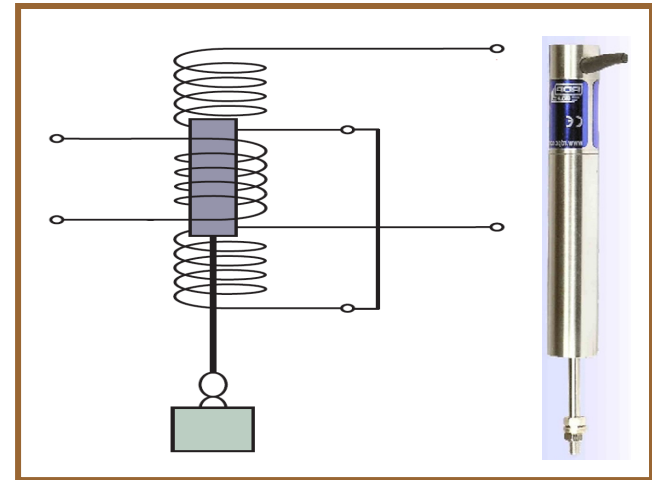


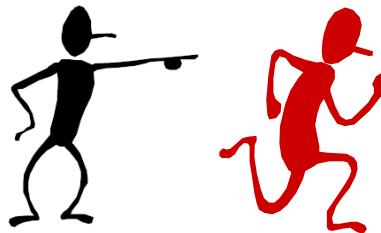
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ & ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Λάμπρος Μπισδούνης
Καθηγητής



6^η ενότητα

ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ (ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ, ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ, ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ,
ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ), ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ, ΔΥΝΑΜΗΣ, ΒΑΡΟΥΣ



Περιεχόμενα 6^{ης} ενότητας

- Η ενότητα περιγράφει τους **αισθητήρες/μετρητές** που ανιχνεύουν/μετρούν **μορφές κίνησης** (μετατόπιση, προσέγγιση, ταχύτητα, επιτάχυνση), **μηχανική τάση** και **βάρος**, καθώς και τις **αρχές λειτουργίας** τους.
- Εισαγωγή στη μέτρηση κίνησης, μηχανικής τάσης και βάρους.
- Μέτρηση γραμμικής μετατόπισης: ωρολογιακό μικρόμετρο, γραμμικό ποτενσιόμετρο, γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (LVDT), πυκνωτής μεταβλητού εμβαδού.
- Μέτρηση γωνιακής μετατόπισης: περιστροφικό ποτενσιόμετρο, οπτικοί κωδικοποιητές, ταχυμετρικές γεννήτριες.
- Μέτρηση προσέγγισης: μικροδιακόπτες, αισθητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, ανιχνευτής φαινομένου Hall, οπτικοί αισθητήρες.
- Μέτρηση ταχύτητας και επιτάχυνσης: ταχυμετρικές γεννήτριες, επιταχυνσιόμετρα σεισμικής μάζας, πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα.
- Μέτρηση μηχανικής τάσης και δύναμης μέσω μεταβολής αντίστασης και γέφυρας Wheatstone.
- Μέτρηση βάρους: κυψελίδα φόρτισης, ζυγός ελατηρίου.
- Συμπεράσματα, ερωτήσεις και ασκήσεις.

Εισαγωγή στη μέτρηση κίνησης, μηχ. τάσης, βάρους

- Κίνηση είναι η αλλαγή της φυσικής θέσης ενός αντικειμένου και υπάρχουν αισθητήρες που μετρούν κίνηση στις εξής μορφές: γραμμική (ευθύγραμμη) μετατόπιση, γωνιακή μετατόπιση, προσέγγιση και επιτάχυνση.
- Πολλές συσκευές ευθύγραμμης και γωνιακής μετατόπισης είναι ικανές να μετρούν τη μετατόπιση ως προς τον χρόνο και επομένως να μετρούν την ταχύτητα και την επιτάχυνση.
- Άλλες συσκευές μετρούν απευθείας την ταχύτητα ή την επιτάχυνση (επιταχυνσιόμετρα), από όπου είναι δυνατός ο υπολογισμός της μετατόπισης.
- Ένας αισθητήρας προσέγγισης ανιχνεύει τη διεύρυνση της παρουσίας ενός αντικειμένου σε μια περιοχή κοντά σε αυτόν.
- Οι μετρητές μηχανικής τάσης μετρούν τις αλλαγές του μεγέθους ενός στερεού αντικειμένου που προκαλούνται από συμπίεση ή εφελκυσμό.
- Το βάρος ενός σώματος ισούται με τη μάζα του επί την επιτάχυνση της βαρύτητας, αλλά είναι συχνά πιο εύκολο να μετρήσουμε το βάρος ενός αντικειμένου και από αυτό να προσδιορίσουμε άλλες παραμέτρους όπως ο όγκος ($\rho = m / V$).
- Το βάρος αποτελεί τη δύναμη έλξης που ασκεί η γη σε όλα τα σώματα, οπότε οι αισθητήρες που μετρούν βάρος μπορούν να μετρήσουν και δύναμη.

Μέτρηση γραμμικής μετατόπισης

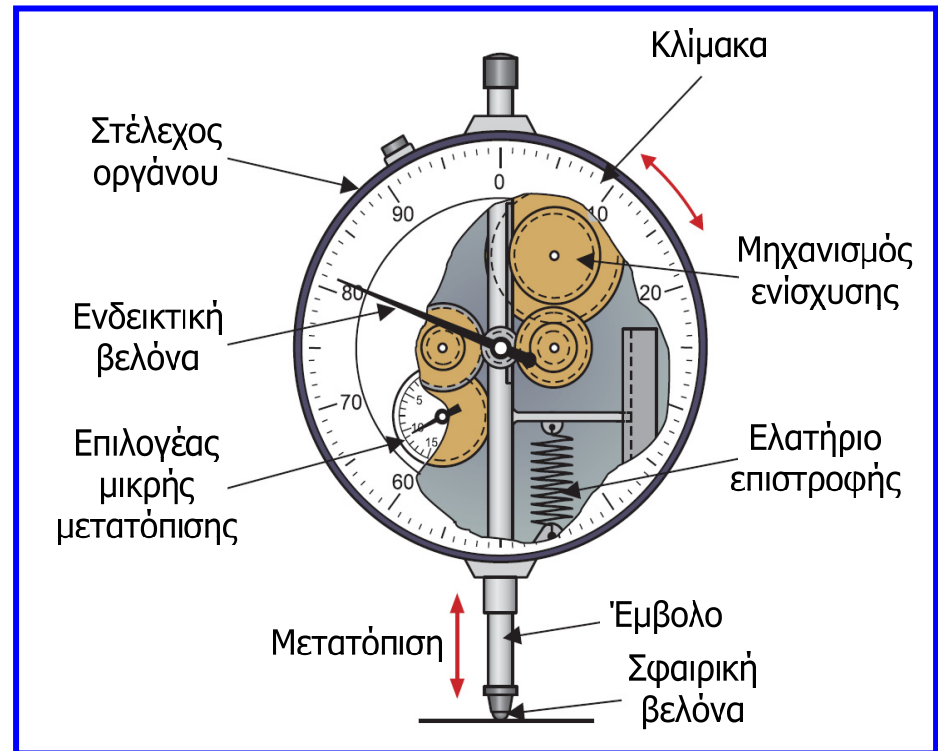
- **Μετατόπιση** είναι το μέγεθος και η κατεύθυνση που αντιπροσωπεύει η αλλαγή θέσης ενός αντικειμένου ως προς ένα σημείο αναφοράς.
- **Γραμμική μετατόπιση** είναι η μετατόπιση σε ευθεία γραμμή (δηλ. σε συγκεκριμένη διεύθυνση), ενώ **γωνιακή μετατόπιση** είναι η γωνία κατά την οποία έχει περιστραφεί ένα σώμα γύρω από δεδομένο άξονα περιστροφής.
- Βασική μονάδα μέτρησης γραμμικής μετατόπισης είναι το **μέτρο (m)**, ενώ της **γωνιακής μετατόπισης** το **ακτίνιο (rad)** δηλ. η γωνία που σχηματίζεται στο κέντρο ενός κύκλου από ένα τόξο με μήκος ίσο με την ακτίνα του κύκλου (R).
- Η γωνία πλήρους περιστροφής (360°) αντιστοιχεί σε 2π ακτίνια (αφού περίμετρος κύκλου $= 2\pi R$), οπότε ένα ακτίνιο ισούται με $(360 / 2\pi) = 57.3^\circ$.
- Οι συσκευές (αισθητήρες) γραμμικής μετατόπισης που θα περιγραφούν μετρούν **μικρές μετατοπίσεις** (μικρότερες από 1 μέτρο).
- Υπάρχουν πολλές απλές **μηχανικές συσκευές** που μπορούν να μετρήσουν εύκολα και γρήγορα γραμμική μετατόπιση (χάρακας, παχύμετρο, μικρόμετρο), αλλά η **ακρίβειά** τους **εξαρτάται** σε μεγάλο βαθμό από την **ικανότητα του χρήστη** και **δε** μπορούν να χρησιμοποιηθούν για **μετρήσεις από απόσταση**.

Ωρολογιακό μικρόμετρο

- Είναι **μηχανική συσκευή μέτρησης γραμμικής μετατόπισης** πιο ακριβής από άλλες μηχανικές συσκευές, αλλά και από κάποιες ηλεκτρικές και συχνά αναφέρεται ως **DTI (dial test indicator)**.

- Το μικρόμετρο είναι σταθερό ως προς το αντικείμενο του οποίου τη μετατόπιση επιθυμούμε να μετρήσουμε.

- Το έμβολο του οποίου η μία άκρη συνδέεται με ελατήριο και η άλλη με σφαιρική βελόνα, εφαρμόζει στο αντικείμενο.



- Η μετατόπιση ενισχύεται με χρήση γρاناζιών και εμφανίζεται σε ωρολογιακή κλίμακα.
- Η κλίμακα αυτή μπορεί να περιστρέφεται ώστε να μπορούμε να λάβουμε ένα επιθυμητό σημείο αναφοράς.
- Για να βελτιωθεί η ακρίβεια της ένδειξης υπάρχουν δύο περιστροφικοί επιλογείς: ο μεγάλος εμφανίζει τη μετατόπιση σε μικρά βήματα (συνήθως 0.01 mm), ενώ ο μικρός εμφανίζει την ίδια μετατόπιση σε μεγαλύτερη μονάδα (συνήθως 1 mm).

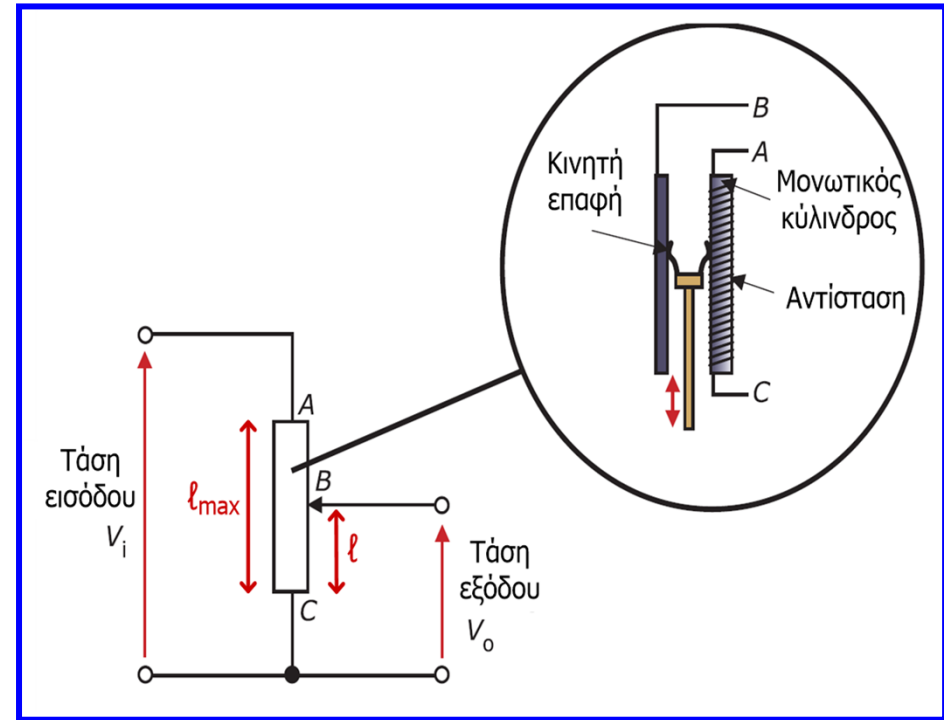
Ωρολογιακό μικρόμετρο

- **Χρήσεις:** μέτρηση γραμμικής μετατόπισης στη βιομηχανία κατασκευών για έλεγχο των διαστάσεων αντικειμένων κατά τη φάση του ποιοτικού ελέγχου, για ακριβή ρύθμιση μηχανημάτων και για έλεγχο φθοράς μεταλλικών μερών.
- **Πλεονεκτήματα:** ευκολία, ταχύτητα, ακρίβεια.
- **Μειονεκτήματα:**
 - ✓ Πρέπει να διαβάζεται τοπικά και δεν μπορεί εύκολα να μετρά μετατοπίσεις σε διάφορες κατευθύνσεις.
 - ✓ Η μετατόπιση που μετρά πρέπει να είναι προσπελάσιμη από το έμβολο και ικανή να αντισταχθεί στη δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου, που ασκείται στο έμβολο.
 - ✓ Αντικείμενα που είναι ευαίσθητα ή τοποθετημένα στο εσωτερικό άλλων αντικειμένων ή αποκρύπτονται από άλλα αντικείμενα, δεν μπορούν να μετρηθούν ικανοποιητικά με το ωρολογιακό μικρόμετρο.



Γραμμικό ποτενσιόμετρο

- Η κινητή επαφή ενός ποτενσιόμετρου συνδέεται με ένα έμβολο, το οποίο εφαρμόζει στο αντικείμενο του οποίου η μετατόπιση πρόκειται να μετρηθεί.
- Υπάρχει γραμμική σχέση ανάμεσα στην τάση εισόδου, την τάση εξόδου και την απόσταση BC ή ℓ (στην οποία μετριέται η τάση εξόδου), αφού η αντίσταση ενός αγωγού είναι ανάλογη με το μήκος του.
- Οποιαδήποτε μετατόπιση του αντικειμένου θα αλλάξει την απόσταση BC και επομένως την αντίσταση R_{BC} και την τάση εξόδου.
- Η **μεταβολή της τάσης εξόδου** που αντιπροσωπεύει τη **μετατόπιση** του εμβόλου, απεικονίζεται σε ένα βολτόμετρο βαθμονομημένο σε μονάδες μετατόπισης.



$$\frac{V_o + \Delta V_o}{V_i} = \frac{\ell + \Delta \ell}{\ell_{\max}} \quad (2)$$

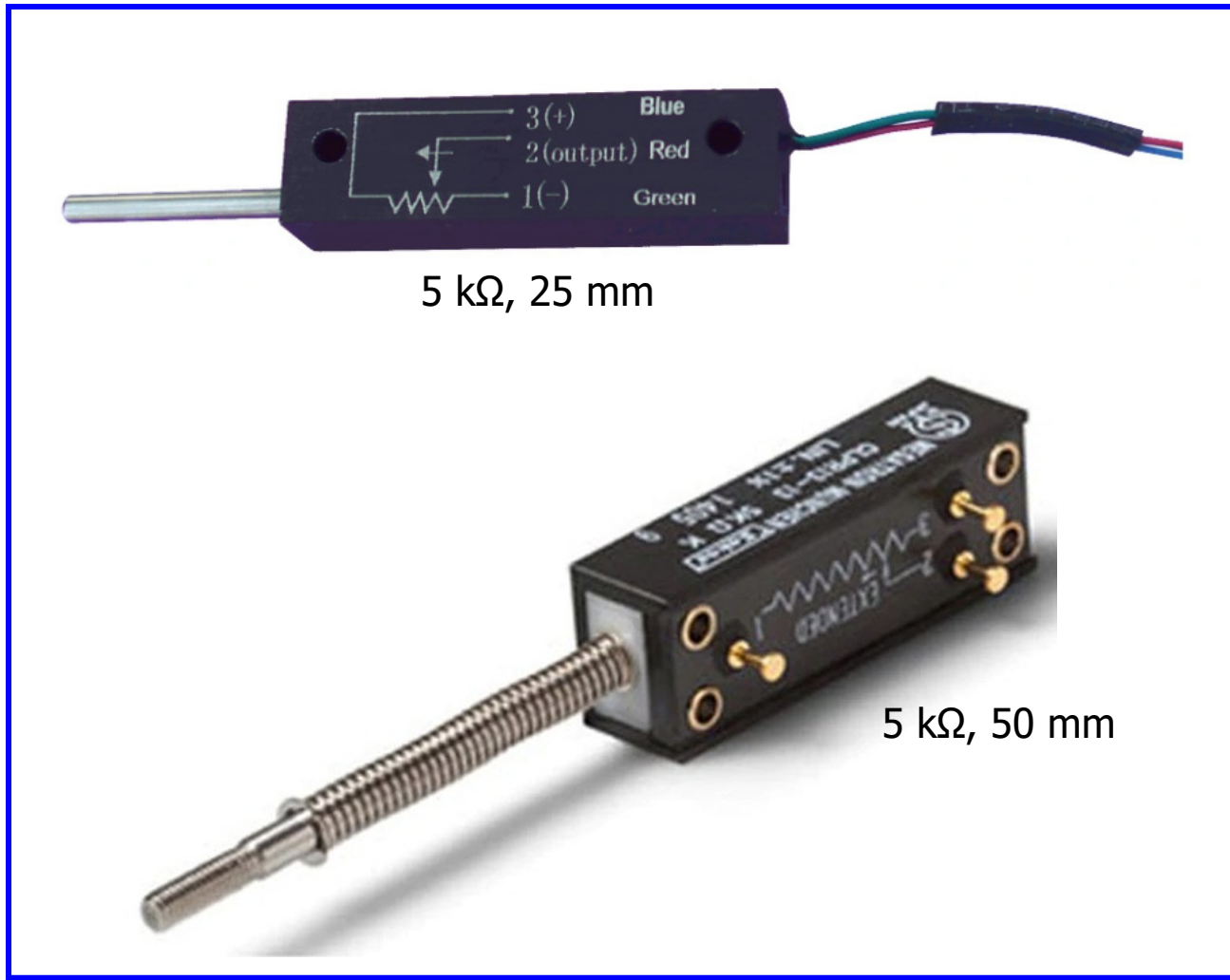
$$R = \frac{\rho \cdot \ell}{A} \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC}} = \frac{R_{BC}}{R_{AC}} = \frac{\ell}{\ell_{\max}} \quad (1)$$

$$(2) - (1) \Rightarrow \frac{\Delta V_o}{V_i} = \frac{\Delta \ell}{\ell_{\max}}$$

Γραμμικό ποτενσιόμετρο

- Τα στοιχεία αντίστασης (που κυμαίνονται από 10 Ω έως 200 kΩ) κατασκευάζονται συνήθως από λεπτό σύρμα νικελίου ή λευκόχρυσου, το οποίο τυλίγεται γύρω από έναν κύλινδρο κατασκευασμένο από μονωτικό υλικό.
- Μπορούν επίσης να κατασκευαστούν από υμένα άνθρακα, μετάλλων ή αγωγίμων πλαστικών (από 100 Ω έως 1 MΩ) για βελτίωση της διακριτικής ικανότητας.
- Η διακριτική ικανότητα των ποτενσιόμετρων τυλιγμένου σύρματος εξαρτάται από τον αριθμό των περιελίξεων πάνω στον κύλινδρο.
- Τα ποτενσιόμετρα πάσχουν από τη μικρή μη γραμμικότητα που εισάγεται λόγω του κυλίνδρου, η οποία επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
- Οι κινητές επαφές και η αντίσταση υπόκεινται σε μηχανική φθορά και έτσι μεταβάλλεται η απόκρισή τους και επίσης προσθέτουν μικρή φυσική αντίσταση στη μετρούμενη μετατόπιση.
- Προβλήματα μπορούν να προκληθούν και από ανεπιθύμητα ηλεκτρικά σήματα θορύβου.
- Με το ποτενσιόμετρο μπορεί να επιτευχθεί ένδειξη από απόσταση, εάν η αλλαγή της τάσης εξόδου χρησιμοποιηθεί ως σήμα εισόδου σε ένα σύστημα συλλογής ή καταγραφής.
- Χρησιμοποιούνται συχνά όταν απαιτείται η λήψη ηλεκτρικού σήματος εξαρτώμενου από τη μετατόπιση με χαμηλό κόστος και χωρίς εξαιρετική ακρίβεια.
- **Χρήσεις:** καταγραφή της θέσης των αντικειμένων σε μία γραμμή παραγωγής, έλεγχος διαστάσεων αντικειμένων σε συστήματα ποιοτικού ελέγχου.

Γραμμικό ποτενσιόμετρο

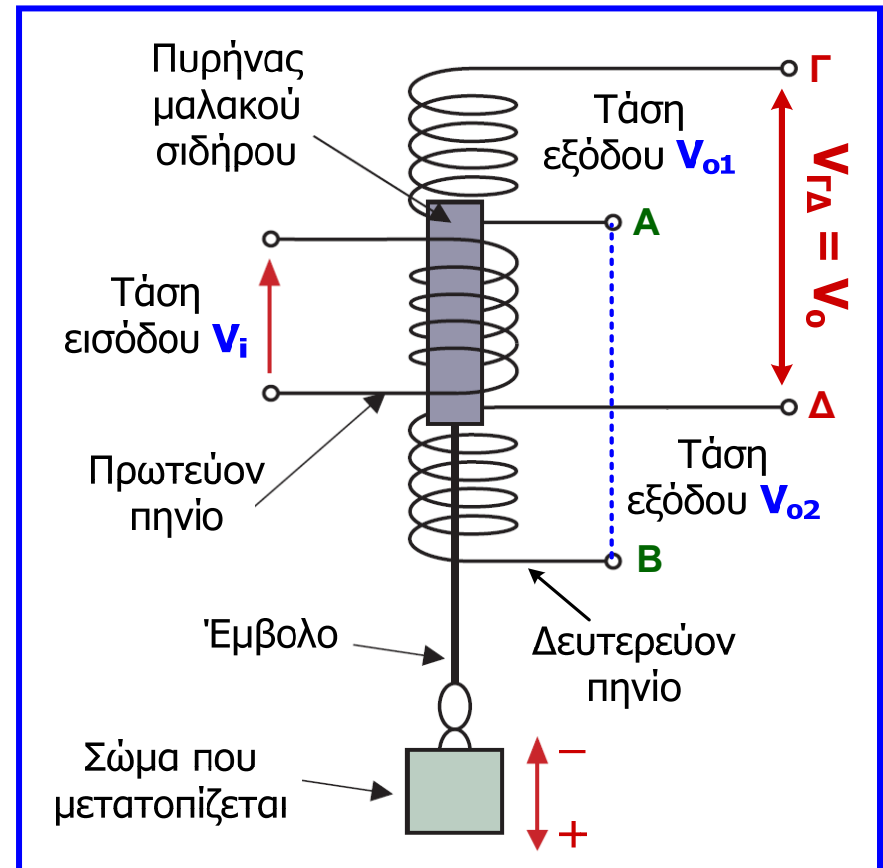


Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής

- Είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες για τον προσδιορισμό μετατοπίσεων έως 300 mm με ακρίβεια και συνήθως αναφέρονται με τον όρο **LVDT (linear variable differential transformer)**.
- Όταν ρέει εναλλασσόμενο ρεύμα στο πρωτεύον πηνίο ενός μετασχηματιστή, παράγεται εναλλασσόμενη μαγνητική ροή και λόγω του **νόμου της επαγωγής (Faraday)** επάγεται μία ηλεκτρεγερτική δύναμη στο δευτερεύον πηνίο.
- Η ΗΕΔ αυτή εξαρτάται από το ποσό ρεύματος που διαρρέει το πρωτεύον πηνίο και από το πηλίκο των περιελίξεων (στροφών) πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου.
- Ο LVDT έχει ένα πρωτεύον και δύο δευτερεύοντα πηνία, τα οποία συνδέονται έτσι ώστε να παρέχουν τη διαφορά των αντίστοιχων τάσεων των εξόδων τους (**διαφορικός μετασχηματιστής**).
- Ο LVDT είναι **μεταβλητός** αφού η μαγνητική σύζευξη μεταξύ του πρωτεύοντος και των δύο δευτερευόντων πηνίων μπορεί να μεταβληθεί και να επηρεάσει το μέγεθος της επαγόμενης ΗΕΔ.
- Η μεταβολή της μαγνητικής σύζευξης γίνεται **γραμμικά**.

Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής

- Όταν ο πυρήνας είναι στο κέντρο του συστήματος και εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση εισόδου (στο πρωτεύον), το ρεύμα που διέρχεται από το πρωτεύον δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του πυρήνα, το οποίο προκαλεί ΗΕΔ στα δευτερεύοντα πηνία σε φάση και με το ίδιο πλάτος.
- Εάν συνδέσουμε τον ακροδέκτη Α με τον Β, τα δύο παραγόμενα σήματα τάσης θα αλληλοαναιρεθούν ($V_{\Gamma\Delta} = 0$).
- Ωστόσο, εάν κινηθεί ο πυρήνας προς μία από τις δύο κατευθύνσεις, τότε η σύζευξη στο ένα δευτερεύον θα αυξηθεί, ενώ στο άλλο θα μειωθεί, οπότε το πλάτος της **συνδυασμένης εξόδου ($V_{\Gamma\Delta}$)** θα αυξάνεται μέχρι να γίνει μέγιστη η σύζευξη στο ένα δευτερεύον και να μηδενιστεί στο άλλο.
- Επιπλέον μετατόπιση του πυρήνα μετά το σημείο αυτό, δεν οδηγεί σε επιπλέον αύξηση της τάσης (**φαινόμενο κόρου**).

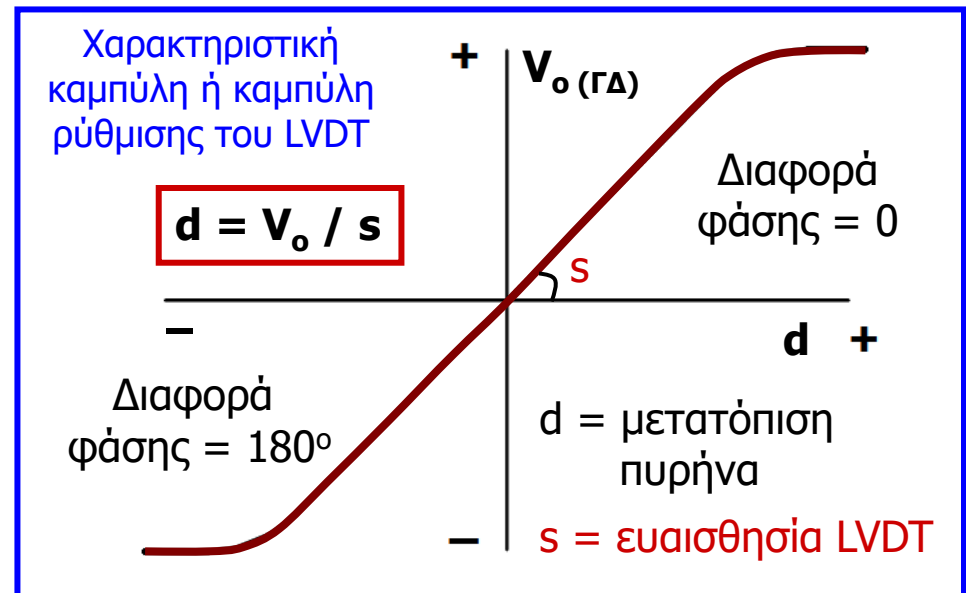


Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής

- Από τη μέτρηση του πλάτους της συνδυασμένης τάσης εξόδου στα δευτερεύοντα πηνία μπορούμε να εξάγουμε την μετατόπιση του πυρήνα, αφού **το πλάτος της συνδυασμένης τάσης εξόδου είναι ανάλογο της μετατόπισης** του πυρήνα.

$$V_i = V_I \cdot \eta \mu(\omega \cdot t)$$
$$V_o (\Gamma\Delta) = V_{o1} - V_{o2} = V_o \cdot \eta \mu(\omega \cdot t + \varphi)$$

- Η **διαφορά φάσης** της τάσης εξόδου του LVDT ως προς την τάση που εφαρμόζεται στο πρωτεύον του LVDT **υποδεικνύει την κατεύθυνση της μετατόπισης**.
- Προφανώς, για μέτρηση μετατοπίσεων θα πρέπει ο πυρήνας να συνδέεται με το αντικείμενο που μετατοπίζεται.
- Μπορούμε με κατάλληλο κύκλωμα να **ανορθώσουμε την συνδυασμένη έξοδο** στα δευτερεύοντα πηνία, έτσι ώστε να λαμβάνουμε συνεχή τάση, η οποία να μεταβάλλεται ανάλογα με την μετατόπιση του πυρήνα.

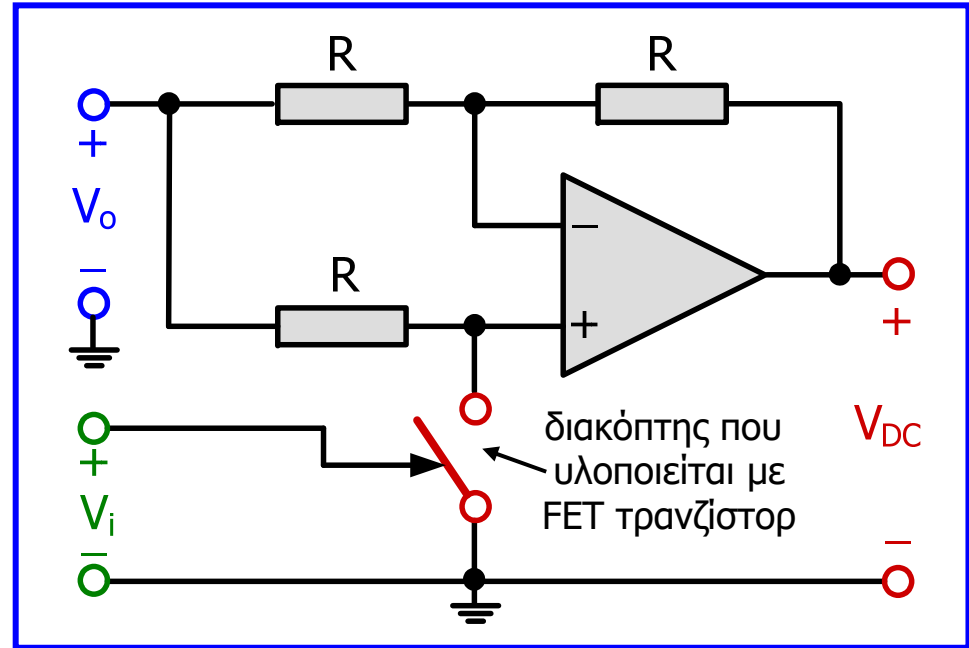


Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής

- Χρησιμοποιείται κύκλωμα **ανορθωτή πλήρους κύματος με δυνατότητα ανίχνευσης διαφοράς φάσης (phase sensitive full-wave rectifier)**, μια απλουστευμένη μορφή του οποίου παρουσιάζεται στο διπλανό σχήμα.

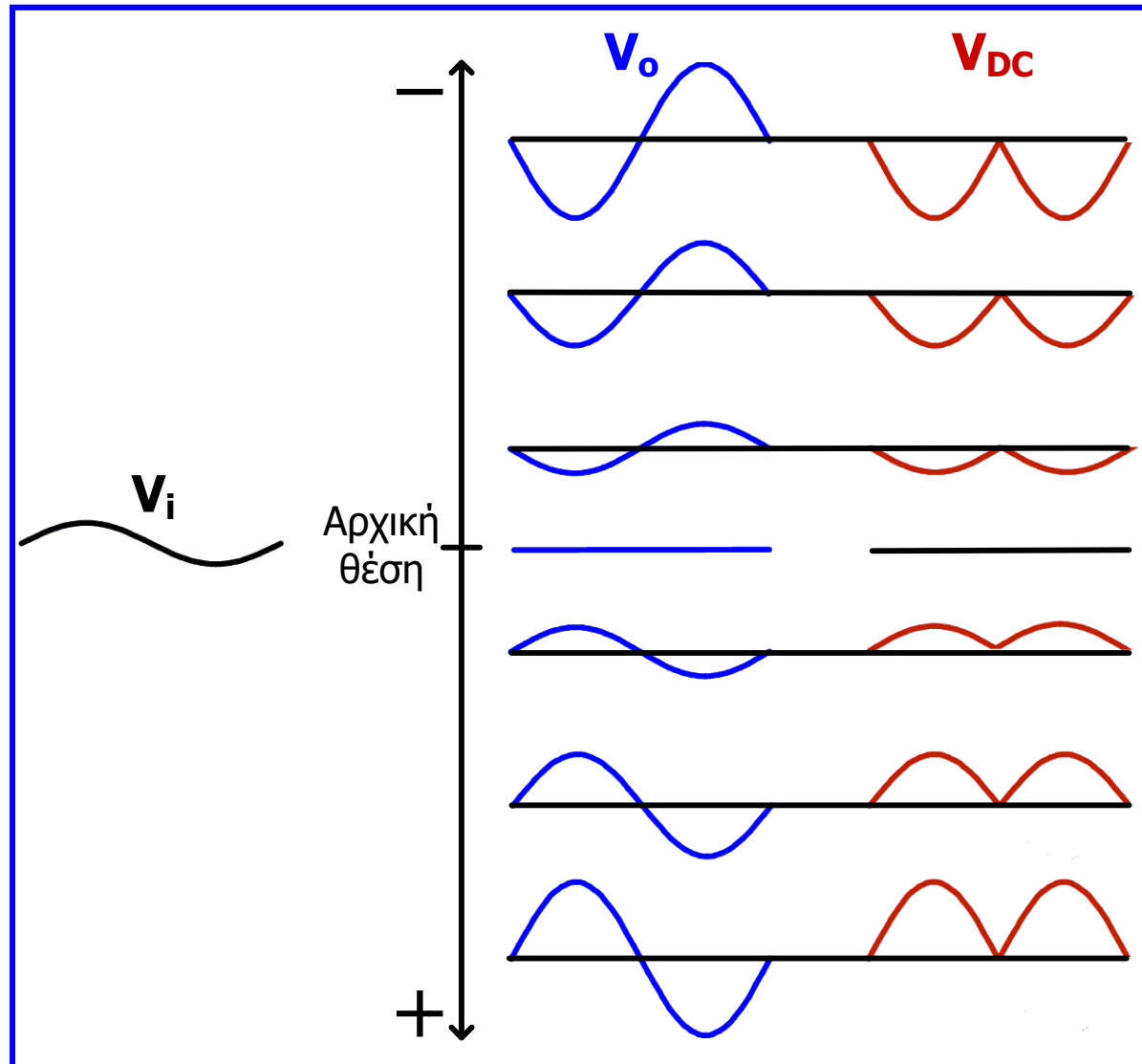
- $V_i > 0 \Rightarrow$ διακόπτης ανοικτός
 $\Rightarrow V_{DC} = V_o$

- $V_i < 0 \Rightarrow$ διακόπτης κλειστός
 $\Rightarrow V_{DC} = -V_o$

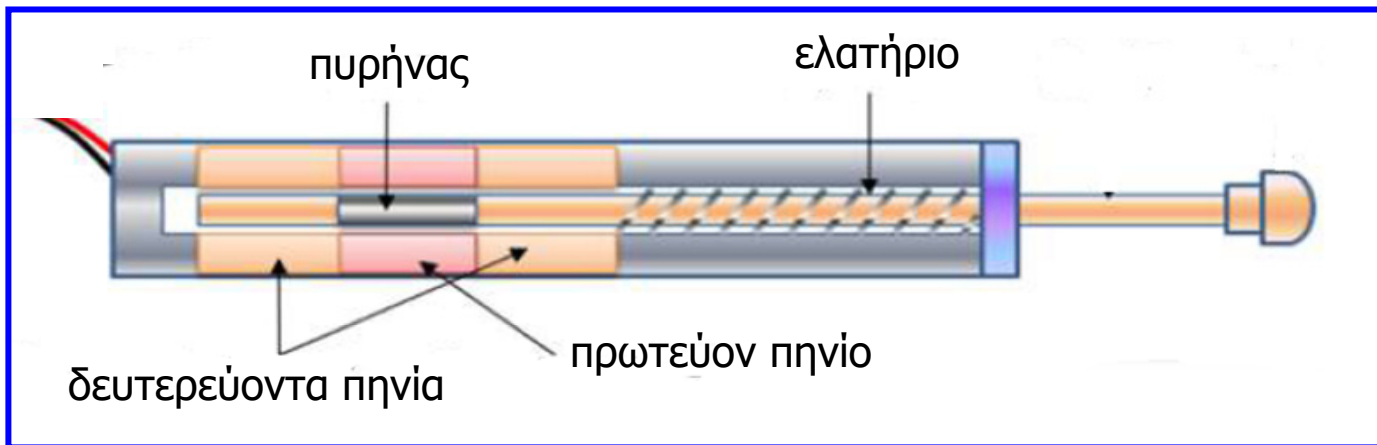


- Όταν τα σήματα εισόδου (V_i) και εξόδου (V_o) του LVDT είναι συμφασικά (μετακίνηση του πυρήνα προς τα κάτω), η συνεχής τάση εξόδου (V_{DC}) του ανορθωτή θα είναι θετική (με μέση τιμή $2 \cdot V_{o_{max}} / \pi$).
- Όταν τα σήματα εισόδου (V_i) και εξόδου (V_o) του LVDT έχουν διαφορά φάσης 180° (μετακίνηση του πυρήνα προς τα πάνω), η συνεχής τάση εξόδου (V_{DC}) του ανορθωτή θα είναι αρνητική (με μέση τιμή $-2 \cdot V_{o_{max}} / \pi$).
- $V_{o_{max}}$ είναι το πλάτος (μέγιστη τιμή) της τάσης εξόδου (V_o) του LVDT.

Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής

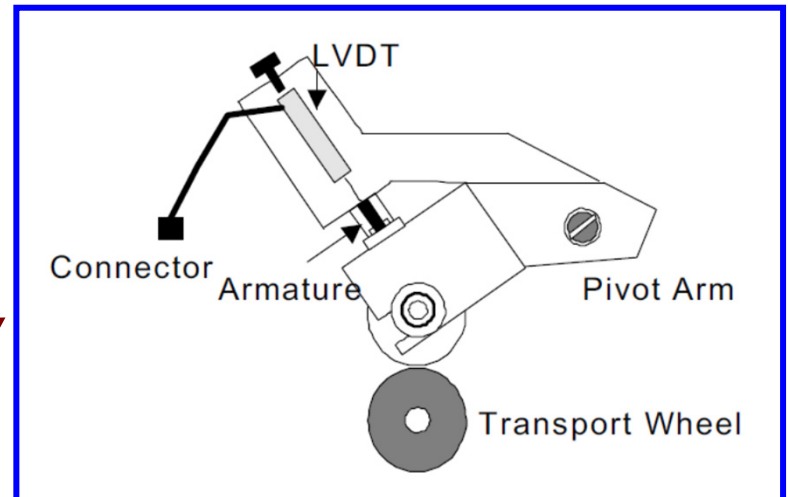


Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής



Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής

- Οι LVDT έχουν μεγάλη ευαισθησία, διακριτική ικανότητα έως 0.05 mm, εύρος μέτρησης 0.1 – 300 mm και παρουσιάζουν μικρό σφάλμα ($\pm 0.5 \%$), επειδή ο πυρήνας δεν βρίσκεται σε επαφή με τα πηνία, με αποτέλεσμα πολύ μικρή μηχανική τριβή και φθορά.
- Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του πάχους των υλικών στην βιομηχανία μετάλλου και χαρτιού, στις γραμμές παραγωγής διάφορων προϊόντων για τον έλεγχο των ορθών διαστάσεων των προϊόντων, σε υδραυλικά συστήματα για την παρακολούθηση της θέσης υδραυλικών κυλίνδρων (ρομποτικά συστήματα, συστήματα ελέγχου πτήσης).
- Πιο εξεζητημένες εφαρμογές αποτελούν: η χρήση LVDTs για τη συνεχή παρακολούθηση της θέσης του μηχανισμού διάνοιξης οπών κατά την εξόρυξη πετρελαίου (LVDTs υψηλών απαιτήσεων, αφού πρέπει να λειτουργούν σε δύσκολες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας), καθώς και η χρήση LVDTs στις ατμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας για τη συνεχή παρακολούθηση της θέσης των βαλβίδων ελέγχου ατμού με στόχο την αυξημένη απόδοση.
- Ιδιαίτερη εφαρμογή αποτελεί η χρήση LVDT στα μηχανήματα αυτόματης ανάληψης (ATMs) για την ορθή επίδοση των χαρτονομισμάτων.

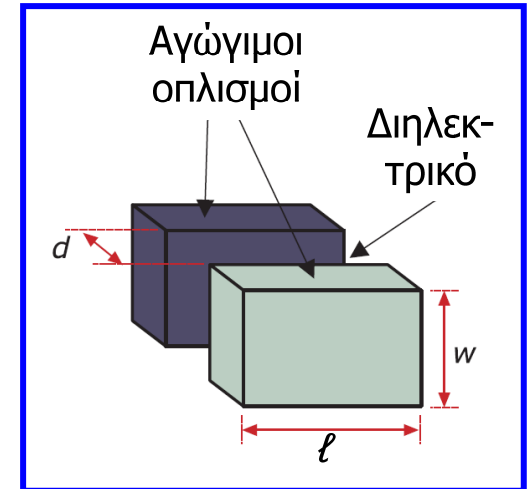


Πυκνωτής μεταβλητού εμβαδού

- Μέτρηση της μετατόπισης μπορεί να επιτευχθεί και με χρήση της ηλεκτρικής ιδιότητας της χωρητικότητας, δηλ. της ιδιότητας ενός πυκνωτή να αποθηκεύει ενέργεια.

$$C = \frac{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{d}$$

A: εμβαδόν επικάλυψης των οπλισμών (πλακών) του πυκνωτή ($\ell \cdot w$), ϵ_0 : απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του αέρα ($8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m), ϵ_r : σχετική διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υλικού, d: απόσταση των οπλισμών

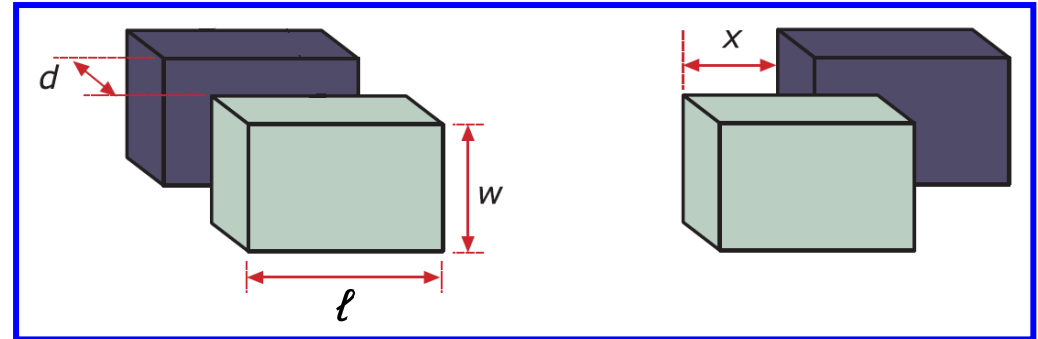


- Η χωρητικότητα μπορεί να αλλάξει εάν μεταβληθεί η επιφάνεια επικάλυψης A ή η σχετική διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού (ηλεκτρική διαπερατότητα) ή η απόσταση μεταξύ των οπλισμών.
- Ένας τρόπος να μετρήσουμε μετατόπιση είναι μέσω της αλλαγής χωρητικότητας που οφείλεται σε μεταβολή της επιφάνειας επικάλυψης των οπλισμών.
- Προφανώς, ο πυκνωτής θα πρέπει να σχεδιαστεί και να στερεωθεί κατάλληλα ώστε να είναι εφικτή η μέτρηση της μετατόπισης.

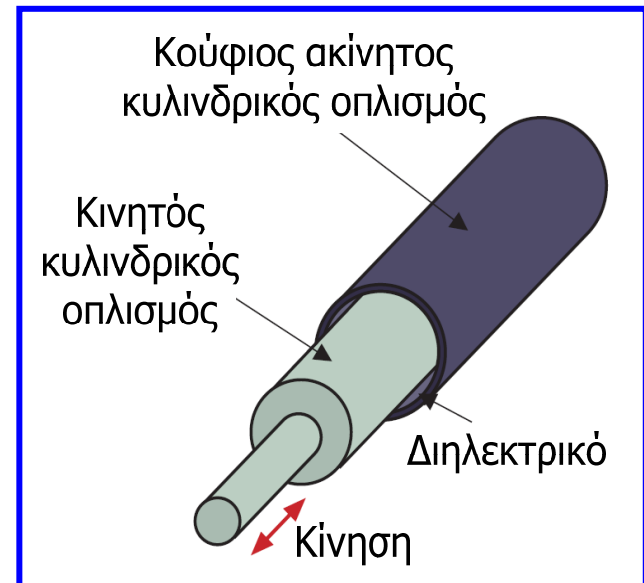
Πυκνωτής μεταβλητού εμβαδού

$$C = \frac{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{d} = \frac{\ell \cdot w \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{d}$$

$$C = \frac{(A - w \cdot x) \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{d} = \frac{(\ell \cdot w - w \cdot x) \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{d}$$



- Ο κινητός κύλινδρος βρίσκεται σε επαφή με το αντικείμενο του οποίου τη μετατόπιση επιθυμούμε να μετρήσουμε.
- Όταν ο κύλινδρος κινείται μέσα-έξω αλλάζει η επιφάνεια επικάλυψης των δύο κυλινδρικών οπλισμών και επομένως η χωρητικότητα μεταβάλλεται ανάλογα με τη μετατόπιση.
- Το σήμα εξόδου είναι η τάση στον πυκνωτή που είναι ανάλογη της χωρητικότητας και της μετατόπισης και η μετατόπιση μετριέται με κατάλληλα βαθμονομημένο βολτόμετρο μετά από προσεκτική ρύθμιση.
- Διαθέτει μεγάλη ευαισθησία και διακριτική ικανότητα, αλλά έχει μεγάλο κόστος και χρησιμοποιείται μόνο σε ειδικές εφαρμογές.



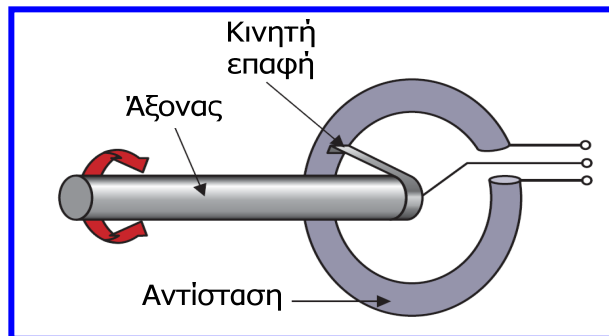
Μέτρηση γωνιακής μετατόπισης

- **Γωνιακή μετατόπιση** είναι η γωνία κατά την οποία έχει περιστραφεί ένα σώμα γύρω από δεδομένο άξονα περιστροφής.
- Βασική **μονάδα μέτρησης γωνιακής μετατόπισης** το **ακτίνιο (rad)** δηλ. η γωνία που σχηματίζεται στο κέντρο ενός κύκλου από ένα τόξο με μήκος ίσο με την ακτίνα του κύκλου (R).
- Η γωνιακή μετατόπιση μετριέται πολύ συχνά σε μηχανήματα, αφού η μέτρησή της είναι αναγκαία για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός μηχανήματος και ουσιαστική σε συστήματα ελέγχου.
- Από τη γωνιακή μετατόπιση μπορούν να υπολογιστούν κι άλλες παράμετροι π.χ. η γωνιακή ταχύτητα (γωνιακή μετατόπιση στη μονάδα του χρόνου) των τροχών ενός οχήματος είναι ευθέως ανάλογη της μεταφορικής ταχύτητας ή απλά της ταχύτητας του οχήματος.
- Οπότε η προσαρμογή ενός κατάλληλου αισθητήρα στους τροχούς ενός οχήματος επιτρέπει τη μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας και η πληροφορία αυτή απεικονίζεται στο ταχύμετρο του οχήματος που είναι βαθμονομημένο σε μονάδες μεταφορικής ταχύτητας (ή απλά ταχύτητας).

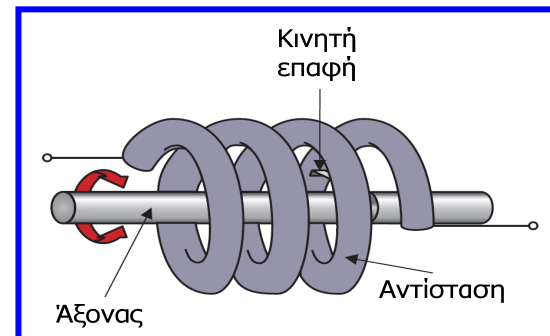
Περιστροφικό ποτενσιόμετρο

- Λειτουργεί με βάση την ίδια αρχή που λειτουργεί και το γραμμικό, αλλά για να μετρά τη γωνιακή μετατόπιση.
- Το **στοιχείο αντίστασης** έχει **μορφή δακτυλίου (τόξου)**, πάνω στο οποίο ολισθαίνει η κινητή επαφή, η οποία περιστρέφεται επειδή είναι συνδεδεμένη στον άξονα εισόδου.
- Η **τάση εξόδου** είναι **ανάλογη** της **γωνιακής μετατόπισης** του άξονα και διαβάζεται σε ένα βολτόμετρο βαθμονομημένο σε μονάδες γωνιακής μετατόπισης.
- Τα **ποτενσιόμετρα μίας στροφής (single-turn)**, όπου το στοιχείο αντίστασης καταλαμβάνει μία πλήρη περιστροφή του άξονα, μπορούν να μετρήσουν γωνιακές μετατοπίσεις μικρότερες από μία περιστροφή.
- Μεγαλύτερες δυνατότητες μέτρησης έχει το **σπειροειδές ή ελικοειδές ποτενσιόμετρο (helical)**, όπου το **στοιχείο αντίστασης** έχει **μορφή σπείρας** και ένα μηχανικό σύστημα επιτρέπει στην κινητή επαφή να παρακολουθεί τη σπείρα, καθώς περιστρέφεται ο άξονας.
- Το ποτενσιόμετρο αυτό μπορεί να μετρά μετατοπίσεις έως 30 στροφές.

Περιστροφικό ποτενσιόμετρο



Σπειροειδές ποτενσιόμετρο

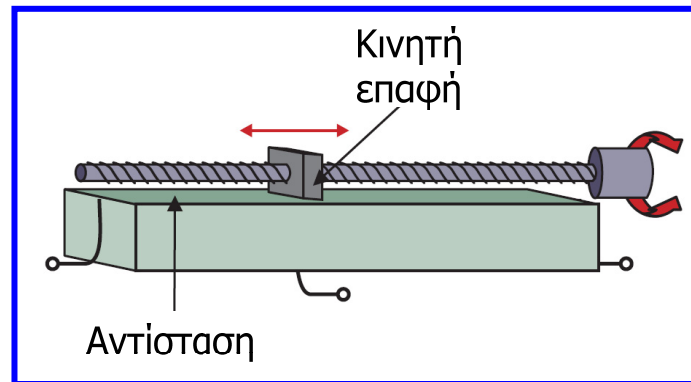


Περιστροφικό ποτενσιόμετρο



Περιστροφικό ποτενσιόμετρο

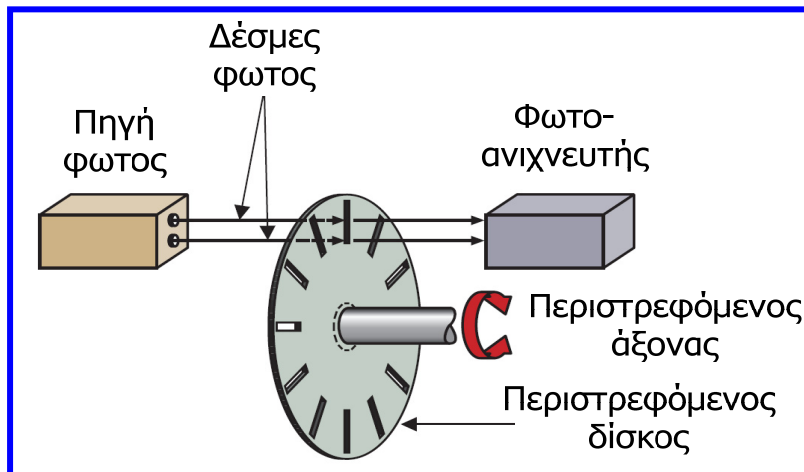
- Μία άλλη μορφή ποτενσιόμετρου πολλών στροφών χρησιμοποιεί κινητή επαφή που είναι συνδεδεμένη σε κοχλιοειδή άξονα.
- Η κινητή επαφή εφαρμόζει σε **στοιχείο αντίστασης μορφής ράβδου** και κινείται αριστερά-δεξιά, καθώς περιστρέφεται ο άξονας εισόδου.



- Όπως και το γραμμικό, το περιστροφικό ποτενσιόμετρο πάσχει από μηχανική φθορά λόγω της συνεχούς τριβής της κινητής επαφής.
- Για υψηλότερη ακρίβεια θα πρέπει το στοιχείο αντίστασης να είναι τελείως κυκλικού σχήματος, οι στροφές της σπείρας ομοιόμορφες και η κινητή επαφή να βρίσκεται στο κέντρο.
- Το **εύρος μέτρησης** είναι $0.17 - 61$ ακτίνια ($10 - 3500^\circ$).
- Το περιστροφικό ποτενσιόμετρο είναι σχετικά φθινό και χρησιμοποιείται ευρέως (από ηλεκτρονικά κυλιόμενα καθίσματα έως αεροσκάφη).

Αυξητικός οπτικός κωδικοποιητής

- **Οπτικός κωδικοποιητής** είναι ένας μετατροπέας στον οποίο η μετατόπιση μεταβάλλει την εκπομπή μίας ακτίνας φωτός από μία πηγή σε έναν ανιχνευτή.
- Ο **αυξητικός κωδικοποιητής** παράγει ένα σήμα το οποίο δείχνει ότι έχει συμβεί γωνιακή μετατόπιση σε έναν άξονα. Μετρούνται πολλά τέτοια σήματα εξόδου και από το πλήθος τους εξάγεται η γωνιακή μετατόπιση του άξονα.
- Αποτελείται από δίσκο στερεωμένο στον άξονα εισόδου, ο οποίος έχει στην περιφέρεια του έναν αριθμό από ισαπέχουσες σχισμές ή παράθυρα, μέσα από τα οποία μπορεί να περνά μία φωτεινή ακτίνα, ενώ το υπόλοιπο τμήμα του δίσκου είναι αδιαφανές.
- Μία πηγή φωτός η οποία αποτελείται από δύο διόδους φωτοεκπομπής (LED) ευθυγραμμίζεται με το δίσκο και εάν το φως των διόδων αυτών περάσει μέσα από το δίσκο χωρίς να διακοπεί, συλλέγεται από δύο ανιχνευτές φωτός.



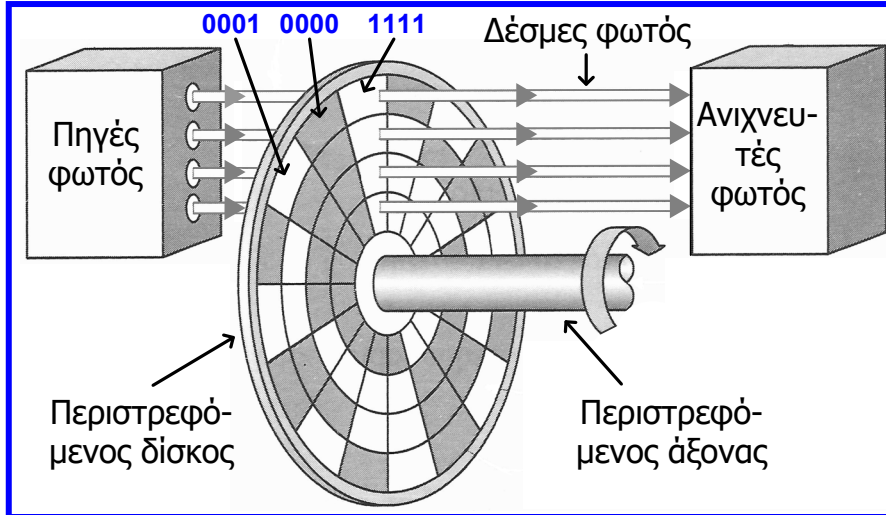
Αυξητικός οπτικός κωδικοποιητής

- Καθώς περιστρέφεται ο άξονας, το φως περνά περιοδικά μέσα από τα ισαπέχοντα παράθυρα του δίσκου και εμποδίζεται από τις ενδιάμεσες αδιαφανείς περιοχές, με αποτέλεσμα να παράγεται μία παλμική δέσμη φωτός στην άλλη πλευρά του δίσκου.
- Οι ανιχνευτές τοποθετούνται έτσι ώστε καθώς περιστρέφεται ο άξονας και ο δίσκος, η διαφορά φάσης των παλμών φωτός που προσπίπτουν στους ανιχνευτές να δείχνει την κατεύθυνση της περιστροφής.
- Ο αριθμός των παλμών που ανιχνεύονται είναι ανάλογος της γωνίας κατά την οποία έχει μετατοπιστεί ο άξονας και ο δίσκος και η γωνιακή μετατόπιση του άξονα μπορεί να προσδιοριστεί αναφορικά με ένα αυθαίρετα επιλεγμένο σημείο έναρξης.
- Η **διακριτική ικανότητα** του δίσκου εξαρτάται από τον αριθμό των παραθύρων του και προσδιορίζεται διαιρώντας τα ακτίνια μίας πλήρους περιστροφής (2π) με τον αριθμό των παραθύρων.
- Ο **αριθμός παραθύρων** κυμαίνεται από 60 έως 1000 (σε πολλαπλές σειρές) οδηγώντας σε εξαιρετική διακριτική ικανότητα $0.0034 - 0.102$ ακτίνια ($0.2 - 6^\circ$).

Απόλυτος οπτικός κωδικοποιητής

- Ο **απόλυτος οπτικός κωδικοποιητής** παράγει ένα σήμα εξόδου, το οποίο δείχνει τη συνολική γωνιακή μετατόπιση του άξονα, από μία αρχική θέση (θέση 0).
- Διαφέρει από τον αυξητικό, στο ότι το σήμα εξόδου που παράγει είναι σε ψηφιακή μορφή (δηλ. συμβατή με Η/Υ και ψηφιακά συστήματα).
- Στον άξονα προσαρμόζεται ένας περιστρεφόμενος δίσκος με ομόκεντρα κανάλια (αυλακώσεις) και μία πηγή φωτός που αποτελείται από διόδους LED ευθυγραμμίζεται με τις αυλακώσεις του δίσκου.
- Μερικοί ανιχνευτές φωτός ευθυγραμμίζονται με όμοιο τρόπο με το δίσκο και τις δέσμες φωτός που περνούν μέσα από αυτόν.
- Ένα **αδιαφανές (κλειστό) παράθυρο** που εμποδίζει τη διέλευση φωτός από κάποια δίοδο προς τον αντίστοιχο ανιχνευτή, αντιπροσωπεύει το ψηφίο 0.
- Ένα **διαφανές (ανοιχτό) παράθυρο** που επιτρέπει το φως από κάποια δίοδο να φθάσει στον αντίστοιχο ανιχνευτή, αντιπροσωπεύει το ψηφίο 1.
- Ο συνδυασμός ανοικτών και κλειστών παραθύρων μπορεί να αντιπροσωπεύει όλους τους δεκαδικούς αριθμούς από 0 έως 2^{n-1} , όπου n είναι ο αριθμός των παραθύρων ανά τομέα του δίσκου.

Απόλυτος οπτικός κωδικοποιητής



Παράδειγμα

Παράθυρα ανά τομέα: 4

Ψηφία δυαδικών αριθμών: 4

Αριθμός θέσεων που ανιχνεύονται: 16

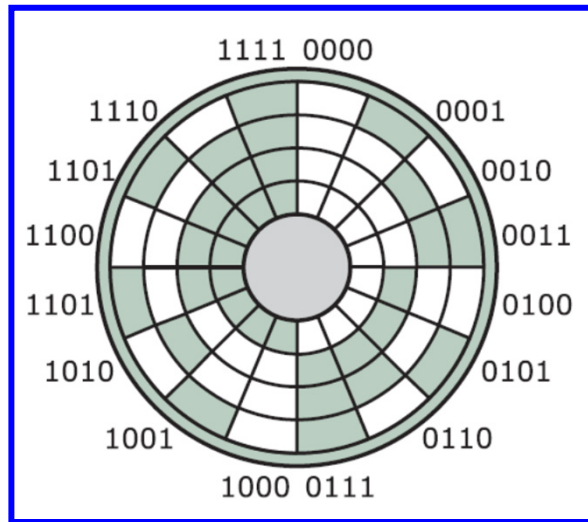
Τομείς δίσκου: $2^4 = 16$

Διακριτική ικανότητα: $2\pi / 16 = 0.393$
ακτίνια ή $360^\circ / 16 = 22.5^\circ$

- **Μειονέκτημα** αποτελεί το ότι μία αύξηση της μετατόπισης μπορεί να προκαλέσει ταυτόχρονη αλλαγή κατάστασης σε περισσότερα από ένα παράθυρα.
- Για παράδειγμα από τον αριθμό 0011 οδηγούμαστε στον 0100 όπου αλλάζουν 3 παράθυρα.
- Επομένως, εάν αναγνωστεί λάθος κάποιο παράθυρο θα προκληθούν σημαντικά σφάλματα στον προσδιορισμό της θέσης.
- Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα έχει επινοηθεί ο κώδικας Gray που απεικονίζει τους δεκαδικούς αριθμούς με τέτοια δυαδική μορφή, έτσι ώστε από κάποιον αριθμό στον επόμενο να αλλάζει μόνο ένα bit (δηλ. μόνο ένα παράθυρο).
- Οι οπτικοί κωδικοποιητές χρησιμοποιούνται σε μηχανές (τόρνοι, φρέζες) που ελέγχονται από Η/Υ και στη ρομποτική. Συνηθισμένη εφαρμογή στους Η/Υ αποτελεί το ποντίκι.

Απόλυτος οπτικός κωδικοποιητής

Δίσκος απόλυτου οπτικού κωδικοποιητή 4 ψηφίων (bits)



Απόλυτος οπτικός κωδικοποιητής 10 ψηφίων (κώδικα Gray)

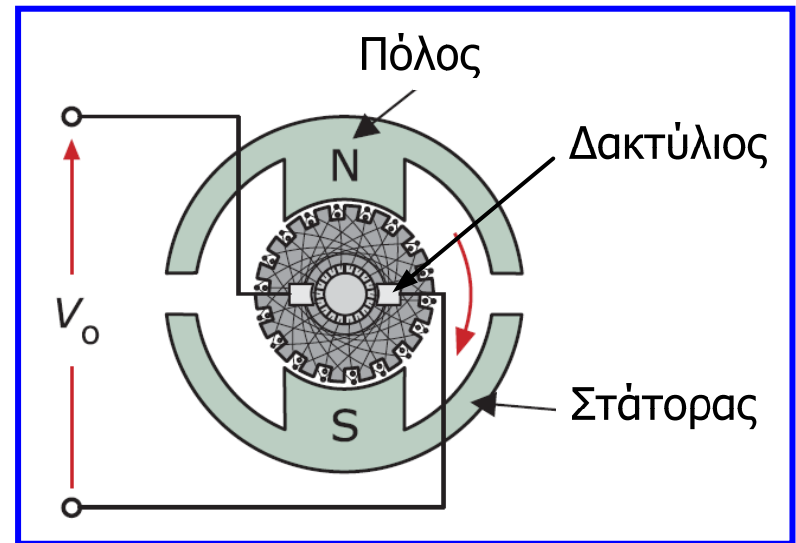
Περιέχει:
10 παράθυρα ανά τομέα και $2^{10} = 1024$ τομείς



Κώδικας Gray	Ισοδύναμος δεκαδικός
0000	0
0001	1
0011	2
0010	3
0110	4
0111	5
0101	6
0100	7
1100	8
1101	9
1111	10
1110	11
1010	12
1011	13
1001	14
1000	15

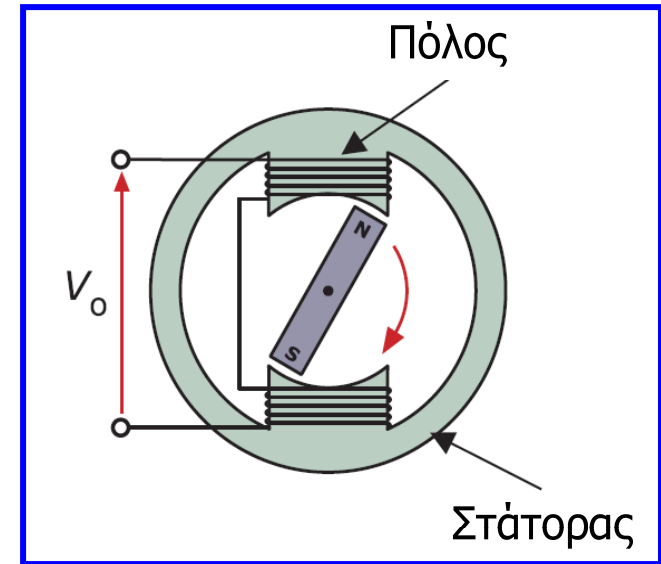
Ταχυμετρικές γεννήτριες

- Οι **ταχυμετρικές γεννήτριες** ή **ταχυγεννήτριες** οδηγούνται από μία εξωτερική περιστροφική μηχανική δύναμη και παράγουν ηλεκτρική έξοδο ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής.
- Αφού η **ταχύτητα** αποτελεί το **ρυθμό μεταβολής** της **μετατόπισης**, εάν μετριέται η μετατόπιση, μπορεί να προκύψει η ταχύτητα με ολοκλήρωση, χρησιμοποιώντας το κύκλωμα ολοκληρωτή που μελετήθηκε στην ενότητα 4.
- Η **ταχογεννήτρια συνεχούς ρεύματος** είναι μία γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (με περιστρεφόμενο πηνίο και μόνιμο μαγνήτη), η οποία παράγει συνεχή τάση εξόδου που είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του άξονά της.
- Η τάση εξόδου αλλάζει πολικότητα όταν αντιστραφεί η φορά περιστροφής.
- Η τάση εξόδου μπορεί να αναγνωστεί σε ένα βολτόμετρο βαθμονομημένο σε μονάδες ταχύτητας με την πολικότητα της τάσης αυτής να δείχνει την κατεύθυνση περιστροφής του άξονα.
- Εύρος μέτρησης: 0 – 600 ακτίνια ανά sec ή περίπου 0 – 6000 στροφές ανά λεπτό (αφού μία περιστροφή αντιστοιχεί σε $2\pi \approx 6$ ακτίνια).



Ταχυμετρικές γεννήτριες

- Η ταχογεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος περιέχει ένα μόνιμο περιστρεφόμενο μαγνήτη (ρότορας) ενός σταθερού πηνίου (στάτορας).
- Ο ρότορας συνδέεται με τον άξονα, του οποίου την ταχύτητα περιστροφής επιθυμούμε να μετρήσουμε.
- Λόγω της περιστροφής επάγεται στο σταθερό πηνίο εναλλασσόμενη τάση εξόδου με πλάτος ανάλογο της ταχύτητας περιστροφής.
- Σε σύγκριση με την ταχογεννήτρια συνεχούς ρεύματος, πλεονεκτεί όσον αφορά το κόστος, την αξιοπιστία, την ανθεκτικότητα και το θόρυβο, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να προσδιοριστεί η κατεύθυνση περιστροφής αφού η τάση εξόδου είναι εναλλασσόμενη.
- Οι ταχυγεννήτριες χρησιμοποιούνται σε αυτόματα συστήματα παραγωγής και στον έλεγχο μεγάλων ηλεκτρογεννητριών.



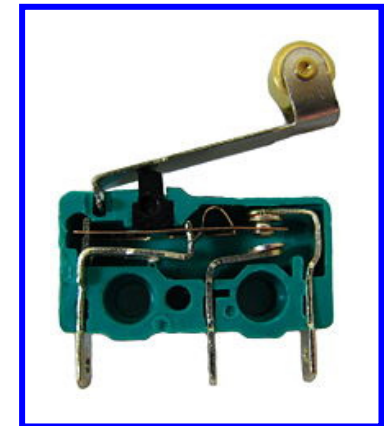
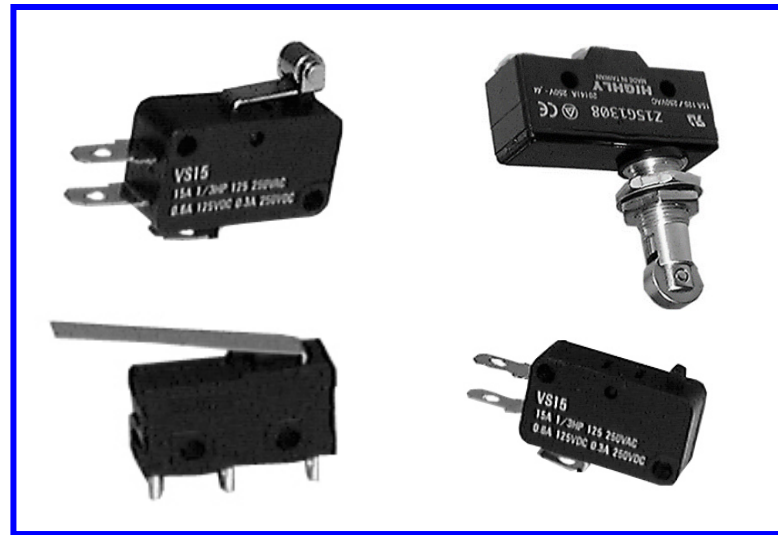
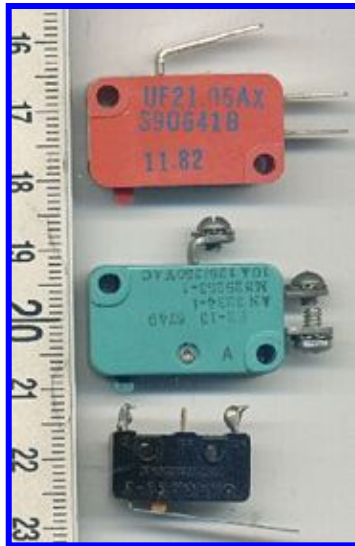
Μέτρηση προσέγγισης

- Η **μέτρηση** της **προσέγγισης** αναφέρεται στη διεύρυνση της παρουσίας ενός αντικειμένου σε μία καθορισμένη περιοχή κοντά στον ανιχνευτή.
- Από αυτόν τον προσδιορισμό μπορούν να υπολογιστούν η μετατόπιση και η ταχύτητα.
- Για **παράδειγμα**, ένας **ανιχνευτής προσέγγισης** μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μέτρηση της μετατόπισης και της ταχύτητας ενός περιστρεφόμενου άξονα, σημειώνοντας πότε κάποιο συγκεκριμένο τμήμα του άξονα εμφανίζεται κοντά στον ανιχνευτή.
- Εάν ο άξονας περιστρέφεται προς την ίδια κατεύθυνση και καταγράψουμε πόσες φορές περνά κοντά στον αισθητήρα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη γωνιακή μετατόπιση με ακρίβεια μίας περιστροφής,
- Εάν εκτός από τις περιστροφές μετρήσουμε και το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, μπορούν εύκολα να μετρηθούν η γωνιακή ταχύτητα, αλλά και η επιτάχυνση.
- Οι ανιχνευτές προσέγγισης χρησιμοποιούνται ευρέως στις διαδικασίες κατασκευής: καταγραφή θέσης, παρουσίας ή απουσίας κάποιων τμημάτων κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας, απαρίθμηση αντικειμένων σε κυλιόμενη ταινία κ.ά.

Μικροδιακόπτες

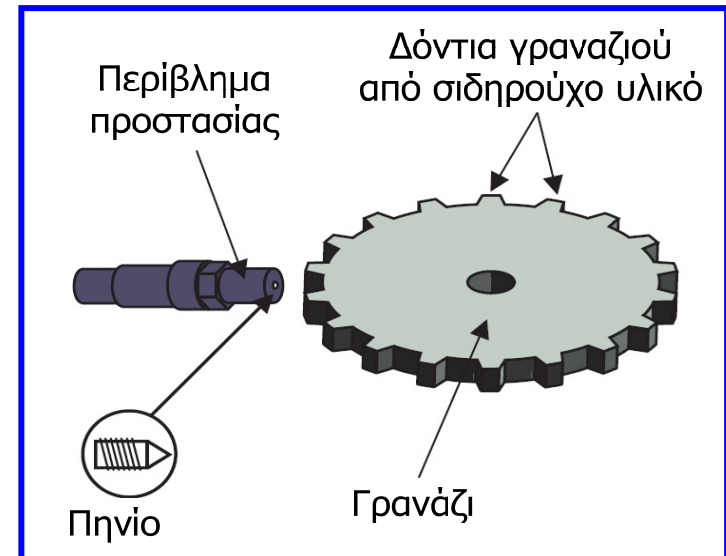
- Περιλαμβάνουν μία επαφή, η οποία αλλάζει κατάσταση με μικρή κίνηση ενός εμβόλου που επίσης διαθέτουν.
- Είναι ευαίσθητοι και χρήσιμοι ως αισθητήρες άμεσης επαφής.
- Οι επαφές των μικροδιακοπών στην κανονική τους κατάσταση μπορούν να είναι κλειστές ή ανοιχτές και το άνοιγμα ή το κλείσιμό τους μετά από κάποια άμεση επαφή (δηλ. άσκηση μικρής δύναμης) χρησιμοποιείται για να ενεργοποιείται ή να διακόπτεται ένα κύκλωμα.
- Είναι **απλοί** και **φθηνοί** και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγάλη **ευελιξία** και σε διάφορα περιβάλλοντα.
- Τυπική εφαρμογή είναι η χρήση τους στα **καλύμματα ασφαλείας**, τα οποία διακόπτουν τη λειτουργία ενός μηχανήματος ή θέτουν σε λειτουργία κάποιο συναγερμό εάν ανοιχθούν.
- Οι μικροδιακόπτες χρησιμοποιούνται επίσης στον **ποιοτικό έλεγχο** (π.χ. αποδοχή ή απόρριψη παραγόμενων αντικειμένων με βάση το εάν το βάρος τους ή το μέγεθός τους ενεργοποιεί ένα μικροδιακόπτη).

Μικροδιακόπτες



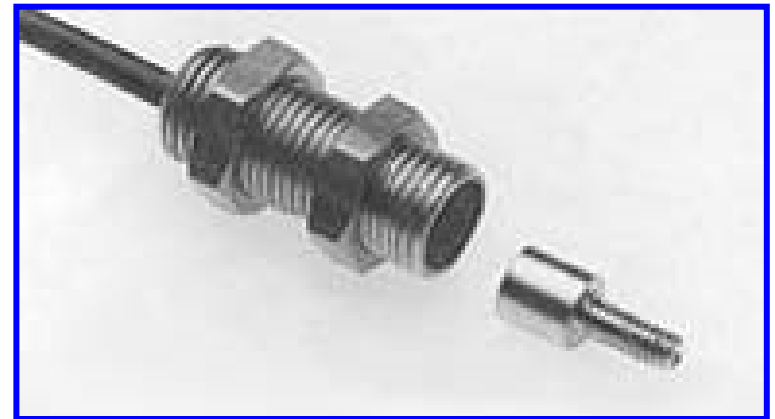
Αισθητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

- Ο αισθητήρας προσέγγισης μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης είναι μικρή **μαγνητική συσκευή** που χρησιμοποιείται για την **ανίχνευση γωνιακής μετατόπισης**.
- Αποτελείται από μικρό ηλεκτρομαγνητικό πηνίο που τοποθετείται σε προστατευτική θήκη, στερεώνεται σε μία ακλόνητη θέση κοντά στον περιστρεφόμενο άξονα και μπορεί να ανιχνεύσει την ύπαρξη ενός σιδηρούχου μετάλλου.
- **Παράδειγμα:** αισθητήρας προσέγγισης που ανιχνεύει την άμεση προσέγγιση ενός «δοντιού» από κάποιο γρανάτζι και όταν το «δόντι» περνά κοντά από τον αισθητήρα τότε παράγεται τάση εξόδου, η οποία προκαλείται από τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή του πηνίου και μπορεί να εμφανιστεί στην οθόνη ενός βολτόμετρου.
- Η έξοδος είναι ένας παλμός και η γωνιακή μετατόπιση μπορεί με αυτόν τον τρόπο να μετρηθεί εάν μετρηθεί πόσες φορές παράγεται τάση εξόδου.
- Οι τυπικοί αισθητήρες αυτού του είδους μπορούν να ανιχνεύουν σιδηρομαγνητικά υλικά σε αποστάσεις έως 2.5 mm.



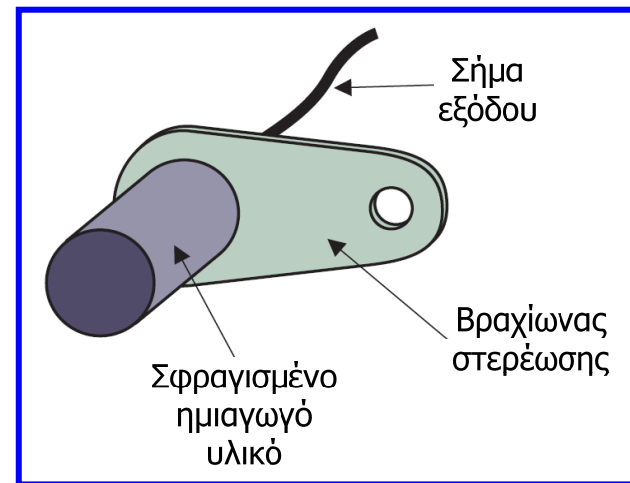
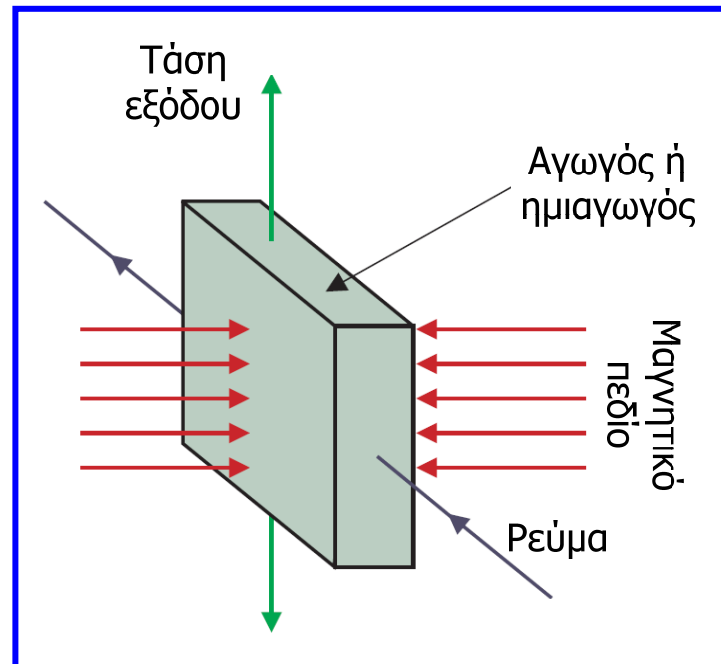
Αισθητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

- **Χρήσεις:** ανίχνευση της γωνίας ενός άξονα, μέτρηση χρόνου ανάφλεξης κινητήρων, σε δίσκους Η/Υ, ανίχνευση ταχύτητας κινητήρων.
- **Κύρια χαρακτηριστικά:**
 - ✓ Πολύ **μικρό μέγεθος** (χρησιμοποιείται εκεί όπου άλλοι ανιχνευτές δε χωρούν).
 - ✓ Παθητική συσκευή (**δε χρειάζεται εξωτερική τροφοδοσία** για να λειτουργήσει).
 - ✓ Μεγάλη **αντοχή** αφού σφραγίζεται σε προστατευτική θήκη (λειτουργεί σε ακραίες θερμοκρασίες και πιέσεις και υπό τη δράση δραστικών χημικών ουσιών).
 - ✓ **Χαμηλό κόστος.**
 - ✓ Πρέπει να **τοποθετηθεί πολύ κοντά** σε κάποιο σιδηρούχο υλικό για να παράγει υπολογίσιμη τάση εξόδου.
 - ✓ Λειτουργεί σε **μέτριες** έως **υψηλές ταχύτητες**, αλλά πάσχει από την εμφάνιση ανεπιθύμητων σημάτων **θορύβου**.



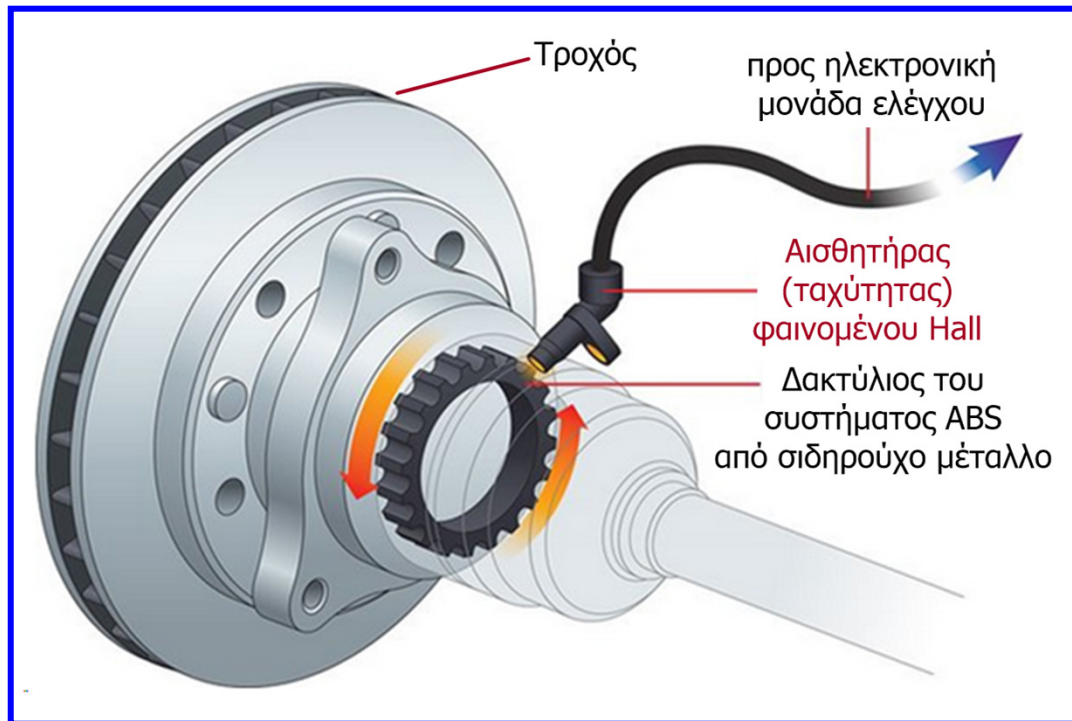
Ανιχνευτής φαινομένου Hall

- Το **φαινόμενο Hall** είναι η **δημιουργία** μίας **εγκάρσιας τάσης** στα άκρα ενός αγωγού, όταν αυτός **διαρρέεται από ρεύμα** και βρίσκεται **μέσα σε μαγνητικό πεδίο**.
- Είναι ανιχνευτής προσέγγισης που μπορεί να ανιχνεύει εξαιρετικά ασθενή μαγνητικά πεδία και μικρές αλλαγές της έντασης του μαγνητικού πεδίου.
- Κατασκευάζεται από ημιαγωγά υλικά, όπου το φαινόμενο είναι πιο ισχυρό.
- Αποτελείται από μικρό **ολοκληρωμένο κύκλωμα**, ενσωματωμένο σε μία **βελόνα δοκιμής**, η οποία μπορεί με ακρίβεια να ανιχνεύει την κίνηση στόχων από σιδηρούχα μέταλλα.
- Είναι πιο ακριβός από τον ανιχνευτή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, αλλά πάσχει λιγότερο από σήματα θορύβου και είναι κατάλληλος για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας.



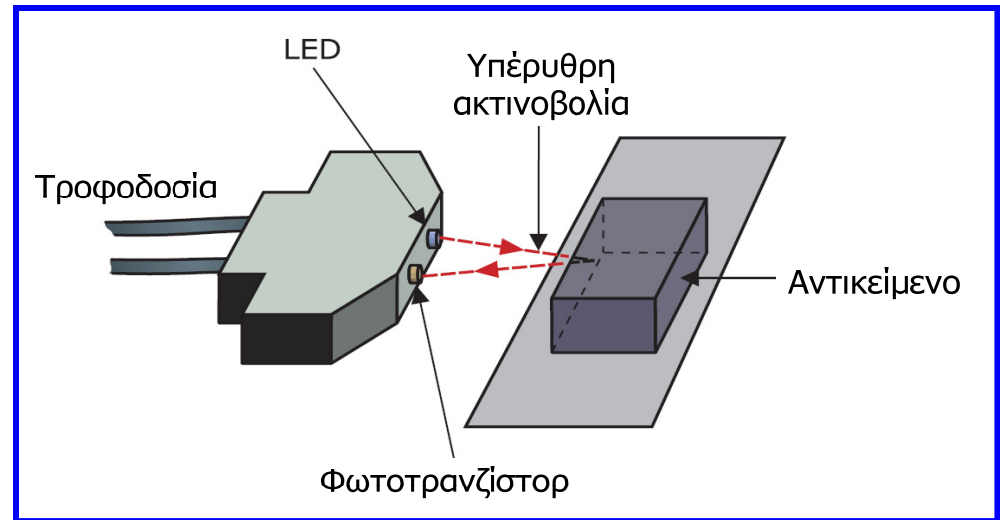
Ανιχνευτής φαινομένου Hall

- **Παράδειγμα χρήσης:** anti-lock brake system (ABS), στο οποίο ο αισθητήρας φαινομένου Hall ελέγχει την ταχύτητα των τροχών, ώστε να ανιχνεύσει πιθανό μπλοκάρισμα (γλίστρημα) κάποιου τροχού κατά τη διάρκεια της χρήσης των φρένων και να το εμποδίσει, απελευθερώνοντας τον και παρέχοντας του κίνηση περιορισμένης έκτασης.
- Όταν το σύστημα ABS λειτουργεί, το πεντάλ του φρένου πάλλεται, γεγονός που οφείλεται στο γρήγορο άνοιγμα (μείωση πίεσης) και κλείσιμο (αύξηση πίεσης) των βαλβίδων του φρένου (περίπου 15 φορές ανά δευτερόλεπτο).



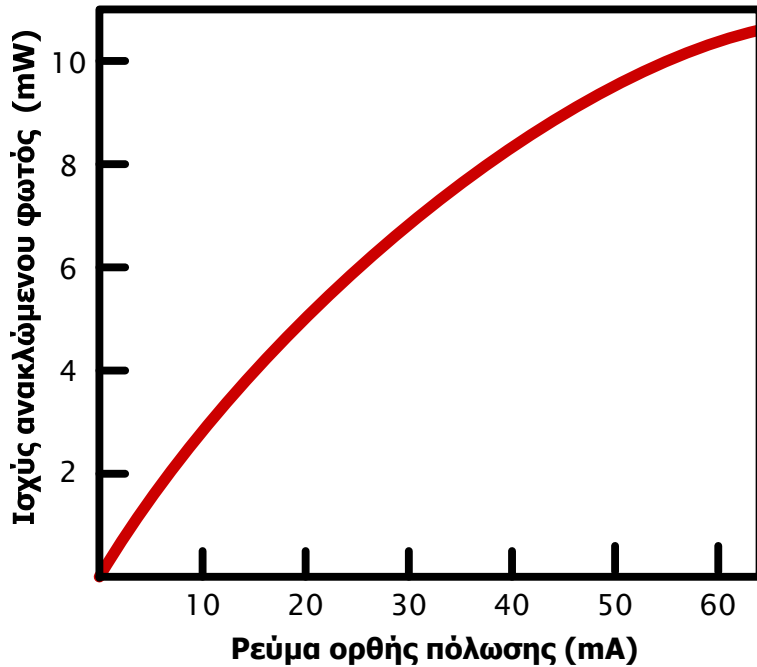
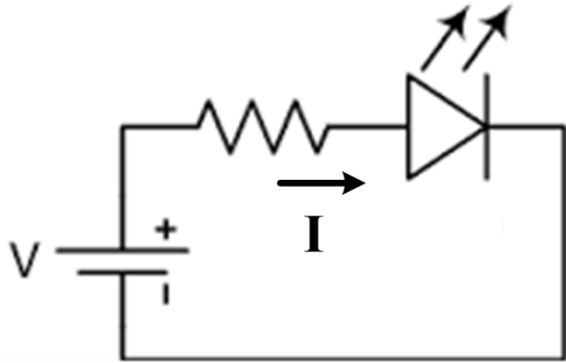
Οπτικοί αισθητήρες

- Αποτελούνται από μία πηγή φωτός και έναν ανιχνευτή και τα συνηθέστερα είδη είναι ο **αισθητήρας ανακλώμενης οπτικής δέσμης** (όπου ο ανιχνευτής στερεώνεται δίπλα στην πηγή φωτός) και ο **αισθητήρας διαπερατότητας** (όπου ο ανιχνευτής στερεώνεται απέναντι από την πηγή φωτός).
- Ως **πηγές φωτός** (ορατού ή μη) χρησιμοποιούνται οι **δίοδοι φωτοεκπομπής (LED)** και ως **ανιχνευτές** τα **φωτοτρανζίστορ**.
- Στον αισθητήρα ανακλώμενης δέσμης, η πηγή εκπέμπει δέσμη φωτός, η οποία ανακλάται από κάθε αντικείμενο που πλησιάζει τον αισθητήρα και το ανακλώμενο φως ανιχνεύεται από το φωτοτρανζίστορ.
- Στον αισθητήρα διαπερατότητας, η δέσμη που προσπίπτει στον ανιχνευτή διακόπτεται οπότε διαπιστώνεται η ύπαρξη αντικειμένου στον ενδιάμεσο χώρο.
- Ο ανιχνευτής φωτός παράγει τάση εξόδου που ενισχύεται για να μπορεί να ληφθεί ένδειξη από απόσταση, ενώ στις πιο σύγχρονες συσκευές παρέχεται και ένδειξη απόστασης.
- **Χρήσεις:** συστήματα συναγερμού και ελέγχου ποιότητας.

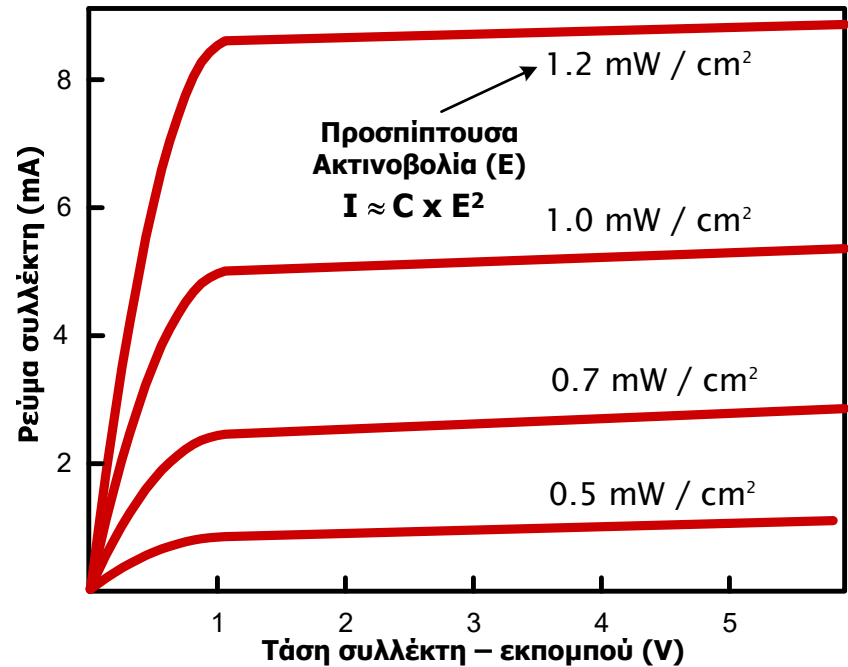
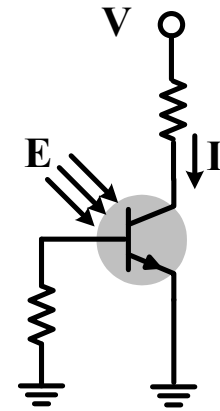


Οπτικοί αισθητήρες

LED



Φωτοτρανζιστορ



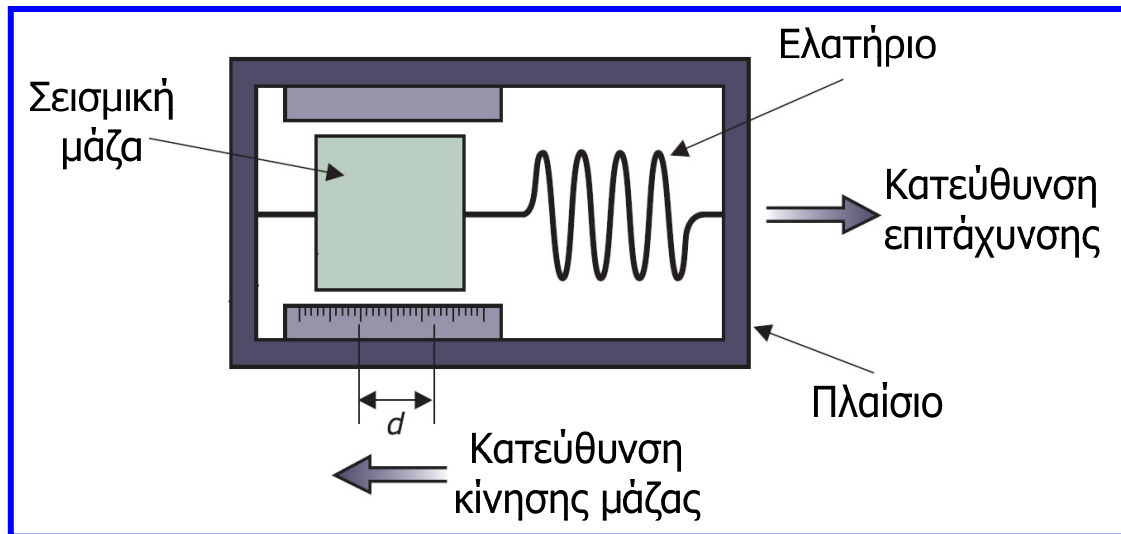
Μέτρηση επιτάχυνσης

- **Επιτάχυνση** είναι ο **ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας**, μετριέται σε m/sec^2 , αλλά μερικές φορές εκφράζεται με βάση την **επιτάχυνση της βαρύτητας** ($g = 9.81 m/sec^2$).
- Τα **επιταχυνσιόμετρα (accelerometers)** χρησιμοποιούνται σε **δύο ειδικά είδη μετρήσεων: κρούσεις** (μεγάλες επιταχύνσεις που διαρκούν μικρά χρονικά διαστήματα) και **δονήσεις** (μικρές και περιοδικά επαναλαμβανόμενες επιταχύνσεις).
- Επίσης, χρησιμοποιούνται για τη **μέτρηση επιταχύνσεων οχημάτων** (όπως αεροπλάνα και πλοία), παρέχοντας πληροφορίες για τη θέση, την ταχύτητα και την απόσταση που έχει καλυφθεί.
- Τα επιταχυνσιόμετρα διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:
 - ✓ **Επιταχυνσιόμετρα σεισμικής μάζας**: μετρούν τη μετατόπιση μιας μάζας από μία θέση αναφοράς και υπολογίζουν την επιτάχυνση.
 - ✓ **Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα**: βασίζονται στο **πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο** που αφορά την εμφάνιση ηλεκτρικού φορτίου ανάλογου της μηχανικής τάσης (καταπόνησης) που ασκείται σε έναν κρύσταλλο.

Επιταχυνσιόμετρο σεισμικής μάζας

- Η έκφραση σεισμική μάζα αναφέρεται στη μάζα που χρησιμοποιείται ως μάζα αναφοράς.
- Αυτή η μάζα είναι συνδεδεμένη με ένα ελατήριο γνωστής σταθεράς K και το ελατήριο είναι συνδεδεμένο στο πλαίσιο που περιβάλλει τη διάταξη.
- Όταν το πλαίσιο επιταχυνθεί με επιτάχυνση a προς μία κατεύθυνση, ασκείται στη μάζα μια δύναμη $F = m \cdot a$, η οποία της προκαλεί μετατόπιση (d) αντίθετης κατεύθυνσης, έως ότου η δύναμη που ασκήθηκε λόγω της επιτάχυνσης να εξισωθεί με τη δύναμη του ελατηρίου:

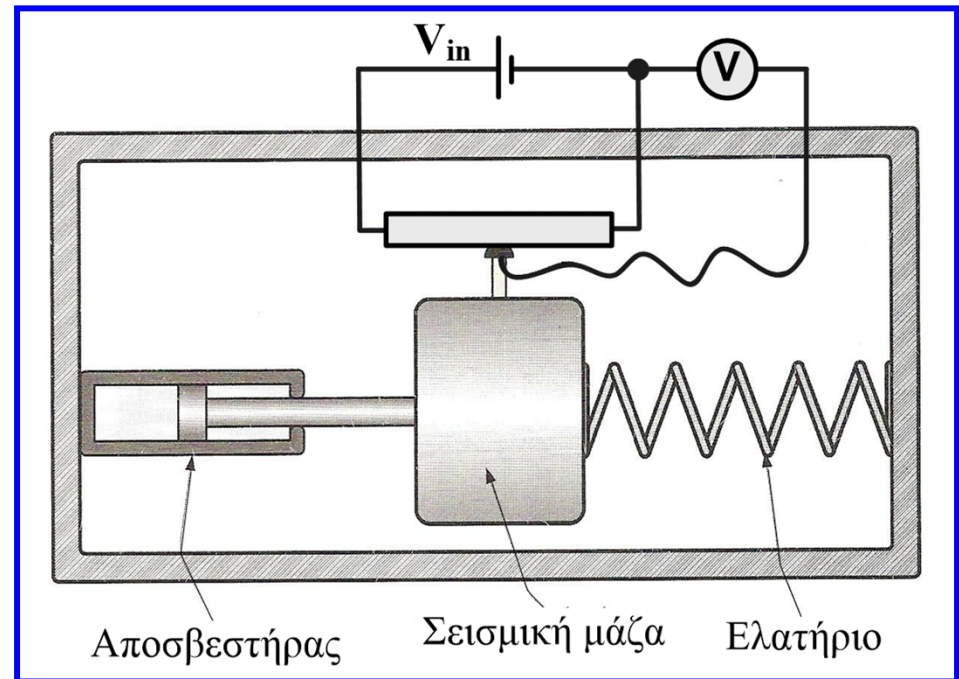
$$F = F_{\text{ελατ.}} \Rightarrow m \cdot a = K \cdot d \Rightarrow a = \frac{K \cdot d}{m}$$



α : επιτάχυνση (m/sec^2)
 d : μετατόπιση μάζας (m)
 K : σταθερά ελατηρίου (N/m)
 m : μάζας (kg)

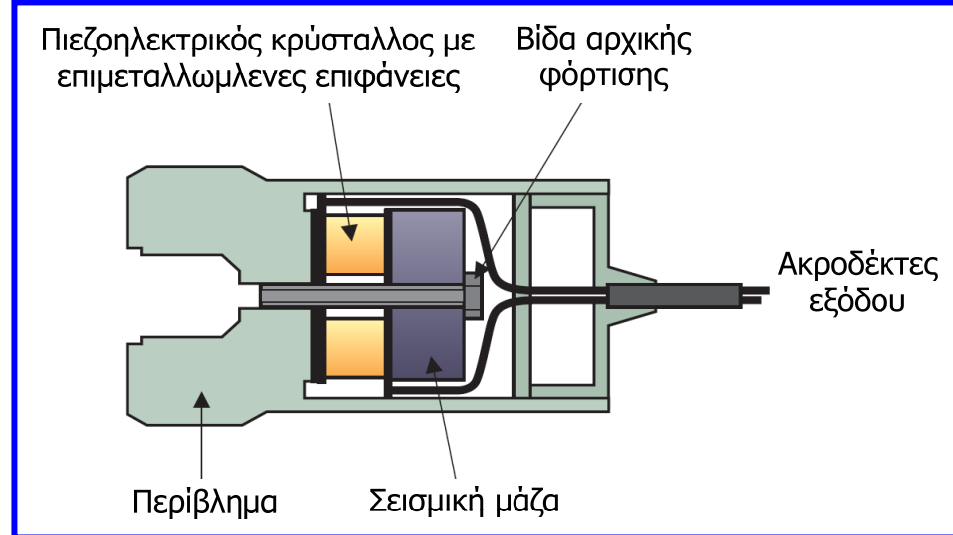
Επιταχυνσιόμετρο σεισμικής μάζας

- Όσο μεγαλύτερη η επιτάχυνση, τόσο μεγαλύτερη η μετατόπιση της μάζας.
- Όταν το πλαίσιο πάψει να επιταχύνεται, η μάζα επιστρέφει στην αρχική της θέση, ενώ όταν το πλαίσιο επιβραδύνεται τότε η μάζα συμπιέζει το ελατήριο.
- Τα επιταχυνσιόμετρα σεισμικής μάζας χρησιμοποιούνται για να μετρούν κρούσεις και δονήσεις πολύ μικρής συχνότητας, όπως αυτές που σχετίζονται με τους σεισμούς και τις κινήσεις του γήινου φλοιού. Χρησιμοποιούνται επίσης για να μετρούν την επίδραση υπόγειων εκρήξεων πυρομαχικών.
- Στην πράξη, η μετατόπιση της μάζας μετριέται με γραμμικό ποτενσιόμετρο ή LVDT και η επιτάχυνση υπολογίζεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο

- Είναι ένας από τους διαδεδομένους τύπους επιταχυνσιομέτρου.
- Αποτελείται από μάζα συνδεδεμένη μέσω βίδας με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, που τοποθετούνται σε περίβλημα.
- Οι επιμεταλλωμένες επιφάνειες του κρυστάλλου είναι σε επαφή με ηλεκτρικό κύκλωμα.
- Το κύκλωμα (ενισχυτής φορτίου) παράγει τάση εξόδου από το φορτίο που αναπτύσσεται στον κρύσταλλο λόγω της μηχανικής τάσης (πίεσης) που αναπτύσσεται σε αυτόν.
- Αυτό συμβαίνει λόγω του **πιεζοηλεκτρικού φαινομένου**, σύμφωνα με το οποίο όταν ο κρύσταλλος πιέζεται εμφανίζεται ηλεκτρικό φορτίο αντίθετου προσήμου στις πλευρές του, το οποίο είναι ανάλογο της μηχανικής τάσης που ασκείται.
- Η τάση εξόδου είναι ανάλογη της επιτάχυνσης και ως κρύσταλλος χρησιμοποιείται συνήθως **χαλαζίας (quartz)** λόγω της υψηλής μηχανικής αντοχής που διαθέτει.
- Τα πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα έχουν χαμηλό κόστος, μικρό μέγεθος και βάρος, προσφέρονται για λειτουργία σε **υψηλές συχνότητες**, αντέχουν σε **υψηλές επιταχύνσεις** ($250,000 \text{ m/sec}^2$) και χρησιμοποιούνται στις δοκιμές κρούσεων.

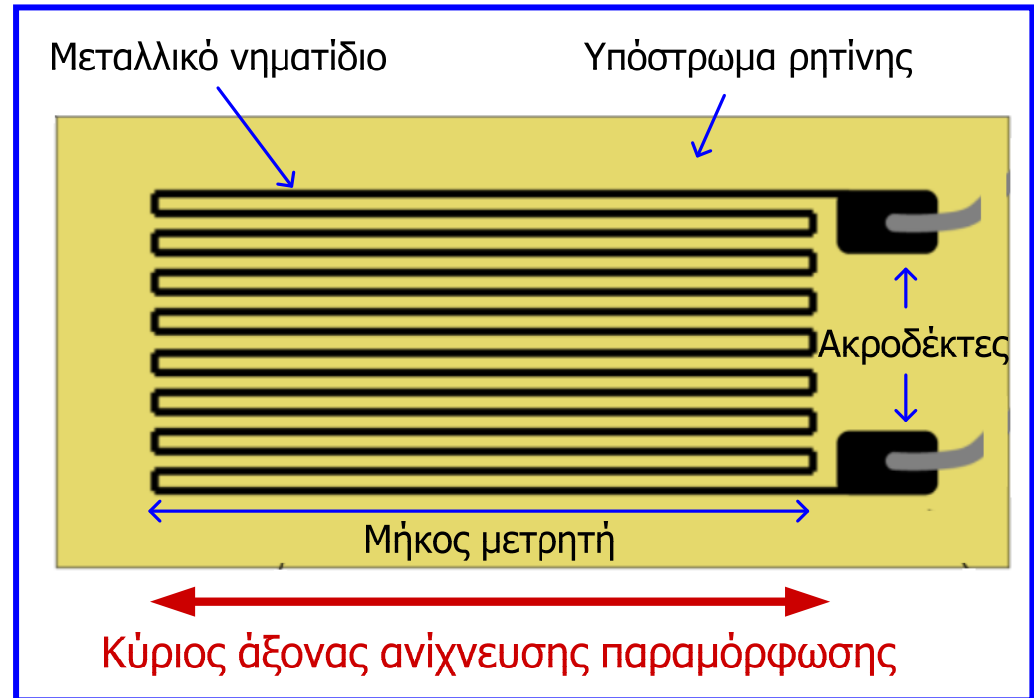


Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο



Μετρητής μηχανικής τάσης ή πιεζοαντίσταση

- Στερεώνεται σε αντικείμενα και μετράει τις **αλλαγές μεγέθους τους λόγω παραμόρφωσης (συμπίεσης ή εφελκυσμού)**.
- Όταν μεταβληθούν οι διαστάσεις του αντικειμένου, μεταβάλλονται και οι διαστάσεις του μετρητή με αποτέλεσμα να αλλάζουν και οι ηλεκτρικές ιδιότητές του (δηλαδή, όταν ο μετρητής τεντώνεται ή συμπιέζεται αλλάζει η αντίσταση του και αυτή η αλλαγή μπορεί να συσχετιστεί με μία μετατόπιση).



- Οι **μετρητές μηχανικής τάσης είναι ενεργοί (ευαίσθητοι) όταν η μηχανική τάση ασκείται παράλληλα με τον άξονα ανίχνευσης παραμόρφωσης** και πρακτικά ανενεργοί όταν η μηχανική τάση ασκείται κάθετα προς τον άξονα ανίχνευσης παραμόρφωσης.
- Όταν η μηχανική τάση ασκείται **παράλληλα με τον άξονα ανίχνευσης, μεταβάλλεται το μήκος** του μετρητή, ενώ όταν ασκείται **κάθετα προς τον άξονα ανίχνευσης, ο μετρητής ξεδιπλώνεται ή διπλώνεται στενότερα, χωρίς πρακτικά να μεταβάλλεται το μήκος του**.
- Οι μετρητές έχουν μήκος έως 10 mm, αλλά κατασκευάζονται και μετρητές έως 50 mm.

Μετρητής μηχανικής τάσης ή πιεζοαντίσταση

- Συνήθως, αποτελούνται από νηματίδιο πάχους μερικών μικρομέτρων (μεταλλικό φύλλο από κράμα χαλκού - νικελίου ή χρωμίου - νικελίου με υψηλή ειδική αντίσταση και υψηλή μηχανική αντοχή) σχήματος ζιγκ-ζαγκ, στερεωμένο σε υπόστρωμα από ρητίνη.
- Για την ορθή χρήση **προσκολλημένων μετρητών**, η συγκόλληση αντικειμένου και μετρητή θα πρέπει να είναι ισχυρή και μονωτική, αν και σε ειδικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται **μη προσκολλημένοι μετρητές μηχανικής τάσης (ελεύθερου τύπου)**.
- Η **αντίσταση** του **νηματιδίου** του **μετρητή**, δίνεται ως εξής:

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

ρ : ειδική αντίσταση του υλικού του νηματιδίου ($\Omega \cdot m$)

l : μήκος νηματιδίου (m)

A : εμβαδόν διατομής νηματιδίου (m^2)

- Η αλλαγή του μήκους του νηματιδίου προκαλεί αλλαγή της αντίστασης R (για παράδειγμα, ο εφελκυσμός του νηματιδίου προκαλεί αύξησή του μήκους και της αντίστασης), επομένως ο μετρητής χρησιμοποιεί το γεγονός αυτό για τη μέτρηση της μεταβολή της διάστασης λόγω της ασκούμενης τάσης.
- Όταν οι μετρητές μηχανικής τάσης μετρούν τις μεταβαλλόμενες διαστάσεις ενός αντικειμένου, μετρούν τη μηχανική τάση (strain) υπό την οποία αυτό βρίσκεται.
- Η **μηχανική τάση (ϵ)** ή **παραμόρφωση** ορίζεται ως το πηλίκο της μεταβολής της διάστασης προς την αρχική διάσταση: $\epsilon = \Delta l / l$.

Μετρητής μηχανικής τάσης ή πιεζοαντίσταση

- Η **ηλεκτρομηχανική τάση** ορίζεται ως $\Delta R / R$ και ισούται με $G \cdot \varepsilon$, όπου G είναι το πηλίκο της ποσοστιαίας αλλαγής της αντίστασης προς την ποσοστιαία αλλαγή του μήκους λόγω της εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης:

$$G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} \Rightarrow G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \Rightarrow G \cdot \varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow \Delta R = G \cdot \varepsilon \cdot R$$

- Ο **παράγοντας G** λαμβάνει συνήθως τιμές από 1.8 έως 2.2 και οι αντιστάσεις των μετρητών είναι συνήθως μεταξύ 50 Ω και 2 k Ω .
- Αν και η **μηχανική τάση ε** είναι καθαρός αριθμός, χρησιμοποιείται γι' αυτή η (ψευδο)μονάδα **microstrain (με)**.
- **Παράδειγμα:** για μήκος αντικειμένου 100 mm που αυξάνεται κατά 0.1 mm η μηχανική τάση είναι: $\varepsilon = \Delta l / l = 0.1 / 100 = 0.001 = 1000 \cdot 10^{-6}$ ή 1000 με.
- Συνήθως οι πιεζοαντιστάσεις χρησιμοποιούνται για μέτρηση μηχανικών τάσεων έως 10000 με, αν και μπορούν να μετρηθούν μηχανικές τάσεις έως και 100000 με από μετρητές κονσταντάνης (κράμα χαλκού - νικελίου) που παρουσιάζουν υψηλή μηχανική αντοχή.

Μετρητής μηχανικής τάσης ή πιεζοαντίσταση

Μέτρηση δύναμης με μετρητή μηχανικής τάσης:

F : ασκούμενη δύναμη στο δοκίμιο (αντικείμενο) που είναι τοποθετημένος ο μετρητής μηχανικής τάσης [N].

P = F / S = E · ε : εφαρμοζόμενη πίεση λόγω της δύναμης F [N / m²].

E : μέτρο ελαστικότητας δοκιμίου [N / m²].

S : επιφάνεια του δοκιμίου [m²].

$$F = P \cdot S = E \cdot \varepsilon \cdot S \Rightarrow \varepsilon = \frac{F}{S \cdot E}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta R}{G \cdot R}$$

$$F = \frac{E \cdot S \cdot \Delta l}{l} = \frac{E \cdot S \cdot \Delta R}{G \cdot R}$$

Παράδειγμα: Μια κυλινδρική μεταλλική ράβδος μήκους $l = 100 \text{ mm}$ και διαμέτρου $d = 20 \text{ mm}$ υφίσταται εφελκυσμό κατόπιν άσκησης δύναμης F , με αποτέλεσμα την επιμήκυνσή της κατά 0.10 mm . Εάν το μέτρο ελαστικότητας του μετάλλου είναι $2.23 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, να υπολογιστεί η ασκούμενη δύναμη F .

$$S = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 3.14 \cdot \frac{20^2 \cdot 10^{-6}}{4} = 3.14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{0.1}{100} = 0.001 = 1000 \mu\epsilon$$

$$F = E \cdot S \cdot \varepsilon = 2.23 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 3.14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 0.001 = 7000 \text{ N}$$

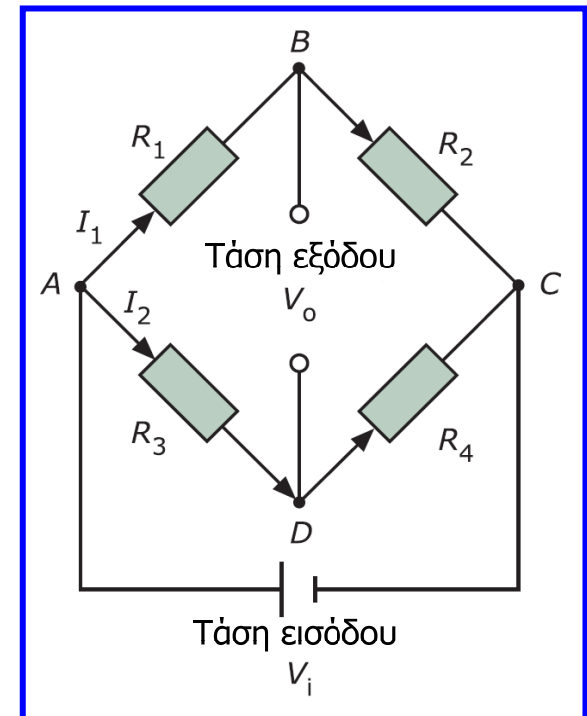
Μετρητής μηχανικής τάσης ή πιεζοαντίσταση

- Η αλλαγή αντίστασης του νηματιδίου στο μετρητή μηχανικής τάσης πρέπει να μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για να δείξει την τάση ή την αλλαγή των διαστάσεων του αντικειμένου.
- Για το λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία **γέφυρα Wheatstone** και ένας μετρητής τάσης στην έξοδο αυτής, κατάλληλα βαθμονομημένος.
- Όπως είδαμε στην ενότητα 3, η τάση εξόδου είναι μηδενική όταν η γέφυρα είναι σε ισορροπία, δηλ. όταν: $R_1 / R_2 = R_3 / R_4$.
- Στην ενότητα 3, αποδείχθηκε επίσης ότι:

$$V_o = V_i \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

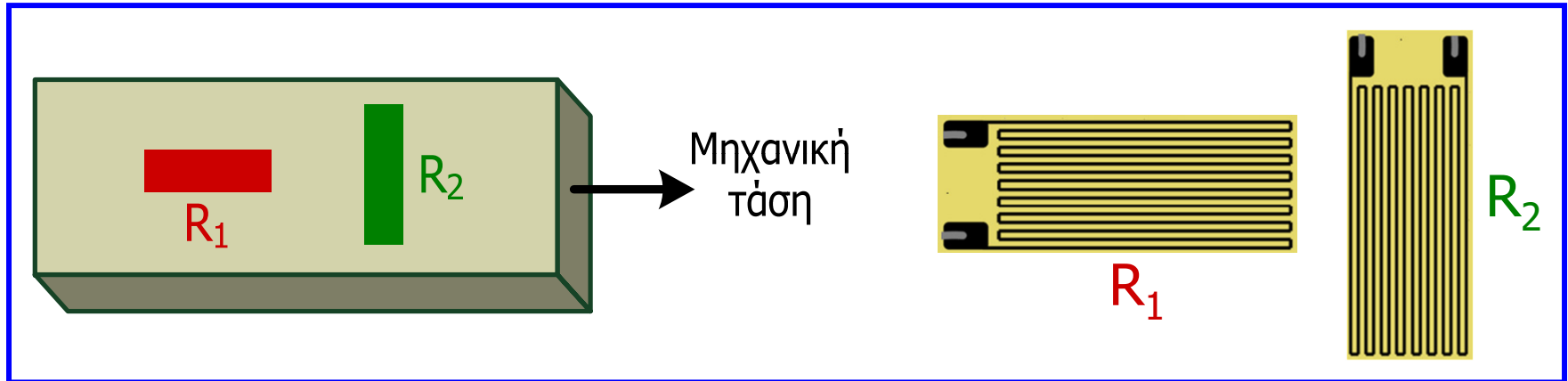
$$\Delta V_o \approx V_i \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

- Εάν αντικατασταθεί η R_1 από ένα μετρητή μηχανικής τάσης, τότε η αλλαγή στην αντίσταση του μετρητή είναι ανάλογη της τάσης εξόδου, η οποία θα αποτελεί μέτρο της εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης.



Μετρητής μηχανικής τάσης ή πιεζοαντίσταση

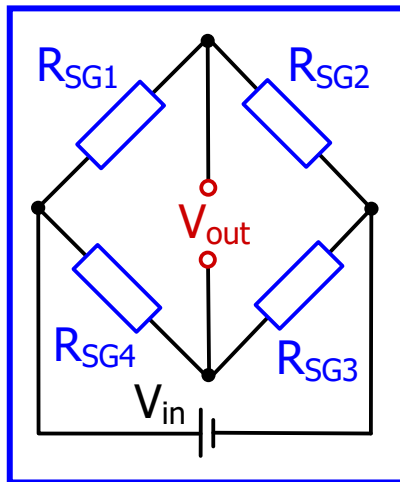
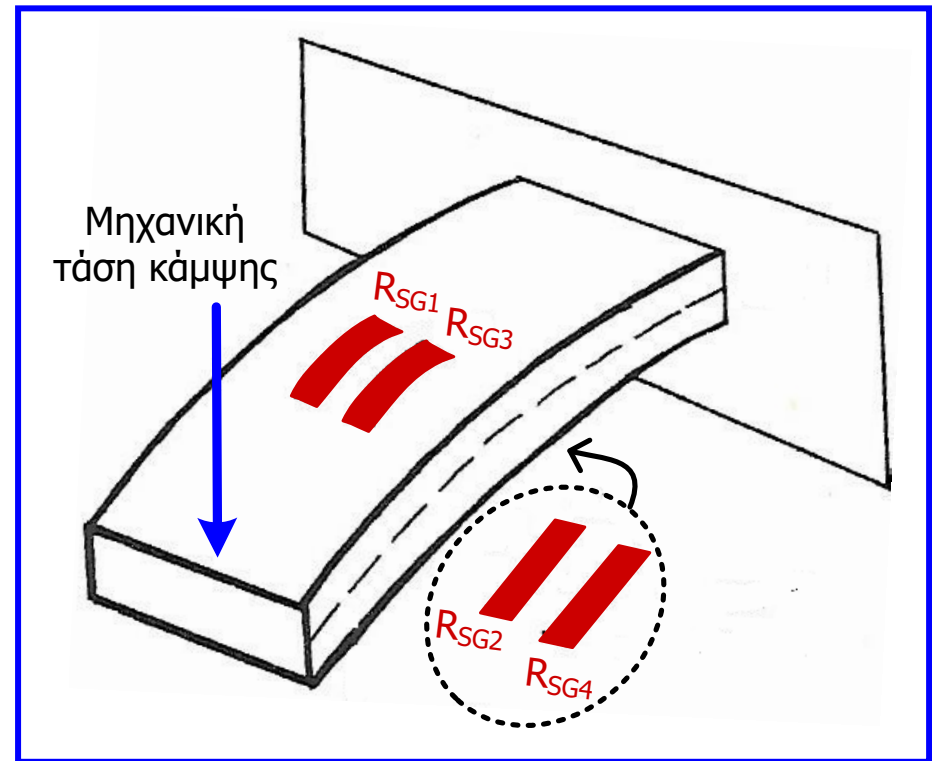
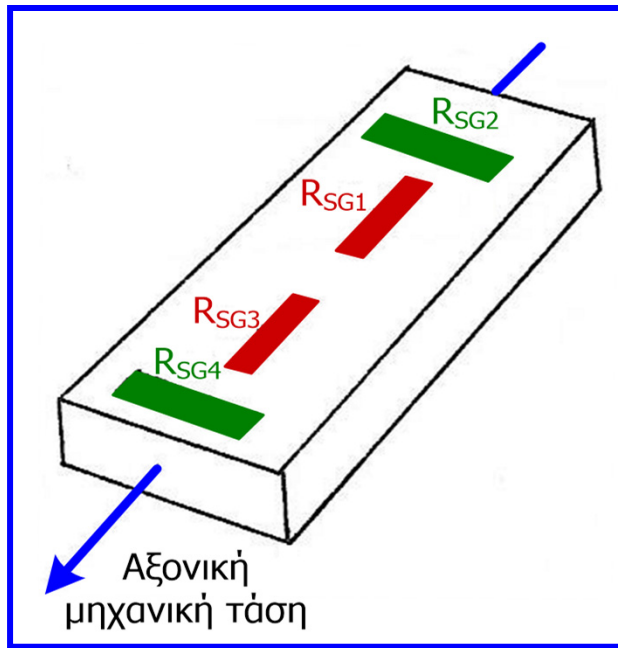
- Στο προηγούμενο κύκλωμα γέφυρας, λόγω του ότι η μεταβολή της αντίστασης του μετρητή μηχανικής τάσης (R_1) είναι μικρή, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα, έτσι ώστε η τάση εξόδου της γέφυρας να μην επηρεάζεται από τη μεταβολή της αντίστασης του μετρητή λόγω αλλαγής της θερμοκρασίας.
- Στην ίδια γέφυρα με τον ενεργό μετρητή R_1 (μετρητής με άξονα παραμόρφωσης παράλληλο προς τη κατεύθυνση της μηχανικής τάσης), συνδέεται ένας μη ενεργός μετρητής R_2 (μετρητής με άξονα ανίχνευσης παραμόρφωσης κάθετο στη μηχανική τάση) του οποίου το μήκος πρακτικά δε μεταβάλλεται.
- Λόγω γειτνίασης, η αντίσταση των δύο μετρητών επηρεάζεται το ίδιο από την αλλαγή της θερμοκρασίας, συνεπώς η αλλαγή της θερμοκρασίας δεν επηρεάζει την τάση εξόδου της γέφυρας, η οποία επηρεάζεται μόνο από την μεταβολή του μήκους του ενεργού μετρητή μηχανικής τάσης R_1 .



Μετρητής μηχανικής τάσης ή πιεζοαντίσταση

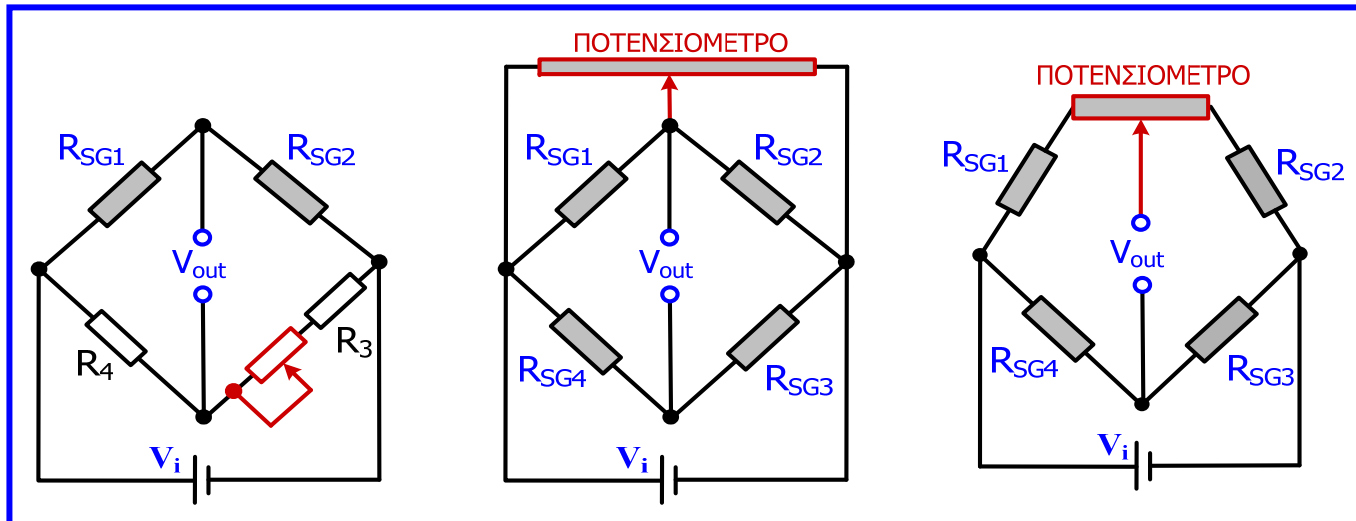
- Σε αρκετές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται περισσότεροι του ενός ενεργοί μετρητές μηχανικής τάσης, οι οποίοι συνδέονται σε γέφυρα Wheatstone.
- Όπως προαναφέρθηκε, λόγω του ότι η μεταβολή της αντίστασης κάθε μετρητή είναι μικρή, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα, έτσι ώστε η τάση εξόδου της γέφυρας να μην επηρεάζεται από τη μεταβολή της αντίστασης των μετρητών λόγω αλλαγής της θερμοκρασίας.
- Όταν χρησιμοποιούνται 2 ενεργοί μετρητές, ενδείκνυται να συνδέονται στην ίδια γέφυρα 2 μη ενεργοί μετρητές, δηλαδή, μετρητές των οποίων το μήκος πρακτικά δε μεταβάλλεται.
- Λόγω γειτνίασης, η αντίσταση των 4 μετρητών επηρεάζεται το ίδιο από την αλλαγή της θερμοκρασίας, συνεπώς η αλλαγή της θερμοκρασίας δεν επηρεάζει την τάση εξόδου της γέφυρας, η οποία επηρεάζεται μόνο από την μεταβολή του μήκους των 2 ενεργών μετρητών.
- Όταν δεν ασκείται αξονική μηχανική τάση, αλλά μηχανική τάση κάμψης, τότε ενδείκνυται να τοποθετούνται 2 μετρητές στην άνω πλευρά του αντικειμένου που κάμπτεται προς τα κάτω (των οποίων το μήκος αυξάνεται) και 2 μετρητές στην κάτω πλευρά του ίδιου αντικειμένου (των οποίων το μήκος μειώνεται).
- Οι 4 μετρητές συνδέονται σε γέφυρα, η μεταβολή της τάσης εξόδου της γέφυρας οφείλεται στη μηχανική τάση κάμψης και η αλλαγή της θερμοκρασίας δεν επηρεάζει την τάση εξόδου, αφού η μεταβολή της αντίστασης λόγω αλλαγής θερμοκρασίας είναι ίδια στους 4 μετρητές.

Μετρητής μηχανικής τάσης ή πιεζοαντίσταση



Μετρητής μηχανικής τάσης ή πιεζοαντίσταση

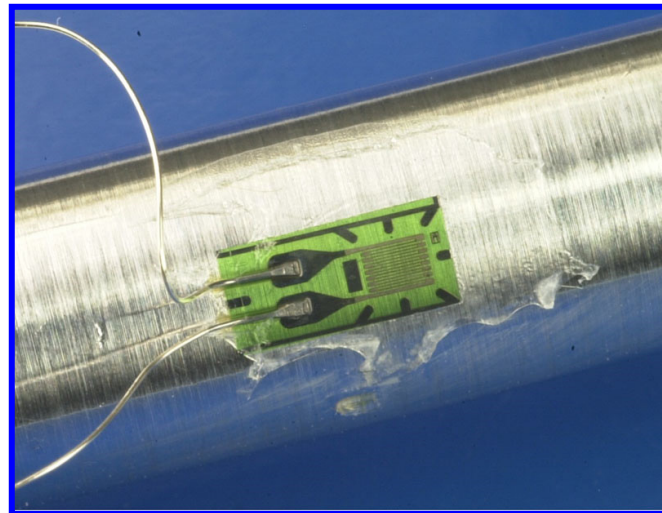
- Η **ανοχή της αντίστασης των μετρητών μηχανικής τάσης**, συχνά είναι παρόμοια ή πιο μεγάλη από την αλλαγή της αντίστασης τους λόγω της ασκούμενης μηχανική τάσης.
- Για παράδειγμα, πιεζοαντίσταση 120Ω με ανοχή 0.5% , δηλαδή $\pm 0.6 \Omega$ και παράγοντα $G = 2$, με ασκούμενη μηχανική τάση $\varepsilon = 2500 \mu\epsilon$, παρουσιάζει μεταβολή αντίστασης ίση με την ανοχή, αφού $\Delta R = \pm G \cdot \varepsilon \cdot R = \pm 2 \cdot 0.0025 \cdot 120 = \pm 0.6 \Omega$.
- Για το λόγο αυτό, στη γέφυρα που συνδέονται μετρητές μηχανικής τάσης, υιοθετούνται **τεχνικές με χρήση ποτενσιόμετρου**, έτσι ώστε η τάση εξόδου της γέφυρας να είναι μηδενική όταν δεν ασκείται μηχανική τάση στους μετρητές.
- Εναλλακτικά, αυτό επιτυγχάνεται με τη σύνδεση στην έξοδο της γέφυρας, μιας ενισχυτικής διάταξης **με τελεστικό ενισχυτή, ο οποίος διαθέτει δυνατότητα αντιστάθμισης**.



Μετρητής μηχανικής τάσης ή πιεζοαντίσταση

- Εφόσον οι μετρητές μηχανικής τάσης στερεωθούν σε ένα αντικείμενο, είναι σχεδόν μόνιμοι και συνήθως δε μπορούν να ανακτηθούν.
- Η ακρίβεια τους εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία έχουν τοποθετηθεί, οπότε ο σωστός προσανατολισμός και η άριστη συγκόλληση του μετρητή έχουν μεγάλη σημασία για την ακρίβεια της μέτρησης.
- **Χρήσεις:** στη βιομηχανία συνήθως σε ομάδες για μέτρηση μηχανικών τάσεων αντικειμένων σε διάφορες διευθύνσεις, σε δομικά έργα για να καταγράφουν μηχανικές τάσεις που υφίστανται γέφυρες και τοίχοι ψηλών κτιρίων, καθώς και για την ανίχνευση ρωγμών, σε δρόμους για καταγραφή βαθμού χρήσης και φθοράς, στη μηχανολογία για μέτρηση μηχανικών τάσεων σε μέταλλα, κινητήρες, κυλίνδρους κ.α., αλλά και για μέτρηση δύναμης, πίεσης και επιτάχυνσης.

Μετρητής μηχανικής
τάσης συγκολλημένος
σε μεταλλική δοκό

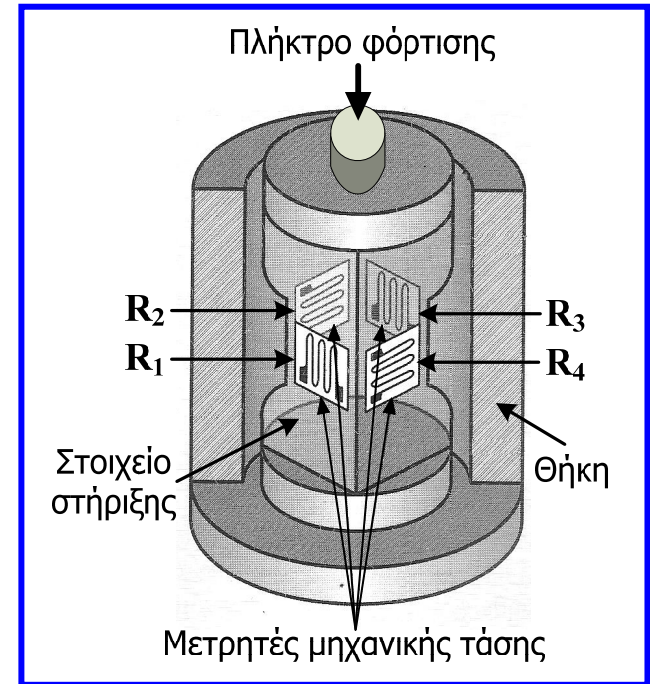


Μέτρηση βάρους

- Το βάρος ενός σώματος ή ουσίας ισούται με τη μάζα του/ης επί την επιτάχυνση της βαρύτητας (g).
- Συχνά είναι πιο εύκολο να μετράμε το **βάρος** ενός σώματος ή μιας ουσίας και στη συνέχεια από το αποτέλεσμα να προσδιορίζουμε άλλες παραμέτρους, όπως είναι ο **όγκος** και η **στάθμη**.
- Συνηθέστερες συσκευές (αισθητήρες) που μετρούν βάρος (δύναμη) και μπορούν να αξιοποιηθούν έτσι ώστε να λαμβάνεται σήμα τάσης στην έξοδό τους:
 - ✓ **Κυψελίδα φόρτισης (load cell)** που χρησιμοποιεί μετρητές μηχανικής τάσης.
 - ✓ **Ζυγός ελατηρίου** που βασίζεται στο νόμο του Hooke, ο οποίος δηλώνει ότι η επιμήκυνση ενός ελατηρίου είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης δύναμης (μηχανικής τάσης).

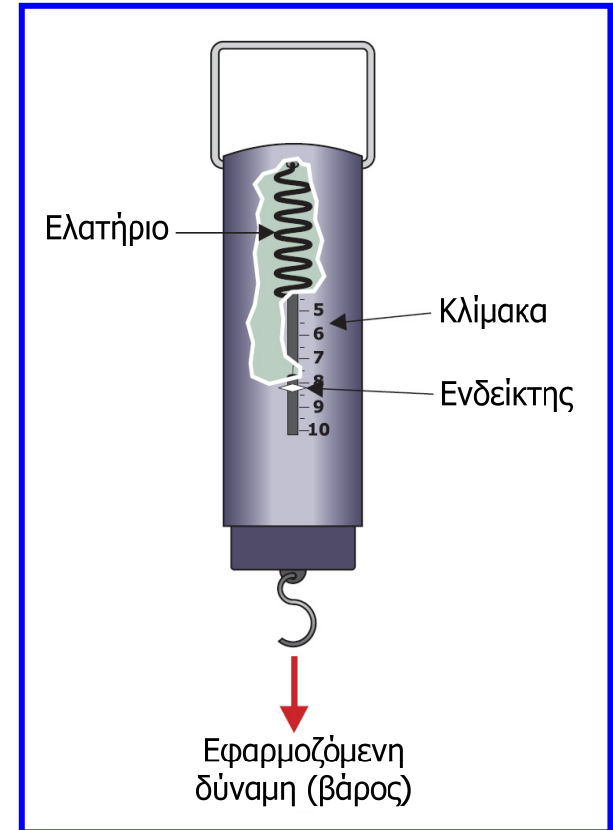
Κυψελίδα φόρτισης

- Είναι συσκευή που **χρησιμοποιεί μετρητές μηχανικής τάσης** για να προσδιορίσει το βάρος ενός σώματος ή την τιμή μίας άγνωστης δύναμης.
- Μία κυψελίδα φόρτισης χρησιμοποιεί τέσσερις μετρητές μηχανικής τάσης, οι οποίοι είναι προσκολλημένοι στο ελαστικό στοιχείο στήριξης φορτίου, το οποίο δέχεται το βάρος ή τη δύναμη.
- Όταν το στοιχείο στήριξης βρίσκεται υπό μηχανική τάση, τότε προκαλείται μεταβολή των αντιστάσεων κάποιων μετρητών μηχανικής τάσης, ανάλογα με τον προσανατολισμό της τοποθέτησής τους (**Άσκηση 16^η**).
- Οι μετρητές μηχανικής τάσης συνδέονται σε **γέφυρα Wheatstone**.
- Η τιμή της τάσης στην έξοδο της γέφυρας σχετίζεται με το μέγεθος του εφαρμοζόμενου φορτίου.
- **Χρήσεις:** μέτρηση βάρους υλικών σε κάδους, οχημάτων σε πλαστιγγες, στάθμης και όγκου υγρών σε δεξαμενές.
- Ακριβής, ευέλικτη, σχετικά φθηνή, με υψηλή επαναληψιμότητα και για χρήση σε ευρύ φάσμα φορτίων.



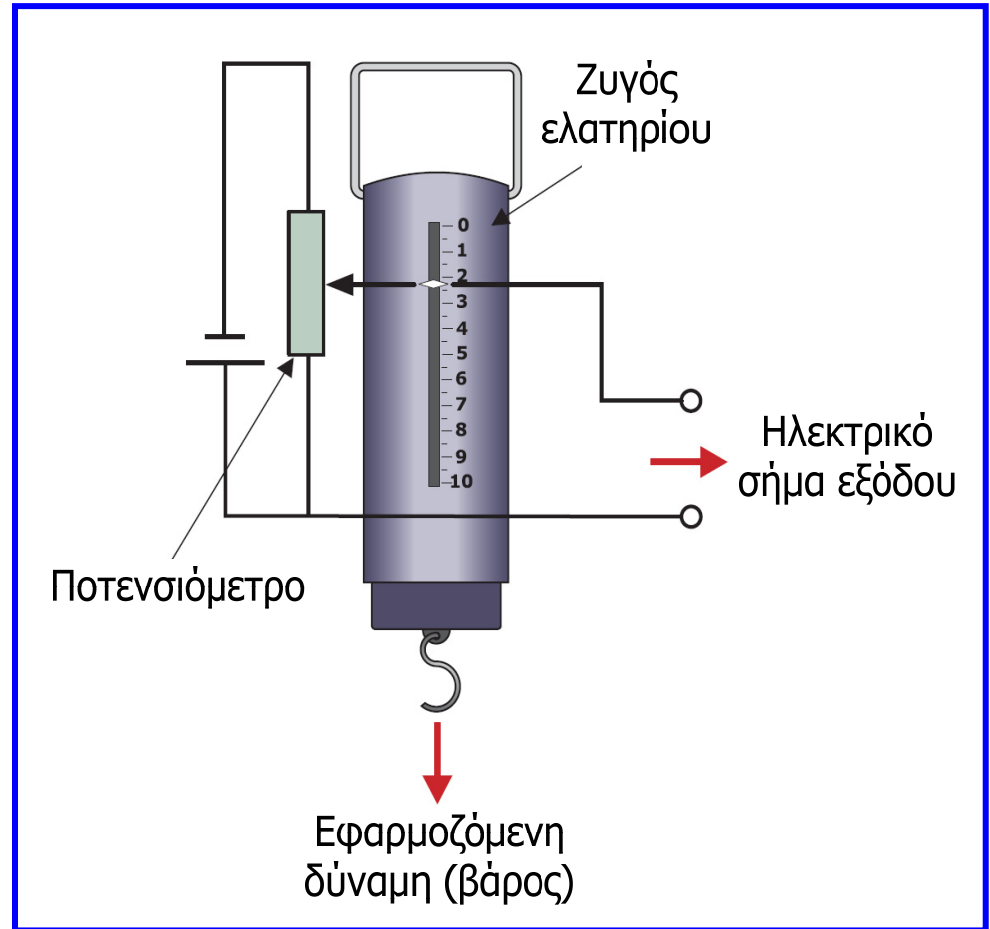
Ζυγός ελατηρίου

- Το ελατήριο είναι στερεωμένο στο ανώτερο σημείο του και επιμηκύνεται λόγω της εφαρμοζόμενης δύναμης ή βάρους W_x .
- Σύμφωνα με το **νόμο του Hooke**, η **επιμήκυνση** του **ελατηρίου** είναι **ανάλογη** της **δύναμης** που εφαρμόζεται ($F = K \cdot \Delta l$) και αυτό μας επιτρέπει να βαθμονομήσουμε την κλίμακα σε μονάδες δύναμης (N) ή μονάδες μάζας (kg).
- Δεν επιτυγχάνεται υψηλή ακρίβεια, αλλά η μέτρηση είναι γρήγορη και εύκολη.
- Το εύρος μέτρησης καθορίζεται από το υλικό, το πάχος, τη διάμετρο και το μήκος του ελατηρίου.
- Η μέγιστη τιμή που μπορεί να μετρηθεί εξαρτάται από το **όριο ελαστικότητας** του ελατηρίου, δηλ. την τιμή της εφαρμοζόμενης δύναμης για την οποία το ελατήριο παύει να υπακούει στο νόμο του Hooke.



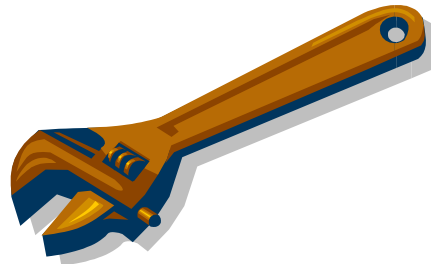
Ζυγός ελατηρίου

- Συνδυάζοντας το ζυγό ελατηρίου με ένα **γραμμικό ποτενσιόμετρο**, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα ηλεκτρικό σήμα εξόδου, το οποίο να είναι ανάλογο του εφαρμοζόμενου φορτίου.
- Ο ζυγός μετατρέπει την εφαρμοζόμενη δύναμη σε μετατόπιση και το ποτενσιόμετρο μετατρέπει τη μετατόπιση σε ηλεκτρική τάση (**Άσκηση 14^η**).
- Η μέθοδος αυτή παρέχει **λήψη μετρήσεων** μάζας, δύναμης, στάθμης και όγκου **από απόσταση** με χαμηλό κόστος.



Συμπεράσματα

- Μελετήσαμε την κίνηση και τις διάφορες συσκευές και τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρησή της.
- Η μέτρηση της κίνησης ποσοτικοποιείται με τη μέτρηση παραμέτρων όπως η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση.
- Σημαντικές σχετικές συσκευές αποτελούν οι αισθητήρες προσέγγισης και οι μετρητές μηχανικής τάσης.
- Οι πιο βασικές συσκευές μέτρησης κίνησης είναι: ωρολογιακό μικρόμετρο, γραμμικό ποτενσιόμετρο, γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (LVDT) και πυκνωτής μεταβλητού εμβαδού για μέτρηση γραμμικής μετατόπισης, περιστροφικό ποτενσιόμετρο, οπτικοί κωδικοποιητές και ταχυμετρικές γεννήτριες που σχετίζονται με τη μέτρηση γωνιακής μετατόπισης, μικροδιακόπτες, αισθητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, ανιχνευτής φαινομένου Hall και οπτικοί αισθητήρες προσέγγισης, επιταχυνσιόμετρα σεισμικής μάζας και πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα και τέλος ο μετρητής μηχανικής τάσης μέσω μεταβολής αντίστασης και γέφυρας.
- Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί και για τη μέτρηση βάρους ή δύναμης όπως η κυψελίδα φόρτισης και οι ζυγοί ισορροπίας και ελατηρίου.



Ερωτήσεις και ασκήσεις 6^{ης} ενότητας

Ερώτηση 1^η

Σε ποιες περιπτώσεις η χρήση γραμμικού ποτενσιόμετρου είναι προτιμότερη από τη χρήση LVDT;

Τα γραμμικά ποτενσιόμετρα παρέχουν ηλεκτρικό σήμα εξαρτώμενο από τη μετατόπιση, με χαμηλό κόστος και χωρίς εξαιρετική ακρίβεια κυρίως λόγω του ότι η κινητή επαφή και η αντίσταση υπόκεινται σε μηχανική φθορά.

Από την άλλη πλευρά οι LVDT παρουσιάζουν υψηλότερη ακρίβεια (σφάλμα $\pm 0.5 \%$) επειδή ο πυρήνας δεν βρίσκεται σε επαφή με τα πηνία, με αποτέλεσμα πολύ μικρή μηχανική τριβή και φθορά. Επίσης, έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία και διακριτική ικανότητα ως 0.05 mm, χρησιμοποιούνται για μέτρηση μετατόπισης έως 300 mm και κοστίζουν περισσότερο.

Σε εφαρμογές λοιπόν όπου επιβάλλεται μικρό κόστος και δεν απαιτείται πολύ υψηλή ακρίβεια (όπως η καταγραφή της θέσης των αντικειμένων σε μία γραμμή παραγωγής) ενδείκνυται η χρήση γραμμικών ποτενσιόμετρων.

Οι LVDT χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγαλύτερης ακρίβειας όπως: μηχανουργεία, ρομποτική, συστήματα μέτρησης δύναμης, πίεσης και επιτάχυνσης.

Ερώτηση 2^η

Σε ποιες περιπτώσεις είναι προτιμότερη η χρήση αισθητήρων φαινομένου Hall από τη χρήση αισθητήρων προσέγγισης μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης;

Οι αισθητήρες φαινομένου Hall έχουν δυνατότητα ανίχνευσης ασθενών μαγνητικών πεδίων, ενώ οι αισθητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης πρέπει να τοποθετούνται πολύ κοντά στο σημείο μέτρησης ώστε να παραχθεί υπολογίσιμη τάση εξόδου.

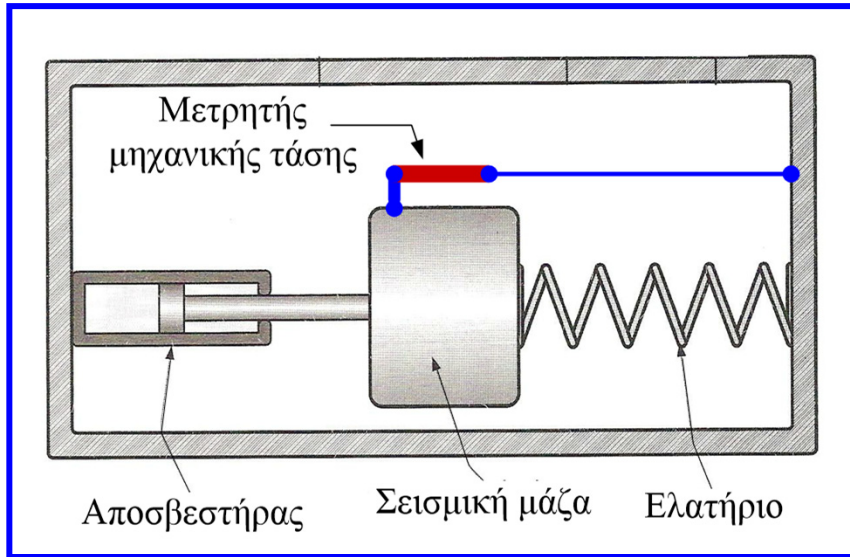
Επίσης, οι αισθητήρες φαινομένου Hall λειτουργούν με καλύτερη ακρίβεια σε περιβάλλοντα με ισχυρά σήματα θορύβου.

Από την άλλη πλευρά, οι αισθητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης λειτουργούν καλύτερα σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και έχουν μικρότερο κόστος.

Επομένως, σε βιομηχανικά περιβάλλοντα όπου η παρουσία σημάτων θορύβου είναι σημαντική και σε εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας, χωρίς εύκολη πρόσβαση στην περιοχή ανίχνευσης, είναι προτιμότερη η χρήση αισθητήρων προσέγγισης φαινομένου Hall.

Ερώτηση 3^η

Πως μπορούμε να τροποποιήσουμε το επιταχυνσιόμετρο σεισμικής μάζας ώστε να χρησιμοποιεί μετρητή μηχανικής τάσης;



Στην πράξη, η μετατόπιση της μάζας στα επιταχυνσιόμετρα σεισμικής μάζας μετριέται με γραμμικό ποτενσιόμετρο ή LVDT.

Μπορούμε όμως να στερεώσουμε το ένα άκρο ενός μετρητή μηχανικής τάσης (μη προσκολλημένου) στη σεισμική μάζα και το άλλο του άκρο στο πλαίσιο της διάταξης, με αποτέλεσμα κατά την επιτάχυνση της διάταξης προς τα δεξιά, η σεισμική μάζα να μετατοπίζεται προς τα αριστερά και ο μετρητής μηχανικής τάσης να εφελκύεται.

Η μετατόπιση της σεισμικής μάζας είναι ανάλογη με την αλλαγή αντίστασης του μετρητή μηχανικής τάσης, η οποία μπορεί να μετατραπεί σε μετρήσιμη ηλεκτρική τάση εάν ο μετρητής συνδεθεί σε γέφυρα.

$$G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} \Rightarrow \Delta l = \frac{l \cdot \Delta R}{R \cdot G}$$

$$\alpha = \frac{\Delta l \cdot K}{m}$$

Ερώτηση 4^η

Όταν χρησιμοποιείται απόλυτη οπτική κωδικοποίηση για τη μέτρηση γωνιακής μετατόπισης, ποιο πλεονέκτημα παρουσιάζει η χρήση κώδικα Gray σε σχέση με τον κλασσικό δυαδικό κώδικα;

Μειονέκτημα της χρήσης του κλασσικού δυαδικού κώδικα αποτελεί το ότι μία αύξηση της μετατόπισης μπορεί να προκαλέσει ταυτόχρονη αλλαγή κατάστασης σε περισσότερα από ένα παράθυρα.

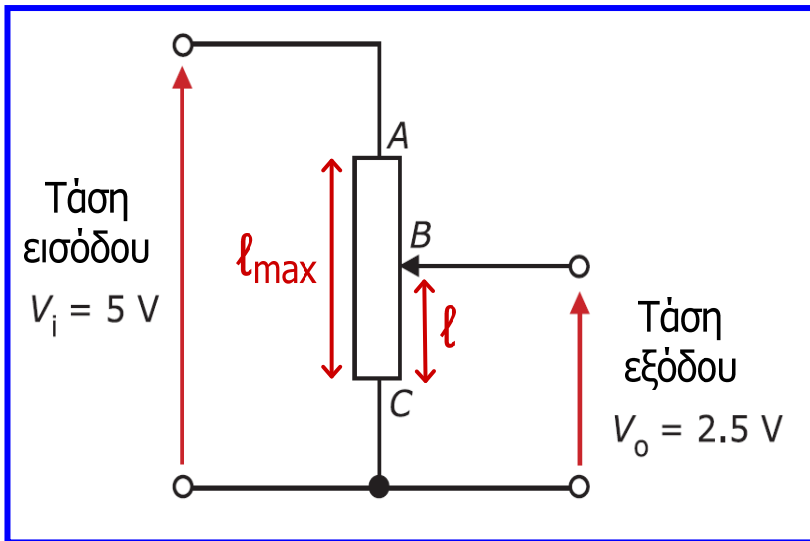
Για παράδειγμα από τον αριθμό 0011 οδηγούμαστε στον 0100 όπου αλλάζουν κατάσταση 3 παράθυρα.

Επομένως, εάν αναγνωστεί λάθος κάποιο παράθυρο θα προκληθούν σημαντικά σφάλματα στον προσδιορισμό της θέσης του άξονα.

Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιείται ο κώδικας Gray που απεικονίζει τους δεκαδικούς αριθμούς με τέτοια δυαδική μορφή, έτσι ώστε από κάποιον αριθμό στον επόμενο να αλλάζει μόνο ένα bit (δηλαδή μόνο ένα παράθυρο), με αποτέλεσμα περιορισμό του σφάλματος μέτρησης.

Άσκηση 1^η

Σε γραμμικό ποτενσιόμετρο με αντίσταση συνολικού μήκους 100 mm, εφαρμόζεται τάση εισόδου 5 V και η τάση εξόδου είναι 2.5 V όταν η κινητή επαφή βρίσκεται στο μέσο της αντίστασης του. Εάν η γραμμική μετατόπιση ενός αντικειμένου αναγκάζει την κινητή επαφή να κινηθεί έτσι ώστε η τάση εξόδου να γίνει 2.65 V, να προσδιορίσετε τη μετατόπιση του αντικειμένου και την κατεύθυνση προς την οποία κινήθηκε.



$$R = \frac{\rho \cdot \ell}{A} \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC}} = \frac{R_{BC}}{R_{AC}} = \frac{\ell}{\ell_{\max}} \quad (1)$$

$$\frac{V_o + \Delta V_o}{V_i} = \frac{\ell + \Delta \ell}{\ell_{\max}} \quad (2)$$

$$V_i = 5 \text{ V}, \quad \ell_{\max} = 100 \text{ mm}, \quad \ell = 50 \text{ mm} \\ \Delta V_o = 2.65 - 2.5 = 0.15 \text{ V}$$

$$(2) - (1) \Rightarrow \frac{\Delta V_o}{V_i} = \frac{\Delta \ell}{\ell_{\max}} \Rightarrow \Delta \ell = \frac{\ell_{\max} \cdot \Delta V_o}{V_i} = 3 \text{ mm}$$

Εφόσον η τάση εξόδου αυξήθηκε, η μετατόπιση $\Delta \ell$ έγινε προς το σημείο A.

Άσκηση 2^η

Ένας μετρητής μηχανικής τάσης που έχει αντίσταση 250Ω και παράγοντα $G = 2.2$, στερεώνεται ακλόνητα σε αντικείμενο. Να προσδιορίσετε την αλλαγή της αντίστασης του μετρητή εάν αυτός υφίσταται μηχανική τάση εφελκυσμού $450 \mu\epsilon$ (microstrains). Επίσης, εάν το πηλίκο της αλλαγής (μεταβολής) της αντίστασης του μετρητή προς την αλλαγή του μήκους του αντικειμένου λόγω της εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης είναι $0.05 \Omega/\text{mm}$, να προσδιορίσετε την αλλαγή του μήκους του αντικειμένου.

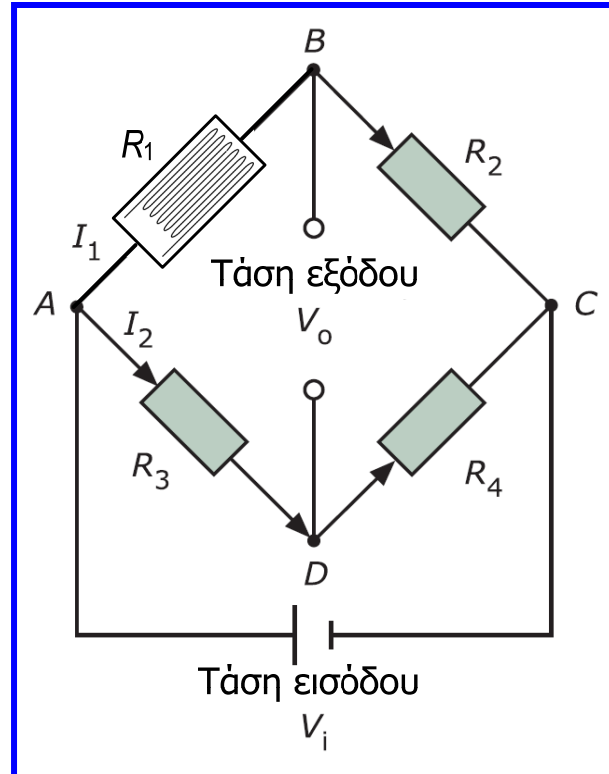
$$R = 250 \Omega, \quad G = 2.2, \quad \epsilon = 450 \mu\epsilon = 450 \cdot 10^{-6}$$

$$G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad \epsilon = \frac{\Delta l}{l} \Rightarrow G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\epsilon} \Rightarrow G \cdot \epsilon = \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow \Delta R = G \cdot \epsilon \cdot R \Rightarrow \Delta R = 0.2475 \Omega$$

$$\frac{\Delta R}{\Delta l} = 0.05 \frac{\Omega}{\text{mm}} \Rightarrow \Delta l = \frac{\Delta R}{0.05 \frac{\Omega}{\text{mm}}} \Rightarrow \Delta l = \frac{0.2475 \Omega}{0.05 \frac{\Omega}{\text{mm}}} \Rightarrow \Delta l = 4.95 \text{ mm}$$

Άσκηση 3^η

Μετρητής μηχανικής τάσης με αντίσταση $R_1 = 200 \Omega$ και παράγοντα $G = 1.9$ συνδέεται σε γέφυρα Wheatstone. Οι υπόλοιπες αντιστάσεις της γέφυρας (R_2, R_3, R_4) είναι σταθερές με τιμή 200Ω . Εάν ο μετρητής μηχανικής τάσης υφίσταται τάση εφελκυσμού $400 \mu\text{e}$, να προσδιορίσετε τη μεταβολή της αντίστασης (ΔR_1) του μετρητή και εάν η τάση εισόδου της γέφυρας είναι 4 V να προσδιορίσετε την αντίστοιχη μεταβολή της τάσης εξόδου της γέφυρας.



Άσκηση 3^η

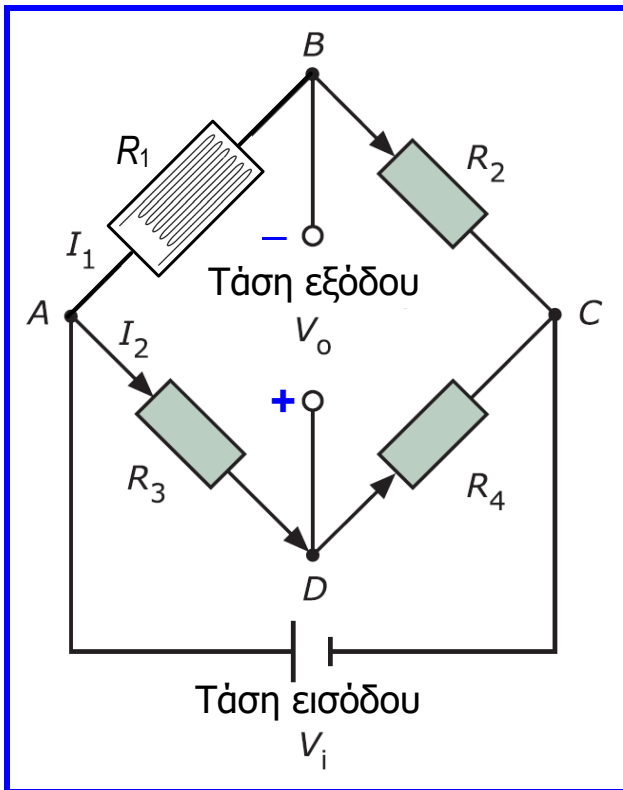
$$R_1 = R_2 =$$

$$R_3 = R_4 = 200 \Omega,$$

$$G = 1.9, \varepsilon = 400 \mu\text{ε}$$

$$= 400 \cdot 10^{-6}$$

$$G = \frac{\Delta R_1}{\frac{R_1}{1}} \stackrel{\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}}{\Rightarrow} G = \frac{\Delta R_1}{\varepsilon} \Rightarrow \Delta R_1 = G \cdot \varepsilon \cdot R_1 \Rightarrow \Delta R_1 = 0.152 \Omega$$



$$V_o = V_{R_1} - V_{R_3} \Rightarrow V_o = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_3$$

$$\Rightarrow V_o = \left(\frac{V_i}{R_1 + R_2} \right) \cdot R_1 - \left(\frac{V_i}{R_3 + R_4} \right) \cdot R_3$$

$$\Rightarrow V_o = V_i \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

$$V_o + \Delta V_o = V_i \cdot \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

Άσκηση 3^η

Αφαιρούμε τις δύο προηγούμενες σχέσεις κατά μέλη:

$$\Delta V_o = V_i \cdot \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow$$

$$\Delta V_o \approx V_i \cdot \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow$$

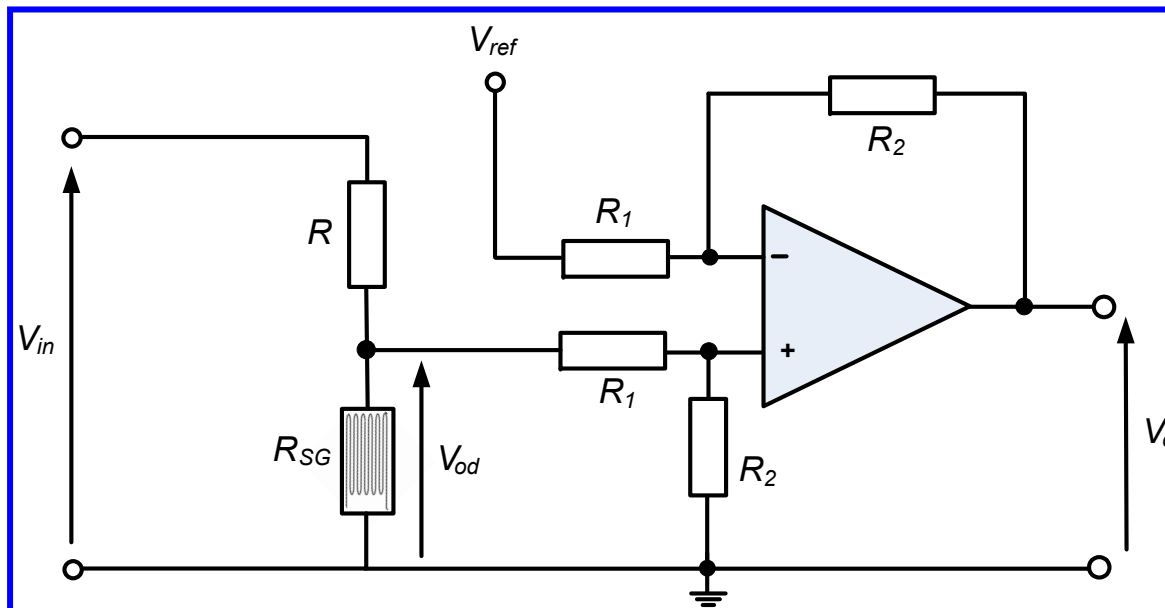
$$\Delta V_o \approx V_i \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow \Delta V_o = 4 \cdot \left(\frac{0.152}{200 + 200} \right) \Rightarrow$$

$$\Delta V_o = 0.00152 \text{ V} = 1.52 \text{ mV}$$

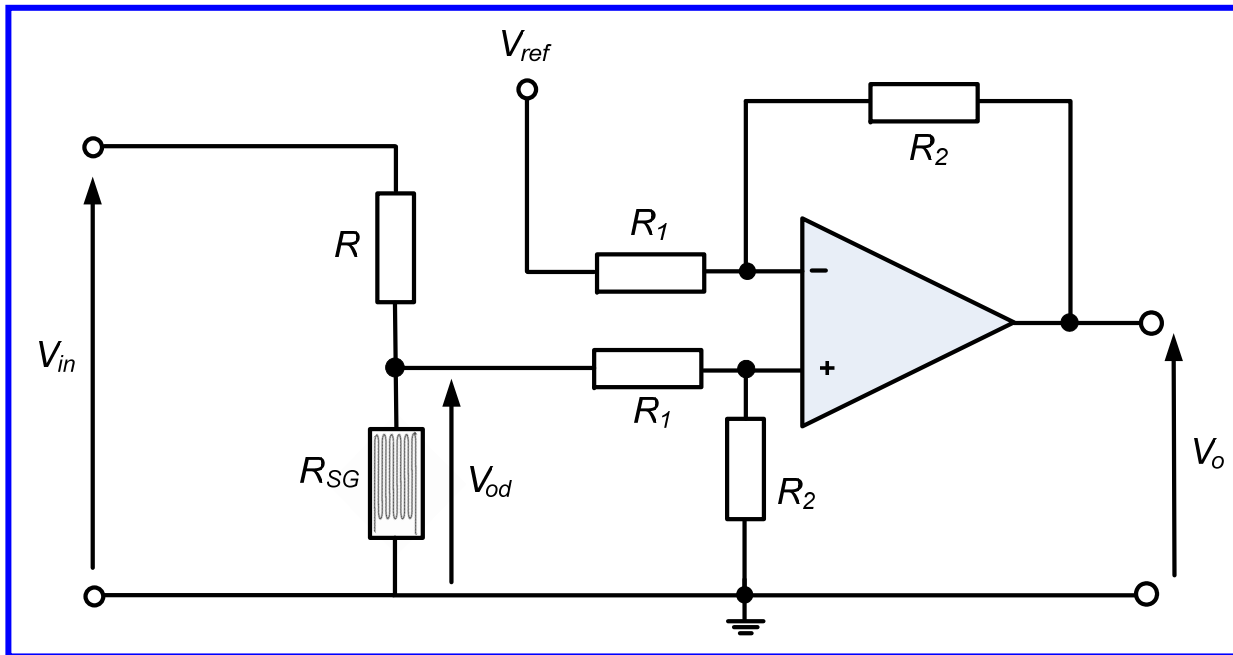
Άσκηση 4η

Μετρητής μηχανικής τάσης με αντίσταση $R_{SG} = 200 \Omega$ και παράγοντα $G = 2.2$ συνδέεται σε διαιρέτη τάσης. Η τάση εισόδου (V_{in}) είναι $10 V$ και η δεύτερη αντίσταση του διαιρέτη είναι $R = 200 \Omega$. Η έξοδος του διαιρέτη τάσης συνδέεται στη μία από τις εισόδους ενός ενισχυτή διαφοράς που περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή.

Η άλλη είσοδος του ενισχυτή διαφοράς συνδέεται σε τάση αναφοράς $V_{ref} = 2 V$. Οι αντιστάσεις του ενισχυτή διαφοράς είναι $R_1 = 20 k\Omega$ και $R_2 = 100 k\Omega$. Εάν ο μετρητής μηχανικής τάσης δεν υφίσταται εφελκυσμό ή συμπίεση, υπολογίστε την τάση εξόδου V_o . Εάν ο μετρητής μηχανικής τάσης υφίσταται τάση εφελκυσμού $3000 \mu\epsilon$, υπολογίστε τη μεταβολή της τάσης εξόδου.



Άσκηση 4^η



Επειδή η αντίσταση R_1 που αποτελεί το φορτίο του διαιρέτη τάσης είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση του μετρητή μηχανικής τάσης, **το ρεύμα που κατευθύνεται προς την έξοδο του διαιρέτη τάσης είναι αμελητέο, οπότε:**

$$V_{in} = V_{R_{SG}} + V_R = I \cdot R_{SG} + I \cdot R$$

$$V_{od} = V_{R_{SG}} = I \cdot R_{SG}$$

$$I = \frac{V_{in}}{R_{SG} + R}$$

$$\frac{V_{od}}{V_{in}} = \frac{R_{SG}}{R_{SG} + R} \Rightarrow V_{od} = V_{in} \cdot \left(\frac{R_{SG}}{R_{SG} + R} \right) \Rightarrow V_{od} = 10 \cdot \left(\frac{200}{200 + 200} \right) \Rightarrow V_{od} = 5V$$

Άσκηση 4^η

Στην ενότητα 4 αποδείξαμε ότι στον ενισχυτή διαφοράς ισχύει:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_{in2} - V_{in1}) \Rightarrow V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_{od} - V_{ref}) \Rightarrow$$
$$V_o = \frac{100}{20} \cdot (5 - 2) \text{ V} \Rightarrow V_o = 15 \text{ V}$$

Υπολογίζουμε τη μεταβολή αντίστασης του μετρητή μηχανικής τάσης όταν δέχεται τάση εφελκυσμού 3000 με:

$$G = \frac{\frac{\Delta R_{SG}}{R_{SG}}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \Rightarrow G = \frac{\Delta R_{SG}}{R_{SG} \cdot \varepsilon} \Rightarrow \Delta R_{SG} = G \cdot \varepsilon \cdot R_{SG} \Rightarrow \Delta R_{SG} = 1.32 \Omega$$

Άσκηση 4^η

$$V'_{od} = V_{in} \cdot \left(\frac{R_{SG} + \Delta R_{SG}}{R_{SG} + \Delta R_{SG} + R} \right) \Rightarrow V'_{od} = 10 \cdot \left(\frac{201.32}{201.32 + 200} \right) \Rightarrow V'_{od} = 5.016 \text{ V}$$

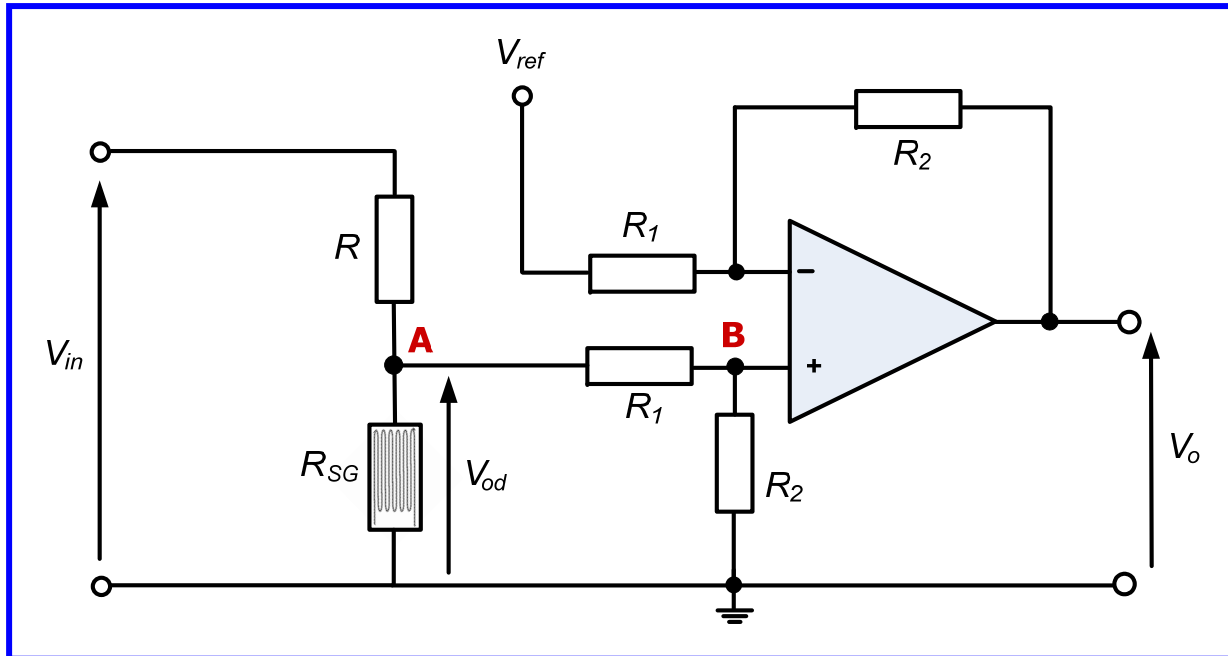
$$V'_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V'_{od} - V_{ref}) \Rightarrow$$

$$V'_o = \frac{100}{20} \cdot (5.016 - 2) \text{ V} \Rightarrow V'_o = 15.08 \text{ V}$$

$$\Delta V_o = V'_o - V_o \Rightarrow \Delta V_o = 0.08 \text{ V} = 80 \text{ mV}$$

Άσκηση 4^η

Εάν επιθυμούμε να λάβουμε υπόψη και το ρεύμα που κατευθύνεται προς την έξοδο του διαιρέτη τάσης, τότε αναλύουμε το κύκλωμα στο σύνολό του:



Οι αντιστάσεις R_1 και R_2 που συνδέονται στον κόμβο B δημιουργούν διαιρέτη τάσης από τον οποίο προκύπτει:

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{od} \Rightarrow$$
$$V_+ = 0.833 \cdot V_{od}$$

(1)

Αναλύοντας τον κόμβο A λαμβάνουμε:

$$\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{SG}} + \frac{1}{R_1} \right) V_{od} = \frac{V_{in}}{R} + \frac{V_+}{R_1} \quad (2)$$

Άσκηση 4^η

(1)
(2) \Rightarrow

$$\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{SG}} + \frac{1}{R_1} \right) V_{od} = \frac{V_{in}}{R} + \frac{V_+}{R_1} \Rightarrow$$

$$0.01005 \cdot V_{od} = 0.005 \cdot V_{in} + \frac{0.833 \cdot V_{od}}{20000} \Rightarrow$$

$$0.01005 \cdot V_{od} = 0.005 \cdot V_{in} + 0.00004165 \cdot V_{od} \Rightarrow$$

$$0.01000835 \cdot V_{od} = 0.005 \cdot V_{in} \Rightarrow$$

$$V_{od} = 0.4996 \cdot V_{in} = 4.996 V$$

Σφάλμα:
0.08 %

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_{od} - V_{ref}) \Rightarrow V_o = \frac{100}{20} \cdot (4.996 - 2) V \Rightarrow V_o = 14.98 V$$

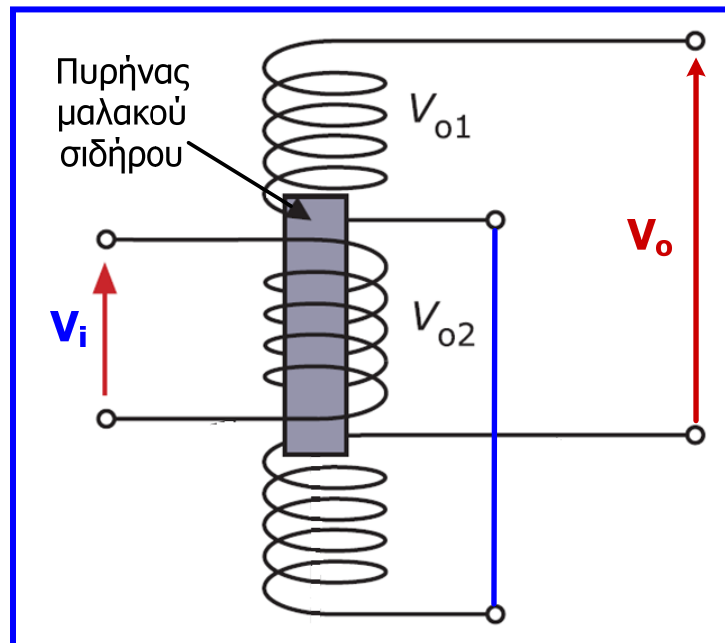
Σφάλμα:
0.13 %

Αντίστοιχα πολύ μικρό σφάλμα προκύπτει και για την V'_o

Άσκηση 5η

Η ευαισθησία ενός LVDT είναι 4.15 V/cm και για να γίνει μέγιστη η σύζευξη στο ένα δευτερεύον και να μηδενιστεί στο άλλο, απαιτείται μετακίνηση του πυρήνα του κατά 1.25 cm .

- (α) Να υπολογιστεί η μετατόπιση του πυρήνα όταν το πλάτος της τάσης εξόδου είναι 2.7 V .
- (β) Να υπολογιστεί το πλάτος της τάσης εξόδου όταν η μετατόπιση του πυρήνα είναι 0.65 cm με κατεύθυνση προς τα πάνω.
- (γ) Να σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου ως προς τη μετατόπιση του πυρήνα, από τη θέση του πυρήνα 0.75 cm πάνω από τη θέση όπου η τάση εξόδου είναι 0 έως τη θέση του πυρήνα 1 cm κάτω από τη θέση όπου η τάση εξόδου είναι 0 .



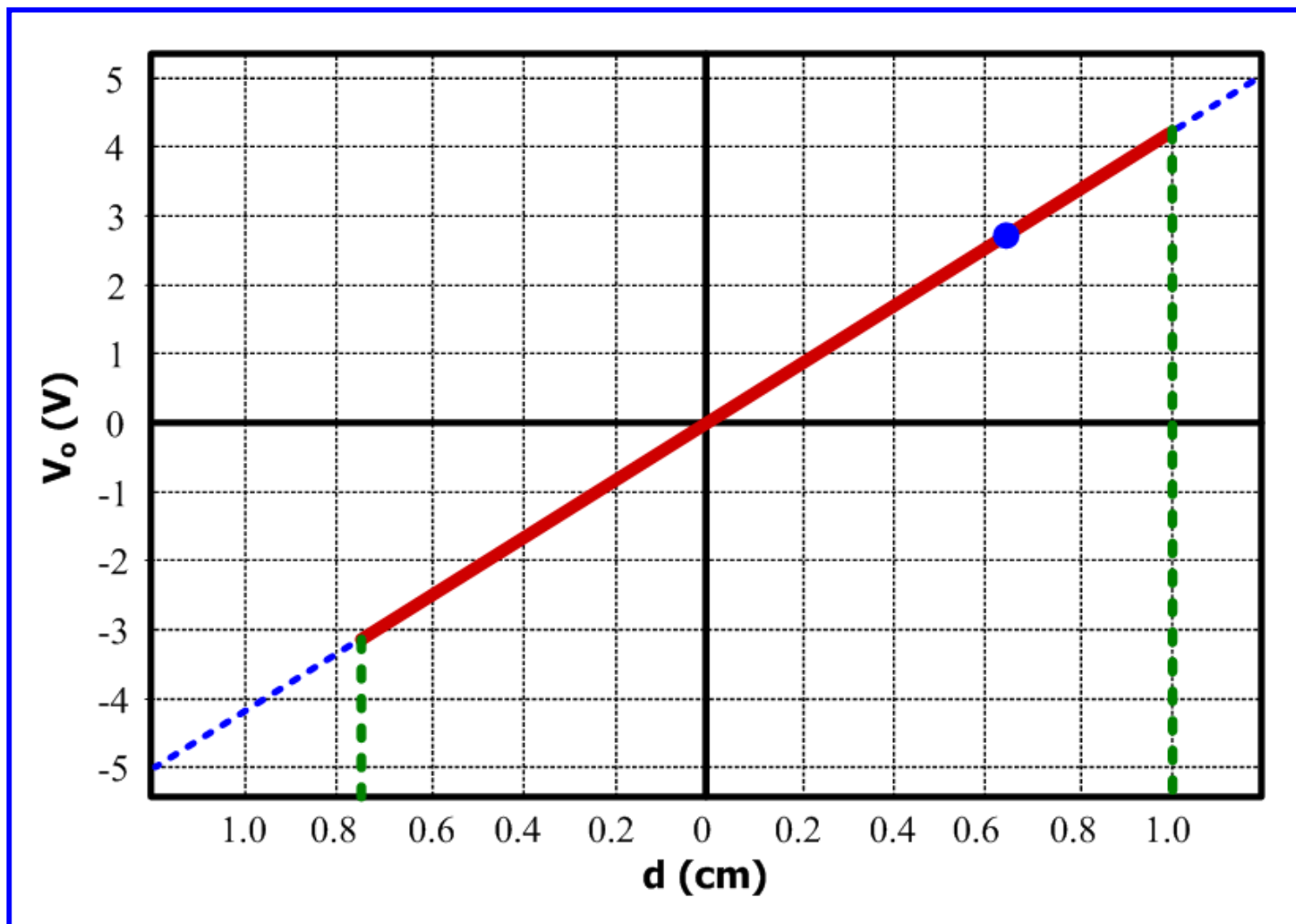
Άσκηση 5η

- (α) Η ευαισθησία του LVDT δίνεται από τη σχέση $s = V_o / d$, και αφού το πλάτος της τάσης εξόδου είναι 2.7 V και η ευαισθησία 4.15 V/cm, προκύπτει εύκολα ότι η μετατόπιση του πυρήνα στην περίπτωση αυτή είναι: $d = V_o / s = (2.7 / 4.15) \text{ cm} = 0.65 \text{ cm}$ και αφού η τάση εξόδου έχει θετικό πρόσημο (δηλαδή είναι συμφασική με την τάση εισόδου), η μετατόπιση του πυρήνα είναι προς τα κάτω.
- (β) Ομοίως προκύπτει ότι όταν ο πυρήνας μετατοπίζεται προς τα πάνω κατά 0.65 cm, η τάση εξόδου του LVDT θα είναι αρνητική (δηλαδή με διαφορά φάσης 180° σε σχέση με την τάση εισόδου) με τιμή $V_o = -2.7 \text{ V}$.

Παρατηρούμε ότι αφού η μετακίνηση και στις δύο περιπτώσεις που εξετάσαμε είναι μικρότερη από 1.25 cm, το πλάτος της τάσης εξόδου δεν έχει φθάσει τη μέγιστη τιμή του, η οποία είναι: $V_{o-\max} = s \cdot d = (4.15 \cdot 1.25) \text{ V} = 5.19 \text{ V}$.

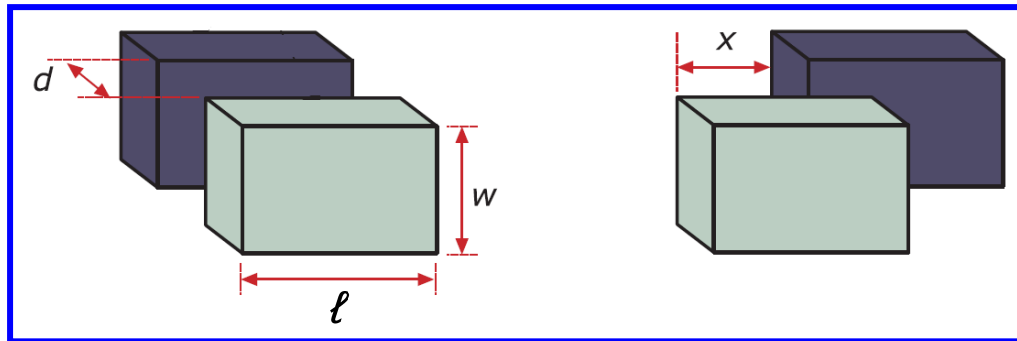
- (γ) Η ευαισθησία του LVDT είναι η κλίση της γραφικής παράστασης της τάσης εξόδου ως προς τη μετατόπιση του πυρήνα, συνεπώς σχεδιάζοντας την ευθεία $V_{o-\max} = s \cdot d$, μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε τη γραφική παράσταση για τα ζητούμενα όρια μετατόπισης (αφού κανένα από αυτά δεν ξεπερνά τη μετατόπιση του 1.25 cm).

Άσκηση 5η



Άσκηση 6^η

Οι δύο παράλληλοι αγώγιμοι οπλισμοί (πλάκες) ενός πυκνωτή έχουν ο καθένας πλάτος $w = 0.1 \text{ m}$, μήκος $\ell = 0.5 \text{ m}$ και η μεταξύ τους απόσταση είναι $d = 0.1 \text{ m}$. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) του διηλεκτρικού υλικού του πυκνωτή είναι 1 και η διηλεκτρική σταθερά του αέρα (ϵ_o) είναι $8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$. Να προσδιορίσετε τη χωρητικότητα του πυκνωτή και εάν ο ένας οπλισμός κινηθεί οριζόντια κατά $x = 50 \text{ mm}$, να προσδιορίσετε τη νέα τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή.



$$w = 0.1 \text{ m}, \ell = 0.5 \text{ m}, d = 0.1 \text{ m},$$
$$\epsilon_r = 1, \epsilon_o = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m},$$
$$x = 50 \text{ mm}$$

$$C = \frac{A \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r}{d} = \frac{\ell \cdot w \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r}{d} \Rightarrow C = \frac{0.1 \cdot 0.5 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{0.1} \Rightarrow C = 4.427 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 4.427 \text{ pF}$$

$$C' = \frac{(A - w \cdot x) \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r}{d} = \frac{(\ell \cdot w - w \cdot x) \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r}{d} \Rightarrow C' = \frac{(0.05 - 0.005) \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{0.1} \Rightarrow C' = 3.984 \text{ pF}$$

Άσκηση 6η

Παρατήρηση:

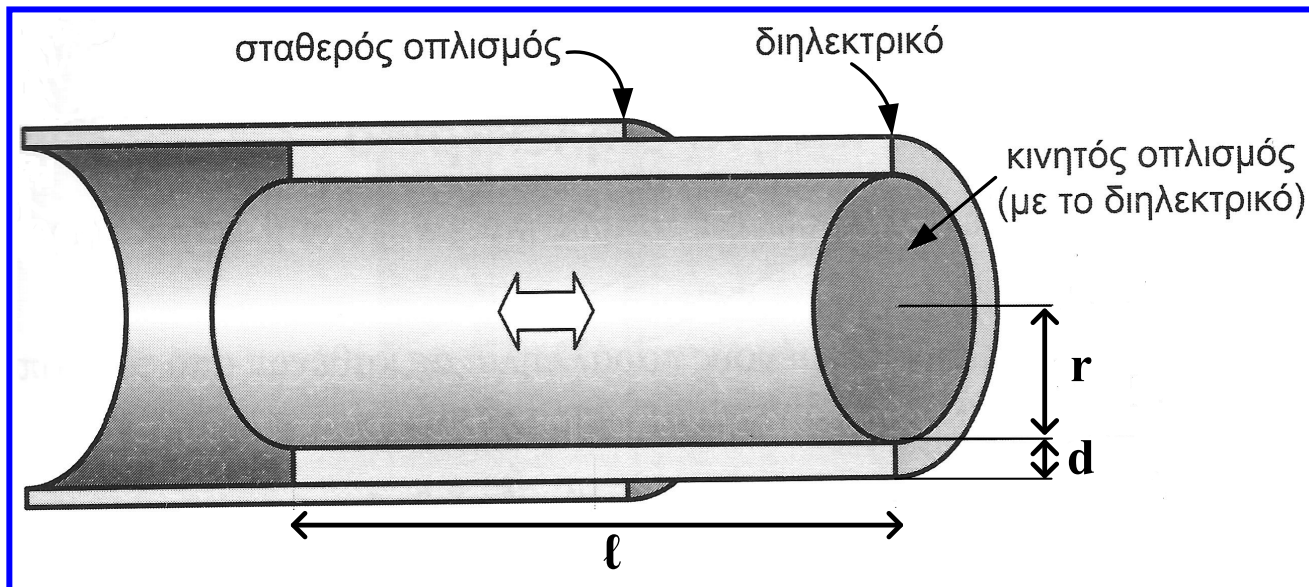
Στον επίπεδο πυκνωτή, ο τύπος υπολογισμού της χωρητικότητας, προκύπτει ως εξής:

$$C = \frac{Q}{V} \Rightarrow C = \frac{Q}{E \cdot d} \Rightarrow C = \frac{Q}{\frac{Q}{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} \cdot d \Rightarrow C = \frac{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{d}$$

όπου Q , V , E , η τάση, η ένταση ηλεκτρικού πεδίου και το φορτίο μεταξύ των οπλισμών, αντίστοιχα.

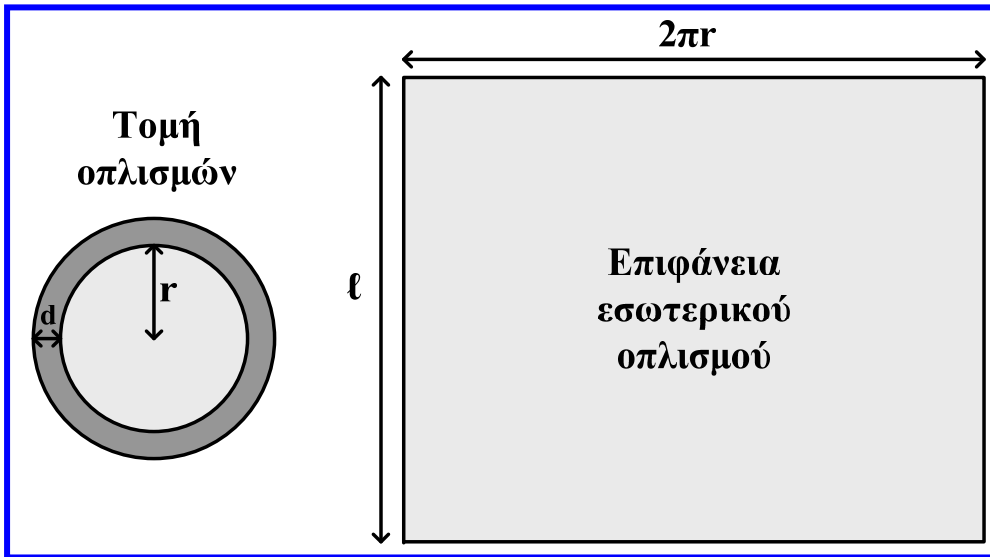
Άσκηση 7η

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται πυκνωτής με κυλινδρικούς οπλισμούς, οι οποίοι έχουν ίδιο μήκος $\ell = 0.25$ m, η μεταξύ τους απόσταση είναι $d = 0.02$ m και η ακτίνα του εσωτερικού-κινητού οπλισμού είναι $r = 0.05$ m. Να προσδιορίσετε τη μεταβολή της χωρητικότητας του πυκνωτή εάν από την κατάσταση στην οποία ο εσωτερικός οπλισμός βρίσκεται εξ' ολοκλήρου μέσα στον εξωτερικό-σταθερό οπλισμό, εξέλθει οριζόντια κατά 50 mm. Δίνεται η διηλεκτρική σταθερά του αέρα $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m και η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού $\epsilon_r = 1.15$.



Άσκηση 7η

Στην περίπτωση του κυλινδρικού πυκνωτή, η χωρητικότητα υπολογίζεται εάν η τάση μεταξύ των πυκνωτών προσδιοριστεί ως το ολοκλήρωμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ως προς την απόσταση (r) από τον άξονα των οπλισμών:



$$C = \frac{Q}{V} \Rightarrow C = \frac{Q}{\int_{r_2}^{r_1} E dr}$$

όπου r_1 , r_2 είναι οι ακτίνες του εξωτερικού και εσωτερικού οπλισμού, αντίστοιχα.

$$E = \frac{Q}{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \Rightarrow E = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$$

$$C = \frac{Q}{\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r} = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{r+d}{r}\right)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\ln\left(1 + \frac{d}{r}\right)}$$

Άσκηση 7η

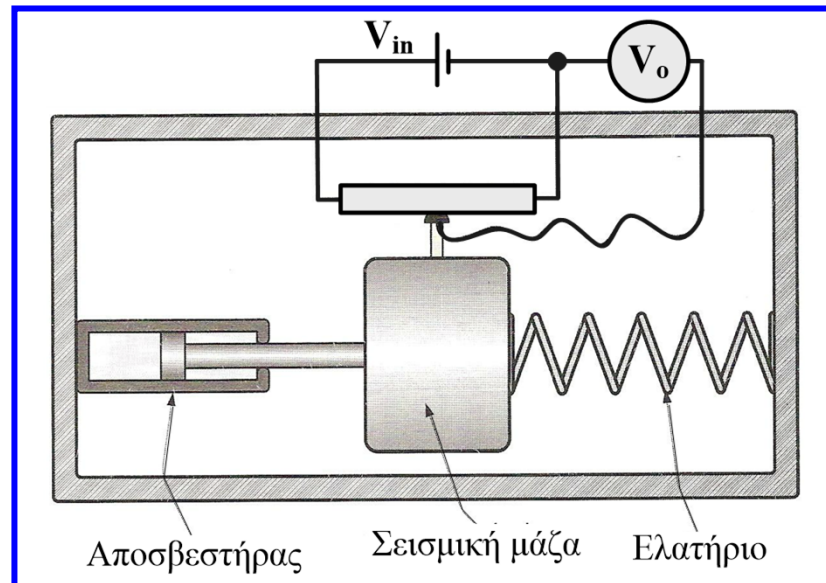
Με βάση τον τύπο που προέκυψε, η μεταβολή χωρητικότητας πριν και μετά τη μετατόπιση του κινητού οπλισμού κατά 50 mm υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \ell}{\ln\left(1 + \frac{d}{r}\right)} - \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot (\ell - 0.05)}{\ln\left(1 + \frac{d}{r}\right)} \Rightarrow$$

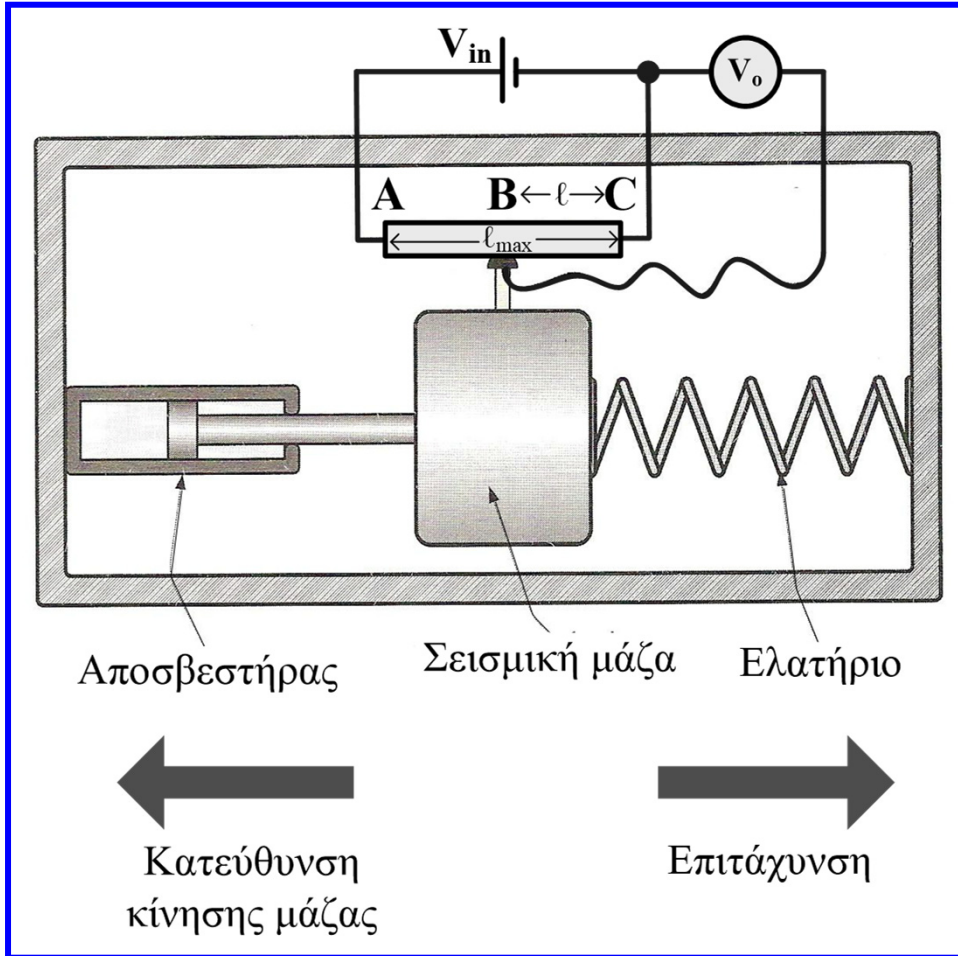
$$\Delta C = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 1.15 \cdot 0.05}{\ln\left(1 + \frac{0.02}{0.05}\right)} \Rightarrow \Delta C = 9.5 \text{ pF}$$

Άσκηση 8^η

Σε επιταχυνσιόμετρο σεισμικής μάζας συνδέεται κατάλληλα ένα γραμμικό ποτενσιόμετρο για τη μέτρηση της μετατόπισης της σεισμικής μάζας. Το ποτενσιόμετρο αυτό διαθέτει αντίσταση συνολικού μήκους 200 mm, τάση εισόδου 5 V και τάση εξόδου 2.5 V όταν η κινητή επαφή βρίσκεται στο μέσο της αντίστασης του. Εάν μια μετατόπιση της σεισμικής μάζας προκαλέσει μετακίνηση της κινητής επαφής του ποτενσιόμετρου τέτοια ώστε η τάση εξόδου του να γίνει 2.75 V, να προσδιορίσετε τη μετατόπιση αυτή της σεισμικής μάζας. Επίσης να προσδιορίσετε την αντίστοιχη επιτάχυνση της σεισμικής μάζας εάν το μέγεθος της μάζας (m) είναι 0.2 kg και η σταθερά του ελατηρίου (K) στο επιταχυνσιόμετρο είναι 200 N/m.



Άσκηση 8^η



$$V_i = 5 \text{ V}, \quad \ell_{\max} = 200 \text{ mm}, \quad \ell = 100 \text{ mm}$$

$$\Delta V_o = 2.75 - 2.5 = 0.25 \text{ V}$$

$$K = 200 \text{ N/m}, \quad m = 0.2 \text{ kg}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC}} = \frac{R_{BC}}{R_{AC}} = \frac{\ell}{\ell_{\max}} \quad (1)$$

$$\frac{V_o + \Delta V_o}{V_i} = \frac{\ell + \Delta \ell}{\ell_{\max}} \quad (2)$$

$$(2) - (1) \Rightarrow$$

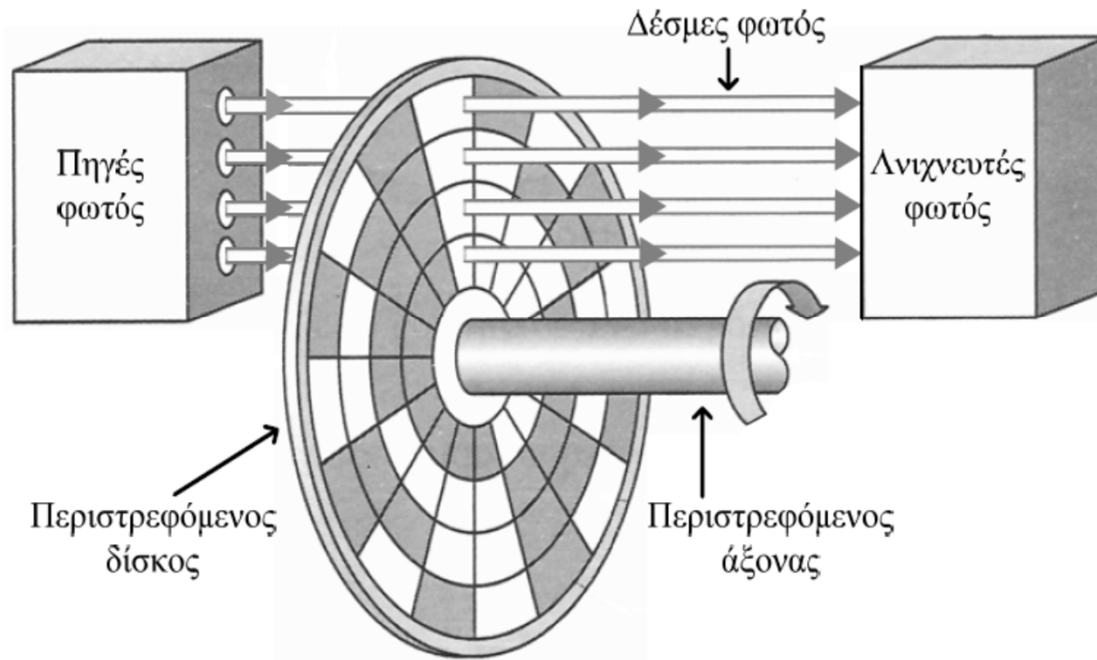
$$\frac{\Delta V_o}{V_i} = \frac{\Delta \ell}{\ell_{\max}} \Rightarrow \Delta \ell = \frac{\ell_{\max} \cdot \Delta V_o}{V_i} = 10 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{d \cdot K}{m} \Rightarrow \alpha = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 200}{0.2} = 10 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$$

Άσκηση 9η

Για τη μέτρηση της γωνίας περιστροφής ενός άξονα, χρησιμοποιούνται συσκευές που ονομάζονται απόλυτοι οπτικοί κωδικοποιητές. Ο δίσκος του απόλυτου οπτικού κωδικοποιητή του παρακάτω σχήματος, περιλαμβάνει τέσσερα (4) παράθυρα ανά τομέα, τα οποία είναι διαφανή (λευκά) ή αδιαφανή (γκρίζα).

- Να προσδιορίσετε τη διακριτική ικανότητα της συσκευής του σχήματος, σε μοίρες.
- Εάν ο δίσκος της συσκευής κατασκευαζόταν έτσι ώστε να περιλαμβάνει 10 παράθυρα ανά τομέα και 1024 τομείς, να προσδιορίσετε κατά πόσες μοίρες θα μεταβαλλόταν η διακριτική ικανότητα της συσκευής. Η μεταβολή αυτή αποτελεί βελτίωση ή επιδείνωση της διακριτικής ικανότητας της συσκευής και γιατί;



Άσκηση 9η

- (α) Στον απόλυτο οπτικό κωδικοποιητή, ένα αδιαφανές (γκρίζο) παράθυρο, αντιστοιχεί στη δυαδική τιμή 0, ενώ ένα διαφανές (λευκό) παράθυρο, αντιστοιχεί στη δυαδική τιμή 1. Στα τέσσερα παράθυρα κάθε τομέα αντιστοιχεί ένας συνδυασμός δυαδικών ψηφίων. Ο αριθμός των συνδυασμών που μπορούν να δημιουργηθούν με τέσσερα δυαδικά ψηφία είναι $2^4 = 16$, όσοι δηλαδή και οι τομείς του δίσκου της συσκευής.

Η διακριτική ικανότητα της συσκευής (δηλαδή η μικρότερη γωνία περιστροφής του άξονα που μπορεί να ανιχνεύσει η συσκευή) είναι: $360^\circ / 2^4 = 360^\circ / 16 = 22.5^\circ$.

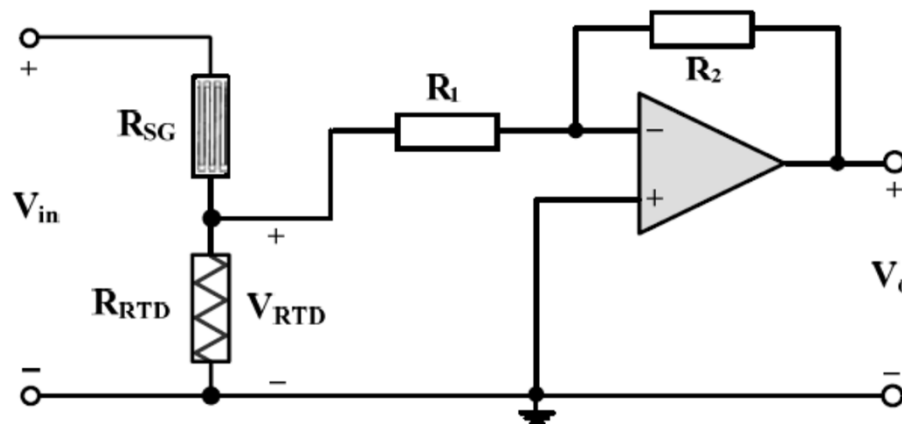
- (β) Γενικεύοντας τη σχέση με την οποία υπολογίσαμε τη διακριτική ικανότητα της συσκευής στο ερώτημα (α), προκύπτει ότι η μικρότερη γωνία περιστροφής που μπορεί να ανιχνευτεί από έναν απόλυτο οπτικό κωδικοποιητή, είναι: $360^\circ / 2^N$, όπου N είναι το πλήθος των παραθύρων ανά τομέα και 2^N το πλήθος των τομέων του δίσκου.

Συνεπώς, εάν ο δίσκος της συσκευής περιελάμβανε 10 παράθυρα ανά τομέα και $2^{10} = 1024$ τομείς, η διακριτική ικανότητα της συσκευής θα ήταν $360^\circ / 1024 = 0.35^\circ$. Η μεταβολή της διακριτικής ικανότητας σε σχέση με τη συσκευή που περιλαμβάνει 4 παράθυρα ανά τομέα και 16 τομείς, είναι $22.5^\circ - 0.35^\circ = 22.15^\circ$. Προφανώς, πρόκειται για βελτίωση του χαρακτηριστικού της διακριτικής ικανότητας, αφού η συσκευή με τα περισσότερα παράθυρα ανά τομέα και τους περισσότερους τομείς, επιτρέπει την ανίχνευση μικρότερης γωνίας περιστροφής, η οποία δε μπορεί να γίνει αντιληπτή από τη συσκευή με τα λιγότερα παράθυρα ανά τομέα και τους λιγότερους τομείς.

Άσκηση 10η

Στο κύκλωμα του παρακάτω σχήματος, μετρητής μηχανικής τάσης με παράγοντα $G = 1.8$, ο οποίος όταν δεν υφίσταται εφελκυσμό ή συμπίεση παρουσιάζει αντίσταση $R_{SG} = 200 \Omega$, συνδέεται σε διαιρέτη τάσης με τάση εισόδου (V_{in}) ίση με 12 V , μαζί με θερμομέτρο αντίστασης λευκόχρυσου, το οποίο στους $0 \text{ }^\circ\text{C}$ παρουσιάζει αντίσταση $R_{RTD} = 400 \Omega$. Η έξοδος του διαιρέτη τάσης συνδέεται στην είσοδο ενός ενισχυτή αντιστροφής που περιλαμβάνει δύο αντιστάσεις ($R_1 = 30 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 120 \text{ k}\Omega$) και ιδανικό τελεστικό ενισχυτή. Δίνεται ότι ο θερμοκρασιακός συντελεστής του λευκόχρυσου είναι $0.0039 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Να υπολογίσετε την τάση εξόδου (V_o) του κυκλώματος, όταν:

- Ο μετρητής μηχανικής τάσης υφίσταται τάση εφελκυσμού $3500 \mu\text{ε}$ και το θερμομέτρο ηλεκτρικής αντίστασης βρίσκεται σε θερμοκρασία $0 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Ο μετρητής μηχανικής τάσης δεν υφίσταται τάση εφελκυσμού ή συμπίεσης και το θερμομέτρο ηλεκτρικής αντίστασης βρίσκεται σε θερμοκρασία $50 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Ο μετρητής μηχανικής τάσης υφίσταται τάση εφελκυσμού $5000 \mu\text{ε}$ και το θερμομέτρο ηλεκτρικής αντίστασης βρίσκεται σε θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$.



Άσκηση 10η

Επειδή η αντίσταση R_1 που αποτελεί το φορτίο του διαιρέτη τάσης είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση του θερμομέτρου, το ρεύμα που κατευθύνεται προς την έξοδο του διαιρέτη τάσης είναι αμελητέο, συνεπώς θεωρούμε από το μετρητή μηχανικής τάσης και το θερμομέτρο διέρχεται όμοιο ρεύμα, το οποίο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{in} = V_{SG} + V_{RTD} = I \cdot R_{SG} + I \cdot R_{RTD} \Rightarrow I = \frac{V_{in}}{R_{SG} + R_{RTD}} \quad (1)$$

(α) Όταν ο μετρητής μηχανικής τάσης υφίσταται τάση εφελκυσμού 3500 με, η αντίστασή του υπολογίζεται ως εξής:

$$G = \frac{\frac{\Delta R_{SG}}{R_{SG}}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \Rightarrow G = \frac{\Delta R_{SG}}{R_{SG} \cdot \varepsilon} \Rightarrow \Delta R_{SG} = G \cdot \varepsilon \cdot R_{SG} \Rightarrow \Delta R_{SG} = 1.8 \cdot 3500 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \Rightarrow \Delta R_{SG} = 1.26 \Omega$$

Άσκηση 10η

$$R_{SG} = 200\Omega + \Delta R_{SG} \Rightarrow R_{SG} = 200\Omega + 1.26\Omega \Rightarrow R_{SG} = 201.26\Omega,$$

ενώ η αντίσταση του θερμομέτρου σε θερμοκρασία 0°C , είναι: $R_{RTD} = 400\Omega$.

$$\text{Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι: } I = \frac{V_{in}}{R_{SG} + R_{RTD}} = \frac{12}{201.26 + 400} \text{ A} = 19.96 \text{ mA}.$$

$$V_{RTD} = I \cdot R_{RTD} = (19.96 \cdot 10^{-3} \cdot 400) \text{ V} \Rightarrow V_{RTD} = 7.98 \text{ V}$$

Για τον ενισχυτή αντιστροφής ισχύει:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{RTD} \Rightarrow V_o = -\frac{120}{30} \cdot 7.98 \text{ V} \Rightarrow V_o = -31.92 \text{ V}$$

Άσκηση 10η

(β) Όταν ο μετρητής μηχανικής τάσης δεν υφίσταται τάση εφελκυσμού ή συμπίεσης, η αντίστασή του είναι $R_{SG} = 200 \Omega$, ενώ η αντίσταση του θερμομέτρου σε θερμοκρασία 50°C , υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{RTD} = R_{RTD_0} \cdot (1 + \alpha \cdot t) \Rightarrow R_{RTD} = 400 \cdot (1 + 3.9 \cdot 10^{-3} \cdot 50) \Rightarrow R_{RTD} = 478 \Omega$$

Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι: $I = \frac{V_{in}}{R_{SG} + R_{RTD}} = \frac{12}{200 + 478} \text{ A} = 17.7 \text{ mA}$.

$$V_{RTD} = I \cdot R_{RTD} = (17.7 \cdot 10^{-3} \cdot 478) \text{ V} \Rightarrow V_{RTD} = 8.46 \text{ V}$$

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{RTD} \Rightarrow V_o = -\frac{120}{30} \cdot 8.46 \text{ V} \Rightarrow V_o = -33.84 \text{ V}$$

Άσκηση 10η

(γ) Όταν ο μετρητής μηχανικής τάσης υφίσταται τάση εφελκυσμού 5000 με, η αντίστασή του υπολογίζεται ως εξής:

$$G = \frac{\frac{\Delta R_{SG}}{R_{SG}}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \Rightarrow G = \frac{\Delta R_{SG}}{R_{SG} \cdot \varepsilon} \Rightarrow \Delta R_{SG} = G \cdot \varepsilon \cdot R_{SG} \Rightarrow \Delta R_{SG} = 1.8 \cdot 5000 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \Rightarrow \Delta R_{SG} = 1.8 \Omega$$

$$R_{SG} = 200 \Omega + \Delta R_{SG} \Rightarrow R_{SG} = 200 \Omega + 1.8 \Omega \Rightarrow R_{SG} = 201.8 \Omega ,$$

ενώ η αντίσταση του θερμομέτρου σε θερμοκρασία 15 °C, υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{RTD} = R_{RTD_0} \cdot (1 + \alpha \cdot t) \Rightarrow R_{RTD} = 400 \cdot (1 + 3.9 \cdot 10^{-3} \cdot 15) \Rightarrow R_{RTD} = 423.4 \Omega .$$

Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι: $I = \frac{V_{in}}{R_{SG} + R_{RTD}} = \frac{12}{201.8 + 423.4} \text{ A} = 19.19 \text{ mA} .$

$$V_{RTD} = I \cdot R_{RTD} = (19.19 \cdot 10^{-3} \cdot 423.4) \text{ V} \Rightarrow V_{RTD} = 8.12 \text{ V}$$

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{RTD} \Rightarrow V_o = -\frac{120}{30} \cdot 8.12 \text{ V} \Rightarrow V_o = -32.48 \text{ V} .$$

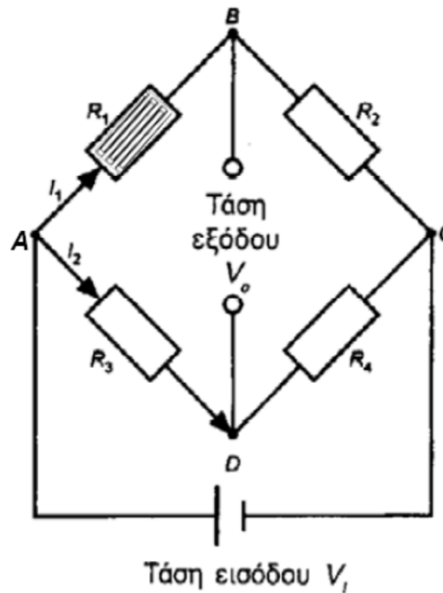
Άσκηση 11η

Μετρητής μηχανικής τάσης με αντίσταση R_1 και παράγοντα G συνδέεται σε γέφυρα Wheatstone με τάση εισόδου 15 V . Οι υπόλοιπες τρεις αντιστάσεις της γέφυρας R_2 , R_3 και R_4 έχουν τιμές $200\ \Omega$, $300\ \Omega$ και $600\ \Omega$, αντίστοιχα. Όταν ο μετρητής δεν υφίσταται εφελκυσμό ή συμπίεση, η τάση εξόδου της γέφυρας είναι 2.5 V , ενώ όταν ο μετρητής υφίσταται τάση εφελκυσμού $13500\ \mu\text{ε}$, η τάση εξόδου της γέφυρας γίνεται 2.6 V .

- (α) Να σχεδιάσετε το κύκλωμα της γέφυρας και να προσδιορίσετε την αντίσταση του μετρητή μηχανικής τάσης (R_1) **πριν και μετά** την άσκηση της προαναφερόμενης τάσης εφελκυσμού.
- (β) Να προσδιορίσετε τον παράγοντα G του μετρητή μηχανικής τάσης.

Άσκηση 11η

(α) Το κύκλωμα της γέφυρας με τον μετρητή μηχανικής τάσης δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Πριν την άσκηση της τάσης εφελκισμού, η τάση εξόδου της γέφυρας έχει ως εξής:

$$V_o = V_{R_1} - V_{R_3} \Rightarrow V_o = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_3 \Rightarrow V_o = \left(\frac{V_i}{R_1 + R_2} \right) \cdot R_1 - \left(\frac{V_i}{R_3 + R_4} \right) \cdot R_3$$
$$\Rightarrow R_1 = \frac{V_o \cdot R_2 + \left(\frac{V_i}{R_3 + R_4} \right) \cdot R_3 \cdot R_2}{V_i - V_o - \left(\frac{V_i}{R_3 + R_4} \right) \cdot R_3} \Rightarrow R_1 = \frac{2.5 \cdot 200 + \left(\frac{15}{300 + 600} \right) \cdot 300 \cdot 200}{15 - 2.5 - \left(\frac{15}{300 + 600} \right) \cdot 300} \Omega = 200 \Omega$$

Άσκηση 11η

Παρομοίως, μετά την άσκηση της τάσης εφελκισμού, η τάση εξόδου της γέφυρας έχει ως εξής:

$$V_o = V_{R_1} - V_{R_3} \Rightarrow V_o = I_1 \cdot R'_1 - I_2 \cdot R_3 \Rightarrow V_o = \left(\frac{V_i}{R'_1 + R_2} \right) \cdot R'_1 - \left(\frac{V_i}{R_3 + R_4} \right) \cdot R_3$$

$$\Rightarrow R'_1 = \frac{V_o \cdot R_2 + \left(\frac{V_i}{R_3 + R_4} \right) \cdot R_3 \cdot R_2}{V_i - V_o - \left(\frac{V_i}{R_3 + R_4} \right) \cdot R_3} \Rightarrow R'_1 = \frac{2.6 \cdot 200 + \left(\frac{15}{300 + 600} \right) \cdot 300 \cdot 200}{15 - 2.6 - \left(\frac{15}{300 + 600} \right) \cdot 300} \Omega = 205.4 \Omega$$

(β) Η μεταβολή της αντίστασης του μετρητή μηχανικής τάσης λόγω της τάσης εφελκισμού είναι:

$$\Delta R_1 = R'_1 - R_1 = (205.4 - 200) \Omega = 5.4 \Omega .$$

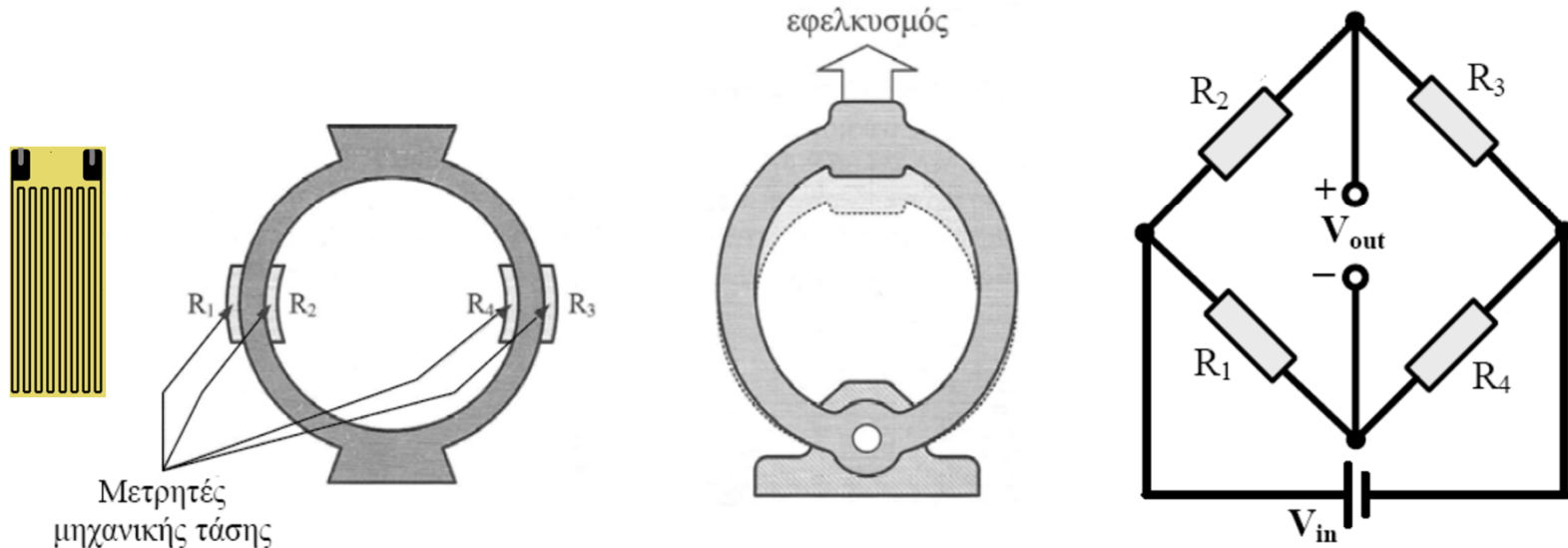
Για τον μετρητή μηχανικής τάσης ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$G = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{\frac{\Delta I}{I}} \quad \varepsilon = \frac{\Delta I}{I} \quad \Rightarrow \quad G = \frac{\Delta R_1}{R_1} \cdot \frac{I}{\varepsilon} \Rightarrow G = \frac{5.4}{200} \cdot \frac{1}{13500 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow G = 2.$$

Άσκηση 12η

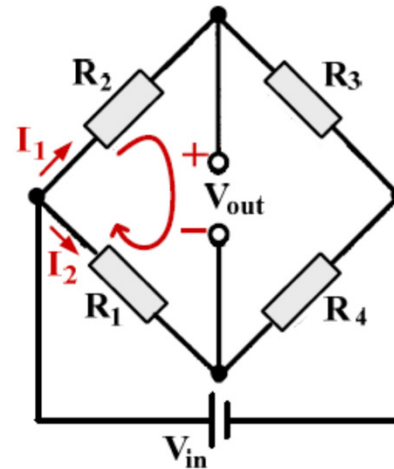
Στον δακτύλιο φόρτισης, που φαίνεται στο αριστερό μέρος του παρακάτω σχήματος, συμμετέχουν 4 μετρητές μηχανικής τάσης. Στο μέσο του ίδιου σχήματος φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο παραμορφώνεται ο δακτύλιος κατά την επιβολή εφελκυσμού. Οι μετρητές μηχανικής τάσης που είναι συνδεδεμένοι σε γέφυρα Wheatstone, όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος του παρακάτω σχήματος, παρουσιάζουν παράγοντα $G = 2.2$ και όταν δεν υφίστανται εφελκυσμό ή συμπίεση οι τιμές των αντιστάσεών τους R_1 , R_2 , R_3 και R_4 είναι 400Ω , 300Ω , 200Ω και 100Ω , αντίστοιχα. Δίνεται η τάση εισόδου της γέφυρας $V_{in} = 10 \text{ V}$.

- (α) Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου της γέφυρας εάν η μηχανική τάση εφελκυσμού που ασκείται στον δακτύλιο είναι $15900 \mu\epsilon$ (microstrains).
- (β) Να προσδιορίσετε το απόλυτο και το εκατοστιαίο σφάλμα που προκύπτει εάν κατά τον προσδιορισμό της τάσης εξόδου, δε ληφθεί υπόψη ο εφελκυσμός που υφίσταται ο μετρητής μηχανικής τάσης R_4 .



Άσκηση 12η

(α) Εφαρμόζουμε τον 2^ο κανόνα Kirchhoff στον αριστερό βρόχο της γέφυρας:



$$I_1 R_2 + V_{\text{out}} - I_2 R_1 = 0 \Rightarrow V_{\text{out}} = I_2 R_1 - I_1 R_2 .$$

Υπολογίζουμε στη συνέχεια τα ρεύματα I_1 και I_2 :

$$I_1 = \frac{V_{\text{in}}}{R_2 + R_3} \quad \text{και} \quad I_2 = \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_4} .$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_4} R_1 - \frac{V_{\text{in}}}{R_2 + R_3} R_2 .$$

Άσκηση 12η

Όπως μπορεί κανείς να διακρίνει στο μέσο του σχήματος, όλοι οι μετρητές μηχανικής τάσης του δακτυλίου υφίστανται εφελκυσμό (δηλ. αυξάνεται το μήκος τους), με αποτέλεσμα η αντίστασή τους να αυξάνεται.

Η αύξηση της αντίστασης των μετρητών μηχανικής τάσης, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$G = \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow G \cdot \varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow \Delta R = G \cdot \varepsilon \cdot R,$$

και για κάθε μετρητή τάσης έχει ως εξής:

$$\Delta R_1 = 2.2 \cdot 15900 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \Omega \Rightarrow \Delta R_1 = 14 \Omega,$$

$$\Delta R_2 = 2.2 \cdot 15900 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \Omega \Rightarrow \Delta R_2 = 10.5 \Omega,$$

$$\Delta R_3 = 2.2 \cdot 15900 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \Omega \Rightarrow \Delta R_3 = 7 \Omega,$$

$$\Delta R_4 = 2.2 \cdot 15900 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \Omega \Rightarrow \Delta R_4 = 3.5 \Omega.$$

Επομένως, οι τιμές των αντιστάσεων των τεσσάρων μετρητών που θα πρέπει να τεθούν στη σχέση υπολογισμού της τάσης εξόδου της γέφυρας που προέκυψε παραπάνω, έχουν ως εξής:

$$R_1 = 414 \Omega, R_2 = 310.5 \Omega, R_3 = 207 \Omega \text{ και } R_4 = 103.5 \Omega.$$

Η τάση εξόδου της γέφυρας υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_4} R_1 - \frac{V_{\text{in}}}{R_2 + R_3} R_2 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_{\text{out}} = \left(\frac{10}{414 + 103.5} \cdot 414 - \frac{10}{310.5 + 207} \cdot 310.5 \right) V \Rightarrow V_{\text{out}} = (8 - 6) V \Rightarrow V_{\text{out}} = 2 V.$$

Άσκηση 12η

- (β) Εάν κατά τον προσδιορισμό της τάσης εξόδου της γέφυρας δε ληφθεί υπόψη ο εφελκυσμός που υφίσταται ο μετρητής μηχανικής τάσης R_4 , τότε η τάση εξόδου της γέφυρας θα πρέπει να υπολογιστεί θέτοντας στην παραπάνω σχέση $R_4 = 100 \Omega$:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_4} R_1 - \frac{V_{\text{in}}}{R_2 + R_3} R_2 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_{\text{out}} = \left(\frac{10}{414 + 100} \cdot 414 - \frac{10}{310.5 + 207} \cdot 310.5 \right) V \Rightarrow V_{\text{out}} = (8.05 - 6) V \Rightarrow V_{\text{out}} = 2.05 V .$$

Το απόλυτο σφάλμα είναι η διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής και της τιμής που προσδιορίστηκε χωρίς να ληφθεί υπόψη ο εφελκυσμός που υφίσταται ο μετρητής μηχανικής τάσης R_4 και εκφράζεται ως προς τις μονάδες της μετρούμενης ποσότητας. Συνεπώς, το απόλυτο σφάλμα στην εν λόγω περίπτωση είναι:

$$e = |r - x| \Rightarrow e = |2 - 2.05| V \Rightarrow e = 0.05 \quad V = 50 \text{mV} .$$

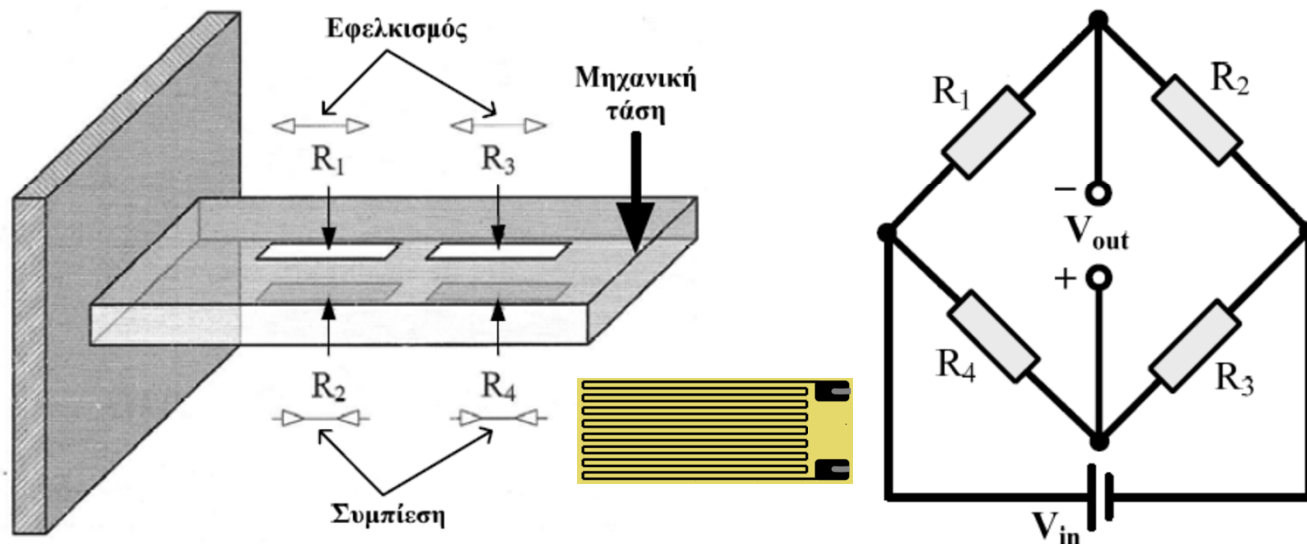
Το εκατοστιαίο σφάλμα, είναι:

$$e(\%) = \left(\frac{|r - x|}{r} \right) \cdot 100 \Rightarrow e(\%) = \left(\frac{|2 - 2.05|}{2} \right) \cdot 100 \Rightarrow e(\%) = 2.5\% .$$

Άσκηση 13η

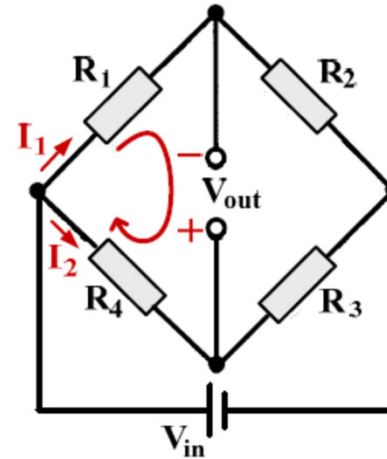
Στη διάταξη που φαίνεται στο αριστερό μέρος του παρακάτω σχήματος, συμμετέχουν 4 μετρητές μηχανικής τάσης, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι ανά δύο στην άνω και στην κάτω πλευρά μιας παραλληλεπίπεδης ράβδου. Όταν η ράβδος κάμπτεται προς τα κάτω λόγω της μηχανικής τάσης που ασκείται στο δεξιό της άκρο, οι μετρητές R_1 και R_3 υφίστανται εφελκυσμό, ενώ οι μετρητές R_2 και R_4 υφίστανται συμπίεση. Οι μετρητές αυτοί είναι συνδεδεμένοι σε γέφυρα Wheatstone, όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος του παρακάτω σχήματος, είναι όμοιοι με παράγοντα $G = 2.2$ και όταν δεν υφίστανται εφελκυσμό ή συμπίεση παρουσιάζουν αντίσταση 200Ω . Δίνεται η τάση εισόδου της γέφυρας $V_{in} = 12 V$.

- (α) Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου της γέφυρας εάν η μηχανική τάση που ασκείται στη ράβδο είναι 15000 με (microstrains).
- (β) Να προσδιορίσετε το απόλυτο και το εκατοστιαίο σφάλμα που προκύπτει εάν κατά τον προσδιορισμό της τάσης εξόδου, δε ληφθεί υπόψη η συμπίεση που υφίστανται οι μετρητές μηχανικής τάσης R_2 και R_4 .



Άσκηση 13η

(α) Εφαρμόζουμε τον 2^ο κανόνα Kirchhoff στον αριστερό βρόχο της γέφυρας:



$$I_1 R_1 - V_{\text{out}} - I_2 R_4 = 0 \Rightarrow V_{\text{out}} = I_1 R_1 - I_2 R_4.$$

Υπολογίζουμε στη συνέχεια τα ρεύματα I_1 και I_2 :

$$I_1 = \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_2} \quad \text{και} \quad I_2 = \frac{V_{\text{in}}}{R_3 + R_4}.$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_2} R_1 - \frac{V_{\text{in}}}{R_3 + R_4} R_4.$$

Άσκηση 13η

Η μεταβολή της αντίστασης των μετρητών μηχανικής τάσης που υφίστανται τάση συμπίεσης ή εφελκισμού $\varepsilon = 15000$ με, υπολογίζεται ως εξής:

$$G = \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow G \cdot \varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow \Delta R = G \cdot \varepsilon \cdot R \Rightarrow .$$

$$\Rightarrow \Delta R = 2.2 \cdot 15000 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \Omega \Rightarrow \Delta R = 6.6 \Omega$$

Λόγω του ότι οι μετρητές R_1 και R_3 υφίστανται εφελκισμό (δηλ. αυξάνεται το μήκος τους), η αντίστασή τους αυξάνεται κατά ΔR . Αντιθέτως, λόγω του ότι οι μετρητές R_2 και R_4 υφίστανται συμπίεση (δηλ. μειώνεται το μήκος τους), η αντίστασή τους μειώνεται κατά ΔR . Επομένως, οι τιμές των αντιστάσεων των τεσσάρων μετρητών που θα πρέπει να τεθούν στη σχέση υπολογισμού της τάσης εξόδου της γέφυρας που προέκυψε παραπάνω, έχουν ως εξής:

$$R_1 = R_3 = (200 + 6.6) \Omega = 206.6 \Omega \text{ και } R_2 = R_4 = (200 - 6.6) \Omega = 193.4 \Omega.$$

Η τάση εξόδου της γέφυρας υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_2} R_1 - \frac{V_{\text{in}}}{R_3 + R_4} R_4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{\text{out}} = \left(\frac{12}{206.6 + 193.4} \cdot 206.6 - \frac{12}{206.6 + 193.4} \cdot 193.4 \right) \text{V} \Rightarrow V_{\text{out}} = 396 \text{mV}.$$

Άσκηση 13η

Παρατήρηση:

Θεωρώντας ότι R είναι η αντίσταση των μετρητών όταν δεν υφίστανται εφελκυσμό ή συμπίεση και ΔR η μεταβολή της αντίστασής τους λόγω της άσκησης μηχανικής τάσης, η σχέση που δίνει την τάση εξόδου της γέφυρας μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_2} R_1 - \frac{V_{\text{in}}}{R_3 + R_4} R_4 \Rightarrow$$
$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{R + \Delta R + R - \Delta R} (R + \Delta R) - \frac{V_{\text{in}}}{R + \Delta R + R - \Delta R} (R - \Delta R) \Rightarrow$$
$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{2R} (R + \Delta R) - \frac{V_{\text{in}}}{2R} (R - \Delta R) \Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}} \Delta R}{R}.$$

Στην περίπτωση δηλαδή όπου χρησιμοποιούνται 4 μετρητές προκύπτει απόλυτα γραμμική εξάρτηση της τάσης εξόδου της γέφυρας από τη μεταβολή της αντίστασης των μετρητών.

Άσκηση 13η

(β) Εάν κατά τον προσδιορισμό της τάσης εξόδου της γέφυρας δε ληφθεί υπόψη η συμπίεση που υφίστανται οι μετρητές μηχανικής τάσης R_2 και R_4 , τότε η τάση εξόδου της γέφυρας θα πρέπει να υπολογιστεί θέτοντας στην παραπάνω σχέση $R_2 = R_4 = 200 \Omega$:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_2} R_1 - \frac{V_{\text{in}}}{R_3 + R_4} R_4 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_{\text{out}} = \left(\frac{12}{206.6 + 200} \cdot 206.6 - \frac{12}{206.6 + 200} \cdot 200 \right) \text{V} \Rightarrow V_{\text{out}} = 195 \text{mV} .$$

Το απόλυτο σφάλμα είναι η διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής και της τιμής που προσδιορίστηκε χωρίς να ληφθεί υπόψη η συμπίεση που υφίστανται οι μετρητές μηχανικής τάσης R_2 και R_4 και εκφράζεται ως προς τις μονάδες της μετρούμενης ποσότητας. Συνεπώς, το απόλυτο σφάλμα στην εν λόγω περίπτωση είναι:

$$e = |r - x| \Rightarrow e = |396 - 195| \text{mV} \Rightarrow e = 201 \text{mV} .$$

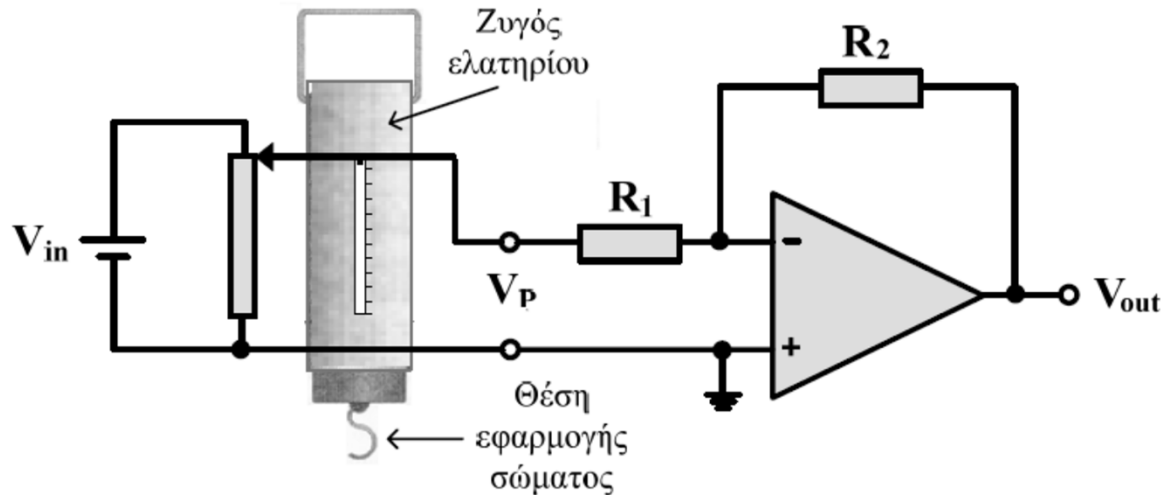
Το εκατοστιαίο σφάλμα, είναι:

$$e(\%) = \left(\frac{|r - x|}{r} \right) \cdot 100 \Rightarrow e(\%) = \left(\frac{|396 - 195|}{396} \right) \cdot 100 \Rightarrow e(\%) = 50.75\% .$$

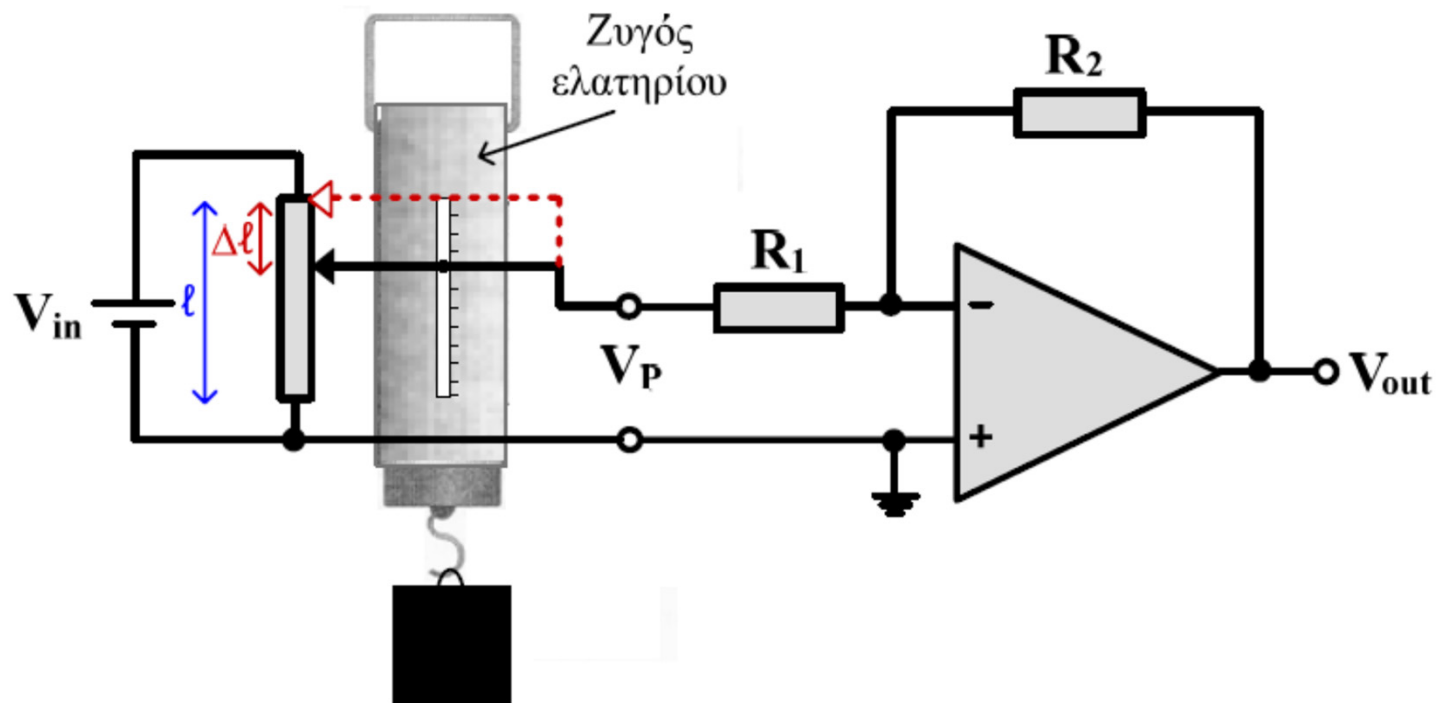
Άσκηση 14η

Σε ζυγό ελατηρίου συνδέεται όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα γραμμικό ποτενσιόμετρο με αντίσταση συνολικού μήκους 10 cm και τάση εισόδου $V_{in} = 5\text{ V}$, του οποίου η έξοδος V_p συνδέεται σε ενισχυτή αντιστροφής που περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή. Δίνονται: $R_1 = 200\text{ k}\Omega$, $R_2 = 1\text{ M}\Omega$, $K = 200\text{ N/m}$ (σταθερά ελατηρίου του ζυγού) και $g = 10\text{ m/sec}^2$ (επιτάχυνση της βαρύτητας). Θεωρείστε ότι η αντίσταση του ποτενσιόμετρου είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση εισόδου του ενισχυτή αντιστροφής.

- (α) Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου του V_{out} του συνολικού κυκλώματος σε σχέση με τη μάζα του σώματος που εφαρμόζεται στο ζυγό.
- (β) Να σχεδιάσετε με ακρίβεια το διάγραμμα της V_{out} ως προς τη μάζα του σώματος που εφαρμόζεται στο ζυγό για μάζα σώματος από 200 gr έως 2 kg. Ποια είναι η μέγιστη μάζα που μπορεί να εφαρμοστεί στον ζυγό ώστε να μετρηθεί σωστά το βάρος της και ποια η έξοδος του συνολικού κυκλώματος εάν εφαρμοστεί η μάζα αυτή;



Άσκηση 14η



$$\frac{V_P}{V_{in}} = \frac{R_{l-\Delta l}}{R_l} = \frac{l - \Delta l}{l} \Rightarrow V_P = \frac{V_{in} (l - \Delta l)}{l}$$

Άσκηση 14η

Το σώμα μάζας m που εφαρμόζεται στο ζυγό, ασκεί δύναμη βάρους: $B = m \cdot g$. Η δύναμη του βάρους ασκείται στο ελατήριο του ζυγού και του προκαλεί επιμήκυνση Δl , συνεπώς:

$$B = K \cdot \Delta l \Rightarrow \Delta l = \frac{B}{K} \Rightarrow \Delta l = \frac{m g}{K}.$$

Επομένως, η τάση εξόδου του ποτενσιόμετρου μετά την εφαρμογή του σώματος μάζας m στον ζυγό είναι:

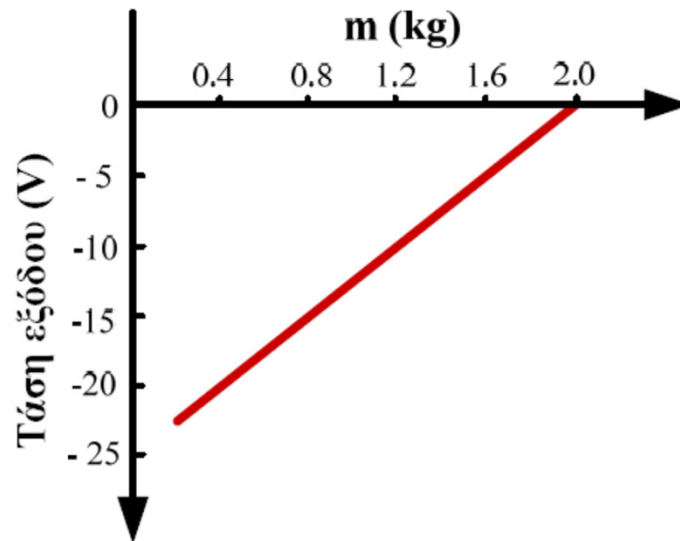
$$V_P = \frac{V_{in} \left(\ell - \frac{m g}{K} \right)}{\ell}.$$

Λόγω της παρουσίας του ενισχυτή αντιστροφής, η τάση εξόδου του συνολικού κυκλώματος έχει ως εξής:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_P \Rightarrow V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{V_{in} \left(\ell - \frac{m g}{K} \right)}{\ell} \Rightarrow V_{out} = -25 + 12.5 \cdot m \quad (\text{Volts}).$$

Άσκηση 14η

- (β) Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η συνάρτηση της τάσης εξόδου του κυκλώματος με τη μάζα είναι γραμμική, συνεπώς για το σχεδιασμό της απαιτούμενης ευθείας γραφικής παράστασης, αρκεί ο προσδιορισμός των δύο ακραίων σημείων της. Για $m = 200 \text{ gr}$ ή 0.2 kg , από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι $V_{\text{out}} = -22.5 \text{ V}$, ενώ για $m = 2 \text{ kg}$ προκύπτει ότι V_{out} είναι μηδενική. Συνεπώς, η ζητούμενη γραφική παράσταση έχει ως εξής:



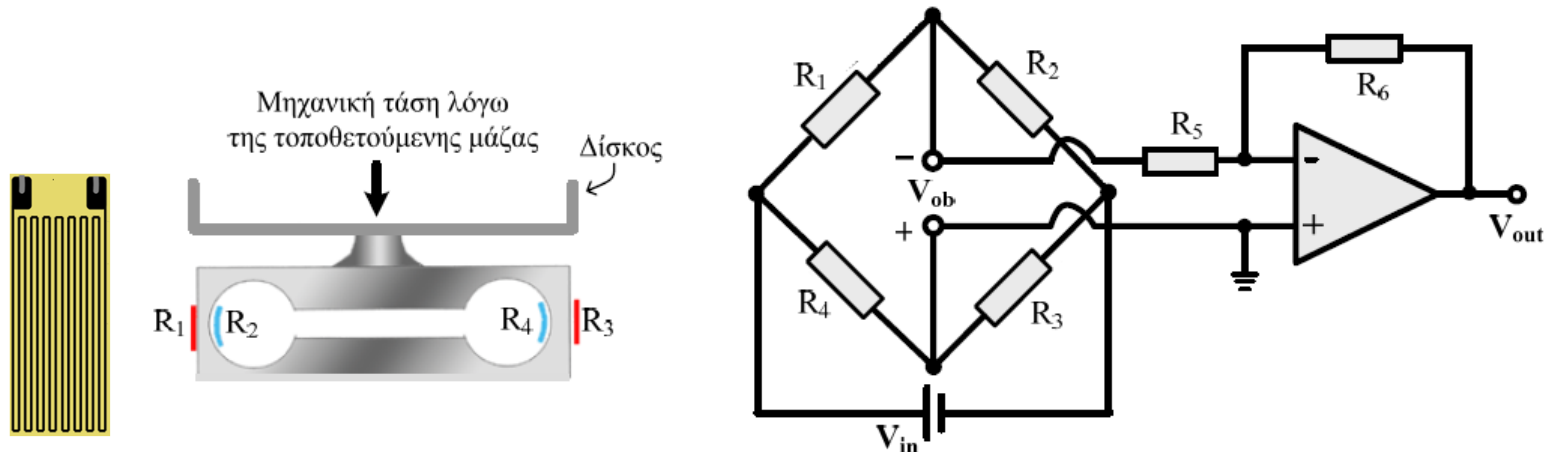
Είναι προφανές ότι για $m = 2 \text{ kg}$ η κινητή επαφή του ποτενσιόμετρου έχει φτάσει στο κάτω άκρο της αντίστασης του με αποτέλεσμα το μηδενισμό της V_p και επομένως και της V_{out} . Συνεπώς, η μέγιστη μάζα που μπορεί να μετρηθεί από το κύκλωμα είναι 2 kg και η έξοδος του συνολικού κυκλώματος εάν εφαρμοστεί στο άκρο του ζυγού η μάζα αυτή είναι μηδενική.

Άσκηση 15η

Στη ζυγαριά που φαίνεται στο αριστερό μέρος του παρακάτω σχήματος, συμμετέχουν τέσσερις μετρητές μηχανικής τάσης, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε όταν τοποθετείται μια μάζα στο δίσκο της ζυγαριάς οι μετρητές R_1 και R_3 να υφίστανται εφελκυσμό, ενώ οι μετρητές R_2 και R_4 να υφίστανται συμπίεση. Η σχέση μεταξύ της μηχανικής τάσης (ε) και της μάζας (m) για τη ζυγαριά αυτή είναι: $\varepsilon = 0.4 \times m$. Στη σχέση αυτή, η μηχανική τάση είναι σε microstrains ($\mu\epsilon$) και η μάζα σε γραμμάρια. Οι τέσσερις μετρητές που είναι συνδεδεμένοι σε γέφυρα Wheatstone, όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος του παρακάτω σχήματος, είναι όμοιοι με παράγοντα $G = 2$ και όταν δεν υφίστανται εφελκυσμό ή συμπίεση παρουσιάζουν αντίσταση 200Ω . Η τάση εισόδου της γέφυρας (V_{in}) είναι 10 V , ενώ η έξοδος της (V_{ob}) συνδέεται σε ενισχυτή αντιστροφής, ο οποίος περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή και αντιστάσεις $R_5 = 20 \text{ k}\Omega$ και $R_6 = 100 \text{ k}\Omega$.

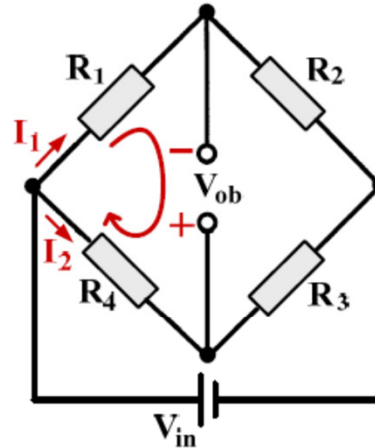
- (α) Να υπολογίσετε την τάση εξόδου του κυκλώματος (V_{out}) εάν στη ζυγαριά τοποθετηθεί μάζα 2 κιλών.
- (β) Να σχεδιάσετε με ακρίβεια το διάγραμμα της V_{out} ως προς τη μάζα που τοποθετείται στη ζυγαριά για τιμές μάζας από 500 γραμμάρια έως 3 κιλά.

Να θεωρήσετε ότι ο δίσκος της ζυγαριάς δεν προκαλεί μηχανική τάση στους τέσσερις μετρητές.



Άσκηση 15η

(α) Εφαρμόζουμε τον 2^ο κανόνα Kirchhoff στον αριστερό βρόχο της γέφυρας:



$$I_1 R_1 - V_{ob} - I_2 R_4 = 0 \Rightarrow V_{ob} = I_1 R_1 - I_2 R_4.$$

Υπολογίζουμε στη συνέχεια τα ρεύματα I_1 και I_2 :

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} \quad \text{και} \quad I_2 = \frac{V_{in}}{R_3 + R_4}.$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$V_{ob} = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} R_1 - \frac{V_{in}}{R_3 + R_4} R_4.$$

Επειδή η αντίσταση R_5 που αποτελεί το φορτίο της γέφυρας, είναι πολύ μεγαλύτερη (100 φορές) από τις αντιστάσεις της γέφυρας, το ρεύμα που κατευθύνεται από την έξοδο της γέφυρας προς τον ενισχυτή αντιστροφής, είναι πολύ μικρό και θεωρήθηκε αμελητέο.

Άσκηση 15η

Η μεταβολή της αντίστασης των μετρητών μηχανικής τάσης που υφίστανται μηχανική τάση συμπίεσης ή εφελκυσμού ε , υπολογίζεται ως εξής:

$$G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \Rightarrow G \cdot \varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow \Delta R = G \cdot \varepsilon \cdot R.$$

Επειδή δίνεται ότι $\varepsilon = 0.4 \times m$, όπου ε η μηχανική τάση είναι σε microstrains ($\mu\varepsilon$) και m η μάζα σε γραμμάρια, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\Delta R = G \cdot (0.4 \cdot m \cdot 10^{-6}) \cdot R, \text{ όπου η μάζα } m \text{ είναι σε γραμμάρια.}$$

Λόγω του ότι οι μετρητές R_1 και R_3 υφίστανται εφελκυσμό (δηλαδή, αυξάνεται το μήκος τους), η αντίστασή τους αυξάνεται κατά ΔR . Αντιθέτως, λόγω του ότι οι μετρητές R_2 και R_4 υφίστανται συμπίεση (δηλαδή, μειώνεται το μήκος τους), η αντίστασή τους μειώνεται κατά ΔR . Αφού οι αντιστάσεις των μετρητών είναι ίσες όταν δεν υφίστανται εφελκυσμό ή συμπίεση, δηλαδή, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 300 \Omega = R$, η σχέση που δίνει την τάση εξόδου της γέφυρας μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\begin{aligned} V_{ob} &= \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} R_1 - \frac{V_{in}}{R_3 + R_4} R_4 \Rightarrow \\ V_{ob} &= \frac{V_{in}}{R + \Delta R + R - \Delta R} (R + \Delta R) - \frac{V_{in}}{R + \Delta R + R - \Delta R} (R - \Delta R) \Rightarrow \\ V_{ob} &= \frac{V_{in}}{2R} (R + \Delta R) - \frac{V_{in}}{2R} (R - \Delta R) \Rightarrow V_{ob} = \frac{V_{in} \Delta R}{R}. \end{aligned}$$

Άσκηση 15η

Με βάση τη σχέση που συνδέει τη μεταβολή της αντίστασης (ΔR) με τη μάζα (m) σε γραμμάρια, που τοποθετείται στη ζυγαριά, η τάση εξόδου της γέφυρας, όταν στη ζυγαριά τοποθετηθεί μάζα 2 κιλών (δηλαδή, 2000 γραμμαρίων), έχει ως εξής:

$$V_{ob} = \frac{V_{in} \Delta R}{R} \Rightarrow V_{ob} = \frac{V_{in} \cdot G \cdot (0.4 \cdot m \cdot 10^{-6}) \cdot R}{R} \Rightarrow$$

$$V_{ob} = V_{in} \cdot G \cdot (0.4 \cdot m \cdot 10^{-6}) \Rightarrow V_{ob} = (10 \cdot 2 \cdot 0.4 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}) V \Rightarrow V_{ob} = 16 \cdot 10^{-3} V = 16 \text{mV}$$

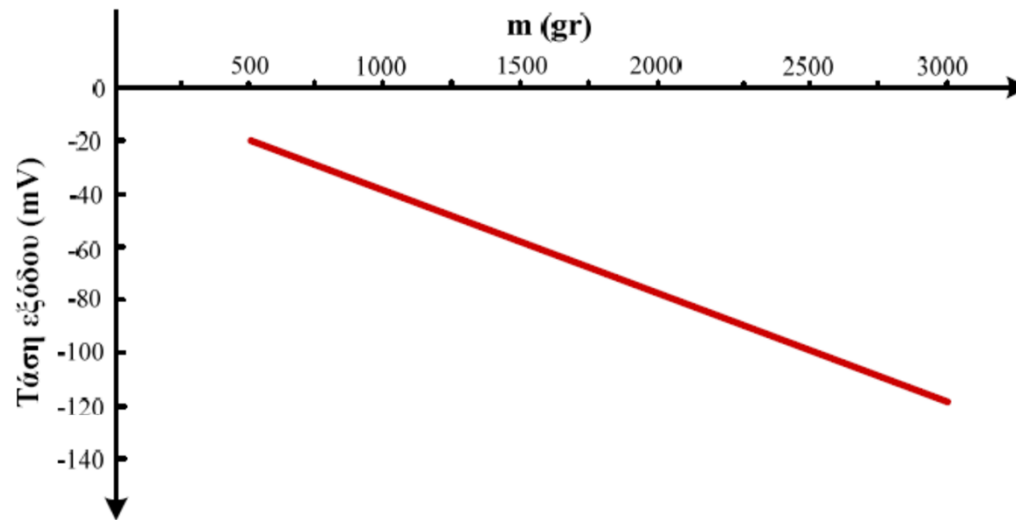
Η τάση εξόδου του ενισχυτή αντιστροφής (V_{out}), υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{out} = -\frac{R_6}{R_5} \cdot V_{ob} \Rightarrow V_{out} = -\frac{100 \text{k}\Omega}{20 \text{k}\Omega} \cdot 16 \text{mV} \Rightarrow V_{out} = -80 \text{mV}.$$

Άσκηση 15η

(β) Για να σχεδιάσουμε το διάγραμμα της V_{out} ως προς τη μάζα που τοποθετείται στη ζυγαριά, θα πρέπει να προσδιορίσουμε τη μεταξύ τους σχέση. Αυτή έχει ως εξής:

$$V_{out} = -\frac{R_6}{R_5} \cdot V_{ob} \Rightarrow V_{out} = -\frac{R_6}{R_5} \cdot V_{in} G \cdot 0.4 \cdot m \cdot 10^{-6} \Rightarrow V_{out} = -5 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 0.4 \cdot 10^{-6} \cdot m \Rightarrow V_{out} = -40 \cdot 10^{-6} \cdot m .$$

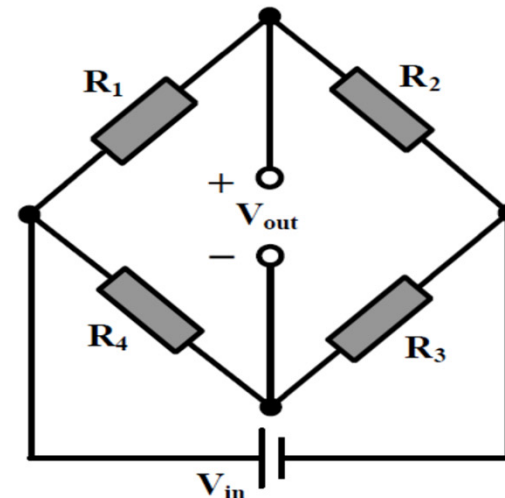
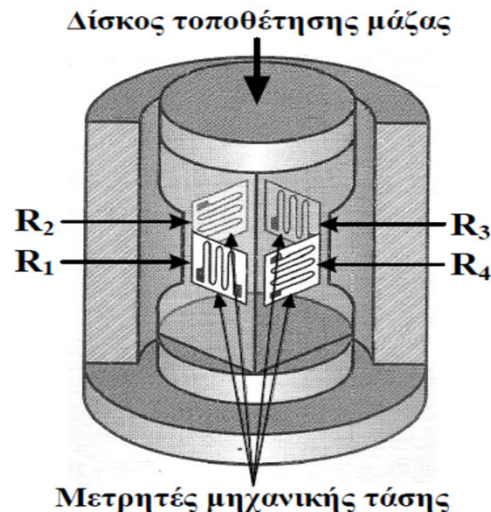


Στην παραπάνω σχέση, η V_{out} είναι σε Volt και η μάζα σε γραμμάρια. Η σχέση αυτή είναι γραμμική, συνεπώς για το σχεδιασμό της απαιτούμενης ευθείας γραφικής παράστασης, αρκεί ο προσδιορισμός των δύο ακραίων σημείων της. Για $m_1 = 500$ gr προκύπτει ότι $V_{out} = -20$ mV, ενώ για $m_2 = 3$ kg = 3000 gr προκύπτει ότι $V_{out} = -120$ mV.

Άσκηση 16η

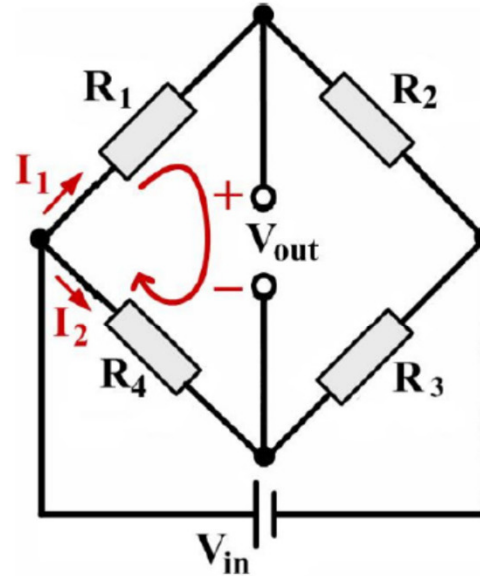
Στη κυψελίδα φόρτισης που φαίνεται στο αριστερό μέρος του παρακάτω σχήματος και χρησιμοποιείται για τη ζύγιση αντικειμένων, συμμετέχουν τέσσερις (4) μετρητές μηχανικής τάσης, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στις πλευρές του ελαστικού στοιχείου στήριξης της κυψελίδας. Ο τρόπος τοποθέτησης των μετρητών R_1 και R_3 είναι διαφορετικός από τον τρόπο τοποθέτησης των μετρητών R_2 και R_4 . Η σχέση μεταξύ της μηχανικής τάσης (ε) που ασκείται στην κυψελίδα και της μάζας (m) που τοποθετείται στο δίσκο της κυψελίδας είναι: $\varepsilon = 0.5 \times m$. Στη σχέση αυτή, η μηχανική τάση είναι σε microstrains ($\mu\varepsilon$) και η μάζα σε γραμμάρια. Οι τέσσερις μετρητές που είναι συνδεδεμένοι σε γέφυρα Wheatstone, όπως φαίνεται στο δεξί μέρος του παρακάτω σχήματος, είναι όμοιοι με παράγοντα $G = 2$ και όταν δεν υφίστανται παραμόρφωση παρουσιάζουν αντίσταση $1 \text{ k}\Omega$. Η τάση εισόδου της γέφυρας (V_{in}) είναι 10 V .

- Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου (V_{out}) της γέφυρας ως προς τη μάζα (m) που τοποθετείται στο δίσκο της κυψελίδας.
- Να σχεδιάσετε με ακρίβεια το διάγραμμα της τάσης εξόδου (V_{out}) της γέφυρας ως προς τη μάζα (m) που τοποθετείται στο δίσκο της κυψελίδας, για τιμές μάζας από 2 έως 10 κιλά.
- Να υπολογίσετε το εκατοστιαίο σφάλμα που προκύπτει εάν κατά τον προσδιορισμό της τάσης εξόδου, δεν ληφθεί υπόψη η παραμόρφωση που υφίσταται ο μετρητής μηχανικής τάσης R_1 .



Άσκηση 16η

(α) Εφαρμόζουμε τον 2^ο κανόνα Kirchhoff στον αριστερό βρόχο της γέφυρας:



$$I_1 \cdot R_1 + V_{out} - I_2 \cdot R_4 = 0 \Rightarrow V_{out} = I_2 \cdot R_4 - I_1 \cdot R_1.$$

Υπολογίζουμε στη συνέχεια τα ρεύματα I₁ και I₂:

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} \quad \text{και} \quad I_2 = \frac{V_{in}}{R_3 + R_4}.$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{R_3 + R_4} \cdot R_4 - \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} \cdot R_1$$

Άσκηση 16η

Η μεταβολή της αντίστασης των μετρητών μηχανικής τάσης που υφίστανται μηχανική τάση ε , υπολογίζεται ως εξής: $\Delta R = G \cdot \varepsilon \cdot R$. Επειδή δίνεται ότι $\varepsilon = 0.5 \times m$, όπου ε η μηχανική τάση είναι σε microstrains ($\mu\epsilon$) και m η μάζα σε γραμμάρια, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\Delta R = G \cdot (0.5 \cdot m \cdot 10^{-6}) \cdot R, \text{ όπου η μάζα } m \text{ είναι σε γραμμάρια.}$$

Λόγω του τρόπου τοποθέτησης των μετρητών μηχανικής τάσης στο στοιχείο στήριξης της κυψελίδας, παρατηρούμε ότι όταν τοποθετηθεί μια μάζα στο δίσκο της κυψελίδας, οι μετρητές R_1 και R_3 υφίστανται συμπίεση (δηλαδή μειώνεται το μήκος τους), αφού ασκείται μηχανική τάση παράλληλα με τον άξονα ανίχνευσης παραμόρφωσής τους. Επομένως, η αντίστασή τους μειώνεται κατά ΔR . Οι μετρητές R_2 και R_4 είναι πρακτικά μη ενεργοί, αφού ασκείται μηχανική τάση κάθετα προς τον άξονα ανίχνευσης παραμόρφωσης. Επομένως, μεταβολή της αντίστασής τους είναι πρακτικά αμελητέα.

Θεωρώντας ότι R ($= 1 \text{ k}\Omega$) είναι η αντίσταση των μετρητών μηχανικής τάσης όταν δεν υφίστανται παραμόρφωση και ΔR η μεταβολή της αντίστασής τους λόγω της τοποθέτησης μάζας m στο δίσκο της κυψελίδας, η σχέση που δίνει την τάση εξόδου της γέφυρας μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{R_3 + R_4} \cdot R_4 - \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_2} \cdot R_1 \Rightarrow$$

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{2R - \Delta R} \cdot R - \frac{V_{\text{in}}}{2R - \Delta R} \cdot (R - \Delta R) \Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}} \cdot \Delta R}{2R - \Delta R}.$$

Η σύνδεση μη ενεργών μετρητών μηχανικής τάσης γίνεται συνήθως για να εξουδετερωθεί η εξάρτηση των αντιστάσεων των μετρητών από τη θερμοκρασία.

Άσκηση 16η

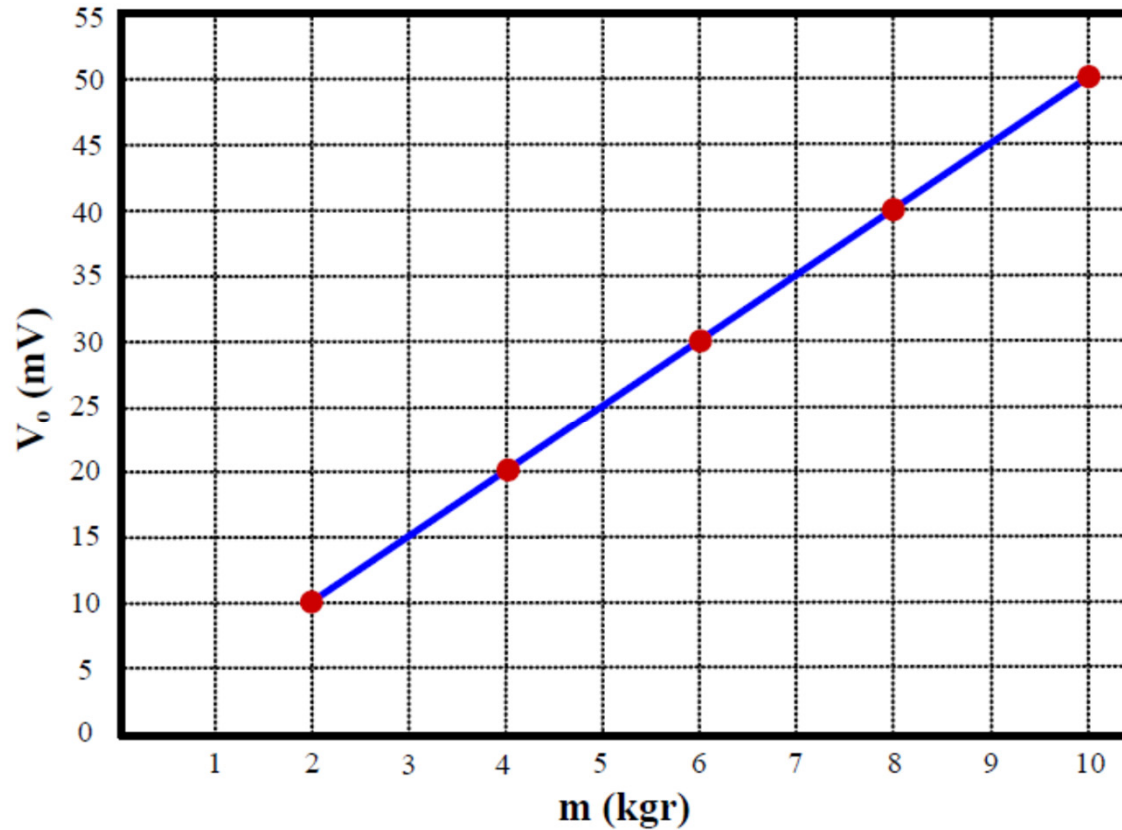
Με βάση τη σχέση που συνδέει τη μεταβολή της αντίστασης (ΔR) με τη μάζα (m) σε γραμμάρια, η ζητούμενη σχέση για την τάση εξόδου της γέφυρας, γίνεται:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}} \cdot \Delta R}{2R - \Delta R} \Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}} \cdot G \cdot 0.5 \cdot m \cdot 10^{-6} \cdot R}{2 \cdot R - G \cdot 0.5 \cdot m \cdot 10^{-6} \cdot R} \Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}} \cdot G \cdot 0.5 \cdot m \cdot 10^{-6}}{2 - G \cdot 0.5 \cdot m \cdot 10^{-6}}$$
$$V_{\text{out}} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 0.5 \cdot m \cdot 10^{-6}}{2 - 2 \cdot 0.5 \cdot m \cdot 10^{-6}} \Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{10^{-5} \cdot m}{2 - 10^{-6} \cdot m}$$

- (β) Με βάση την παραπάνω σχέση, καταστρώνουμε τον παρακάτω πίνακα που περιλαμβάνει τις τιμές της τάσης εξόδου της γέφυρας, για τιμές της μάζας m από $2 \text{ kgr} = 2000 \text{ gr}$ έως $10 \text{ kgr} = 10000 \text{ gr}$, από τον οποίο προκύπτει το ζητούμενο διάγραμμα. Λόγω του ότι η ποσότητα του παρανομαστή στην παραπάνω σχέση είναι πολύ κοντά στον αριθμό 2 για την περιοχή τιμών μάζας που εξετάζουμε, η ζητούμενη γραφική παράσταση είναι πολύ κοντά στην ευθεία που προκύπτει από τη σχέση $V_{\text{out}} = 0.5 \cdot 10^{-5} \cdot m$.

m (kgr)	2	4	6	8	10
V_{out} (mV)	10.01	20.04	30.09	40.16	50.25

Άσκηση 16η



Άσκηση 16η

- (γ) Εάν κατά τον προσδιορισμό της τάσης εξόδου της γέφυρας δεν ληφθεί υπόψη η παραμόρφωση που υφίσταται ο μετρητής μηχανικής τάσης R_1 , τότε η τάση εξόδου της γέφυρας προσδιορίζεται θέτοντας στην αντίστοιχη σχέση του ερωτήματος (α), όπου $R_1 = R$:

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{R_3 + R_4} \cdot R_4 - \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_2} \cdot R_1 \Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{R - \Delta R + R} \cdot R - \frac{V_{\text{in}}}{R + R} \cdot R \Rightarrow$$

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{2 \cdot R - \Delta R} - \frac{V_{\text{in}}}{2} \Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{2 \cdot R - G \cdot 0.5 \cdot m \cdot 10^{-6} \cdot R} - \frac{V_{\text{in}}}{2} \Rightarrow$$

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{2 - 2 \cdot 0.5 \cdot m \cdot 10^{-6}} - \frac{V_{\text{in}}}{2} \Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{10}{2 - 10^{-6} \cdot m} - 5.$$

Το εκατοστιαίο σφάλμα που προκύπτει εάν κατά τον προσδιορισμό της τάσης εξόδου, δε ληφθεί υπόψη η παραμόρφωση που υφίστανται οι μετρητές μηχανικής τάσης R_1 και R_2 , ορίζεται ως εξής:

$$e(\%) = \left| \frac{r - x}{r} \right| \cdot 100,$$

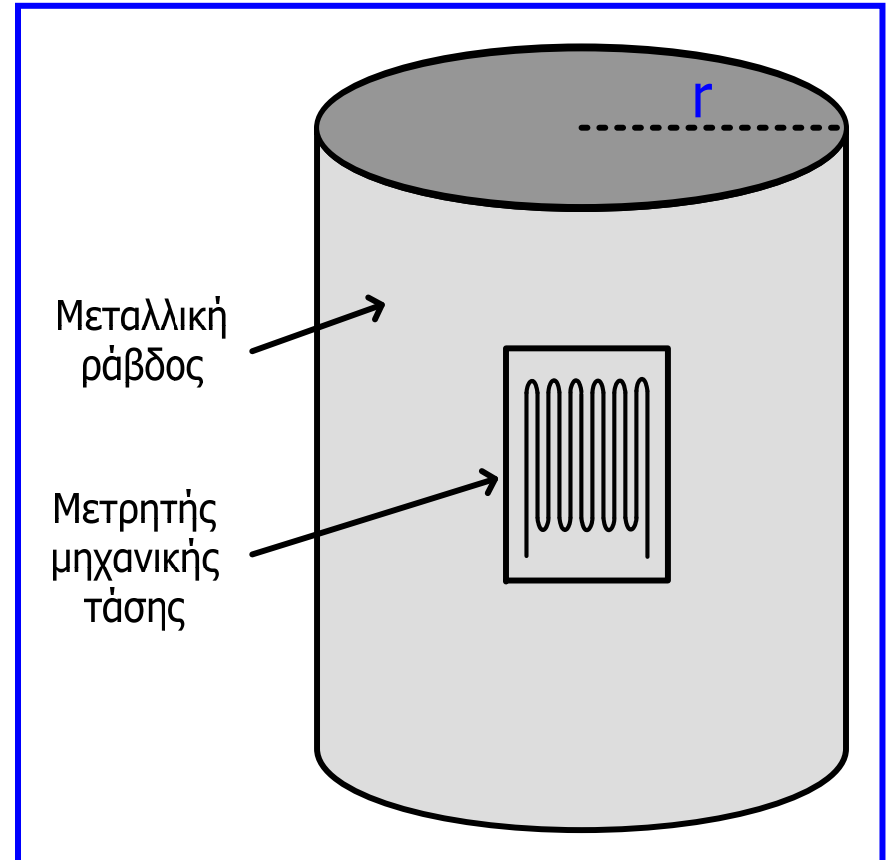
όπου r είναι η τιμή της V_{out} όταν λαμβάνεται υπόψη η παραμόρφωση και των 2 μετρητών (δηλαδή η πραγματική τιμή) και x είναι η τιμή της V_{out} όταν δε λαμβάνεται υπόψη η παραμόρφωση του μετρητή R_1 :

$$e(\%) = \left| \frac{\frac{10^{-5} \cdot m}{2 - 10^{-6} \cdot m} - \frac{10}{2 - 10^{-6} \cdot m} + 5}{\frac{10^{-5} \cdot m}{2 - 10^{-6} \cdot m}} \right| \cdot 100 \Rightarrow e(\%) = \frac{|10^{-5} \cdot m - 10 + 5 \cdot (2 - 10^{-6} \cdot m)|}{10^{-5} \cdot m} \cdot 100 \Rightarrow$$

$$e(\%) = \frac{10^{-5} \cdot m - 5 \cdot 10^{-6} \cdot m}{10^{-5} \cdot m} \cdot 100 \Rightarrow e(\%) = \frac{10^{-5} - 5 \cdot 10^{-6}}{10^{-5}} \cdot 100 \Rightarrow e(\%) = 50\%.$$

Άσκηση 17η

Μετρητής μηχανικής τάσης με αντίσταση $R_{SG} = 400 \Omega$ και παράγοντα $G = 2$ είναι στερεωμένος ακλόνητα (συγκολλημένος) σε μεταλλική κυλινδρική ράβδο ακτίνας $r = 8 \text{ cm}$. Στο άνω μέρος της ράβδου, η οποία χρησιμοποιείται ως στήριγμα σε μεταλλική κατασκευή, εφαρμόζεται αντικείμενο που συμμετέχει στην κατασκευή με μάζα 0.5 τόνους με αποτέλεσμα την κατά μήκος συμπίεσή της. Εάν το μέτρο ελαστικότητας του μεταλλικού κράματος, από το οποίο είναι κατασκευασμένη η ράβδος, είναι $0.2 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, να υπολογίσετε την μεταβολή της αντίστασης του μετρητή μηχανικής τάσης. Δίνεται ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι $g = 10 \text{ m/sec}^2$, καθώς και ότι $\pi = 3.14$.



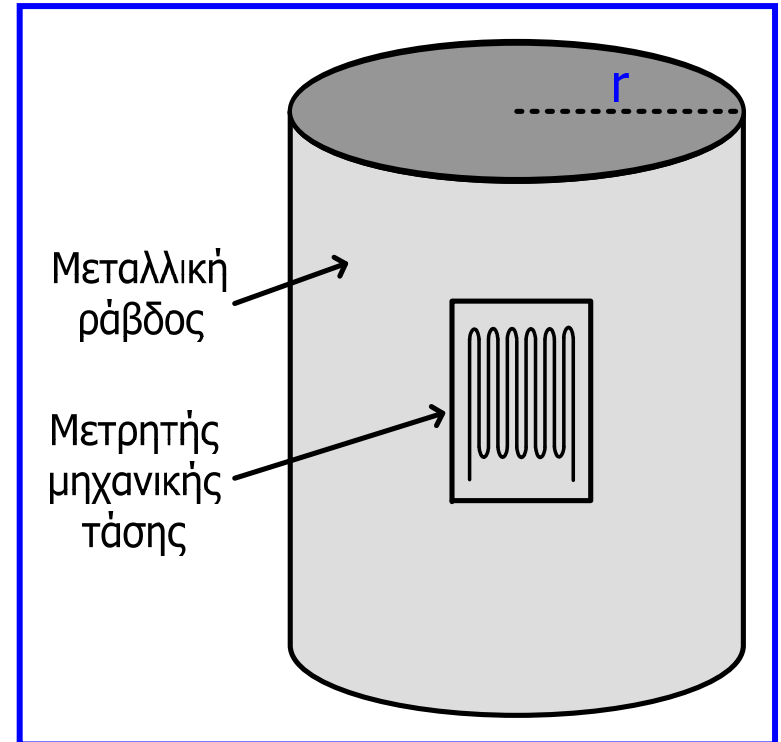
Άσκηση 17η

$$F = B = m \cdot g \Rightarrow F = 0.5 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2} \Rightarrow F = 5000 \text{ N}$$

$$S = \pi \cdot r^2 \Rightarrow S = 3.14 \cdot 8^2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \Rightarrow S = 0.02 \text{ m}^2$$

$$F = E \cdot S \cdot \varepsilon \Rightarrow F = E \cdot S \cdot \frac{\Delta R}{R \cdot G} \Rightarrow \Delta R = \frac{F \cdot R \cdot G}{E \cdot S} \Rightarrow$$

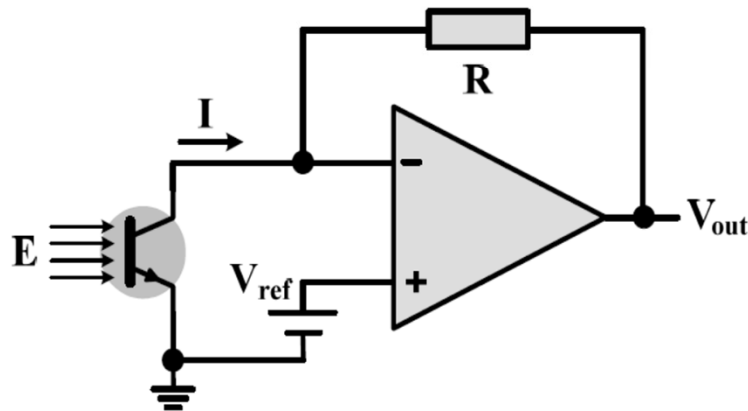
$$\Rightarrow \Delta R = \frac{5000 \text{ N} \cdot 400 \Omega \cdot 2}{0.2 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0.02 \text{ m}^2} \Rightarrow \Delta R = 0.1 \Omega$$



Άσκηση 18η

Στους ανιχνευτές προσέγγισης ή αισθητήρες ανακλώμενης δέσμης φωτός, που συμμετέχουν σε συστήματα ασφαλείας, χρησιμοποιούνται δίοδοι φωτοεκπομπής (light-emission diodes, LEDs) ως πηγές φωτός και φωτοτρανζίστορ (phototransistors) ως ανιχνευτές φωτός. Στους αισθητήρες αυτούς, η πηγή εκπέμπει μια δέσμη φωτός, η οποία ανακλάται από κάθε αντικείμενο που πλησιάζει τον αισθητήρα και το ανακλώμενο φως ανιχνεύεται από το φωτοτρανζίστορ. Με τη σχέση $I = C \times E^2$ υπολογίζεται κατά προσέγγιση το ρεύμα I που δημιουργείται σε ένα φωτοτρανζίστορ όταν σε αυτό προσπίπτει ακτινοβολία E . Στη σχέση αυτή, το ρεύμα υπολογίζεται συνήθως σε mA και η προσπίπτουσα ακτινοβολία δίνεται σε mW/cm^2 . Στο κύκλωμα του παρακάτω σχήματος συμμετέχει ένα φωτοτρανζίστορ, μία αντίσταση $R = 200 \Omega$, μια πηγή σταθερής τάσης $V_{\text{ref}} = 12 \text{ V}$ και ένας ιδανικός τελεστικός ενισχυτής. Για το φωτοτρανζίστορ δίνεται ότι: $C = 6 \text{ mA} \cdot \text{cm}^4 / \text{mW}^2$.

- (α) Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου (V_{out}) του κυκλώματος σε σχέση με την ακτινοβολία E που προσπίπτει στο φωτοτρανζίστορ.
- (β) Να σχεδιάσετε το διάγραμμα της τάσης εξόδου (V_{out}) του κυκλώματος ως προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία για τιμές ακτινοβολίας από $0.5 \text{ mW}/\text{cm}^2$ έως $3 \text{ mW}/\text{cm}^2$.



Άσκηση 18η

(α) Λόγω του ότι η αντίσταση εισόδου του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή είναι άπειρη, το ρεύμα (I) που δημιουργείται στο φωτοτρανζίστορ είναι ίσο με το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση R . Επίσης, λόγω της ιδιότητας αντιγραφής των τάσεων στους ακροδέκτες εισόδου του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή, η τάση της αντιστρέφουσας εισόδου του ενισχυτή είναι ίση με την τάση V_{ref} . Με βάση τα στοιχεία αυτά, το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση R (και συνεπώς το ρεύμα του φωτοτρανζίστορ), δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I = \frac{V_{-} - V_{out}}{R} \Rightarrow I = \frac{V_{ref} - V_{out}}{R} \Rightarrow I \cdot R = V_{ref} - V_{out} \Rightarrow V_{out} = V_{ref} - I \cdot R.$$

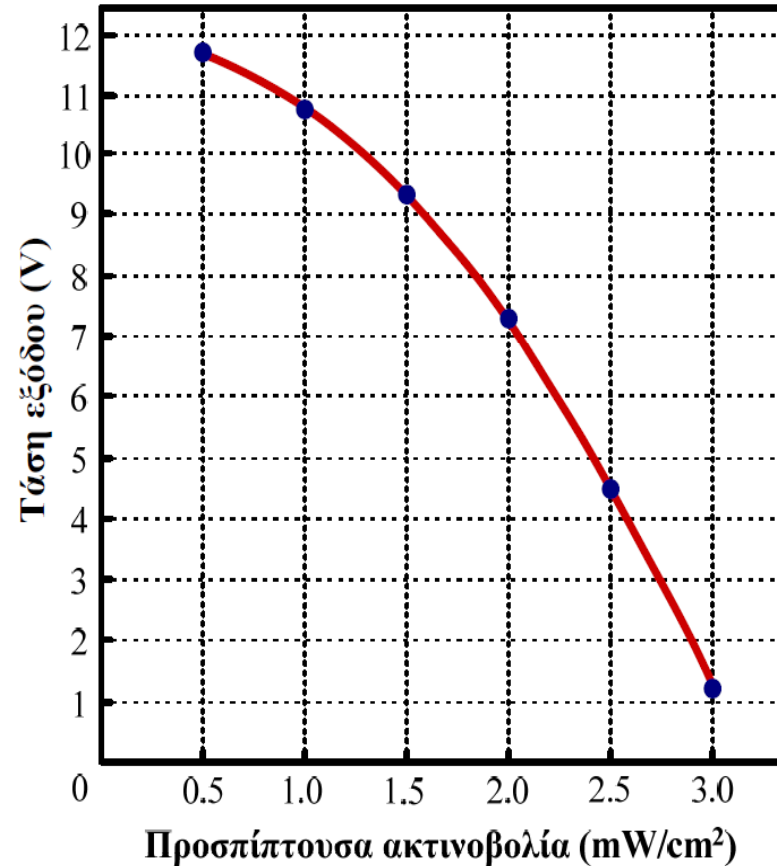
Επίσης, αφού με βάση όσα αναφέρονται στην εκφώνηση του θέματος, το ρεύμα που δημιουργείται στο φωτοτρανζίστορ δίνεται από τη σχέση $I = C \cdot E^2$, η ζητούμενη σχέση προσδιορισμού της τάση εξόδου (V_{out}) του κυκλώματος σε σχέση με την ακτινοβολία E που προσπίπτει στο φωτοτρανζίστορ, έχει ως εξής:

$$V_{out} = V_{ref} - I \cdot R \Rightarrow V_{out} = V_{ref} - C \cdot R \cdot E^2 \Rightarrow V_{out} = 12 - 6 \cdot 0.2 \cdot E^2 \Rightarrow V_{out} = 12 - 1.2 \cdot E^2.$$

Άσκηση 18η

(β) Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τιμές προσπίπτουσας ακτινοβολίας από 0.5 mW/cm^2 έως 3 mW/cm^2 , προκύπτει εύκολα ο παρακάτω πίνακας τιμών της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοτρανζίστορ και της τάσης εξόδου του κυκλώματος, καθώς και το αντίστοιχο διάγραμμα.

$E \text{ (mW/cm}^2\text{)}$	$V_{\text{out}} \text{ (V)}$
0.5	11.70
1.0	10.80
1.5	9.30
2.0	7.20
2.5	4.50
3.0	1.20





Τέλος 6ης ενότητας