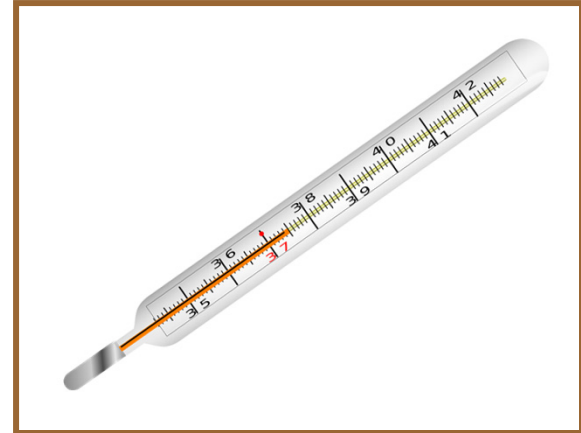
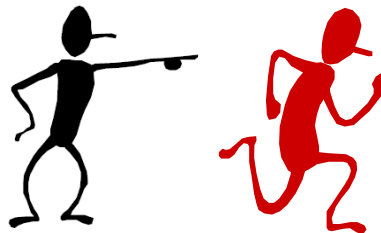


# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ & ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Λάμπρος Μπισδούνης  
Καθηγητής



## 5<sup>η</sup> ενότητα ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ



# Περιεχόμενα 5<sup>ης</sup> ενότητας

- Η μέτρηση της θερμοκρασίας είναι σημαντική επειδή σε διαφορετικές θερμοκρασίες οι φυσικές ιδιότητες των ουσιών (μορφή, όγκος κλπ.) είναι διαφορετικές και έτσι εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά.
- Η ενότητα περιγράφει τα διάφορα είδη συσκευών που μετρούν θερμοκρασία (θερμόμετρα και πυρόμετρα), καθώς και τις αρχές λειτουργίας τους.
- Εισαγωγή στη μέτρηση θερμοκρασίας.
- Θερμόμετρα διαστολής υγρού: γυάλινο θερμόμετρο ή θερμόμετρο υγρού, μεταλλικό θερμόμετρο.
- Θερμόμετρα διαστολής μετάλλου: διμεταλλικό έλασμα, διμεταλλικό θερμόμετρο, διμεταλλικός θερμοστάτης.
- Θερμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης και θερμίστορ.
- Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο και θερμοζεύγος.
- Ακτινοβολία θερμότητας και πυρόμετρα ακτινοβολίας: οπτικό πυρόμετρο νήματος, πυρόμετρο υπέρυθρου.
- Συμπεράσματα, ερωτήσεις και ασκήσεις.

# Εισαγωγή στη μέτρηση θερμοκρασίας

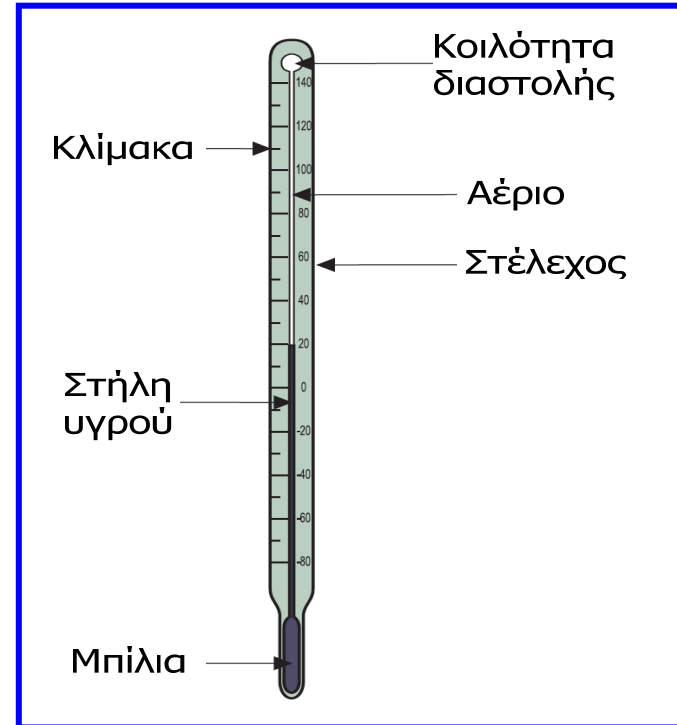
- **Θερμοκρασία** είναι ο βαθμός κατά τον οποίο ένα σώμα (ουσία ή μέσο) είναι θερμό σε σύγκριση με κάποιο άλλο.
- **Μέτρηση θερμοκρασίας** είναι η **σύγκριση του βαθμού θερμότητας** ενός σώματος (ουσίας ή μέσου) με κάποιο σημείο αναφοράς χρησιμοποιώντας μία ορισμένη κλίμακα θερμοκρασίας.
- Η **κλίμακα 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  $0^{\circ}\text{C}$ ).
- 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**.

# Θερμόμετρα διαστολής υγρού

- Τα **θερμόμετρα διαστολής υγρού** (liquid expansion thermometers) στηρίζονται στην αρχή ότι ο **όγκος** κάποιων **υγρών μεταβάλλεται** σημαντικά με την **αύξηση** της **θερμοκρασίας**, σε σύγκριση με τις μεταβολές όγκου που παρατηρούνται στα στερεά σώματα.
- Το ποσό κατά το οποίο διαστέλλεται ένα υγρό μπορεί να βαθμονομηθεί σε μονάδες θερμοκρασίας.
- Υπάρχουν δύο τύποι θερμομέτρων διαστολής υγρού:
  - ✓ **Γυάλινα θερμόμετρα** (ή **θερμόμετρα υγρού**, liquid-in-glass thermometers), στα οποία για την ίδια αύξηση θερμοκρασίας το γυαλί διαστέλλεται λίγο συγκριτικά με τα υγρά που χρησιμοποιούνται.
  - ✓ **Μεταλλικά θερμόμετρα** (liquid-in-metal thermometers), στα οποία το υγρό που χρησιμοποιείται περικλείεται υπό πίεση σε μία μεταλλική κοιλότητα.

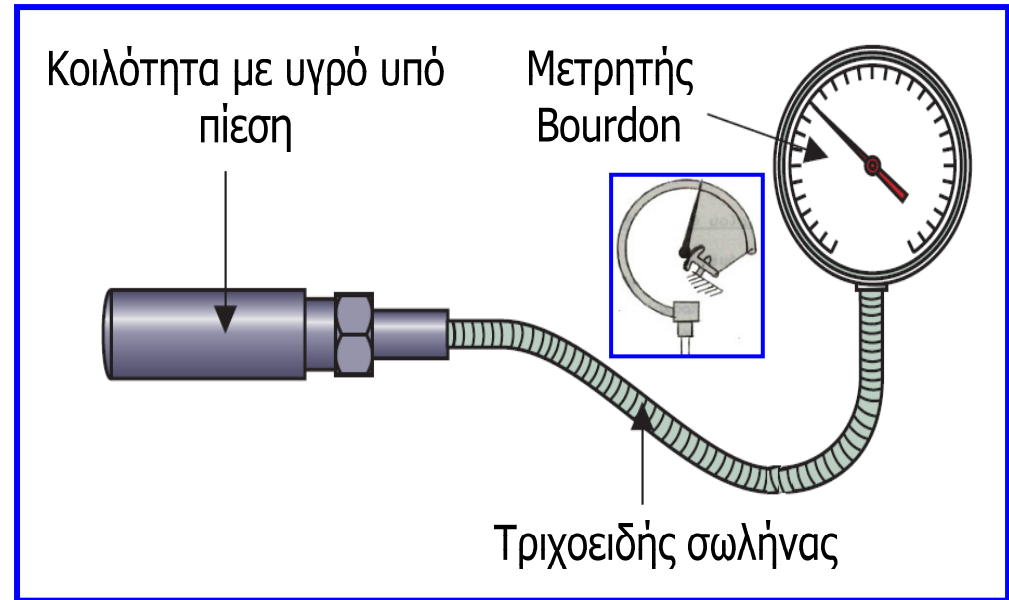
# Γυάλινο θερμόμετρο ή θερμόμετρο υγρού

- Όταν το θερμόμετρο θερμαίνεται, το υγρό διαστέλλεται και αυξάνει η στάθμη του μέσα στη γυάλινη στήλη.
- Πάνω από το υγρό ο χώρος είναι κενός ή υπάρχει αέριο που συμπιέζεται όταν το υγρό διαστέλλεται.
- Η κλίμακα είναι κατάλληλα βαθμονομημένη, ώστε η στάθμη του υγρού να είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του θερμομέτρου.
- Τα υγρά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι ο υδράργυρος και η αλκοόλη, αλλά όπου απαιτείται υψηλή ασφάλεια χρησιμοποιούνται και άλλα υγρά (ο υδράργυρος είναι τοξικός).
- Το υγρό που χρησιμοποιείται εξαρτάται από την περιοχή μέτρησης στην οποία το υγρό δε θα πρέπει να παγώνει ή να βράζει και ο όγκος του θα πρέπει να αυξάνει γραμμικά με την θερμοκρασία.
- **Χαρακτηριστικά:** χαμηλό κόστος, εύκολη χρήση, αξιοπιστία, ακρίβεια, εύθραυστο, αργή απόκριση σε γρήγορη μεταβολή θερμοκρασίας, μόνο τοπική ανάγνωση ενδείξεων.
- **Χρήσεις:** ιατρικές, κτηνιατρικές, οικιακές και μετεωρολογικές εφαρμογές.



# Μεταλλικό θερμόμετρο

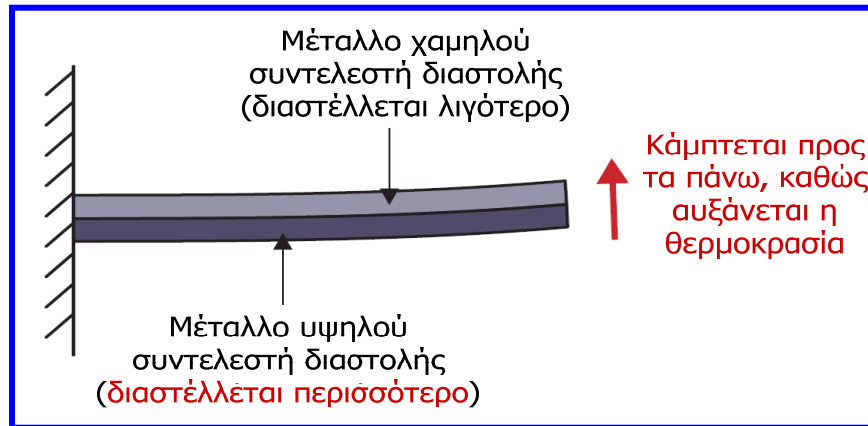
- Η **μεταλλική κοιλότητα** περιέχει υδράργυρο ή αλκοόλη υπό πίεση και συνδέεται με εύκαμπτο σωλήνα.
- Ο **μετρητής πίεσης Bourdon** (που θα μελετήσουμε στην **7<sup>η</sup> ενότητα**) είναι σωλήνας **σχήματος C** με το ένα άκρο κλειστό και εάν εφαρμοστεί πίεση στο ανοιχτό άκρο, τότε ο σωλήνας αποκλίνει προς τα έξω δηλ. τείνει να ευθυγραμμιστεί, ανάλογα με την πίεση στο εσωτερικό του.



- Στο μεταλλικό θερμόμετρο, ο **μετρητής Bourdon** είναι **βαθμονομημένος σε μονάδες θερμοκρασίας**, το υγρό διαστέλλεται λόγω αύξησης της θερμοκρασίας με συνέπεια την απόκλιση του σωλήνα του μετρητή που αναγκάζει την ενδεικτική του βελόνα να κινηθεί και τελικά να παρέχει άμεση ανάγνωση της θερμοκρασίας, χωρίς να απαιτείται παρατήρηση του υγρού που διαστέλλεται.
- **Χαρακτηριστικά:** πιο ευκίνητο και πιο ακριβό από το γυάλινο, ανάγνωση ενδείξεων από απόσταση, σφάλματα λόγω αλλαγής θερμοκρασίας στο εσωτερικό των δύο σωλήνων.
- **Χρήσεις:** χημική βιομηχανία, μηχανές οχημάτων, υγρά μέταλλα.

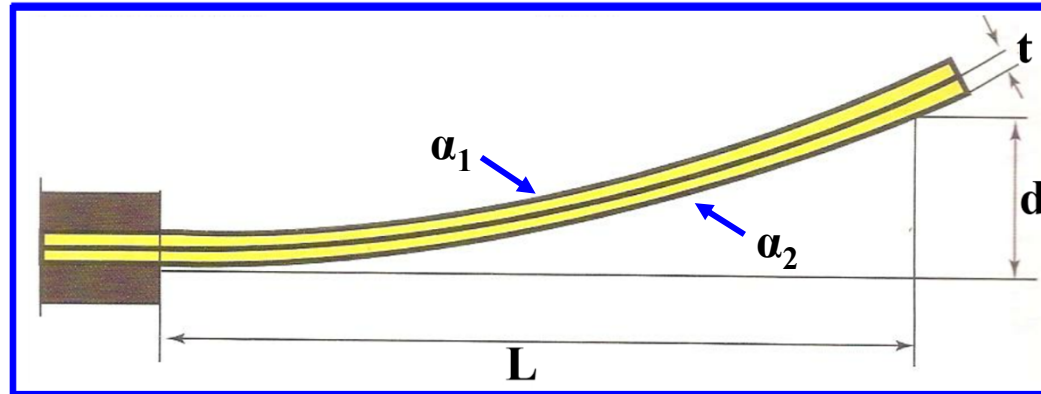
# Θερμόμετρα διαστολής μετάλλου

- Μία κατηγορία θερμομέτρων και θερμοστατών βασίζεται στο **διμεταλλικό έλασμα (bimetallic strip)** που το ένα άκρο του είναι στερεωμένο (ακίνητο) και αποτελείται από **δύο ενωμένα ελάσματα ίδιου μήκους** που είναι κατασκευασμένα από **μέταλλα με διαφορετικούς συντελεστές διαστολής**.
- **Συντελεστής διαστολής** ενός **μετάλλου** είναι το ποσοστό του αρχικού μήκους κατά το οποίο διαστέλλεται το μέταλλο, εάν η θερμοκρασία αυξηθεί ένα βαθμό.



- Για το έλασμα με χαμηλό συντελεστή διαστολής χρησιμοποιείται συνήθως κράμα σιδήρου-νικελίου, ενώ για το έλασμα με υψηλό συντελεστή διαστολής χρησιμοποιείται συνήθως ορείχαλκος (κράμα χαλκού-ψευδαργύρου).
- Με αύξηση της θερμοκρασίας, το έλασμα ορείχαλκου διαστέλλεται περισσότερο, δηλ. αποκτά μεγαλύτερο μήκος, με αποτέλεσμα το διμεταλλικό έλασμα να κάμπτεται προς την πλευρά του άλλου ελάσματος.

# Διμεταλλικό έλασμα



- Η απόκλιση του διμεταλλικού ελάσματος είναι κατά προσέγγιση ανάλογη με τη μεταβολή της θερμοκρασίας:

$$d = \frac{3 \cdot (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot L^2}{8 \cdot t} \cdot (\theta_{\text{τελ.}} - \theta_{\text{αρχ.}})$$

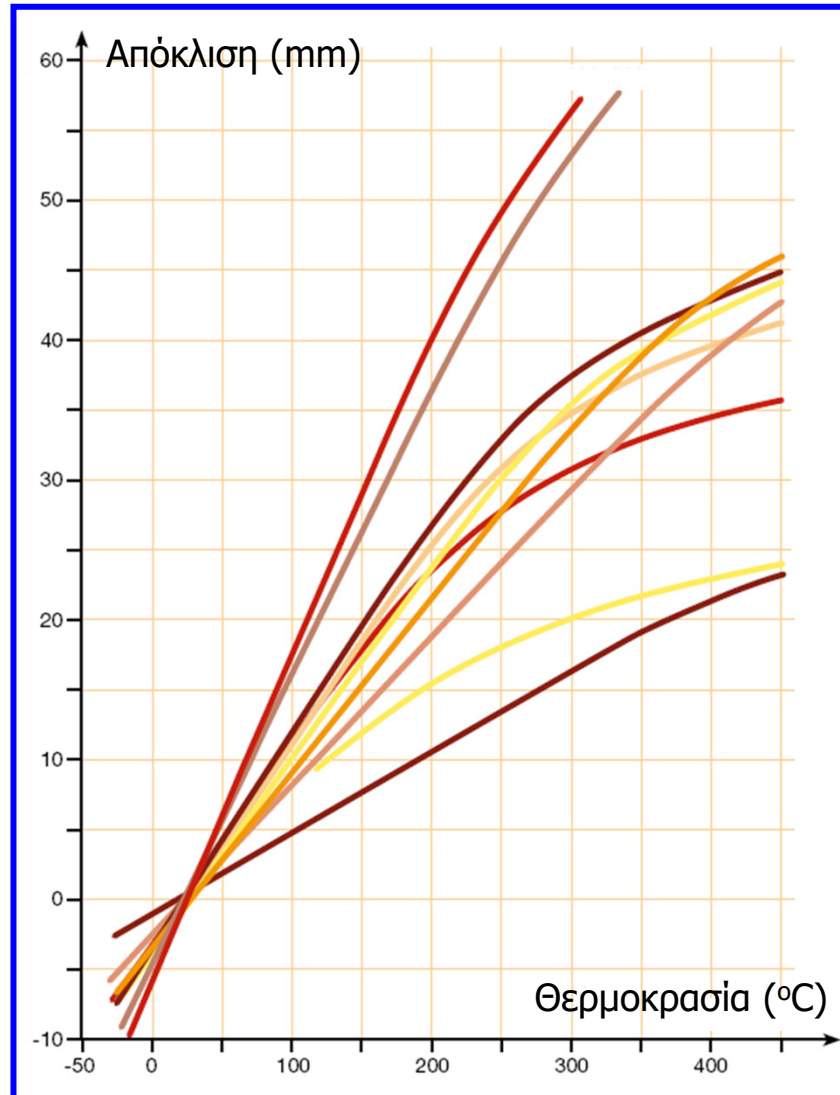
- Στην παραπάνω σχέση η θερμοκρασία τίθεται σε °F (°F = 1.8 · °C + 32).
- **Παράδειγμα:** Ο συντελεστής διαστολής του κράματος σιδήρου-νικελίου είναι  $0.67 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$  ενώ ο συντελεστής διαστολής του ορείχαλκου είναι  $9.4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$ . Για διμεταλλικό έλασμα μήκους 12 cm, με ελάσματα πάχους 0.25 cm, αρχική θερμοκρασία 40 °C και τελική 80 °C, προκύπτει απόκλιση:

$$d = \frac{3 \cdot (9.4 - 0.67) \cdot 10^{-6} \cdot 12^2}{8 \cdot 0.25} \cdot (1.8 \cdot 80 + 32 - 1.8 \cdot 40 - 32) = 0.136 \text{ cm} = 13.6 \text{ mm}$$



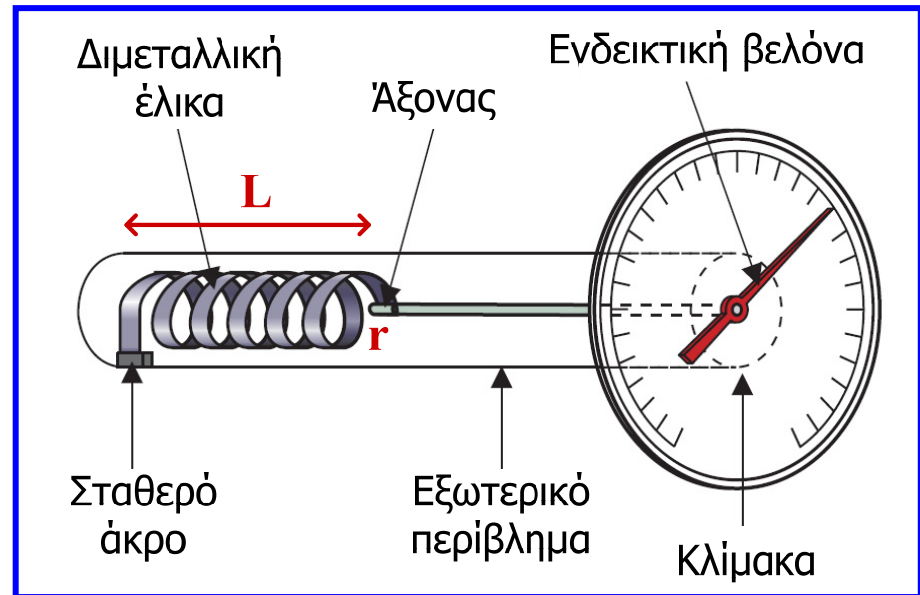
# Διμεταλλικό έλασμα

Διάγραμμα  
απόκλισης – θερμοκρασίας  
για διάφορους τύπους  
και μεγέθη διμεταλλικών  
ελασμάτων



# Διμεταλλικό θερμόμετρο

- Το διμεταλλικό έλασμα κάμπτεται σε **ελικοειδή μορφή** για να παρέχεται αυξημένη ευαισθησία.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί συστροφή του ενός άκρου του ελάσματος σε σχέση με το άλλο.
- Η περιστροφή του ελεύθερου άκρου μεταφέρεται μέσω ενός άξονα σε μία κλίμακα βαθμονομημένη ως προς τη θερμοκρασία.
- Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι το διμεταλλικό θερμόμετρο απαιτεί συχνή βαθμονόμηση, λόγω γήρανσης του διμεταλλικού ελάσματος.
- Επίσης, τα διμεταλλικά θερμόμετρα δεν προσφέρονται για χρήση από απόσταση και αποκρίνονται αργά στις μεταβολές της θερμοκρασίας.
- **Χαρακτηριστικά:** συμπαγές, ευκίνητο, σχετικά μικρό κόστος, εύρος μέτρησης από  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  με γενικά υψηλή ακρίβεια.
- **Χρήσεις:** φούρνοι, σωληνώσεις ζεστού νερού, θάλαμοι ατμού.



$$d = \frac{3 \cdot (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot r \cdot L}{4 \cdot t} \cdot (\theta_{\text{τελ.}} - \theta_{\text{αρχ.}})$$

# Διμεταλλικό θερμόμετρο

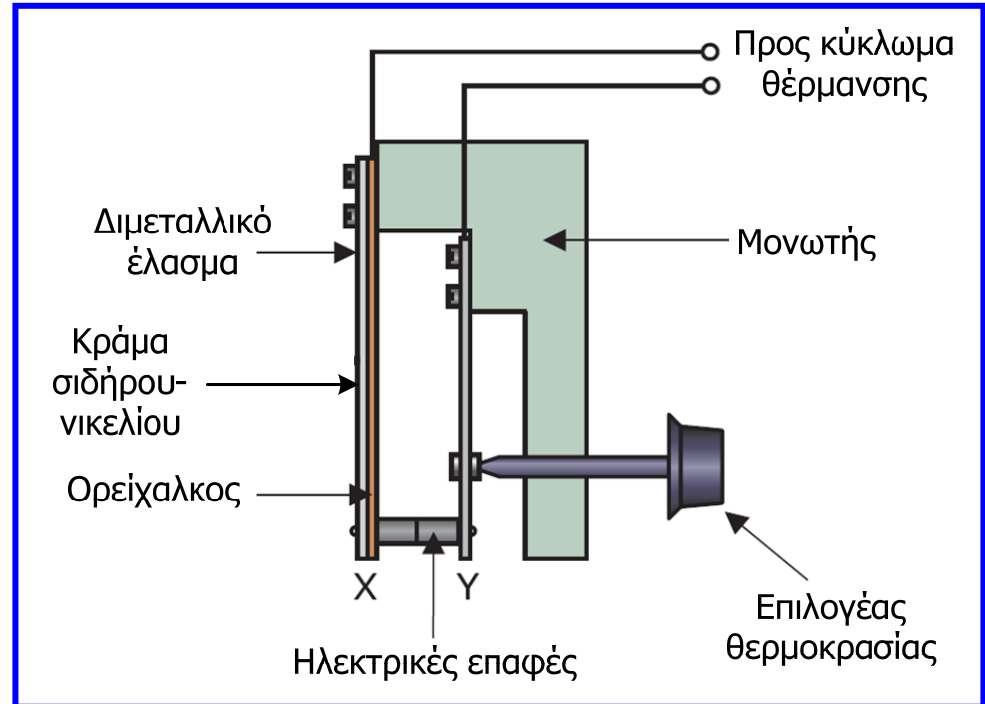
---



# Διμεταλλικός θερμοστάτης

- Ο θερμοστάτης ελέγχει τη θερμότητα που παράγει ένα σύστημα θέρμανσης, ώστε να το διατηρεί ένα σώμα ή έναν χώρο σε σταθερή θερμοκρασία.

- Εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι όταν το διμεταλλικό έλασμα **θερμαίνεται, κάμπτεται προς τα αριστερά** και όταν **ψύχεται, ευθυγραμμίζεται** και μπορεί να **αποσυνδέει** ή να **συνδέει τις επαφές** ενός ηλεκτρικού κυκλώματος.



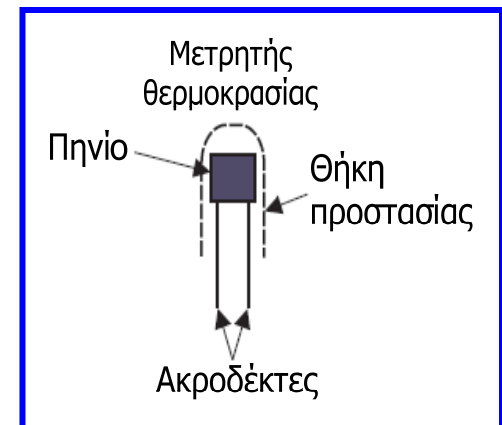
- Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία πάνω από μία επιθυμητή τιμή, το έλασμα κάμπτεται προς τα αριστερά και οι επαφές ανοίγουν, ενώ όταν μειωθεί η θερμοκρασία το έλασμα ευθυγραμμίζεται και το κύκλωμα ξανακλείνει και ενεργοποιεί το σύστημα θέρμανσης.
- Η αύξηση της πίεσης (βίδωμα προς τα δεξιά) που ασκεί ο επιλογέας θερμοκρασίας στο μονωτικό υλικό, έχει σαν αποτέλεσμα το διμεταλλικό έλασμα να πρέπει να καμφθεί περισσότερο, δηλαδή απαιτείται μεγαλύτερη αύξηση θερμοκρασίας, για να ανοίξουν οι επαφές.
- **Χρήσεις:** οικιακή θέρμανση, φούρνοι, ηλεκτρικά σίδερα, θερμοσίφωνες, ενυδρεία κ.α.

# Θερμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης

- Η αντίσταση των περισσότερων μετάλλων αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία τους.

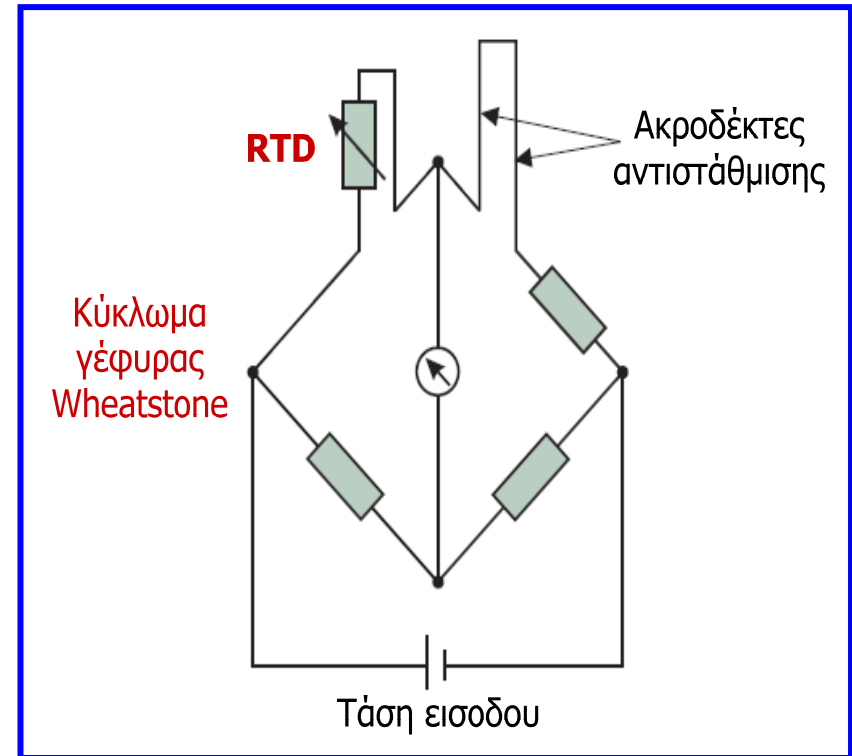
$$R_{\theta} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta)$$

- ✓  $R_0$ : αντίσταση σε  $\Omega$  του αγωγού μετάλλου σε θερμοκρασία  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .
  - ✓  $R_{\theta}$ : αντίσταση σε  $\Omega$  του αγωγού μετάλλου σε θερμοκρασία  $\theta \text{ }^{\circ}\text{C}$ .
  - ✓  $\alpha$ : θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης σε  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ , που λαμβάνει διαφορετική τιμή για κάθε μέταλλο (π.χ. χαλκός:  $4.3 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , λευκόχρυσος:  $3.9 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).
- Το **θερμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης (electrical resistance thermometer)** εκμεταλλεύεται την παραπάνω σχέση αντίστασης και θερμοκρασίας.
  - Ο **μετρητής (probe) θερμοκρασίας** του θερμομέτρου ηλεκτρικής αντίστασης που αναφέρεται και ως **RTD (resistance thermometer detector)** περιλαμβάνει ένα πηνίο (τύλιγμα μεταλλικού σύρματος γύρω από κεραμικό σωλήνα).
  - Το πηνίο επικαλύπτεται με κεραμικό υλικό και τοποθετείται σε προστατευτική θήκη.



# Θερμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης

- Τα άκρα του πηνίου (μετρητή) συνδέονται σε βραχίονα γέφυρας Wheatstone και ο μετρητής τοποθετείται στο χώρο μέτρησης.
- Μετά από μερικά sec, η θερμοκρασία του χώρου εμφανίζεται στο όργανο εξόδου.
- Η αντίσταση των ακροδεκτών που συνδέουν το πηνίο στη γέφυρα επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και εισάγεται σφάλμα, οπότε για να αντισταθμιστεί συνδέονται αντίστοιχοι ακροδέκτες και σε άλλο βραχίονα της γέφυρας.
- Η ισορροπία της γέφυρας είναι ανάλογη της μεταβολής της αντίστασης του μετρητή, οπότε η οθόνη του οργάνου μπορεί να βαθμονομηθεί σε μονάδες θερμοκρασίας.
- Στο μετρητή συνήθως χρησιμοποιείται **λευκόχρυσος**: γραμμική σχέση θερμοκρασίας και αντίστασης, υψηλό σημείο τήξης (ενδείκνυται για μέτρηση θερμοκρασιών έως 1000 °C).
- **Χρήσεις**: μέτρηση θερμοκρασίας υγρών, αερίων, επιφάνειας στερεών, βιομηχανία τροφίμων, χημική βιομηχανία (σταθερότητα σε εχθρικά περιβάλλοντα).
- Είναι ακριβή, εύθραυστα, μεγάλου μεγέθους και υψηλού κόστους.



# Θερμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης

---



# 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**, **καψουλών** και **μικρών στύλων**.
- Η **αντίσταση** των **θερμίστορ μειώνεται** με την **αύξηση** της **θερμοκρασίας** με εκθετική τρόπο (θερμίστορ NTC, **negative temperature coefficient**, **αρνητικού θερμοκρασιακού συντελεστή**)

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

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

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

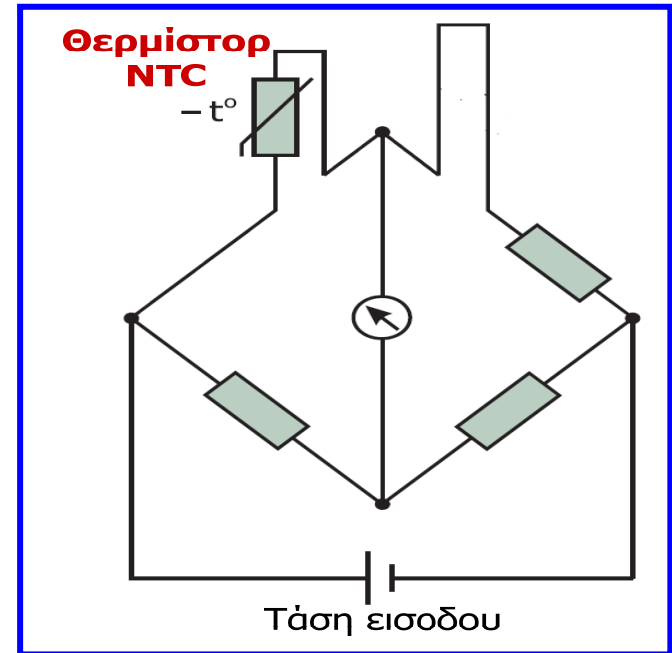
$R_O$ : αντίσταση σε Ω του θερμίστορ σε θερμοκρασία αναφοράς  $T_O$  °K (η θερμοκρασία αναφοράς μπορεί να είναι οποιαδήποτε θερμοκρασία σε °K).

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

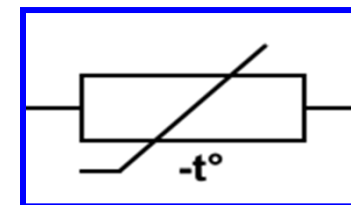


# Θερμίστορ NTC

- 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.

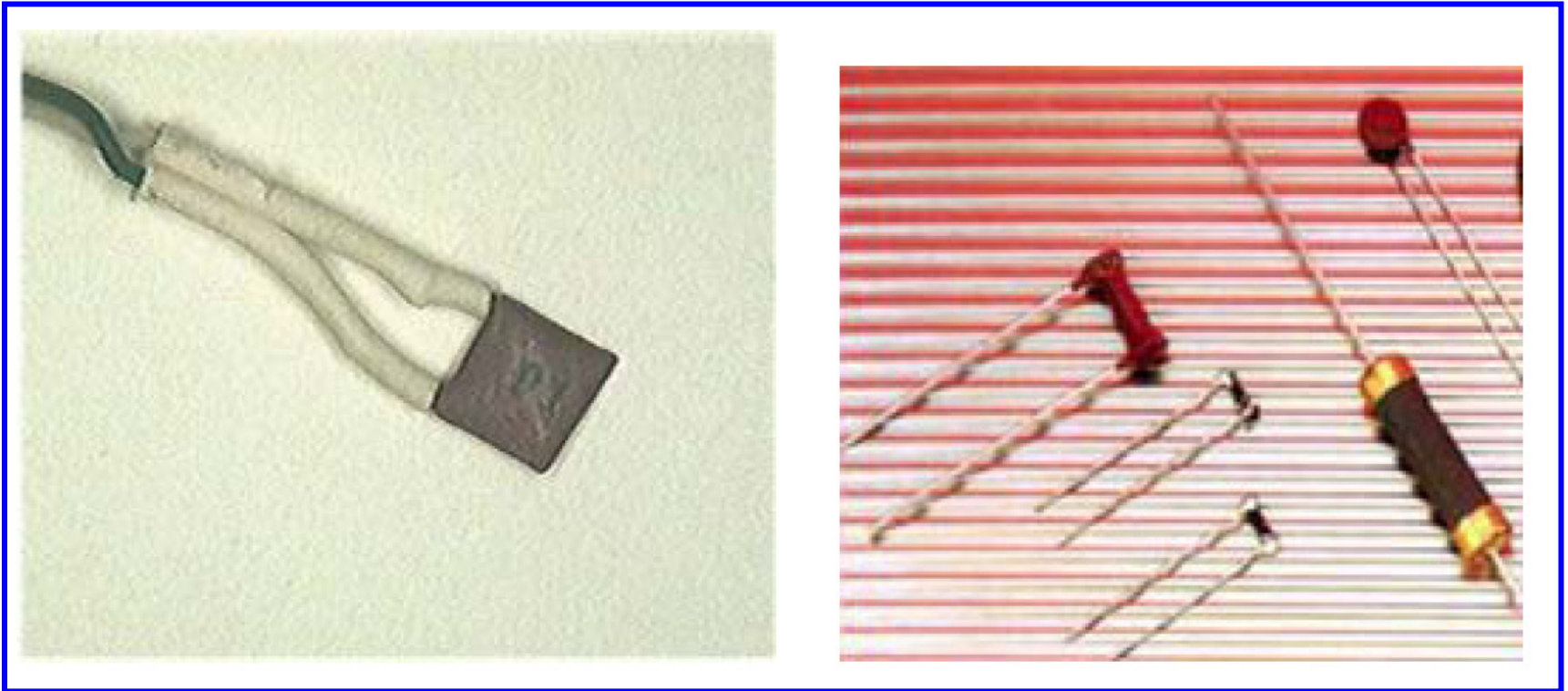


**Σύμβολο του θερμίστορ NTC:** το πρόσημο σημαίνει ότι πρόκειται για θερμίστορ NTC, δηλαδή για στοιχείο του οποίου η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

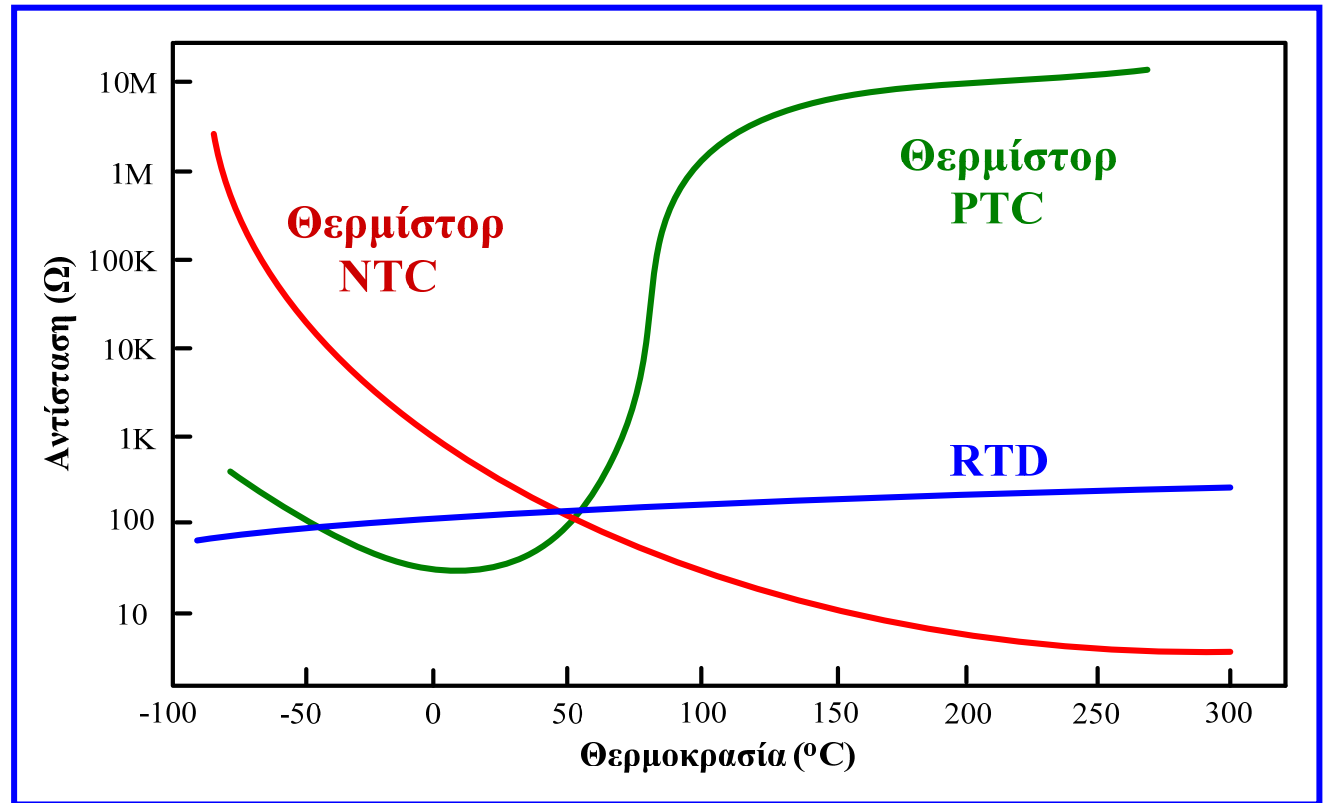
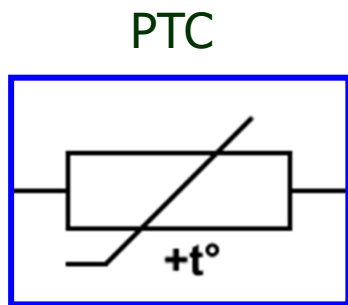
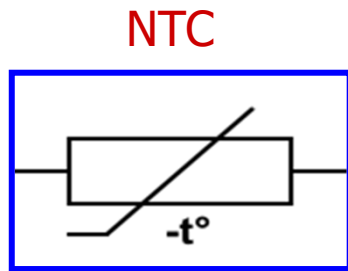


# Θερμίστορ NTC

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

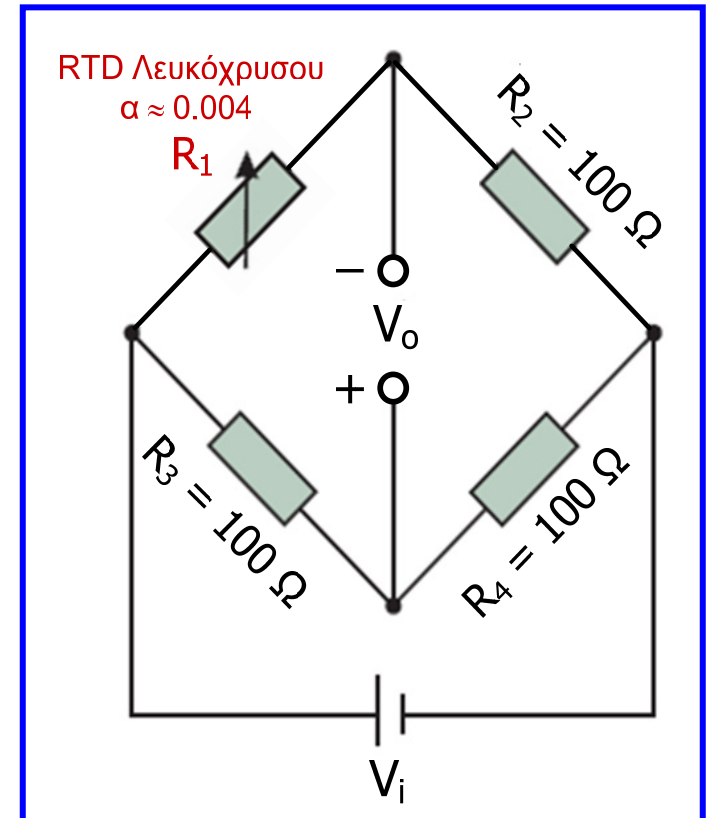
- Τα **θερμίστορ PTC** χρησιμοποιούνται και ως αισθητήρες θερμοκρασίας (PTC που κατασκευάζονται από πυρίτιο), ωστόσο είναι **κυρίως διακοπτικού τύπου**.
- Η αντίσταση των θερμίστορ του τύπου αυτού αυξάνεται απότομα μετά από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία (όπως φαίνεται και στη χαρακτηριστική καμπύλη τους).
- 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 (RTD, 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.

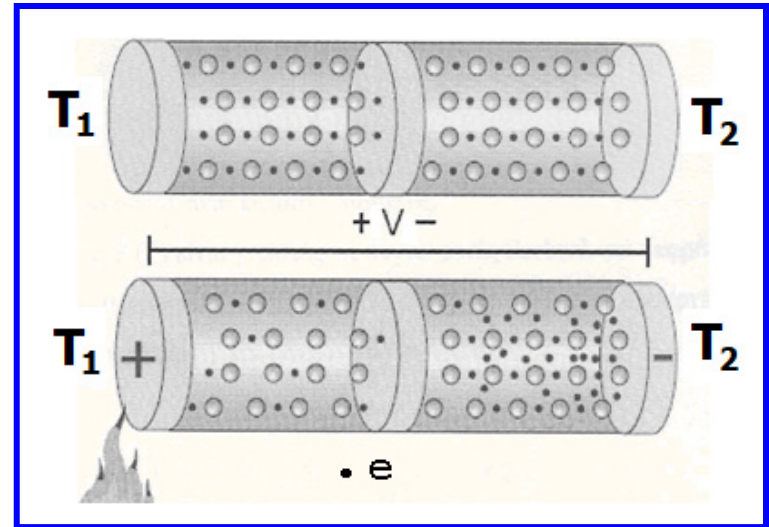
# Φαινόμενο αυτοθέρμανσης

- Έστω RTD λευκόχρυσου με αντίσταση  $100\ \Omega$  σε θερμοκρασία  $0\ ^\circ\text{C}$ , το οποίο συνδέεται σε γέφυρα Wheatstone με τρεις αντιστάσεις των  $100\ \Omega$ .
- Με  $V_i = 0.5\ \text{V}$ , η αντίσταση του RTD μετρήθηκε  $109\ \Omega$ , ενώ με  $V_i = 2\ \text{V}$  μετρήθηκε  $110\ \Omega$ .
- Αυτό συμβαίνει διότι η μεγαλύτερη  $V_i$  προκάλεσε ισχυρότερο ρεύμα και συνεπώς ισχυρότερο φαινόμενο Joule που θερμαίνει την αντίσταση με αποτέλεσμα τη μικρή αύξηση της τιμής της.
- Λόγω της τιμής του θερμοκρασιακού συντελεστή του λευκόχρυσου ( $\alpha$ ), μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $1\ ^\circ\text{C}$  προκαλεί αύξηση της αντίστασης κατά  $0.4\ \Omega$  [αφού  $R_\theta = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta)$ ].
- Επομένως, αφού η αντίσταση αυξήθηκε κατά  $1\ \Omega$ , προκύπτει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω αυτοθέρμανσης είναι:  $1 / 0.4 = 2.5\ ^\circ\text{C}$ .
- Μείωση του σφάλματος λόγω αυτοθέρμανσης, μπορεί να επιτευχθεί με περιορισμό της τάσης εισόδου της γέφυρας, στην οποία συνδέεται ο αισθητήρας θερμοκρασίας.



# Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

- Όταν η θερμοκρασία κατά μήκος ενός μεταλλικού αγωγού είναι η ίδια, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια βρίσκονται σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένα 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 αντισταθμίσει τη ροή των ηλεκτρονίων.

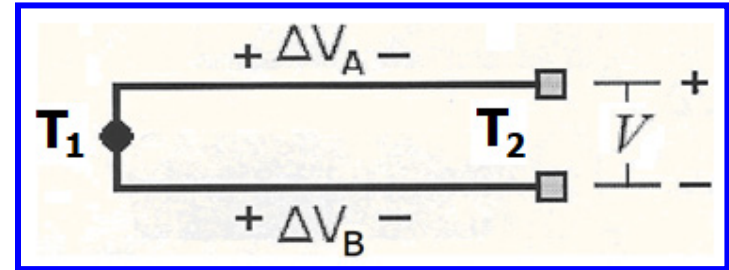


# Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

- 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

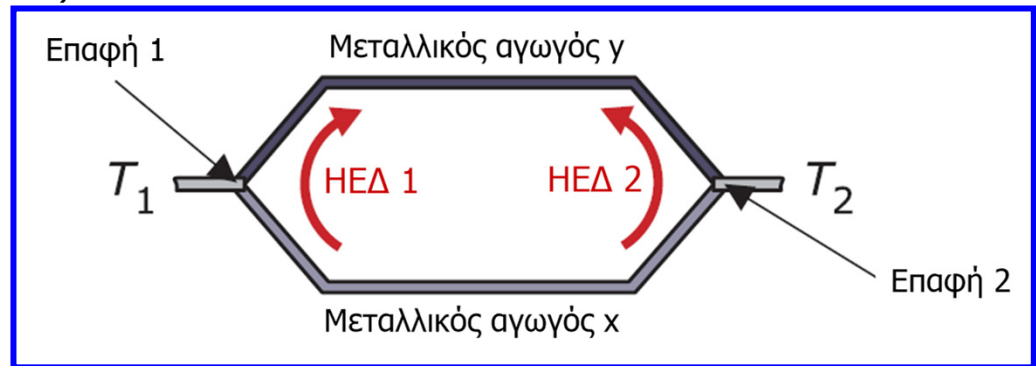


- Εάν συνδεθούν δύο αγωγοί του ίδιου μετάλλου, σχηματίζεται ένα **θερμοηλεκτρικό ζεύγος** ή **θερμοζεύγος**.
- Εάν το σημείο επαφής των δύο αγωγών τεθεί σε υψηλότερη θερμοκρασία από τα ελεύθερα άκρα των αγωγών, σύμφωνα με το φαινόμενο Seebeck δημιουργείται διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων σε κάθε αγωγό.
- 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.



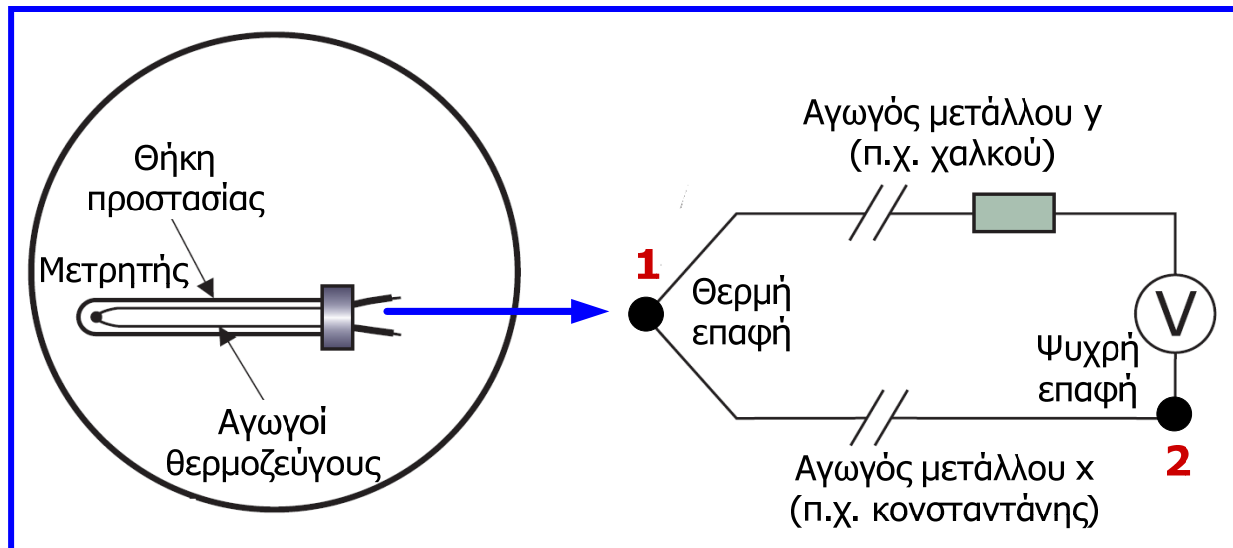
# Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

- 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  $\mu\text{V}$  ανά βαθμό Κελσίου.

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

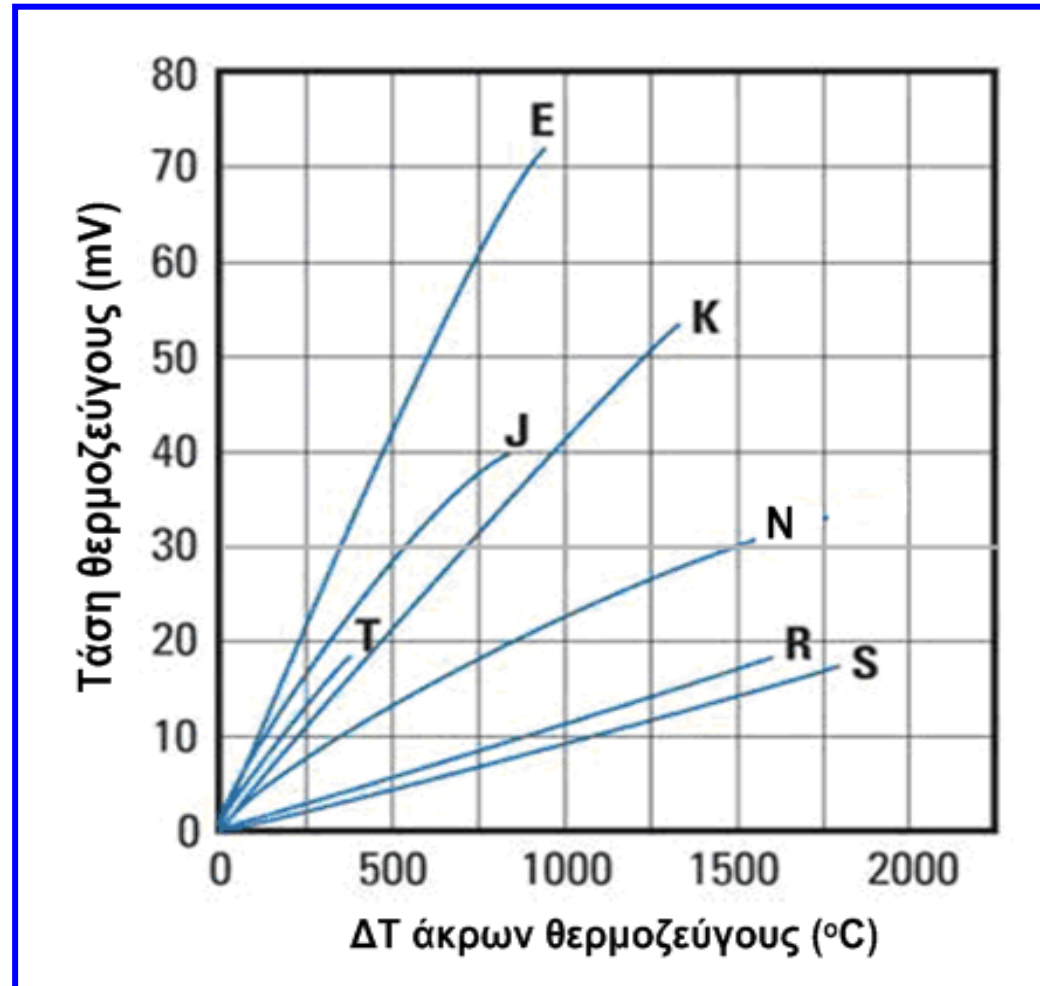
# Θερμοζεύγος

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

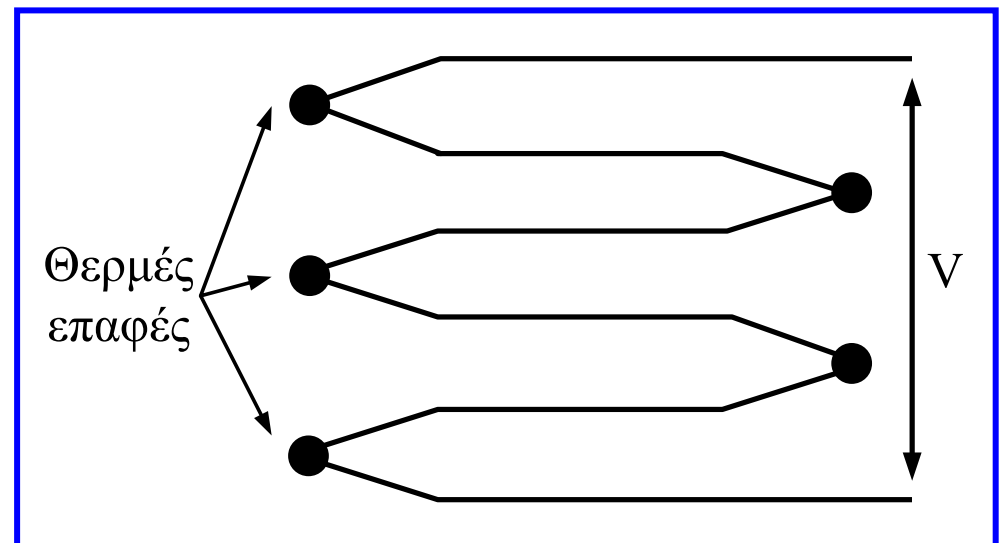
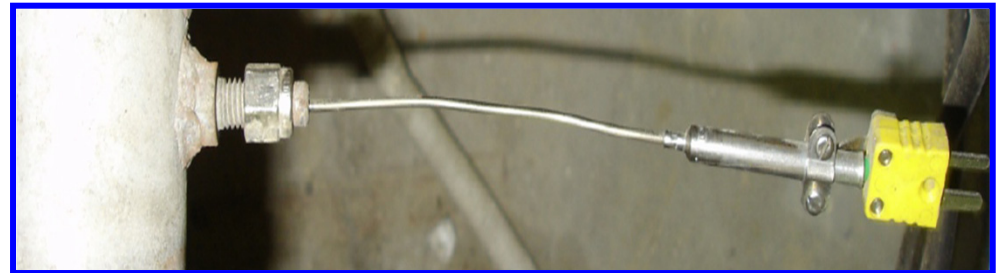


Διαγράμματα τάσης διαφόρων τύπων θερμοζεύγους ως προς τη διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) των άκρων τους.

# 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.



# Ακτινοβολία θερμότητας

- Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός υλικού, τότε αυτό εκπέμπει θερμότητα με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία άλλοτε είναι ορατή και άλλοτε όχι.
- Στην πράξη δεν μπορούμε να δούμε την ακτινοβολία που εκπέμπει ένα σώμα με θερμοκρασία κάτω από 650 °C, αν και μπορούμε να αισθανθούμε τη θερμότητα που ελευθερώνει.
- Εάν ανιχνεύσουμε την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με τα μάτια μας (π.χ. ηλεκτρικός λαμπτήρας) ή με κάποιο όργανο μέτρησης ακτινοβολίας, τότε η ένταση της ακτινοβολίας σχετίζεται με τη θερμοκρασία του σώματος που την εκπέμπει.

| Wavelength<br>$\lambda = c / f$    | Wave type             |             |
|------------------------------------|-----------------------|-------------|
| 1000 km<br>100 km<br>10 km<br>1 km | Audio-frequency AC    |             |
| 100 m<br>10 m<br>1 m               |                       |             |
| 10 cm<br>1 cm                      |                       | Radio waves |
| 1 mm                               |                       |             |
| 100 μm<br>10 μm                    | Microwaves            |             |
| 1 μm                               |                       |             |
| 100 nm<br>10 nm                    | Infrared radiation    |             |
| 1 nm                               | <b>Visible light</b>  |             |
| 0,1 nm<br>0,01 nm<br>0,001 nm      | Ultraviolet radiation |             |
| 0,000 1 nm<br>0,000 01 nm          | X-rays                |             |
|                                    |                       |             |
|                                    | Gamma rays            |             |

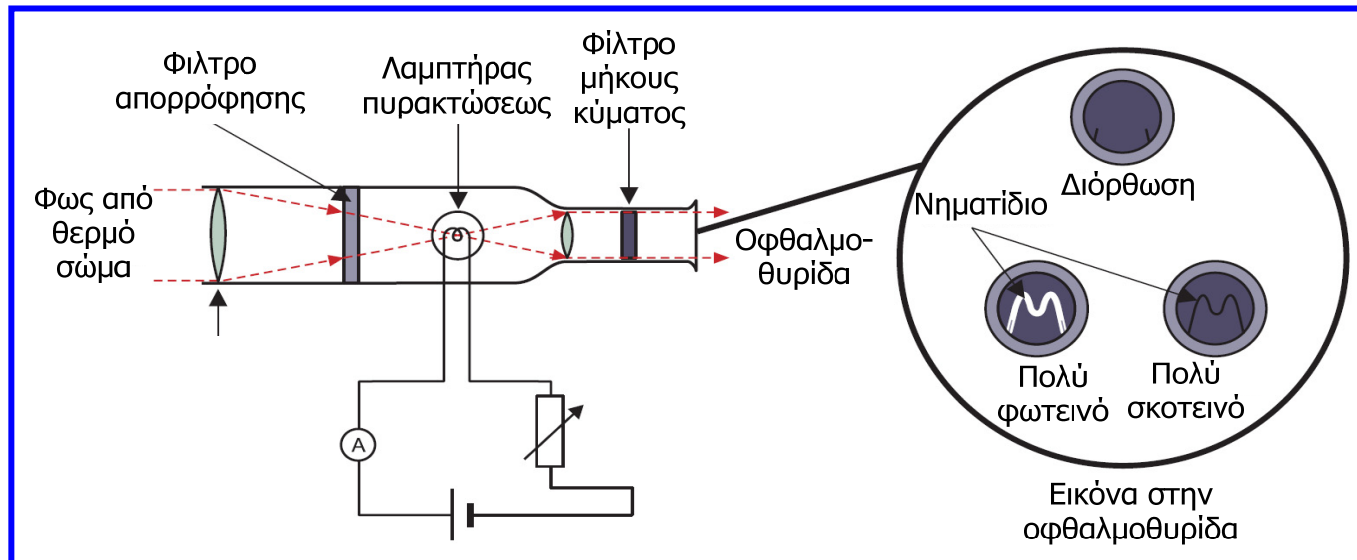
# Οπτικό πυρόμετρο νήματος

- Χρησιμοποιεί την ακτινοβολία που μπορεί να δει το ανθρώπινο μάτι για να μετρά τη θερμοκρασία, επομένως το σώμα του οποίου τη θερμοκρασία επιθυμούμε να μετρήσουμε πρέπει να είναι αρκετά θερμό ώστε να φεγγοβολεί, δηλ. θα πρέπει να είναι θερμότερο από περίπου 650 °C.
- Το οπτικό πυρόμετρο νήματος συγκρίνει την ορατή ακτινοβολία που αποβάλλεται από ένα θερμό σώμα με το φως που εκπέμπεται από έναν λαμπτήρα πυρακτώσεως, ο οποίος είναι βαθμονομημένος έτσι ώστε η λαμπρότητα του νηματιδίου του να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες.
- Χρησιμοποιείται σε μία κλίμακα από 650 – 3000 °C σε ειδικές εφαρμογές όπως η μέτρηση της θερμοκρασίας λιωμένων μετάλλων, φούρνων και διεργασιών θερμικής επεξεργασίας.
- Μεταξύ του λαμπτήρα που χρησιμοποιεί και του θερμού σώματος τοποθετείται φίλτρο απορρόφησης, το οποίο επιτρέπει στη συσκευή να μετρά θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές που μπορεί να φτάσει το νηματίδιο του λαμπτήρα.



# Οπτικό πυρόμετρο νήματος

- Κοιτάζοντας στη θυρίδα, παρατηρούμε ένα μικρό τμήμα του θερμού σώματος και το νηματίδιο του λαμπτήρα μπροστά από το θερμό σώμα κι έτσι μπορούμε να συγκρίνουμε τη λαμπρότητα του σώματος με τη λαμπρότητα του νηματιδίου.
- Ρυθμίζοντας το ρεύμα που ρέει στο λαμπτήρα, ρυθμίζουμε τη λαμπρότητα του νηματιδίου.
- Μεταβάλλουμε το ρεύμα έως ότου το νηματίδιο πάψει να διακρίνεται, γεγονός που σημαίνει ότι σώμα και νηματίδιο έχουν την ίδια θερμοκρασία.
- Αυτή η τιμή ρεύματος αποτελεί ένδειξη θερμοκρασίας.
- Το φίλτρο μήκους κύματος διασφαλίζει ότι η λαμπρότητα του σώματος και του νηματιδίου συγκρίνονται σε ένα μήκος κύματος.



# Οπτικό πυρόμετρο νήματος



Μέτρηση της θερμοκρασίας  
τηγμένου πυριτίου (1500 °C)  
με οπτικό πυρόμετρο νήματος σε  
μονάδα κατασκευής τρανζίστορ  
(1956)

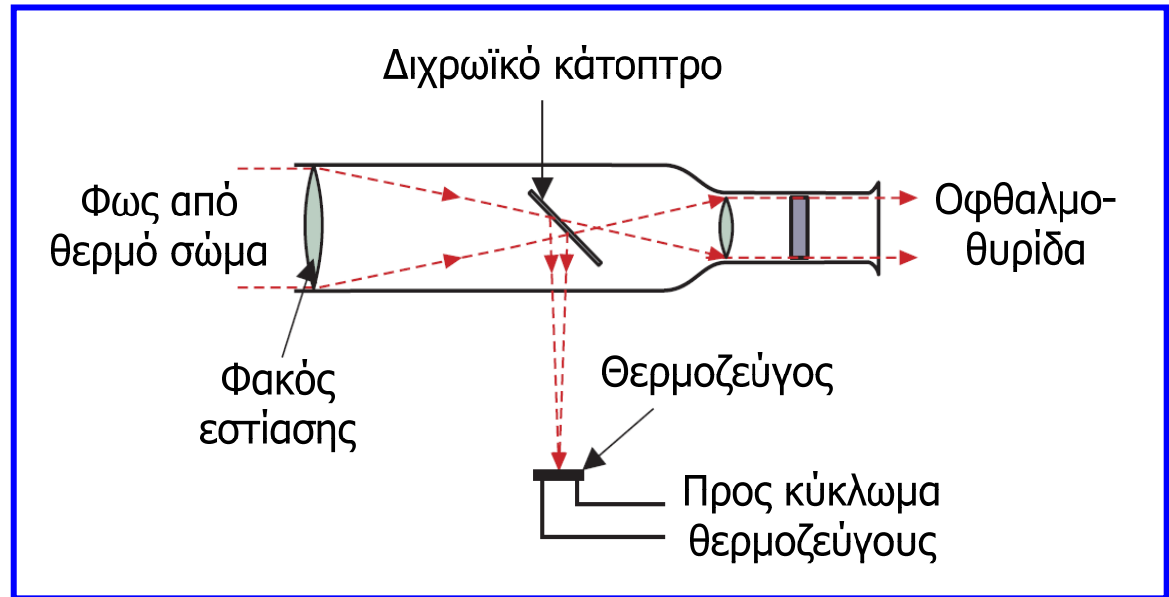
# Πυρόμετρο υπέρυθρου

---

- Επιτρέπει τη μέτρηση θερμοκρασίας από απόσταση και βασίζεται λιγότερο στη κρίση του χρήστη.
- Χρησιμοποιεί την υπέρυθη (infrared) ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα σώμα και μετρούν την έντασή της με τη βοήθεια θερμοζεύγους.
- Το υπέρυθρο πυρόμετρο μπορεί να μετρήσει μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών από ένα οπτικό πυρόμετρο νήματος (μπορεί να μετρήσει ψηλότερες θερμοκρασίες αλλά και χαμηλές θερμοκρασίες έως  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
- Αυτό συμβαίνει επειδή μπορεί να ανιχνεύσει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που δεν είναι ορατή από το ανθρώπινο μάτι.
- Το κύκλωμα θερμοζεύγους που χρησιμοποιεί, επιτρέπει ανάγνωση από απόσταση.
- Χρησιμοποιείται στα ίδια πεδία εφαρμογών με το οπτικό πυρόμετρο νήματος, αλλά στις περιπτώσεις όπου απαιτείται μέτρηση από απόσταση και μέτρηση υψηλότερων ή χαμηλότερων θερμοκρασιών από το πυρόμετρο νήματος.

# Πυρόμετρο υπέρυθρου

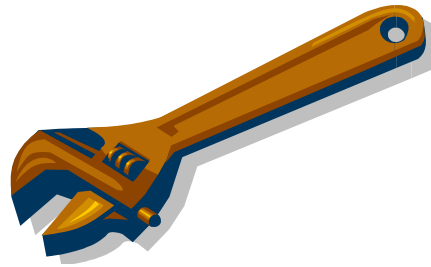
- Εστιάζουμε το πυρόμετρο πάνω στο υπό μέτρηση σώμα.
- Ένα κάτοπτρο ανακλά το υπέρυθρο τμήμα της ακτινοβολίας και επιτρέπει στα υπόλοιπα να διέρχονται, ώστε να μπορούμε να εστιάσουμε στο σώμα.
- Η υπέρυθρη ακτινοβολία που έχει ανακλαστεί από το κάτοπτρο προσπίπτει στο θερμοζεύγος.
- Το όργανο μέτρησης της τάσης εξόδου του κυκλώματος του θερμοζεύγους βαθμονομείται σε μονάδες θερμοκρασίας.



# Συμπεράσματα

---

- Μελετήσαμε την παράμετρο της θερμοκρασίας και τις συσκευές και τεχνικές που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρησή της.
- Η θερμότητα είναι μία μορφή ενέργειας που επηρεάζει τη συμπεριφορά των υλικών με διάφορους τρόπους και χρησιμοποιούμε τις αλλαγές της συμπεριφοράς των υλικών για να μετρήσουμε τη θερμοκρασία.
- Οι πιο βασικές συσκευές μέτρησης της θερμοκρασίας είναι: θερμόμετρα διαστολής υγρού (γυάλινο θερμόμετρο, μεταλλικό θερμόμετρο), θερμόμετρα διαστολής μετάλλου (διμεταλλικό έλασμα στο οποίο βασίζεται το διμεταλλικό θερμόμετρο και ο διμεταλλικός θερμοστάτης), θερμόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης, θερμίστορ, θερμοζεύγος, πυρόμετρα ακτινοβολίας (οπτικό πυρόμετρο νήματος, πυρόμετρο υπέρυθρου).
- Η επιλογή συγκεκριμένης συσκευής για τη μέτρηση της θερμοκρασίας εξαρτάται από τους περιορισμούς που παρουσιάζουν οι ίδιες οι συσκευές, τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής και το εύρος θερμοκρασιών που επιθυμούμε να μετρήσουμε.



# Ερωτήσεις και ασκήσεις 5<sup>ης</sup> ενότητας

# Ερώτηση 1<sup>η</sup>

---

Ποιοι είναι οι περιορισμοί των θερμομέτρων υδραργύρου, σε σύγκριση με τα μεταλλικά θερμομέτρα;

Τα γυάλινα θερμομέτρα υδραργύρου είναι εύθραυστα και λιγότερο ευκίνητα από τα μεταλλικά θερμομέτρα. Βασικό περιορισμό αποτελεί το γεγονός ότι στα γυάλινα θερμομέτρα δεν είναι δυνατή η ανάγνωση ενδείξεων από απόσταση.

Οπότε για εφαρμογές όπου η πρόσβαση του χρήστη είναι δύσκολη ή το περιβάλλον μέτρησης μπορεί να προκαλέσει φθορές στο όργανο είναι προτιμότερη η χρήση μεταλλικών θερμομέτρων.

Ωστόσο, τα γυάλινα θερμομέτρα πλεονεκτούν όσον αφορά το χαμηλό κόστος τους.

## Ερώτηση 2<sup>η</sup>

Κάτω από ποιες συνθήκες αποτελεί ο χαλκός καλύτερη επιλογή από τον λευκόχρυσο για την κατασκευή του μετρητή ενός θερμομέτρου ηλεκτρικής αντίστασης;

$$R_t = R_o \cdot (1 + \alpha \cdot t)$$

Ο θερμοκρασιακός συντελεστής αντίστασης  $\alpha$  του χαλκού ( $4.3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) είναι μεγαλύτερος από εκείνον του λευκόχρυσου ( $3.9 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ). Οπότε για την ίδια μεταβολή θερμοκρασίας η αντίσταση του χάλκινου αγωγού παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβολή που σημαίνει μεγαλύτερη ευαισθησία μέτρησης.

Ωστόσο, η αντίσταση του αγωγού λευκόχρυσου μεταβάλλεται γραμμικά με τη θερμοκρασία για μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος, άρα προσφέρει ευρύτερη περιοχή μέτρησης και διαθέτει μεγαλύτερο σημείο τήξης με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μέτρηση μεγαλύτερων θερμοκρασιών.

Εάν λοιπόν επιθυμούμε μεγαλύτερη ευαισθησία σε περιορισμένη περιοχή μέτρησης που κινείται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, ο αγωγός χαλκού είναι καλύτερη επιλογή.



# Ερώτηση 3<sup>η</sup>

Ποιους παράγοντες πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη όταν επιλέγουμε μία συσκευή για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού στο λέβητα ενός οικιακού συστήματος κεντρικής θέρμανσης; Ποιες συσκευές μέτρησης θα ήταν κατάλληλες;

Σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι το κόστος και η ανθεκτικότητα της συσκευής μέτρησης, αφού η μεγάλη ακρίβεια, η γρήγορη απόκριση και η ανάγνωση ενδείξεων από απόσταση δεν είναι αναγκαία σε μεγάλο βαθμό για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Το διμεταλλικό θερμόμετρο (που χρησιμοποιείται σε παρόμοιες εφαρμογές) είναι σχετικά φθηνό και ανθεκτικό και σε γενικές γραμμές παρέχει καλή ακρίβεια. Ωστόσο, απαιτείται συχνή βαθμονόμηση του, επειδή το μεταλλικό έλασμα που περιλαμβάνει εμφανίζει γήρανση. Η χρήση του μπορεί να συνδυαστεί με διμεταλλικούς θερμοστάτες.

Άλλες συσκευές μέτρησης (μεταλλικό θερμόμετρο, RTD, θερμίστορ, θερμοζεύγος) ανταποκρίνονται στην εφαρμογή αυτή, αλλά το υψηλό τους κόστος τα καθιστά μη ελκυστικά για χρήση.

# Ερώτηση 4<sup>η</sup>

Στην περίπτωση που επιθυμούμε να παρακολουθούμε τη θερμοκρασία ενός ηλεκτρικού βραστήρα, ποια συσκευή μέτρησης μεταξύ των θερμίστορ, μετρητή αντίστασης (RTD) και θερμοζεύγους μπορεί να χρησιμοποιηθεί και γιατί;

Η θερμοκρασία που θα πρέπει να παρακολουθείται κυμαίνεται περίπου στο διάστημα 30-100 °C και ένα σφάλμα της τάξης του 1 °C είναι απολύτως αποδεκτό.

Το θερμίστορ είναι ιδανικό για αυτή την περιοχή μέτρησης αφού είναι αρκετά ευαίσθητο στην περιοχή αυτή (παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβολή αντίστασης από το μετρητή αντίστασης για την ίδια μεταβολή θερμοκρασίας) και παρέχει γρήγορη απόκριση. Ωστόσο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ο μετρητής αντίστασης. Για τη χρήση και των δύο απαιτείται ρύθμιση σήματος με γέφυρα.

Θερμοζεύγος θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί αν και συνήθως χρησιμοποιείται για μέτρηση μεγαλύτερων θερμοκρασιών.

Επομένως, καταλήγουμε ότι και οι τρεις τύποι συσκευών θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αφού καλύπτουν τις απαιτήσεις εύρους μέτρησης και ακρίβειας και το μέγεθός τους προσφέρεται για την εν λόγω εφαρμογή.

Ωστόσο, προτιμότερη λύση αποτελεί το θερμίστορ.

# Ερώτηση 5<sup>η</sup>

---

Θεωρήστε ότι πρέπει να μετρήσουμε τη θερμοκρασία σε ένα εξαιρετικά εχθρικό περιβάλλον, όπως είναι το εσωτερικό ενός πυρηνικού αντιδραστήρα. Ποιες συσκευές θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε και γιατί;

Το θερμοζεύγος είναι ανθεκτικό στη διάβρωση και οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες, προσφέρει γρήγορη απόκριση στις μεταβολές θερμοκρασίας, καλή ακρίβεια και μπορεί να μετρήσει υψηλές θερμοκρασίες (έως 1700 °C). Επίσης, η χρήση του σε ομάδες (θερμοστοιχεία) αυξάνει την ευαισθησία του.

Επομένως, είναι κατάλληλο για χρήση σε εχθρικά περιβάλλοντα, διασφαλίζοντας συνάμα και την ακρίβεια, απόκριση, ευαισθησία που απαιτεί μία κρίσιμη εφαρμογή όπως είναι ένας πυρηνικός αντιδραστήρας.

Άλλες συσκευές μέτρησης (RTD, θερμίστορ) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, αλλά αν και είναι πιο ακριβείς, δεν είναι τόσο ανθεκτικές, δεν μπορούν να μετρήσουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες και παρουσιάζουν αργή απόκριση.

# Ερώτηση 6<sup>η</sup>

Ποια προβλήματα υπάρχουν εάν μετράμε τη θερμοκρασία μίας καμίνου θερμικής επεξεργασίας μετάλλων χρησιμοποιώντας οπτικό πυρόμετρο νήματος και πως μπορούν να ξεπεραστούν τα προβλήματα αυτά;

Βασικά προβλήματα κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας της καμίνου με οπτικό πυρόμετρο νήματος είναι ότι η μέτρηση βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην κρίση και την ικανότητα του χρήστη, ότι μπορεί να γίνει μέτρηση θερμοκρασιών μόνο πάνω από 650 °C (ακτινοβολία ορατή από το ανθρώπινο μάτι) και ότι δεν είναι εφικτή η ανάγνωση ενδείξεων από απόσταση.

Τα προβλήματα αυτά ξεπερνιούνται με χρήση πυρομέτρου υπέρυθρου το οποίο παρέχει μεγαλύτερη περιοχή μέτρησης (αφού ανιχνεύουν ακτινοβολία μη ορατή από το ανθρώπινο μάτι), ανάγνωση ενδείξεων από απόσταση (αφού η έξοδος του κυκλώματος θερμοζεύγους μπορεί να ληφθεί σε απόσταση από την περιοχή μέτρησης) και βασίζεται λιγότερο στην κρίση του χρήστη.

Επιπλέον, το πυρόμετρο υπέρυθρου παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτερη απόκριση, αλλά το κόστος του είναι αισθητά υψηλότερο.

# Άσκηση 1<sup>η</sup>

Ένα κομμάτι σύρματος από λευκόχρυσο έχει αντίσταση  $110 \Omega$  σε θερμοκρασία  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Να υπολογίσετε την αντίσταση του κομματιού σε θερμοκρασία  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  και να προσδιορίσετε την αλλαγή της αντίστασης του. Δίνετε ο θερμοκρασιακός συντελεστής του λευκόχρυσου  $\alpha = 3.9 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

$$\begin{aligned}R_t &= R_o \cdot (1 + \alpha \cdot t) \Rightarrow R_{25} = 110 \cdot (1 + 3.9 \cdot 10^{-3} \cdot 25) \Rightarrow \\R_{25} &= 110 \cdot (1 + 0.0975) \Rightarrow R_{25} = 110 \cdot 1.0975 \Rightarrow \\R_{25} &= 120.725 \Omega\end{aligned}$$

Η αντίσταση του κομματιού σε θερμοκρασία  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  είναι  $120.725 \Omega$  και η μεταβολή της αντίστασης  $\Delta R$  είναι:

$$\Delta R = R_t - R_o \Rightarrow \Delta R = 120.725 - 110 \Rightarrow \Delta R = 10.725 \Omega$$

# Άσκηση 2<sup>η</sup>

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  $e = 2.718$ .

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

$$T_0 = 0 \text{ } ^{\circ}\text{C} + 273 = 273 \text{ } ^{\circ}\text{K}$$

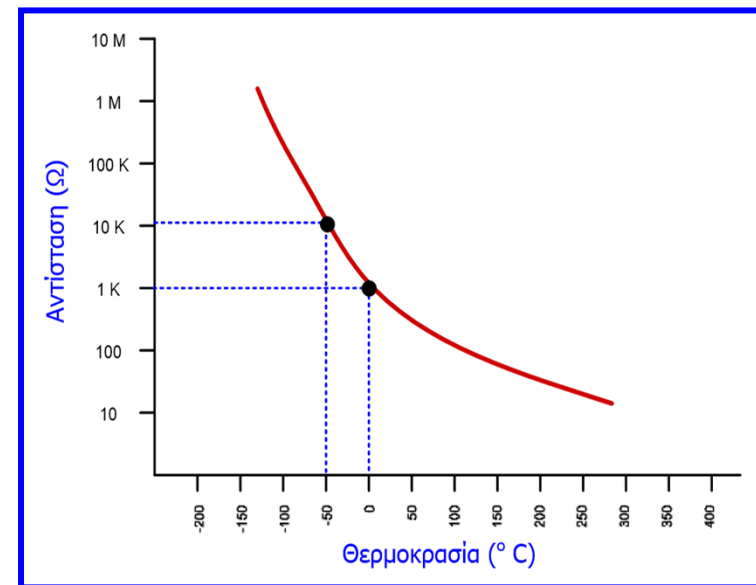
$$T = -50 \text{ } ^{\circ}\text{C} + 273 = 223 \text{ } ^{\circ}\text{K}$$

$$R_t = R_o \cdot e^{\beta \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \Rightarrow R_t = 1 \cdot 10^3 \cdot e^{3000 \cdot \left( \frac{1}{223} - \frac{1}{273} \right)} \Rightarrow$$

$$R_t = 1 \cdot 10^3 \cdot e^{3000 \cdot 0.021 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow R_t = 1 \cdot 10^3 \cdot e^{2.46} \Rightarrow$$

$$R_t = 1 \cdot 10^3 \cdot 2.718^{2.46} \Rightarrow R_t = 1 \cdot 10^3 \cdot 11.702 \Rightarrow$$

$$R_t = 11.702 \text{ k}\Omega$$

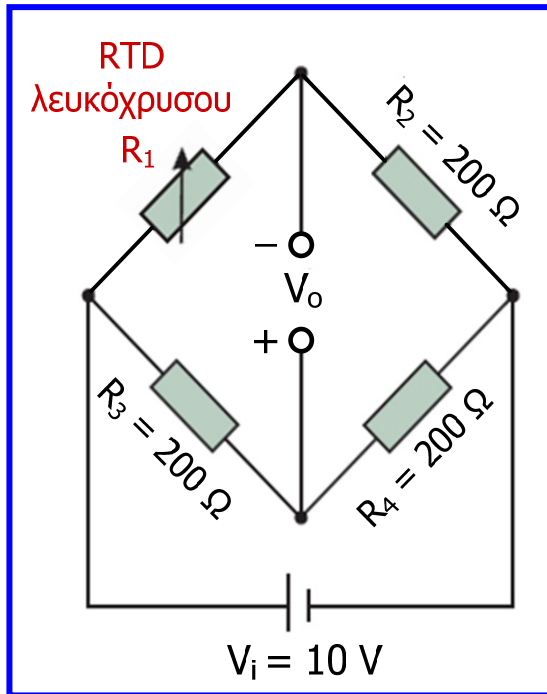


$$\Delta R = R_t - R_o \Rightarrow \Delta R = 11.702 - 1 \Rightarrow$$

$$\Delta R = 10.702 \text{ k}\Omega$$

# Άσκηση 3<sup>η</sup>

Ένα θερμόμετρο αντίστασης λευκόχρυσου συνδέεται στον ένα βραχίονα μιας γέφυρας Wheatstone, όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι σταθερές αντιστάσεις του κυκλώματος είναι  $200 \Omega$  η καθεμία και η τάση εισόδου είναι  $10 \text{ V}$ . Στους  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  το κύκλωμα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας και στη θερμοκρασία αυτή το θερμόμετρο έχει αντίσταση  $200 \Omega$ . Να υπολογίσετε τη μεταβολή της τάσης εξόδου εάν η θερμοκρασία αλλάξει κατά  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Δίνεται ο θερμοκρασιακός συντελεστής του λευκόχρυσου  $\alpha = 0.0039 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .



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

$$R_{1-1^\circ\text{C}} = R_{1-0^\circ\text{C}} \cdot (1 + \alpha \cdot t) \Rightarrow$$
$$R_{1-1^\circ\text{C}} = 200 \cdot (1 + 0.0039 \cdot 1) \approx 200.8 \Omega$$

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

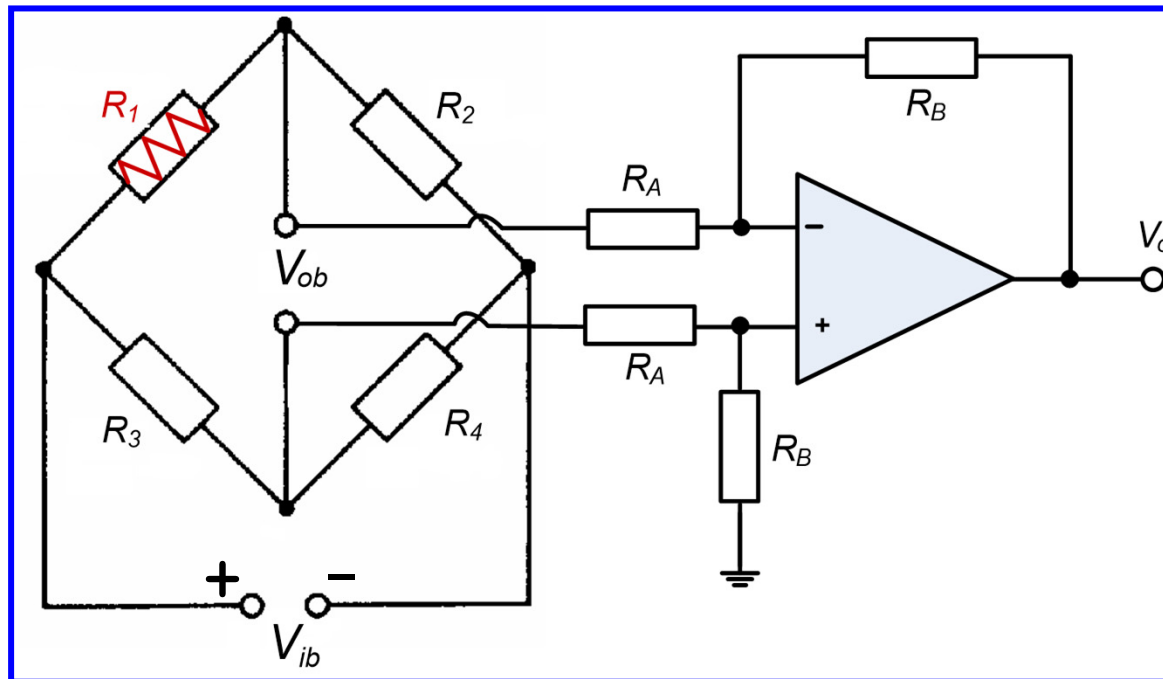
Στην ενότητα 3 είχε αποδειχθεί ότι:

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

Επομένως, για κάθε βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας προκαλείται μεταβολή  $20 \text{ mV}$  στην τάση εξόδου της γέφυρας.

# Άσκηση 4<sup>η</sup>

Ένα θερμόμετρο αντίστασης λευκόχρυσου ( $R_1$ ) συνδέεται στον ένα βραχίονα μιας γέφυρας Wheatstone, η έξοδος της οποίας συνδέεται σε ενισχυτή διαφοράς που περιλαμβάνει ιδανικό τελεστικό ενισχυτή. Οι σταθερές αντιστάσεις της γέφυρας είναι  $200 \Omega$  η καθεμία, η τάση εισόδου ( $V_{ib}$ ) είναι  $10 \text{ V}$  και οι αντιστάσεις του ενισχυτή είναι  $R_A = 20 \text{ k}\Omega$  και  $R_B = 100 \text{ k}\Omega$ . Εάν το θερμόμετρο στους  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  έχει αντίσταση  $200 \Omega$ , να υπολογίσετε την τάση εξόδου ( $V_o$ ) όταν το θερμόμετρο βρίσκεται σε θερμοκρασία  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Δίνεται ο θερμοκρασιακός συντελεστής του λευκόχρυσου  $\alpha = 0.0039 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .



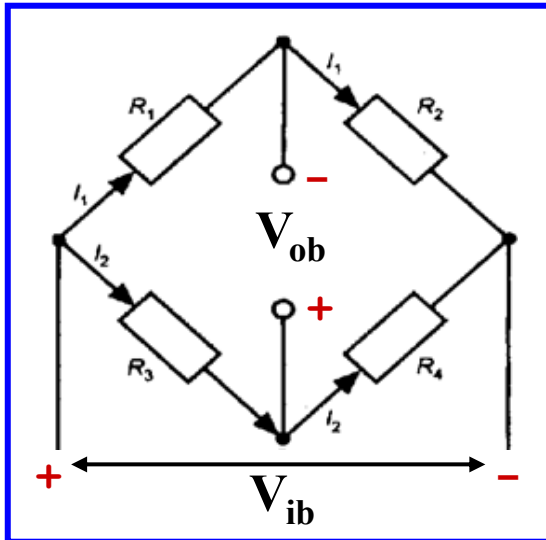


# Άσκηση 4<sup>η</sup>

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

$$R_{1-10^{\circ}\text{C}} = R_{1-0^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + \alpha \cdot t) \Rightarrow R_{1-10^{\circ}\text{C}} = 200 \cdot (1 + 0.0039 \cdot 10) = 207.8\ \Omega$$

Στην ενότητα 3 μελετήσαμε τη γέφυρα Wheatstone:



$$V_{ob} = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_3$$
$$\Rightarrow V_{ob} = \left( \frac{V_{ib}}{R_1 + R_2} \right) \cdot R_1 - \left( \frac{V_{ib}}{R_3 + R_4} \right) \cdot R_3$$
$$\Rightarrow V_{ob} = V_{ib} \cdot \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

Η αντίσταση  $R_A$  του ενισχυτή διαφοράς είναι πολύ μεγαλύτερη από τις αντιστάσεις της γέφυρας, οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το ρεύμα που ρέει εκτός των ακροδεκτών εξόδου της γέφυρας είναι αμελητέο.

## Άσκηση 4η

$$V_{ob} = V_{ib} \cdot \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = V_{ib} \cdot \left( \frac{R_1}{R_1 + R} - \frac{1}{2} \right) = 10 \cdot \left( \frac{207.8}{207.8 + 200} - 0.5 \right)$$
$$\Rightarrow V_{ob} = 0.096 \text{ V} = 96 \text{ mV}$$

$$R_2 = R_3 = R_4 = R = 200 \Omega$$

Στην ενότητα 4 αποδείξαμε ότι στον ενισχυτή διαφοράς ισχύει:

$$V_o = \frac{R_B}{R_A} \cdot (V_{in2} - V_{in1}) \Rightarrow V_o = \frac{R_B}{R_A} \cdot V_{ob} \Rightarrow V_o = \frac{100}{20} \cdot 0.096 \Rightarrow$$
$$V_o = 0.48 \text{ V} = 480 \text{ mV}$$

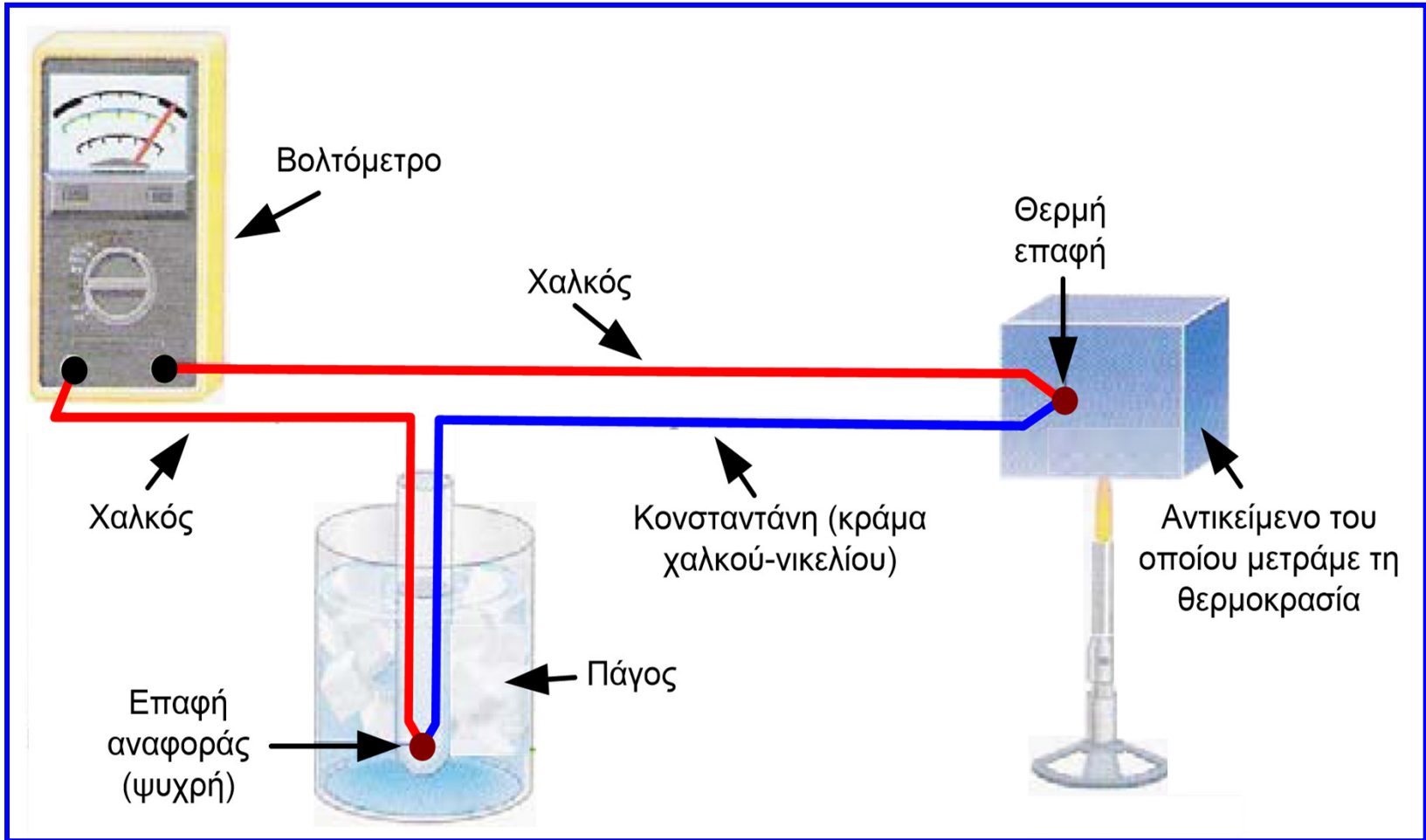
# Άσκηση 5η

---

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  $2.55 \text{ mV}$ , να προσδιοριστεί η θερμοκρασία του αντικειμένου. Επίσης, εάν η ένδειξη του βολτομέτρου αυξηθεί κατά  $0.45 \text{ mV}$  να προσδιοριστεί η μεταβολή της θερμοκρασίας του αντικειμένου.

# Άσκηση 5η

Η κατάλληλη συνδεσμολογία έχει ως εξής:



# Άσκηση 5η

Η θερμοκρασία της επαφής αναφοράς ( $T_2$ ) είναι  $0^\circ\text{C}$  (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  $0.45 \text{ mV}$ , τότε  $V = 3 \text{ mV}$ :

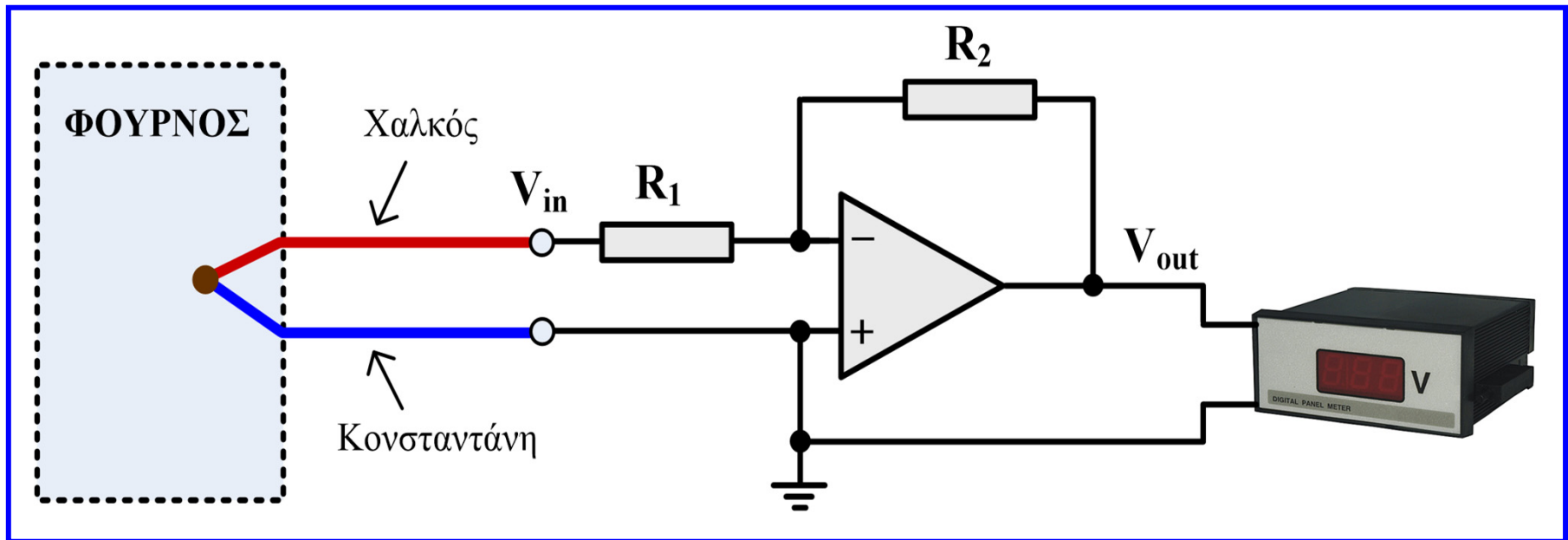
$$V = C \cdot (T'_1 - T_2) \Rightarrow V = C \cdot (T'_1 - 0) \Rightarrow T'_1 = \frac{V}{C} \Rightarrow T'_1 = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ V}}{38 \cdot 10^{-6} \text{ V}/^\circ\text{C}} \Rightarrow T'_1 = 78.9^\circ\text{C}$$

Συνεπώς, η μεταβολή της θερμοκρασίας του αντικειμένου είναι:

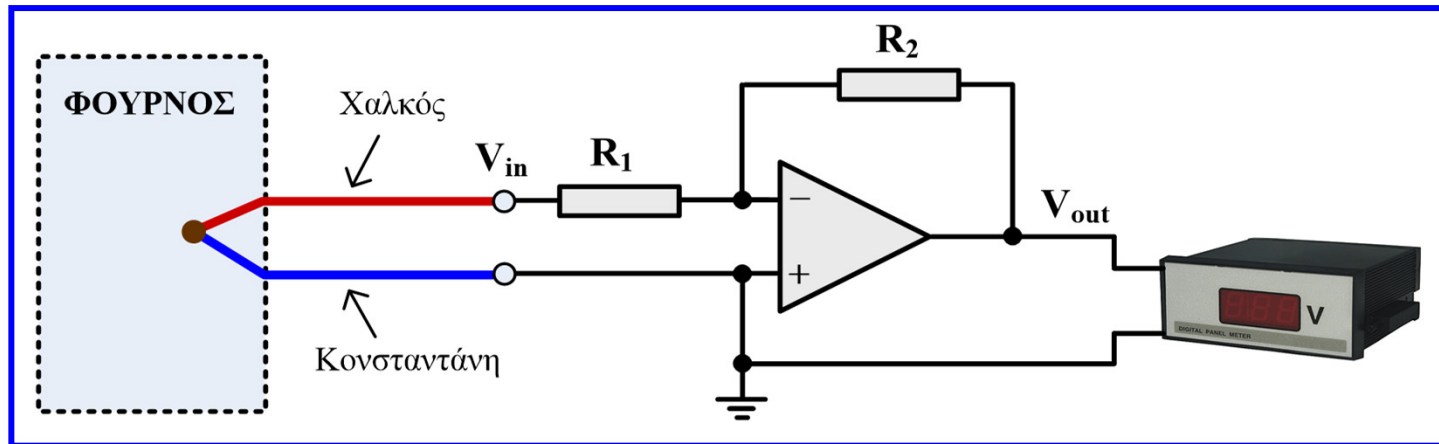
$$\Delta T = T'_1 - T_1 = 78.9^\circ\text{C} - 67.1^\circ\text{C} \Rightarrow \Delta T = 11.8^\circ\text{C}$$

# Άσκηση 6η

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  $90 ^\circ\text{C}$  και του περιβάλλοντος  $19 ^\circ\text{C}$ . Δίνονται:  $R_1 = 100 \Omega$ ,  $R_2 = 330 \text{ k}\Omega$ .



# Άσκηση 6η



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:

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

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

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

# Άσκηση 7η

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι τιμές της τάσης εξόδου ενός θερμοζεύγους χαλκού-κωνσταντάνης για διάφορες τιμές θερμοκρασίας της επαφής μέτρησης ή «θερμής» επαφής ή «θερμού» άκρου του θερμοζεύγους. Η θερμοκρασία της «ψυχρής» επαφής ή «ψυχρού» άκρου του θερμοζεύγους είναι σταθερή.

|    |      |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|
| °C | 250  | 500   | 750   | 1000  |
| mV | 8.36 | 17.86 | 27.36 | 36.86 |

- (α) Να υπολογίσετε την ευαισθησία του θερμοζεύγους.  
(β) Να υπολογίσετε τη σταθερή θερμοκρασία της «ψυχρής» επαφής του θερμοζεύγους.

- (α) Η ευαισθησία (sensitivity) ενός αισθητήρα εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στην αλλαγή της εξόδου και την αντίστοιχη αλλαγή της εισόδου και υπολογίζεται από τον λόγο των προαναφερόμενων αλλαγών.

Εύκολα παρατηρούμε ότι από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η αλλαγή της θερμοκρασίας της επαφής μέτρησης του θερμοζεύγους μεταξύ δύο συνεχόμενων τιμών του πίνακα είναι 250 °C. Επίσης, προκύπτει ότι η αντίστοιχη αλλαγή της τάσης εξόδου του θερμοζεύγους είναι 9.5 mV. Συνεπώς, η ευαισθησία του θερμοζεύγους μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\text{Ευαισθησία} = \frac{9.5 \text{ mV}}{250^\circ\text{C}} = 38 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}} = 38 \frac{\mu\text{V}}{^\circ\text{C}}.$$

Επίσης, η ευαισθησία του θερμοζεύγους μπορεί να υπολογιστεί με την παρακάτω σχέση:

$$\text{Ευαισθησία} = \frac{\text{Μέγιστη τιμή εξόδου} - \text{Ελάχιστη τιμή εξόδου}}{\text{Μέγιστη τιμή εισόδου} - \text{Ελάχιστη τιμή εισόδου}} = \frac{(36.86 - 8.36) \text{ mV}}{(1000 - 250)^\circ\text{C}} = \frac{28.5 \text{ mV}}{750^\circ\text{C}} = 38 \frac{\mu\text{V}}{^\circ\text{C}}.$$



# Άσκηση 7η

(β) Για την τάση εξόδου ( $V$ ) του θερμοζεύγους ισχύει η ακόλουθη σχέση:

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

όπου  $T_1$  είναι η θερμοκρασία (σε  $^{\circ}\text{C}$ ) της επαφής μέτρησης,  $T_2$  είναι η θερμοκρασία (σε  $^{\circ}\text{C}$ ) της «ψυχρής» επαφής και  $C$  είναι η σταθερά του θερμοζεύγους (σε  $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ).

Αφού η θερμοκρασία της «ψυχρής» επαφής ( $T_2$ ) είναι σταθερή για όλα τα ζεύγη τιμών του πίνακα που δίνεται στην εκφώνηση του θέματος, μπορούμε με βάση την παραπάνω σχέση να διατυπώσουμε τις ακόλουθες σχέσεις για δύο ζεύγη τιμών του πίνακα:  $8.36 \text{ mV} = C \cdot (250^{\circ}\text{C} - T_2)$  και  $17.86 \text{ mV} = C \cdot (500^{\circ}\text{C} - T_2)$ . Αφαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις αυτές προκύπτει:  $9.5 \text{ mV} = C \cdot 250^{\circ}\text{C} \Rightarrow C = 9.5 \text{ mV} / 250^{\circ}\text{C} \Rightarrow C = 38 \mu\text{V} / ^{\circ}\text{C}$ , δηλαδή ότι η τιμή της σταθεράς του θερμοζεύγους ταυτίζεται με την ευαισθησία του.

Αντικαθιστώντας τη σταθερά  $C$  και ένα από τα ζεύγη τιμών του πίνακα στη σχέση υπολογισμού της τάσης εξόδου του θερμοζεύγους, υπολογίζουμε εύκολα τη σταθερή θερμοκρασία της «ψυχρής» επαφής του:

$$V = C \cdot (T_1 - T_2) \Rightarrow V = C \cdot T_1 - C \cdot T_2 \Rightarrow T_2 = \frac{C \cdot T_1 - V}{C} \Rightarrow T_2 = T_1 - \frac{V}{C} \Rightarrow T_2 = 250^{\circ}\text{C} - \frac{8.36 \text{ mV}}{38 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}} \Rightarrow$$

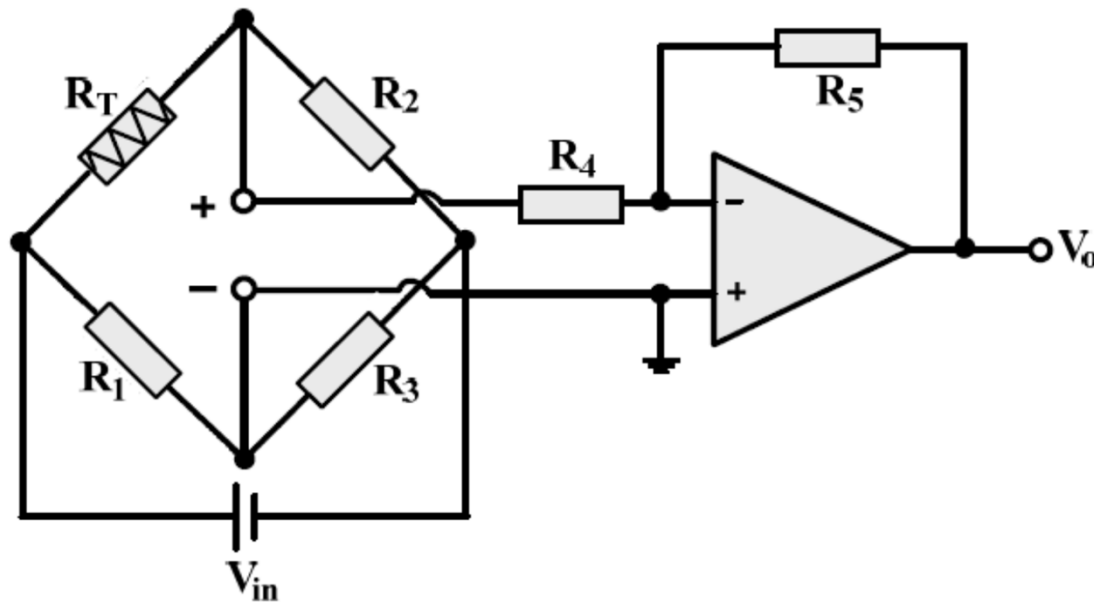
$$T_2 = 250^{\circ}\text{C} - \frac{8360 \mu\text{V}}{38 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}} \Rightarrow T_2 = 250^{\circ}\text{C} - 220^{\circ}\text{C} \Rightarrow T_2 = 30^{\circ}\text{C} .$$

# Άσκηση 8η

Ένα θερμόμετρο αντίστασης λευκόχρυσου ( $R_T$ ) συνδέεται στον ένα βραχίονα της γέφυρας Wheatstone που περιλαμβάνεται στο κύκλωμα του παρακάτω σχήματος. Η αντίσταση του θερμομέτρου μετρήθηκε  $200 \Omega$  στους  $0^\circ \text{C}$ .

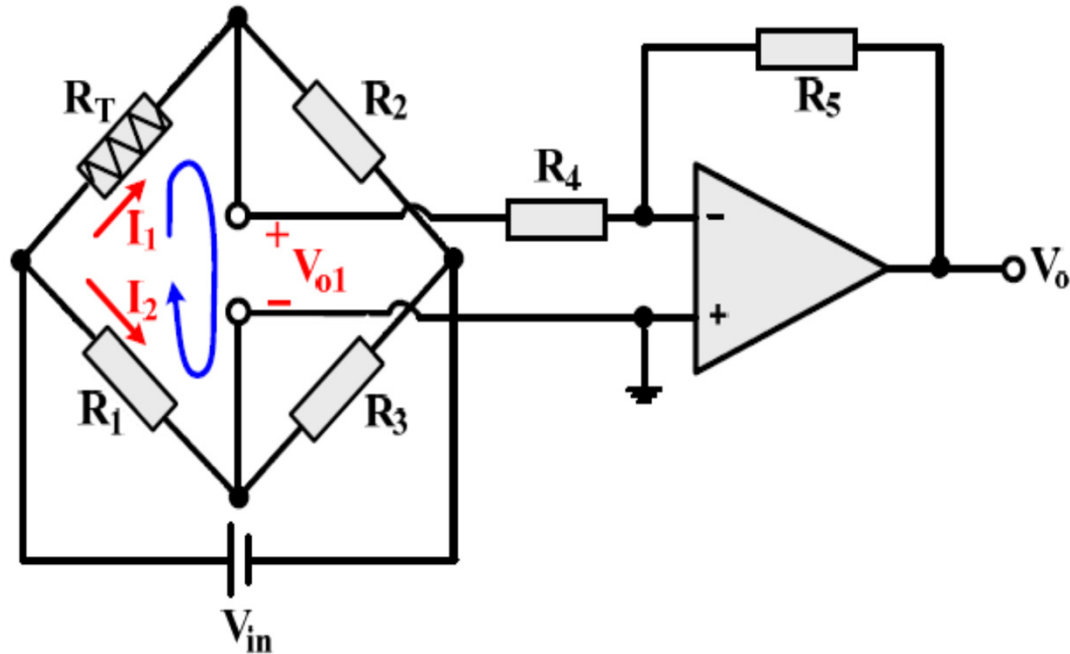
- (α) Να προσδιορίσετε τη σχέση της τάσης εξόδου ( $V_o$ ) του κυκλώματος με τη θερμοκρασία  $\theta$  ( $^\circ \text{C}$ ) στην οποία βρίσκεται το θερμόμετρο αντίστασης.
- (β) Να σχεδιάσετε διάγραμμα της τάσης εξόδου ( $V_o$ ) του κυκλώματος ως προς τη θερμοκρασία, για θερμοκρασίες από  $0^\circ \text{C}$  έως  $250^\circ \text{C}$ .

Δίνονται:  $R_1 = R_2 = R_3 = 150 \Omega$ ,  $R_4 = 30 \text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 120 \text{ k}\Omega$ ,  $V_{in} = 12 \text{ V}$ , θερμοκρασιακός συντελεστής λευκόχρυσου  $= 0.004^\circ \text{C}^{-1}$ . Θεωρείστε ότι ο τελεστικός ενισχυτής του κυκλώματος είναι ιδανικός.



# Άσκηση 8η

- (α) Επειδή η αντίσταση  $R_4$  ( $30 \text{ k}\Omega$ ) και η αντίσταση εισόδου του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή που αποτελούν το φορτίο της γέφυρας είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντιστάσεις της γέφυρας  $R_2$  και  $R_3$ , το ρεύμα που κατευθύνεται προς την έξοδο της γέφυρας είναι αμελητέο.



Συνεπώς, για τα ρεύματα στους κλάδους της γέφυρας δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

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

# Άσκηση 8η

Εφαρμόζοντας τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στον βρόχο που περιλαμβάνει τις αντιστάσεις  $R_T$ ,  $R_1$  και την τάση εξόδου της γέφυρας ( $V_{o1}$ ), έχουμε:

$$V_{o1} + I_1 \cdot R_T - I_2 \cdot R_1 = 0 \Rightarrow V_{o1} = I_2 \cdot R_1 - I_1 \cdot R_T \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{o1} = \left( \frac{V_{in}}{R_1 + R_3} \right) \cdot R_1 - \left( \frac{V_{in}}{R_T + R_2} \right) \cdot R_T \Rightarrow V_{o1} = V_{in} \cdot \left( \frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_T}{R_T + R_2} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{o1} = 12 \cdot \left( \frac{150}{300} - \frac{R_T}{R_T + 150} \right) \Rightarrow V_{o1} = 12 \cdot \left( 0.5 - \frac{R_T}{R_T + 150} \right) \Rightarrow V_{o1} = 6 - \frac{12 \cdot R_T}{150 + R_T} \quad (1)$$

Επίσης, για το θερμόμετρο αντίστασης ισχύει:

$$R_T = R_{T-0^\circ C} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta) \Rightarrow R_T = 200 \cdot (1 + 0.004 \cdot \theta) \Rightarrow R_T = 200 + 0.8 \cdot \theta \quad (2)$$

# Άσκηση 8η

Στον ενισχυτή αντιστροφής που συνίσταται από τον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή και τις αντιστάσεις  $R_4$  και  $R_5$ , γνωρίζουμε ότι ισχύει:

$$V_o = -\frac{R_5}{R_4} V_{o1} \Rightarrow V_o = -\frac{120 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^3} V_{o1} \Rightarrow V_o = -4 \cdot V_{o1} \quad (3)$$

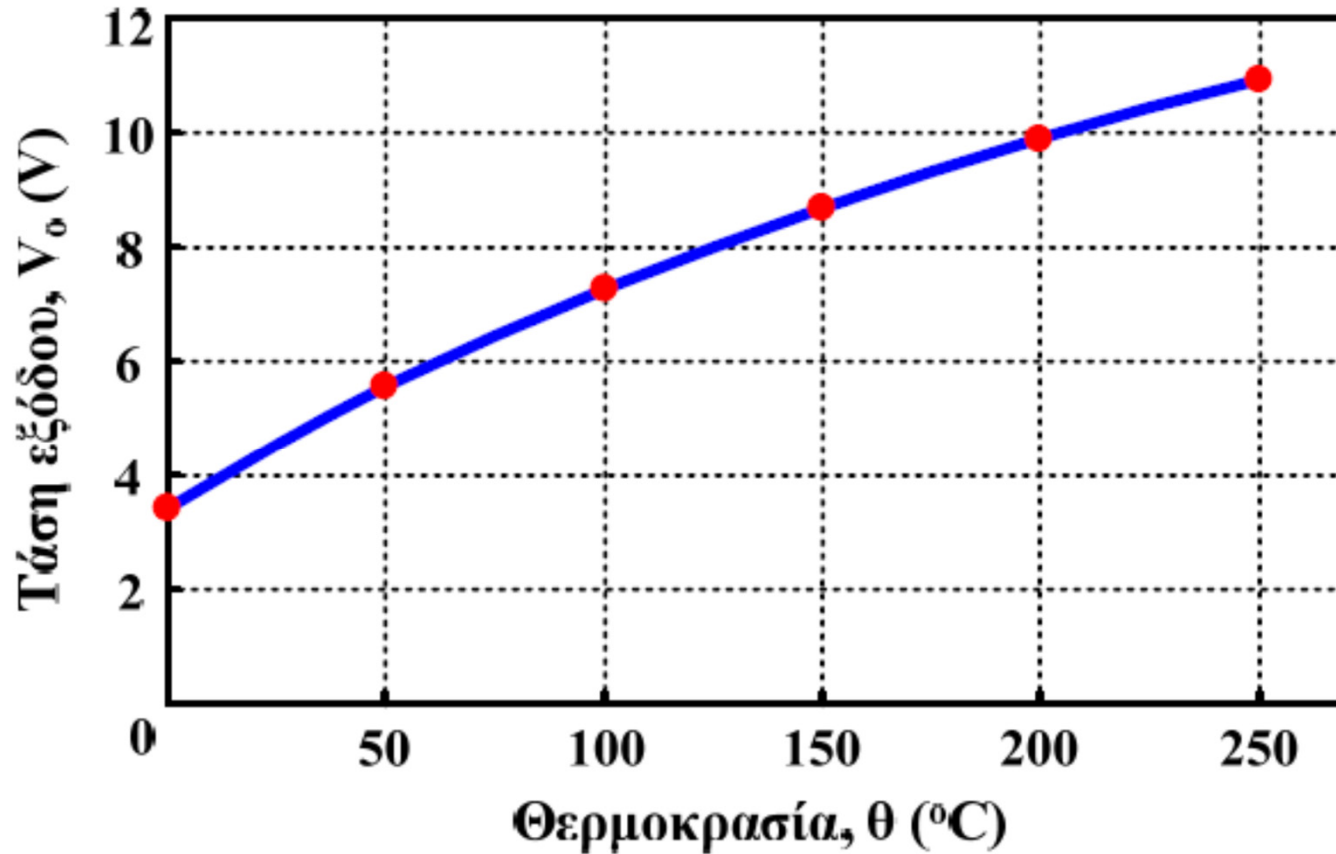
Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1), (2) και (3), λαμβάνουμε τη ζητούμενη σχέση της τάσης εξόδου ( $V_o$ ) του κυκλώματος με τη θερμοκρασία  $\theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) στην οποία βρίσκεται το θερμόμετρο:

$$V_o = -4 \cdot \left( 6 - \frac{12 \cdot R_T}{150 + R_T} \right) \Rightarrow V_o = \frac{48 \cdot R_T}{150 + R_T} - 24 \Rightarrow V_o = \frac{48 \cdot (200 + 0.8 \cdot \theta)}{150 + 200 + 0.8 \cdot \theta} - 24 \Rightarrow V_o = \frac{9600 + 38.4 \cdot \theta}{350 + 0.8 \cdot \theta} - 24 .$$

(β) Με βάση την παραπάνω σχέση, καταστρώνουμε τον παρακάτω πίνακα που περιλαμβάνει τις τιμές της τάσης εξόδου ( $V_o$ ) για θερμοκρασίες από  $0^{\circ}\text{C}$  έως  $250^{\circ}\text{C}$ , από τον οποίο προκύπτει το ζητούμενο διάγραμμα της τάσης εξόδου ( $V_o$ ) του κυκλώματος ως προς τη θερμοκρασία.

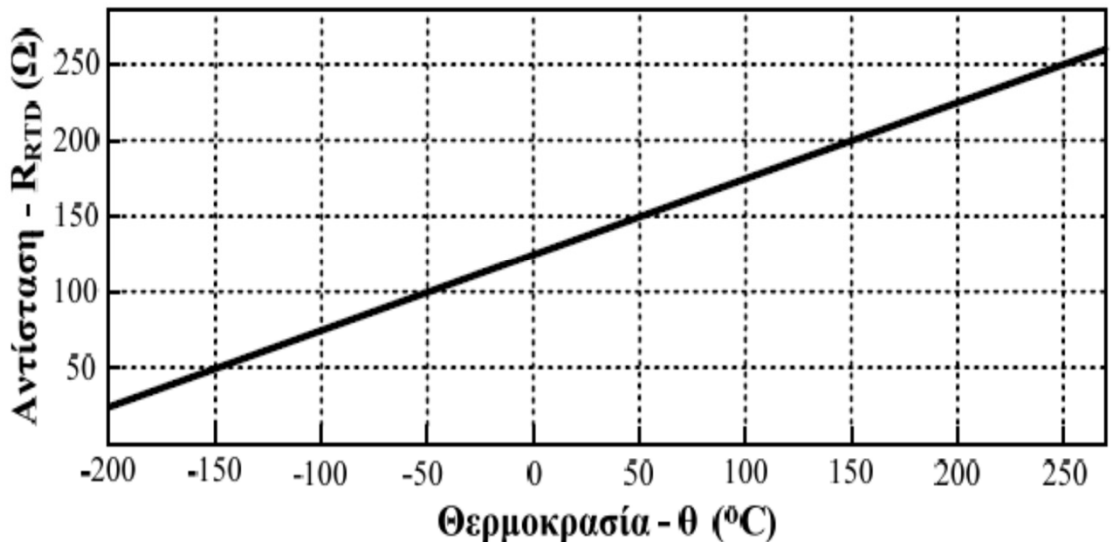
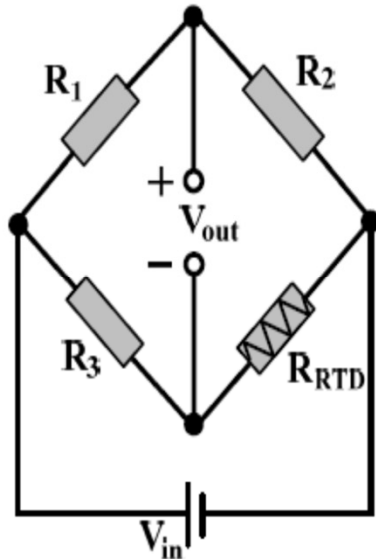
|                                 |      |      |      |      |      |       |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| $\theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 0    | 50   | 100  | 150  | 200  | 250   |
| $V_o$ (V)                       | 3.43 | 5.54 | 7.26 | 8.68 | 9.88 | 10.91 |

# Άσκηση 8η



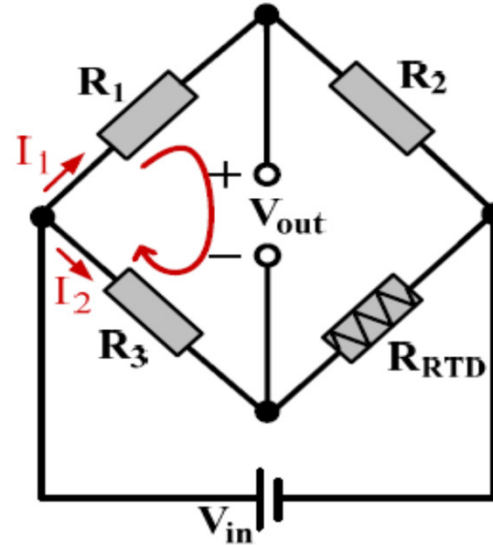
# Άσκηση 9η

Η γέφυρα Wheatstone του παρακάτω σχήματος περιλαμβάνει τρεις αντιστάσεις  $R_1 = 40 \Omega$ ,  $R_2 = 80 \Omega$  και  $R_3 = 100 \Omega$  και έναν αισθητήρα θερμοκρασίας RTD με αντίσταση  $R_{RTD}$ , για τον οποίο το διάγραμμα  $R_{RTD} = f(\theta)$ , δίνεται επίσης στο παρακάτω σχήμα. Να προσδιορίσετε τη θερμοκρασία του αισθητήρα για την οποία η γέφυρα ισορροπεί, καθώς και τη θερμοκρασία του αισθητήρα για την οποία η τάση εξόδου της γέφυρας είναι υποτριπλάσια της τάσης εισόδου της γέφυρας, θεωρώντας ότι η τιμή των αντιστάσεων  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές της θερμοκρασίας.



# Άσκηση 9η

Εφαρμόζουμε τον 2<sup>ο</sup> κανόνα Kirchhoff στον αριστερό βρόχο της γέφυρας:



$$I_1 \cdot R_1 + V_{out} - I_2 \cdot R_3 = 0 \Rightarrow V_{out} = I_2 \cdot R_3 - I_1 \cdot R_1.$$

Υπολογίζουμε στη συνέχεια τα ρεύματα  $I_1$  και  $I_2$ :

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

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

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



# Άσκηση 9η

Ισορροπία της γέφυρας σημαίνει μηδενική τάση εξόδου, συνεπώς:

$$\frac{V_{in}}{R_3 + R_{RTD}} \cdot R_3 - \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} \cdot R_1 = 0 \Rightarrow \frac{V_{in} \cdot R_3}{R_3 + R_{RTD}} = \frac{V_{in} \cdot R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow$$

$$V_{in} \cdot R_1 \cdot (R_3 + R_{RTD}) = V_{in} \cdot R_3 \cdot (R_1 + R_2) \Rightarrow$$

$$V_{in} \cdot R_1 \cdot R_3 + V_{in} \cdot R_1 \cdot R_{RTD} = V_{in} \cdot R_3 \cdot (R_1 + R_2) \Rightarrow V_{in} \cdot R_1 \cdot R_{RTD} = V_{in} \cdot R_3 \cdot (R_1 + R_2) - V_{in} \cdot R_1 \cdot R_3 \Rightarrow$$

$$R_{RTD} = \frac{R_3 \cdot (R_1 + R_2) - R_1 \cdot R_3}{R_1} \Rightarrow R_{RTD} = \frac{R_3 \cdot R_1 + R_3 \cdot R_2 - R_1 \cdot R_3}{R_1} \Rightarrow R_{RTD} = \frac{R_3 \cdot R_2}{R_1} \Rightarrow$$

$$R_{RTD} = \frac{100 \cdot 80}{40} \Omega \Rightarrow R_{RTD} = 200 \Omega .$$

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα  $R_{RTD} = f(\theta)$ , η τιμή της αντίστασης του αισθητήρα θερμοκρασίας RTD είναι 200 Ω στους 150 °C, συνεπώς η γέφυρα ισορροπεί όταν ο αισθητήρας βρίσκεται σε θερμοκρασία 150 °C.

Όταν η τάση εξόδου της γέφυρας είναι υποτριπλάσια της τάσης εισόδου της γέφυρας, ισχύει:

$$\frac{V_{in}}{R_3 + R_{RTD}} \cdot R_3 - \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} \cdot R_1 = \frac{V_{in}}{3} \Rightarrow \frac{R_3}{R_3 + R_{RTD}} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{3} \Rightarrow$$

$$\frac{3 \cdot R_3}{R_3 + R_{RTD}} = 1 + \frac{3 \cdot R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow 3 \cdot R_3 = R_3 + R_{RTD} + \frac{3 \cdot R_1 \cdot (R_3 + R_{RTD})}{R_1 + R_2} \Rightarrow$$

# Άσκηση 9η

$$2 \cdot R_3 - \frac{3 \cdot R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2} = R_{RTD} + \frac{3 \cdot R_1 \cdot R_{RTD}}{R_1 + R_2} \Rightarrow 2 \cdot R_3 - \frac{3 \cdot R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2} = R_{RTD} \cdot \left( 1 + \frac{3 \cdot R_1}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow$$

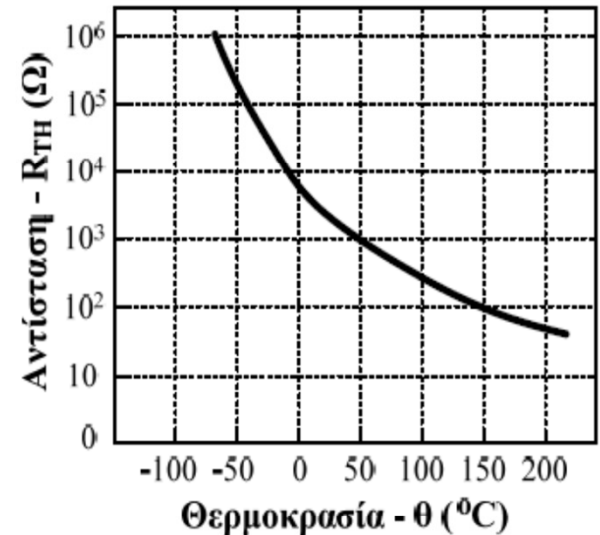
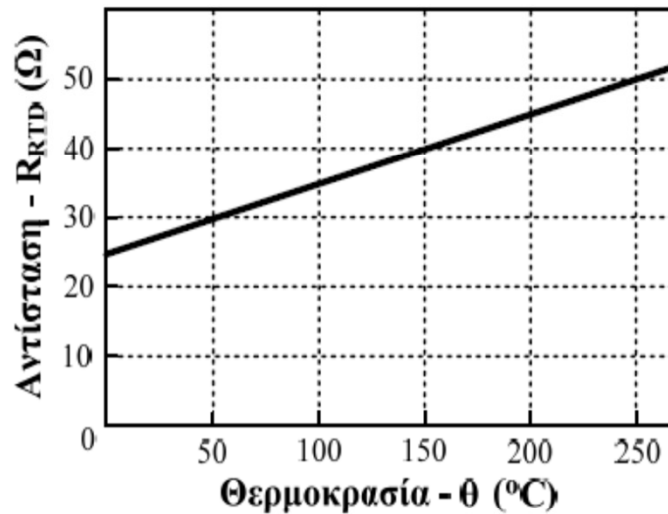
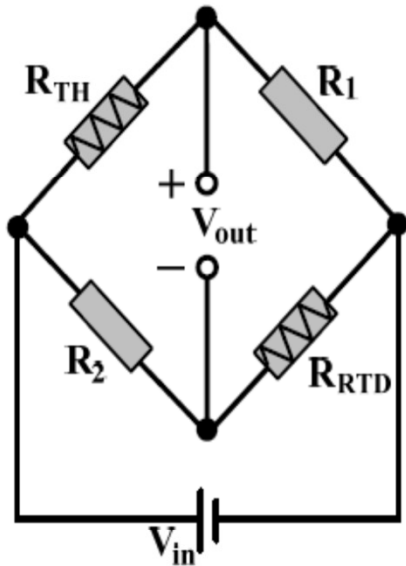
$$R_{RTD} = \frac{2 \cdot R_3 - \frac{3 \cdot R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2}}{1 + \frac{3 \cdot R_1}{R_1 + R_2}} \Rightarrow R_{RTD} = \frac{2 \cdot R_3(R_1 + R_2) - 3 \cdot R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + 3 \cdot R_1} \Rightarrow$$

$$R_{RTD} = \frac{2 \cdot R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_3}{4 \cdot R_1 + R_2} \Rightarrow R_{RTD} = \frac{2 \cdot 80 \cdot 100 - 40 \cdot 100}{4 \cdot 40 + 80} \Omega \Rightarrow R_{RTD} = 50 \Omega .$$

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα  $R_{RTD} = f(\theta)$ , η τιμή της αντίστασης του αισθητήρα θερμοκρασίας RTD είναι 50 Ω στους  $-150 \text{ }^\circ\text{C}$ , συνεπώς η τάση εξόδου της γέφυρας ισούται με το ένα τρίτο της τάσης εισόδου όταν ο αισθητήρας βρίσκεται σε θερμοκρασία  $-150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

# Άσκηση 10η

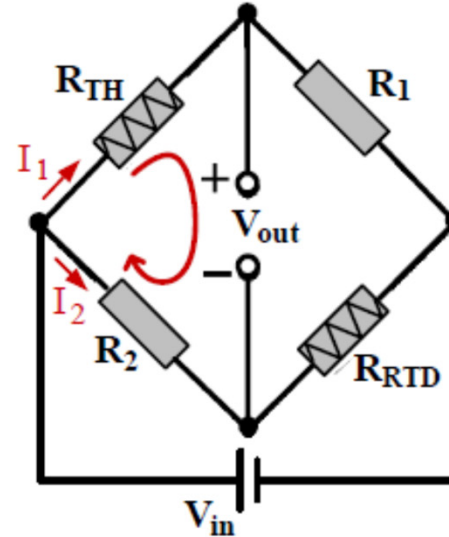
Η γέφυρα Wheatstone του παρακάτω σχήματος περιλαμβάνει δύο αντιστάσεις  $R_1 = 60 \Omega$  και  $R_2 = 80 \Omega$ , έναν αισθητήρα θερμοκρασίας RTD με αντίσταση  $R_{RTD}$  και ένα θερμίστορ NTC με αντίσταση  $R_{TH}$ . Τα διαγράμματα  $R_{RTD} = f(\theta)$  και  $R_{TH} = f(\theta)$ , δίνονται επίσης στο παρακάτω σχήμα. Η τάση εισόδου ( $V_{in}$ ) της γέφυρας είναι 12 V.



- (α) Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου ( $V_{out}$ ) της γέφυρας όταν η θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται ο αισθητήρας θερμοκρασίας RTD και το θερμίστορ είναι  $150^{\circ}\text{C}$ , θεωρώντας ότι η τιμή των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$  δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία.
- (β) Να προσδιορίσετε το θερμοκρασιακό συντελεστή ( $\alpha$ ) του μετάλλου από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αισθητήρας θερμοκρασίας RTD, καθώς και τη σταθερά ( $\beta$ ) του θερμίστορ. Δίνεται ότι:  $\ln 10 = 2.3$ .

# Άσκηση 10η

(α) Εφαρμόζουμε τον 2<sup>ο</sup> 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  $I_2$ :

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

# Άσκηση 10η

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

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

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα  $R_{\text{RTD}} = f(\theta)$ , η τιμή της αντίστασης του αισθητήρα θερμοκρασίας RTD στους  $150^\circ\text{C}$  είναι  $40\ \Omega$ , ενώ στην ίδια θερμοκρασία από το διάγραμμα  $R_{\text{TH}} = f(\theta)$  προκύπτει ότι η αντίσταση του θερμίστορ είναι  $100\ \Omega$ . Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην παραπάνω σχέση, υπολογίζουμε την τάση εξόδου της γέφυρας για τις δύο τιμές θερμοκρασίας του αισθητήρα:

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

(β) Για τον αισθητήρα θερμοκρασίας RTD, ισχύει ότι:

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

όπου:  $R_0$  η αντίσταση ( $\Omega$ ) σε θερμοκρασία  $0^\circ\text{C}$ ,

$R_\theta$  η αντίσταση ( $\Omega$ ) σε θερμοκρασία  $\theta^\circ\text{C}$ ,

$\alpha$  ο θερμοκρασιακός συντελεστής του μετάλλου της αντίστασης.

Για τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού συντελεστή ( $\alpha$ ) του μετάλλου από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αισθητήρας RTD, από το διάγραμμα  $R_{\text{RTD}} = f(\theta)$ , λαμβάνουμε την τιμή της αντίστασης ( $R_0$ ) για τη θερμοκρασία των  $0^\circ\text{C}$ , καθώς και την τιμή της αντίστασης για μία ακόμη θερμοκρασία, όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία των  $150^\circ\text{C}$ . Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση, για τις τιμές της αντίστασης που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες των  $0^\circ\text{C}$  και των  $150^\circ\text{C}$ , υπολογίζουμε το ζητούμενο συντελεστή:

$$R_{150^\circ\text{C}} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot 150^\circ\text{C}) \Rightarrow \alpha \cdot 150^\circ\text{C} = \frac{R_{150^\circ\text{C}}}{R_0} - 1 \Rightarrow \alpha = \frac{\frac{40\ \Omega}{25\ \Omega} - 1}{150^\circ\text{C}} \Rightarrow \alpha = \frac{1.6 - 1}{150^\circ\text{C}} \Rightarrow \alpha = 0.004^\circ\text{C}^{-1}.$$

# Άσκηση 10η

Για το θερμίστορ ισχύει ότι:

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

όπου:  $R_o$  η αντίσταση ( $\Omega$ ) σε θερμοκρασία αναφοράς  $T_0$  °K,

$R_t$  η αντίσταση ( $\Omega$ ) σε θερμοκρασία  $T$  °K,

$\beta$  η σταθερά του θερμίστορ.

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

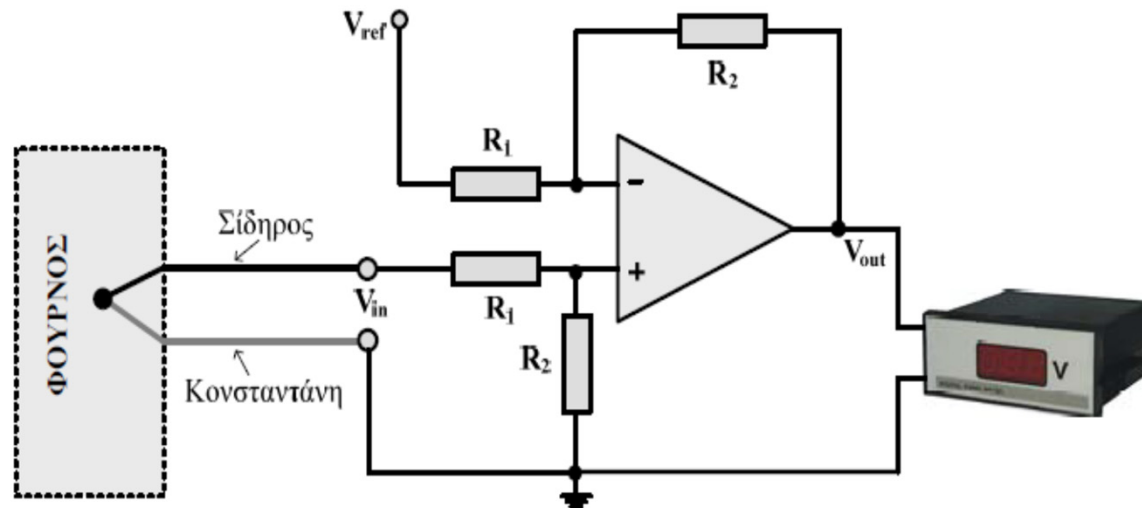
$$\begin{aligned} R_{323^\circ\text{K}} &= R_{423^\circ\text{K}} \cdot e^{\beta \cdot \left( \frac{1}{323^\circ\text{K}} - \frac{1}{423^\circ\text{K}} \right)} \Rightarrow \frac{R_{323^\circ\text{K}}}{R_{423^\circ\text{K}}} = e^{\beta \cdot \left( \frac{1}{323^\circ\text{K}} - \frac{1}{423^\circ\text{K}}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

# Άσκηση 11η

Η διάταξη του παρακάτω σχήματος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας σε ηλεκτρικό φούρνο και περιλαμβάνει θερμοζεύγος σιδήρου και κωνσταντάνης με σταθερά  $C = 50 \mu\text{V} / ^\circ\text{C}$ , ψηφιακό βολτόμετρο και ενισχυτή διαφοράς (με ιδανικό τελεστικό ενισχυτή).

- (α) Να προσδιορίσετε την τάση εξόδου ( $V_{\text{out}}$ ) της διάταξης που απεικονίζεται στο ψηφιακό βολτόμετρο συναρτήσει της θερμοκρασίας του φούρνου.
- (β) Να σχεδιάσετε με ακρίβεια το διάγραμμα της  $V_{\text{out}}$  ως προς τη θερμοκρασία του φούρνου για θερμοκρασίες από  $100^\circ\text{C}$  έως  $800^\circ\text{C}$ .

Δίνεται ότι  $R_1 = 330 \Omega$ ,  $R_2 = 3.3 \text{ k}\Omega$ ,  $V_{\text{ref}} = 49 \text{ mV}$ , καθώς και ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι  $20^\circ\text{C}$ .



# Άσκηση 11η

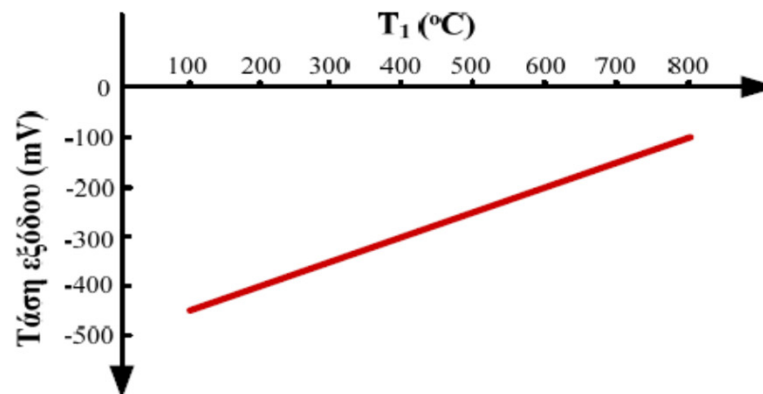
- (α) Η μία επαφή του θερμοζεύγους βρίσκεται στο φούρνο (θερμοκρασία  $T_1$ ), ενώ η άλλη επαφή που συνδέεται στην είσοδο του ενισχυτή διαφοράς βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_2 = 20^\circ\text{C}$ ), συνεπώς:

$$V_{\text{in}} = C \cdot (T_1 - T_2) \Rightarrow V_{\text{in}} = 50 \frac{\mu\text{V}}{^\circ\text{C}} \cdot (T_1 - 20^\circ\text{C}) \Rightarrow V_{\text{in}} = (0.05 \cdot T_1 - 1) \text{ mV}$$

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

$$V_{\text{out}} = \frac{R_2}{R_1} (V_{\text{in}2} - V_{\text{in}1}) \Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{R_2}{R_1} (V_{\text{in}} - V_{\text{ref}}) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{3300\Omega}{330\Omega} [(0.05 \cdot T_1 - 1) - 49 \text{ mV}] \Rightarrow V_{\text{out}} = (0.5 \cdot T_1 - 500) \text{ mV} .$$

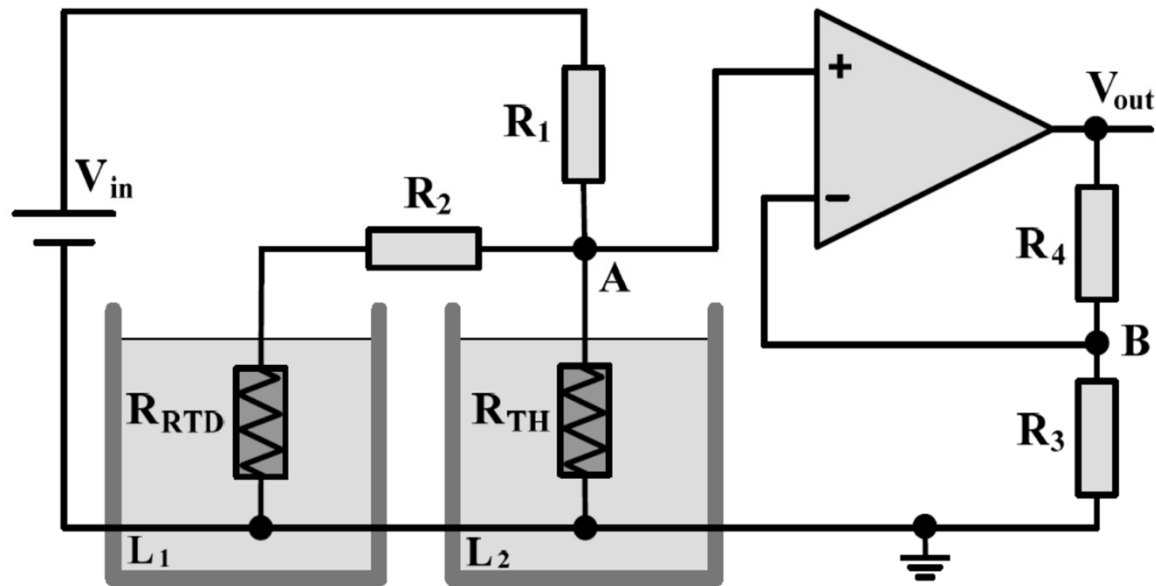
- (β) Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η συνάρτηση της τάσης εξόδου του κυκλώματος με τη θερμοκρασία είναι γραμμική, συνεπώς για το σχεδιασμό της απαιτούμενης ευθείας γραφικής παράστασης, αρκεί ο προσδιορισμός των δύο ακραίων σημείων της. Για  $T_1 = 100^\circ\text{C}$  προκύπτει ότι  $V_{\text{out}} = -450 \text{ mV}$ , ενώ για  $T_1 = 800^\circ\text{C}$  προκύπτει ότι  $V_{\text{out}} = -100 \text{ mV}$ . Συνεπώς, η ζητούμενη γραφική παράσταση έχει ως εξής:





# Άσκηση 12η

Η διάταξη του παρακάτω σχήματος περιλαμβάνει ένα RTD λευκόχρυσου με αντίσταση  $R_{RTD}$ , η οποία μετρήθηκε  $50 \Omega$  στους  $0^\circ\text{C}$  και ένα θερμίστορ τύπου NTC με αντίσταση  $R_{TH}$ , η οποία επίσης μετρήθηκε  $50 \Omega$  στους  $200^\circ\text{C}$ . Οι αισθητήρες αυτοί είναι βυθισμένοι σε λέβητες θέρμανσης νερού  $L_1$  και  $L_2$ , αντίστοιχα. Η διάταξη περιλαμβάνει ακόμη μια πηγή σταθερής τάσης  $V_{in} = 2\text{ V}$ , ιδανικό τελεστικό ενισχυτή και τις αντιστάσεις  $R_1 = 300 \Omega$ ,  $R_2 = 200 \Omega$ ,  $R_3 = 50 \Omega$  και  $R_4 = 450 \Omega$ . Ο θερμοκρασιακός συντελεστής του λευκόχρυσου ( $\alpha$ ) είναι  $0.004^\circ\text{C}^{-1}$  και η σταθερά του θερμίστορ ( $\beta$ ) είναι  $3000^\circ\text{K}$ . Να υπολογίσετε την τάση εξόδου ( $V_{out}$ ) της διάταξης, όταν το νερό του λέβητα  $L_1$  βρίσκεται σε θερμοκρασία  $200^\circ\text{C}$  και το νερό του λέβητα  $L_2$  βρίσκεται σε θερμοκρασία  $100^\circ\text{C}$ . Να θεωρήσετε ότι τα στοιχεία του κυκλώματος, εκτός των δύο αισθητήρων, δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Δίνεται η βάση των φυσικών λογαρίθμων  $e = 2.72$ .



# Άσκηση 12η

Χρησιμοποιούμε τη μέθοδο ανάλυσης των κόμβων του κυκλώματος, δηλαδή εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff στους κόμβους των δύο εισόδων του τελεστικού ενισχυτή. Θα πρέπει να εξισώσουμε το άθροισμα των αγωγιμοτήτων (δηλ. των αντίστροφων αντιστάσεων) που ξεκινούν από τους κόμβους αυτούς, πολλαπλασιασμένο με την τάση τους, με το άθροισμα των γινομένων των αγωγιμοτήτων αυτών με τις τάσεις των κόμβων στους οποίους καταλήγουν.

Έτσι στον κόμβο της μη αντιστρέφουσας εισόδου του τελεστικού ενισχυτή, δηλαδή στον κόμβο A, έχουμε:

$$\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_{RTD}} + \frac{1}{R_{TH}} \right) \cdot V_A = \frac{1}{R_1} \cdot V_{in} + \frac{1}{R_2 + R_{RTD}} \cdot 0 + \frac{1}{R_{TH}} \cdot 0 \Rightarrow V_A = \frac{V_{in}}{1 + \frac{R_1}{R_2 + R_{RTD}} + \frac{R_1}{R_{TH}}} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_A = \frac{V_{in}}{\frac{(R_2 + R_{RTD}) \cdot R_{TH} + R_1 \cdot R_{TH} + R_1 \cdot (R_2 + R_{RTD})}{R_{TH} \cdot (R_2 + R_{RTD})}} \Rightarrow V_A = \frac{R_{TH} \cdot (R_2 + R_{RTD}) \cdot V_{in}}{(R_1 + R_{TH}) \cdot (R_2 + R_{RTD}) + R_1 \cdot R_{TH}}.$$

Προσέξτε τη σειριακή σύνδεση των δύο αντιστάσεων  $R_2$  και  $R_{RTD}$ .

Στον κόμβο της αντιστρέφουσας εισόδου του τελεστικού ενισχυτή, δηλαδή στον κόμβο B, έχουμε:

$$\left( \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) \cdot V_B = \frac{1}{R_3} \cdot 0 + \frac{1}{R_4} \cdot V_{out} \Rightarrow V_{out} = \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \cdot V_B.$$

Λόγω της ιδιότητας αντιγραφής τάσεων στις εισόδους του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή ( $V_A = V_B$ ), από τις παραπάνω σχέσεις καταλήγουμε στο εξής:

$$V_{out} = \left( \frac{R_4}{R_3} + 1 \right) \cdot V_B \Rightarrow V_{out} = \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \cdot \frac{R_{TH} \cdot (R_2 + R_{RTD}) \cdot V_{in}}{(R_1 + R_{TH}) \cdot (R_2 + R_{RTD}) + R_1 \cdot R_{TH}}.$$

# Άσκηση 12η

Αφού προσδιορίσαμε τη σχέση υπολογισμού της τάσης εξόδου της διάταξης, στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογίσουμε την τιμή της, όταν το νερό του λέβητα  $L_1$  βρίσκεται σε θερμοκρασία  $200\text{ }^\circ\text{C}$  και το νερό του λέβητα  $L_2$  βρίσκεται σε θερμοκρασία  $100\text{ }^\circ\text{C}$ .

Για τον αισθητήρα θερμοκρασίας RTD, ισχύει ότι:

$$R_{\text{RTD}} = R_{\text{RTD}0} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta),$$

όπου:  $R_{\text{RTD}0}$  η αντίσταση ( $\Omega$ ) σε θερμοκρασία  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $R_{\text{RTD}}$  η αντίσταση ( $\Omega$ ) σε θερμοκρασία  $\theta\text{ }^\circ\text{C}$  και  $\alpha$  ο θερμοκρασιακός συντελεστής ( $^\circ\text{C}^{-1}$ ) του λευκόχρυσου.

Αφού ζητείται ο υπολογισμός της τάσης εξόδου ( $V_{\text{out}}$ ) όταν το νερό του λέβητα  $L_1$  βρίσκεται σε θερμοκρασία  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , η αντίσταση του RTD στους  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{\text{RTD}} = 50\ \Omega \cdot (1 + 0.004\text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot 200\text{ }^\circ\text{C}) \Rightarrow R_{\text{RTD}} = 90\ \Omega.$$

Για το θερμίστορ ισχύει ότι:

$$R_{\text{TH}} = R_{\text{TH}0} \cdot e^{\beta \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)},$$

όπου:  $R_{\text{TH}0}$  η αντίσταση ( $\Omega$ ) σε θερμοκρασία αναφοράς  $T_0\text{ }^\circ\text{K}$ ,  $R_{\text{TH}}$  η αντίσταση ( $\Omega$ ) σε θερμοκρασία  $T\text{ }^\circ\text{K}$  και  $\beta$  η σταθερά ( $^\circ\text{K}$ ) του θερμίστορ.

# Άσκηση 12η

Επιλέγοντας ως θερμοκρασία αναφοράς εκείνη των  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  (δηλαδή,  $T_0 = 200 + 273 = 473\text{ }^{\circ}\text{K}$ ) στην οποία η αντίσταση του θερμίστορ μετρήθηκε  $50\ \Omega$  και αφού ζητείται ο υπολογισμός της τάσης εξόδου ( $V_{\text{out}}$ ) όταν το νερό του λέβητα  $L_2$  βρίσκεται σε θερμοκρασία  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (δηλαδή,  $T = 100 + 273 = 373\text{ }^{\circ}\text{K}$ ), η αντίσταση του θερμίστορ στους  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{\text{TH}} = 50\ \Omega \cdot e^{3000\text{ }^{\circ}\text{K} \cdot \left( \frac{1}{373\text{ }^{\circ}\text{K}} - \frac{1}{473\text{ }^{\circ}\text{K}} \right)} \Rightarrow R_{\text{TH}} = 50 \cdot e^{3 \cdot 10^3 \cdot (2.68 \cdot 10^{-3} - 2.11 \cdot 10^{-3})}\ \Omega \Rightarrow$$
$$\Rightarrow R_{\text{TH}} = 50 \cdot e^{1.71}\ \Omega \Rightarrow R_{\text{TH}} = 50 \cdot 2.72^{1.71}\ \Omega \Rightarrow R_{\text{TH}} = 50 \cdot 5.53\ \Omega \Rightarrow R_{\text{TH}} = 276.5\ \Omega.$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (3) τα δεδομένα της άσκησης και τις τιμές των αντιστάσεων του RTD και του θερμίστορ που προέκυψαν, υπολογίζεται εύκολα η ζητούμενη τάση εξόδου του κυκλώματος:

$$V_{\text{out}} = \left( 1 + \frac{450}{50} \right) \cdot \frac{276.5 \cdot (200 + 90) \cdot 2}{(300 + 276.5) \cdot (200 + 90) + 300 \cdot 276.5}\ \text{V} \Rightarrow V_{\text{out}} = 10 \cdot \frac{160370}{250135}\ \text{V} \Rightarrow V_{\text{out}} = 6.4\ \text{V}.$$



Τέλος 5ης ενότητας