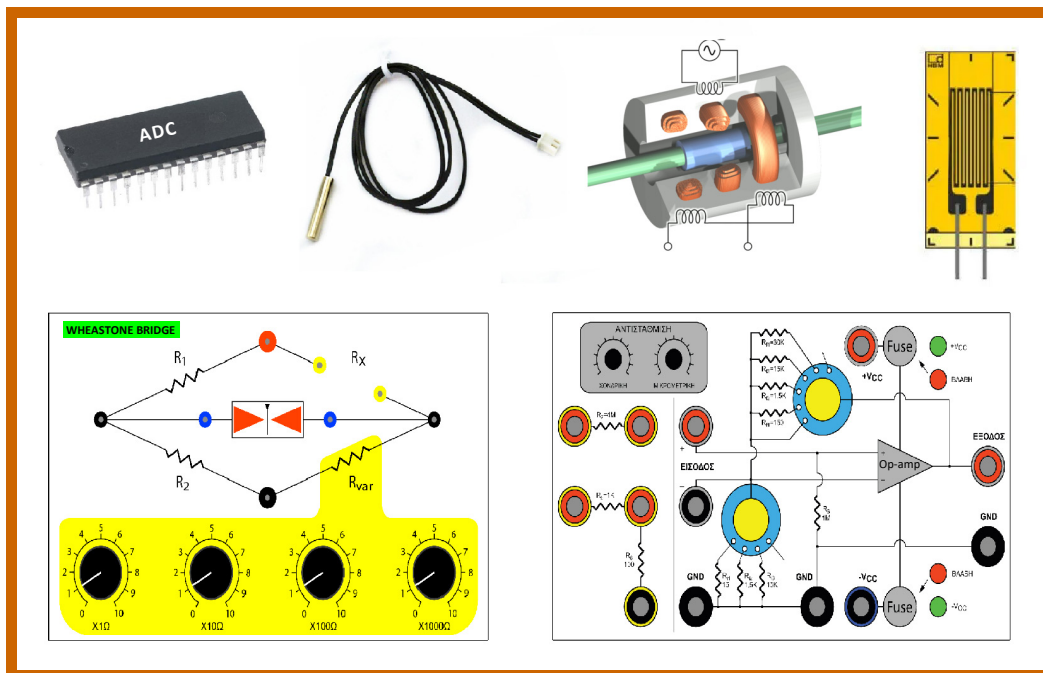


ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

– ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ –



Λάμπρος Μπισδούνης
Καθηγητής

Πάτρα 2021



ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Εργαστήριο συστημάτων μέτρησης και αισθητήρων

- Το εργαστηριακό μέρος του μαθήματος αφορά την κατανόηση, μελέτη και πειραματική εξοικείωση των φοιτητών με τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων, με τα κυκλώματα ρύθμισης των συστημάτων μέτρησης, με τεχνικές μέτρησης θερμοκρασίας και μετατόπισης και μηχανικής τάσης (παραμόρφωσης), καθώς και με τεχνικές μετατροπής αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά και αντίστροφα.
- Τα αντικείμενα που εξετάζονται στα πλαίσια των εργαστηριακών ασκήσεων στη διάρκεια ενός εξαμήνου είναι:
 - ✓ μελέτη μετατροπέων αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά και αντίστροφα,
 - ✓ μελέτη χαρακτηριστικών του θερμοζεύγους και μέτρηση θερμοκρασίας,
 - ✓ μελέτη χαρακτηριστικών του θερμίστορ και μέτρηση θερμοκρασίας,
 - ✓ μελέτη του γραμμικού μεταβλητού διαφορικού μετασχηματιστή (LVDT) και μέτρηση μετατόπισης,
 - ✓ μελέτη μετρητή μηχανικής τάσης (πιεζοαντίστασης) και εφαρμογών του.

Α. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ



Αισθητήρες

- Οι **αισθητήρες** είναι συσκευές που ανιχνεύουν ένα σήμα ή μία διέγερση και παράγουν από αυτό μία μετρήσιμη έξοδο.
- Είναι διαθέσιμες διαφορετικές μορφές αισθητήρων, σχεδιασμένες να **μετρούν** διάφορες **φυσικές παραμέτρους**.
- Φυσικές παράμετροι που συναντώνται συχνά και απαιτούν μέτρηση είναι η θέση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση αντικειμένων, η ροή και η στάθμη υγρών, η δύναμη, η πίεση και η θερμοκρασία.
- Υπάρχουν ακόμη και ειδικότεροι αισθητήρες που μπορούν να ανιχνεύσουν και να μετρήσουν χημικές ποσότητες, ήχο, ακτινοβολία κλπ.
- Η **επιλογή** ενός **αισθητήρα** εξαρτάται από τη φύση των παραμέτρων που πρέπει να μετρηθούν, καθώς και από άλλους παράγοντες, όπως: κόστος, αξιοπιστία, ακρίβεια, ευαισθησία, διακριτική ικανότητα, χρόνος και χώρος αξιοποίησης της απαιτούμενης πληροφορίας, περιβάλλον χρήσης.

Αισθητήρες

- Υπάρχουν δύο πεδία στα οποία χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες: η **συλλογή πληροφορίας (μέτρηση)** και ο **έλεγχος συστημάτων**. Η χρήση της τεχνολογίας αισθητήρων στα πεδία αυτά διαφέρει ως προς τον **τρόπο αξιοποίησης της πληροφορίας** που λαμβάνεται από τους αισθητήρες.
- Οι αισθητήρες ως **ανιχνευτές συλλογής πληροφορίας** παρέχουν πληροφορία με στόχο να είναι διαρκώς γνωστή και κατανοητή η τρέχουσα κατάσταση των παραμέτρων ενός συστήματος (π.χ. ανιχνευτής – ταχύμετρο αυτοκινήτου).
- Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καταγράφουν και να παρέχουν μία εικόνα της εξέλιξης των παραμέτρων του συστήματος (π.χ. ταχογράφος).
- Οι **αισθητήρες συστημάτων ελέγχου** είναι της ίδιας μορφής, αλλά συνήθως τροφοδοτούν **ελεγκτή** ο οποίος παράγει μία νέα έξοδο που ρυθμίζει την τιμή της μετρούμενης παραμέτρου.
- **Παράδειγμα:** anti-lock brake system (ABS), στο οποίο ένας αισθητήρας 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.
- Σήμερα χρησιμοποιούνται υπερσύγχρονοι επεξεργαστές με χαμηλό κόστος ως ελεγκτές, των οποίων όμως η αξιοποίηση θα ήταν πολύ δύσκολη εάν δεν τροφοδοτούσαν από τις κατάλληλες πληροφορίες που συλλέγονται από αποδοτικούς και αξιόπιστους αισθητήρες.

Εύρος λειτουργίας

- **Εύρος λειτουργίας ή περιοχή τιμών εισόδου (full-scale input, FSI)**: όρια στα οποία ένας αισθητήρας λειτουργεί αξιόπιστα (μέγιστη και ελάχιστη τιμή της μετρούμενης παραμέτρου που μπορεί να μετρήσει).
- Εκφράζεται συνήθως ως τη διαφορά της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της μετρούμενης ποσότητας που ο αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει: $r_i = X_{\max} - X_{\min}$.
- Αντίστοιχα, το **εύρος λειτουργίας ή περιοχή τιμών εξόδου (full-scale output, FSO)** αφορά τη μέγιστη μεταβολή της εξόδου ενός αισθητήρα: $r_o = Y_{\max} - Y_{\min}$.
- Επιπλέον στις προδιαγραφές των αισθητήρων, ως εύρος λειτουργίας συχνά αναφέρεται το θερμοκρασιακό εύρος, το εύρος τιμών πίεσης ή το εύρος τιμών υγρασίας, εννοώντας την περιοχή τιμών θερμοκρασίας, πίεσης ή υγρασίας αντίστοιχα, στην οποία είναι δυνατή η χρήση του αισθητήρα.

Ακρίβεια

- **Ακρίβεια (accuracy)**: είναι ο βαθμός εγγύτητας της τιμής που μετράει ο αισθητήρας προς την πραγματική τιμή.
- Στους αισθητήρες η ακρίβεια αφορά την εγγύτητα της τιμής εξόδου του αισθητήρα προς τη μετρούμενη τιμή και εκφράζεται ως καθαρός αριθμός μικρότερος ή ίσος το 1 (**σχετική ακρίβεια**) ή ως ποσοστό (**εκατοστιαία ακρίβεια**).

$$A_{\text{σχετ.}} = 1 - \left| \frac{r - x}{r} \right|$$

$$A (\%) = \left(1 - \left| \frac{r - x}{r} \right| \right) \cdot 100$$

r : μετρούμενη τιμή (πραγματική)

x : τιμή εξόδου αισθητήρα
(αποτέλεσμα μέτρησης)

Παράδειγμα: σε θερμοόμετρο ακρίβειας 0.98 ή 98% εάν η μέτρηση είναι 20.5 °C, τότε η πραγματική θερμοκρασία βρίσκεται μεταξύ των τιμών 20.1 και 20.9 °C.

Σφάλμα

- **Σφάλμα (error)**: ενός αισθητήρα ή συστήματος μέτρησης είναι η διαφορά ανάμεσα στη έξοδο του αισθητήρα ή του συστήματος και την μετρούμενη (πραγματική τιμή) και εκφράζεται ως προς τις μονάδες της μετρούμενης ποσότητας (**απόλυτο σφάλμα**) και ως **σχετικό** (καθαρός αριθμός) ή **εκατοστιαίο σφάλμα** (ποσοστό).

$$e_{\text{απ.}} = |r - x|$$

$$e_{\text{σχετ.}} = \frac{|r - x|}{r}$$

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

r : μετρούμενη τιμή (πραγματική)

x : τιμή εξόδου αισθητήρα
(αποτέλεσμα μέτρησης)

Παράδειγμα: σε θερμόμετρο με απόλυτο σφάλμα μετρήσεων ± 0.4 °C, εάν η μέτρηση είναι 20.5 °C, τότε η πραγματική θερμοκρασία βρίσκεται μεταξύ των τιμών 20.1 και 20.9 °C. Ομοίως, εάν το εκατοστιαίο σφάλμα των μετρήσεων είναι 2%.

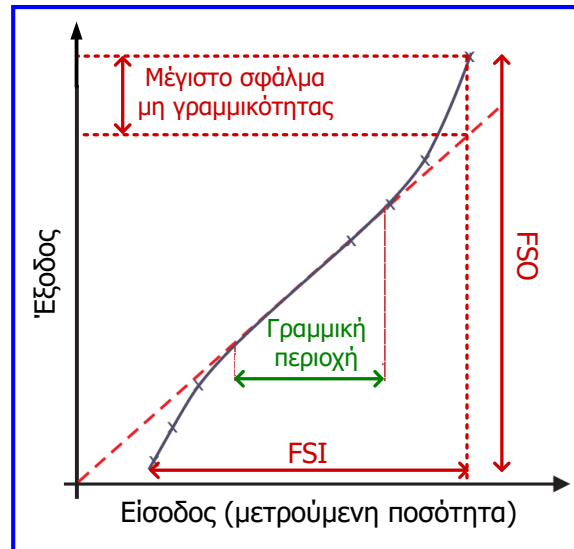
- Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες σφαλμάτων: τα **συστηματικά σφάλματα**, και τα **τυχαία ή στατιστικά σφάλματα**.
- **Συστηματικά σφάλματα**, είναι τα σφάλματα τα οποία επηρεάζουν συστηματικά και με τον ίδιο τρόπο όλες τις μετρήσεις. Τέτοια είναι τα σφάλματα που οφείλονται στη λάθος βαθμονόμηση ή σε περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Σφάλμα

- Για παράδειγμα η χρήση ενός θερμομέτρου του οποίου η κλίμακα βαθμονόμησης έχει μετατοπιστεί, θα έχει ως αποτέλεσμα το μηδέν της κλίμακας να μην αντιστοιχεί σε 0 °C, και επομένως όλες οι μετρήσεις θα είναι μετατοπισμένες από την πραγματική θερμοκρασία κατά αυτή τη διαφορά.
- Τα συστηματικά σφάλματα τις περισσότερες φορές μπορούν να αναγνωρισθούν και να διορθωθούν κατά την ανάλυση των μετρήσεων.
- Για παράδειγμα στην περίπτωση του θερμομέτρου, μετρώντας τη θερμοκρασία πάγου που λιώνει ή αποσταγμένου νερού που βράζει για τα οποία γνωρίζουμε την πραγματική τους θερμοκρασία, μπορούμε να εκτιμήσουμε αποκλίσεις της κλίμακας και να τις προσθέσουμε αλγεβρικά σε όλες τις μετρήσεις.
- Τα **τυχαία σφάλματα** επηρεάζουν όλες τις μετρήσεις αλλά με τυχαίο τρόπο και επομένως δεν μπορούν να αφαιρεθούν κατά την επεξεργασία τους.
- Τα τυχαία σφάλματα οφείλονται σε ατέλειες της πειραματικής διάταξης και στην πεπερασμένη ακρίβεια των μετρητικών οργάνων σε συνδυασμό με την επίδραση των αισθήσεων μας. Επίσης, τυχαίες και μη ελεγχόμενες μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις μας κατά μη επαναλήψιμο τρόπο.
- Το μέγιστο ποσοστό σφάλματος που μπορεί να υπάρξει κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός αισθητήρα αναφέρεται ως **ανοχή (tolerance)**.

Γραμμικότητα

- **Γραμμικότητα (linearity)**: βαθμός κατά τον οποίο οι μεταβολές της μετρούμενης παραμέτρου (είσοδος αισθητήρα) προκαλούν μεταβολές της εξόδου του αισθητήρα με ανάλογο τρόπο, ιδιότητα με βάση την οποία η γραφική παράσταση της εξόδου ως προς την είσοδο του αισθητήρα να είναι μία ευθεία γραμμή.
- Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός σε μία περιοχή τιμών εισόδου και τότε η **γραμμικότητά του εκφράζεται ως ποσοστό της περιοχής τιμών εξόδου του**.
- Η ιδιότητα αυτή είναι σημαντική για έναν αισθητήρα, αφού στην περίπτωση κατά την οποία υφίσταται γραμμικότητα σε όλο το εύρος (περιοχή τιμών) εισόδου του αισθητήρα, για τη **βαθμονόμησή** του αρκούν οι τιμές της εξόδου δύο επιβεβαιωμένες τιμές εισόδου.
- Συνήθως, η σχέση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου είναι **μη γραμμική**.
- Για **μία τιμή εισόδου**, η διαφορά μεταξύ της τιμής εξόδου του αισθητήρα και της τιμής εξόδου που προκύπτει από την ιδανική (γραμμική) χαρακτηριστική του αισθητήρα, είναι το **σφάλμα μη γραμμικότητας**, που εκφράζεται στη μονάδα μέτρησης εξόδου ή ως **ποσοστό της περιοχής τιμών εξόδου (FSO)**.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

A.9

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ευαισθησία

- **Ευαισθησία (sensitivity)**: είναι η σχέση της μεταβολής εξόδου ενός αισθητήρα με τη μεταβολή της εισόδου του και εκφράζεται από το λόγο της μεταβολής της εξόδου προς την αντίστοιχη αλλαγή της εισόδου. Όσο πιο υψηλή τιμή λαμβάνει η έξοδος ενός αισθητήρα για κάθε μονάδα της μετρούμενου παραμέτρου (είσοδος αισθητήρα) τόσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία του αισθητήρα.

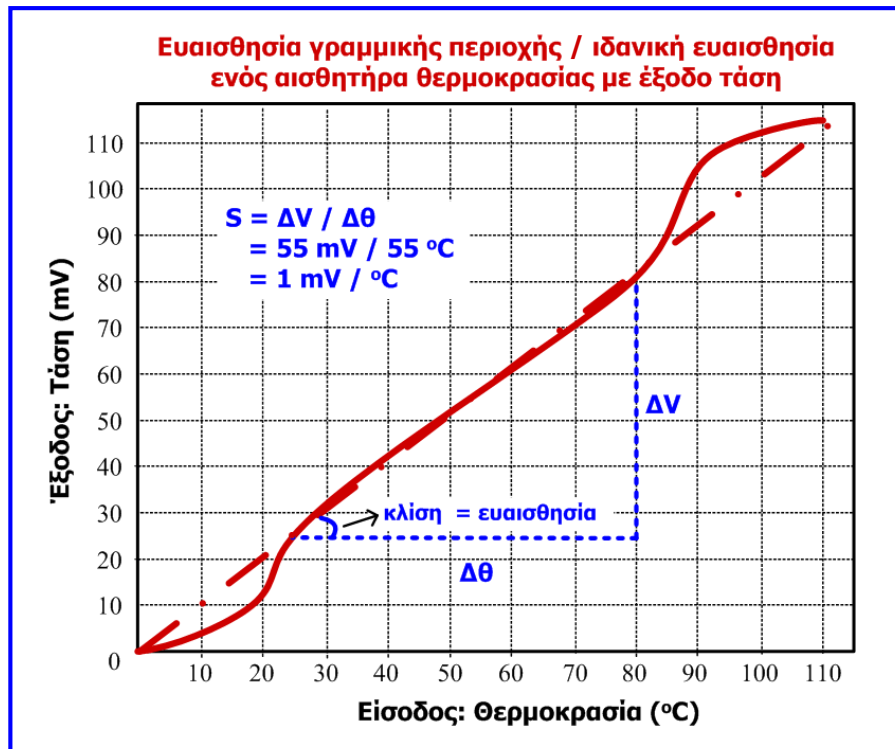
$$\text{Ευαισθησία (S)} = \frac{[\text{Μέγιστη τιμή εξόδου}] - [\text{Ελάχιστη τιμή εξόδου}]}{[\text{Μέγιστη τιμή εισόδου}] - [\text{Ελάχιστη τιμή εισόδου}]}$$

- Οι **μονάδες μέτρησης της ευαισθησίας** διαφέρουν ανάλογα με τη φύση του αισθητήρα και τη μετρούμενη ποσότητα (π.χ. Volt/mm σε αισθητήρα που μετρά μικρή μετατόπιση ενός αντικειμένου και παρέχει ως έξοδο τάση).
- Εάν η σχέση ανάμεσα στη μετρούμενη ποσότητα (είσοδο) και την έξοδο είναι **γραμμική**, η ευαισθησία είναι μία για όλο το εύρος λειτουργίας, εάν όχι τότε η ευαισθησία διαφέρει από περιοχή σε περιοχή, κάτι που είναι σύνηθες στα συστήματα μέτρησης.
- Όταν η καμπύλη της εξόδου του αισθητήρα ως προς την είσοδο, προσεγγίζεται με γραμμική συνάρτηση για όλο το εύρος τιμών εισόδου και εξόδου, τότε η ευαισθησία που υπολογίζεται αποτελεί την **ιδανική ευαισθησία (virtual sensitivity)** του αισθητήρα.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

A.10

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



Διακριτική ικανότητα

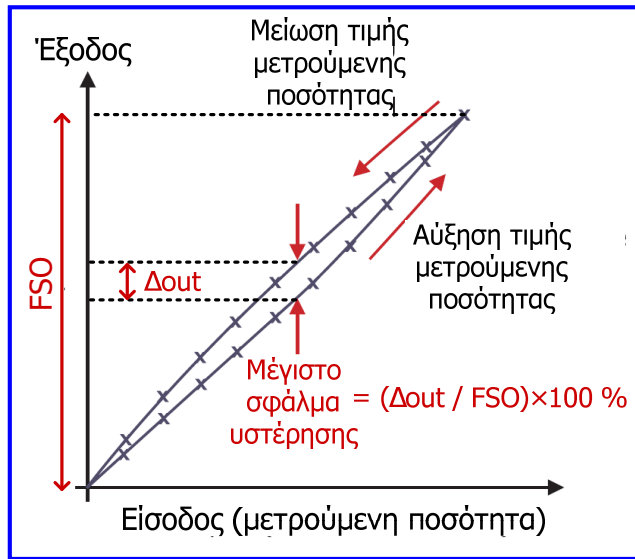
- **Διακριτική ικανότητα (resolution):** αναφέρεται στη μικρότερη αλλαγή εισόδου (Δx) που μπορεί να ανιχνεύσει (μετρήσει) ένας αισθητήρας.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα, τόσο μικρότερο είναι το βήμα που μπορεί να μετρηθεί.
- Εκφράζεται με τη μικρότερη αλλαγή εισόδου (Δx) που μπορεί να μετρηθεί (και αναφέρεται ως **βήμα διακριτότητας**) ή ως το ποσοστό του λόγου του βήματος διακριτότητας προς την περιοχή τιμών εισόδου του αισθητήρα (FSI):

$$\text{Διακριτική ικανότητα} = \frac{\Delta x}{r_i} \cdot 100 (\%)$$

- Η διακριτική ικανότητα, όπως και αρκετά από τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων, αποτελεί γενικότερο χαρακτηριστικό των οργάνων / συστημάτων μέτρησης.
- **Παράδειγμα:** η διακριτική ικανότητα ενός ψηφιακού βολτομέτρου με ενδείκτη (display) 3 ψηφίων και μέγιστη ένδειξη 99.9 V είναι 0.1 V (βήμα διακριτότητας) ή $(0.1 / 99.9) \cdot 100 = 0.1 \%$.
- Αυτό γίνεται προφανές, αφού για παράδειγμα το όργανο μπορεί να διακρίνει και να μας δείξει τις τιμές τάσης 12.4 V και 12.5 V, αλλά δε έχει τη δυνατότητα να διακρίνει τιμές μεταξύ αυτών.

Υστέρηση

- Η **υστέρηση (hysteresis)** είναι χαρακτηριστικό ενός αισθητήρα που προκαλεί διαφορές στην έξοδό του, όταν η κατεύθυνση μεταβολής της εισόδου του αντιστραφεί (από αυξανόμενη γίνει μειούμενη ή αντιστρόφως).
- Υστέρηση εμφανίζεται συνήθως σε αισθητήρες με κινητά μέρη που επηρεάζονται από τριβή, μηχανική τάση ή μαγνητικά φαινόμενα.
- Η απόκλιση των λαμβανομένων μετρήσεων (τιμών εξόδου) για την ίδια τιμή εισόδου, αλλά για διαφορετική κατεύθυνση μεταβολής της, αναφέρεται ως **σφάλμα υστέρησης** και για κάθε τιμή εισόδου εκφράζεται ως η **διαφορά των τιμών εξόδου** ή ως **ποσοστό της περιοχής τιμών εξόδου (FSO)** του αισθητήρα:



$$\text{Σφάλμα υστέρησης} = \frac{\text{Διαφορά τιμών εξόδου για την ίδια είσοδο}}{\text{FSO}} \cdot 100 (\%)$$

Επαναληψιμότητα

- Προηγούμενες μεταβολές της εισόδου ενός αισθητήρα μπορεί να επηρεάζουν την τιμή της μέτρησης με αποτέλεσμα να είναι πιθανή η εμφάνιση αποκλίσεων μεταξύ επαναλαμβανόμενων μετρήσεων της ίδιας τιμής της εισόδου του αισθητήρα.
- **Επαναληψιμότητα (repeatability)**: βαθμός κατά τον οποίο ο αισθητήρας παράγει το ίδιο αποτέλεσμα όταν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές τροφοδοτείται με την ίδια είσοδο (εκφράζεται σε απόλυτο νούμερο ή ως ποσοστό). Αναφέρεται και ως **ευστοχία (precision)**.
- Δεν πρέπει να συγχέεται με την ακρίβεια, αφού ένας αισθητήρας μπορεί να δίνει παρόμοια έξοδο πολλές φορές για συγκεκριμένη είσοδο, αλλά εάν υπάρχει σημαντικό σφάλμα, η έξοδος δεν είναι ακριβής.



Υψηλή ακρίβεια,
χαμηλή επαναληψιμότητα

Υψηλή επαναληψιμότητα
χαμηλή ακρίβεια

Υψηλή ακρίβεια και
επαναληψιμότητα

$$P = 1 - |(x-m)/m| \quad (\text{ή } \%)$$

x: έξοδος (αποτέλεσμα μέτρησης)

m: μέση τιμή σειράς εξόδων (μετρήσεων) για την ίδια είσοδο

Επαναληψιμότητα

Παράδειγμα: Για να ελέγξουμε την ποιότητα του επιλογέα θερμοκρασίας ενός οικιακού φούρνου τον θέτουμε στους 100 °C και εκτελούμε μία σειρά μετρήσεων. Εάν η ακολουθία μετρήσεων είναι: {99°C , 103°C , 100°C , 97°C , 100°C , 103°C , 98°C, 107°C, 106°C , 98°C}, να προσδιορίσετε την επαναληψιμότητα για την τέταρτη μέτρηση.

Ο μέσος όρος της ακολουθίας των μετρήσεων είναι:

$$m = (99+103+100+97+100+103+98+107+106+98) / 10 = 101.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Επομένως, η επαναληψιμότητα για την τέταρτη μέτρηση είναι:

$$P = 1 - |(x-m)/m|$$

x : μέτρηση

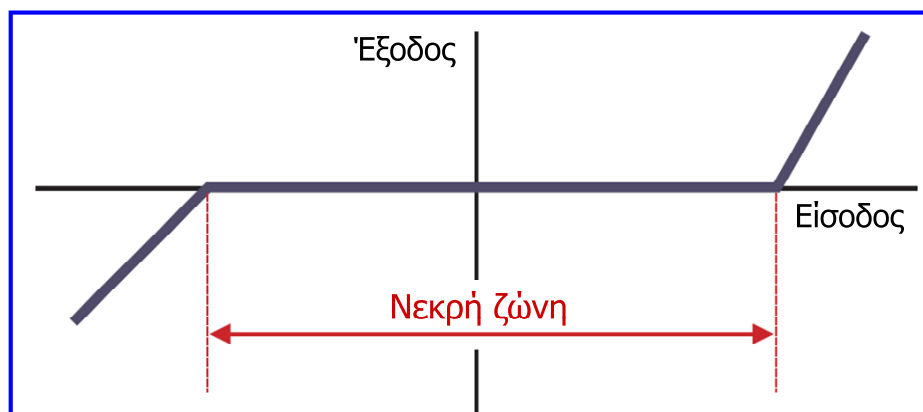
m : μέση τιμή ακολουθίας μετρήσεων για την ίδια είσοδο

$$P = 1 - |97 - 101.1| / 101.1 = 0.96 \text{ ή } 96\%$$

Το αποτέλεσμα που προέκυψε σημαίνει ότι η τέταρτη μέτρηση είναι κοντά στις υπόλοιπες μετρήσεις κατά ποσοστό 96%.

Νεκρή ζώνη

- **Νεκρή ζώνη (dead-zone, dead-band):** μέγιστη αλλαγή της μετρούμενης παραμέτρου (εισόδου του αισθητήρα) που δεν προκαλεί αλλαγή στην έξοδο του αισθητήρα.
- Η εν λόγω μέγιστη αλλαγή της εισόδου του αισθητήρα πέρα από την οποία γίνεται αντιληπτή η μεταβολή της εισόδου, αναφέρεται και ως **κατώφλι**.
- Η νεκρή ζώνη είναι συχνά αποτέλεσμα της μηχανικής δομής ενός αισθητήρα όταν σε αυτή υπεισέρχεται τριβή μεταξύ των μηχανικών μερών.



Άλλα χαρακτηριστικά των αισθητήρων

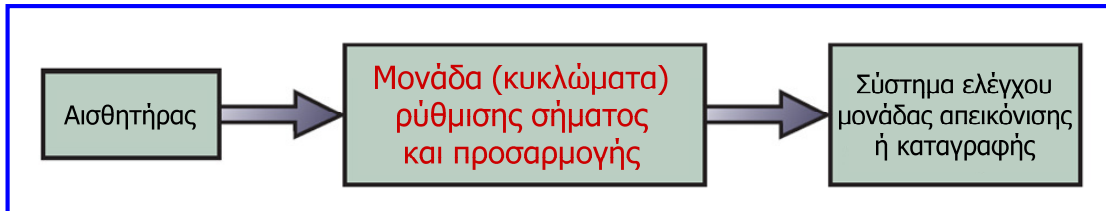
- **Απόκριση (response):** χρόνος που απαιτείται για να λάβει η έξοδος ενός αισθητήρα την τελική της τιμή, για μία δεδομένη είσοδο. Εκφράζεται σε μονάδες χρόνου ή σε ποσοστό της τελικής τιμής εξόδου (π.χ. απόκριση 95% = 3 sec, δηλ. 3 sec για να φτάσει η έξοδος στο 95% της τελικής τιμής της).
- **Ολίσθηση (drift):** φυσική τάση ενός αισθητήρα ή συστήματος να μεταβάλει τα χαρακτηριστικά του με το χρόνο λόγω γήρανσης υλικών και λόγω περιβαλλοντικών μεταβολών (π.χ. μεταβολή θερμοκρασίας), που συχνά οδηγεί σε εμφάνιση μεταβολής στην έξοδο του αισθητήρα, ενώ η είσοδος του παραμένει αμετάβλητη.
- **Καθυστέρηση (lag):** καθυστέρηση αλλαγής της τιμής εξόδου ενός αισθητήρα ως προς την αλλαγή της εισόδου του (σε sec ή κλάσματα sec).
- **Χρόνος λειτουργίας (operating life):** χρονικό διάστημα κατά το οποίο αναμένεται να λειτουργεί ο αισθητήρας στα πλαίσια των προδιαγραφών του. Εκφράζεται σε μονάδες χρόνου ή πλήθος κύκλων λειτουργίας.
- **Αξιοπιστία (reliability):** ικανότητα του αισθητήρα να λειτουργήσει στα πλαίσια των προδιαγραφών του, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και για μία δεδομένη περίοδο ή πλήθος κύκλων λειτουργίας. Συγγενές χαρακτηριστικό με το χρόνο λειτουργίας.
- **Ευστάθεια (stability):** μέτρο μεταβολής της εξόδου μίας συσκευής, όταν η είσοδος και οι συνθήκες μέτρησης παραμένουν σταθερές, κατά τη διάρκεια μεγάλης χρονικής περιόδου.

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ



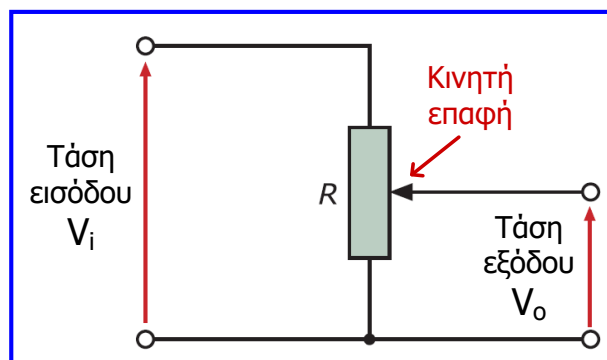
Κυκλώματα ρύθμισης συστημάτων μέτρησης

- Συνήθως, δεν υπάρχει συμβατότητα των ηλεκτρικών σημάτων που παράγουν οι αισθητήρες με τα συστήματα ελέγχου των συσκευών απεικόνισης και καταγραφής.
- Επομένως, απαιτούνται κατάλληλες τεχνικές για την **τροποποίηση (ρύθμιση)** των σημάτων αυτών καθώς και κατάλληλη **προσαρμογή (διασύνδεση)**, ώστε η συνλειτουργία αισθητήρων και συσκευών απεικόνισης και καταγραφής να είναι σωστή και αποδοτική.



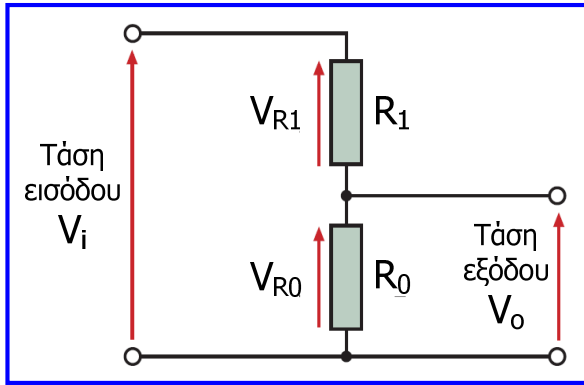
- Το **σήμα εξόδου** ενός **αισθητήρα** μπορεί να χρειάζεται **υποβιβασμό** ώστε να μπορεί να το χειριστεί μία συσκευή απεικόνισης.
- Επίσης, η **αλλαγή** μιας **αντίστασης** που είναι αποτέλεσμα της λειτουργίας ενός **αισθητήρα** μπορεί να απαιτεί **βαθμονόμηση** σε **μονάδες τάσης**.
- Μία κατηγορία τεχνικών ρύθμισης σήματος, περιλαμβάνει τις τεχνικές που χρησιμοποιούν **παθητικά στοιχεία**, όπως το **ποτενσιόμετρο** (διαίρετης τάσης) και η γέφυρα **Wheatstone**.

Ποτενσιόμετρο



- Το ποτενσιόμετρο είναι κύκλωμα που μας επιτρέπει να λάβουμε μία χαμηλότερη τάση από μία υψηλότερη τάση.
- Η τάση εξόδου του αποτελεί ποσοστό της τάσης εισόδου.
- Εάν η έξοδος ενός αισθητήρα είναι υπερβολικά υψηλή, για να χρησιμοποιηθεί σωστά από μία συσκευή απεικόνισης ή καταγραφής, τότε την υποβιβάζουμε (τη διαιρούμε) ανάλογα με τη βοήθεια ενός ποτενσιόμετρου.
- Εάν ο παράγοντας κατά τον οποίο υποβιβάστηκε η τάση είναι γνωστός, τότε μπορούμε να βαθμονομήσουμε τις τιμές που εμφανίζονται στη συσκευή απεικόνισης ή καταγραφής με βάση αυτόν τον παράγοντα.

Ποτενσιόμετρο



Εάν στην έξοδο του ποτενσιόμετρου συνδεθεί αντίσταση φορτίου (όπως γίνεται και στην πράξη με κάθε συσκευή απεικόνισης ή καταγραφής), η σχέση μεταξύ τάσης εισόδου και εξόδου παύει να ισχύει και τάση εξόδου θα μειωθεί, αφού ένα ποσοστό του ρεύματος δεν περνάει από την R_0 , αλλά κατευθύνεται στην αντίσταση φορτίου.

R_0, R_1 : τμήματα της αντίστασης R , οι τιμές των οποίων μεταβάλλονται όταν αλλάζει η θέση της κινητής επαφής.

Εάν δεν κατευθύνεται ρεύμα στην έξοδο:

$$I = \frac{V_i}{R_1 + R_0}$$

$$V_o = V_{R_0} = I \cdot R_0$$

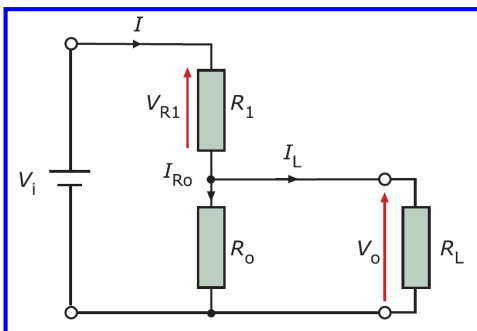
$$V_i = V_{R_0} + V_{R_1} = I \cdot R_0 + I \cdot R_1$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_0}{R_1 + R_0} \Rightarrow V_o = V_i \left(\frac{R_0}{R_1 + R_0} \right)$$

Παράγοντας υποβιβασμού τάσης εισόδου

Ποτενσιόμετρο

- Η επίδραση της αντίστασης φορτίου στον παράγοντα υποβιβασμού του ποτενσιόμετρου πρέπει να μειωθεί όσο περισσότερο είναι δυνατό.
- Εάν μειωθεί το τμήμα του ρεύματος που κατευθύνεται προς την αντίσταση φορτίου, τότε θα μειωθεί και η επίδραση της αντίστασης φορτίου στον παράγοντα υποβιβασμού.



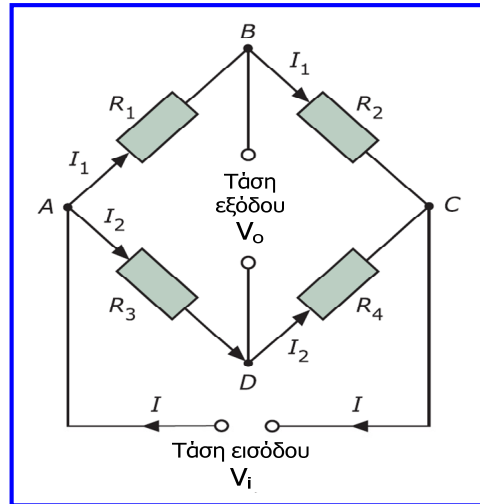
$$V_o = V_i \left(\frac{R_E}{R_1 + R_E} \right)$$

$$R_E = \frac{R_0 \cdot R_L}{R_0 + R_L}$$

- Όσο μεγαλύτερη είναι η R_L , τόσο μικρότερο ρεύμα θα την διαρρέει και επομένως τόσο μικρότερη θα είναι και η επίδραση στην τάση εξόδου και στον παράγοντα υποβιβασμού.
- Όσο λοιπόν **αυξάνεται η αντίσταση του φορτίου, μειώνεται το σφάλμα** που προκαλείται στη λειτουργία του ποτενσιόμετρου (δηλ. στη διαίρεση τάσης).
- Στην πράξη, η **αντίσταση φορτίου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 100 φορές μεγαλύτερη από την R_0** , για να διασφαλιστεί **σφάλμα όχι μεγαλύτερο του 1%**.

Γέφυρα Wheatstone

- Πολλά είδη αισθητήρων μετρούν διάφορες **φυσικές παραμέτρους** με τη βοήθεια της **αλλαγής μιας αντίστασης**.
- Για τη μέτρηση των παραμέτρων αυτών, θα πρέπει η αλλαγή της αντίστασης που συμβαίνει να βαθμονομείται ως προς την παράμετρο που μετρείται.
- Όταν αλλάζει η αντίσταση ενός κυκλώματος, αλλάζουν αναλογικά η τάση και το ρεύμα σε αυτό.



- Συνεπώς, **η τάση ή το ρεύμα θα αποτελούν ένα μέτρο της φυσικής παραμέτρου** που προκαλεί την αλλαγή της αντίστασης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε μία συσκευή απεικόνισης ή καταγραφής.
- Η **γέφυρα Wheatstone είναι κύκλωμα που παρέχει μία περίπου γραμμική σχέση ανάμεσα στην τάση εξόδου της και την αλλαγή σε μία από τις αντιστάσεις** της, οπότε είναι ιδιαίτερα χρήσιμη ως σύστημα ρύθμισης σημάτων.

Γέφυρα Wheatstone

- Η αντίσταση των μεταλλικών αγωγών αυξάνεται όταν αυξάνεται η **θερμοκρασία** τους.

$$R_{\theta} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta)$$

Παράδειγμα 1

R_0 : αντίσταση σε Ω του αγωγού μετάλλου σε θερμοκρασία $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

R_{θ} : αντίσταση σε Ω του αγωγού μετάλλου σε θερμοκρασία $\theta \text{ }^{\circ}\text{C}$.

α : θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης σε $1/^{\circ}\text{C}$, που λαμβάνει διαφορετική τιμή για κάθε μέταλλο (π.χ. χαλκός: $4.3 \cdot 10^{-3}$, λευκόχρυσος: $3.9 \cdot 10^{-3}$).

- Η αντίσταση ενός μεταλλικού νηματιδίου, δίνεται ως εξής:

Παράδειγμα 2

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

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

l : μήκος νηματιδίου (m)

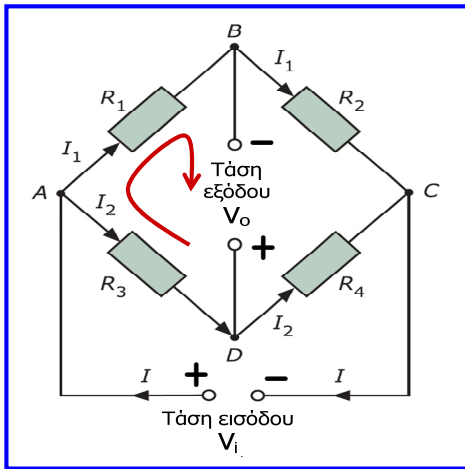
A : εμβαδόν διατομής νηματιδίου (m^2)

Η αλλαγή του A ή του l του νηματιδίου προκαλεί αλλαγή της αντίστασης R (π.χ. ο εφελκυσμός του νηματιδίου προκαλεί αύξηση του l και μείωση του A και επομένως αύξηση της αντίστασης R), επομένως ο μετρητής χρησιμοποιεί το γεγονός αυτό για τη μέτρηση **μηχανικής τάσης (καταπόνησης)**.

Γέφυρα Wheatstone

$$V_o = 0 \Rightarrow V_B = V_D \Rightarrow V_{R_1} = V_{R_3} \Rightarrow I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_3$$

$$V_o = 0 \Rightarrow V_B = V_D \Rightarrow V_{R_2} = V_{R_4} \Rightarrow I_1 \cdot R_2 = I_2 \cdot R_4$$



$$\frac{I_1 \cdot R_1}{I_1 \cdot R_2} = \frac{I_2 \cdot R_3}{I_2 \cdot R_4} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Βασική ιδιότητα της γέφυρας σε κατάσταση ισορροπίας ($V_o = 0$)

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1 + R_2} \quad I_2 = \frac{V_i}{R_3 + R_4}$$

$$-I_2 \cdot R_3 + I_1 \cdot R_1 - V_o = 0 \Rightarrow V_o = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_3$$

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

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

Γέφυρα Wheatstone

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

Επιθυμούμε να εξάγουμε μία γραμμική σχέση μεταξύ της μεταβολής μίας εκ των αντιστάσεων (έστω της R_1) και της αλλαγής της τάσης εξόδου.

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

Αφαιρούμε τις παραπάνω σχέσεις:

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

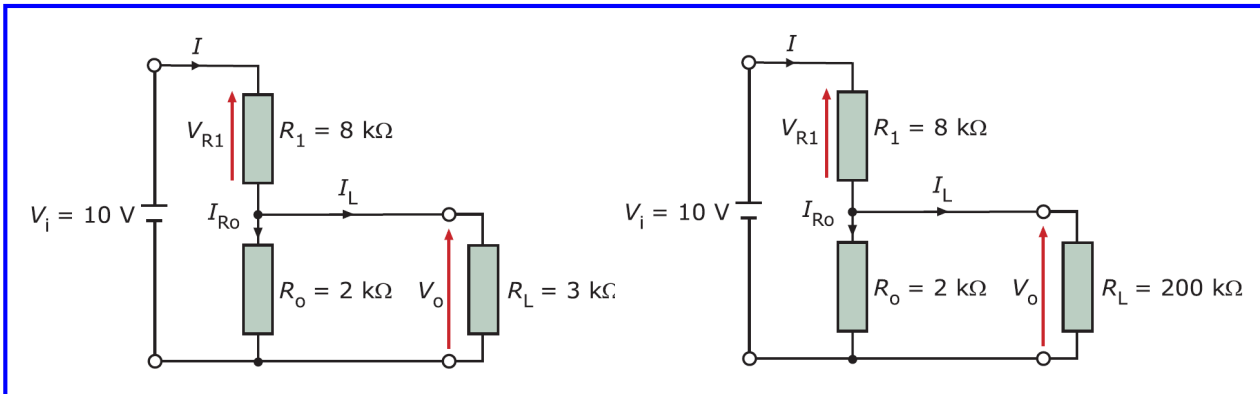
$$\Delta V_o \approx V_i \cdot \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow$$

$$\Delta V_o \approx V_i \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad \text{Γραμμική σχέση μεταξύ } \Delta R_1 \text{ και } \Delta V_o$$

Εφόσον δηλαδή, η ΔR_1 είναι πολύ μικρότερη από την R_1 και η συσκευή απεικόνισης ή καταγραφής (φορτίο) λαμβάνει πολύ λίγο ρεύμα σε σύγκριση με αυτό που κυκλοφορεί στη γέφυρα, μπορούμε να θεωρήσουμε τη ΔV_o ανάλογη της ΔR_1 , ιδιότητα που καθιστά τη γέφυρα χρήσιμο κύκλωμα για τη δημιουργία ρυθμισμένου σήματος από εξόδους αισθητήρων που υφίστανται αλλαγή αντίστασης.

Παράδειγμα 1

Η μόνη διαφορά που έχουν τα κυκλώματα του σχήματος είναι ότι στο πρώτο η αντίσταση φορτίου είναι 3 kΩ, ενώ στο δεύτερο είναι 200 kΩ. Και στα δύο κυκλώματα η τάση εισόδου είναι 10 V και η κινητή επαφή του ποτενσιόμετρου βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε χωρίς αντίσταση φορτίου η αντίσταση στους ακροδέκτες της τάσης εξόδου να είναι 2 kΩ και η υπόλοιπη αντίσταση 8 kΩ. Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου όταν δεν υπάρχει αντίσταση φορτίου, αλλά και στις περιπτώσεις των δύο κυκλωμάτων του σχήματος. Να διερευνήσετε το εκατοστιαίο σφάλμα που προκύπτει στα κυκλώματα που ακολουθούν σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν υφίσταται αντίσταση φορτίου.



Παράδειγμα 1

Από τη σχέση λειτουργίας του διαιρέτη τάσης **χωρίς αντίσταση φορτίου**, προκύπτει ότι:

$$V_o = V_i \left(\frac{R_0}{R_1 + R_0} \right) = 2 \text{ V}$$

Στην περίπτωση του πρώτου κυκλώματος (αντίσταση φορτίου 3 kΩ):

$$R_E = \frac{R_0 \cdot R_L}{R_0 + R_L} = 1.2 \text{ k}\Omega$$

$$V_o = V_i \left(\frac{R_E}{R_1 + R_E} \right) = 1.3 \text{ V}$$

$$e(\%) = \frac{2 - 1.3}{2} 100 = 35\%$$

Στην περίπτωση του δεύτερου κυκλώματος (αντίσταση φορτίου 200 kΩ):

$$R_E = \frac{R_0 \cdot R_L}{R_0 + R_L} = 1.9802 \text{ k}\Omega$$

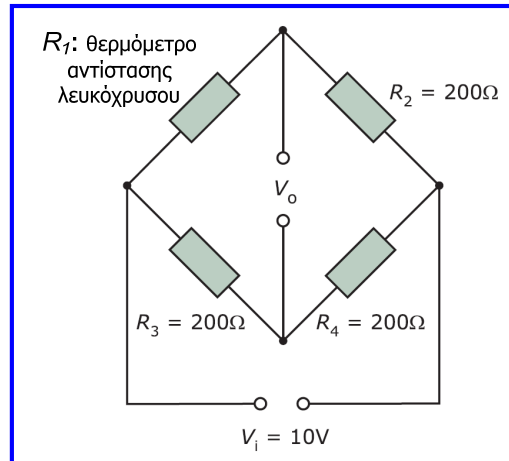
$$V_o = V_i \left(\frac{R_E}{R_1 + R_E} \right) = 1.984 \text{ V}$$

$$e(\%) = \frac{2 - 1.984}{2} 100 = 0.8\%$$

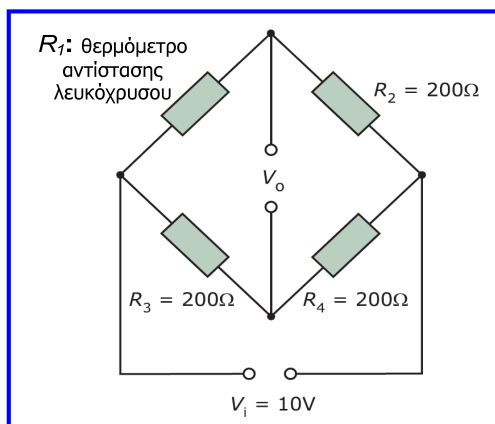
Παρατηρούμε λοιπόν ότι όταν χρησιμοποιηθεί αντίσταση φορτίου ($R_L = 200 \text{ k}\Omega$) 100 φορές μεγαλύτερη από την R_0 , τότε το σφάλμα λόγω της προσθήκης της αντίστασης φορτίου είναι μικρότερο από 1%, ενώ στην πρώτη περίπτωση ($R_L = 3 \text{ k}\Omega$) το σφάλμα φτάνει στο 35 %.

Παράδειγμα 2

Ένα θερμόμετρο αντίστασης λευκόχρυσου συνδέεται στον ένα βραχίονα μιας γέφυρας Wheatstone, όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι σταθερές αντιστάσεις του κυκλώματος είναι 200Ω η καθεμία και η τάση εισόδου είναι 10 V . Στους 0°C το κύκλωμα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας και στη θερμοκρασία αυτή το θερμόμετρο έχει αντίσταση 200Ω . Να υπολογίσετε τη μεταβολή της τάσης εξόδου εάν η θερμοκρασία αλλάξει κατά 1°C . Δίνεται ότι για την αντίσταση του θερμόμετρου ισχύει η σχέση: $R_\theta = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta)$, όπου R_θ είναι η αντίσταση στους $\theta^\circ\text{C}$, R_0 η αντίσταση στους 0°C και α είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής του υλικού της αντίστασης θερμομέτρου, ο οποίος για τον λευκόχρυσο είναι $0.0039^\circ\text{C}^{-1}$.



Παράδειγμα 2



$$R_{1-0^\circ\text{C}} = 200 \Omega$$

$$R_{1\theta} = R_{10} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta) \Rightarrow$$

$$R_{1-1^\circ\text{C}} = 200 \cdot (1 + 0.0039 \cdot 1) \approx 200.8 \Omega$$

$$\Delta R_1 = R_{1-1^\circ\text{C}} - R_{1-0^\circ\text{C}} = 200.8 \Omega - 200 \Omega = 0.8 \Omega$$

Γραμμική σχέση ανάμεσα στη μεταβολή μίας αντίστασης της γέφυρας και στη μεταβολή της τάσης εξόδου:

$$\Delta V_0 \approx V_i \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow \Delta V_0 \approx 0.02 \text{ V}$$

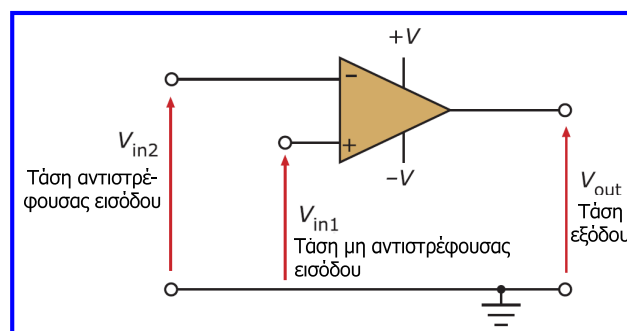
Επομένως, για κάθε βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας προκαλείται μεταβολή 20 mV στην τάση εξόδου της γέφυρας.

Τελεστικός ενισχυτής (ΤΕ)

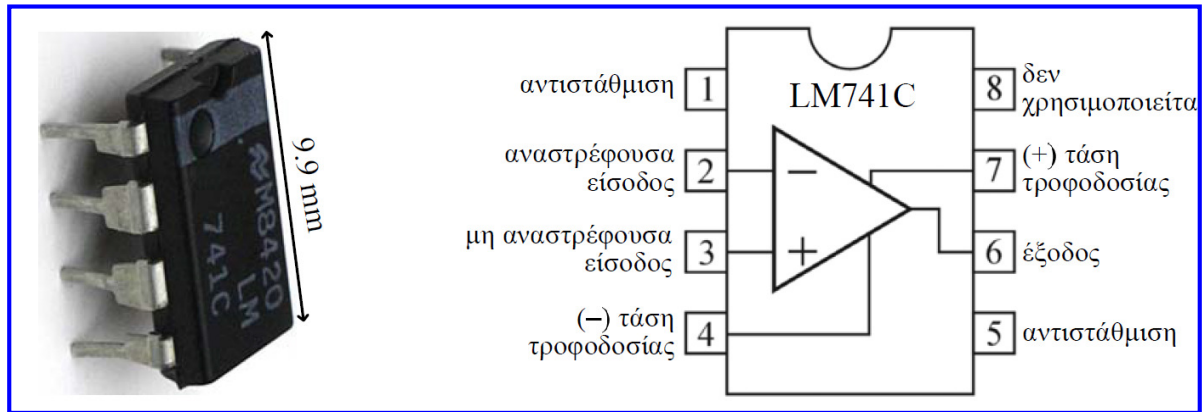
- Οι τεχνικές παθητικών κυκλωμάτων δε μπορούν να ικανοποιήσουν όλες τις απαιτήσεις που υπάρχουν και ρύθμιση σημάτων και προσαρμογή, οπότε στην πράξη συνδυάζονται με **τεχνικές ενεργητικών κυκλωμάτων**.
- Με την αλματώδη πρόοδο της ηλεκτρονικής, ο σχεδιασμός με βάση διακριτά στοιχεία παραχώρησε τη θέση του στο σχεδιασμό με βάση **ολοκληρωμένα κυκλώματα** με τα οποία απλοποιούνται οι τεχνικές επεξεργασίας και ρύθμισης σημάτων και ταυτόχρονα βελτιώνεται η αξιοπιστία τους.
- Έτσι προβλήματα ρύθμισης ή επεξεργασίας σήματος επιλύονται με μικρότερο μέγεθος κατασκευής και κόστος και με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.
- **Ενισχυτής (amplifier)** είναι ένα ηλεκτρονικό στοιχείο που αποτελείται από ενεργητικά και παθητικά στοιχεία, έχει τροφοδοσία ξεχωριστή από το σήμα εισόδου του και ενισχύει ένα σήμα τάσης ή ρεύματος χωρίς να αλλάζει βασικά χαρακτηριστικά του.
- **Τελεστικός ενισχυτής (operational amplifier, op-amp)** είναι ένας ειδικός τύπος ενισχυτή, κατασκευασμένος σε ολοκληρωμένο κύκλωμα, που έχει τη δυνατότητα εκτέλεσης μαθηματικών λειτουργιών σημάτων και αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο των περισσότερων ενεργητικών κυκλωμάτων διασύνδεσης και ρύθμισης σήματος.

Τελεστικός ενισχυτής (ΤΕ)

- Ο ΤΕ διαθέτει πέντε ακροδέκτες: δύο εισόδους, μία έξοδο και δύο τροφοδοσίες.
- Ο ΤΕ διαθέτει **διαφορική είσοδο** με **μη αντιστρέφουσα είσοδο V_{in1} (+)** και **αντιστρέφουσα είσοδο V_{in2} (-)**. Η έξοδος είναι σε φάση (ίδιο πρόσημο) με την μη αντιστρέφουσα είσοδο και σε διαφορά φάσης 180° (αντίθετο πρόσημο) με την αντιστρέφουσα είσοδο.
- Ο ΤΕ είναι ένας ενισχυτής τάσης πολλαπλών βαθμίδων απευθείας σύζευξης που είναι κατασκευασμένος για να ανιχνεύει τη διαφορά των σημάτων τάσης που εφαρμόζονται στους ακροδέκτες εισόδου ($V_{in1} - V_{in2}$), να πολλαπλασιάζει τη διαφορά αυτή με A_o (**απολαβή ή ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου**) και να προκαλεί την εμφάνιση του αποτελέσματος $A_o \cdot (V_{in1} - V_{in2})$ στον **ακροδέκτη εξόδου**.
- Η **απολαβή ανοικτού βρόχου A_o** του ΤΕ είναι **πολύ υψηλή** (~ 50.000), η **αντίσταση εισόδου** είναι **πολύ υψηλή** ($\sim 1\text{M}\Omega$) και η **αντίσταση εξόδου χαμηλή** ($\sim 100\ \Omega$).



Τελεστικός ενισχυτής (ΤΕ)



- Οι ακροδέκτες 2 και 3 είναι η αναστρέφουσα και μη αναστρέφουσα είσοδος του ΤΕ.
- Ο ΤΕ τροφοδοτείται με συμμετρική συνεχή τάση (τυπικής τιμής $\pm 15V$, ακροδέκτες 4, 7).
- Λόγω κατασκευαστικής ασυμμετρίας εμφανίζεται μεταξύ των δύο εισόδων παρασιτική διαφορά δυναμικού, η οποία προστίθεται στο σήμα εισόδου, με αποτέλεσμα για μηδενικό σήμα εισόδου να εμφανίζεται σήμα μικρού πλάτους (μερικών mV) στην έξοδο.
- Για να μηδενιστεί το σφάλμα, είναι απαραίτητη η εισαγωγή μιας αντισταθμιστικής τάσης (offset voltage), μέσω μιας μεταβλητής αντίστασης (nulling potentiometer) στους ακροδέκτες 1 και 5, έτσι ώστε για σήμα εισόδου 0 να λαμβάνεται σήμα εξόδου 0.

Ιδανικός τελεστικός ενισχυτής (ΙΤΕ)

- Στον ΙΤΕ, η **απολαβή τάσης ανοικτού βρόχου** θεωρείται ότι έχει **άπειρη τιμή**, αλλά ο ΙΤΕ δεν χρησιμοποιείται χωρίς ανατροφοδότηση, οπότε στις εφαρμογές του η ενίσχυση εξαρτάται από το κύκλωμα ανατροφοδότησης.
- Στον ΙΤΕ, η διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες εισόδου είναι μηδενική, οπότε οι τάσεις στους ακροδέκτες εισόδου είναι ίσες.

$$(V_{in1} - V_{in2}) = \frac{1}{A_o} \cdot V_{out} \quad A_o = \infty \Rightarrow V_{in1} - V_{in2} = 0 \Rightarrow V_{in1} = V_{in2}$$

Ιδιότητα
αντιγραφής
τάσεων
στον ΙΤΕ

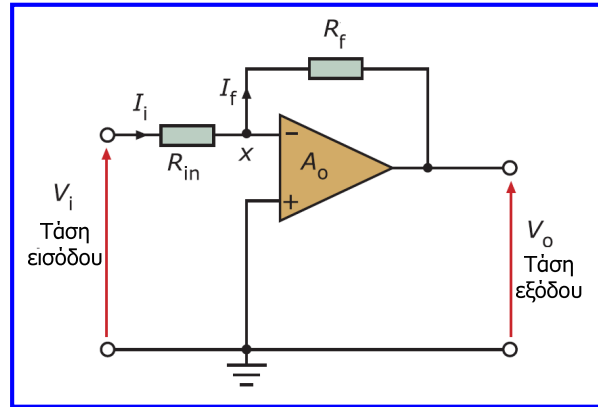
- Ο ΙΤΕ δεν «τραβάει» ρεύμα από τις εισόδους του ($I_1 = I_2 = 0$), δηλ. ο ΙΤΕ δεν φορτώνει τα κυκλώματα προς τα οποία συνδέεται, συνεπώς η **αντίσταση εισόδου** θεωρείται **άπειρη**.
- Η **αντίσταση εξόδου** του ΙΤΕ θεωρείται **μηδενική**, οπότε η τάση εξόδου δεν επηρεάζεται από το φορτίο στο οποίο συνδέεται.
- Οι αισθητήρες και τα κυκλώματα μέτρησης χρησιμοποιούν ΤΕ με διαφορετικούς τρόπους. Οι ΤΕ σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία δομούν κυκλώματα ρύθμισης σημάτων που εκτελούν διάφορες λειτουργίες.

Ενισχυτής αντιστροφής

- Το ρεύμα στις εισόδους του ΙΤΕ είναι μηδενικό:

$$I_{in} = I_f \Rightarrow \frac{V_i - V_x}{R_{in}} = \frac{V_x - V_o}{R_f} \Rightarrow$$

$$\frac{V_i}{R_{in}} + \frac{V_o}{R_f} = \left(\frac{1}{R_{in}} + \frac{1}{R_f} \right) V_x$$



- Λόγω της ιδιότητας αντιγραφής τάσεων του ΙΤΕ, η αντιστρέφουσα είσοδος (V_x) συμπεριφέρεται ως **εικονική γη (virtual earth)**:

$$V_x = 0 \Rightarrow V_o = -\frac{R_f}{R_{in}} \cdot V_i \Rightarrow A = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_{in}}$$

Απολαβή ενισχυτή αντιστροφής

- Το κύκλωμα δηλαδή αντιστρέφει το σήμα εισόδου και το ενισχύει ή το υποβαθμίζει ανάλογα με το λόγο των αντιστάσεων ανατροφοδότησης και εισόδου.

Ενισχυτής μη αντιστροφής

- Από το διαιρέτη τάσης που δημιουργείται στο κύκλωμα ανατροφοδότησης:

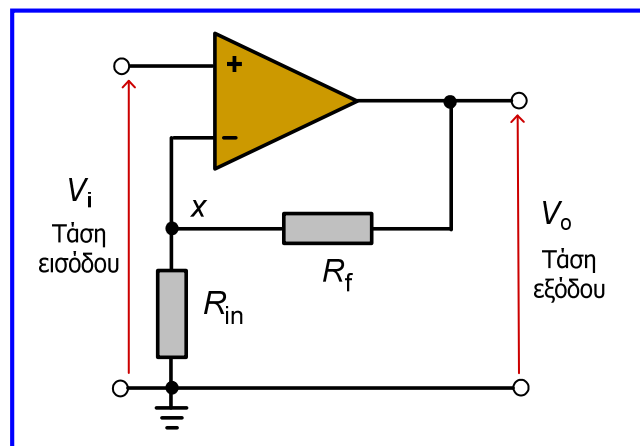
$$V_x = \frac{R_{in}}{R_f + R_{in}} V_{out} \Rightarrow V_x = V_{in}$$

$$V_{in} = \frac{R_{in}}{R_f + R_{in}} V_{out} \Rightarrow$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_f + R_{in}}{R_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_{in}}$$

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_{in}}$$

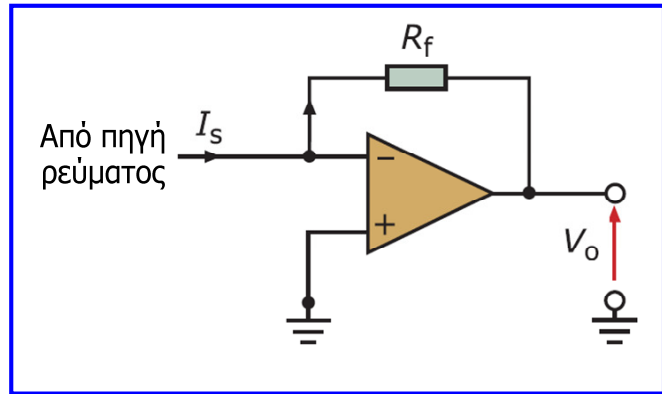
Απολαβή ενισχυτή μη αντιστροφής



Η τιμή της τάσης εξόδου είναι διπλάσια με την τιμή της τάσης εισόδου όταν η αντίσταση ανατροφοδότησης είναι όμοια με την αντίσταση εισόδου.

Μετατροπέας ρεύματος σε τάση

- Μερικά συστήματα μέτρησης παράγουν σήματα εξόδου στα οποία η μεταβολή του ρεύματος είναι ανάλογη της μεταβολής της μετρούμενης παραμέτρου.
- Στον μετατροπέα ρεύματος σε τάση, όλο το παρεχόμενο ρεύμα από την πηγή ρεύματος περνά μέσα από την αντίσταση ανατροφοδότησης αφού η αντιστρέφουσα είσοδος συμπεριφέρεται ως εικονική γη λόγω της ιδιότητας αντιγραφής τάσεων του τελεστικού ενισχυτή.

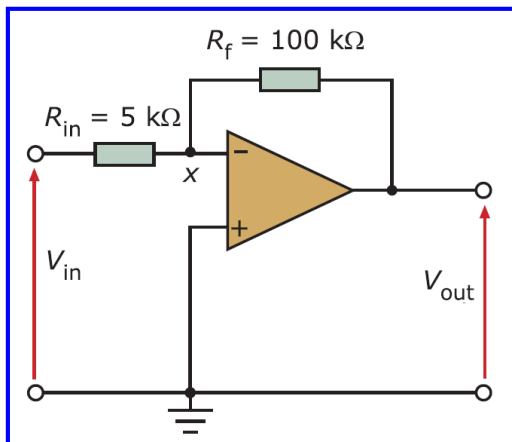


$$I_s = I_f = \frac{V_x - V_{out}}{R_f} = -\frac{V_{out}}{R_f} \Rightarrow$$

$$V_{out} = -I_s \cdot R_f$$

Παράδειγμα 1

Για τον ενισχυτή αντιστροφής που περιλαμβάνει ΙΤΕ του σχήματος, εάν η τάση εισόδου είναι 50 mV, να υπολογίσετε την απολαβή του ενισχυτή και την τάση εξόδου.



Το ρεύμα στις εισόδους του ΙΤΕ είναι 0:

$$I_{in} = I_f \Rightarrow \frac{V_{in} - V_x}{R_{in}} = \frac{V_x - V_{out}}{R_f} \Rightarrow$$

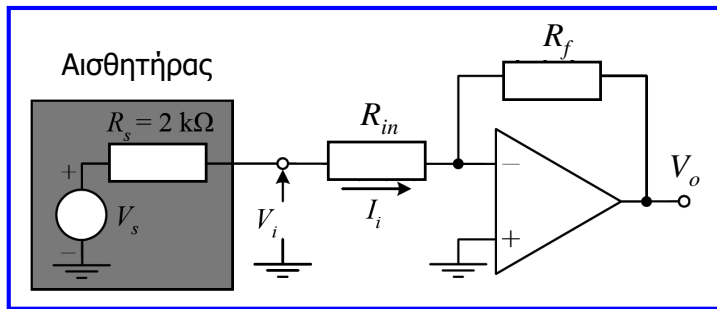
$$\frac{V_{in}}{R_{in}} + \frac{V_{out}}{R_f} = \left(\frac{1}{R_{in}} + \frac{1}{R_f} \right) V_x$$

$$V_+ = 0 = V_x \Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_{in}} \Rightarrow A = -\frac{R_f}{R_{in}} = -20, \quad V_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}} V_{in} = -1V$$

Παράδειγμα 2

Ένας ενισχυτής αντιστροφής (με ΙΤΕ) καλείται να ενισχύσει 50 φορές το σήμα που παράγει ένας ενεργός αισθητήρας. Ο αισθητήρας μπορεί να παρασταθεί από ένα ισοδύναμο κύκλωμα το οποίο αποτελείται από μία πηγή τάσης 100 mV σε σειρά με μία αντίσταση 2 kΩ. Η πηγή (αισθητήρας) μπορεί να αποδώσει μέγιστο ρεύμα 10 μΑ. Ζητείται να επιλεγούν οι τιμές της αντίστασης εισόδου R_{in} και ανατροφοδότησης R_f του ενισχυτή, οι οποίες εξασφαλίζουν την επιθυμητή ενίσχυση.

Το κύκλωμα έχει ως εξής:

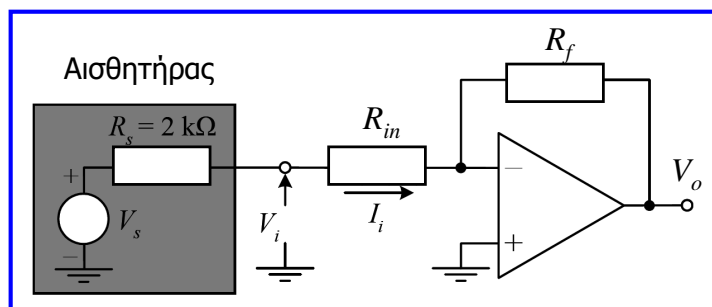


Προκειμένου το ρεύμα εισόδου του ενισχυτή να είναι μικρότερο από το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να αποδώσει ο αισθητήρας, πρέπει:

$$I_i = \frac{V_s}{R_s + R_{in}} \Rightarrow R_{in} \geq \frac{V_s}{I_{i-max}} - R_s \geq 8 \text{ k}\Omega$$

Επομένως, η αντίσταση εισόδου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 8 kΩ, ώστε να μην υπερφορτώνεται ο αισθητήρας. Επιλέγουμε λοιπόν: $R_{in} = 10 \text{ k}\Omega$.

Παράδειγμα 2

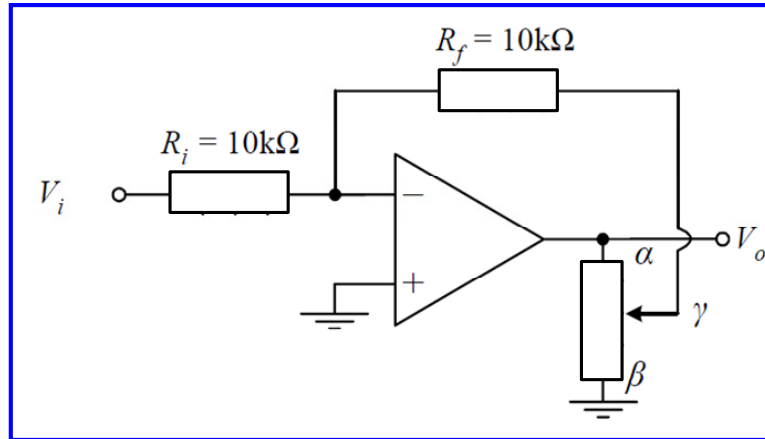


Από τη σχέση που μας δίνει την απολαβή (ενίσχυση) του ενισχυτή αντιστροφής μπορούμε πλέον εύκολα να υπολογίσουμε την τιμή της αντίστασης ανατροφοδότησης, αφού βέβαια λάβουμε υπόψη στο κύκλωμα και την αντίσταση της πηγής που προστίθεται στην αντίσταση εισόδου του ενισχυτή.

$$A = -50 = -\frac{R_f}{(R_{in} + R_s)} \Rightarrow R_f = 600 \text{ k}\Omega$$

Παράδειγμα 3

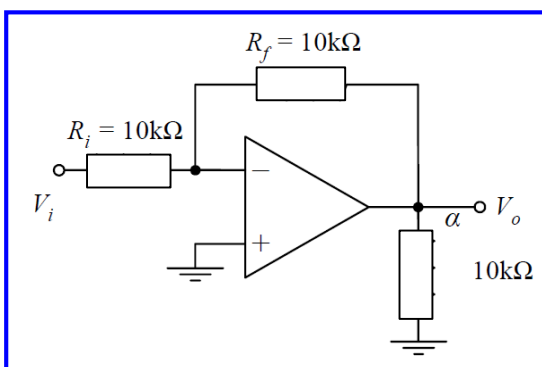
Να υπολογίσετε την απολαβή του ενισχυτή του σχήματος που περιλαμβάνει ΙΤΕ, στις περιπτώσεις όπου η κινητή επαφή του ποτενσιόμετρου βρίσκεται στο σημείο α, στο σημείο β και στο μέσο της απόστασης α-β. Δίνεται ότι η συνολική αντίσταση του ποτενσιόμετρου είναι 10 kΩ.



Ανάλογα με τη θέση της κινητής επαφής του ποτενσιόμετρου σχεδιάζουμε τα αντίστοιχα ισοδύναμα κυκλώματα του ενισχυτή.

Παράδειγμα 3

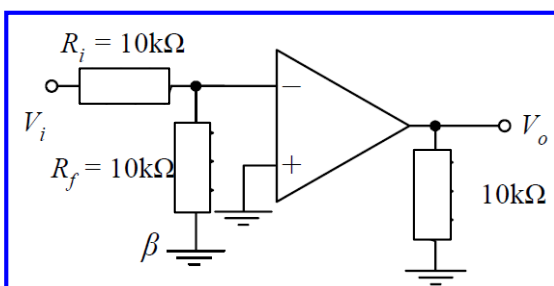
Κινητή επαφή στο σημείο α



Πρόκειται για τοπολογία ενισχυτή αντιστροφής, επομένως:

$$A = -\frac{R_f}{R_i} = -1$$

Κινητή επαφή στο σημείο β

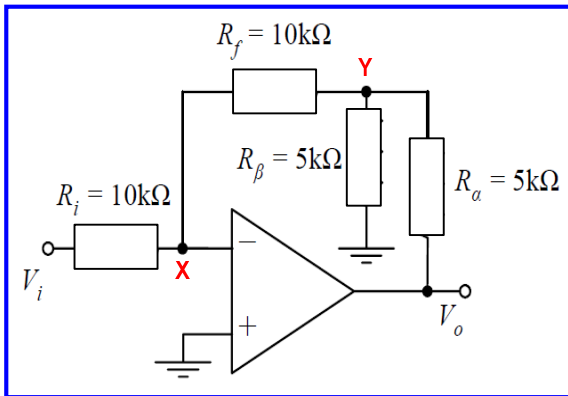


Ο τελεστικός ενισχυτής λειτουργεί χωρίς ανατροφοδότηση (με ανοικτό βρόχο), επομένως η απολαβή του τείνει στο άπειρο.

Σημειώνεται, ότι αν και η αντίσταση R_f δεν επηρεάζει την απολαβή θα μπορούσε να παραληφθεί αφού η τάση στα άκρα της είναι 0, λόγω του ότι η αντιστρέφουσα είσοδος του ΙΤΕ λειτουργεί ως εικονική γη.

Παράδειγμα 3

Κινητή επαφή στο μέσο της αβ



Κόμβος X:

$$\left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_f}\right) \cdot V_x = \frac{V_i}{R_i} + \frac{V_y}{R_f} \quad V_x = V_+ = 0 \Rightarrow$$

$$V_y = -\frac{R_f}{R_i} \cdot V_i \quad (1)$$

Για την επίλυση σύνθετων κυκλωμάτων με ΙΤΕ, εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff σε κάθε κόμβο του κυκλώματος εκτός των κόμβων εισόδου και εξόδου ως εξής: το άθροισμα των αγωγιμοτήτων (δηλ. των αντίστροφων αντιστάσεων ή εμπεδήσεων) που ξεκινούν από τον κόμβο εφαρμογής πολ/σμένο με την τάση του κόμβου εφαρμογής ισούται με το άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών με τις τάσεις των κόμβων στους οποίους καταλήγουν.

Κόμβος Y:

$$\left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_\beta} + \frac{1}{R_\alpha}\right) \cdot V_y = \frac{V_x}{R_f} + \frac{0}{R_\beta} + \frac{V_o}{R_\alpha} \quad V_x = V_+ = 0 \Rightarrow (1)$$

$$-\left(\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_\beta} + \frac{1}{R_\alpha}\right) \cdot \frac{R_f}{R_i} \cdot V_i = \frac{V_o}{R_\alpha} \Rightarrow$$

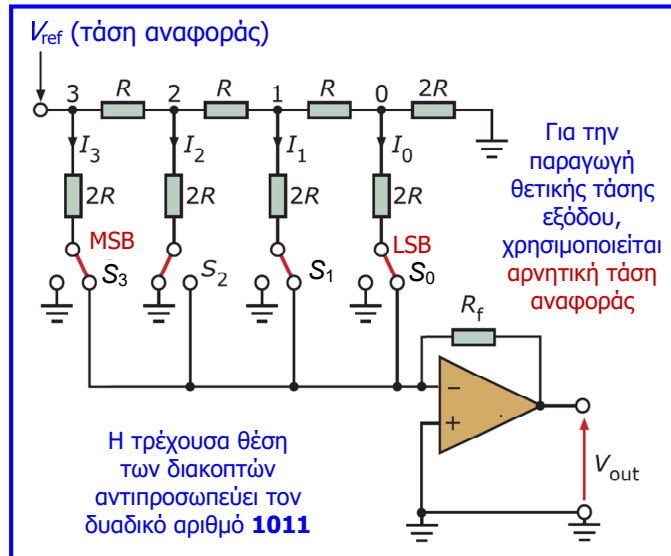
$$A = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{1}{R_i} \cdot \left(R_f + R_\alpha + \frac{R_f \cdot R_\alpha}{R_\beta}\right) \Rightarrow A = -2.5$$

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΣΗΜΑΤΟΣ D/A και A/D



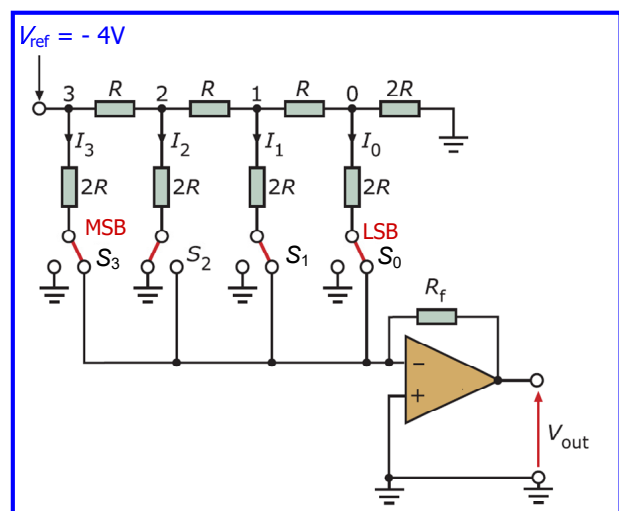
Μετατροπές ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC)

- Ο μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (digital-to-analog converter, DAC), χρησιμοποιείται όταν ένας υπολογιστής ή κάποια άλλη ψηφιακή συσκευή εξόδου πρέπει να ελέγχει μία αναλογική συσκευή (π.χ. αντλία ή βαλβίδα).
- Ένας απλός DAC αποτελείται από: έναν μετατροπέα ρεύματος σε τάση, ένα κλιμακωτό κύκλωμα ή δικτύωμα (ladder network) αντιστάσεων τύπου R-2R και διακόπτες.
- Το κλιμακωτό κύκλωμα χειρίζεται τα bits του ψηφιακού σήματος, κάθε δυαδικό ψηφίο παριστάνεται ως ένα ρεύμα που διαβιβάζεται στην είσοδο του μετατροπέα και τα ρεύματα αθροίζονται.
- Για την παραγωγή των ρευμάτων χρησιμοποιείται η τάση αναφοράς και όταν ένας από τους διακόπτες είναι κλειστός αντιστοιχεί σε λογικό επίπεδο 1, ενώ όταν είναι ανοικτός στο λογικό επίπεδο 0.
- Η κατάσταση (θέση) του διακόπτη S_3 αφορά την τιμή του MSB και του διακόπτη S_0 την τιμή του LSB.



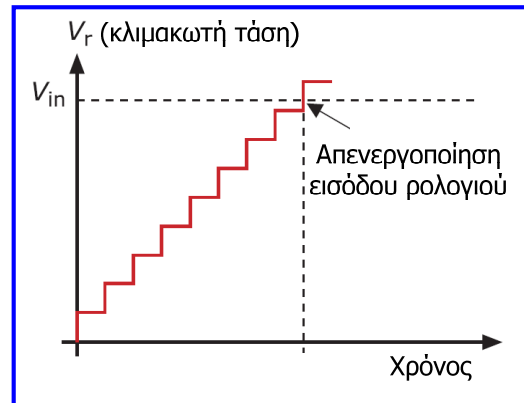
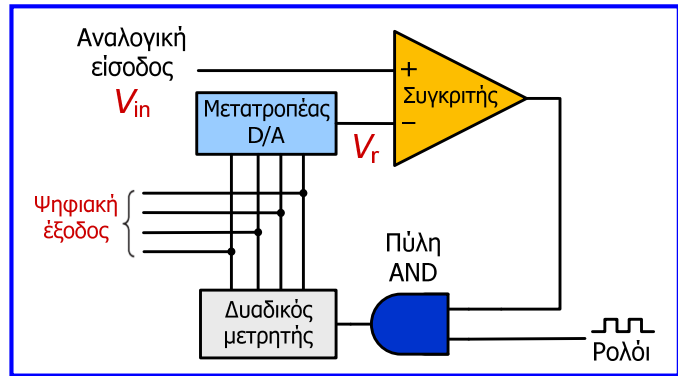
Μετατροπές ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC)

- Βασικά χαρακτηριστικά ενός DAC είναι η διακριτική ικανότητα ή βήμα διακριτότητας και η ανάλυση.
- Διακριτική ικανότητα ενός DAC που χρησιμοποιεί n bits: $V_{ref} / 2^n$ (n : αριθμός bits του DAC).
- Στο παράδειγμα το βήμα είναι: $4 / 16 = 0.25$ Volts, η ψηφιακή είσοδος 0000 αντιστοιχεί σε αναλογική έξοδο 0 Volt και η ψηφιακή είσοδος 1111 αντιστοιχεί σε αναλογική έξοδο 3.75 Volts, επομένως ο συγκεκριμένος DAC μπορεί να μετατρέψει ψηφιακή είσοδο (1111) σε αναλογική έξοδο έως 3.75 Volts.
- Η ανάλυση του DAC είναι ο αριθμός των διαφορετικών ψηφιακών συνδυασμών που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της τιμής ενός αναλογικού σήματος και καθορίζεται από τον αριθμό των bits του DAC.
- Όσο περισσότερα τα bits του DAC, τόσο μεγαλύτερη η ανάλυση και τελικά η ακρίβεια μετατροπής. Στο παράδειγμα, ο DAC διαθέτει 4 bits, επομένως μπορεί να αναπαραστήσει την τιμή ενός αναλογικού σήματος με $2^4 = 16$ διαφορετικούς συνδυασμούς.



Μετατροπές αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC)

- Τα κύρια εξαρτήματα του **ADC κλιμακωτής ανόδου** είναι ένας **συγκριτής τάσεων**, ένας **δυναμικός μετρητής** κι ένας **DAC**.
- Ο συγκριτής είναι δομημένος έτσι ώστε εάν $V_{in} > V_r$ η έξοδος του να τροφοδοτεί την πύλη AND με 1, ενώ αν $V_{in} \leq V_r$ με λογικό 0.
- Οι τιμές του αναλογικού σήματος που παράγονται από τον DAC συγκρίνονται με την τιμή της αναλογικής εισόδου και αν είναι μικρότερες, στον επόμενο παλμό του σήματος ρολογιού, η έξοδος του μετρητή αυξάνεται κατά 1.
- Η διαδικασία αυτή σταματά μέσω της πύλης AND όταν η τιμή του αναλογικού σήματος που παράγεται από τον DAC γίνει μεγαλύτερη από εκείνη της αναλογικής εισόδου, οπότε προκύπτει η αντίστοιχη ψηφιακή έξοδος.



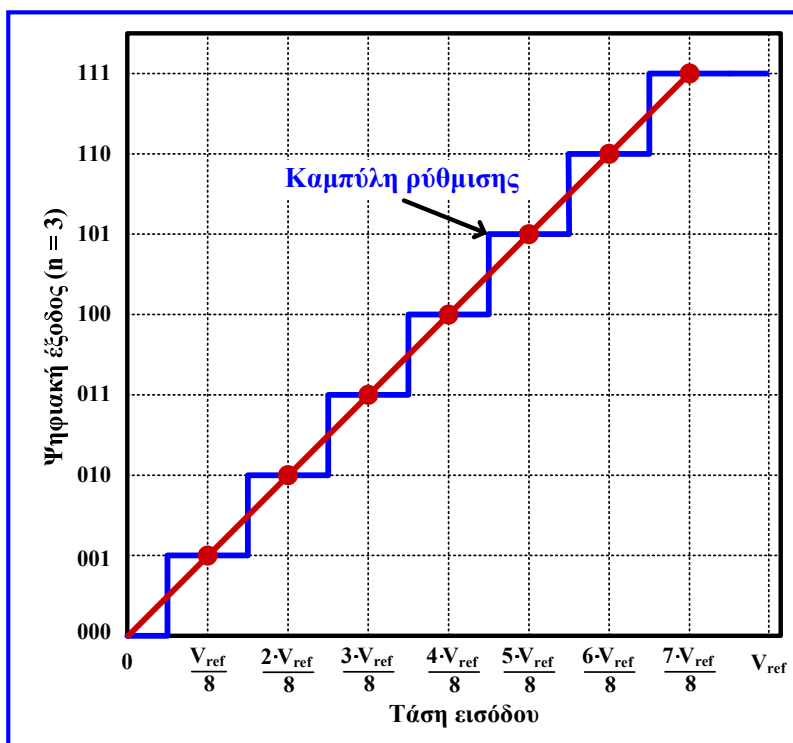
Μετατροπές αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC)

- Ας υποθέσουμε για **παράδειγμα**, ότι θέτουμε τάση 0.7 V στην αναλογική είσοδο του ADC και ότι το βήμα διακριτότητας του DAC είναι 0.25 V (δηλαδή, η διαφορά τάσης μεταξύ δύο διαδοχικών ψηφιακών συνδυασμών εισόδου του είναι 0.25 V).
- Ο μετρητής ξεκινάει από το 0000, στην έξοδο του συγκριτή προκύπτει λογικό 1 που ενεργοποιεί την πύλη AND και ο πρώτος παλμός ρολογιού φθάνει στο μετρητή που τώρα δείχνει 0001.
- Το 0001 είναι η νέα ψηφιακή λέξη που τροφοδοτεί τον DAC και μετατρέπεται σε τάση 0.25 V, η οποία τροφοδοτεί την αντιστρέφουσα είσοδο του συγκριτή.
- Επειδή $0.7 \text{ V} > 0.25 \text{ V}$ το λογικό 1 παραμένει στην έξοδο του συγκριτή, οπότε περνάει ο επόμενος παλμός ρολογιού και η έξοδος του μετρητή αυξάνεται κατά 1 και γίνεται πλέον 0010.
- Η ψηφιακή ποσότητα 0010 μετατρέπεται μέσω του DAC σε τάση 0.5 V, η οποία συγκρίνεται πάλι με την τάση εισόδου και επειδή $0.7 \text{ V} > 0.5 \text{ V}$ η έξοδος του συγκριτή παραμένει 1 και η έξοδος του μετρητή γίνεται 0011.
- Το 0011 μετατρέπεται από τον DAC σε τάση $0.75 \text{ V} > 0.7 \text{ V}$, η έξοδος του συγκριτή γίνεται 0, η πύλη AND απενεργοποιείται (δηλαδή, η έξοδος της γίνεται 0) και ο μετρητής σταματά να λειτουργεί αφού δε δέχεται πλέον παλμό σήματος ρολογιού.
- Η τελευταία ένδειξη (έξοδος) του μετρητή (0011) είναι η ψηφιακή μετατροπή της τάσης εισόδου 0.7 V.

Μετατροπείας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC)

- Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ADC είναι:
 - ✓ Το **εύρος μετατροπής** (ή **περιοχή μέτρησης**) που είναι η μέγιστη τιμή τάσης που μπορεί να μετατρέψει ο ADC (V_{ref}).
 - ✓ Η **ανάλυση** του ADC είναι ο αριθμός των διαφορετικών ψηφιακών συνδυασμών που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της τιμής ενός αναλογικού σήματος και καθορίζεται από τον αριθμό των bits του DAC.
 - ✓ Η **διακριτική ικανότητα** (ή **βήμα διακριτότητας**) του ADC με n bits εξόδου και **εύρος μετατροπής (FSI) V_{ref}** είναι $\Delta = V_{ref} / 2^n$, δηλαδή όταν οι τάσεις εισόδου διαφέρουν κατά $V_{ref} / 2^n$, προκύπτει διαφορετική τιμή ψηφιακής εξόδου.
 - ✓ Στο προηγούμενο παράδειγμα, το εύρος μετατροπής είναι 4 V και οι τάσεις εισόδου διαφέρουν $4 / 16 = 0.25$ V.
 - ✓ Ο **χρόνος μετατροπής** που είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη μετατροπή της αναλογικής εισόδου σε ψηφιακή έξοδο.
- Ένα **μειονέκτημα** του ADC **κλιμακωτής ανόδου** είναι ότι δεν έχει σταθερό χρόνο μετατροπής, αλλά ο χρόνος αυτός εξαρτάται από την τιμή της αναλογικής εισόδου (έχει ξεπεραστεί από άλλους ADC, π.χ. ADC διαδοχικών προσεγγίσεων).
- Η **μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό** δεν είναι συνεχής, αλλά γίνεται **κατά δείγματα** που λαμβάνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Καμπύλη ρύθμισης ιδανικού ADC



Σφάλμα κβαντισμού στους ADC είναι το σφάλμα που οφείλεται στο γεγονός ότι μια συνεχής ποσότητα (όπως η τάση) προσεγγίζεται με ένα συγκεκριμένο πλήθος επιπέδων. Το σφάλμα ισούται με το μισό του βήματος διακριτότητας Δ

$$\Delta = V_{ref} / 2^n = V_{ref} / 8$$

$$\text{Μέγιστο σφάλμα κβαντισμού} = \Delta / 2$$

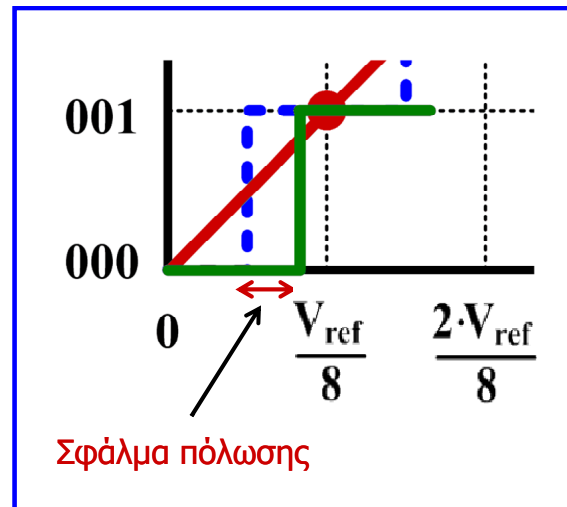
$$\text{π.χ. } V_{ref} = 3.2 \text{ V} \Rightarrow \Delta = 0.4 \text{ V}$$

$$\text{Μέγιστο σφάλμα κβαντισμού} = 0.2 \text{ V}$$

Σφάλμα πόλωσης μη ιδανικού ADC

Στον μη ιδανικό ADC, η μετατροπή της ψηφιακής εξόδου από 000 (0) σε 001 (1) **δεν** λαμβάνει χώρα για τιμή τάσης εισόδου που ισούται με $0.5 \cdot \Delta$ (Δ = διακριτική ικανότητα ή βήμα διακριτότητας).

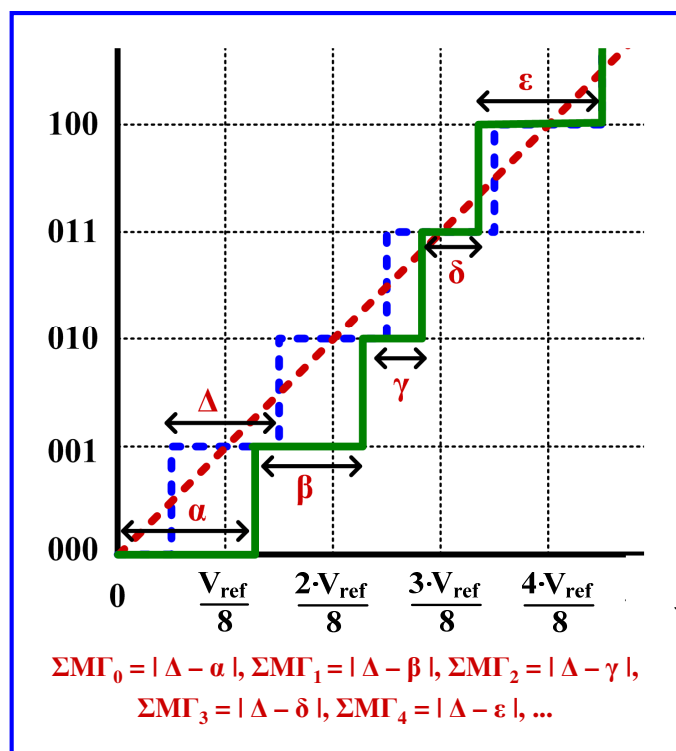
Η διαφορά της τιμής της τάσης εισόδου στην οποία λαμβάνει χώρα η μετατροπή από 000 (0) σε 001 (1) με το μισό βήμα διακριτότητας είναι το **σφάλμα πόλωσης** (ή σφάλμα μετατόπισης ή σφάλμα μηδενός) του μετατροπέα, το οποίο υπολογίζεται σε **mV** ή ως **ποσοστό του βήματος διακριτότητας** ή ως **ποσοστό της FSI** (περιοχή τιμών της τάσης εισόδου ή εύρος μετατροπής).



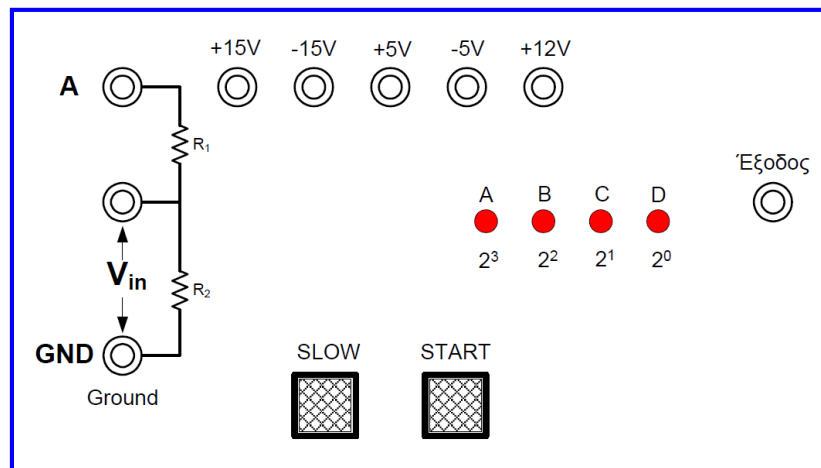
Σφάλμα μη γραμμικότητας μη ιδανικού ADC

Στον μη ιδανικό ADC, η απόσταση μεταξύ των τιμών της τάσης εισόδου στις οποίες μεταβάλλεται κατά 1 η ψηφιακή έξοδος του ADC δεν είναι ίσες με το βήμα διακριτότητας Δ . Η διαφορά των αποστάσεων αυτών από το βήμα διακριτότητας είναι το **σφάλμα μη γραμμικότητας (ΣΜΓ)** του ADC.

Συνήθως αναφέρεται το **μέγιστο σφάλμα μη γραμμικότητας** ή το **μέσο σφάλμα μη γραμμικότητας** του ADC, τα οποία υπολογίζονται σε **mV** ή ως **ποσοστό του βήματος διακριτότητας** ή ως **ποσοστό του FSI** (περιοχή τιμών της τάσης εισόδου ή εύρος μετατροπής).



Μονάδα μελέτης του ADC



- Η μονάδα με την οποία θα μελετήσουμε τη λειτουργία ενός μετατροπέα A/D κλιμακωτής ανόδου παρέχει έξοδο τεσσάρων δυαδικών ψηφίων (bits).
- Σε αυτή είναι προσαρμοσμένες 4 ενδεικτικές φωτοдиодοι (LEDs), που η καθεμία αντιστοιχεί σε ένα δυαδικό ψηφίο της ψηφιακής λέξης εξόδου.
- Η αριστερότερη φωτοдиодος αντιστοιχεί στο πιο σημαντικό δυαδικό ψηφίο (MSB, με τιμή $2^3 = 8$) και προς τα δεξιά ακολουθούν οι φωτοдиодοι που αντιστοιχούν στα λιγότερο σημαντικά ψηφία με τιμές $2^2 = 4$, $2^1 = 2$ και $2^0 = 1$, αντίστοιχα.

Μονάδα μελέτης του ADC

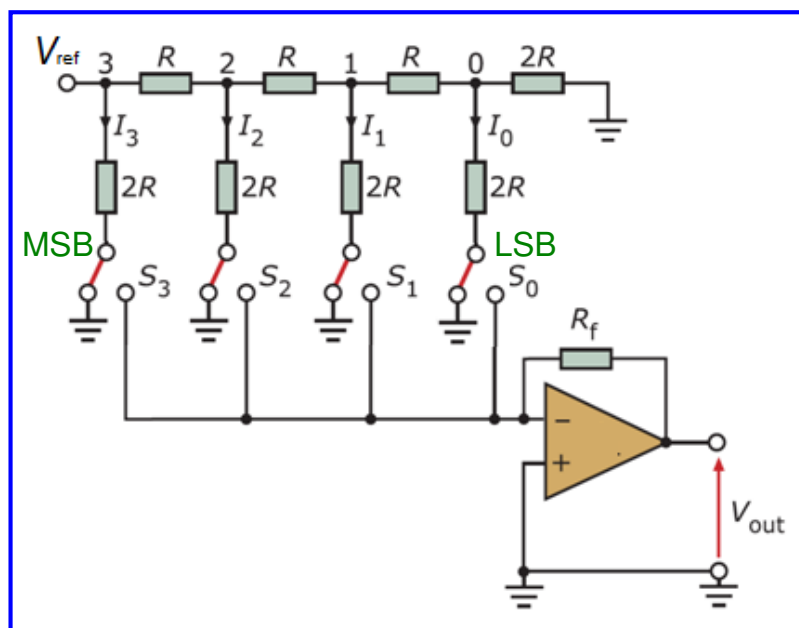
- Κάθε φωτοдиодος ανάβει όταν το αντίστοιχο δυαδικό ψηφίο λαμβάνει λογική τιμή 1.
- Στο κάτω μέρος της μονάδας έχει προσαρμοστεί ένα πλήκτρο START, το οποίο όταν πιέζεται ξεκινάει η μετατροπή της αναλογικής τάσης εισόδου σε ψηφιακό αριθμό.
- Η ταχύτητα μετατροπής καθορίζεται από το πλήκτρο που υπάρχει στο κάτω αριστερό μέρος της μονάδας.
- Ο χρόνος μετατροπής έχει μέγιστη τιμή 15 s, όταν διατηρείται πιεσμένο το πλήκτρο SLOW και 3 ms όταν αυτό δε συμβαίνει.
- Η αναλογική τάση εισόδου παρέχεται μέσω των ακροδεκτών στο αριστερό μέρος της μονάδας και πρέπει να είναι θετική.
- Η αναλογική τάση εισόδου λαμβάνεται από την έξοδο ενός διαιρέτη τάσης με λόγο αντιστάσεων $5 \div 1$, στην είσοδο του οποίου συνδέεται το τροφοδοτικό εισόδου.
- Η μέγιστη αναλογική τάση εισόδου που μπορεί να μετατραπεί από την εν λόγω μονάδα μετατροπής είναι 4 V.
- Για τις ανάγκες της λειτουργίας του μετατροπέα, τροφοδοτούμε την μονάδα με τις συνεχείς τάσεις που διακρίνονται στο πάνω μέρος της.
- Για να λειτουργήσει ο μετατροπέας τροφοδοτούμε την είσοδο της μονάδας με μια τιμή αναλογικής τάσης και πιέζουμε το πλήκτρο έναρξης μετατροπής (START).

Μονάδα μελέτης του ADC

- Εάν δεν πιέζεται το πλήκτρο SLOW, θα δούμε σχεδόν αμέσως μερικές από τις φωτοδιόδους να ανάβουν, όσες δηλαδή απαιτούνται για να προσεγγιστεί με την υψηλότερη δυνατή ακρίβεια η τιμή της αναλογικής τάσης εισόδου.
- Εάν πιέζεται το πλήκτρο SLOW, τότε όταν πιεστεί το πλήκτρο έναρξης μετατροπής (START), οι φωτοδιόδους θα αρχίσουν να ανάβουν και να σβήνουν, σύμφωνα με την ακολουθία μέτρησης, δηλαδή από τον δυαδικό αριθμό 0000 (0_{10}) έως το μεγαλύτερο δυνατό δυαδικό αριθμό 1111 (15_{10}) όταν η τάση εισόδου είναι από 3.75 V έως 4 V.
- Εάν η αναλογική τάση εισόδου ανήκει στην περιοχή λειτουργίας του μετατροπέα (δηλαδή από 0 έως 4 V), τότε η ακολουθία των συνδυασμών αναμένων και σβηστών φωτοδίοδων θα συνεχιστεί μέχρι να προκύψει ο συνδυασμός που αντιστοιχεί σε αναλογική τάση ίση ή λίγο μεγαλύτερη από την αναλογική τάση εισόδου.
- Όταν συμβεί αυτό, η λειτουργία του μετατροπέα σταματάει, αφού έχει ολοκληρωθεί η μετατροπή.
- Ο τελευταίος συνδυασμός αναμένων και σβηστών φωτοδίοδων (ο οποίος παραμένει μέχρι να πιεστεί ξανά το πλήκτρο START), αντιστοιχεί στον δυαδικό αριθμό που αποτελεί την ψηφιακή έξοδο του μετατροπέα για την αναλογική τάση εισόδου που εφαρμόστηκε.
- Με σύνδεση του ακροδέκτη εξόδου της μονάδας (και της γείωσης) σε παλμογράφο, μπορούμε να παρατηρήσουμε την καμπύλη ρύθισης του μετατροπέα.

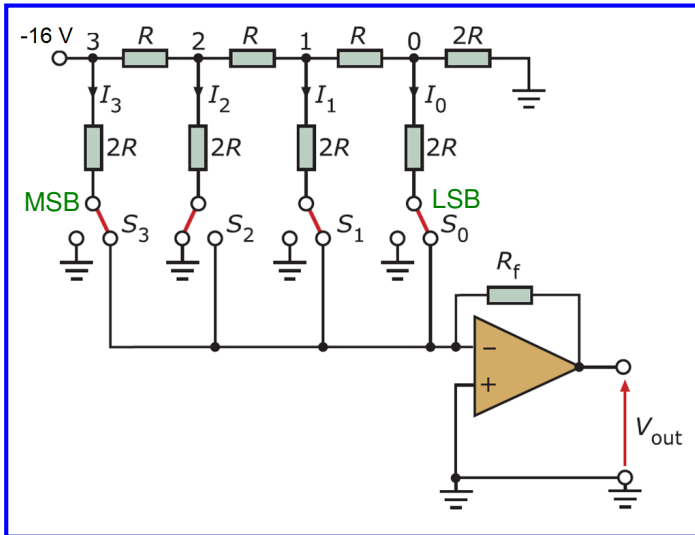
Παράδειγμα 1

Για το μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC) του σχήματος δίνεται $R = R_f = 1 \text{ k}\Omega$ και τάση αναφοράς (V_{ref}) -16 Volts. Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου που παράγεται από την ψηφιακή είσοδο 1011.



Παράδειγμα 1

Στο κύκλωμα του DAC σημειώνουμε τις θέσεις των διακοπών που αντιστοιχούν στη ψηφιακή είσοδο που δίνεται (1011).



Εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff στους κόμβους 0, 1 και 2, ώστε να υπολογίσουμε τις τάσεις στους κόμβους 0, 1, 2 και στη συνέχεια τα ρεύματα στους κόμβους 0, 1, 2, 3 του DAC. Η τάση στην είσοδο (-) του ΙΤΕ είναι 0, αφού είναι ίση με την τάση στην είσοδο (+). Συνεπώς, για οποιαδήποτε θέση των διακοπών, η τάση στο κάτω άκρο τους είναι μηδενική.

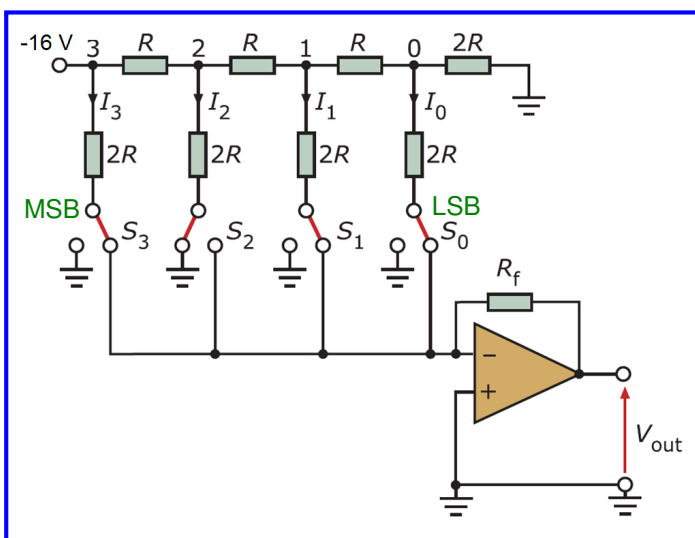
$$\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{2R}\right) \cdot V_0 = \frac{1}{R} \cdot V_1$$

$$\Rightarrow V_0 = V_1/2 \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{R}\right) \cdot V_1 = \frac{1}{R} \cdot V_2 + \frac{1}{R} \cdot V_0$$

$$\stackrel{(1)}{\Rightarrow} V_1 = V_2/2 \quad (2)$$

Παράδειγμα 1



$$\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{R}\right) \cdot V_2 = \frac{1}{R} \cdot V_3 + \frac{1}{R} \cdot V_1$$

$$\stackrel{(2)}{\Rightarrow} V_2 = V_3/2$$

Η τάση στον κόμβο 3 είναι ίση με την τάση αναφοράς (-16 V) και μετακινούμενοι προς τα δεξιά, οι τάσεις στους κόμβους 2, 1 και 0 είναι διαδοχικά το μισό κάθε προηγούμενου κόμβου. Τα ρεύματα στους κόμβους 0, 1, 2, 3, είναι:

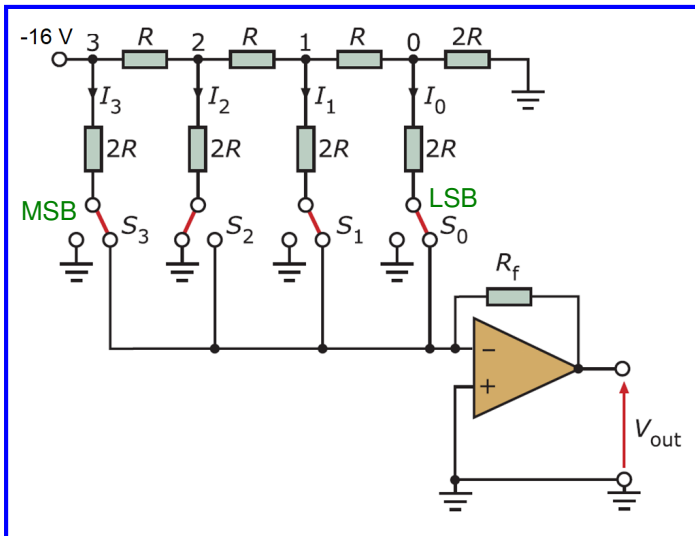
$$I_3 = V_3/2R = V_{\text{ref}}/2R = -8 \text{ mA}$$

$$I_2 = V_2/2R = V_{\text{ref}}/4R = -4 \text{ mA}$$

$$I_1 = V_1/2R = V_{\text{ref}}/8R = -2 \text{ mA}$$

$$I_0 = V_0/2R = V_{\text{ref}}/16R = -1 \text{ mA}$$

Παράδειγμα 1



Ωστόσο, επειδή η ψηφιακή είσοδος είναι 1011 ο διακόπτης S_2 είναι ανοικτός με αποτέλεσμα το ρεύμα I_2 να ρέει προς τη γείωση. Οπότε το συνολικό ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση ανατροφοδότησης είναι:

$$I_f = I_3 + I_2 + I_1 + I_0 = -(8 + 0 + 2 + 1)\text{mA}$$
$$\Rightarrow I_f = -11\text{mA} = \frac{11}{16} \cdot \frac{V_{\text{ref}}}{R}$$

Η τάση εξόδου στον μετατροπέα ρεύματος σε τάση είναι:

$$V_{\text{out}} = -I_f \cdot R_f = 11\text{V} = -\frac{11}{16} \cdot V_{\text{ref}}$$

Βήμα διακριτότητας του DAC: $V_{\text{ref}} / 2^n = 16 / 16 = 1\text{V}$. Η ψηφιακή είσοδος 0000 (0) αντιστοιχεί σε αναλογική έξοδο 0 Volt και η ψηφιακή είσοδος 1111 (15) αντιστοιχεί σε αναλογική έξοδο 15 Volts, επομένως ο συγκεκριμένος DAC **μπορεί να μετατρέψει ψηφιακή είσοδο (1111) σε αναλογική έξοδο έως 15 Volts**. Στη λύση της άσκησης διαπιστώσαμε ορθά ότι η ψηφιακή είσοδος 1011 (11) αντιστοιχεί σε αναλογική έξοδο 11 Volts.

Παράδειγμα 2

Δίνεται μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) κλιμακωτής ανόδου με 5 bits εξόδου. Η απόλυτη τιμή της τάσης αναφοράς του μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC) που περιλαμβάνεται στον ADC είναι 4 Volts. Ποιο είναι το βήμα διακριτότητας και ποιο το εύρος μετατροπής (περιοχή μέτρησης) του ADC;

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να μετατραπεί από τον ADC είναι $V_{\text{ref}} = 4\text{V}$, δηλαδή το εύρος μετατροπής ή περιοχή μέτρησης του ADC είναι από 0 έως 4 V.

Το βήμα διακριτότητας του DAC είναι: $V_{\text{ref}} / 2^n = 4 / 32 = 0.125\text{Volts}$ (δηλαδή η διαφορά τάσης μεταξύ δύο διαδοχικών ψηφιακών συνδυασμών).

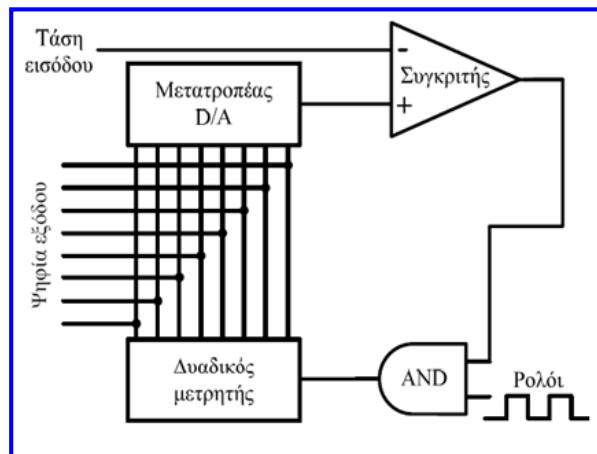
Παράδειγμα 3

Ο μετατροπέας A/D του παρακάτω σχήματος έχει εύρος μετατροπής από 0 έως 7.68 V.

Να υπολογιστεί η διακριτική ικανότητα (ή βήμα διακριτότητας) του μετατροπέα.

Εάν τεθεί στο μετατροπέα τάση εισόδου ίση με 5.76 V, να προσδιοριστεί η ψηφιακή λέξη που θα εμφανιστεί στην έξοδο του.

Εάν η διάρκεια ενός παλμού του σημαυος ρολογιού είναι 0.25 μsec, να υπολογιστεί ο χρόνος που απαιτείται για τη μετατροπή της προαναφερόμενης τάσης εισόδου. Κατά την έναρξη της λειτουργίας του μετατροπέος οι έξοδοι του μετρητή είναι μηδενικές.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

A.61

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Παράδειγμα 3

Για έναν μετατροπέα A/D με n δυαδικά ψηφία εξόδου, η ψηφιακή έξοδος μπορεί να λάβει 2^n διαφορετικές τιμές, συνεπώς εάν το εύρος μετατροπής είναι $V_{ref} = 7.68$ V, θα προκύπτει διαφορετική τιμή εξόδου όταν οι τάσεις εισόδου διαφέρουν τουλάχιστον κατά $V_{ref} / 2^n$. Η τιμή αυτή αποτελεί και το βήμα διακριτότητας του μετατροπέα, το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{V_{ref}}{2^n} = \frac{7.68 \text{ V}}{2^8} = \frac{7.68}{256} \text{ V} = 0.03 \text{ V} = 30 \text{ mV}$$

Αφού οι τάσεις εισόδου που αντιστοιχούν σε διαδοχικούς συνδυασμούς των ψηφίων εξόδου διαφέρουν κατά 0.03 V, εάν διαιρέσουμε την τάση εισόδου των 5.76 V με το βήμα διακριτότητας, θα προκύψει η δεκαδική μορφή της ψηφιακής εξόδου, δηλαδή: $5.76 / 0.03 = 192$, η οποία σε δυαδική μορφή είναι η λέξη: 11000000.

Αφού κατά την έναρξη λειτουργίας του μετατροπέα οι έξοδοι του μετρητή είναι μηδενικές, αρχικά η ψηφιακή έξοδος αποτελείται από 8 μηδενικά. Μετά από κάθε παλμό του σήματος ρολογιού αυξάνεται κατά ένα με αποτέλεσμα για την μετατροπή του ερωτήματος (β) να απαιτούνται 192 παλμοί του σήματος ρολογιού. Έτσι ο χρόνος μετατροπής την περίπτωση αυτή είναι: $192 \cdot 0.25 \text{ μsec} = 48 \text{ μsec}$.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

A.62

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΟΣ

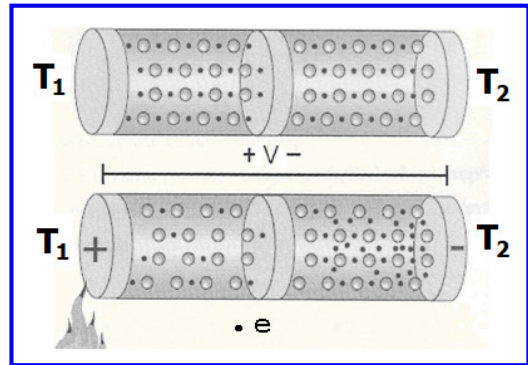


Εισαγωγή στη μέτρηση θερμοκρασίας

- **Θερμοκρασία** είναι ο βαθμός κατά τον οποίο ένα σώμα (ουσία ή μέσο) είναι θερμό σε σύγκριση με κάποιο άλλο.
- **Μέτρηση θερμοκρασίας** είναι η **σύγκριση του βαθμού θερμότητας** ενός σώματος (ουσίας ή μέσου) με κάποιο σημείο αναφοράς χρησιμοποιώντας μία ορισμένη κλίμακα θερμοκρασίας.
- Η **κλίμακα Kelvin** ($^{\circ}\text{K}$) χρησιμοποιεί ως σημείο αναφοράς το απόλυτο μηδέν (**απόλυτη μέτρηση** αφού το **απόλυτο μηδέν** είναι η μικρότερη φυσική δυνατή τιμή που μπορεί φτάσει η θερμοκρασία ενός σώματος, όπου τα μόρια του δεν περιέχουν καθόλου θερμική ενέργεια).
- Η **κλίμακα Κελσίου** ($^{\circ}\text{C}$) χρησιμοποιεί ως σημείο αναφοράς το σημείο πήξης του νερού (**σχετική μέτρηση**, αφού το **σημείο πήξης** του **νερού** ορίζεται αυθαίρετα στους 0°C).
- Απόλυτο μηδέν = $0^{\circ}\text{K} = -273^{\circ}\text{C}$.
- Οι συσκευές που μετρούν θερμοκρασία είναι τα **θερμόμετρα** και τα **πυρόμετρα** που στηρίζονται στη **διαστολή υγρού** ή **μετάλλου**, στη **μεταβολή ηλεκτρικής αντίστασης**, στο **θερμοηλεκτρικό φαινόμενο** ή στην **ακτινοβολία θερμότητας**.

Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

- Όταν η θερμοκρασία κατά μήκος ενός μεταλλικού αγωγού είναι η ίδια, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια βρίσκονται σχεδόν ομοιόμορφα κατανομημένα κατά μήκος αυτού, ενώ έχουν συγκεκριμένη κινητική ενέργεια που αναλογεί στη θερμοκρασία του αγωγού.
- Ο αγωγός βρίσκεται σε ουδέτερη κατάσταση, καθώς δεν υπάρχουν σε κάποιο σημείο κατά μήκος του συγκεντρωμένα θετικά φορτία (ιόντα) ή αρνητικά φορτία (ηλεκτρόνια).
- Αν η θερμοκρασία του ενός άκρου του αγωγού αυξηθεί, ενώ η θερμοκρασία του άλλου άκρου του αγωγού διατηρείται χαμηλότερη, τα ηλεκτρόνια στη θερμότερη περιοχή αρχίζουν να αποκτούν μεγαλύτερη ταχύτητα.
- Αυτό οδηγεί σε διάχυση ηλεκτρονίων από το θερμότερο άκρο προς το ψυχρότερο, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση ηλεκτρονίων στο ένα άκρο (ψυχρό άκρο) και αύξηση των θετικών φορτίων στο άλλο άκρο (θερμό άκρο).
- Έτσι, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των δύο άκρων και η κίνηση των ηλεκτρονίων συνεχίζεται μέχρι η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται μεταξύ των δύο άκρων να αντισταθμίζει τη ροή των ηλεκτρονίων.

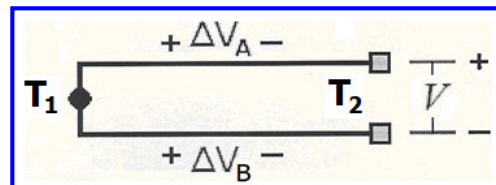


Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

- Το φαινόμενο που αφορά τη δημιουργία τάσης μεταξύ των άκρων του αγωγού, τα οποία βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία, αναφέρεται ως **φαινόμενο Seebeck** (ή **θερμοηλεκτρικό φαινόμενο**) και η σχετική τάση αναφέρεται ως **θερμοηλεκτρική τάση**.
- Η θερμοηλεκτρική τάση μεταξύ των δύο άκρων του αγωγού είναι συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας τους, και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V = \int_{T_2}^{T_1} S(T) dT \Rightarrow \Delta V = S(T) \cdot \Delta T$$

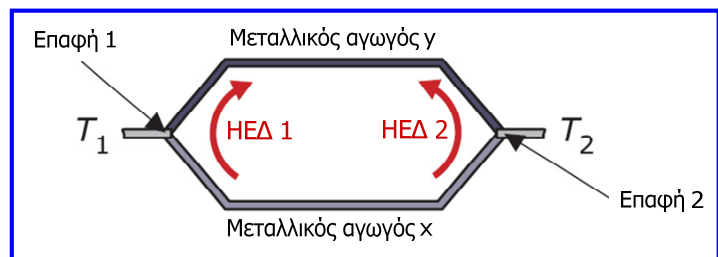
$S(T)$:
συντελεστής
Seebeck



- Εάν συνδεθούν δύο αγωγοί του ίδιου μετάλλου, σχηματίζεται ένα **θερμοηλεκτρικό ζεύγος** ή **θερμοζεύγος**.
- Εάν το σημείο επαφής των δύο αγωγών τεθεί σε υψηλότερη θερμοκρασία από τα ελεύθερα άκρα των αγωγών, σύμφωνα με το φαινόμενο Seebeck δημιουργείται διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων σε κάθε αγωγό.
- Ωστόσο, λόγω του ότι οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από το ίδιο μέταλλο, η συγκέντρωση των φορέων στα ελεύθερα (ψυχρά) άκρα τους θα είναι ίδια, με αποτέλεσμα η τάση μεταξύ των άκρων κάθε αγωγού να ίση στους δύο αγωγούς.
- Έτσι, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ελεύθερων άκρων των δύο αγωγών θα είναι 0.

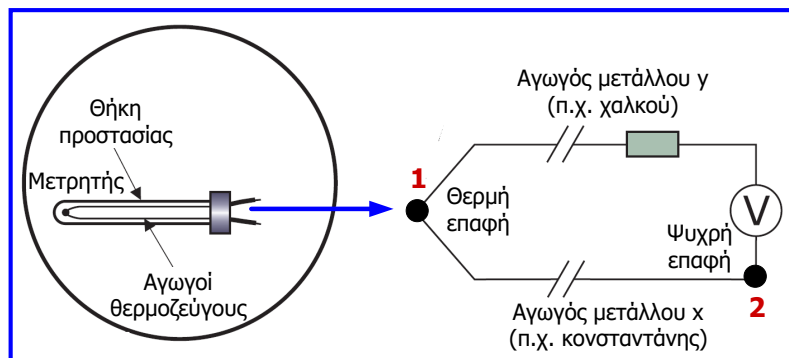
Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

- Εάν όμως σχηματίσουμε ένα **θερμοζεύγος με αγωγούς από διαφορετικό μέταλλο**, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ελεύθερων άκρων των δύο αγωγών δεν θα είναι μηδενική, αφού με την ίδια διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο άκρων κάθε αγωγού, η συγκέντρωση των ελεύθερων φορέων στο ψυχρό άκρο του ενός αγωγού θα είναι διαφορετική από την αντίστοιχη συγκέντρωση στο ψυχρό άκρο του άλλου αγωγού.
- Με βάση λοιπόν το **θερμοηλεκτρικό φαινόμενο (φαινόμενο Seebeck)**, όταν **δύο αγωγοί από διαφορετικά μέταλλα** σχηματίζουν βρόχο και τα δύο σημεία της σύνδεσής τους (επαφές) βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία, τότε εμφανίζονται μικρές και διαφορετικές ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις (HEΔ) στις επαφές και η **συνολική HEΔ** (δηλ. η διαφορά δυναμικού ή τάση) και η **τιμή ρεύματος** που ρέει στο βρόχο είναι **ανάλογες της διαφοράς θερμοκρασίας**.
- Η συνολική HEΔ (αλγεβρικό άθροισμα) του ζεύγους των αγωγών μπορεί να μετρηθεί και να βαθμονομηθεί σε μονάδες θερμοκρασίας.
- Εάν οι δύο επαφές βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, τότε η συνολική HEΔ θα είναι μηδενική και όταν η θερμοκρασία μίας επαφής αλλάξει τότε θα δημιουργηθεί HEΔ, η οποία θα μεγαλώνει όσο αυξάνεται η διαφορά θερμοκρασίας (**αρχή λειτουργίας θερμοζεύγους**).



Θερμοζεύγος

- Το **θερμοζεύγος (thermocouple)** αποτελείται από δύο ανόμοια μέταλλα που συνδέονται μεταξύ τους σε δύο σημεία και σχηματίζουν κλειστό κύκλωμα.
- Η μία επαφή (σύνδεση) τοποθετείται σε προστατευτική θήκη και αποτελεί τον **μετρητή θερμοκρασίας**, αφού έρχεται σε επαφή με το σώμα (ή ουσία) του οποίου τη θερμοκρασία επιθυμούμε να μετρήσουμε.
- Όταν η μία επαφή βρίσκεται σε διαφορετική θερμοκρασία από την άλλη, δημιουργείται ροή ρεύματος με μέγεθος και φορά εξαρτώμενα από τη διαφορά θερμοκρασίας επαφών.
- Η θερμοηλεκτρική τάση που προκύπτει είναι μικρή (**μερικά mV**) και η θερμοκρασία μετριέται συνδέοντας βολτόμετρο με κλίμακα βαθμονομημένη ως προς τη θερμοκρασία, στο «ψυχρό» άκρο που διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία.



Θερμοζεύγος

- Η θερμοηλεκτρική τάση V που προκύπτει δεν είναι ευθέως ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας $T_1 - T_2$.
- Αυτό συμβαίνει σε συγκεκριμένες, στενές περιοχές θερμοκρασιών, στις οποίες μπορεί να θεωρηθεί χωρίς σφάλμα ότι η τάση V μεταξύ των επαφών του θερμοζεύγους είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας.
- Συνήθως ανατρέχουμε σε **πίνακες**, οι οποίοι αναγράφουν την τάση που αντιστοιχεί σε ποικίλες διαφορές θερμοκρασίας ($T - T_0$) για ποικίλες θερμοκρασίες αναφοράς T_0 .
- Ωστόσο, ο υπολογισμός της εν λόγω τάσης μπορεί (**κατά προσέγγιση μόνο**) να γίνει μέσω της ακόλουθης σχέσης, η οποία ακολουθεί τη θεώρηση ότι η θερμοηλεκτρική τάση V είναι ευθέως ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας :

$$V = C \cdot (T_1 - T_2)$$

όπου C λογίζεται ως μια **σταθερά του θερμοζεύγους** με τιμή μερικών δεκάδων μV ανά βαθμό Κελσίου.

- Τυπικές τιμές της σταθεράς C είναι περίπου $38 \mu V/^\circ C$ για θερμοζεύγος χαλκού-κωνσταντάνης (κράμα χαλκού-νικελίου) και $50 \mu V/^\circ C$ για θερμοζεύγος σιδήρου-κωνσταντάνης.

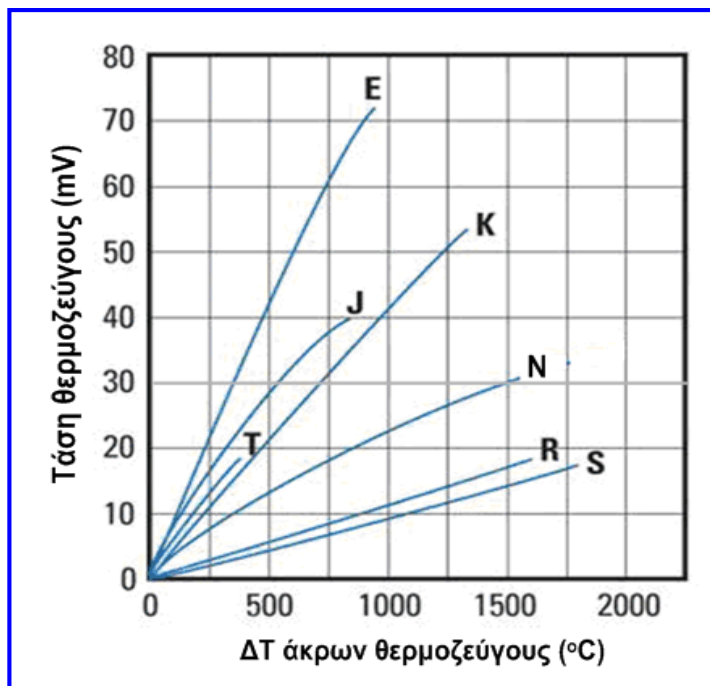
Θερμοζεύγος

Τμήμα πίνακα που περιλαμβάνει την τάση θερμοζεύγους T χαλκού-κωνσταντάνης που αντιστοιχεί σε ποικίλες διαφορές θερμοκρασίας ($T - T_0$) με θερμοκρασία αναφοράς $T_0 = 0^\circ C$

$^\circ C$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Thermoelectric Voltage in mV											
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.352	0.391
10	0.391	0.431	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.790
20	0.790	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.033	1.074	1.114	1.155	1.196
30	1.196	1.238	1.279	1.320	1.362	1.403	1.445	1.486	1.528	1.570	1.612
40	1.612	1.654	1.696	1.738	1.780	1.823	1.865	1.908	1.950	1.993	2.036
50	2.036	2.079	2.122	2.165	2.208	2.251	2.294	2.338	2.381	2.425	2.468
60	2.468	2.512	2.556	2.600	2.643	2.687	2.732	2.776	2.820	2.864	2.909
70	2.909	2.953	2.998	3.043	3.087	3.132	3.177	3.222	3.267	3.312	3.358
80	3.358	3.403	3.448	3.494	3.539	3.585	3.631	3.677	3.722	3.768	3.814
90	3.814	3.860	3.907	3.953	3.999	4.046	4.092	4.138	4.185	4.232	4.279
100	4.279	4.325	4.372	4.419	4.466	4.513	4.561	4.608	4.655	4.702	4.750
110	4.750	4.798	4.845	4.893	4.941	4.988	5.036	5.084	5.132	5.180	5.228
120	5.228	5.277	5.325	5.373	5.422	5.470	5.519	5.567	5.616	5.665	5.714
130	5.714	5.763	5.812	5.861	5.910	5.959	6.008	6.057	6.107	6.156	6.206
140	6.206	6.255	6.305	6.355	6.404	6.454	6.504	6.554	6.604	6.654	6.704
150	6.704	6.754	6.805	6.855	6.905	6.956	7.006	7.057	7.107	7.158	7.209
160	7.209	7.260	7.310	7.361	7.412	7.463	7.515	7.566	7.617	7.668	7.720
170	7.720	7.771	7.823	7.874	7.926	7.977	8.029	8.081	8.133	8.185	8.237
180	8.237	8.289	8.341	8.393	8.445	8.497	8.550	8.602	8.654	8.707	8.759
190	8.759	8.812	8.865	8.917	8.970	9.023	9.076	9.129	9.182	9.235	9.288
200	9.288	9.341	9.395	9.448	9.501	9.555	9.608	9.662	9.715	9.769	9.822
210	9.822	9.876	9.930	9.984	10.038	10.092	10.146	10.200	10.254	10.308	10.362
220	10.362	10.417	10.471	10.525	10.580	10.634	10.689	10.743	10.798	10.853	10.907
230	10.907	10.962	11.017	11.072	11.127	11.182	11.237	11.292	11.347	11.403	11.458
240	11.458	11.513	11.569	11.624	11.680	11.735	11.791	11.846	11.902	11.958	12.013
250	12.013	12.069	12.125	12.181	12.237	12.293	12.349	12.405	12.461	12.518	12.574
260	12.574	12.630	12.687	12.743	12.799	12.856	12.912	12.969	13.026	13.082	13.139
270	13.139	13.196	13.253	13.310	13.366	13.423	13.480	13.537	13.595	13.652	13.709
280	13.709	13.766	13.823	13.881	13.938	13.995	14.053	14.110	14.168	14.226	14.283
290	14.283	14.341	14.399	14.456	14.514	14.572	14.630	14.688	14.746	14.804	14.862

Θερμοζεύγος

Τύπος θερμοζεύγους	Αγωγός Α	Αγωγός Β
E	Κράμα νικελίου-χρωμίου	Κράμα χαλκού-νικελίου (κονσταντάνη)
J	Σίδηρος	Κονσταντάνη
K	Κράμα νικελίου-χρωμίου	Κράμα νικελίου-αλουμινίου-μαγγανίου-πυριτίου
N	Κράμα νικελίου-χρωμίου-πυριτίου	Κράμα νικελίου-πυριτίου-μαγνησίου
R	Λευκόχρυσος	Κράμα λευκόχρυσου-ροδίου (13%)
S	Λευκόχρυσος	Κράμα λευκόχρυσου-ροδίου (18%)
T	Χαλκός	Κονσταντάνη

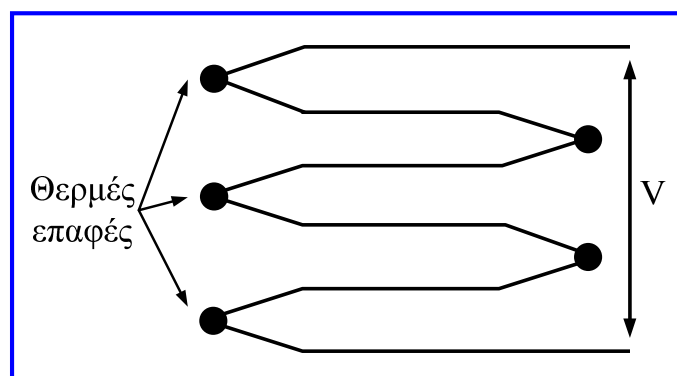
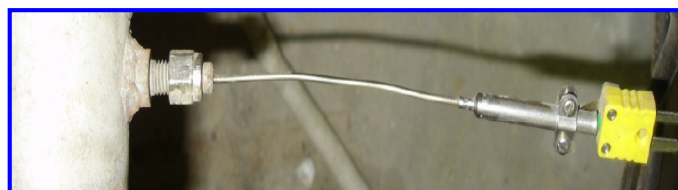


Διαγράμματα τάσης διαφόρων τύπων θερμοζεύγους ως προς τη διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) των άκρων τους.

Θερμοζεύγος

- Παρέχουν εύρος μέτρησης από -270 έως 1700 °C, ανάλογα με τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των αγωγών και επιτυγχάνουν γρήγορη απόκριση σε μεταβολές της θερμοκρασίας.
- **Χρήσεις:** βιομηχανία (φούρνοι, υγρά μέταλλα), εχθρικά περιβάλλοντα όπως πυρηνικοί αντιδραστήρες), ιατρική (καταγραφή θερμοκρασίας στη διάρκεια εγχειρήσεων), ηλεκτρονική (μέτρηση θερμοκρασίας πολύ μικρών αντικειμένων).
- Για **αύξηση της ευαισθησίας**, τα θερμοζεύγη χρησιμοποιούνται συχνά σε ομάδες που αναφέρονται ως **θερμοστοιχεία (thermopiles)**.

Κάθε θερμοηλεκτρικό ζεύγος έχει θετικό και αρνητικό ακροδέκτη, με το πρώτο μέταλλο του ζεύγους καλωδίων να αφορά τον θετικό αγωγό και το δεύτερο τον αρνητικό.

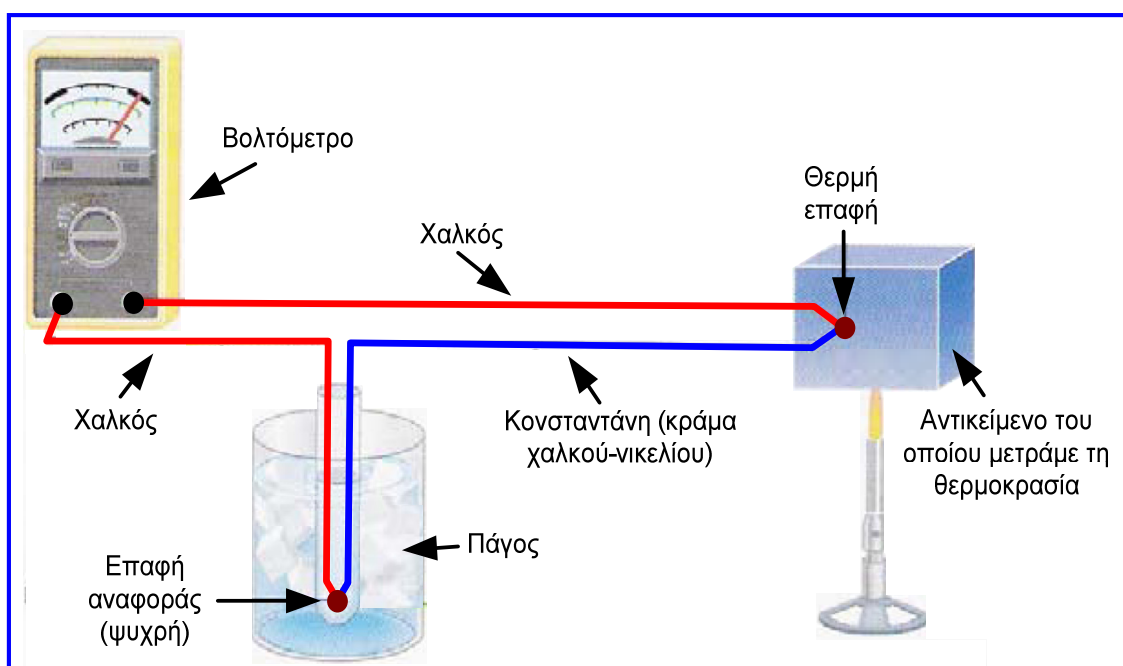


Παράδειγμα 1

Επιθυμούμε να μετράμε τη θερμοκρασία ενός αντικειμένου που θερμαίνουμε με καμινέτο με τη βοήθεια διάταξης η οποία περιλαμβάνει θερμοζεύγος χαλκού και κονσταντάνης με σταθερά $C = 38 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, βολτόμετρο και δοχείο πάγου. Να καθοριστεί η κατάλληλη συνδεσμολογία. Εάν η ένδειξη του βολτομέτρου είναι 2.55 mV , να προσδιοριστεί η θερμοκρασία του αντικειμένου. Επίσης, εάν η ένδειξη του βολτομέτρου αυξηθεί κατά 0.45 mV να προσδιοριστεί η μεταβολή της θερμοκρασίας του αντικειμένου.

Παράδειγμα 1

Η κατάλληλη συνδεσμολογία έχει ως εξής:



Παράδειγμα 1

Η θερμοκρασία της επαφής αναφοράς (T_2) είναι 0°C (πάγος), συνεπώς:

$$V = C \cdot (T_1 - T_2) \Rightarrow V = C \cdot (T_1 - 0) \Rightarrow T_1 = \frac{V}{C} \Rightarrow T_1 = \frac{2.55 \cdot 10^{-3} \text{ V}}{38 \cdot 10^{-6} \text{ V}/^\circ\text{C}} \Rightarrow T_1 = 67.1^\circ\text{C}$$

Εάν η ένδειξη του βολτομέτρου αυξηθεί κατά 0.45 mV , τότε $V = 3 \text{ mV}$:

$$V = C \cdot (T'_1 - T_2) \Rightarrow V = C \cdot (T'_1 - 0) \Rightarrow T'_1 = \frac{V}{C} \Rightarrow T'_1 = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ V}}{38 \cdot 10^{-6} \text{ V}/^\circ\text{C}} \Rightarrow T'_1 = 78.9^\circ\text{C}$$

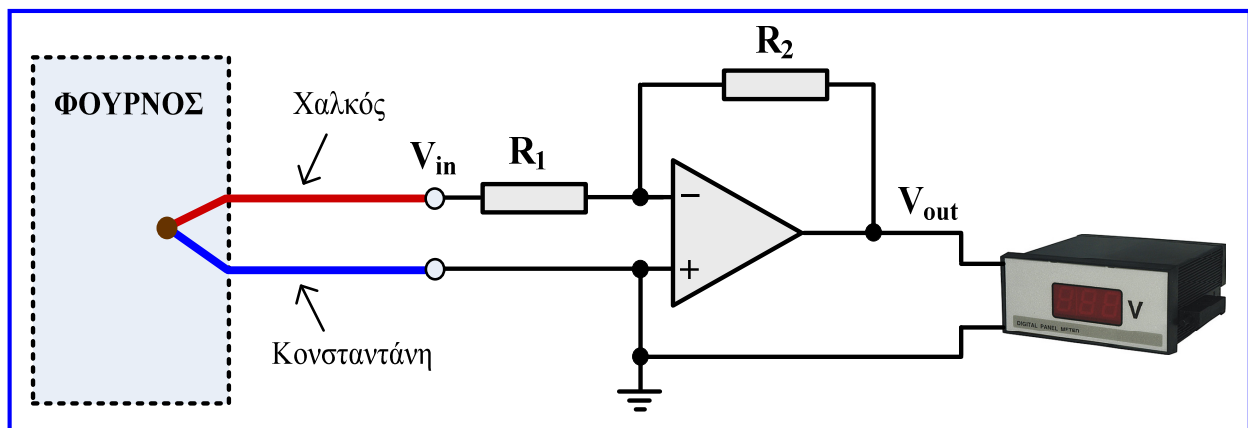
Συνεπώς, η μεταβολή της θερμοκρασίας του αντικειμένου είναι:

$$\Delta T = T'_1 - T_1 = 78.9^\circ\text{C} - 67.1^\circ\text{C} \Rightarrow \Delta T = 11.8^\circ\text{C}$$

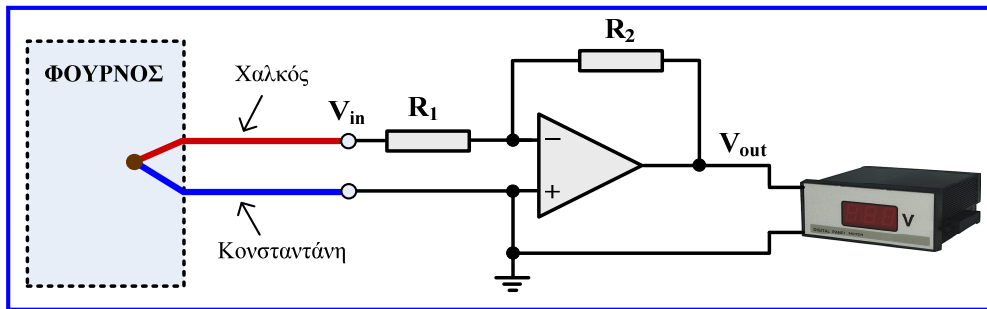
Τα αποτελέσματα θα ήταν ακριβέστερα, εάν αντί για την σταθερά C του θερμοζεύγους χρησιμοποιούταν ο πίνακας του θερμοζεύγους με τις τιμές θερμοηλεκτρικής τάσης για διάφορες τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας των άκρων του θερμοζεύγους.

Παράδειγμα 2

Η διάταξη του παρακάτω σχήματος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας σε φούρνο βαφής και περιλαμβάνει θερμοζεύγος χαλκού και κονσταντάνης με σταθερά $C = 38 \mu\text{V} / ^\circ\text{C}$, ψηφιακό βολτόμετρο και ενισχυτή αντιστροφής (με ιδανικό τελεστικό ενισχυτή). Να προσδιοριστεί η ένδειξη του βολτόμετρου όταν η θερμοκρασία του φούρνου είναι 90°C και του περιβάλλοντος 19°C . Δίνονται: $R_1 = 100 \Omega$, $R_2 = 330 \text{ k}\Omega$.



Παράδειγμα 2



Η μία επαφή του θερμοζεύγους βρίσκεται στο φούρνο δηλ. σε θερμοκρασία $T_1 = 90^\circ\text{C}$, ενώ η άλλη επαφή που συνδέεται στην είσοδο του ενισχυτή αντιστροφής βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_2 = 19^\circ\text{C}$, συνεπώς:

$$V_{in} = C \cdot (T_1 - T_2) \Rightarrow V_{in} = 38 \frac{\mu\text{V}}{^\circ\text{C}} \cdot (90^\circ\text{C} - 19^\circ\text{C}) \Rightarrow V_{in} = 2698 \mu\text{V} \Rightarrow V_{in} \approx 2.7 \text{ mV}$$

Στη συνέχεια προσδιορίζουμε την τάση εξόδου του ενισχυτή αντιστροφής (δηλ. την ένδειξη του ψηφιακού βολτομέτρου):

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} \Rightarrow V_{out} = -\frac{330 \cdot 10^3}{100} \cdot 2.7 \cdot 10^{-3} \text{ V} \Rightarrow V_{out} = -8.91 \text{ V}$$

ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΘΕΡΜΙΣΤΟΡ



Θερμίστορ NTC

- Το μεταλλικό σύρμα που τυλίγεται και σχηματίζει το πηνίο στα θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (RTD) έχει το μειονέκτημα ότι οι μεταβολές της αντίστασης είναι μικρές (περίπου 5 mΩ ανά °C), που συνεπάγεται μικρή ευαισθησία.
- Για να λυθεί το πρόβλημα, κατασκευάστηκαν **θερμόμετρα ημιαγωγών**, που χρησιμοποιούν την ίδια αρχή λειτουργίας με τα θερμόμετρα αντίστασης (δηλαδή τη μεταβολή της αντίστασης, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία) με τη διαφορά ότι οι ημιαγωγοί εμφανίζουν μεγαλύτερη μεταβολή αντίστασης για την ίδια μεταβολή θερμοκρασίας.
- Τα στοιχεία που αναφέρονται ως **θερμίστορ** κατασκευάζονται από ημιαγωγικά υλικά (μαγγάνιο, νικέλιο, χρώμιο, κοβάλτιο) και σκόνη χαλκού και διατίθενται σε μορφή **δισκίων**, **κάψουλων** και **μικρών στύλων**.
- Η **αντίσταση** των **θερμίστορ μειώνεται** με την **αύξηση** της **θερμοκρασίας** με **εκθετικό τρόπο** (**θερμίστορ NTC**, **negative temperature coefficient**, **αρνητικού θερμοκρασιακού συντελεστή**)

$$R_T = R_0 \cdot e^{\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

$$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$$

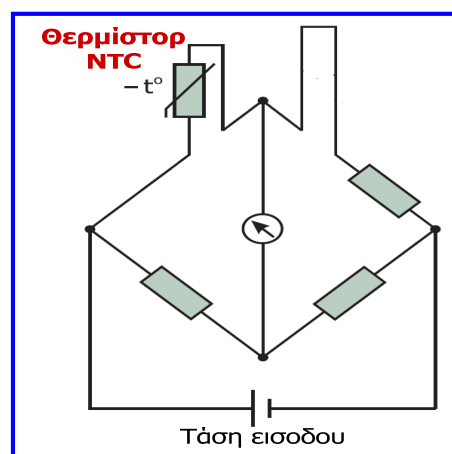
R_T : αντίσταση σε Ω του θερμίστορ σε θερμοκρασία T °K.

R_0 : αντίσταση σε Ω του θερμίστορ σε θερμοκρασία αναφοράς T_0 °K (η θερμοκρασία αναφοράς μπορεί να είναι οποιαδήποτε θερμοκρασία σε °K).

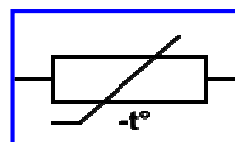
β : σταθερά του θερμίστορ σε °K, που λαμβάνει διαφορετική τιμή για κάθε είδος θερμίστορ (συνήθως 3000 έως 5000 °K).

Θερμίστορ NTC

- Το θερμίστορ μπορεί να συνδεθεί σε ένα βραχίονα γέφυρας Wheatstone.
- Η ισορροπία της γέφυρας είναι ανάλογη της μεταβολής της αντίστασης του θερμίστορ, συνεπώς η ένδειξη του οργάνου στην έξοδο της γέφυρας μπορεί να βαθμονομηθεί σε μονάδες θερμοκρασίας.
- Τα θερμίστορ έχουν πολύ μικρό μέγεθος, ωστόσο παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση και **γρήγορη απόκριση στις μεταβολές θερμοκρασίας**.
- Η περιοχή μέτρησης που παρέχουν είναι συνήθως από 173 έως 573 °K (-100 έως 300 °C), αλλά είναι εφικτές και ευρύτερες περιοχές.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μέτρηση θερμοκρασιών σε μικρούς χώρους, έχουν υψηλή επαναληψιμότητα και διακριτική ικανότητα σε μικρές περιοχές θερμοκρασίας και έτσι χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές και ηλεκτρονικά κυκλώματα.

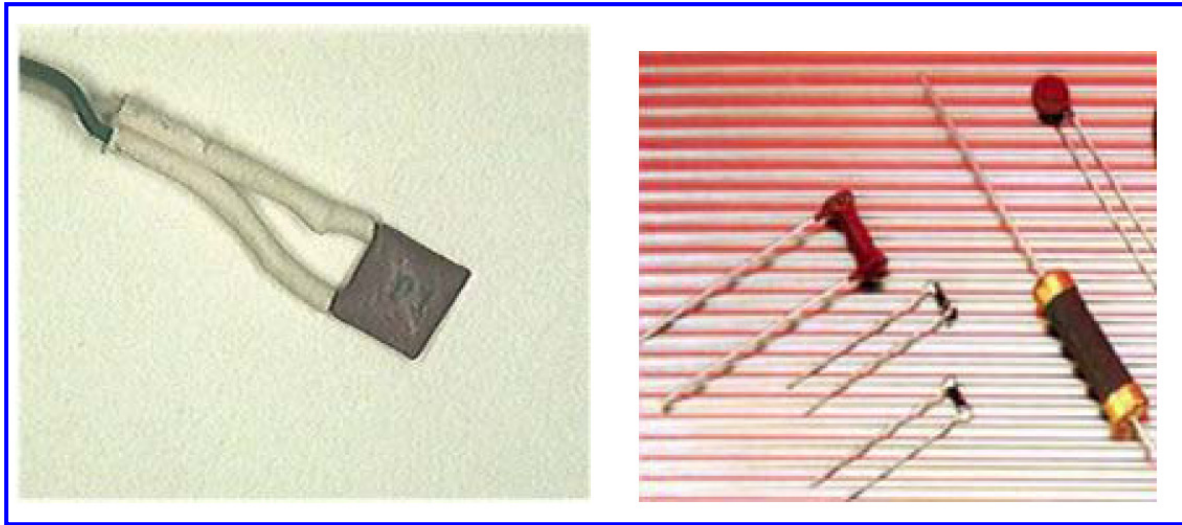


Σύμβολο του θερμίστορ NTC: το πρόσημο σημαίνει ότι πρόκειται για θερμίστορ NTC, δηλαδή για στοιχείο του οποίου η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

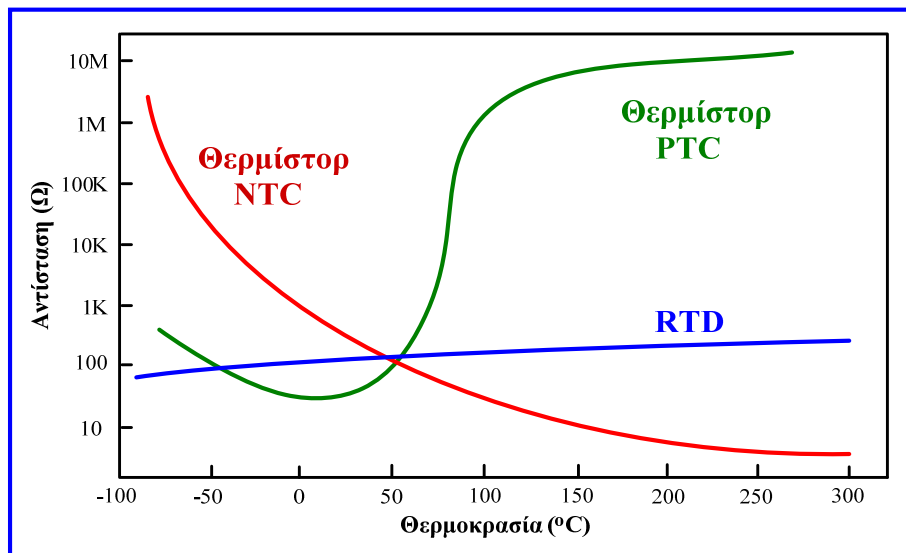
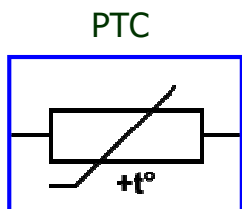
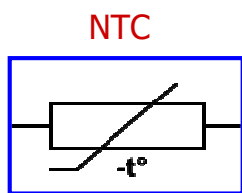


Θερμίστορ NTC

Διάφορες συσκευασίες θερμίστορ NTC



Θερμίστορ NTC και PTC



Χρησιμοποιούνται **θερμίστορ δύο τύπων**: **NTC** (negative temperature coefficient, αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας) των οποίων η αντίσταση μικραίνει με την αύξηση της θερμοκρασίας (δηλ. ο τύπος που εξετάσαμε) και **PTC** (positive temperature coefficient, θετικού συντελεστή θερμοκρασίας) των οποίων η αντίσταση μεγαλώνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα **NTC** χρησιμοποιούνται για ακριβείς μετρήσεις θερμοκρασίας, ενώ τα **PTC** χρησιμοποιούνται συνήθως ως ανιχνευτές θερμότητας.

Θερμίστορ PTC

- Τα **θερμίστορ PTC** χρησιμοποιούνται και ως αισθητήρες θερμοκρασίας (PTC που κατασκευάζονται από πυρίτιο), ωστόσο είναι **κυρίως διακοπτικού τύπου**.
- Η αντίσταση των θερμίστορ του τύπου αυτού αυξάνεται απότομα μετά από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία (όπως φαίνεται και στη χαρακτηριστική καμπύλη τους).
- Αυτή η ιδιότητα τα καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμα αν τοποθετηθούν στη θέση της ασφάλειας για την **προστασία κυκλωμάτων**.
- Το ρεύμα μέσα από το θερμίστορ προκαλεί λόγω του φαινομένου Joule μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του.
- Αν το ρεύμα είναι τόσο μεγάλο ώστε να παράγει θερμότητα περισσότερη από αυτή που μπορεί να αποβάλει το θερμίστορ, τότε αυτό θα θερμανθεί περισσότερο, προκαλώντας περαιτέρω αύξηση της αντίστασης του και πιθανή καταστροφή του.
- Τα θερμίστορ PTC χρησιμοποιούνται και ως **περιοριστές ρεύματος**.
- Στην περίπτωση υπερφόρτωσης, η αντίσταση του θερμίστορ αυξάνεται απότομα (αφού το στοιχείο ξεπεράσει μια συγκεκριμένη κρίσιμη θερμοκρασία), περιορίζοντας έτσι το ρεύμα του κυκλώματος. Όταν μειωθεί το ρεύμα το θερμίστορ ψύχεται και το κύκλωμα λειτουργεί κανονικά.

Φαινόμενο αυτοθέρμανσης

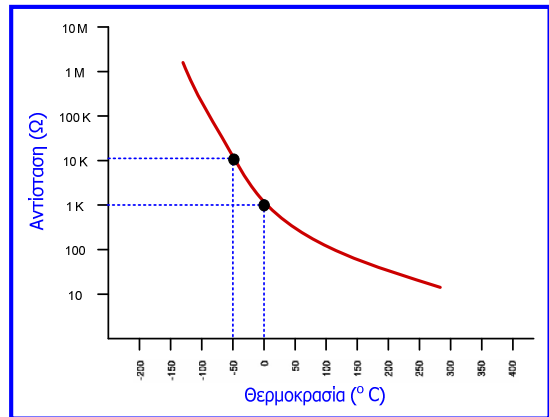
- Σημαντικό μειονέκτημα των αισθητήρων θερμοκρασίας μεταβλητής αντίστασης, όπως το θερμίστορ, αποτελεί το **φαινόμενο αυτοθέρμανσης**.
- Κατά τη λειτουργία τους, οι αισθητήρες αυτοί διαρρέονται από ρεύμα με αποτέλεσμα να θερμαίνονται λόγω του **φαινομένου Joule**.
- Αυτό αποτελεί πηγή σφάλματος, αφού η θερμοκρασία του αισθητήρα δεν επηρεάζεται μόνο από τη θερμότητα του αντικειμένου ή του χώρου, του οποίου μετράμε τη θερμοκρασία, αλλά και από τη θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω του φαινομένου Joule (**αυτοθέρμανση**).
- Με την πάροδο του χρόνου λειτουργίας, λόγω του φαινομένου της αυτοθέρμανσης, παρουσιάζεται μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του αισθητήρα, σε σχέση με τη θερμοκρασία που είναι επιθυμητό να μετρηθεί.
- Εάν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια μέτρησης, τότε θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η απόκλιση λόγω του φαινομένου αυτοθέρμανσης.

Παράδειγμα 1

Ένα θερμίστορ τύπου NTC έχει αντίσταση 1 kΩ στη θερμοκρασία αναφοράς των 0 °C. Να υπολογίσετε την αντίσταση του θερμίστορ σε θερμοκρασία -50 °C και να προσδιορίσετε την αλλαγή της αντίστασης του. Δίδετε η σταθερά του θερμίστορ $\beta = 3000$ °K και η βάση των φυσικών λογαρίθμων $e = 2.718$.

$$\begin{aligned} \text{°K} &= \text{°C} + 273 \\ T_0 &= 0 \text{ °C} + 273 = 273 \text{ °K} \\ T &= -50 \text{ °C} + 273 = 223 \text{ °K} \end{aligned}$$

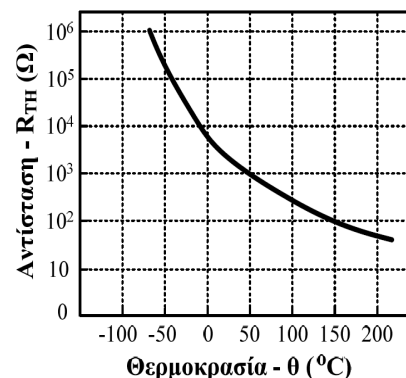
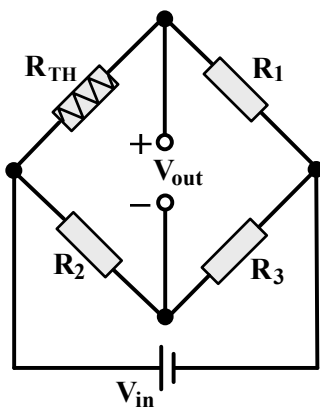
$$\begin{aligned} R_t &= R_o \cdot e^{\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \Rightarrow R_t = 1 \cdot 10^3 \cdot e^{3000 \cdot \left(\frac{1}{223} - \frac{1}{273}\right)} \Rightarrow \\ R_t &= 1 \cdot 10^3 \cdot e^{3000 \cdot 0.82 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow R_t = 1 \cdot 10^3 \cdot e^{2.46} \Rightarrow \\ R_t &= 1 \cdot 10^3 \cdot 2.718^{2.46} \Rightarrow R_t = 1 \cdot 10^3 \cdot 11.702 \Rightarrow \\ R_t &= 11.702 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \Delta R &= R_t - R_o \Rightarrow \Delta R = 11.702 - 1 \Rightarrow \\ \Delta R &= 10.702 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Παράδειγμα 2

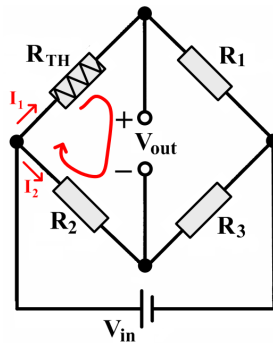
Η γέφυρα Wheatstone του παρακάτω σχήματος περιλαμβάνει τρεις αντιστάσεις $R_1 = 60 \Omega$, $R_2 = 80 \Omega$ και $R_3 = 40 \Omega$ και ένα θερμίστορ NTC με αντίσταση R_{TH} . Το διάγραμμα $R_{TH} = f(\theta)$, δίνεται επίσης στο παρακάτω σχήμα. Η τάση εισόδου (V_{in}) της γέφυρας είναι 12 V.



- (α) Να υπολογιστεί η τάση εξόδου (V_{out}) της γέφυρας όταν η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το θερμίστορ είναι 150 °C, θεωρώντας ότι η τιμή των αντιστάσεων R_1 , R_2 και R_3 δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία.
- (β) Να υπολογιστεί η σταθερά (β) του θερμίστορ. Δίνεται ότι: $\ln 10 = 2.3$.

Παράδειγμα 2

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



$$I_1 \cdot R_{TH} + V_{out} - I_2 \cdot R_2 = 0 \Rightarrow V_{out} = I_2 \cdot R_2 - I_1 \cdot R_{TH}.$$

Υπολογίζουμε στη συνέχεια τα ρεύματα I_1 και I_2 :

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

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{R_2 + R_3} \cdot R_2 - \frac{V_{in}}{R_{TH} + R_1} \cdot R_{TH}.$$

Παράδειγμα 2

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα $R_{TH} = f(\theta)$, η τιμή της αντίστασης του θερμίστορ σε θερμοκρασία 150°C είναι 100Ω . Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην παραπάνω σχέση, υπολογίζουμε την τάση εξόδου της γέφυρας για τις δύο τιμές θερμοκρασίας του αισθητήρα:

$$V_{out-150^\circ\text{C}} = \left(\frac{12}{80 + 40} \cdot 80 - \frac{12}{100 + 60} \cdot 100 \right) \text{V} \Rightarrow V_{out-150^\circ\text{C}} = 0.5 \text{V}.$$

(β) Για το θερμίστορ ισχύει ότι:

$$R_T = R_0 \cdot e^{\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)},$$

όπου: R_0 η αντίσταση (Ω) σε θερμοκρασία αναφοράς T_0 °K,
 R_T η αντίσταση (Ω) σε θερμοκρασία T °K,
 β η σταθερά του θερμίστορ.

Από το διάγραμμα $R_{TH} = f(\theta)$ του θερμίστορ, παρατηρούμε ότι η αντίστασή του σε θερμοκρασία 50°C είναι $1 \text{ k}\Omega$, ενώ η αντίστασή του σε θερμοκρασία 150°C είναι 100Ω . Συνεπώς, αφού $^\circ\text{K} = \text{C} + 273$, επιλέγουμε $T = 50 + 273 = 323 \text{ }^\circ\text{K}$ και $T_0 = 150 + 273 = 423 \text{ }^\circ\text{K}$ και υπολογίζουμε τη ζητούμενη σταθερά:

Παράδειγμα 2

$$\begin{aligned}R_{323^{\circ}\text{K}} &= R_{423^{\circ}\text{K}} \cdot e^{\beta \cdot \left(\frac{1}{323^{\circ}\text{K}} - \frac{1}{423^{\circ}\text{K}} \right)} \Rightarrow \frac{R_{323^{\circ}\text{K}}}{R_{423^{\circ}\text{K}}} = e^{\beta \cdot \left(\frac{1}{323^{\circ}\text{K}} - \frac{1}{423^{\circ}\text{K}} \right)} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \ln \left(\frac{R_{323^{\circ}\text{K}}}{R_{423^{\circ}\text{K}}} \right) = \beta \cdot \left(\frac{1}{323^{\circ}\text{K}} - \frac{1}{423^{\circ}\text{K}} \right) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \ln \left(\frac{1\text{k}\Omega}{100\Omega} \right) = \beta \cdot \left(\frac{1}{323^{\circ}\text{K}} - \frac{1}{423^{\circ}\text{K}} \right) \Rightarrow \ln 10 = \beta \cdot \left(3.096 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^{\circ}\text{K}} - 2.364 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^{\circ}\text{K}} \right) \Rightarrow \\ &\Rightarrow 2.3 = \beta \cdot 0.732 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^{\circ}\text{K}} \Rightarrow \beta = \frac{2.3}{0.732} \cdot 10^3 \text{ } ^{\circ}\text{K} \Rightarrow \beta \approx 3142 \text{ } ^{\circ}\text{K} .\end{aligned}$$

**ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΜΕ ΓΡΑΜΜΙΚΟ
ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ**



Μέτρηση μετατόπισης

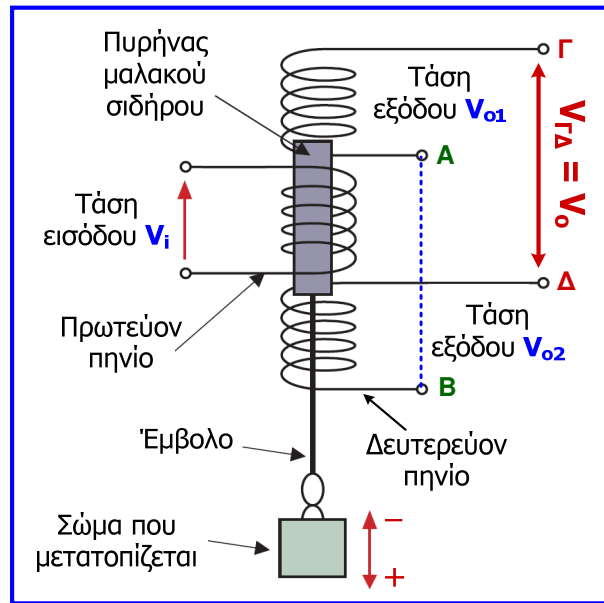
- **Μετατόπιση** είναι το μέγεθος και η κατεύθυνση που αντιπροσωπεύει η αλλαγή θέσης ενός αντικειμένου ως προς ένα σημείο αναφοράς.
- **Γραμμική μετατόπιση** είναι η μετατόπιση σε ευθεία γραμμή (δηλ. σε συγκεκριμένη διεύθυνση), ενώ **γωνιακή μετατόπιση** είναι η γωνία κατά την οποία έχει περιστραφεί 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**.

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 δευτερεύοντων 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**).



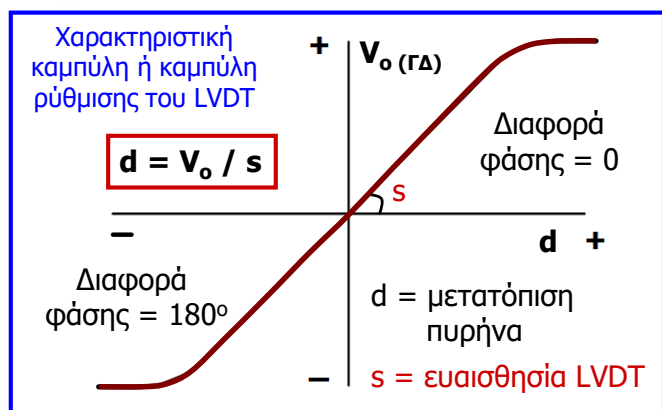
Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής

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

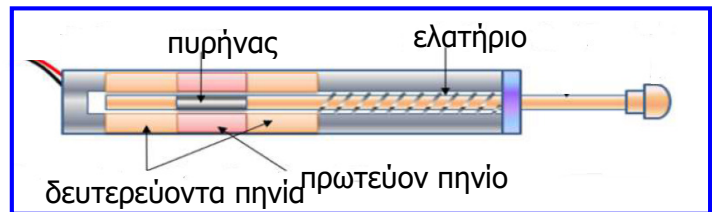
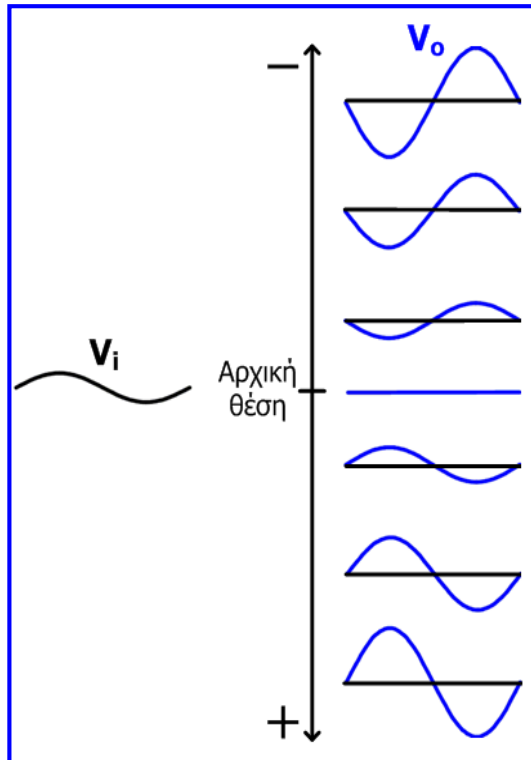
$$V_i = V_I \cdot \eta \mu(\omega \cdot t)$$

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

- 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.

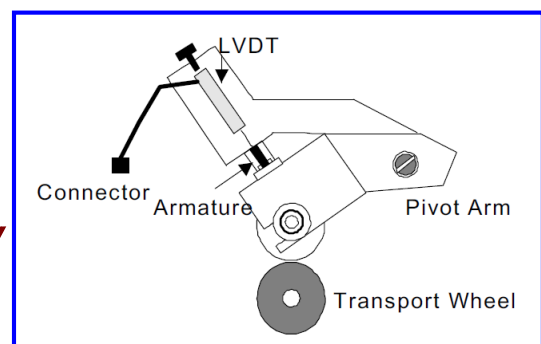


Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής



Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής

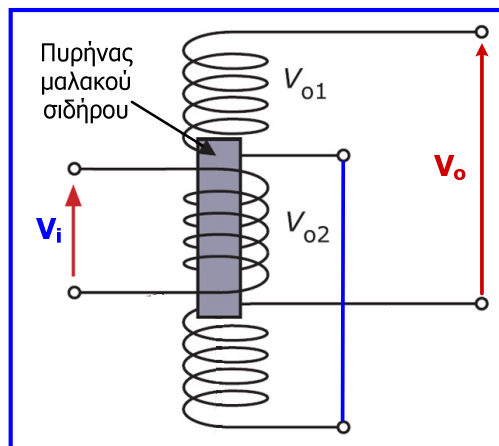
- Οι LVDT έχουν μεγάλη ευαισθησία, διακριτική ικανότητα έως 0.05 mm, εύρος μέτρησης 0.1 – 300 mm και παρουσιάζουν μικρό σφάλμα ($\pm 0.5 \%$), επειδή ο πυρήνας δεν βρίσκεται σε επαφή με τα πηνία, με αποτέλεσμα πολύ μικρή μηχανική τριβή και φθορά.
- Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του πάχους των υλικών 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.



Παράδειγμα

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 .



Παράδειγμα

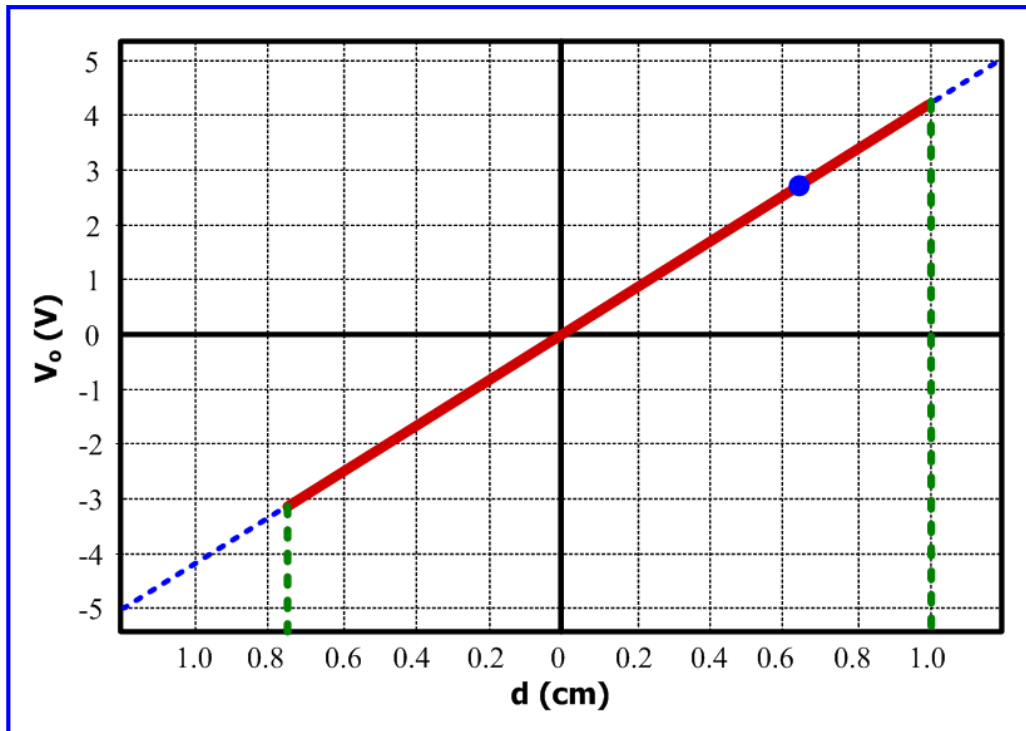
(α) Η ευαισθησία του LVDT δίνεται από τη σχέση $s = V_o / d$, και αφού το πλάτος της τάσης εξόδου είναι 2.7 V και η ευαισθησία 4.15 V / cm , προκύπτει εύκολα ότι η μετατόπιση του πυρήνα στην περίπτωση αυτή είναι: $d = V_o / s = (2.7 / 4.15) \text{ cm} = 0.65 \text{ cm}$ και αφού η τάση εξόδου έχει θετικό 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).

Παράδειγμα

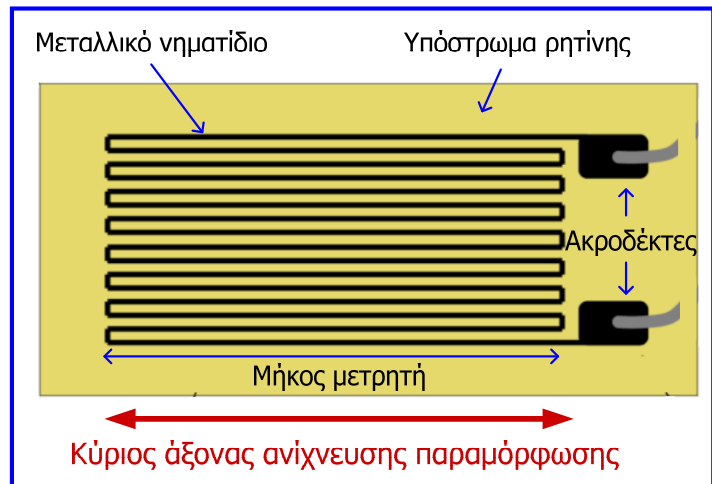


ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ (ΠΙΕЗОΑΝΤΙΣΤΑΣΗ)



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:

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

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 μεταβολής 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: $\epsilon = \Delta l / \ell$.

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:

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

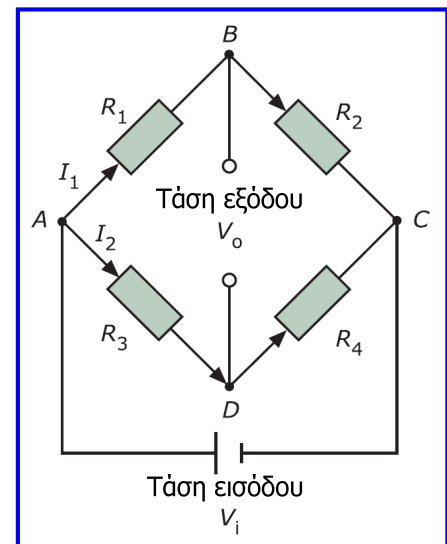
- Ο **παράγοντας G** λαμβάνει συνήθως τιμές από 1.8 έως 2.2 και οι αντιστάσεις των μετρητών είναι συνήθως μεταξύ 50 Ω και 2 k Ω .
- Αν και η **μηχανική τάση ε** είναι καθαρός αριθμός, χρησιμοποιείται γι' αυτή η (ψευτο)μονάδα **microstrain ($\mu\varepsilon$)**.
- **Παράδειγμα:** για μήκος αντικειμένου 100 mm που αυξάνεται κατά 0.1 mm η μηχανική τάση είναι: $\varepsilon = \Delta \ell / \ell = 0.1 / 100 = 0.001 = 1000 \cdot 10^{-6}$ ή 1000 $\mu\varepsilon$.
- Συνήθως οι πιεζοαντιστάσεις χρησιμοποιούνται για μέτρηση μηχανικών τάσεων έως 10,000 $\mu\varepsilon$, αν και μπορούν να μετρηθούν μηχανικές τάσεις έως και 100,000 $\mu\varepsilon$ από μετρητές κωνσταντάνης (κράμα χαλκού - νικελίου) που παρουσιάζουν υψηλή μηχανική αντοχή.

Σύνδεση μετρητών μηχανικής τάσης σε γέφυρα

- 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.
- Όταν $R_1 / R_2 = R_3 / R_4$, η γέφυρα ισορροπεί (μηδενική τάση εξόδου).
- Με εφαρμογή του 2^{ου} κανόνα Kirchhoff σε έναν από τους δύο βρόχους της γέφυρας, προκύπτει ότι:

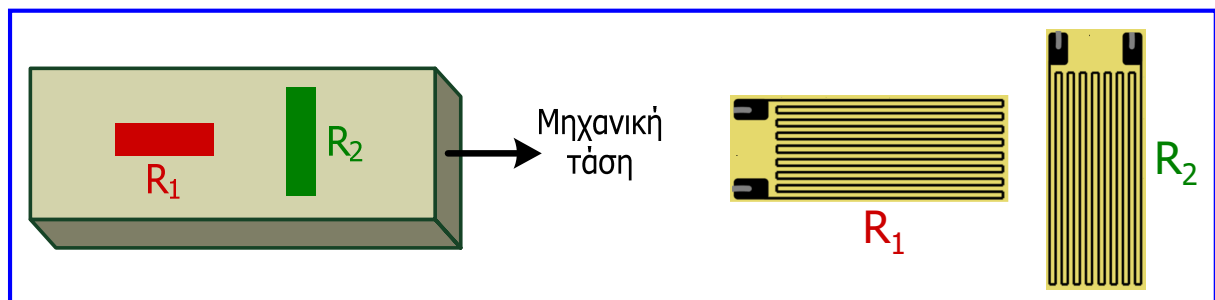
$$V_o = V_i \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

- Εάν αντικατασταθεί μία από τις αντιστάσεις της γέφυρας (π.χ. η R_1) με έναν μετρητή μηχανικής τάσης, τότε η αλλαγή στην αντίσταση του μετρητή προκαλεί μεταβολή της τάσης εξόδου, η οποία αποτελεί μέτρο της ασκούμενης μηχανικής τάσης.



Σύνδεση μετρητών μηχανικής τάσης σε γέφυρα

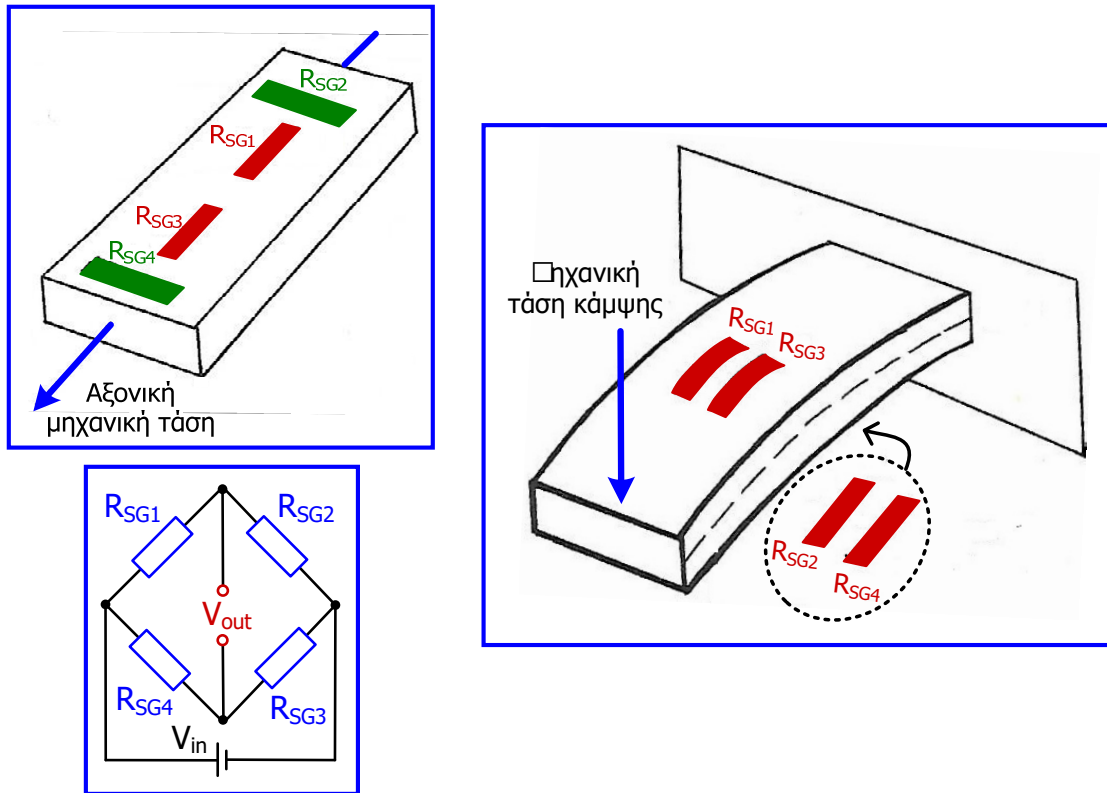
- Στο προηγούμενο κύκλωμα γέφυρας, λόγω του ότι η μεταβολή της αντίστασης του μετρητή μηχανικής τάσης (R_1) είναι μικρή, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα, έτσι ώστε η τάση εξόδου της γέφυρας να μην επηρεάζεται από τη μεταβολή της αντίστασης του μετρητή λόγω αλλαγής της θερμοκρασίας.
- Στην ίδια γέφυρα με 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 .



Σύνδεση μετρητών μηχανικής τάσης σε γέφυρα

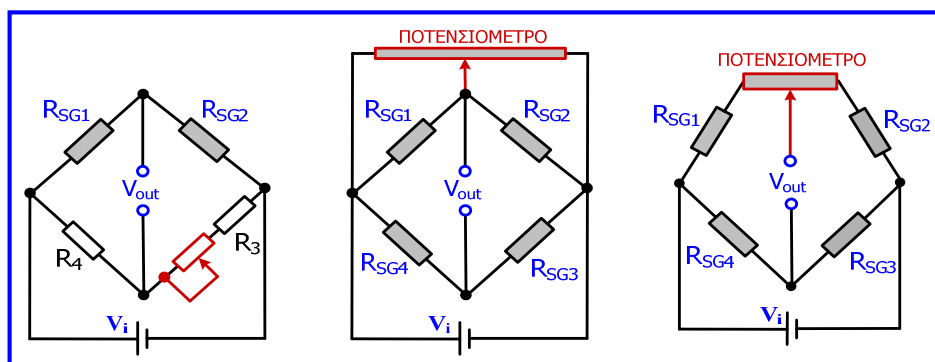
- Σε αρκετές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται περισσότεροι του ενός ενεργοί μετρητές μηχανικής τάσης, οι οποίοι συνδέονται σε γέφυρα Wheatstone.
- Όπως προαναφέρθηκε, λόγω του ότι η μεταβολή της αντίστασης κάθε μετρητή είναι μικρή, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα, έτσι ώστε η τάση εξόδου της γέφυρας να μην επηρεάζεται 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 αντικείμενου που κάμπτεται προς τα κάτω (των οποίων το μήκος αυξάνεται) και 2 μετρητές στην κάτω πλευρά του ίδιου αντικείμενου (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.

Σύνδεση μετρητών μηχανικής τάσης σε γέφυρα



Σύνδεση μετρητών μηχανικής τάσης σε γέφυρα

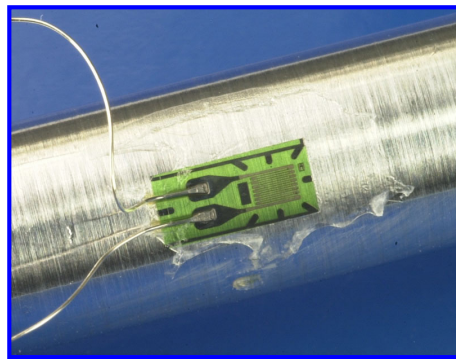
- Η **ανοχή της αντίστασης των μετρητών μηχανικής τάσης**, συχνά είναι παρόμοια ή πιο μεγάλη από την αλλαγή της αντίστασης τους λόγω της ασκούμενης μηχανικής τάσης.
- Για παράδειγμα, πιεζοαντίσταση 120Ω με ανοχή 0.5% , δηλαδή $\pm 0.6 \Omega$ και παράγοντα $G = 2$, με ασκούμενη μηχανική τάση $\epsilon = 2500 \mu\epsilon$, παρουσιάζει μεταβολή αντίστασης ίση με την ανοχή, αφού $\Delta R = \pm G \cdot \epsilon \cdot R = \pm 2 \cdot 0.0025 \cdot 120 = \pm 0.6 \Omega$.
- Για το λόγο αυτό, σε 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**.



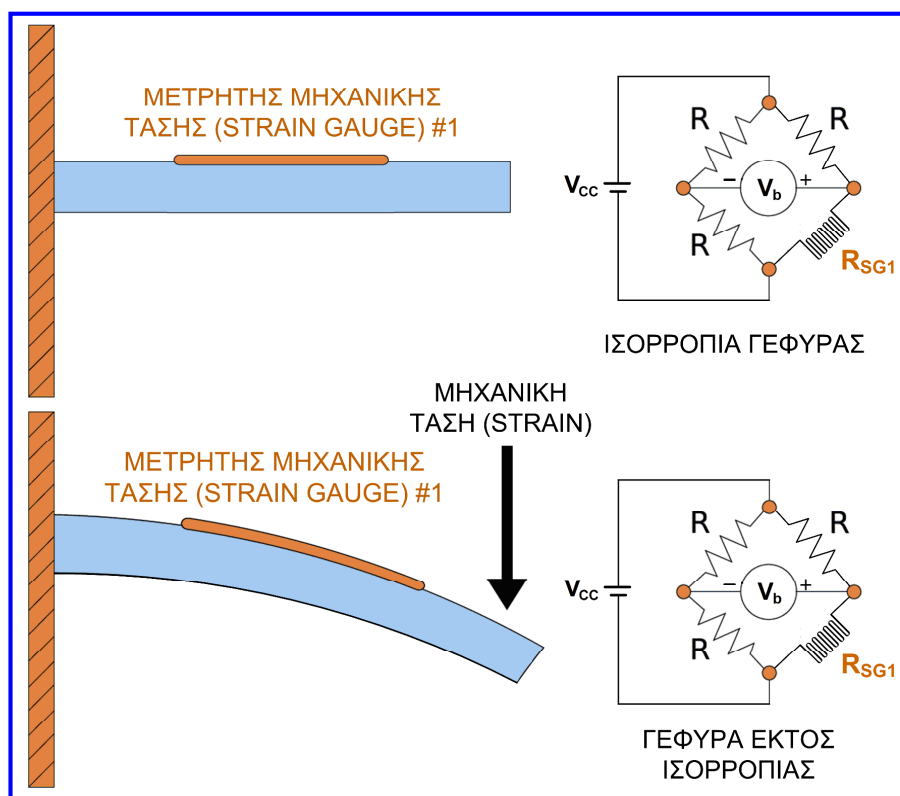
Χρήση μετρητών μηχανικής τάσης

- 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



Παράδειγμα 1



$$R = 200 \Omega$$

$$V_{CC} = 12 \text{ V}$$

Ένας μετρητής μηχανικής τάσης με αντίσταση $R_{SG0} = R = 200 \Omega$ όταν δεν ασκείται εφελκυσμός ή συμπίεση και παράγοντα $G = 2.1$

Υπολογισμός τάσης εξόδου της γέφυρας (V_b) όταν στη ράβδο ασκείται μηχανική τάση κάμψης $\epsilon = 2500 \mu\epsilon$.

Παράδειγμα 1

Λόγω του ότι ο μετρητής μηχανικής τάσης #1 υφίσταται εφελκυσμό (δηλαδή, αυξάνεται το μήκος του), η αντίστασή του αυξάνεται κατά ΔR .

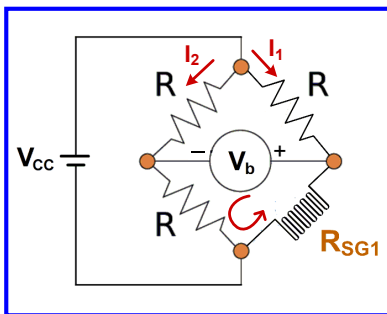
$$\Delta R = G \cdot \varepsilon \cdot R_{SG0} = G \cdot \varepsilon \cdot R = 2.1 \cdot 2500 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \Omega = 1.05 \Omega$$

Επομένως, η τιμή της αντίστασης του μετρητή μηχανικής τάσης όταν ασκείται στη ράβδο μηχανική τάση 2500 $\mu\epsilon$, είναι: $R_{SG1} = R_{SG0} + \Delta R = R + \Delta R = 200 + 1.05 = 201.05 \Omega$.

Εφαρμόζουμε το 2ο κανόνα Kirchhoff στον κάτω βρόχο της γέφυρας:

$$I_2 \cdot R - I_1 \cdot R_{SG1} + V_b = 0 \Rightarrow V_b = I_1 \cdot R_{SG1} - I_2 \cdot R \Rightarrow V_b = I_1 \cdot (R + \Delta R) - I_2 \cdot R$$

$$I_1 = \frac{V_{CC}}{R + R_{SG1}} = \frac{V_{CC}}{R + R + \Delta R} = \frac{V_{CC}}{2 \cdot R + \Delta R} \quad I_2 = \frac{V_{CC}}{R + R} = \frac{V_{CC}}{2 \cdot R}$$



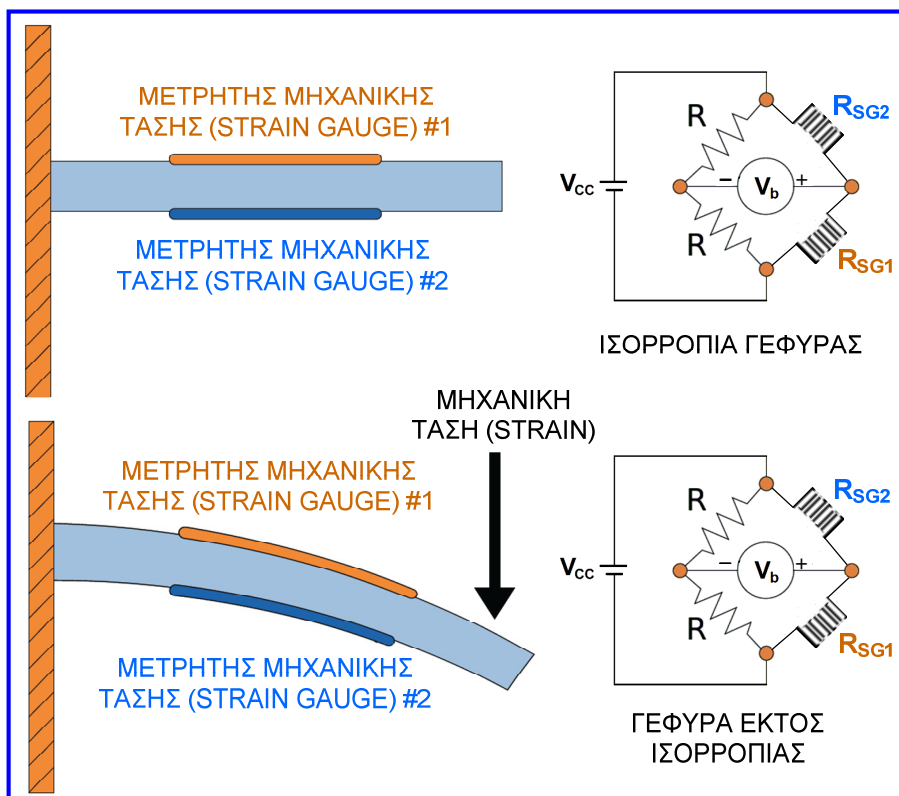
$$V_b = \frac{V_{CC} \cdot (R + \Delta R)}{2 \cdot R + \Delta R} - \frac{V_{CC} \cdot R}{2 \cdot R} \Rightarrow V_b = \frac{V_{CC} \cdot (R + \Delta R)}{2 \cdot R + \Delta R} - \frac{V_{CC}}{2}$$

$$\Rightarrow V_b = V_{CC} \cdot \frac{2 \cdot (R + \Delta R) - (2 \cdot R + \Delta R)}{2 \cdot (2 \cdot R + \Delta R)} \Rightarrow V_b = \frac{V_{CC} \cdot \Delta R}{2 \cdot (2 \cdot R + \Delta R)}$$

$$\Delta R \ll 2 \cdot R \Rightarrow V_b = \frac{V_{CC} \cdot \Delta R}{4 \cdot R} = 15.75 \text{ mV}$$

Η σχέση τάσης εξόδου της γέφυρας (V_b) και ΔR είναι κατά προσέγγιση γραμμική

Παράδειγμα 2



$$R = 200 \Omega$$

$$V_{CC} = 12 \text{ V}$$

Δύο όμοιοι μετρητές μηχανικής τάσης με αντίσταση $R_{SG0} = R = 200 \Omega$ όταν δεν ασκείται εφελκυσμός ή συμπίεση και παράγοντα $G = 2.1$

Υπολογισμός τάσης εξόδου της γέφυρας (V_b) όταν στη ράβδο ασκείται μηχανική τάση κάμψης $\varepsilon = 2500 \mu\epsilon$.

Παράδειγμα 2

Λόγω του ότι ο μετρητής #1 υφίσταται εφελκυσμό (δηλαδή, αυξάνεται το μήκος του), η αντίστασή του αυξάνεται κατά ΔR . Αντιθέτως, λόγω του ότι ο μετρητής #2 υφίσταται συμπίεση ή θλίψη (δηλαδή, μειώνεται το μήκος του), η αντίστασή του μειώνεται κατά ΔR .

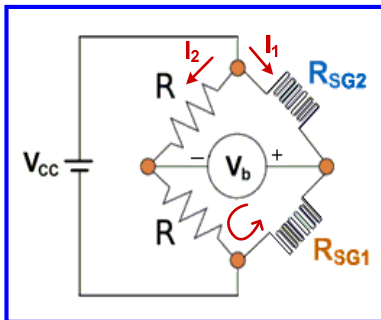
$$\Delta R = G \cdot \varepsilon \cdot R_{SG0} = G \cdot \varepsilon \cdot R = 2.1 \cdot 2500 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \Omega = 1.05 \Omega$$

Επομένως, οι τιμές των αντιστάσεων των δύο μετρητών μηχανικής τάσης όταν ασκείται μηχανική τάση 2500 με, έχουν ως εξής:

$$R_{SG1} = R_{SG0} + \Delta R = R + \Delta R = 200 + 1.05 = 201.05 \Omega,$$

$$R_{SG2} = R_{SG0} - \Delta R = R - \Delta R = 200 - 1.05 = 198.95 \Omega.$$

Εφαρμόζουμε το 2ο κανόνα Kirchhoff στον κάτω βρόχο της γέφυρας:



$$I_2 \cdot R - I_1 \cdot R_{SG1} + V_b = 0 \Rightarrow V_b = I_1 \cdot R_{SG1} - I_2 \cdot R$$

$$I_1 = \frac{V_{CC}}{R_{SG1} + R_{SG2}} = \frac{V_{CC}}{R + \Delta R + R - \Delta R} = \frac{V_{CC}}{2 \cdot R} \quad I_2 = \frac{V_{CC}}{R + R} = \frac{V_{CC}}{2 \cdot R}$$

$$V_b = \frac{V_{CC} \cdot R_{SG1}}{2 \cdot R} - \frac{V_{CC} \cdot R}{2 \cdot R} \Rightarrow V_b = \frac{V_{CC} \cdot (R + \Delta R)}{2 \cdot R} - \frac{V_{CC}}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_b = \frac{V_{CC}}{2} + \frac{V_{CC} \cdot \Delta R}{2 \cdot R} - \frac{V_{CC}}{2} \Rightarrow V_b = \frac{V_{CC} \cdot \Delta R}{2 \cdot R} = 31.5 \text{ mV}$$

Η σχέση V_b και ΔR είναι γραμμική και η V_b είναι διπλάσια από εκείνη του Παραδείγματος 1.

Βιβλιογραφία

- P. Elgar, Αισθητήρες μέτρησης και ελέγχου, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- Κ. Καλαϊτζάκη, Ε. Κουτρούλη, Ηλεκτρικές μετρήσεις και αισθητήρες: Αρχές λειτουργίας και σχεδιασμός των ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2010.
- Κ. Καλοβρέκτη, Ν. Κατέβα, Αισθητήρες μέτρησης και ελέγχου, Εκδόσεις Τζιόλα, 2018.
- Α. Γαστεράτου, Σ. Μουρούτσου, Ι. Ανδρεάδη, Τεχνολογία μετρήσεων - Αισθητήρια, Εκδόσεις Τσότρας, 2013.
- Ν. Σταθόπουλου, Μετρήσεις: Ηλεκτρονικά συστήματα μετρήσεων και αισθητήρια, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Αράκουθος, 2017.
- A. Parr, Industrial control handbook, Industrial Press, 2000.
- J. Fraden, Handbook of modern sensors: Physics, designs and applications, Springer, 2004.
- W. Nawrocki, Measurement systems and sensors, Artech House, 2005.
- J.G. Webster, H. Eren, Measurement, instrumentation and sensors handbook, CRC Press, 2014.

B. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

- Εργαστηριακή άσκηση 1: Μελέτη μετατροπών σήματος (A/D και D/A)
- Εργαστηριακή άσκηση 2: Μέτρηση θερμοκρασίας με θερμοζεύγος
- Εργαστηριακή άσκηση 3: Μέτρηση θερμοκρασίας με θερμίστορ
- Εργαστηριακή άσκηση 4: Μελέτη γραμμικού μεταβλητού διαφορικού μετασχηματιστή (LVDT)
- Εργαστηριακή άσκηση 5: Μελέτη μετρητή μηχανικής τάσης (πιεζοαντίστασης)



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 1

ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΗΜΑΤΟΣ (A/D, D/A)

Αντικείμενο της άσκησης είναι η κατανόηση της λειτουργίας και η μελέτη των χαρακτηριστικών του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D) κλιμακωτής ανόδου και του αντίστοιχου μετατροπές ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (D/A).

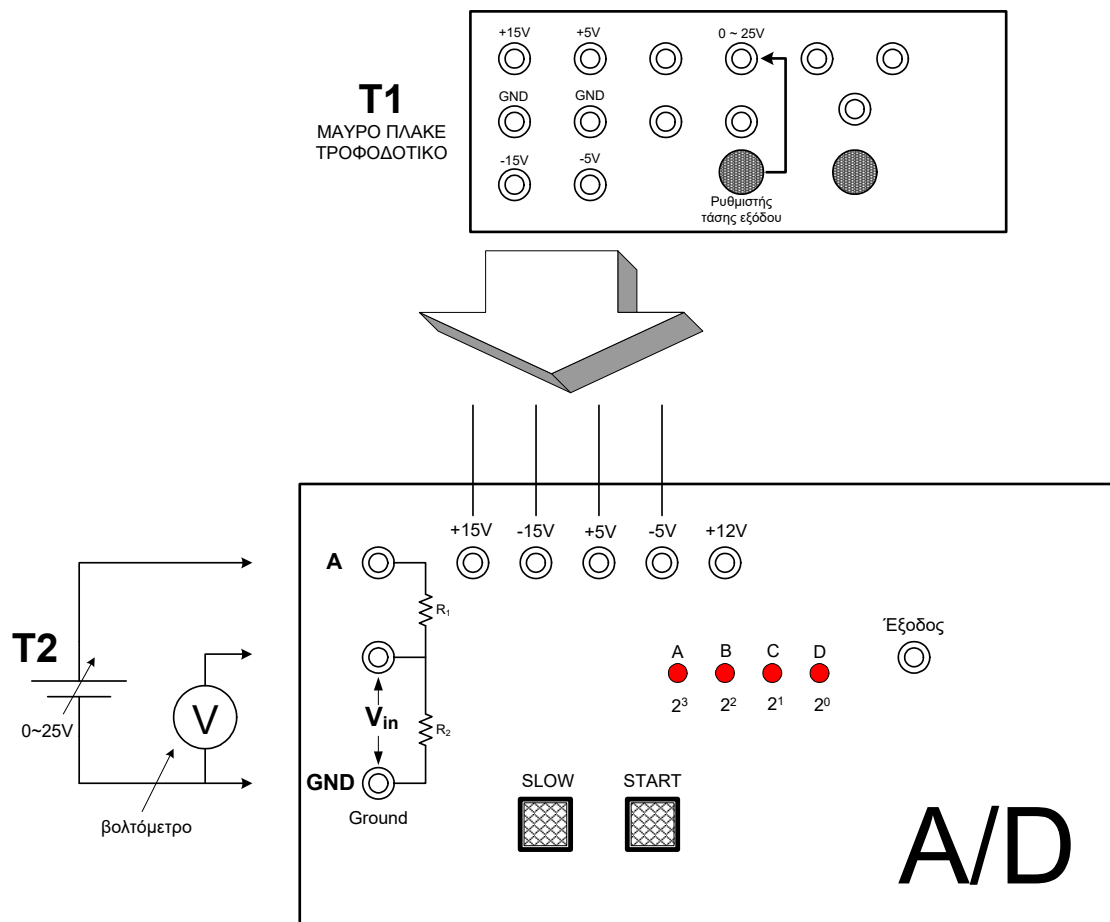
ΒΗΜΑ 1: Για την πραγματοποίηση της άσκησης θα χρειαστείτε δύο τροφοδοτικά. Το μαύρο πλακέ τροφοδοτικό (T1) θα παρέχει στις υποδοχές της πλακέτας του A/D μετατροπέα τις τάσεις +15V, -15V, +5V, -5V και τη γείωση. **Προσοχή, πρώτα συνδέσετε στην πλακέτα τη γείωση (ground)** και μετά τα υπόλοιπα καλώδια. Θα χρησιμοποιήσετε επίσης έναν A/D μετατροπέα των 4 bits με εύρος μετατροπής $V = 4V$. Για το μετατροπέα προσδιορίστε αρχικά τη **διακριτική του ικανότητα** και μετά κάνετε τη **θεωρητική αντιστοιχία των τιμών εισόδου με τις ψηφιακές λέξεις εξόδου σε δυαδικό κώδικα** (πίνακας 1).

Διακριτική Ικανότητα = ————— = ————— =

ΕΙΣΟΔΟΣ (Volt)	ΨΗΦΙΑΚΗ ΛΕΞΗ ΕΞΟΔΟΥ	ΔΕΚΑΔΙΚΗ ΛΕΞΗ ΕΞΟΔΟΥ
		0
		1
		2
		3
		4
		5
		6
		7
		8
		9
		10
		11
		12
		13
		14
		15

Πίνακας 1

ΒΗΜΑ 2: Ο A/D μετατροπέας που θα χρησιμοποιήσετε εσείς **δεν είναι** ιδανικός. Έτσι θα υπάρξει μια μικρή απόκλιση των πειραματικών μετρήσεων από τις αντίστοιχες υπολογισθείσες του πίνακα 1. Υλοποιήστε το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος 1.



Σχήμα 1

ΒΗΜΑ 3: Μεταβάλλοντας την τάση του δεύτερου τροφοδοτικού (T2) θα πάρετε μετρήσεις για να χαράξετε την **καμπύλη ρύθμισης του A/D μετατροπέα.**

Ρυθμίστε την έξοδο του τροφοδοτικού T2 να δίνει 0 Volt.

A. Πατήστε το πλήκτρο Start και δείτε ότι στην έξοδο του A/D (λαμπάκια A,B,C,D) εμφανίζετε η ψηφιακή λέξη 0000.

B. Αυξήστε λίγο την τάση του τροφοδοτικού T2, **ξαναπατήστε** το πλήκτρο Start και ελέγξτε ποια είναι η ψηφιακή λέξη που εμφανίζετε στην έξοδο του μετατροπέα.

Γ. Αν η ψηφιακή λέξη που εμφανίζετε είναι το 0000, επαναλάβετε το παραπάνω βήμα **αυξάνοντας** λίγο ακόμη την τάση του τροφοδοτικού T2.

Δ. Αν η ψηφιακή λέξη που εμφανίζετε στην έξοδο είναι το 0001 τότε καταγράψτε την τάση V_{in} που δείχνει το ψηφιακό βολτόμετρο και καταχωρήστε την στην αντίστοιχη στήλη του παρακάτω πίνακα 2.

Επαναλάβετε την παραπάνω διαδικασία του βήματος B προσπαθώντας να πάρετε **στην έξοδο** του A/D μετατροπέα και τις υπόλοιπες ψηφιακές λέξεις του παρακάτω πίνακα. Για κάθε ψηφιακή λέξη που **επιτυγχάνετε**, **σημειώστε** στην αντίστοιχη στήλη του παρακάτω πίνακα την τάση V_{in} που δείχνει το βολτόμετρο.

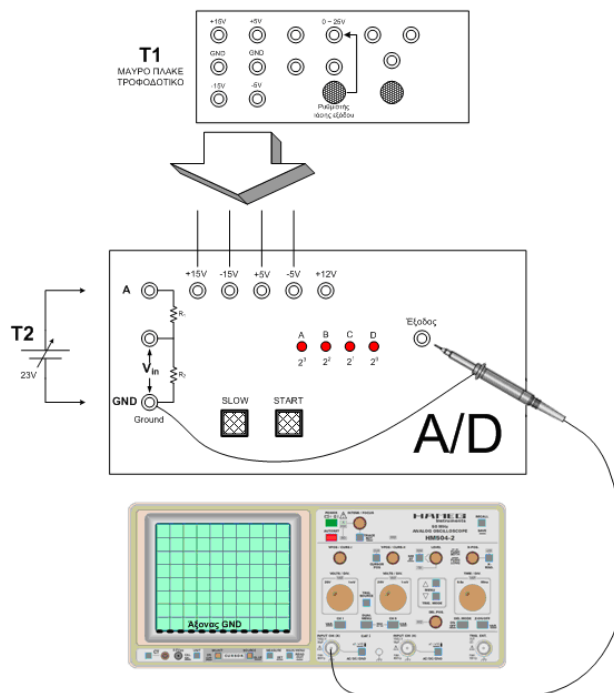
ΨΗΦΙΑΚΗ ΛΕΞΗ ΕΞΟΔΟΥ	ΕΙΣΟΔΟΣ V_{in} (Volt)
0000	
0001	
0010	
0011	
0100	
0101	
0110	
0111	
1000	
1001	
1010	
1011	
1100	
1101	
1110	
1111	

Πίνακας 2

ΒΗΜΑ 4: Με βάση τις τιμές του παραπάνω πίνακα σχεδιάζουμε την καμπύλη ρύθμισης του μετατροπέα A/D (κατακόρυφος άξονας: ψηφιακοί συνδυασμοί εξόδου, οριζόντιος άξονας τιμές αναλογικής τάσης εισόδου).

Συνδέσετε τον παλμογράφο ανάμεσα στον **ακροδέκτη εξόδου** της πλακέτας και το **GND**. Ρυθμίστε τον άξονα αναφοράς του στο κάτω σημείο της οθόνης και επιλέξτε **DC** σύζευξη όσον αφορά το σήμα εισόδου. Δώστε από το τροφοδοτικό **T2** τάση ίση με **23V**.

Πατώντας το πλήκτρο **Start**, θα παρατηρήσετε στην οθόνη του παλμογράφου την καμπύλη ρύθμισης του **A/D**, δηλαδή τη γραφική παράσταση των διαφορετικών συνδυασμών ψηφιακής εξόδου σε σχέση με τις τιμές της αναλογικής τάσης εισόδου.

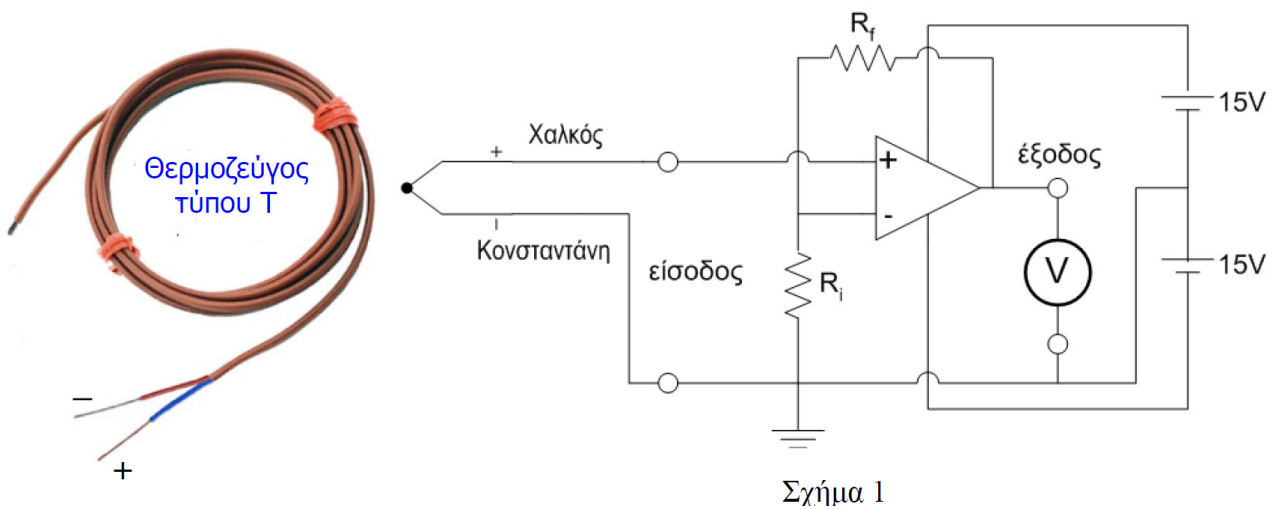


ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 2

ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΟΣ

Αντικείμενο της άσκησης είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών του θερμοζεύγους και η μέτρηση θερμοκρασίας με αυτό.

ΒΗΜΑ 1: Υλοποιήστε **μη αναστρέφον** κύκλωμα **τελεστικού ενισχυτή** (σχήμα 1)



Επειδή η τάση εξόδου του **θερμοζεύγους** **συναρτήσεται** της **διαφοράς θερμοκρασίας** είναι **πολύ μικρή**, γι' αυτό θα επιλέξετε **μεγάλη ενίσχυση** στον **τελεστικό ενισχυτή**. Δηλαδή θα επιλέξετε ενίσχυση τάσεως A_V περίπου 2000 φορές.

Αν λοιπόν η αντίσταση R_i είναι $R_i = 15\Omega$, τότε επιλέξτε την κατάλληλη R_f (από την Πλακέτα 4) ώστε να έχουμε την επιθυμητή ενίσχυση:

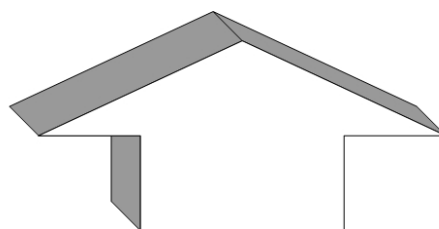
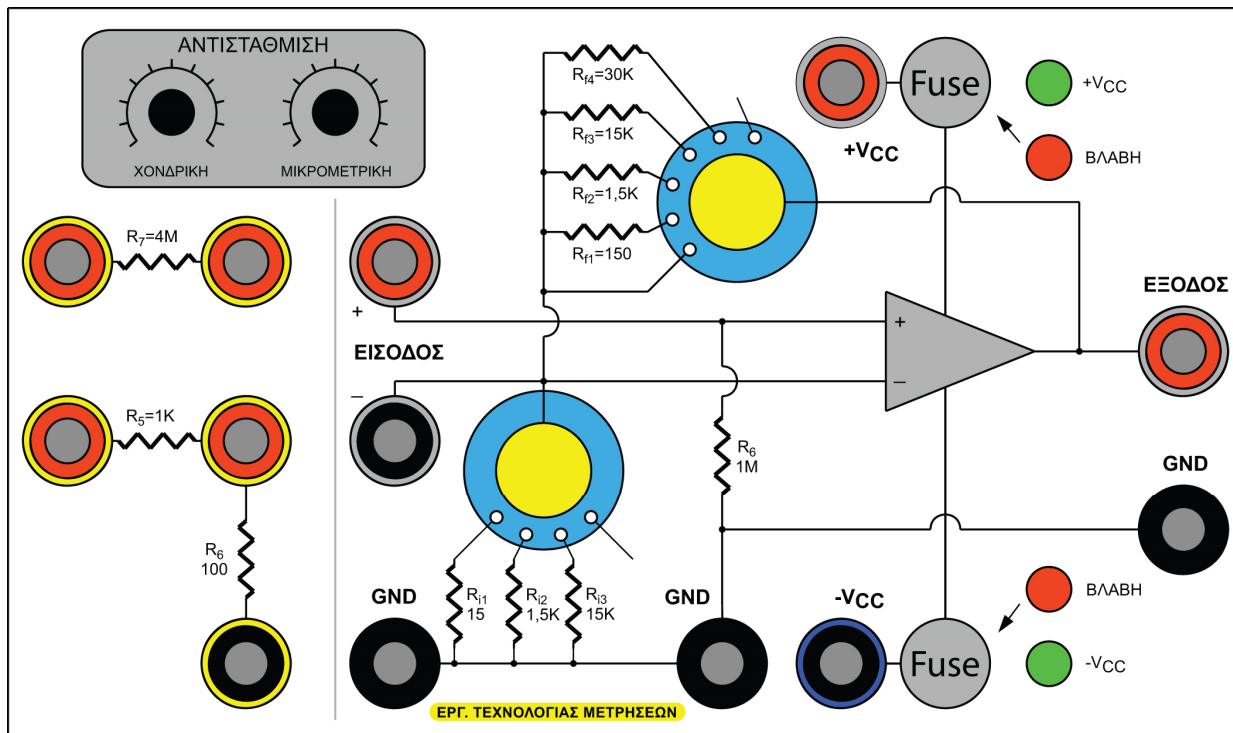
$$R_i = 15 \Omega$$

$$R_f = \dots\dots\dots \Omega$$

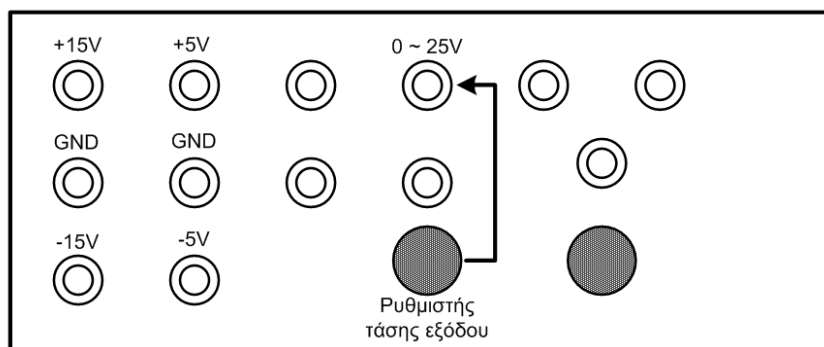
$$\Rightarrow A_V = 1 + (R_f / R_i) = \dots\dots\dots$$

ΒΗΜΑ 2: Για την πραγματοποίηση του κυκλώματος του σχήματος 1 χρησιμοποιήστε την **πλακέτα** που εικονίζεται παρακάτω, συνδέστε στην είσοδο της **θερμοζεύγους χαλκού-κοινοτανάνης** (κράμα χαλκού-νικελίου) και τροφοδοτήστε την με τάση $\pm 15V$ (στα σημεία $+V_{CC}$, $-V_{CC}$ και **GND**) από το τροφοδοτικό **T1**. Στην έξοδο του ενισχυτή συνδέστε ένα ψηφιακό βολτόμετρο (όπως στο σχήμα 1).

Δώστε μεγάλη προσοχή στην τοποθέτηση της γείωσης (GND) του τροφοδοτικού.



T1
ΜΑΥΡΟ ΠΛΑΚΕ
ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ



ΒΗΜΑ 3: Τοποθετείστε τον μικρομετρικό ρυθμιστή αντιστάθμισης της πλακέτας περίπου στην μέση. Με την θερμή επαφή του θερμοζεύγους ελεύθερη στον πάγκο (και μακριά από θερμαντικές πηγές), βάλτε το βολτόμετρο εξόδου στην κλίμακα των 2Volt και κάντε χονδρική αντιστάθμιση στον ενισχυτή (περιστρέφοντας τον χονδρικό ρυθμιστή). Με τον χονδρικό ρυθμιστή αντιστάθμισης θα πρέπει να επιτύχετε ένδειξη στο βολτόμετρο μικρότερη από $\pm 70\text{mV}$. Στην συνέχεια ρυθμίστε τον μικρομετρικό ρυθμιστή αντιστάθμισης ώστε το βολτόμετρο εξόδου να δείξει 0V.

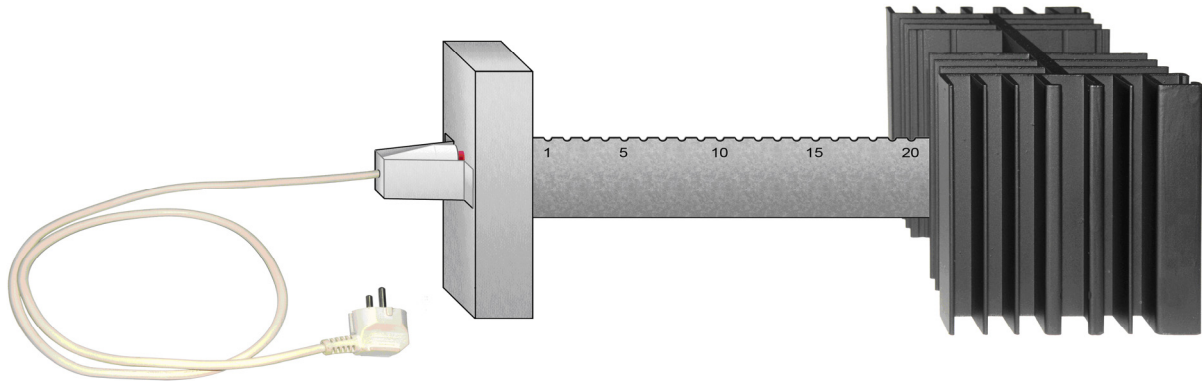
Περιμένετε 2 λεπτά χωρίς να διακόψετε την τροφοδοτική τάση. Ελέγξτε (και πιθανόν ξαναρυθμίστε τον μικρομετρικό ρυθμιστή αντιστάθμισης) ώστε το βολτόμετρο εξόδου να δείχνει 0V.

ΒΗΜΑ 4: Αφού κάνατε αντιστάθμιση, βάλτε τώρα το βολτόμετρο στην κλίμακα των 20 Volt.

Μετρήστε με υδραργυρικό θερμομέτρο την θερμοκρασία του περιβάλλοντος:

$\Theta_{\text{περιβάλλοντος}} = \dots\dots\dots$ (θερμοκρασία ψυχρής επαφής)

Τοποθετήστε την **θερμή επαφή** του **θερμοζεύγους** καθώς και το υδραργυρικό θερμομέτρο μέσα στο **δοχείο βαθμονόμησης** και κρεμάστε το στην **εγκοπή 20** της **θερμαντικής ράβδου**.



Θερμαντική ράβδος

ΒΗΜΑ 5: Αφήστε το στην **εγκοπή 20** για **2,5min** και μετά μετακινήστε το στην πιο θερμή **εγκοπή 18**. Επαναλάβετε το παραπάνω βήμα μετακινώντας το **2 εγκοπές** κάθε **2,5min** (έως την **εγκοπή 0**).

ΒΗΜΑ 6: Με τις μετρήσεις που θα πάρετε συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα.

ΘΕΣΗ ΘΕΡΜΗΣ ΕΠΑΦΗΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΥΔΡΑΡΓΥΡΙΚΟΥ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟΥ	ΕΝΔΕΙΞΗ ΒΟΛΤΟΜΕΤΡΟΥ (V εξόδου σε Volt)	Η.Ε.Δ. ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΟΥΣ (σε mVolt) $H.E.\Delta. = \frac{V_{\text{εξόδου}}}{A_V}$	ΔΙΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ $\Delta\theta = \Theta_{\text{εγκ}} - \Theta_{\text{περιβαλ}}$
Πάγκος				
Εγκοπή 20				
Εγκοπή 18				
Εγκοπή 16				
Εγκοπή 14				
Εγκοπή 12				
Εγκοπή 10				
Εγκοπή 8				
Εγκοπή 6				
Εγκοπή 4				
Εγκοπή 2				

ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΟΣ ΧΑΛΚΟΥ – ΚΟΝΣΤΑΝΤΑΝΗΣ (ΤΥΠΟΥ T)

Πίνακας θερμοηλεκτρικής τάσης (σε mV) και διαφοράς θερμοκρασίας ($T - T_0$) με
θερμοκρασία αναφοράς $T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$

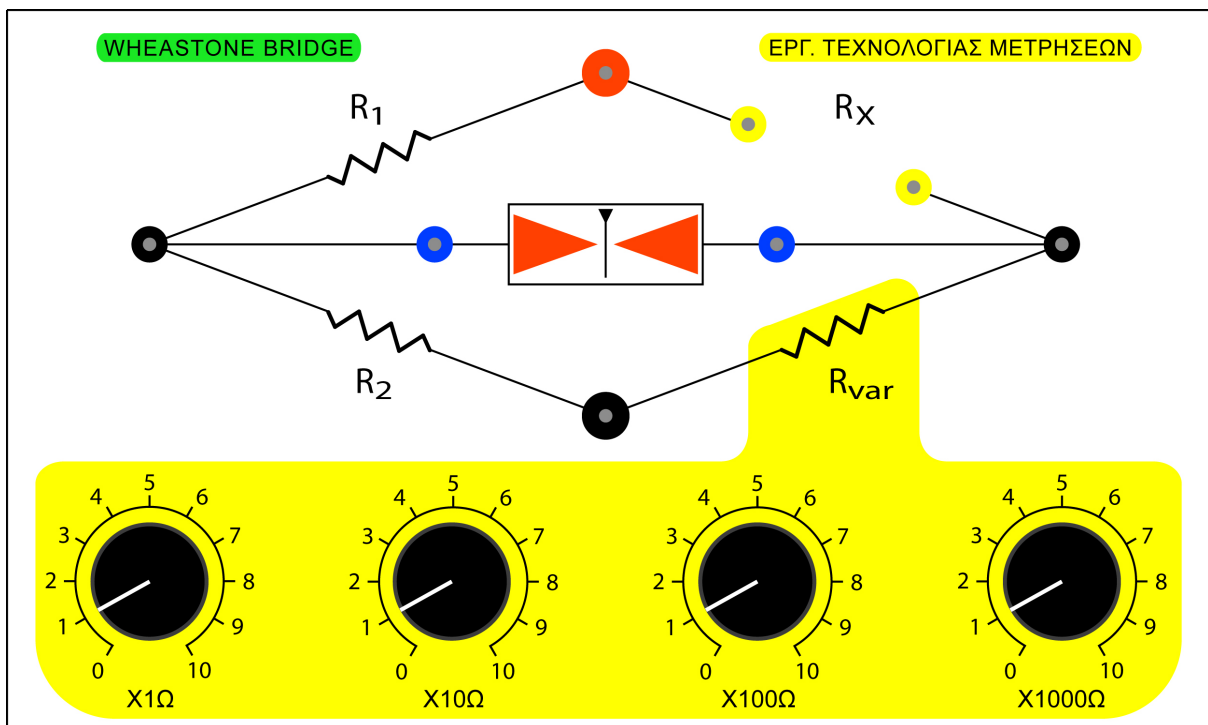
$^\circ\text{C}$	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
Thermoelectric Voltage in mV											
-270	-6.258										
-260	-6.232	-6.236	-6.239	-6.242	-6.245	-6.248	-6.251	-6.253	-6.255	-6.256	-6.258
-250	-6.180	-6.187	-6.193	-6.198	-6.204	-6.209	-6.214	-6.219	-6.223	-6.228	-6.232
-240	-6.105	-6.114	-6.122	-6.130	-6.138	-6.146	-6.153	-6.160	-6.167	-6.174	-6.180
-230	-6.007	-6.017	-6.028	-6.038	-6.049	-6.059	-6.068	-6.078	-6.087	-6.096	-6.105
-220	-5.888	-5.901	-5.914	-5.926	-5.938	-5.950	-5.962	-5.973	-5.985	-5.996	-6.007
-210	-5.753	-5.767	-5.782	-5.795	-5.809	-5.823	-5.836	-5.850	-5.863	-5.876	-5.888
-200	-5.603	-5.619	-5.634	-5.650	-5.665	-5.680	-5.695	-5.710	-5.724	-5.739	-5.753
-190	-5.439	-5.456	-5.473	-5.489	-5.506	-5.523	-5.539	-5.555	-5.571	-5.587	-5.603
-180	-5.261	-5.279	-5.297	-5.316	-5.334	-5.351	-5.369	-5.387	-5.404	-5.421	-5.439
-170	-5.070	-5.089	-5.109	-5.128	-5.148	-5.167	-5.186	-5.205	-5.224	-5.242	-5.261
-160	-4.865	-4.886	-4.907	-4.928	-4.949	-4.969	-4.989	-5.010	-5.030	-5.050	-5.070
-150	-4.648	-4.671	-4.693	-4.715	-4.737	-4.759	-4.780	-4.802	-4.823	-4.844	-4.865
-140	-4.419	-4.443	-4.466	-4.489	-4.512	-4.535	-4.558	-4.581	-4.604	-4.626	-4.648
-130	-4.177	-4.202	-4.226	-4.251	-4.275	-4.300	-4.324	-4.348	-4.372	-4.395	-4.419
-120	-3.923	-3.949	-3.975	-4.000	-4.026	-4.052	-4.077	-4.102	-4.127	-4.152	-4.177
-110	-3.657	-3.684	-3.711	-3.738	-3.765	-3.791	-3.818	-3.844	-3.871	-3.897	-3.923
-100	-3.379	-3.407	-3.435	-3.463	-3.491	-3.519	-3.547	-3.574	-3.602	-3.629	-3.657
-90	-3.089	-3.118	-3.148	-3.177	-3.206	-3.235	-3.264	-3.293	-3.322	-3.350	-3.379
-80	-2.788	-2.818	-2.849	-2.879	-2.910	-2.940	-2.970	-3.000	-3.030	-3.059	-3.089
-70	-2.476	-2.507	-2.539	-2.571	-2.602	-2.633	-2.664	-2.695	-2.726	-2.757	-2.788
-60	-2.153	-2.186	-2.218	-2.251	-2.283	-2.316	-2.348	-2.380	-2.412	-2.444	-2.476
-50	-1.819	-1.853	-1.887	-1.920	-1.954	-1.987	-2.021	-2.054	-2.087	-2.120	-2.153
-40	-1.475	-1.510	-1.545	-1.579	-1.614	-1.648	-1.683	-1.717	-1.751	-1.785	-1.819
-30	-1.121	-1.157	-1.192	-1.228	-1.264	-1.299	-1.335	-1.370	-1.405	-1.440	-1.475
-20	-0.757	-0.794	-0.830	-0.867	-0.904	-0.940	-0.976	-1.013	-1.049	-1.085	-1.121
-10	-0.383	-0.421	-0.459	-0.496	-0.534	-0.571	-0.608	-0.646	-0.683	-0.720	-0.757
0	0.000	-0.039	-0.077	-0.116	-0.154	-0.193	-0.231	-0.269	-0.307	-0.345	-0.383
$^\circ\text{C}$	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Thermoelectric Voltage in mV											
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.352	0.391
10	0.391	0.431	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.790
20	0.790	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.033	1.074	1.114	1.155	1.196
30	1.196	1.238	1.279	1.320	1.362	1.403	1.445	1.486	1.528	1.570	1.612
40	1.612	1.654	1.696	1.738	1.780	1.823	1.865	1.908	1.950	1.993	2.036
50	2.036	2.079	2.122	2.165	2.208	2.251	2.294	2.338	2.381	2.425	2.468
60	2.468	2.512	2.556	2.600	2.643	2.687	2.732	2.776	2.820	2.864	2.909
70	2.909	2.953	2.998	3.043	3.087	3.132	3.177	3.222	3.267	3.312	3.358
80	3.358	3.403	3.448	3.494	3.539	3.585	3.631	3.677	3.722	3.768	3.814
90	3.814	3.860	3.907	3.953	3.999	4.046	4.092	4.138	4.185	4.232	4.279
100	4.279	4.325	4.372	4.419	4.466	4.513	4.561	4.608	4.655	4.702	4.750
110	4.750	4.798	4.845	4.893	4.941	4.988	5.036	5.084	5.132	5.180	5.228
120	5.228	5.277	5.325	5.373	5.422	5.470	5.519	5.567	5.616	5.665	5.714
130	5.714	5.763	5.812	5.861	5.910	5.959	6.008	6.057	6.107	6.156	6.206
140	6.206	6.255	6.305	6.355	6.404	6.454	6.504	6.554	6.604	6.654	6.704
150	6.704	6.754	6.805	6.855	6.905	6.956	7.006	7.057	7.107	7.158	7.209
160	7.209	7.260	7.310	7.361	7.412	7.463	7.515	7.566	7.617	7.668	7.720
170	7.720	7.771	7.823	7.874	7.926	7.977	8.029	8.081	8.133	8.185	8.237
180	8.237	8.289	8.341	8.393	8.445	8.497	8.550	8.602	8.654	8.707	8.759
190	8.759	8.812	8.865	8.917	8.970	9.023	9.076	9.129	9.182	9.235	9.288
200	9.288	9.341	9.395	9.448	9.501	9.555	9.608	9.662	9.715	9.769	9.822
210	9.822	9.876	9.930	9.984	10.038	10.092	10.146	10.200	10.254	10.308	10.362
220	10.362	10.417	10.471	10.525	10.580	10.634	10.689	10.743	10.798	10.853	10.907
230	10.907	10.962	11.017	11.072	11.127	11.182	11.237	11.292	11.347	11.403	11.458
240	11.458	11.513	11.569	11.624	11.680	11.735	11.791	11.846	11.902	11.958	12.013
250	12.013	12.069	12.125	12.181	12.237	12.293	12.349	12.405	12.461	12.518	12.574
260	12.574	12.630	12.687	12.743	12.799	12.856	12.912	12.969	13.026	13.082	13.139
270	13.139	13.196	13.253	13.310	13.366	13.423	13.480	13.537	13.595	13.652	13.709
280	13.709	13.766	13.823	13.881	13.938	13.995	14.053	14.110	14.168	14.226	14.283
290	14.283	14.341	14.399	14.456	14.514	14.572	14.630	14.688	14.746	14.804	14.862
300	14.862	14.920	14.978	15.036	15.095	15.153	15.211	15.270	15.328	15.386	15.445
310	15.445	15.503	15.562	15.621	15.679	15.738	15.797	15.856	15.914	15.973	16.032
320	16.032	16.091	16.150	16.209	16.268	16.327	16.387	16.446	16.505	16.564	16.624
330	16.624	16.683	16.742	16.802	16.861	16.921	16.980	17.040	17.100	17.159	17.219
340	17.219	17.279	17.339	17.399	17.458	17.518	17.578	17.638	17.698	17.759	17.819
350	17.819	17.879	17.939	17.999	18.060	18.120	18.180	18.241	18.301	18.362	18.422
360	18.422	18.483	18.543	18.604	18.665	18.725	18.786	18.847	18.908	18.969	19.030
370	19.030	19.091	19.152	19.213	19.274	19.335	19.396	19.457	19.518	19.579	19.641
380	19.641	19.702	19.763	19.825	19.886	19.947	20.009	20.070	20.132	20.193	20.255
390	20.255	20.317	20.378	20.440	20.502	20.563	20.625	20.687	20.748	20.810	20.872
400	20.872										

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 3

ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΘΕΡΜΙΣΤΟΡ

Αντικείμενο της άσκησης είναι η μελέτη του θερμίστορ NTC και η μέτρηση θερμοκρασίας με αυτό. Για την διεξαγωγή της άσκησης θα χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω εικονιζόμενη **πλακέτα**, ένα **θερμίστορ** τύπου NTC, μια **θερμαντική ράβδο**, ένα **δοχείο βαθμονόμησης**, και ένα **υδραργυρικό θερμόμετρο**.



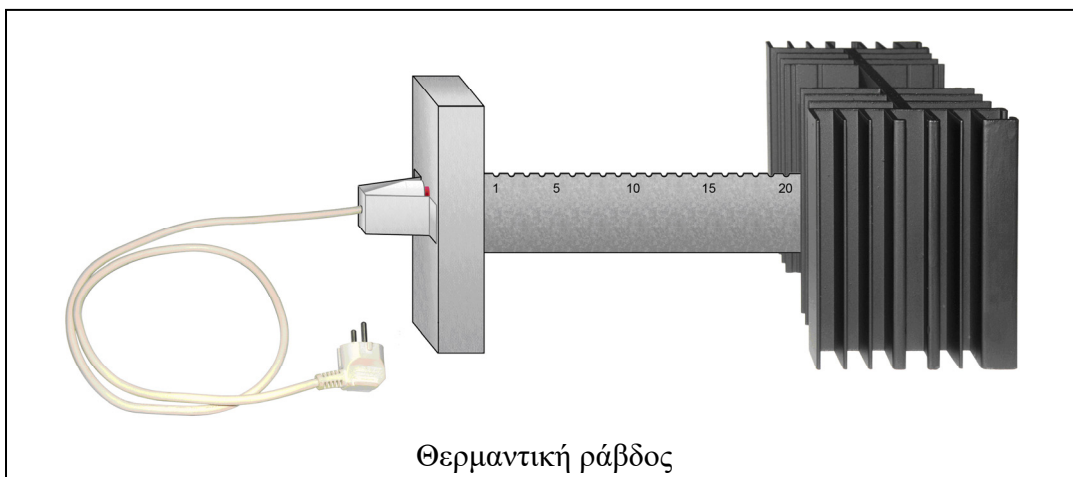
Θερμίστορ τύπου NTC



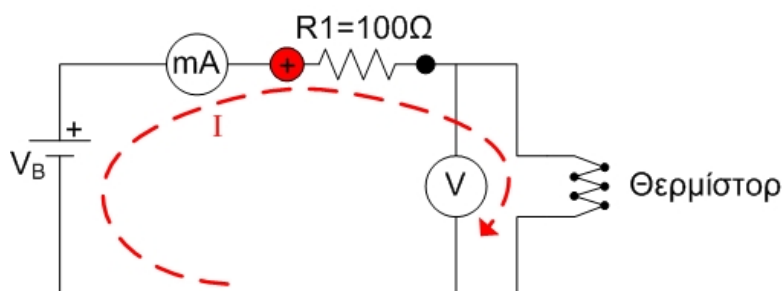
Δοχείο Βαθμονόμησης



Υδραργυρικό
θερμόμετρο



Βήμα 1- 4). Σ' αυτό το βήμα θα μελετήσετε το φαινόμενο της αυτοθέρμανσης του θερμίστορ. Υλοποιήστε το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος 1, χρησιμοποιώντας αντίσταση $R_1 = 100 \Omega$ από το κιβώτιο αντιστάσεων.



Σχήμα 1

Ξεκινώντας με τάση τροφοδοσίας $V_B=0V$ αυξήστε την σιγά-σιγά επιδιώκοντας να επιτύχετε ρεύματα στο κύκλωμα περίπου 2, 4, 10 και 15 mA. Για κάθε ρεύμα I που επιτυγχάνετε περιμένετε 1 min. Μετά την διέλευση του 1 min ξαναμετρήστε το ρεύμα και καταχωρήστε το τώρα σαν I' . Ταυτόχρονα μετρήστε και την τάση V στα όρια του θερμίστορ.

Πραγματοποιήστε την παραπάνω διαδικασία δύο φορές

- i. μία με το θερμίστορ ελεύθερο πάνω στον πάγκο μακριά από θερμαντικές πηγές, και
- ii. μία με το θερμίστορ μέσα στο δοχείο βαθμονόμησης μαζί με νερό μέχρι την μέση. Το δοχείο βαθμονόμησης τοποθετείτε το πάνω στον πάγκο μακριά από θερμαντικές πηγές. Προσοχή μην πέσει και χυθεί το νερό.

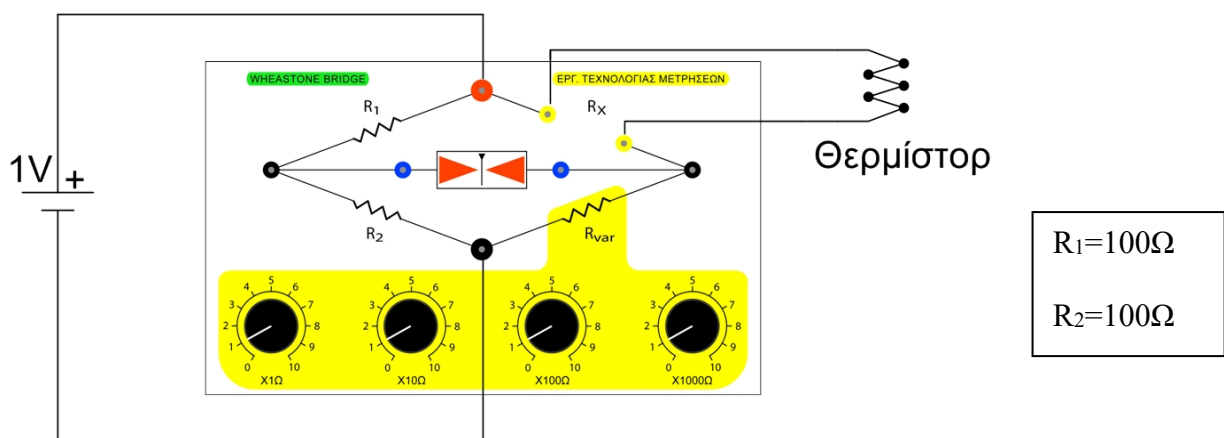
Μετά την πραγματοποίηση της διαδικασίας με το θερμίστορ ελεύθερο στον πάγκο, το θερμίστορ θα πρέπει να ψύχεται με νερό. Με τις μετρήσεις που θα πάρετε συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα 1.

Στις δύο τελευταίες στήλες του πίνακα 1 υπολογίστε την αντίσταση του θερμίστορ καθώς και την ισχύ που καταναλώνεται πάνω του σε κάθε περίπτωση. Όπως προαναφέρθηκε σκοπός αυτών των μετρήσεων και υπολογισμών είναι να παρατηρήσετε και μελετήσετε το φαινόμενο της αυτοθέρμανσης του θερμίστορ.

Με το θερμίστορ ελεύθερο στον πάγκο				
I (mA)	V (Volt)	I' (mA)	$R = \frac{V}{I'}$ (KΩ)	P = V·I' (mW)
2				
4				
10				
15				
Με το θερμίστορ μέσα στο "Δοχείο Βαθμονόμησης"				
I (mA)	V (Volt)	I' (mA)	$R = \frac{V}{I'}$ (KΩ)	P = V·I' (mW)
2				
4				
10				
15				

Πίνακας 1

ΒΗΜΑ 5: Χρησιμοποιώντας την πλακέτα που περιλαμβάνει τη γέφυρα Wheatstone υλοποιήστε το παρακάτω κύκλωμα του σχήματος 2 και δώστε από το τροφοδοτικό τάση $V_{DC}=1\text{ Volt}$



Σχήμα 2

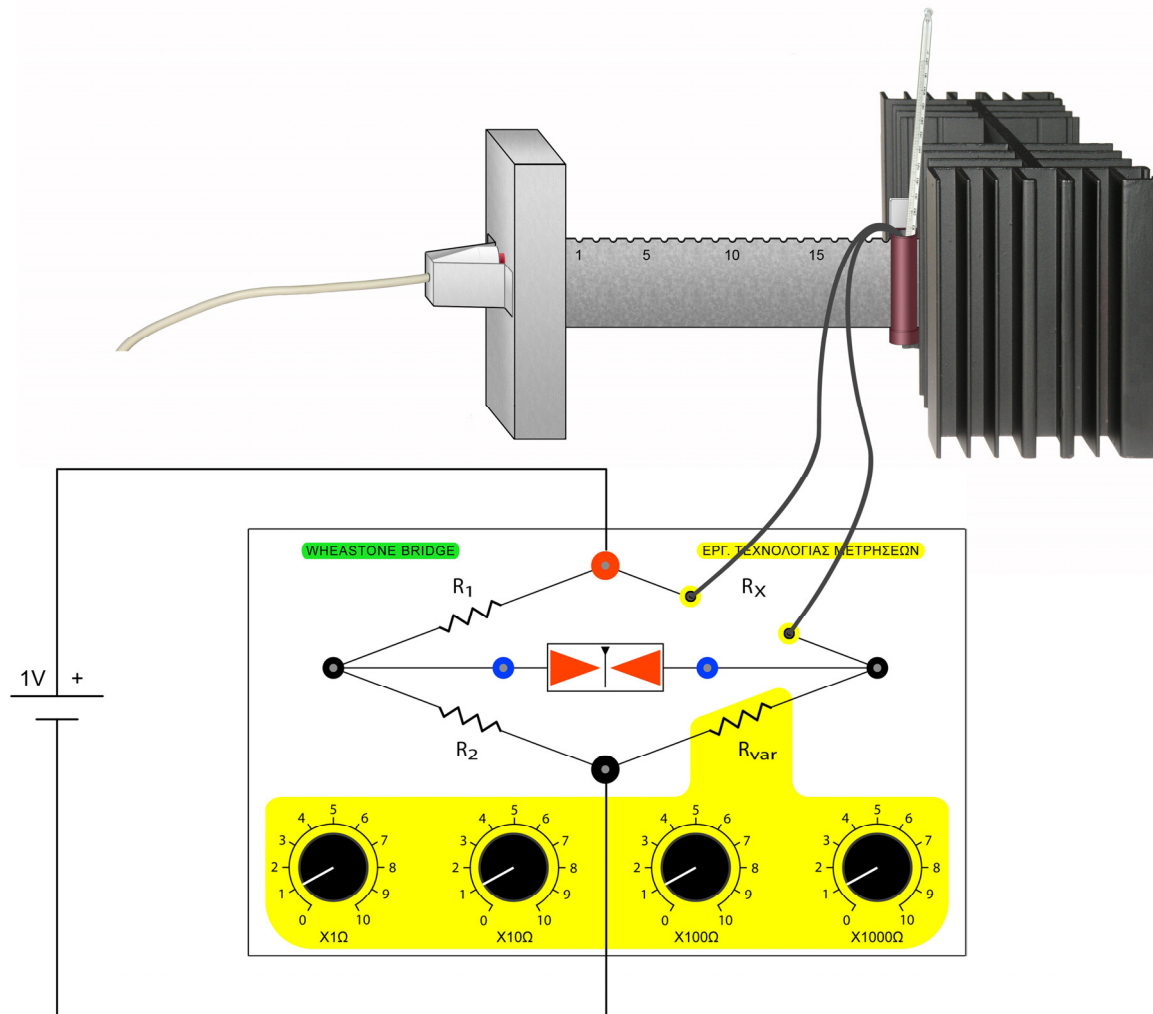
Με το **θερμίστορ** ελεύθερο στο περιβάλλον **μεταβάλλετε** την αντίσταση R_{var} ώστε να **ισορροπείτε** την γέφυρα Wheatstone (επιδιώκοντας να φέρετε την βελόνα του γαλβανόμετρου στην θέση ισορροπίας – Μέση Θέση). Αφού επιτύχετε ισορροπία της γέφυρας τότε η αντίσταση του **θερμίστορ** ($R_{θερμ. περιβάλλον}$) **θα είναι ίση** με την R_{var} αφού $R_1 = R_2$

$$R_{θερμ. περιβάλλον} = \dots \dots \dots \Omega$$

Μετρήστε τώρα με ένα βολτόμετρο και την τάση στα άκρα του **θερμίστορ** ώστε να μπορέσετε να **υπολογίσετε** την **ισχύ** που **καταναλώνεται** πάνω του.

$$V_{θερμ.} = \dots \dots \dots V$$

ΒΗΜΑ 6 – 9: Στην συνέχεια για την διεξαγωγή της άσκησης βάλτε στο **δοχείο βαθμονόμησης** νερό μέχρι την μέση και κρεμάστε το στην **εγκοπή 20** της **θερμαντικής ράβδου**. Τοποθετείστε μέσα στο **δοχείο βαθμονόμησης** το **θερμίστορ** μαζί με το υδραργυρικό θερμόμετρο και δώστε στην **γέφυρα Wheatstone** τροφοδοτική τάση $V_{DC} = 1\text{ Volt}$ (σχήμα 3).



Σχήμα 3

Αφήστε το **δοχείο βαθμονόμησης** για 2,5min στην **εγκοπή 20**, **ισορροπείστε την γέφυρα** (μεταβάλλοντας την R_{var} επιδιώξτε να φέρετε την βελόνα του γαλβανόμετρου στην θέση ισορροπίας – Μέση Θέση), βρείτε **την αντίσταση του θερμίστορ $R_{θερμίστορ}$** για αυτή την **θερμοκρασία**, και έπειτα μετακινήστε το **δοχείο βαθμονόμησης** στην **εγκοπή 18**.

Επαναλάβετε το παραπάνω βήμα μετακινώντας το **δοχείο βαθμονόμησης** 2 **εγκοπές** κάθε 2,5min (μέχρι την **εγκοπή 0**).

Κατόπιν τοποθετήστε το **θερμίστορ** σε **λιωμένο πάγο**, **ισορροπήστε ξανά την γέφυρα** και βρείτε **την αντίσταση** του.

Με τις μετρήσεις που θα πάρετε συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα 2:

ΘΕΣΗ ΘΕΡΜΙΣΤΟΡ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΥΔΡΑΡΓΥΡΙΚΟΥ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟΥ (°C)	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΘΕΡΜΙΣΤΟΡ σε (Ω)
Εγκοπή 20		
Εγκοπή 18		
Εγκοπή 16		
Εγκοπή 14		
Εγκοπή 12		
Εγκοπή 10		
Εγκοπή 8		
Εγκοπή 6		
Εγκοπή 4		
Εγκοπή 2		
Εγκοπή 0		
Πάγος		
Άγνωστο σώμα		

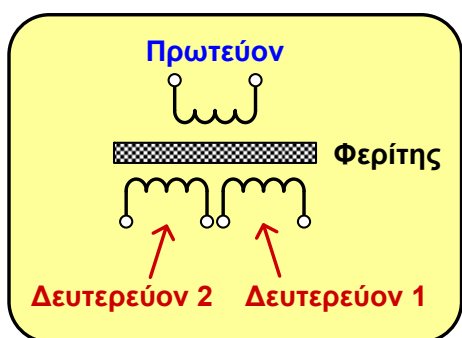
Πίνακας 2

Τέλος κάνοντας χρήση του πίνακα 2 και της **καμπύλης ρύθμισης** του **θερμίστορ** που θα σχεδιάσετε απ' αυτόν, **μετρήστε** έμμεσα με το **θερμίστορ** τη **θερμοκρασία** ενός **άγνωστου σώματος** (χωρίς θερμόμετρο).

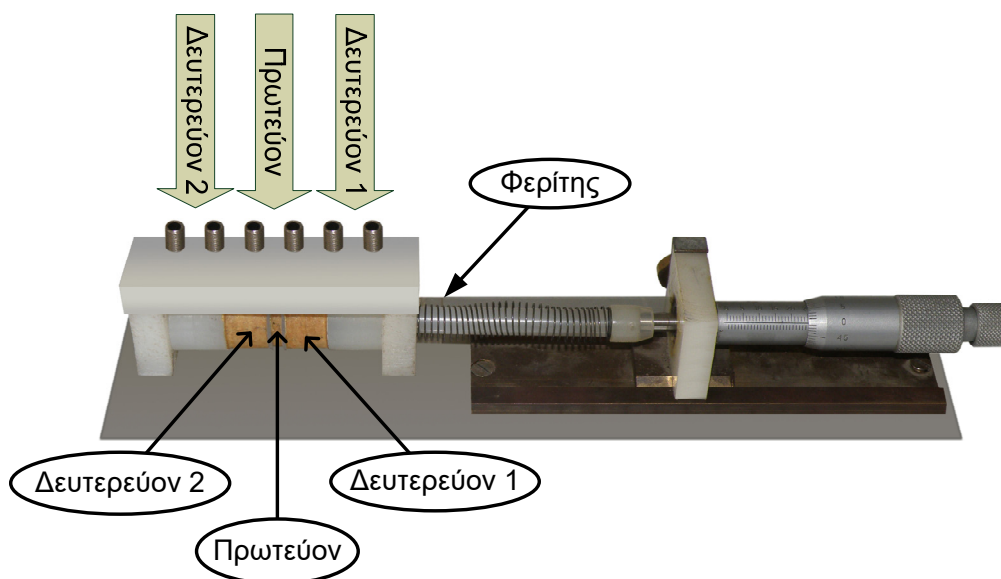
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 4

ΜΕΛΕΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Το αντικείμενο της εργαστηριακής άσκησης είναι ο γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (linear variable differential transformer, LVDT), που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μικρών μετατοπίσεων (έως 300 mm) και παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

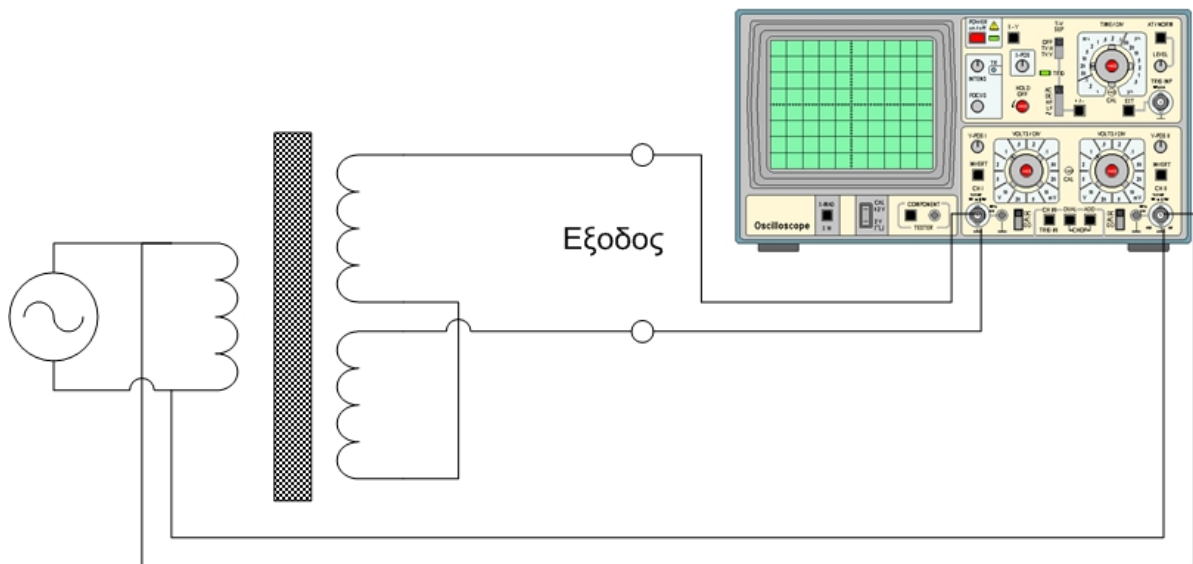


Γραμμικός
μεταβλητός
διαφορικός
μετασχηματιστής
(LVDT)



Επισημαίνεται ότι το μικρόμετρο που περιλαμβάνεται στην διάταξη του παραπάνω σχήματος, δεν αποτελεί μέρος του LVDT, αλλά είναι μια μηχανική διάταξη που την χρησιμοποιούμε στο εργαστήριο για να μπορούμε να μετακινούμε με ακρίβεια τον φερίτη του LVDT, ώστε να πάρουμε τις απαραίτητες μετρήσεις και να χαράξουμε την καμπύλη ρύθμισης του.

Βήμα 2. Συνδεσμολογήστε την διάταξη LVDT ως μετατροπέα μετατόπισης σε ηλεκτρική τάση, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1

Βήμα 3. Δώστε από την γεννήτρια συχνοτήτων σήμα τάσης με **συχνότητα 500 kHz** και το **μέγιστο δυνατό μέγιστο πλάτος**. Ο διακόπτης **OUTPUT** της γεννήτριας συχνοτήτων θα πρέπει να τοποθετηθεί στην ένδειξη **HIGH** και ο ρυθμιστής πλάτους εξόδου **RF GAIN** στην δεξιότερη δυνατή θέση. Επίσης, ο διακόπτης **MODULATION** της γεννήτριας συχνοτήτων θα πρέπει να τοποθετηθεί στη θέση **EXTERNAL**.

Συνδέστε τα δύο κανάλια του παλμογράφου όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 και επιλέξτε για τον **σκανδαλισμό (trigger)** του, το σήμα που προέρχεται από τη γεννήτρια (**CH 2**). Τέλος, ελέγξτε τούς επιλογείς **CAL** του παλμογράφου, ώστε να είναι στη σωστή θέση.

Βήμα 3-8. Με την βοήθεια ενός μικρομέτρου θα **μετακινείτε το φερίτη** του LVDT από την **θέση 25** έως την **θέση 0** με **βήματα του 1 mm**.

Ξεκινήστε τις μετρήσεις σας από την θέση **25 mm**. Για κάθε θέση του φερίτη μετρήστε την **peak-peak τάση εξόδου του LVDT** καθώς και την **διαφορά φάσης μεταξύ του σήματος του πρωτεύοντος και της εξόδου του**.

Στην συνέχεια μεταβείτε στη **θέση 24 mm** περιστρέφοντας το εξωτερικό κέλυφος του μικρομέτρου κατά 2 στροφές.



Εξωτερικό κέλυφος μικρομέτρου
(κάθε περιστροφή αντιστοιχεί σε **0.5 mm**)

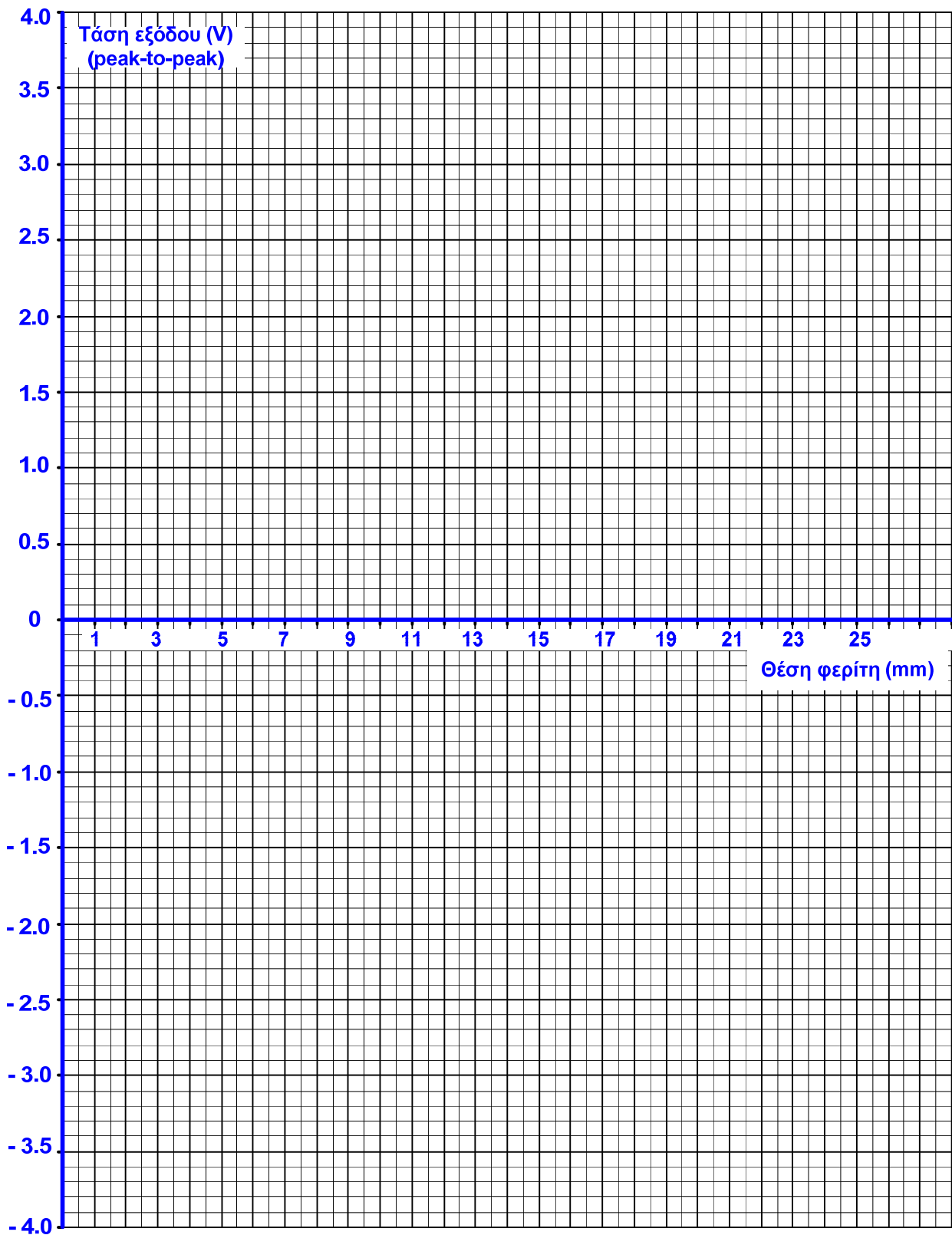
Συνεχίστε **μέχρι την θέση 0 mm** και με τα αποτελέσματα των μετρήσεων συμπληρώστε τον παρακάτω Πίνακα 1.

ΘΕΣΗ ΦΕΡΙΤΗ (σε mm)	ΑC ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ (peak-peak, Volt)	ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ (σε μοίρες)
25		
24		
23		
22		
21		
20		
19		
18		
17		
16		
15		
14		
13		
12		
11		
10		
9		
8		
7		
6		
5		
4		
3		
2		
1		

Πίνακας 1

Βήμα 9. Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του Πίνακα 1 σχεδιάστε στο παρακάτω διάγραμμα την **καμπύλη ρύθμισης του αισθητήρα (LVDT)**, δηλαδή την σχέση της **τάσης εξόδου του σε συνάρτηση με τη θέση (μετατόπιση) του φερίτη.**

Επισημαίνεται ότι όταν η **διαφορά φάσης** μεταξύ της τάσης εισόδου και της τάσης εξόδου του LVDT είναι 0° μεταφέρουμε στο διάγραμμα την **τιμή τάσης** του Πίνακα 1, ενώ όταν η **διαφορά φάσης** μεταξύ της τάσης εισόδου και της τάσης εξόδου του LVDT είναι 180° μεταφέρουμε στο διάγραμμα την **τιμή τάσης** του Πίνακα 1 με **αρνητικό πρόσημο**.



Διάγραμμα 1

Βήμα 10. Στο παραπάνω Διάγραμμα 1 σχεδιάστε για την κεντρική του περιοχή την ευθεία που προσεγγίζει καλύτερα την καμπύλη σας, δηλαδή την ευθεία που διέρχεται από τα περισσότερα δυνατά σημεία (από τα οποία προήλθε η καμπύλη) και από τη θέση μηδενισμού.

Βήμα 11. Στον άξονα μετατόπισης του Διαγράμματος 1 σημειώνουμε τα όρια γραμμικότητας του LVDT:

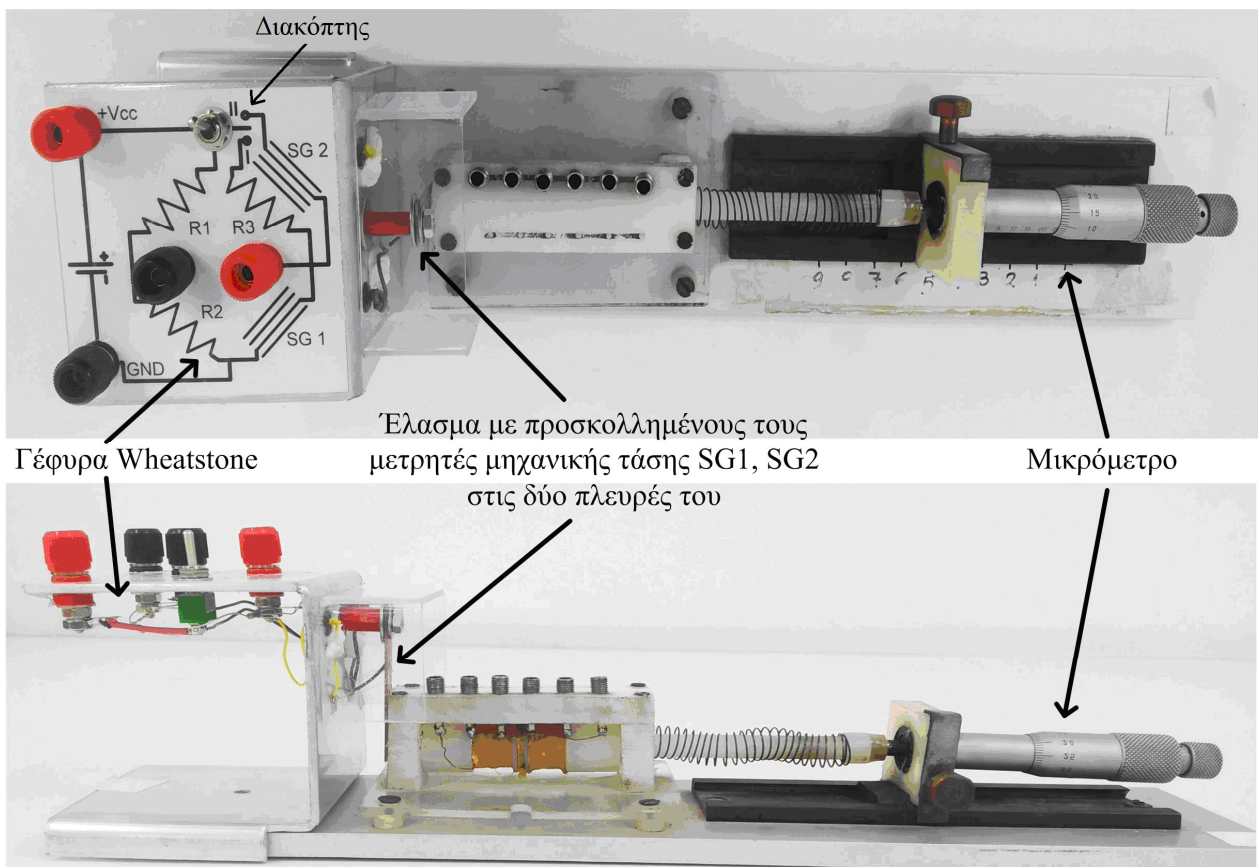
Όρια γραμμικότητας από $X_1 = \dots\dots\dots$ mm έως $X_2 = \dots\dots\dots$ mm

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 5

ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΡΗΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ (ΠΙΕΖΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ)

Το αντικείμενο της εργαστηριακής άσκησης είναι η **μελέτη του μετρητή μηχανικής τάσης (ή πιεζοαντίστασης)**, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μηχανικής τάσης (καταπόνησης). Η βασική διάταξη που θα χρησιμοποιήσουμε και παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 5.1, περιλαμβάνει:

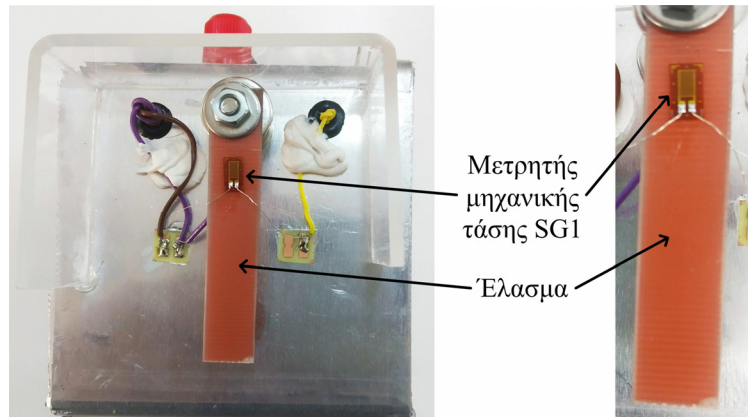
- α) Γέφυρα Wheatstone, στον έναν βραχίονα της οποίας, συνδέεται μετρητής μηχανικής τάσης **SG1** (με παράγοντα $G = 2$ και αντίσταση σε κατάσταση ηρεμίας 120Ω) και υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης και δεύτερου όμοιου μετρητή **SG2**, ανάλογα με τη θέση ενός διακόπτη που έχει προσαρμοστεί στη γέφυρα. Οι δύο μετρητές μηχανικής τάσης είναι προσκολλημένοι στην εξωτερική και την εσωτερική πλευρά ενός ελάσματος, αντίστοιχα.
- β) Μικρόμετρο με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να κάμπτουμε το έλασμα από τη θέση ισορροπίας (ένδειξη μικρομέτρου: 10 mm) και με αυτό τον τρόπο να ασκούμε στο μετρητή μηχανικής τάσης **SG1**, μηχανική τάση (καταπόνηση) εφελκυσμού με αποτέλεσμα μικρή αύξηση του μήκους του και της αντίστασής του και στο μετρητή μηχανικής τάσης **SG2**, μηχανική τάση (καταπόνηση) συμπίεσης (θλίψης) με αποτέλεσμα μικρή μείωση του μήκους του και της αντίστασής του.



Σχήμα 5.1

ΒΗΜΑ 1:

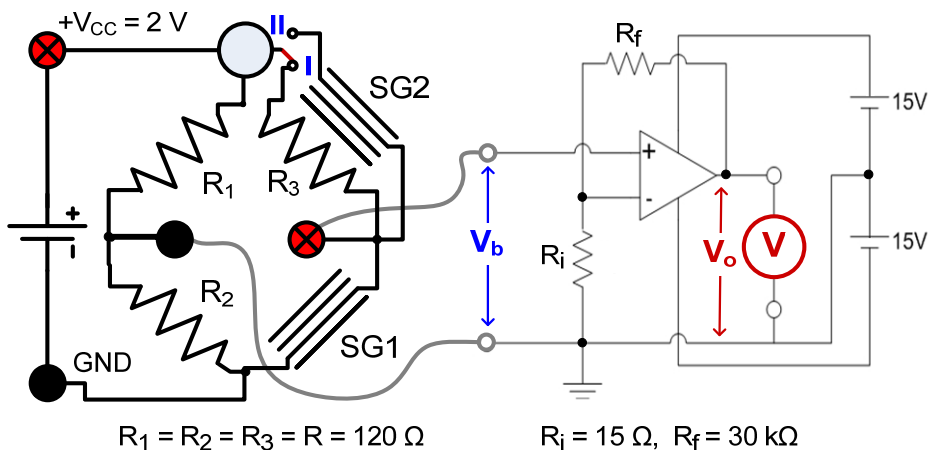
Αρχικά θέτουμε το **διακόπτη** που είναι προσαρμοσμένος στη γέφυρα Wheatstone (σχήμα 5.2) στη **θέση I**. Στον ένα βραχίονα της γέφυρας είναι συνδεδεμένος ο μετρητής μηχανικής τάσης (strain gauge) SG1, ενώ στους υπόλοιπους βραχίονες συνδέονται 3 όμοιες αντιστάσεις ακριβείας των 120 Ω. Ο μετρητής μηχανικής τάσης SG1 είναι προσκολλημένος στην εξωτερική πλευρά του ελάσματος. Με τη βοήθεια του μικρομέτρου, έχουμε τη δυνατότητα να κάμπτουμε το έλασμα από τη θέση ισορροπίας (ένδειξη μικρομέτρου: 10 mm) και με αυτό τον τρόπο να υποβάλουμε τον μετρητή μηχανικής τάσης SG1 σε μηχανική τάση (καταπόνηση) εφελκυσμού με αποτέλεσμα την μικρή αύξηση του μήκους του και της αντίστασής του.



Λόγω του ότι η ανοχή των αντιστάσεων της γέφυρας και του μετρητή μηχανικής τάσης, μπορεί να είναι παρόμοια με την αλλαγή της αντίστασης του μετρητή μηχανικής τάσης που προκαλείται από την ασκούμενη μηχανική τάση, θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε η τάση εξόδου της μετρητικής διάταξης να είναι μηδενική, όταν δεν ασκείται μηχανική τάση στον μετρητή. Παρότι, έχουμε συνδέσει στη γέφυρα Wheatstone αντιστάσεις ακριβείας (ανοχή: $\pm 0.5\%$), για να επιτευχθεί ο προαναφερόμενος στόχος, συνδέουμε στην έξοδο της γέφυρας μια ενισχυτή διάταξη με τελεστικό ενισχυτή, ο οποίος διαθέτει δυνατότητα αντιστάθμισης. Με την προσθήκη αυτή επιτυγχάνουμε επίσης την ενίσχυση της τάσης εξόδου της γέφυρας, με αποτέλεσμα την αύξηση της ευαισθησίας του συστήματος μέτρησης.

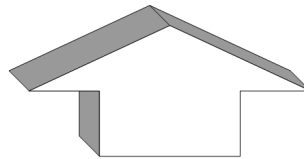
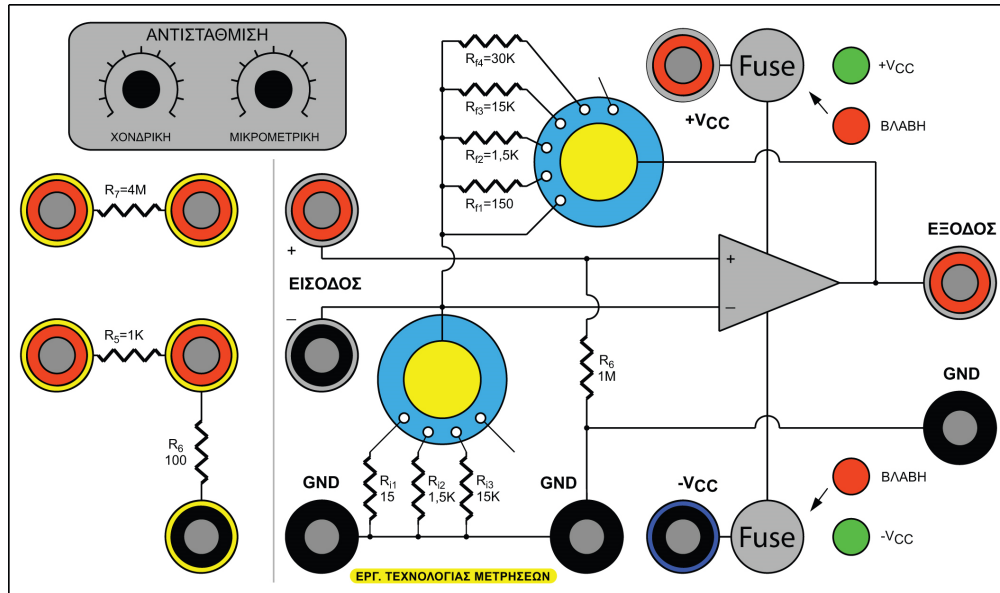
Πρόκειται για έναν μη αντιστρέφοντα ενισχυτή (σχήμα 5.2), για τον οποίο επιλέγουμε αντιστάσεις ανατροφοδότησης και εισόδου, $R_f = 30 \text{ k}\Omega$ και $R_i = 15 \text{ }\Omega$, αντίστοιχα, δηλαδή επιλέγουμε ενίσχυση τάσης:

$$A_v = [1 + (R_f / R_i)] = [1 + (30000 / 15)] \approx 2000.$$

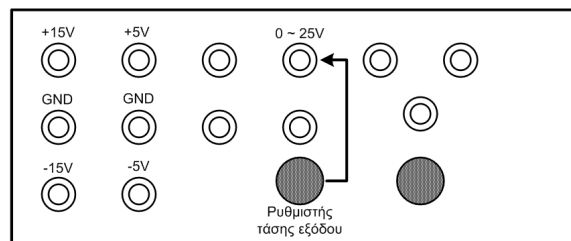


Σχήμα 5.2

Στην είσοδο της γέφυρας θέτουμε **συνεχή τάση 2 V**. Η έξοδος της γέφυρας (V_b) συνδέεται στην είσοδο ενός μη αντιστρέφοντος ενισχυτή και στην έξοδο του μη αναστρέφοντος ενισχυτή, συνδέουμε ένα **ψηφιακό βολτόμετρο**. Για την υλοποίηση του κυκλώματος του παραπάνω σχήματος, θα χρησιμοποιήσουμε τη διάταξη του σχήματος 5.3, την οποία τροφοδοτούμε με τάση $\pm 15V$ (στα σημεία $+V_{CC}$, $-V_{CC}$ και GND) από το τροφοδοτικό T1. Δώστε προσοχή στην τοποθέτηση της γείωσης (GND) του τροφοδοτικού.



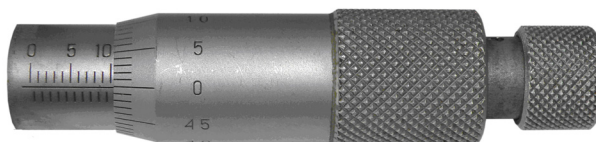
T1
ΜΑΥΡΟ ΠΛΑΚΕ
ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ



Σχήμα 5.3

ΒΗΜΑ 2:

Τοποθετείστε τον μικρομετρικό ρυθμιστή αντιστάθμισης της παραπάνω διάταξης περίπου στη μέση. Με το μικρόμετρο στη θέση 10 mm (στην οποία οριακά δεν ασκείται καταπόνηση στον μετρητή μηχανικής τάσης), ρυθμίστε το βολτόμετρο εξόδου στην κλίμακα των 20 Volt και διενεργείστε αντιστάθμιση περιστρέφοντας τον χονδρικό ρυθμιστή, ώστε το βολτόμετρο να έχει ένδειξη μικρότερη από ± 70 mV. Στη συνέχεια, περιστρέψτε τον μικρομετρικό ρυθμιστή, ώστε το βολτόμετρο εξόδου να έχει μηδενική ένδειξη.



ΒΗΜΑ 3:

Μετά την αντιστάθμιση που διενεργήθηκε στο Βήμα 2 (μηδενική ένδειξη βολτομέτρου), περιστρέφοντας το εξωτερικό κέλυφος του μικρομέτρου από τη θέση ισορροπίας (ένδειξη μικρομέτρου: 10 mm) έως τη θέση στην οποία το μικρόμετρο έχει ένδειξη 5 mm, με βήμα 0.5 mm, κάμπτετε το έλασμα, ασκώντας μηχανική τάση εφελκυσμού στον μετρητή μηχανικής τάσης SG1.

Επισημαίνεται ότι, **μια πλήρης περιστροφή του εξωτερικού κελύφους του μικρομέτρου, αντιστοιχεί σε μετατόπιση (κάμψη) του ελάσματος κατά 0.5 mm**. Επίσης, στην διάταξη του Σχήματος 5.1, **κάθε mm κάμψης του ελάσματος, αντιστοιχεί σε μηχανική τάση 700 με (microstrains)** [ανατρέξτε στην **επισήμανση** που υπάρχει στο τέλος της άσκησης].

Σε κάθε βήμα μετρήστε την ένδειξη του βολτομέτρου (τάση εξόδου της μετρητικής διάταξης) και συμπληρώστε τον πίνακα που ακολουθεί.

Θέση μικρομέτρου	Κάμψη ελάσματος (mm)	Μηχανική τάση (microstrains, $\mu\epsilon$)	Ένδειξη βολτομέτρου (Volt)
10			
9.5			
9			
8.5			
8			
7.5			
7			
6.5			
6			
5.5			
5			

Πίνακας 5.1

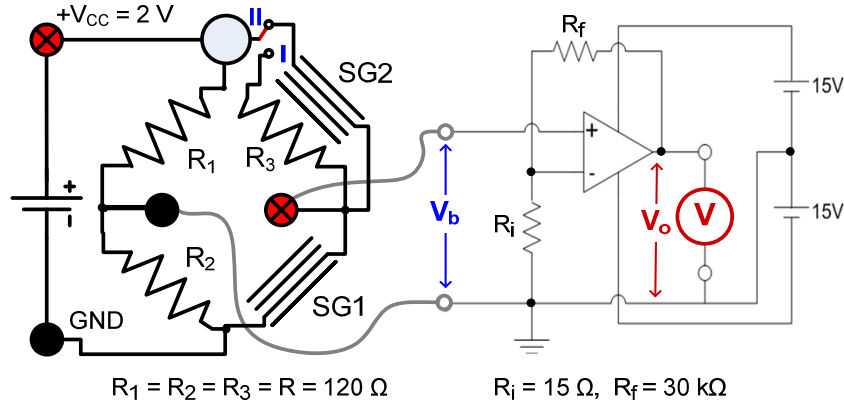
Με βάση τις μετρήσεις του παραπάνω πίνακα, στα πλαίσια της εργασίας που συνοδεύει την άσκηση, θα σχεδιάσετε την καμπύλη ρύθμισης της διάταξης μέτρησης, δηλαδή τη γραφική παράσταση της τάσης εξόδου της διάταξης ως προς τη μηχανική τάση (ϵ) που ασκείται στον μετρητή μηχανικής τάσης SG1 και θα υπολογίσετε βασικά χαρακτηριστικά της διάταξης μέτρησης.

ΒΗΜΑ 4:

Θέτουμε το **διακόπτη** που είναι προσαρμοσμένος στη γέφυρα Wheatstone (σχήμα 5.4) στη **θέση II**. Τώρα, στον κάτω δεξιά βραχίονα της γέφυρας είναι συνδεδεμένος ο μετρητής μηχανικής τάσης (strain gauge) SG1, στον πάνω δεξιά βραχίονα της γέφυρας είναι συνδεδεμένος ο μετρητής μηχανικής τάσης (strain gauge) SG2, ενώ στους υπόλοιπους δύο βραχίονες συνδέονται 2 όμοιες αντιστάσεις ακριβείας των 120 Ω .

Ο μετρητής μηχανικής τάσης SG1 είναι προσκολλημένος στην εξωτερική πλευρά ενός ελάσματος, ενώ ο μετρητής μηχανικής τάσης SG2 είναι προσκολλημένος στην εσωτερική του ελάσματος. Με τη βοήθεια του μικρομέτρου, έχουμε τη δυνατότητα να κάμπτουμε το έλασμα από τη θέση ισορροπίας (ένδειξη μικρομέτρου: 10 mm) και με αυτό τον τρόπο ασκείται μηχανική τάση

εφελκυσμού στον μετρητή SG1, με αποτέλεσμα μικρή αύξηση του μήκους του και της αντίστασής του και μηχανική τάση συμπίεσης (θλίψης) στο μετρητή SG2, με αποτέλεσμα μικρή μείωση του μήκους του και της αντίστασής του. Στην ιδανική περίπτωση, όπου η τοποθέτηση των δύο μετρητών είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένη (δηλαδή, οι δύο μετρητές έχουν προσκολληθεί στο έλασμα, ακριβώς ο ένας πίσω από τον άλλον), ασκείται η ίδια μηχανική τάση σε αυτούς και προκαλείται όμοια μεταβολή της αντίστασής τους.



Σχήμα 5.4

Διενεργήστε **αντιστάθμιση**, ακολουθώντας τη διαδικασία που εφαρμόσατε στο Βήμα 2, έτσι ώστε η ένδειξη του βολτομέτρου να είναι μηδενική, όταν η ένδειξη του μικρομέτρου είναι 10 mm.

ΒΗΜΑ 5:

Περιστρέφοντας το εξωτερικό κέλυφος του μικρομέτρου από τη θέση ισορροπίας (ένδειξη μικρομέτρου: 10 mm) έως τη θέση στην οποία η ένδειξη του μικρομέτρου είναι 5 mm, με βήμα 0.5 mm, κάμπτετε το έλασμα, ασκώντας μηχανική τάση εφελκυσμού στον μετρητή SG1 και μηχανική τάση συμπίεσης (θλίψης) στο μετρητή SG2. Σε κάθε βήμα μετρήστε την ένδειξη του βολτομέτρου (τάση εξόδου της διάταξης μέτρησης) και συμπληρώστε τον πίνακα που ακολουθεί (εκτός από την τελευταία στήλη, που θα την συμπληρώσετε στο Βήμα 6).

Θέση μικρομέτρου	Κάμψη ελάσματος (mm)	Μηχανική τάση (microstrains, με)	Ένδειξη βολτομέτρου (Volt), Βήμα 5	Ένδειξη βολτομέτρου (Volt), Βήμα 6
10				
9.5				
9				
8.5				
8				
7.5				
7				
6.5				
6				
5.5				
5				

Πίνακας 5.2

Με βάση τις μετρήσεις του παραπάνω πίνακα, στα πλαίσια της εργασίας που συνοδεύει την άσκηση, θα σχεδιάσετε την καμπύλη ρύθμισης και θα υπολογίσετε βασικά χαρακτηριστικά της διάταξης μέτρησης, όταν σε αυτή συμμετέχουν δύο μετρητές μηχανικής τάσης, θεωρώντας ότι ασκείται σε αυτούς η ίδια (κατά μέτρο) μηχανική τάση, η οποία προκαλεί όμοια μεταβολή της αντίστασής τους.

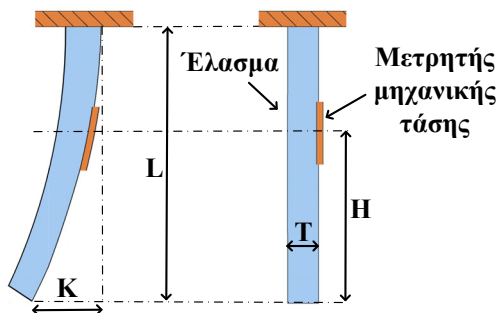
ΒΗΜΑ 6:

Όταν η ένδειξη του μικρομέτρου είναι 5 mm, περιστρέφοντας το εξωτερικό κέλυφος του μικρομέτρου προς την αντίθετη κατεύθυνση έως τη θέση ισορροπίας (ένδειξη μικρομέτρου: 10 mm), με βήμα 0.5 mm, το έλασμα επανέρχεται σταδιακά στη θέση ισορροπίας. Η μηχανική τάση εφελκυσμού που ασκείται στο μετρητή SG1 και η μηχανική τάση συμπίεσης (θλίψης) που ασκείται στο μετρητή SG2, μειώνονται σταδιακά, έως τον μηδενισμό τους.

Σε κάθε βήμα μετρήστε ξανά την ένδειξη του βολτομέτρου (τάση εξόδου της διάταξης μέτρησης) και συμπληρώστε την τελευταία στήλη του Πίνακα 5.2. Σκοπός της διπλής μέτρησης της τάσης εξόδου της διάταξης που διενεργείται στα βήματα 5 και 6 (μία με τη μηχανική τάση που ασκείται στους μετρητές να αυξάνεται και μία δεύτερη με τη μηχανική τάση που ασκείται στους μετρητές να μειώνεται), είναι ο υπολογισμός του μέγιστου σφάλματος υστέρησης της διάταξης μέτρησης, στα πλαίσια της εργασίας που συνοδεύει την άσκηση.

Επισημάνση:

Η μηχανική τάση που ασκείται στο μετρητή μηχανικής τάσης, όταν κάμπτεται το έλασμα στο οποίο αυτός είναι προσκολλημένος, εξαρτάται από την απόσταση του σημείου προσκόλλησής του από το ελεύθερο άκρο του ελάσματος. Όταν το έλασμα κάμπτεται, ασκείται μεγαλύτερη μηχανική τάση στα τμήματα του ελάσματος που βρίσκονται μακρύτερα από το ελεύθερο άκρο του, σε σχέση με τα τμήματα του ελάσματος που βρίσκονται κοντά στο ελεύθερο άκρο του. Ωστόσο, επειδή η σχέση της απόστασης ενός σημείου του ελάσματος με τη μηχανική τάση που ασκείται σε αυτό, είναι γραμμική, μπορούμε να εκλάβουμε τη μηχανική τάση που ασκείται στον μετρητή μηχανικής τάσης που είναι προσκολλημένος στο έλασμα, ως τη μηχανική τάση που ασκείται στο μέσο του, δηλαδή σε απόσταση H από το ελεύθερο άκρο του ελάσματος (μήκους L , πάχους T), όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Η μηχανική τάση ε που ασκείται στο μετρητή για κάμψη $K = 1 \text{ mm}$, δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\alpha \cdot H \cdot T \cdot 10^{-3}}{L^3},$$

όπου η τιμή του παράγοντα α εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του ελάσματος.

Στη μετρητική διάταξη της άσκησης, ισχύει ότι $L = 4.5 \text{ cm}$, $H = 3 \text{ cm}$, $T = 2 \text{ mm}$ και $\alpha = 1.065$. Έτσι, από την παραπάνω σχέση, προκύπτει ότι η μηχανική τάση που ασκείται στο μετρητή για κάθε mm κάμψης του ελάσματος είναι:

$$\varepsilon = \frac{\alpha \cdot H \cdot T \cdot 10^{-3}}{L^3} = \frac{1.065 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{(45 \cdot 10^{-3})^3} \approx 700 \cdot 10^{-6} \text{ ή } 700 \mu\epsilon.$$

Ωστόσο, στις μετρητικές διατάξεις της άσκησης, υπάρχουν αποκλίσεις από την παραπάνω τιμή για λόγους όπως: προσκόλληση του μετρητή σε ύψος διαφορετικό από 3 cm, μη ακριβής ευθυγράμμιση του μετρητή κατά μήκος του ελάσματος, ατέλειες στην προσκόλληση του μετρητή πάνω στο έλασμα, απόκλιση του μήκους του ελάσματος σε σχέση με το μήκος των 4.5 cm.