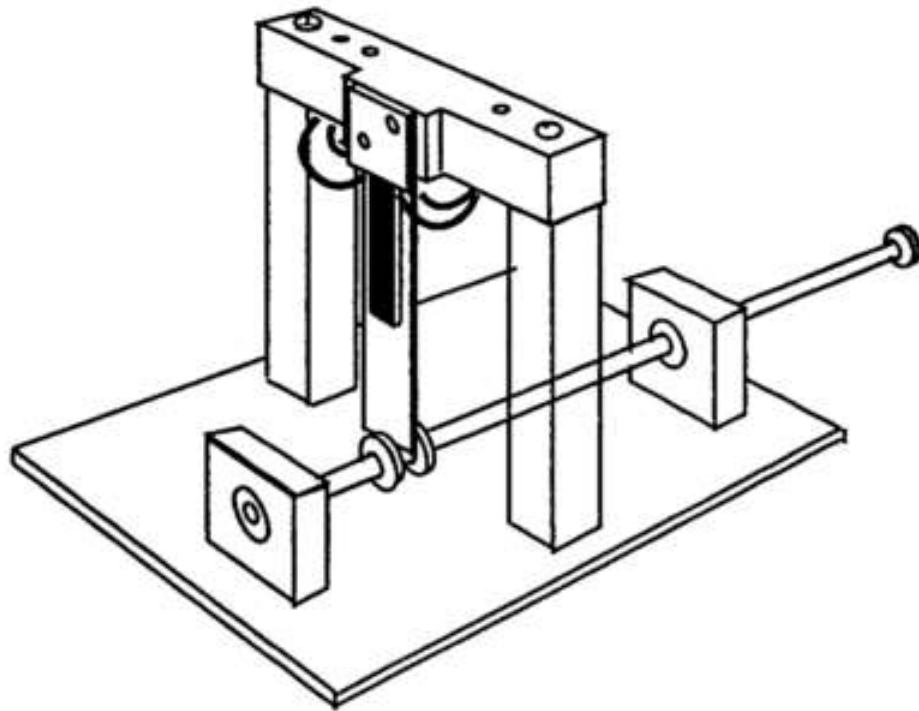
ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

- Να μάθουμε πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο για να μετράμε μηχανική τάση σε ένα υλικό.
- Να συγκρίνουμε μεθόδους χρησιμοποιώντας έναν και δύο αισθητήρες μηχανικής τάσης και να παρατηρήσουμε τα πλεονεκτήματα του συστήματος με τους δύο αισθητήρες.

ΤΑ ΜΕΡΗ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

- Ο Βασικός Αισθητήρας Μηχανικής Τάσης
- ~~Ο Διπλός Αισθητήρας Μηχανικής Τάσης~~

Ο Αισθητήρας Μηχανικής Τάσης TK294E

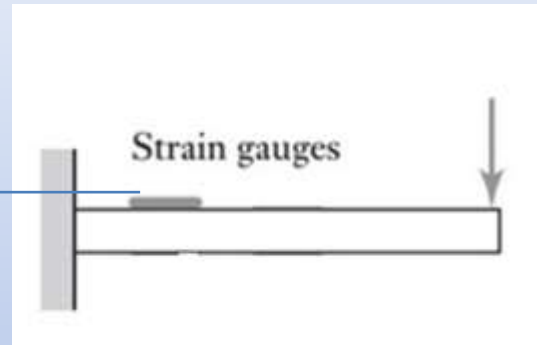
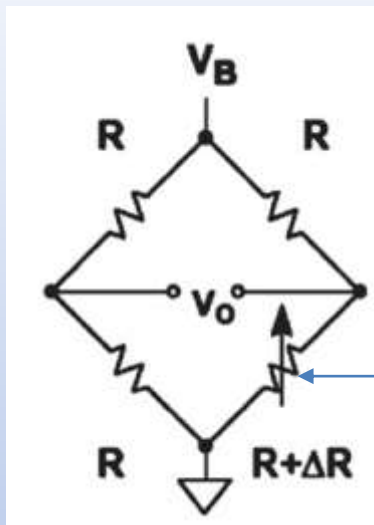


gauge 1: ακροδέκτης 1^{ου} αισθητήρα μηχανικής τάσης (πιεζοαντίστασης)

gauge 2: ακροδέκτης 2^{ου} αισθητήρα μηχανικής τάσης (πιεζοαντίστασης)

common: κοινός ακροδέκτης

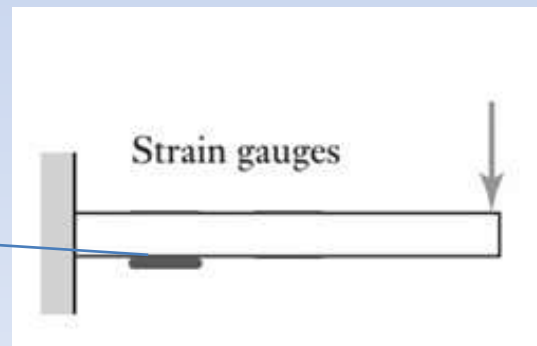
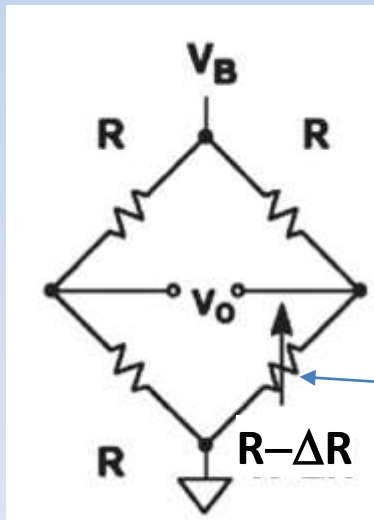
Η διάταξη της γέφυρας μέτρησης με απλό αισθητήρα πιεζοαντίστασης του 1^{ου} μέρους της άσκησης



$$V_o \cong \frac{V_B}{4} \cdot \delta,$$

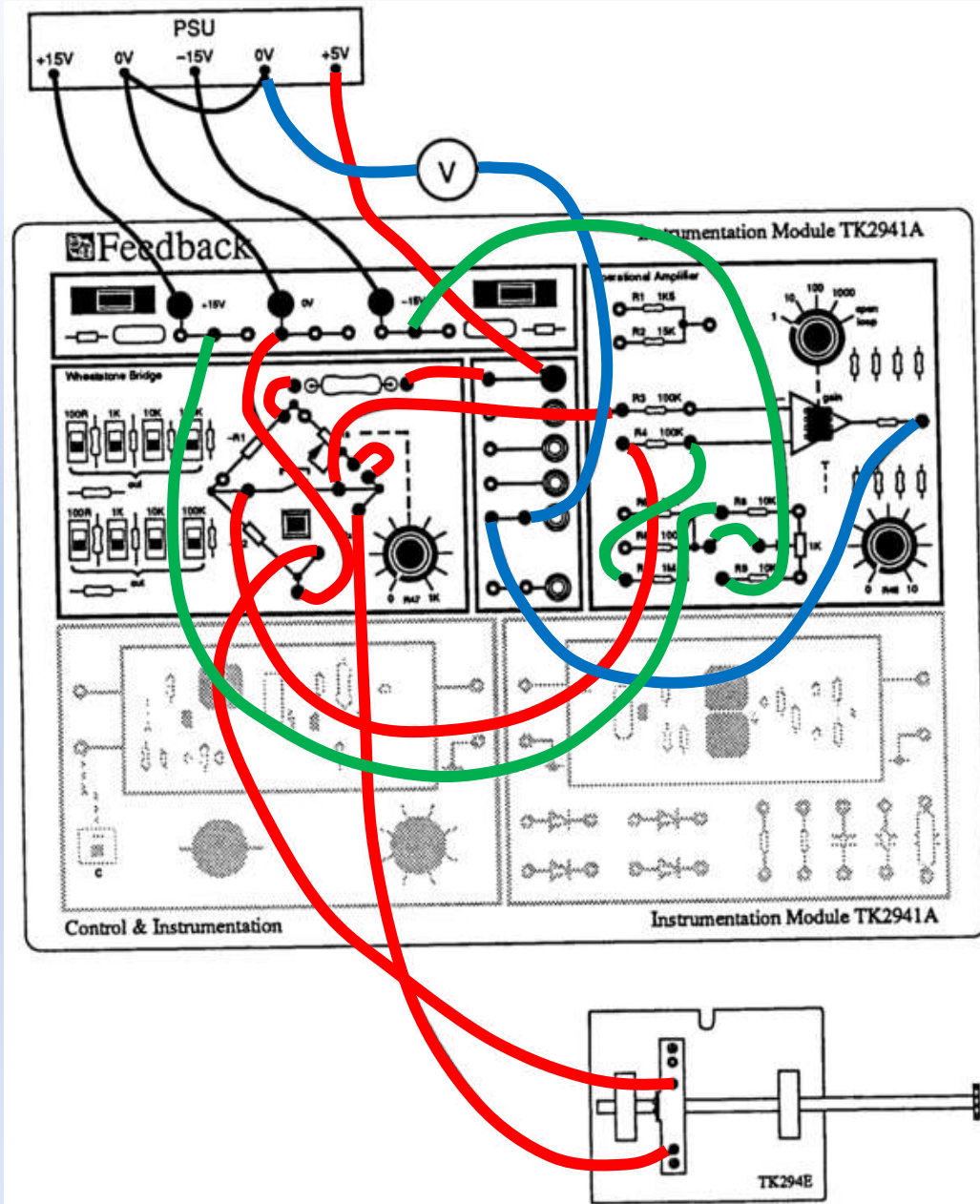
$$\delta = \frac{\Delta R}{R}$$

$$\delta > 0 \Rightarrow V_o < 0$$



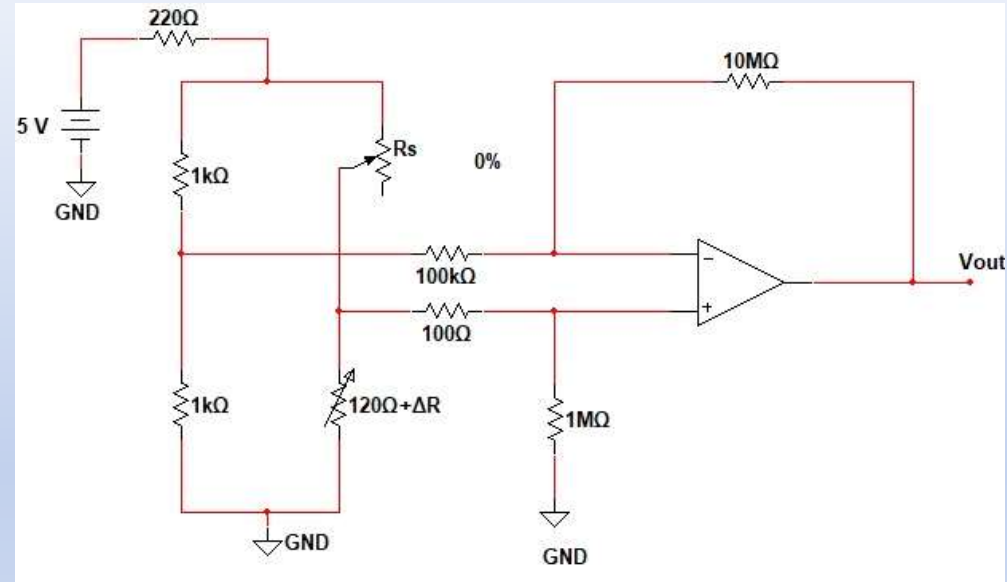
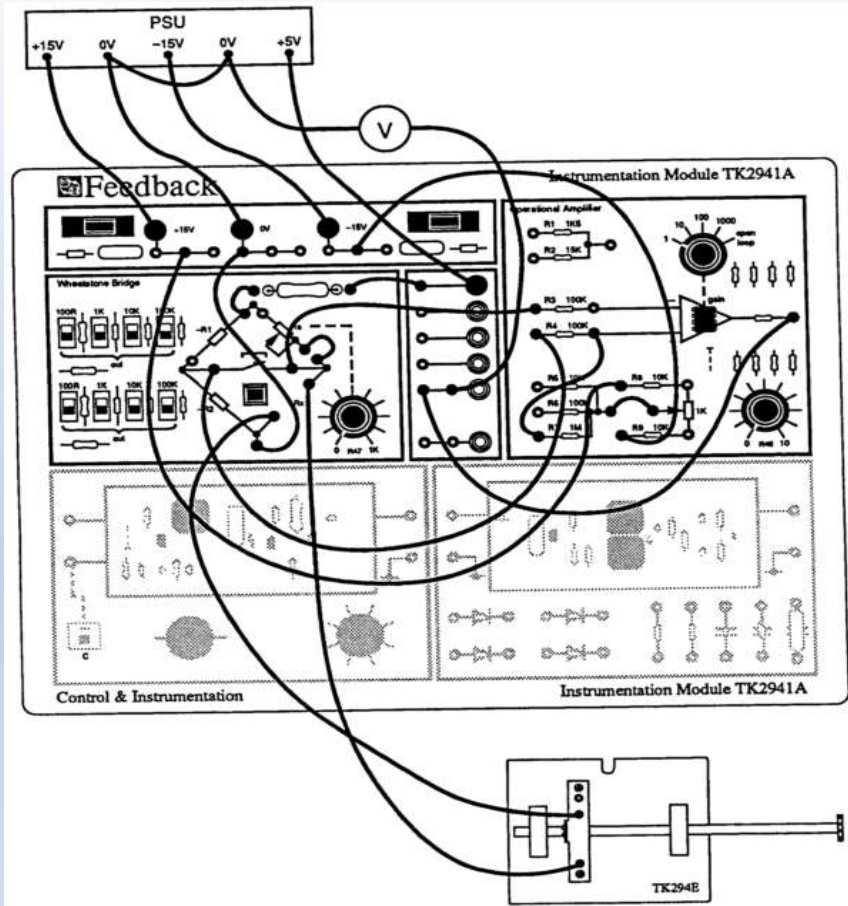
$$\delta < 0 \Rightarrow V_o > 0$$

Μέρος 1^ο : Ο Βασικός Αισθητήρας Μηχανικής Τάσης – Η συνδεσμολογία



1. Συνδέστε τον αισθητήρα μηχανικής τάσης TK294E στη μια πλευρά της γέφυρας.
2. Για να ισορροπήσετε τη γέφυρα, συνδέστε στην πάνω πλευρά της το ποτενσιόμετρο R47.
3. Τροφοδοτήστε την είσοδο της γέφυρας με 5V (+5V και 0V).
4. Συνδέστε την έξοδο της γέφυρας στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή.
5. Συνδέστε στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή ένα βολτόμετρο.
6. Για να μηδενίσουμε αρχικά την έξοδο του ενισχυτή, όταν η πιεζοαντίσταση TK294E δεν είναι υπό τάση, χρησιμοποιούμε το ποτενσιόμετρο R49
 - το τροφοδοτούμε με +15V και -15V
 - και την έξοδό του τροφοδοτούμε στη μη αντιστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή.

Μέρος 1^ο : Ο Βασικός Αισθητήρας Μηχανικής Τάσης – Η συνδεσμολογία



Πρόβλημα

Σχεδιάστε στο Multisim και προσομοιώστε τη λειτουργία του κυκλώματος γέφυρας απλής πιεζοαντίστασης, θεωρώντας τιμές ΔR μεταξύ 0 και 0.2 Ω.

Μέρος 1^ο : Ο Βασικός Αισθητήρας Μηχανικής Τάσης – Εκτέλεση των μετρήσεων

- Για κάθε τιμή της θέσης του μικρομέτρου του Πίνακα 4.10.4, βρείτε την τάση εξόδου και συμπληρώστε την αντίστοιχη στήλη.
- Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.10.4, σχεδιάστε τη γραφική παράσταση της τάσης εξόδου ως προς την ένδειξη του μικρομέτρου, $V_o(x)$.

Πρόβλημα: Από τη γραφική παράσταση $V_o(x)$ ή τις τιμές του Πίνακα 4.10.4, υπολογίστε την ευαισθησία της διάταξης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.10.4

Ένδειξη Μικρομέτρου (mm)	Τάση Εξόδου (mV)
10.0	
10.5	
11.0	
11.5	
12.0	
12.5	
12.0	
11.5	
11.0	
10.5	
10.0	
9.5	
9.0	
8.5	
8.0	
7.5	
8.0	
8.5	
9.0	
9.5	
10.0	