Ηλεκτρικες Μετρησεις

Ενοτητα 4η

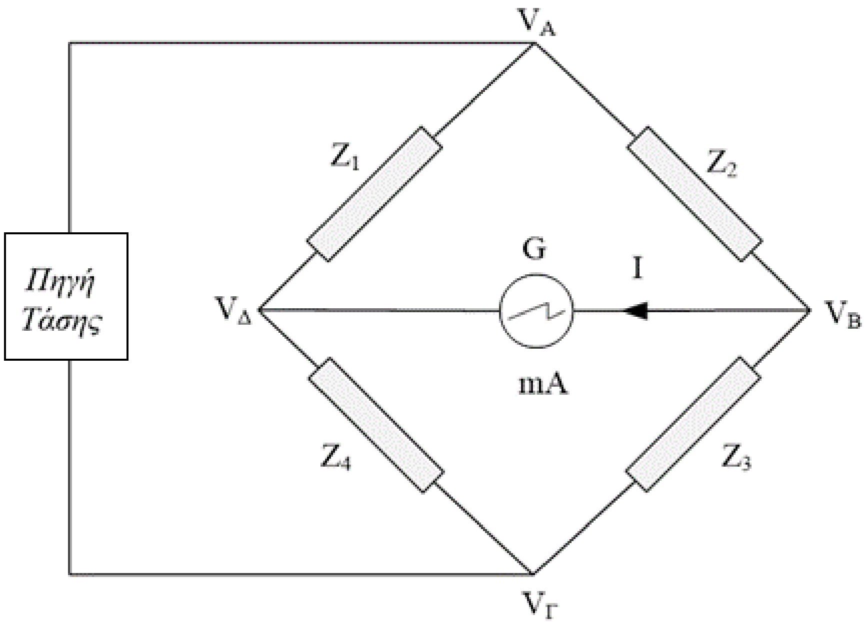
Μέτρηση σύνθετης αντίστασης

Μερος Β: Γέφυρες και μέθοδοι ισορροπίας

Γέφυρες και μέθοδοι ισορροπίας

Γέφυρες και μέθοδοι ισορροπίας

- Βασίζονται στο μηδενισμό του ρεύματος $\mathbf{I}$
- Μηδενισμός ρεύματος συνεπάγεται επίτευξη **ισορροπίας** (equilibrium)
- Ο μηδενισμός ρεύματος μπορεί να γίνει με πολύ μεγάλη ακρίβεια ($\leq 10^{-5}$) με τη χρήση γαλβανομέτρου G (αμπερόμετρο μικρών ρευμάτων)
- Οι **μέθοδοι ισορροπίας** επιτρέπουν εκτέλεση μετρήσεων πολύ μεγάλης ακρίβειας



Κύκλωμα γενικής γέφυρας (bridge)
- Τα στοιχεία $Z_1 - Z_4$ είναι ωμικές αντιστάσεις ή πηνία ή πυκνωτές ή συνδυασμός αυτών

Γενική σχέση ισορροπίας γέφυρας

Στην κατάσταση ισορροπίας

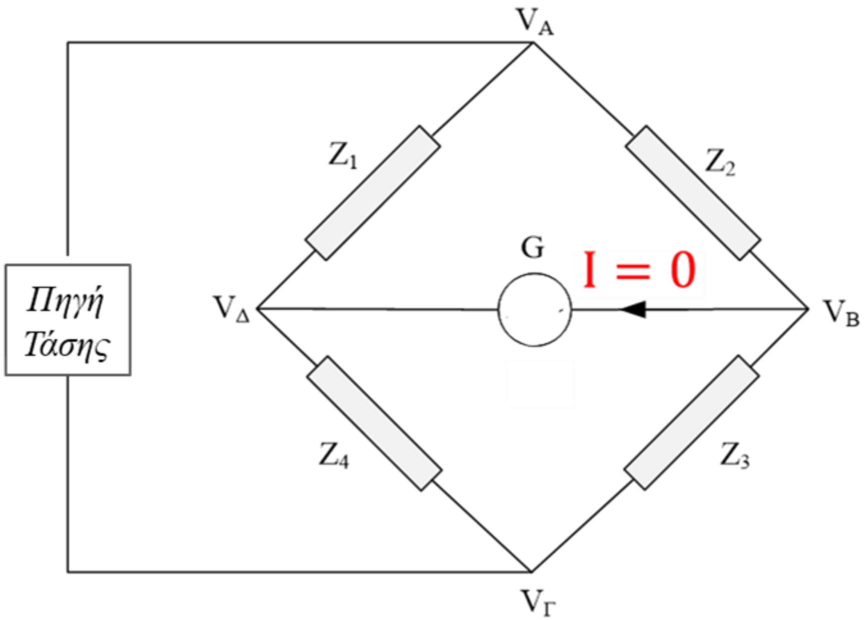
$$I = 0 \;\Rightarrow\; V_{B\Delta} = 0$$

$$V_B - V_\Delta = 0$$

$$(V_B - V_\Gamma) - (V_\Delta - V_\Gamma) = 0$$

ή $\quad V_{B\Gamma} = V_{\Delta\Gamma}$

$$\frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} V_{A\Gamma} = \frac{Z_4}{Z_1 + Z_4} V_{A\Gamma} \; (;;;)$$

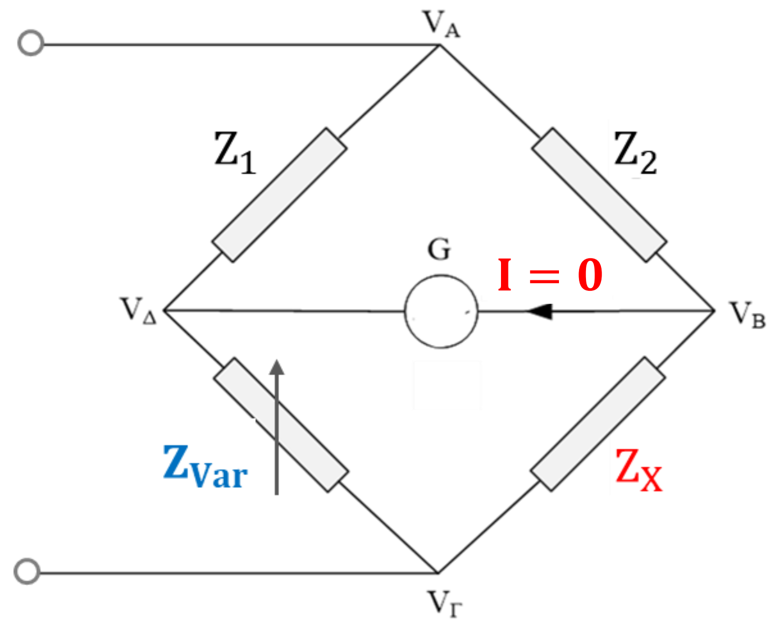


απ’ όπου προκύπτει η **γενική σχέση ισορροπίας της γέφυρας**

$$\mathbf{Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4}$$

Μέθοδος ισορροπίας γέφυρας για τον υπολογισμό της άγνωστης τιμής της (σύνθετης) αντίστασης στοιχείου

- Z_X αντίσταση άγνωστης τιμής
- Z_1, Z_2 σταθερές αντιστάσεις γνωστών τιμών
- Z_{Var} αντίσταση μεταβλητής τιμής (ποτενσιόμετρο ή κιβώτιο αντιστάσεων)



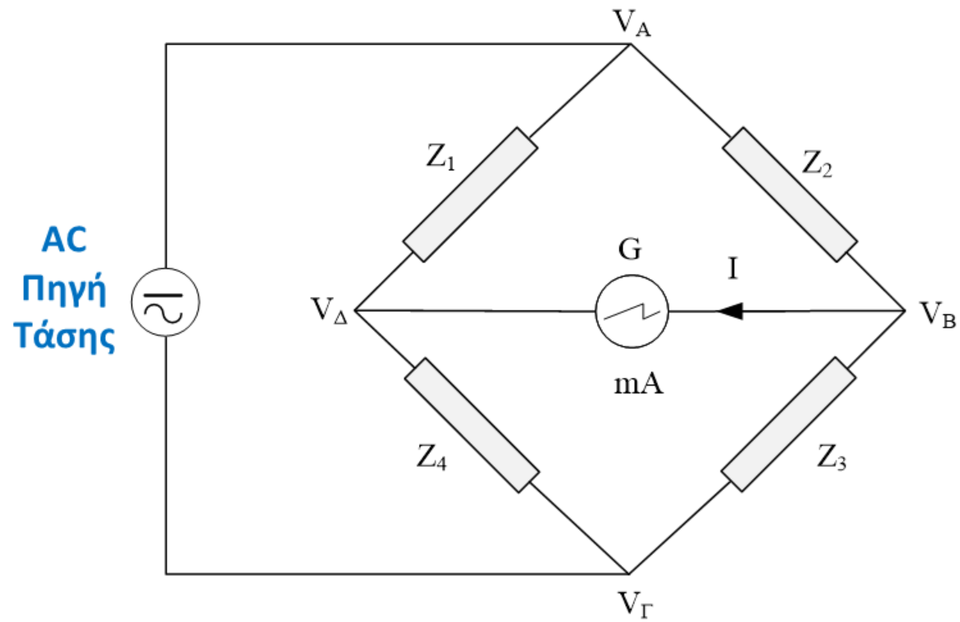
«Ισορροπούμε» τη γέφυρα, δηλαδή, μεταβάλλουμε την τιμή της Z_{Var} μέχρι μηδενισμού της ένδειξης ρεύματος του γαλβανομέτρου G (ή αμπερομέτρου ή βολτομέτρου).

Τότε $Z_1 Z_X = Z_2 Z_{Var}$ και η άγνωστη αντίσταση υπολογίζεται

$$Z_X = \frac{Z_2}{Z_1} Z_{Var}$$

AC γέφυρα

- Τροφοδοτείται από **AC πηγή τάσης**
- Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της χωρητικότητας πραγματικών πυκνωτών ή της αυτεπαγωγής πραγματικών πηνίων.



- Τα στοιχεία των κλάδων της AC γέφυρας είναι εν γένει σύνθετες αντιστάσεις

$$Z_i = R_i + jX_i = |Z_i| e^{j\theta_i}, \qquad i = 1, 2, 3, 4$$

όπου $|Z_i| = \sqrt{{R_i}^2 + {X_i}^2}$ και $\theta_i = \tan^{-1}(X_i/R_i)$

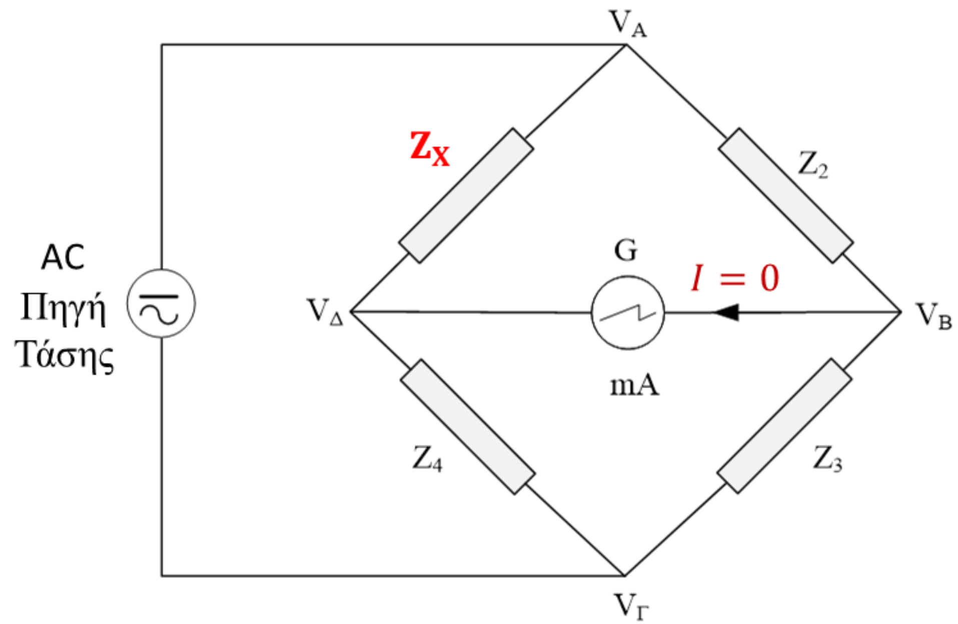
AC γέφυρα σε ισορροπία

Αντικαθιστώντας στη συνθήκη ισορροπίας

$$\mathrm{Z_X Z_3 = Z_2 Z_4}$$

τις σύνθετες αντιστάσεις σε καρτεσιανή μορφή

$$Z_i = R_i + jX_i, \qquad i = \mathrm{X}, 2, 3, 4$$



και εξισώνοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, παίρνουμε το σύστημα εξισώσεων

$$R_3 \boldsymbol{R_X} - X_3 \boldsymbol{X_X} = R_2 R_4 - X_2 X_4$$

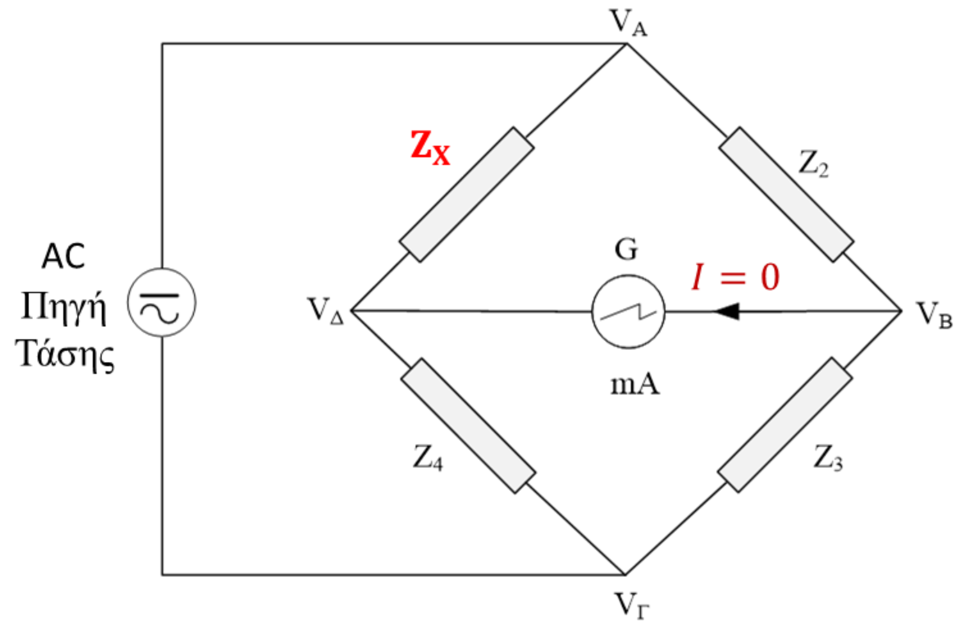
$$X_3 \boldsymbol{R_X} + R_3 \boldsymbol{X_X} = R_2 X_4 + X_2 R_4$$

από το οποίο βρίσκουμε τις ζητούμενες τιμές αντίστασης R_X και ανάδρασης X_X του άγνωστου στοιχείου $\mathrm{Z_X}$.

AC γέφυρα σε ισορροπία *(συνέχεια)*

Αντικαθιστώντας στη συνθήκη ισορροπίας

$$Z_X Z_3 = Z_2 Z_4$$



τις σύνθετες αντιστάσεις των στοιχείων σε πολική μορφή

$$Z_i = |Z_i| e^{j\theta_i}, \qquad i = 1, 2, 3, 4$$

παίρνουμε το σύστημα εξισώσεων σε πολικές συνιστώσες

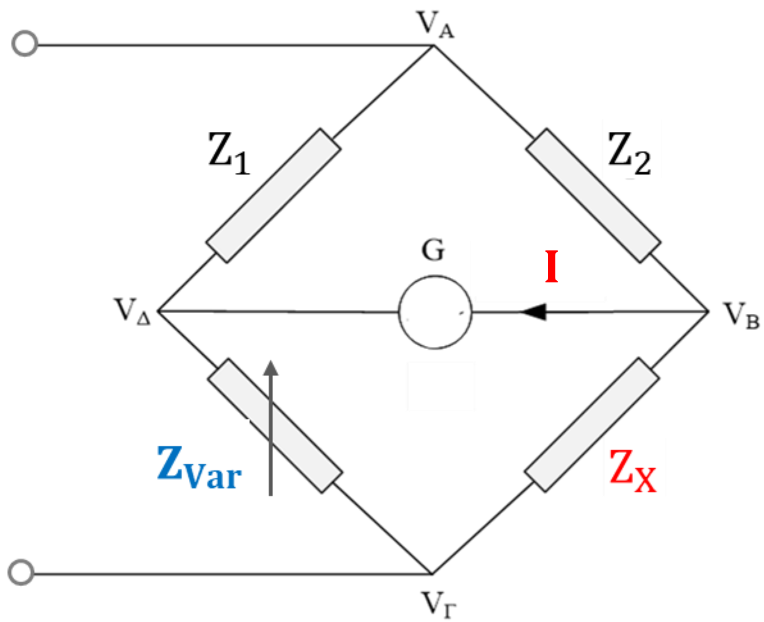
$$|\boldsymbol{Z_X}||Z_3| = |Z_2||Z_4|$$

$$\boldsymbol{\theta_X} + \theta_3 = \theta_2 + \theta_4$$

Ευαισθησία της γέφυρας

Η ευαισθησία (sensitivity) της γέφυρας μπορεί να οριστεί σαν ο λόγος της μεταβολής του ρεύματος ΔI ως προς μικρή μεταβολή ΔZ_{var} της μεταβλητής αντίστασης γύρω από τη θέση ισορροπίας.

$$\mathrm{Sensitivity} = \left.\frac{\Delta \mathrm{I}}{\Delta \mathrm{Z}_{\mathrm{var}}}\right|_{\mathrm{I}=0}$$

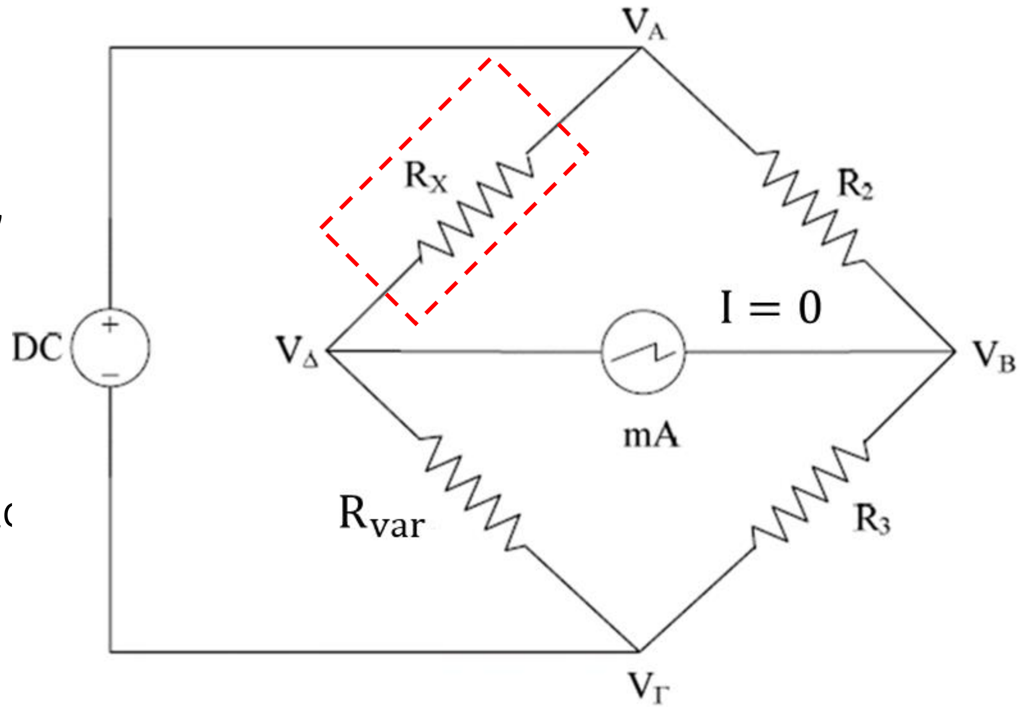


Μέτρηση ωμικής αντίστασης R με γέφυρα

Γέφυρα Wheatstone

- Γέφυρα συνεχούς ρεύματος (DC)
- Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό με μεγάλη ακρίβεια των τιμών άγνωστων ωμικών αντιστάσεων από 1 Ω ως 10 ΜΩ
- Με εξισορρόπηση της γέφυρας $(\mathrm{I}=0)$ με τη βοήθεια μεταβλητής $\mathrm{R_{var}}$, έχουμε

$$\mathrm{R_X} = \frac{\mathrm{R_2}}{\mathrm{R_3}} \mathrm{R_{var}}$$



Μέτρηση χωρητικότητας με γέφυρα

Απλή γέφυρα μέτρησης χωρητικότητας (Sauty – Wien)

Από τη συνθήκη ισορροπίας

$$\mathrm{Z_X Z_3 = Z_2 Z_4}$$

για σύνθετες αντιστάσεις των στοιχείων της γέφυρας

$$\mathrm{Z_X = R_X + 1/j\omega C_X}$$

$$\mathrm{Z_2 = R_2}$$

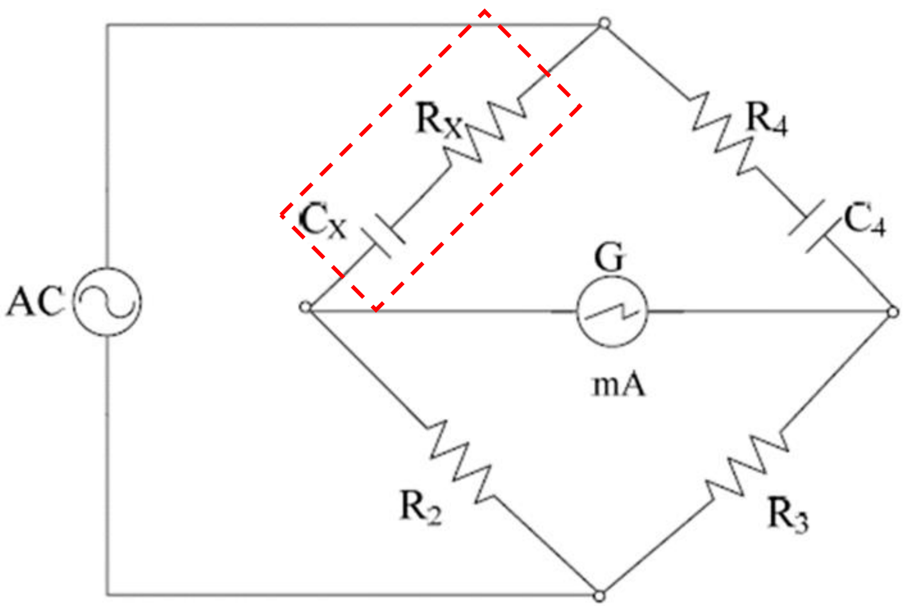
$\mathrm{Z_3 = R_3}$ και

$$\mathrm{Z_4 = R_4 + 1/j\omega C_4}$$

προκύπτουν

$$R_X = \frac{R_2 R_4}{R_3}$$

$$C_X = \frac{R_3}{R_2} C_4$$



Γέφυρα Schering

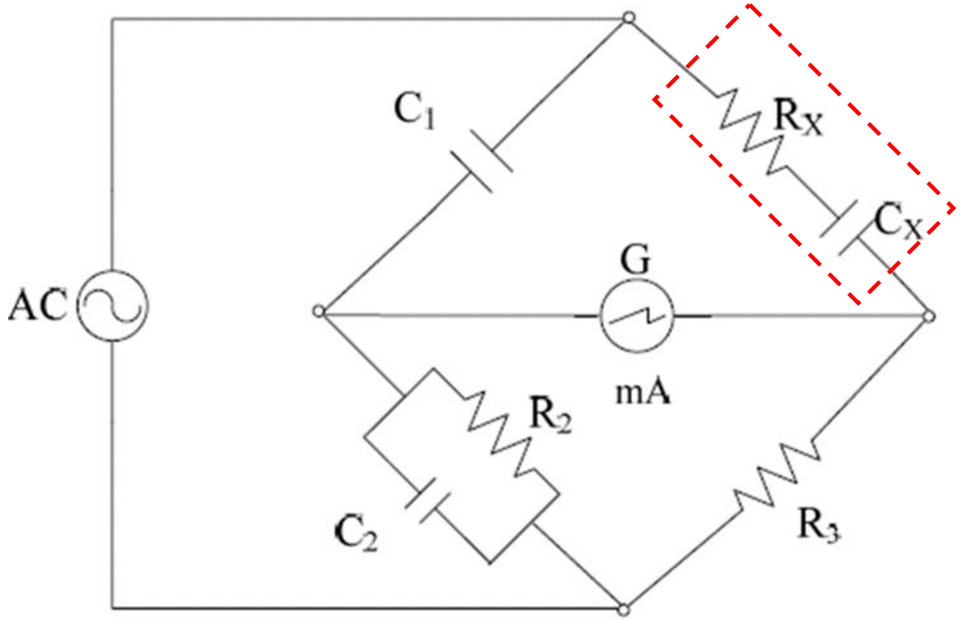
Σύγκριση της άγνωστης πραγματικής χωρητικότητας

$$(R_X, C_X)$$

με γνωστό πρότυπο πυκνωτή με αμελητέες απώλειες (ιδανικός πυκνωτής) χωρητικότητας

$$C_1$$

Έχει εφαρμογές σε εγκαταστάσεις μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για μέτρηση συντελεστή απωλειών σε μονωτικά υλικά.



Γέφυρα Schering *(συνέχεια)*

Από τη συνθήκη ισορροπίας

$$Z_X Z_2 = Z_1 Z_3$$

για σύνθετες αντιστάσεις των στοιχείων της γέφυρας

$$Z_X = R_X + 1/j\omega C_X$$

$$Z_1 = 1/j\omega C_1$$

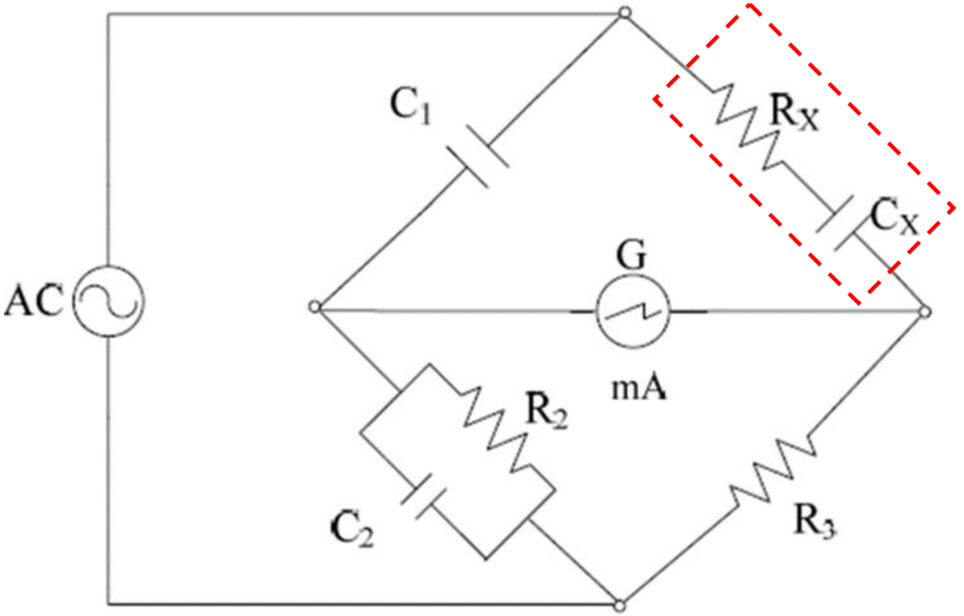
$$Z_2 = R_2/(1 + j\omega R_2 C_2)$$

$$Z_3 = R_3$$

προκύπτουν

$$R_X = \frac{C_2}{C_1} R_3$$

$$C_X = \frac{R_2}{R_3} C_1$$



Υπολογισμός συντελεστή απωλειών μονωτικού με γέφυρα Schering

Συντελεστής απωλειών πυκνωτή

$$\alpha = \frac{\text{Resistace}}{\text{Reactance}} = \frac{R_X}{1/\omega C_X} = \omega R_X C_X$$

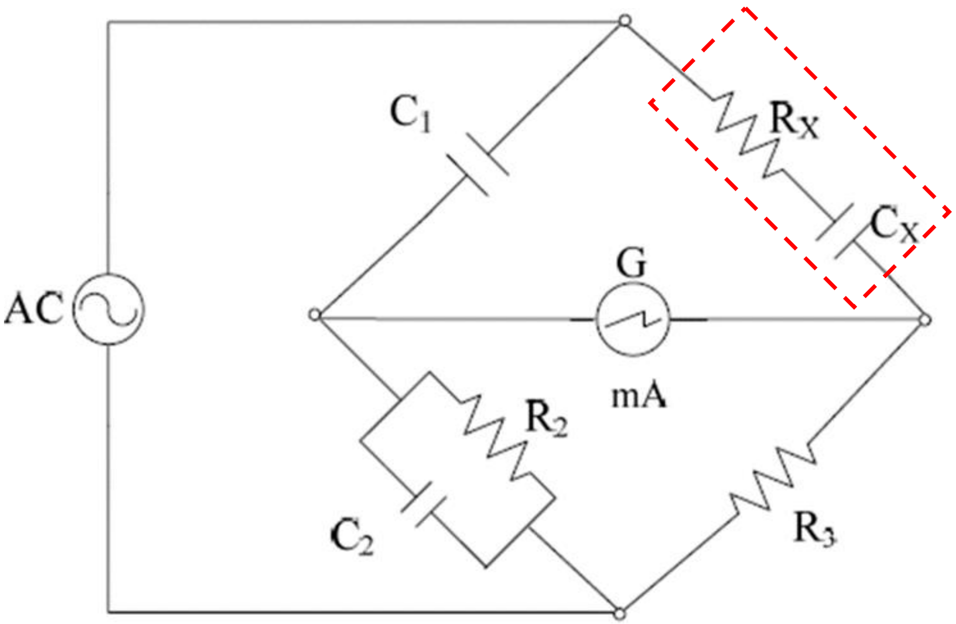
Αντικαθιστώντας τις τιμές της γέφυρας Schering

$$R_X = \frac{C_2}{C_1} R_3$$

$$C_X = \frac{R_2}{R_3} C_1$$

ο ζητούμενος συντελεστής προκύπτει

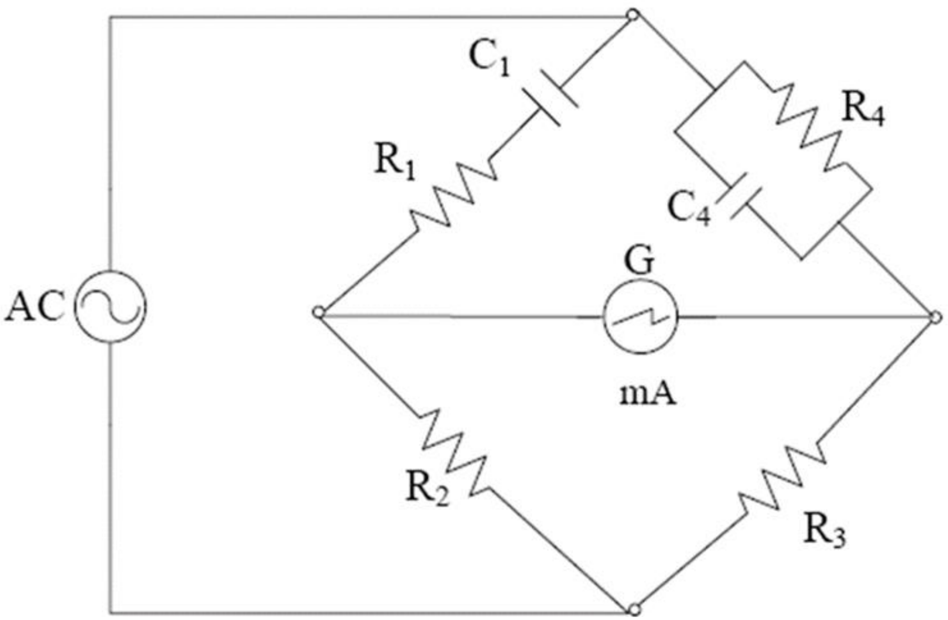
$$\alpha = \omega R_2 C_2$$



Μέτρηση συχνότητας με γέφυρα Wien - Robinson

Γέφυρα Wien - Robinson

- Χρησιμοποιείται κυρίως για τη μέτρηση της συχνότητας
- Προϋποθέτει γνωστές τιμές αντιστάσεων όλων των στοιχείων



Από τη συνθήκη ισορροπίας

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$$

για αντιστάσεις στοιχείων γέφυρας

$$Z_1 = R_1 + 1/j\omega C_1$$

$$Z_2 = R_2$$

$$Z_3 = R_3$$

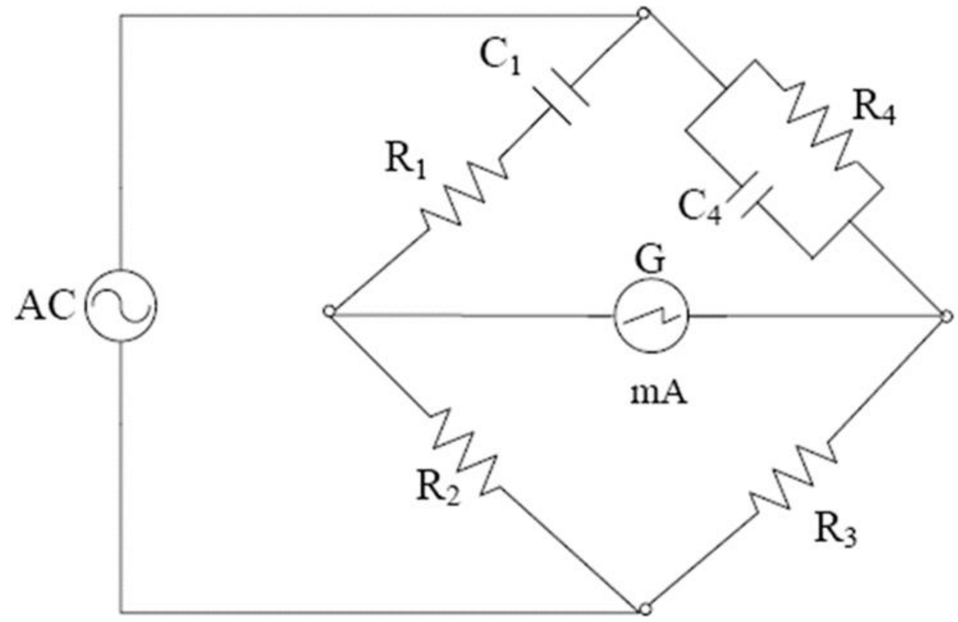
$$Z_4 = R_4/(1 + j\omega R_4 C_4)$$

προκύπτει

$$\omega^2 = \frac{1}{R_1 R_4 C_1 C_4}$$

Γέφυρα Wien – Robinson (*συνέχεια*)

$$\omega^2 = \frac{1}{R_1 R_4 C_1 C_4}$$



Θέτοντας

- συμμεταβλητές τις R_1 και R_4, δηλαδή, $R_1 = R_4 = R$
- συμμεταβλητούς τους πυκνωτές C_1 και C_4 ($C_1 = C_4 = C$)
- και σταθερές τις R_2, R_3 ώστε $R_2 = 2R_3$

η σχέση για τη συχνότητα απλοποιείται στη

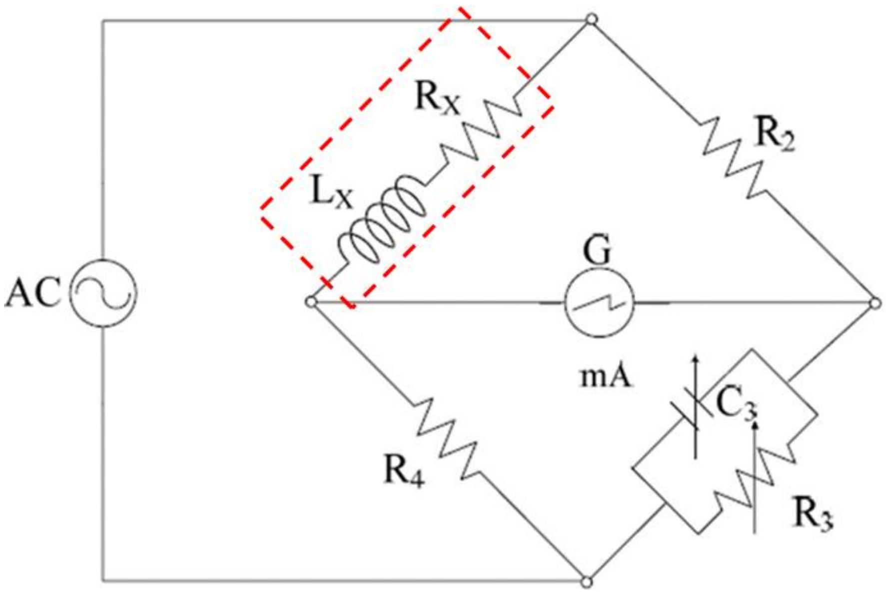
$$\omega = \frac{1}{RC}$$

Μέτρηση σύνθετης αντίστασης πηνίου με γέφυρα

Γέφυρα Maxwell

Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης πηνίων συνήθους ποιότητας

- με τιμές συντελεστή απωλειών (α) από 0.1 ως 5
- ή συντελεστή ποιότητας ($Q = 1/\alpha$) με τιμές από 0.2 ως 10



Μέτρηση σύνθετης αντίστασης πηνίου με γέφυρα Maxwell

Αντικαθιστώντας στη συνθήκη ισορροπίας

$$Z_X Z_3 = Z_2 Z_4$$

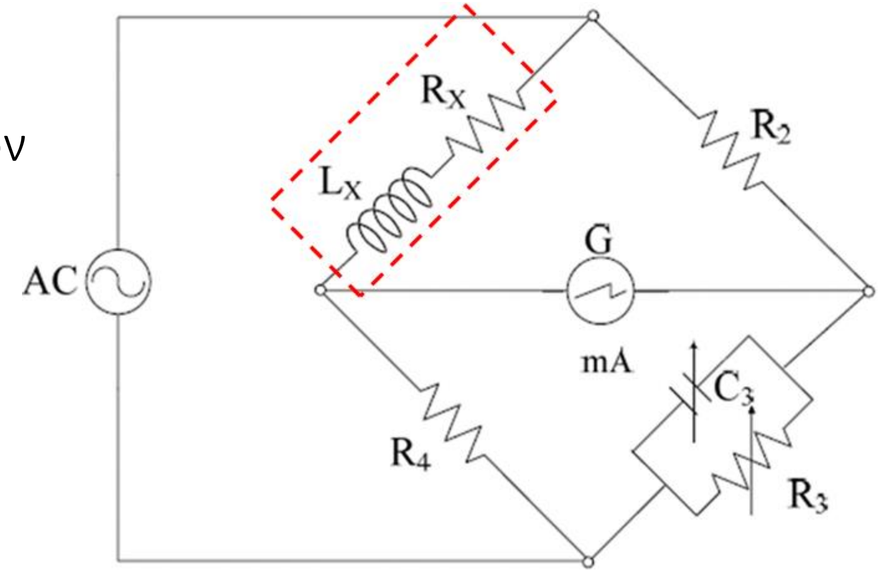
τις τιμές των αντιστάσεων των στοιχείων της γέφυρας

$$Z_X = R_X + j\omega L_X,$$

$$Z_2 = R_2,$$

$$Z_3 = R_3/(1 + j\omega R_3 C_3) \text{ και}$$

$$Z_4 = R_4$$



προκύπτουν

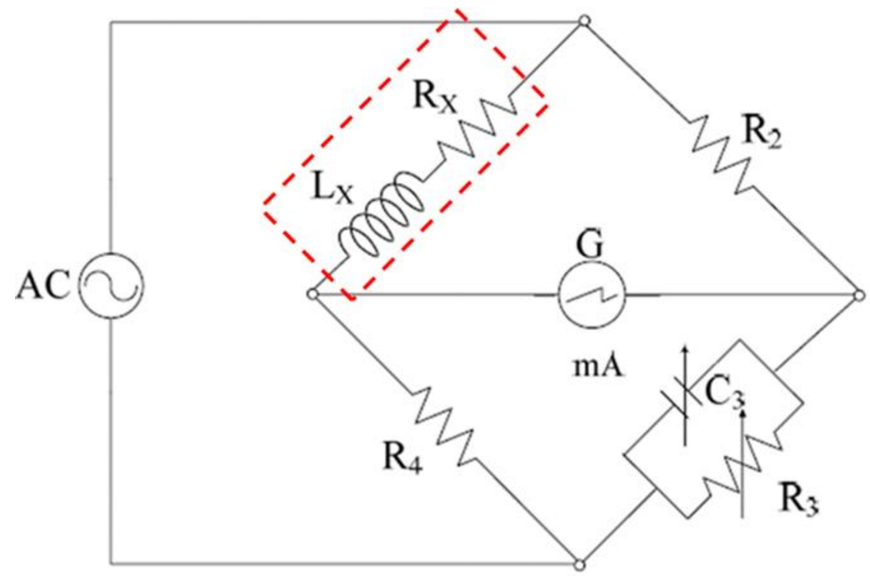
$$R_X = \frac{R_2 R_4}{R_3}$$

$$L_X = R_2 R_4 C_3$$

Υπολογισμός συντελεστή απωλειών πηνίου με γέφυρα Maxwell

Αντικαθιστώντας στο συντελεστή απωλειών πηνίου

$$\alpha = \frac{R_X}{\omega L_X}$$



τις τιμές σύνθετης αντίστασης από τη γέφυρα

$$R_X = \frac{R_2 R_4}{R_3} \quad \text{και} \quad L_X = R_2 R_4 C_3$$

προκύπτει

$$\alpha = \frac{1}{\omega R_3 C_3}$$

και ο συντελεστής ποιότητας

$$Q = \frac{1}{\alpha} = \omega R_3 C_3$$

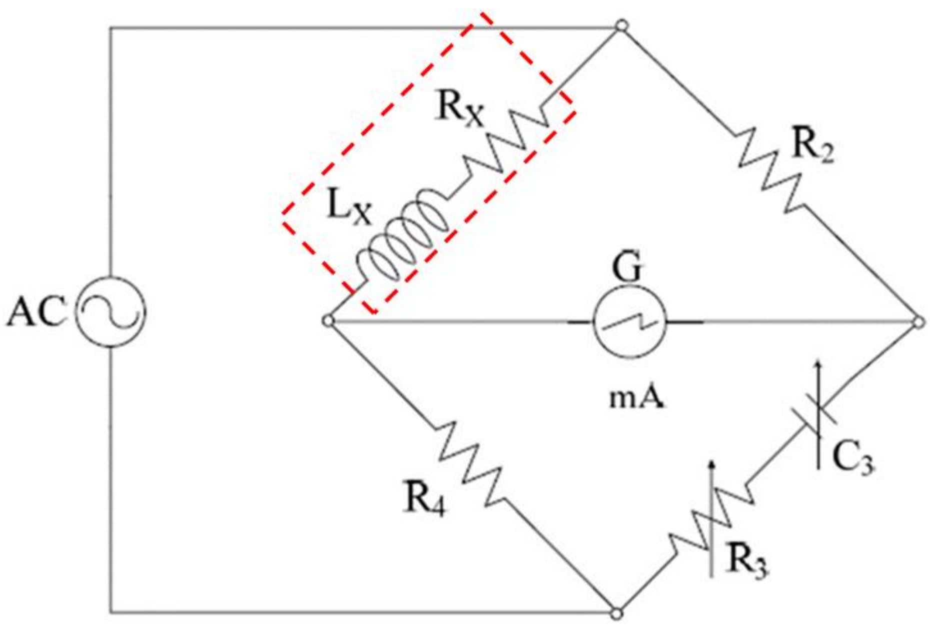
Γέφυρα Hay

- Αποτελεί παραλλαγή της γέφυρας Maxwell για τη μέτρηση επαγωγής πηνίων υψηλής ποιότητας.

- Ένας από τους κλάδους της γέφυρας Hay διαθέτει έναν πυκνωτή ρυθμιζόμενης με μεγάλη ακρίβεια σύνθετης αντίστασης

$$Z_3 = R_3 + 1/j\omega C_3$$

που χρησιμοποιείται για την εξισορρόπηση της άγνωστης επαγωγής



Μέτρηση σύνθετης αντίστασης πηνίου με γέφυρα Hay

Αντικαθιστώντας στη συνθήκη ισορροπίας

$$Z_X Z_3 = Z_2 Z_4$$

τις τιμές αντιστάσεων των στοιχείων της γέφυρας

$$Z_X = R_X + j\omega L_X$$

$$Z_2 = R_2$$

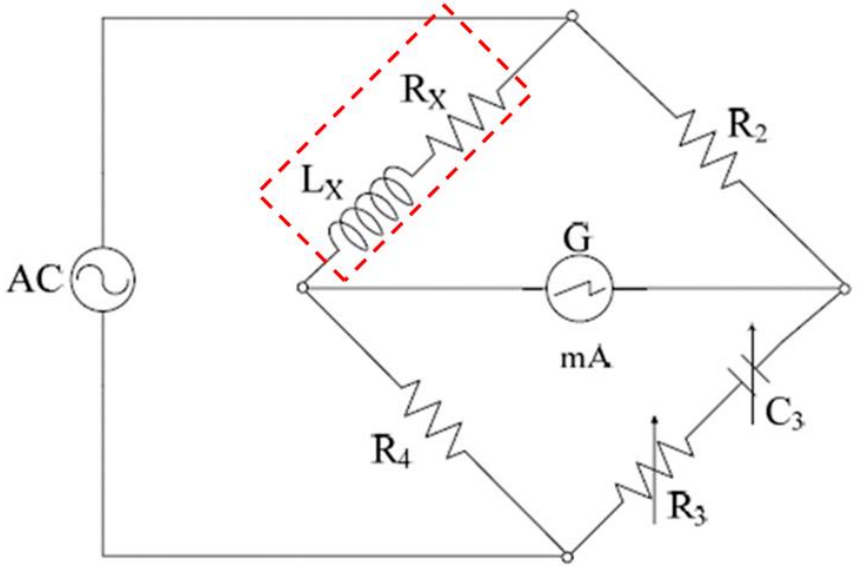
$$Z_3 = R_3 + 1/j\omega C_3$$

$$Z_4 = R_4$$

προκύπτουν

$$R_X = \frac{\omega^2 C_3^2 R_2 R_3 R_4}{1 + \omega^2 C_3^2 R_3^2}$$

$$L_X = \frac{R_2 R_4 C_3}{1 + \omega^2 C_3^2 R_3^2}$$



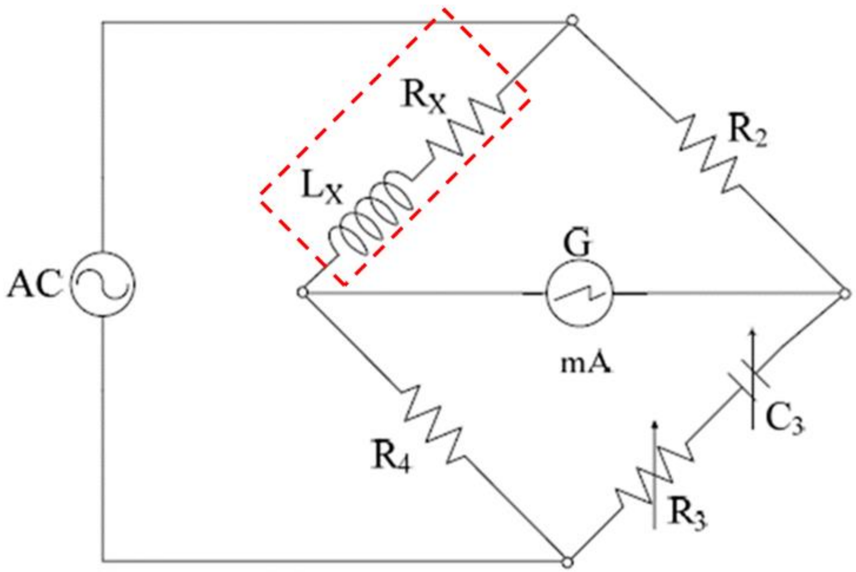
Υπολογισμός συντελεστή απωλειών πηνίου με γέφυρα Hay

- Συντελεστής απωλειών

$$\alpha = \frac{R_X}{\omega L_X} = \omega R_3 C_3$$

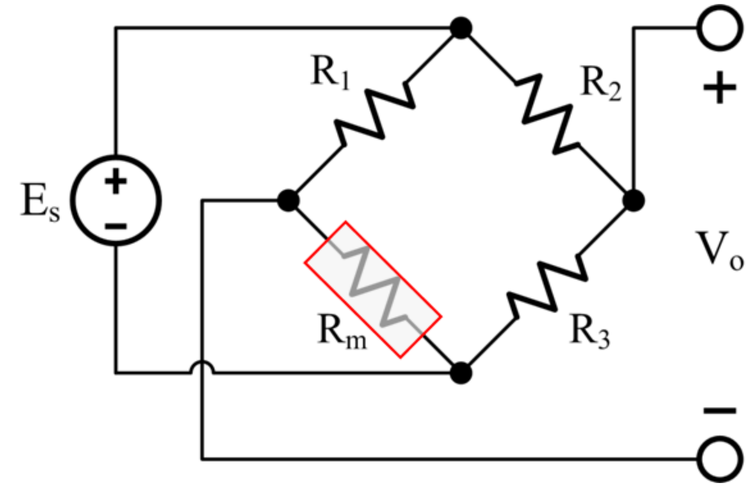
- Συντελεστής ποιότητας

$$Q = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\omega R_3 C_3}$$



Γέφυρα Wheatstone για αισθητήρες αντίστασης

Γέφυρα Wheatstone για χρήση με αισθητήρες αντιστασης



$\mathrm{R_m}$ η τιμή αντίστασης του αισθητήρα (π.χ., RTD ή πιεζοαντίσταση)

$$\mathrm{R_m = R_0 + \Delta R_m}$$

όπου,

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

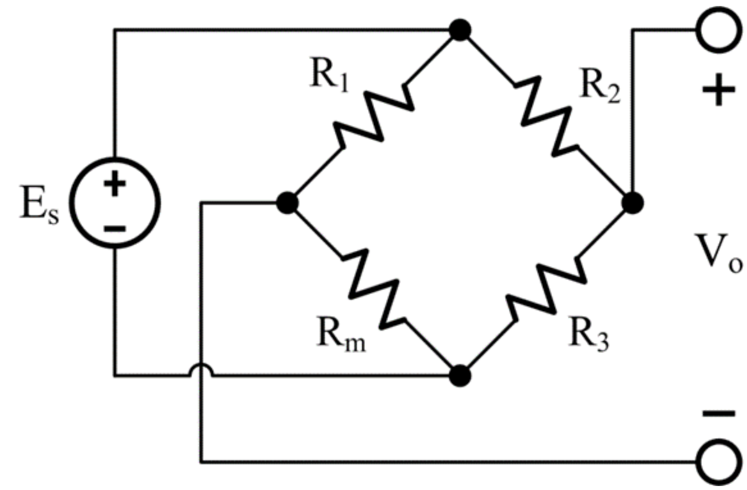
$\mathrm{\Delta R_m}$ η μεταβολή της αντίστασης με τη μεταβολή

- της θερμοκρασίας για την περίπτωση αισθητήρα RTD
- της παραμόρφωσης για την περίπτωση αισθητήρα strain gauge (πιεζοαντίσταση)

Πρόβλημα

Αποδείξτε ότι, γενικά, η τάση εξόδου $\mathbf{V_o}$ της γέφυρας της εικόνας δίνεται από τη σχέση

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

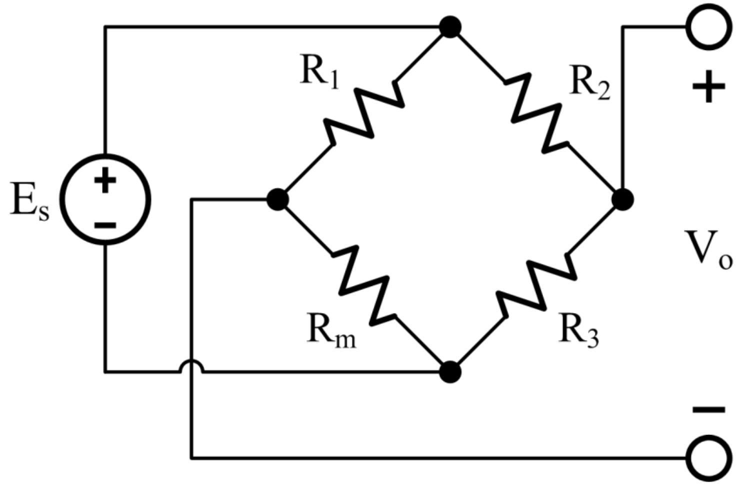


Υπόδειξη: Βλ., Ηλεκτρικά Κυκλώματα Ι, κεφ. 4

Μέτρηση αισθητήρα αντίστασης με γέφυρα Wheatstone

- Τάση εξόδου της γέφυρας

$$V_o = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{R_m}{R_m + R_1}\right) E_s, \qquad (1)$$



- Αντίσταση αισθητήρα (π.χ., RTD ή πιεζοαντίσταση)

$$R_m = R_0 + \Delta R_m$$

- $\delta = \dfrac{\Delta R_m}{R_0}$ η σχετική μεταβολής της αντίστασης του αισθητήρα

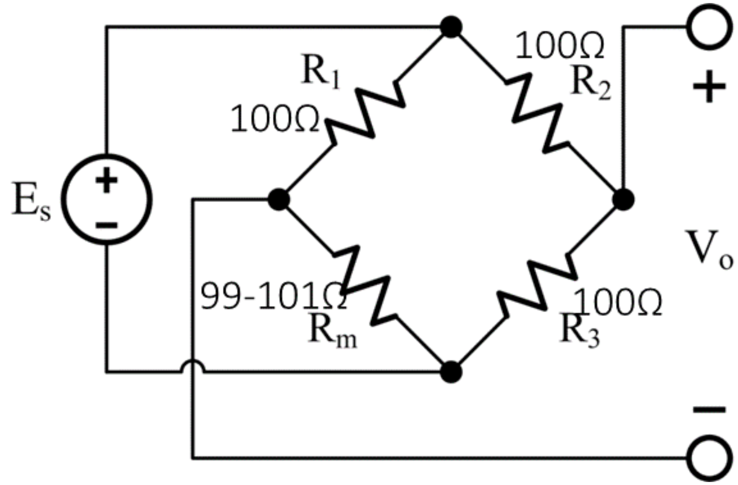
- Επιλέγοντας $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$ στην (1), προκύπτει, για μικρές τιμές μεταβολής ($\delta \leq 1$),

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

Πρόβλημα

(α) Υπολογίστε και σχεδιάστε την τάση εξόδου $\mathbf{V_o}$ σαν συνάρτηση της τιμής αντίστασης $\mathrm{R_m}$ του αισθητήρα στο διάστημα (99Ω – 101Ω)

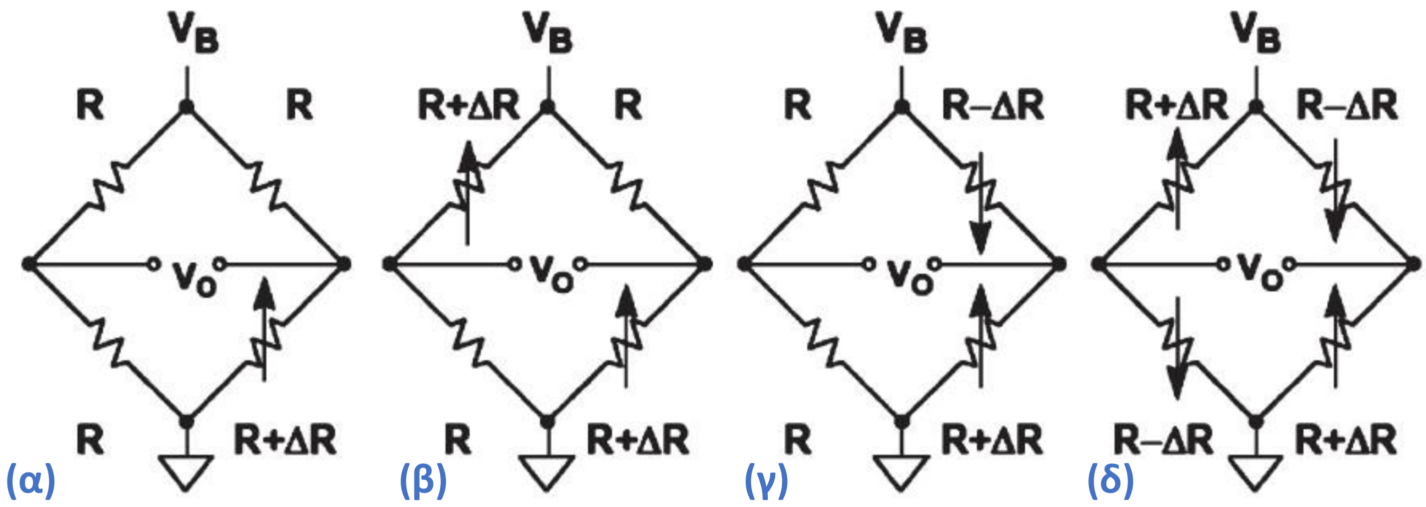
(β) Αποδείξτε ότι, για δ<<1, η έξοδος της γέφυρας είναι γραμμική.



Γέφυρα Wheatstone για αισθητήρες αντίστασης (συνέχεια)

- 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)



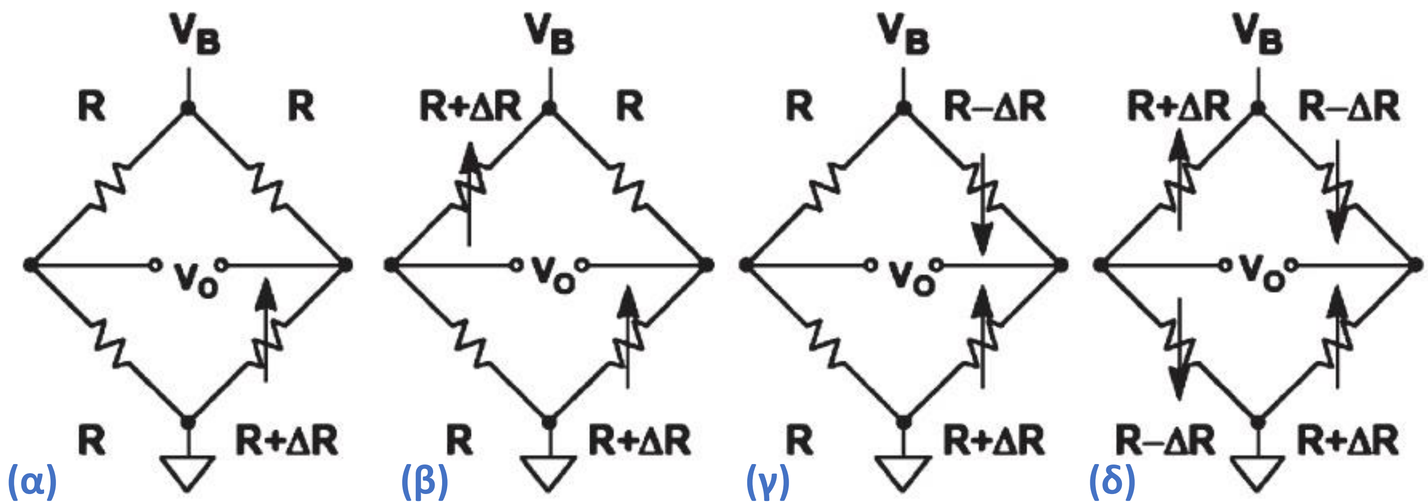
Πρόβλημα

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

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

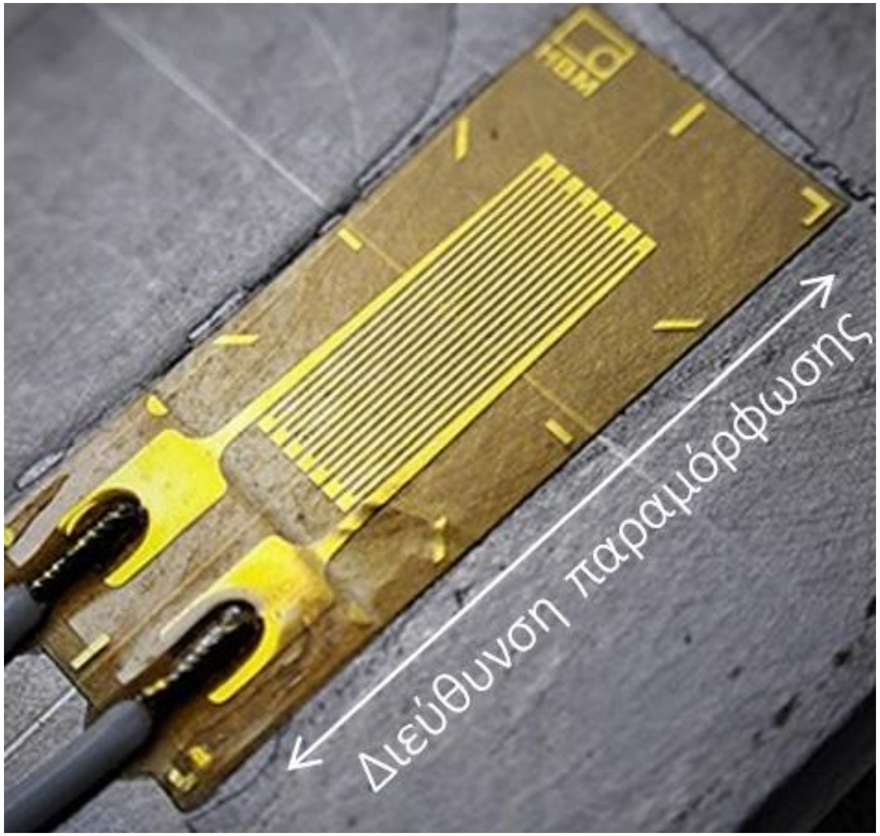
(γ) $V_o \cong -\frac{V_B}{2} \cdot \delta$

(δ) $V_o \cong -V_B \cdot \delta$



Πιεζοαντίσταση (strain gage)

- Είναι ένα πλέγμα λεπτών αγωγών των οποίων η αντίσταση αυξάνεται όταν επιμηκύνονται ή μειώνεται όταν συρρικνώνονται.
- Εφαρμόζονται σταθερά με κόλλα (ή ειδικό τσιμέντο) πάνω στο σώμα στο οποίο ασκούνται εκτατικές ή συμπιεστικές δυνάμεις παράλληλα στη διεύθυνση παραμόρφωσης
- Με αυτόν το τρόπο επιτυγχάνουμε να μετρήσουμε την παραμόρφωση (επιμήκυνση ή συμπίεση) του στερεού σώματος.

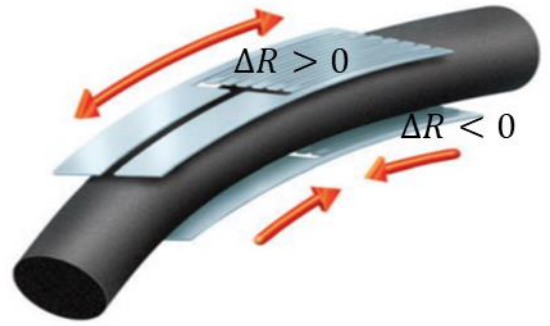


https://encardio.medium.com/strain-gauge-principle-types-features-and-applications-357f6fed86a5

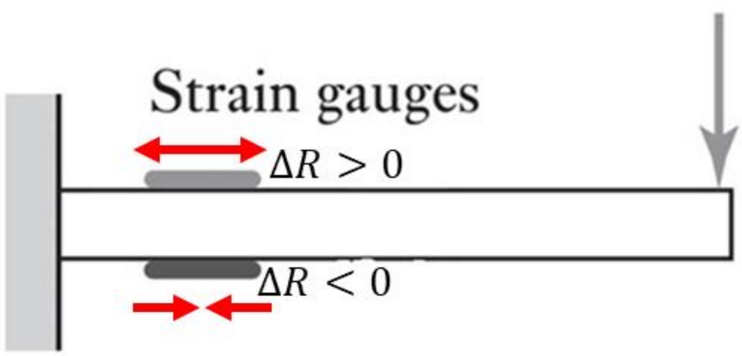
Πιεζοαντίσταση ως ευαίσθητος μετρητής γωνίας κάμψης στερεών σωμάτων

- Προκειμένου να μετρήθεί η γωνία κάμψης (bending angle) μεταλλικών σωλήνων ή ράβδων, συνήθως, συνδέονται ζεύγη πιεζοαντιστάσεων στις αντίθετες πλευρές

- Όταν η ράβδος είναι λυγισμένη, οι αγωγοί στη μια πιεζοαντίσαση του ζεύγους γίνονται μακρύτεροι και λεπτότεροι, αυξάνοντας την αντίσταση ($\Delta R > 0$), ενώ στην άλλη γίνονται κοντύτεροι και παχύτεροι, μειώνοντας την αντίσταση ($\Delta R < 0$).



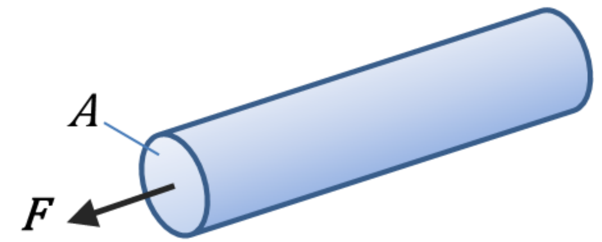
Nilsson and Riedel Electric Circuits Global 9th ed



Μηχανική Τάση και Παραμόρφωση

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

$$\sigma = F/A$$



- Εκφράζεται σε μονάδες πίεσης, $N/m^2 = \mathrm{Pa}$

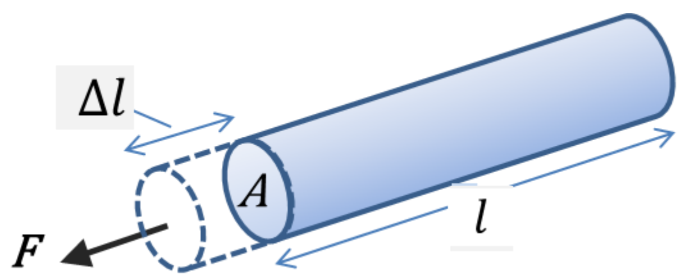
- Σχέση μεταξύ των μονάδων πίεσης

Pa = 10^{-5} bar = 7.5×10^{-3} Torr = 1.45×10^{-4} psi

- Αποτέλεσμα της μηχανικής τάσης, είναι η (μηχανική) **παραμόρφωση** του σώματος (επιμήκυνση ή συμπίεση)

- **Παραμόρφωση** (strain), ε, είναι η σχετική μεταβολή του μήκους του σώματος

$$\varepsilon = \Delta l/l$$



- Εκφράζεται σε *ppm* ή microstrains ($\mu\varepsilon$)

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

Σχέση μηχανικής τάσης – παραμόρφωσης

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

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

όπου,

E είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young (Young's modulus) του υλικού

- έχει διαστάσεις πίεσης (όπως η μηχανική τάση)
- μετριέται, συνήθως, σε Gpa ή Mpsi.

Παράδειγμα

Παραμόρφωση ε = 300$\mu\varepsilon$ 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

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

δηλαδή, το μήκος του σώματος θα γίνει

45.0135 cm (αν επιμηκυνθεί)

ή 44.9865 cm (αν συμπιεστεί)

Μεταβολή της πιεζοαντίστασης στην παραμόρφωση

$$\frac{\Delta R}{R} = S_e \varepsilon$$

- όπου, $\varepsilon = \Delta l / l$ η παραμόρφωση
- $\Delta R / R$ η σχετική μεταβολή της πιεζοαντίστασης
- S_e η ευαισθησία (sensitivity) ή συντελεστής (gauge factor, *GF*) της πιεζοαντίστασης.
- Για μεταλλικά σύρματα η τιμή S_e κυμαίνεται από 2 έως 6.
- Για μετρητές ημιαγωγών, η τιμή S_e είναι πολύ υψηλότερη, μεταξύ 40 και 200.

Πίνακας τιμών του συντελεστή GF ή S_e 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

Παράδειγμα

Ποια είναι η μεταβολή αντίστασης πιεζοαντίστασης, ονομαστικής τιμής $100\ \Omega$ και συντελεστή 2.0, σε παραμόρφωση 0.001;

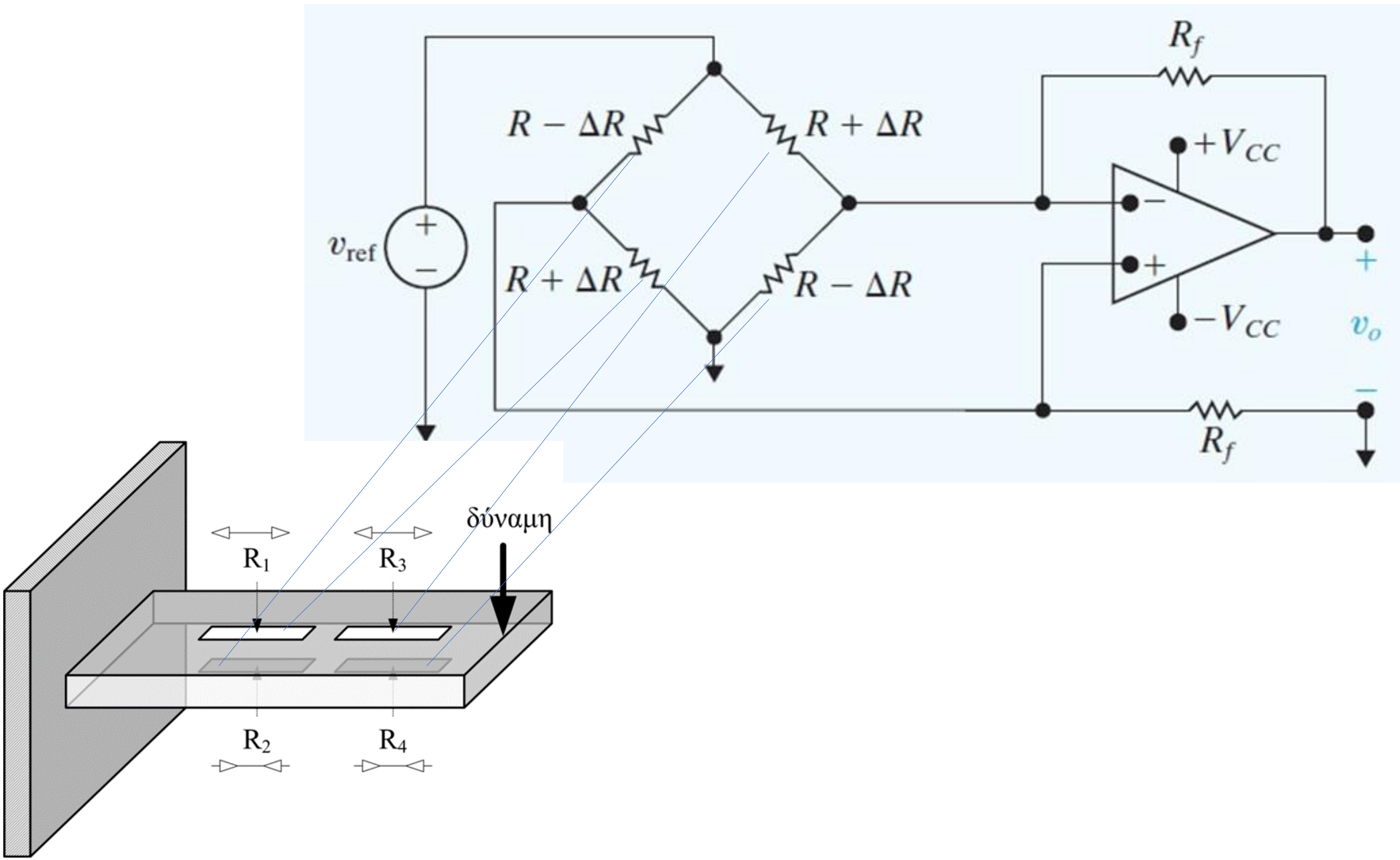
Η σχετική μεταβολή αντίστασης είναι

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

Επομένως, η απόλυτη μεταβολή της αντίστασης είναι

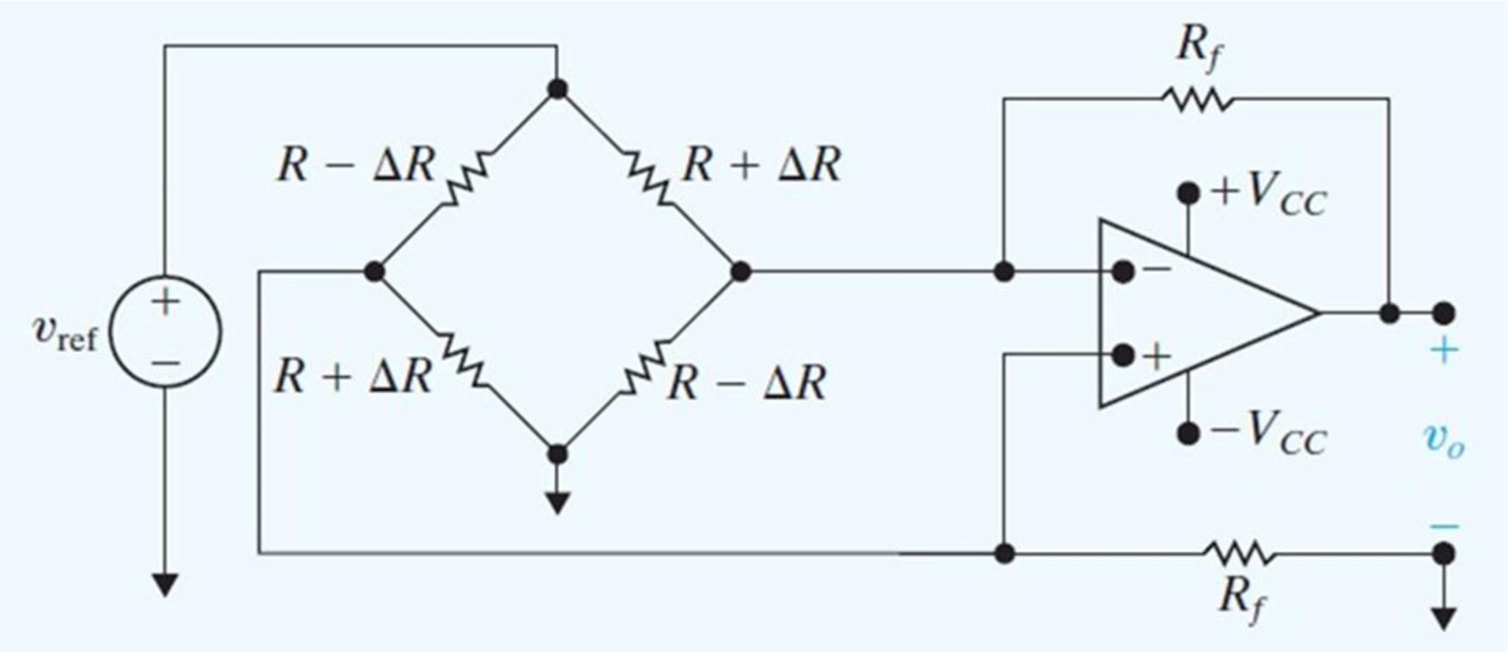
$$\Delta R = 0.002 \cdot R = 0.002 \cdot (100\ \Omega) = 0.2\ \Omega$$

Ένα κύκλωμα γέφυρας – τελεστικού ενισχυτή για τη μέτρηση παραμορφώσεων σε ελαστικά στερεά



Παράδειγμα (βλ. Nilsson and Riedel Ηλεκτρικά Κυκλώματα, 9η έκδ. κεφ. 5, σελ. 162)

Αναλύστε το κύκλωμα της εικόνας και βρείτε τη σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου v_o και της μεταβολής ΔR στην αντίσταση των τεσσάρων όμοιων πιεζοαντιστάσεων.



Απάντηση

$$v_o \approx \frac{R_f}{R} 2\delta v_{ref}$$

(για τη λύση, βλ. Nilsson and Riedel Ηλεκτρικά Κυκλώματα, 9η έκδ. κεφ. 5, σελ. 162)

Πρόβλημα

Υποθέστε ότι οι πιεζοαντιστάτες στη γέφυρα της εικόνας στο προηγούμενο παράδειγμα έχουν τιμή $120\Omega \pm 1\%$. Η τροφοδοσία του τελεστικού ενισχυτή είναι $\pm 15\mathrm{V}$ και η τάση αναφοράς, v_{ref}, λαμβάνεται από τη θετική τροφοδοσία.

α) Υπολογίστε την τιμή της R_f έτσι ώστε όταν η πιεζοαντίσταση που επιμηκύνεται φτάνει στο μέγιστο μήκος της, η τάση εξόδου να είναι 5 V.

β) Ας υποθέσουμε ότι μπορούμε να μετρήσουμε με ακρίβεια μεταβολές των 50 mV στην τάση εξόδου. Ποια μεταβολή στην αντίσταση των πιεζοαντιστάσεων μπορεί να ανιχνευθεί σε milliohms;