

# ΓΕΦΥΡΑ WHEATSTONE, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟ

Εμμανουήλ Παπαναστασίου

### Μαθησιακοί στόχοι

Μετά την ανάγνωση αυτών των σημειώσεων και την εκτέλεση αυτής της εργαστηριακής άσκησης, ο φοιτητής θα πρέπει να είναι σε θέση να...

- Περιγράφει τη διάταξη ενός κυκλώματος γέφυρας Wheatstone
- Περιγράφει πώς χρησιμοποιούνται οι μεταλλάκτες στις μετρητικές συσκευές
- Ονομάζει τις διαφορές ανάμεσα στα μηχανικά και στα ηλεκτρονικά θερμόμετρα
- Προσδιορίζει την καμπύλη απόκρισης ενός θερμίστορ με τη θερμοκρασία
- Βαθμονομεί και να χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρονικό θερμόμετρο

### A. Θεωρία

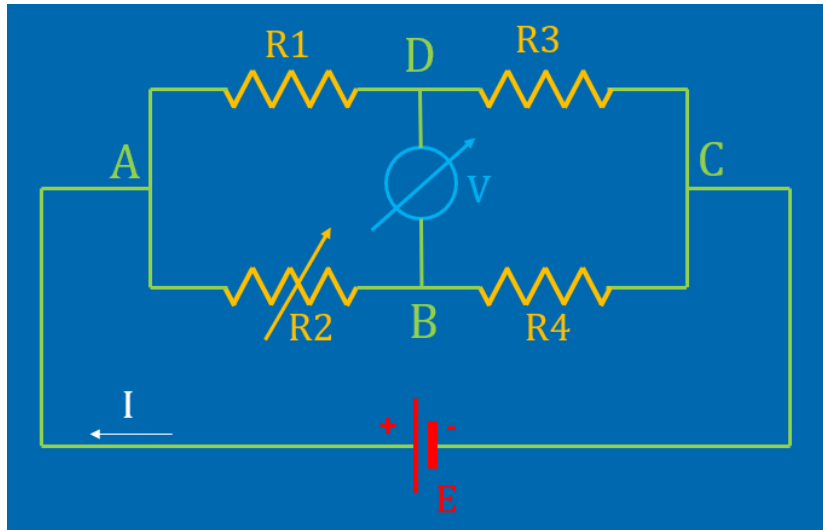
#### A.1. Γέφυρα Wheatstone

Η γέφυρα Wheatstone ανήκει σε μια σειρά ηλεκτρικών κυκλωμάτων «διάταξης γέφυρας», που χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μέτρηση ηλεκτρονικών μεγεθών (ωμική αντίσταση, χωρητικότητα, αυτεπαγωγή κ.λπ.). Η πιο σημαντική όμως χρήση τους είναι για τη μέτρηση μη ηλεκτρονικών μεγεθών όπως θερμοκρασίας, πίεσης κ.λπ. χρησιμοποιώντας κατάλληλους **ευαισθητοποιητές ή μεταλλάκτες**. Στην πρώτη περίπτωση, η γέφυρα Wheatstone λειτουργεί σε **ισορροπία**, ενώ στη δεύτερη περίπτωση λειτουργεί σε **εκτροπή**. Οι ευαισθητοποιητές είναι ειδικές συσκευές που ουσιαστικά μετατρέπουν την ενέργεια από τη μία μορφή σε μία άλλη και χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μετατροπή μιας μη ηλεκτρονικής ποσότητας σε μια άλλη ποσότητα που μπορεί να μετρηθεί με ηλεκτρονική μέθοδο.

Μια **γέφυρα Wheatstone που λειτουργεί σε ισορροπία** χρησιμοποιείται συνήθως για τη μέτρηση μιας άγνωστης αντίστασης με μεγάλη ακρίβεια. Το κύκλωμα της γέφυρας Wheatstone φαίνεται στο σχήμα 2.1.

Ο κατασκευαστής μιας γέφυρας Wheatstone επιλέγει τις αντιστάσεις  $R_3$  και  $R_4$  ώστε να έχουν ακριβώς την ίδια τιμή. Η αντίσταση  $R_2$  είναι μια μεταβλητή αντίσταση, το μέγεθος της οποίας μπορεί να ρυθμιστεί από τον χρήστη και η αντίσταση  $R_1$  είναι η άγνωστη αντίσταση που πρέπει να μετρηθεί. Το κύκλωμα τροφοδοτείται από μία μπαταρία (E). Το βολτόμετρο (ή ένα γαλβανόμετρο) που συνδέεται μεταξύ των σημείων B και D χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ισορροπίας της γέφυρας, η οποία επιτυγχάνεται εάν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων B και D ( $V_{BD}$ ) είναι ίση με το μηδέν, ή, ισοδύναμα, εάν δεν ρέει ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του κλάδου BD. Έστω  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  και  $I_4$  οι εντάσεις των ρευμάτων που διαρρέουν τις αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  και  $R_4$ , αντίστοιχα. Όταν η γέφυρα είναι σε ισορροπία, το δυναμικό  $V_B$  είναι ίσο με το δυναμικό  $V_D$ , επομένως η διαφορά δυναμικού μεταξύ D και C ( $V_{DC}$ ) θα είναι ίση με τη διαφορά δυναμικού μεταξύ B και C ( $V_{BC}$ ):

$$V_{DC} = V_{BC} \Rightarrow I_3 R_3 = I_4 R_4$$



Σχήμα 2.1. Κύκλωμα γέφυρας Wheatstone.

και δεδομένου ότι η  $R_3$  είναι ίση με την  $R_4$ , προκύπτει ότι:

$$I_3 = I_4$$

Με το ίδιο σκεπτικό, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων A και D ( $V_{AD}$ ) θα είναι ίση με τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων A και B ( $V_{AB}$ ) επομένως:

$$V_{AD} = V_{AB} \Rightarrow I_1 R_1 = I_2 R_2$$

και δεδομένου ότι ο κλάδος BD δεν διαρρέεται από ρεύμα, δηλαδή:

$$I_1 = I_3 = I_4 = I_2$$

προκύπτει ότι:

$$R_1 = R_2$$

δηλαδή η άγνωστη αντίσταση  $R_1$  πρέπει να είναι ίση με τη συγκεκριμένη τιμή της μεταβλητής αντίστασης  $R_2$  που έφερε σε ισορροπία τη γέφυρα Wheatstone.

Στην πράξη, για να μετρήσετε μια άγνωστη αντίσταση χρησιμοποιώντας μια γέφυρα Wheatstone, συνδέετε την άγνωστη αντίσταση με την είσοδο της γέφυρας (σημεία A και D) και μεταβάλετε την τιμή της μεταβλητής αντίστασης  $R_2$  έως ότου το βολτόμετρο μεταξύ B και D να δείξει μηδέν. Τότε η γέφυρα ισορροπεί και η άγνωστη αντίσταση είναι ίση με την  $R_2$ .

Η λειτουργία μιας **γέφυρας Wheatstone σε εκτροπή** βασίζεται στο γεγονός ότι οποιαδήποτε μεταβολή στην αντίσταση οποιουδήποτε από τους κλάδους της γέφυρας αντιστοιχεί σε μια μεταβολή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των σημείων B και D (η έξοδος της γέφυρας). Μετρώντας τη διαφορά δυναμικού  $V_{BD}$  μπορεί κανείς να αντλήσει πληροφορίες σχετικά με τη μεταβολή της αντίστασης που την έχει προκαλέσει. Με

άλλα λόγια, χρησιμοποιώντας μια γέφυρα Wheatstone σε εκτροπή, μπορεί κανείς να **μετατρέψει τις μεταβολές της αντίστασης σε μεταβολές της διαφοράς δυναμικού.**

Η πιο σημαντική εφαρμογή της γέφυρας Wheatstone σε εκτροπή είναι όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με έναν μεταλλάκτη. Θυμάστε ότι οι μεταλλάκτες είναι συσκευές που μετατρέπουν μη ηλεκτρονικές ποσότητες σε άλλες ποσότητες που μπορούν να μετρηθούν με ηλεκτρονικά μέσα. Για παράδειγμα, ένας μεταλλάκτης θερμοκρασίας είναι μια συσκευή που ανταποκρίνεται στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μεταβάλλοντας την αντίστασή της, ένας μεταλλάκτης πίεσης μεταβάλλει την αντίστασή του ανταποκρινόμενος στις μεταβολές της πίεσης. Ο μεταλλάκτης συνδέεται συνήθως με την είσοδο της γέφυρας και οι αντιστάσεις των τριών άλλων κλάδων της γέφυρας διατηρούνται σταθερές. Όπως θα εξηγηθεί στις επόμενες ενότητες, ένας μεταλλάκτης θερμοκρασίας συνδεδεμένος σε γέφυρα Wheatstone μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός ηλεκτρονικού θερμόμετρου: οι μεταβολές της θερμοκρασίας προκαλούν μεταβολές στην αντίσταση του μεταλλάκτη, οι οποίες με τη σειρά τους προκαλούν μεταβολές στην τάση εξόδου της γέφυρας Wheatstone. Μετά από μια κατάλληλη διαδικασία βαθμονόμησης, η μέτρηση της τάσης εξόδου «μεταφράζεται» σε μέτρηση της θερμοκρασίας.

#### A.2. Αναλογικά και ηλεκτρονικά θερμόμετρα

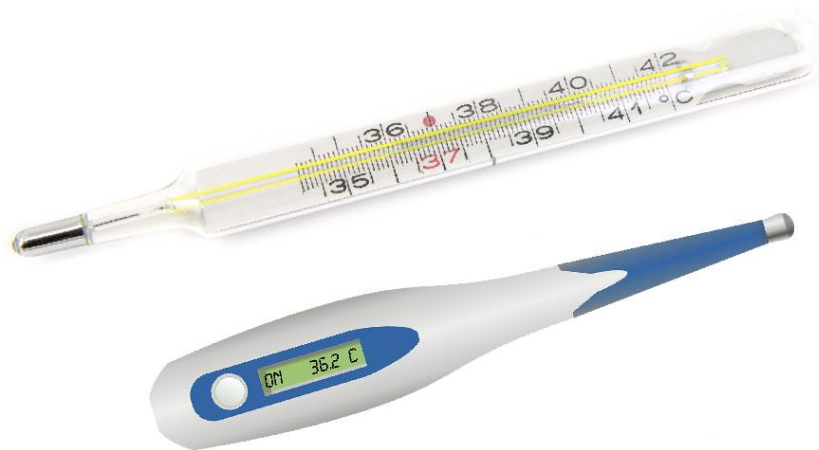
Πολλά σώματα μεταβάλλουν τις ιδιότητές τους όταν αυξάνει η θερμοκρασία τους: μεταλλικές ράβδοι μεγαλώνουν σε μήκος, υγρά αυξάνουν τον όγκο τους, αέρια που περιέχονται σε ένα κλειστό δοχείο αυξάνουν την πίεση που ασκούν στα τοιχώματα του δοχείου, χάλκινα σύρματα αυξάνουν την αντίστασή τους κ.λπ. Οποιαδήποτε από αυτές τις ιδιότητες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έμμεση μέτρηση της θερμοκρασίας, μετά από μια κατάλληλη διαδικασία βαθμονόμησης.

Ο πιο συνηθισμένος τύπος αναλογικού θερμόμετρου για ιατρική χρήση είναι το θερμόμετρο τύπου «υγρό μέσα σε γυαλί», το οποίο βασίζεται στο φαινόμενο της θερμικής διαστολής και στο γεγονός ότι τα υγρά (όπως ο υδράργυρος ή το οινόπνευμα) διαστέλλονται περισσότερο σε σχέση με τα γυάλινα δοχεία που τα περιέχουν. Τα παλιά ιατρικά θερμόμετρα χρησιμοποιούσαν τον υδράργυρο ως διογκούμενο υγρό, αλλά το 2013 η χρήση τους απαγορεύτηκε στην Ευρωπαϊκή Ένωση, λόγω της τοξικότητας του υδραργύρου και από τότε αντικαθίστανται γρήγορα από θερμόμετρα οινόπνευματος και από ηλεκτρονικά θερμόμετρα.

Στις μέρες μας, αν κάποιος έχει ιατρικό θερμόμετρο στο σπίτι, πιθανότατα θα είναι ένα ηλεκτρονικό (ψηφιακό) θερμόμετρο. Η θερμοευαίσθητη άκρη του περιέχει ένα **θερμίστορ**, μια ηλεκτρονική συσκευή που αλλάζει την αντίστασή της με την αλλαγή της θερμοκρασίας. Τα ηλεκτρονικά θερμόμετρα έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα αναλογικά:

- έχουν ταχύτερο χρόνο απόκρισης, της τάξης των 30 s (σε σύγκριση με σχεδόν 3 λεπτά του αναλογικού)
- η ανάγνωσή τους είναι ευκολότερη για τον παρατηρητή
- η ένδειξη της θερμοκρασίας δεν παραμένει μετά το τέλος της μέτρησης (δεν απαιτούν «κατέβασμα» με απότομες κινήσεις πριν από την επόμενη μέτρηση).

Ο γρήγορος χρόνος απόκρισης τα καθιστά ιδανικά για ιατρική χρήση, ειδικά όταν απαιτείται συνεχής παρακολούθηση και καταγραφή της θερμοκρασίας των ασθενών (π.χ. στα Επείγοντα ή σε Μονάδες Εντατικής Θεραπείας).



Εικόνα 2.2 Αναλογικό και ηλεκτρονικό θερμόμετρο.

Ένα ηλεκτρονικό θερμόμετρο αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- έναν μεταλλάκτη θερμοκρασίας (συνήθως ένα θερμίστορ)
- ένα κύκλωμα γέφυρας Wheatstone
- έναν ενισχυτή
- έναν μετρητή με οθόνη για την παρουσίαση της μέτρησης

Ο μεταλλάκτης θερμοκρασίας τοποθετείται σε επαφή με το αντικείμενο του οποίου τη θερμοκρασία θέλουμε να μετρήσουμε και συνδέεται με την είσοδο της γέφυρας Wheatstone, η οποία λειτουργεί σε εκτροπή. Οι μεταβολές στη θερμοκρασία του μεταλλάκτη προκαλούν μεταβολές στην αντίστασή του, οι οποίες με τη σειρά τους προκαλούν μεταβολές στην τάση εξόδου της γέφυρας Wheatstone. Η τάση εξόδου της γέφυρας αφού ενισχυθεί με έναν ενισχυτή, συνδέεται με τον μετρητή, η οθόνη του οποίου έχει βαθμονομηθεί σε μονάδες θερμοκρασίας. Θα κατανοήσετε καλύτερα τη διαδικασία βαθμονόμησης κατά τη διάρκεια του πειράματος.

### A.3. Θερμίστορ

Τα θερμίστορ (θερμοευαίσθητες αντιστάσεις) είναι μεταλλάκτες-ημιαγωγοί, συνήθως κατασκευασμένοι από διάφορα οξειδία μετάλλων, που χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μέτρηση θερμοκρασιών. Είναι ηλεκτρονικές συσκευές που ανταποκρίνονται στις μεταβολές της θερμοκρασίας τους αλλάζοντας την αντίστασή τους. Σε αντίθεση με τους μεταλλικούς αγωγούς (όπως ο χαλκός) των οποίων η αντίσταση αυξάνεται ελαφρώς με την αύξηση της θερμοκρασίας (έχουν όπως λέμε θετικό θερμικό συντελεστή αντίστασης), στους ημιαγωγούς η αντίστασή τους μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας (έχουν αρνητικό θερμικό συντελεστή αντίστασης).

Στους αγωγούς, η σχέση μεταξύ της αντίστασης και της θερμοκρασίας τους είναι γραμμική της μορφής:

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

όπου  $R_{\theta}$  και  $R_0$  είναι οι αντιστάσεις τους στους  $\theta$  °C και στους 0°C αντίστοιχα, και  $\alpha$  είναι ο θετικός θερμικός συντελεστής αντίστασης.

Στα θερμίστορ, από την άλλη μεριά, η αντίστοιχη σχέση δεν είναι γραμμική, αλλά εκθετική και έχει τη μορφή:

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

όπου  $R_T$  και  $R_0$  είναι οι αντιστάσεις του θερμίστορ στις απόλυτες θερμοκρασίες  $T$  and  $T_0$  αντίστοιχα, και  $\beta$  είναι ο θερμικός συντελεστής. Η θερμοκρασία αναφοράς  $T_0$  λαμβάνεται συνήθως ίση με 298 Kelvin (25 °C). Ωστόσο, εάν μας ενδιαφέρει να χρησιμοποιήσουμε το θερμίστορ για να μετρήσουμε θερμοκρασίες μέσα σε ένα στενό εύρος θερμοκρασιών (για παράδειγμα, για ιατρική χρήση, ενδιαφερόμαστε για τη μέτρηση θερμοκρασιών μεταξύ 25 °C και 45 °C) μπορούμε να προσεγγίσουμε την παραπάνω εκθετική συμπεριφορά με γραμμική (κάθε μικρό τμήμα μιας εκθετικής καμπύλης μπορεί να προσεγγιστεί, χωρίς σημαντικά σφάλματα, από μια γραμμική καμπύλη). Θα μπορούσαμε λοιπόν να θεωρήσουμε την ίδια γραμμική σχέση με πριν:

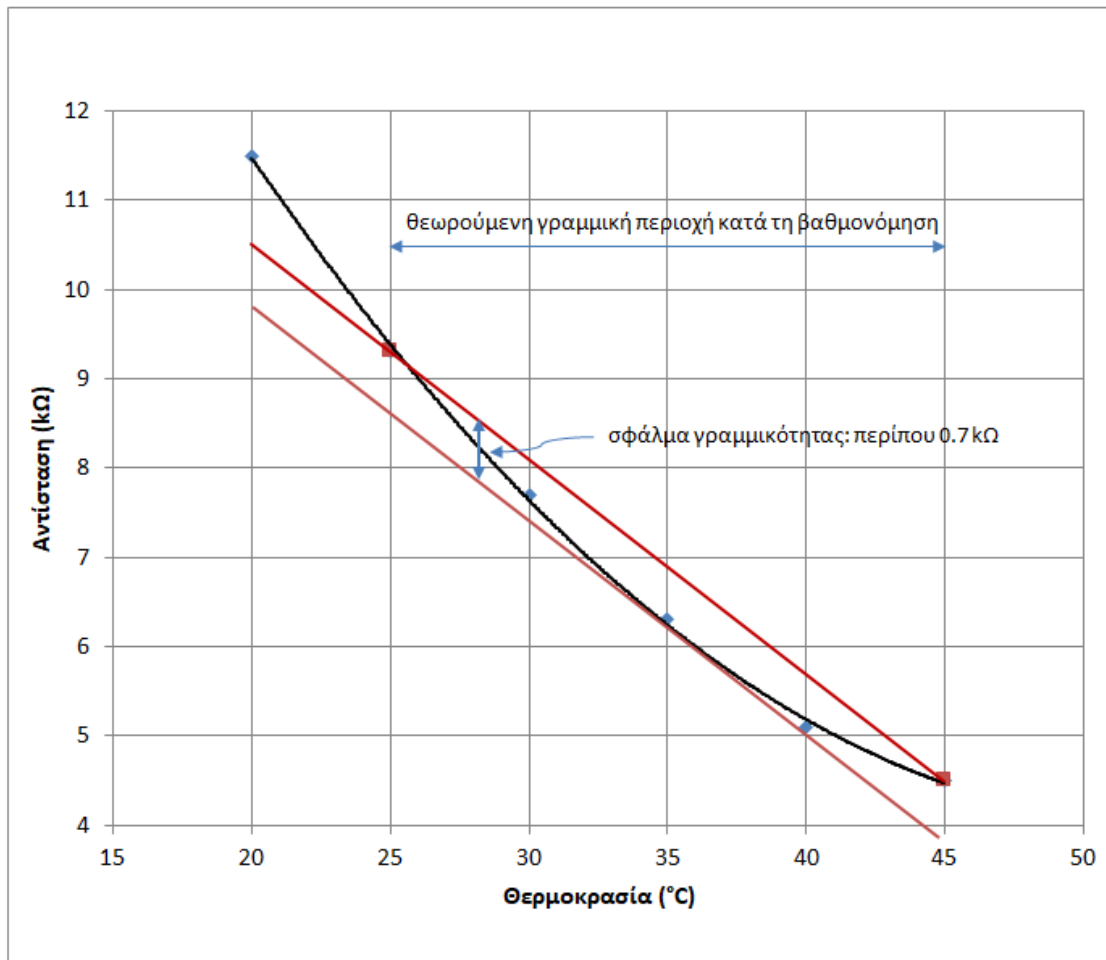
$$R_\theta = R_0(1 + \alpha\theta)$$

αλλά πρέπει να έχουμε κατά νου ότι ο θερμικός συντελεστής αντίστασης,  $\alpha$ , είναι πλέον αρνητικός. Στα θερμίστορ, μια τυπική τιμή για το  $\alpha$  σε θερμοκρασίες δωματίου είναι περίπου -0,02 ανά °C. Στην εικόνα 2.3 φαίνονται θερμίστορ διαφόρων τύπων και σχημάτων.

Κάθε φορά που προσεγγίζουμε μια εκθετική (ή οποιαδήποτε άλλη) καμπύλη με μια ευθεία γραμμή, εισάγουμε ένα σφάλμα γραμμικότητας. Μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε το σφάλμα γραμμικότητας γραφικά, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη μέθοδο (σχήμα 2.4): πρώτα, προσδιορίζουμε το εύρος τιμών μέσα στο οποίο θέλουμε να προσεγγίσουμε την εκθετική μας καμπύλη με μια γραμμική (στο παράδειγμά μας, είναι μεταξύ 25 °C και 45 °C). Ενώνουμε με μια ευθεία τα αντίστοιχα σημεία στην καμπύλη μας και στη συνέχεια μετακινούμε αυτή τη γραμμή παράλληλα με τον εαυτό της, μέχρι να γίνει εφαπτομένη της εκθετικής μας καμπύλης. Η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των δύο γραμμών είναι το σφάλμα γραμμικότητας.



Εικόνα 2.3 Αριστερά: τυπικά είδη εμπορικών θερμίστορ. Δεξιά: το θερμίστορ που θα χρησιμοποιήσετε στο πείραμα, με το μεταλλικό του περίβλημα και το καλώδιο.



Σχήμα 2.4 Γραφικός προσδιορισμός του σφάλματος γραμμικότητας.

## B. Πειραματικό μέρος

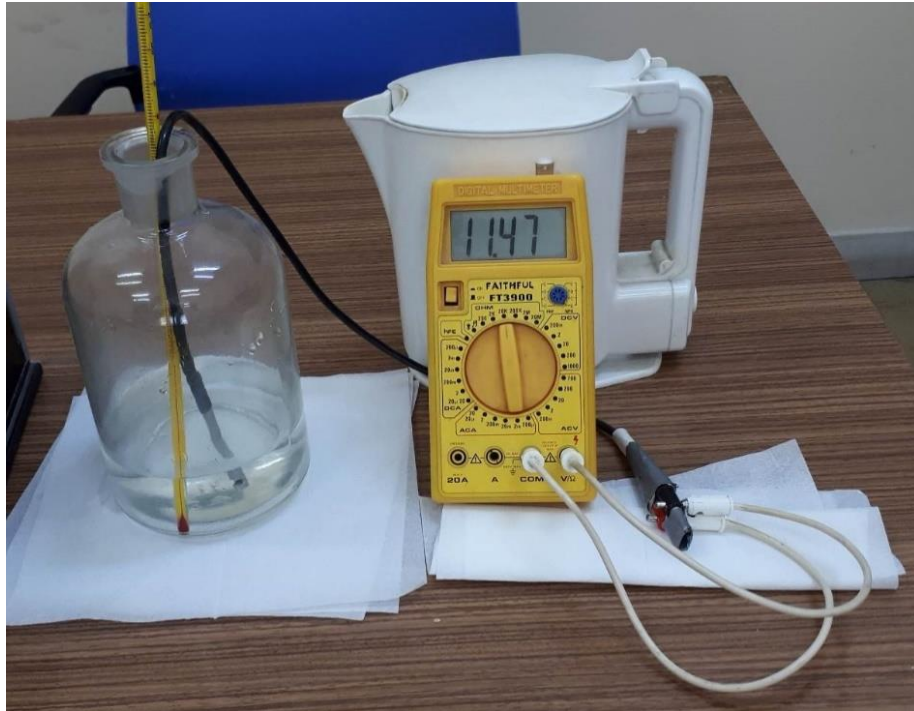
### B.1. Προσδιορισμός της απόκρισης του θερμίστορ με τη θερμοκρασία

Θα χρησιμοποιήσετε τα ακόλουθα στοιχεία:

- ένα θερμίστορ
- ένα ψηφιακό πολύμετρο, που θα χρησιμοποιηθεί ως ωμόμετρο
- ένα αναλογικό θερμομέτρο αναφοράς
- ένα γυάλινο δοχείο
- ένα βραστήρα για να ζεστάνετε νερό

**B.1.1** Χρησιμοποιώντας δύο καλώδια συνδέστε το θερμίστορ στις δύο τέρμα δεξιά υποδοχές του πολύμετρου (επισημαίνονται ως "COM" και "V/Ω"). Επιλέξτε με τον κεντρικό διαλογέα τη θέση με την ένδειξη "20K" από την ομάδα "OHM". Ενεργοποιήστε το πολύμετρο.

**B.1.2** Γεμίστε το γυάλινο δοχείο με νερό βρύσης, περίπου στο 1/5 της χωρητικότητάς του.



Εικόνα 2.5 Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της απόκρισης του θερμίστορ.

- B.1.3** Βυθίστε προσεκτικά το θερμόμετρο αναφοράς και το θερμίστορ στο γυάλινο δοχείο. Προσπαθήστε να τα τοποθετήσετε κοντά το ένα στο άλλο.
- B.1.4** Περιμένετε περίπου 30 δευτερόλεπτα και σημειώστε την τιμή θερμοκρασίας από το θερμόμετρο αναφοράς και την τιμή αντίστασης από το πολύμετρο.
- B.1.5** Αφαιρέστε προσεκτικά και τα δύο θερμόμετρα από το γυάλινο δοχείο. Προσθέστε **λίγο (όχι πολύ)** ζεστό νερό από το βραστήρα στο γυάλινο δοχείο. Ανακατέψτε προσεκτικά. Βυθίστε ξανά τα δύο θερμόμετρα στο γυάλινο δοχείο και λάβετε ένα δεύτερο ζευγάρι τιμών, όπως στο βήμα B.1.4. Επαναλάβετε τη διαδικασία μέχρι να λάβετε τουλάχιστον έξι ζευγάρια τιμών μέσα στο εύρος θερμοκρασιών μεταξύ 25 °C και 45 °C. Συμπληρώστε κατάλληλα τις τιμές που μετρήσατε στα κελιά του Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1

A/A Μέτρησης	$\theta$ (°C)	R (k $\Omega$ )
1		
2		
3		
4		
5		
6		

- B.1.6** Σε χαρτί μιλιμετρέ, κάντε το γράφημα της απόκρισης του θερμίστορ, βάζοντας στον άξονα x τις τιμές της θερμοκρασίας (σε °C) και στον άξονα y τις τιμές της αντίστασης (σε k $\Omega$ ). Προσπαθήστε να σχεδιάσετε μια κατά το δυνατόν ομαλή καμπύλη, που να διέρχεται από τα πειραματικά σας σημεία.

- B.1.7** Επιλέξτε το εύρος τιμών εντός του οποίου θα θεωρήσετε ότι η απόκριση του θερμίστορ είναι περίπου γραμμική (συνήθως θα είναι μεταξύ περίπου 25 °C και 45 °C, εξαρτάται με τις πειραματικές σας τιμές).
- B.1.8** Προσδιορίστε γραφικά το σφάλμα γραμμικότητας.
- B.1.9** Χρησιμοποιώντας δύο διαδοχικά πειραματικά σημεία και θεωρώντας γραμμική τη σχέση μεταξύ της αντίστασης και της θερμοκρασίας του θερμίστορ, βρείτε το θερμικό συντελεστή αντίστασης ( $\alpha$ ) του θερμίστορ και την αντίστασή του στους 0 °C ( $R_0$ ).
- B.1.10** Αποσυνδέστε το θερμίστορ από το πολύμετρο.

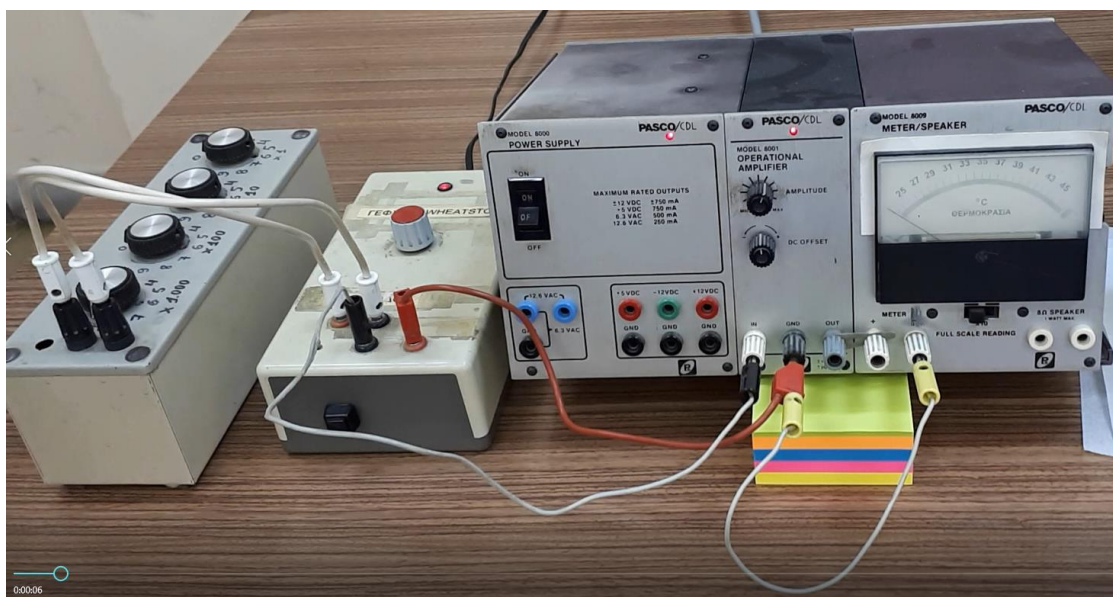
## B.2. Βαθμονόμηση του ηλεκτρονικού θερμόμετρου

Θα κατασκευάσετε το κύκλωμα της εικόνας 2.6, χρησιμοποιώντας τα παρακάτω στοιχεία:

- ένα κιβώτιο αντιστάσεων
- ένα κύκλωμα γέφυρας Wheatstone
- έναν τελεστικό ενισχυτή
- ένα όργανο ανάγνωσης
- ένα θερμίστορ (στο τελευταίο βήμα)

Η γέφυρα Wheatstone, ο τελεστικός ενισχυτής και το όργανο ανάγνωσης θα είναι ήδη συνδεδεμένα μεταξύ τους. Για ευκολία, η διαδικασία βαθμονόμησης θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας το κιβώτιο αντιστάσεων και όχι το ίδιο το θερμίστορ. Σύντομα θα καταλάβετε γιατί.

- B.2.1** Συνδέστε με δύο καλώδια το κιβώτιο αντιστάσεων στην είσοδο της γέφυρας Wheatstone. Ενεργοποιήστε τη γέφυρα, με τον μαύρο διακόπτη στην μπροστινή πλευρά της γέφυρας. Η κόκκινη λυχνία πρέπει να ανάψει.



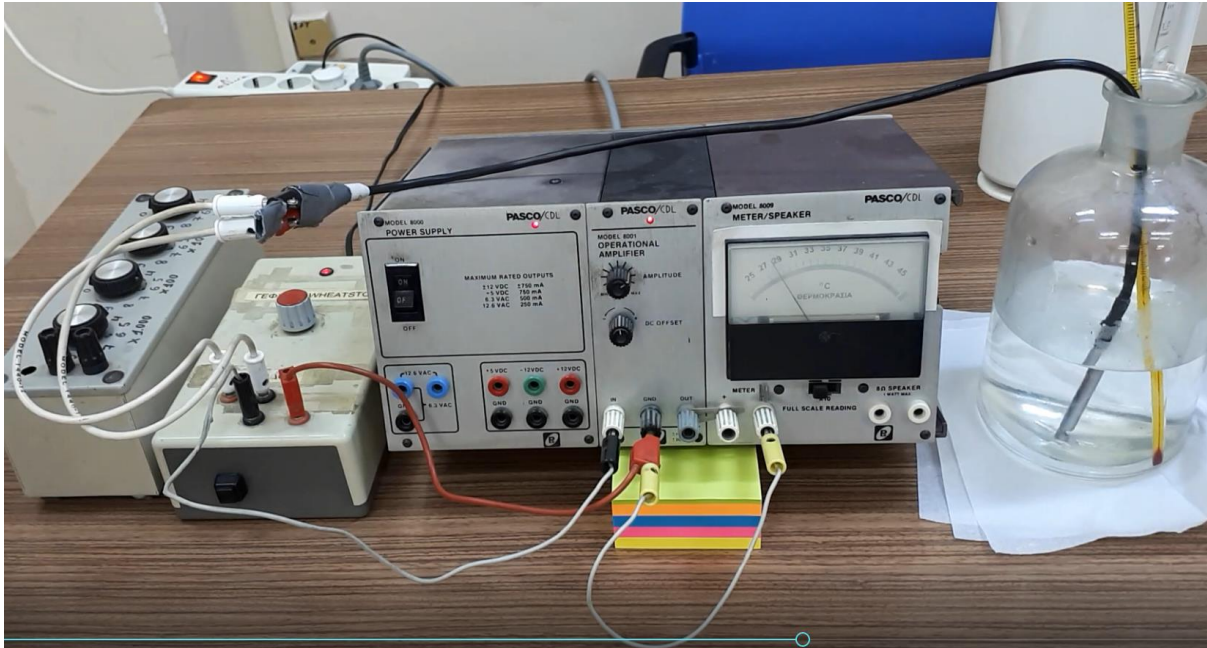
Εικόνα 2.6 Πειραματική διάταξη για τη βαθμονόμηση του ηλεκτρονικού θερμόμετρου.



- B.2.2** Από το διάγραμμα απόκρισης του θερμίστορ που έχετε κατασκευάσει στο βήμα B.1.6 (ή τις τιμές του Πίνακα 2.1) επιλέξτε δύο θερμοκρασίες, μία λίγο υψηλότερη από 25 °C και μία λίγο χαμηλότερη από 45 °C. Αυτές οι θερμοκρασίες θα ορίσουν το εύρος της βαθμονόμησής μας. Έστω TL η χαμηλή και TH υψηλή θερμοκρασία.
- B.2.3** Από το διάγραμμα (ή τον Πίνακα 2.1) βρείτε τις αντίστοιχες τιμές της αντίστασης του θερμίστορ σε αυτές τις δύο ακραίες θερμοκρασίες,  $R_{TL}$  and  $R_{TH}$ .
- B.2.4** Βάλτε στο κιβώτιο αντιστάσεων την τιμή  $R_{TL}$ . Ενεργοποιήστε τον ενισχυτή.
- B.2.5** Ρυθμίστε κατάλληλα το γκρι/κόκκινο ποτενσιόμετρο της γέφυρας για να επιτύχετε ένδειξη θερμοκρασίας ίση με TL στην οθόνη. Μην ανησυχήσετε εάν τερματίσει το ποτενσιόμετρο χωρίς να έχετε φτάσει στην TL.
- B.2.6** Βάλτε στο κιβώτιο αντιστάσεων την τιμή  $R_{TH}$ .
- B.2.7** Ρυθμίστε **απαλά** το μαύρο ποτενσιόμετρο με την ένδειξη "AMPLITUDE" του ενισχυτή, για να επιτύχετε ένδειξη θερμοκρασίας ίση με TH στην οθόνη.
- B.2.8** Επαναλάβετε τα βήματα 8.2.4 έως 8.2.7 όσες φορές χρειάζεται (συνήθως χρειάζονται 2-3 φορές), έως ότου καταφέρετε να έχετε τις σωστές ενδείξεις θερμοκρασίας TL και TH με τις αντίστοιχες αντιστάσεις  $R_{TL}$  και  $R_{TH}$ , χωρίς να χρειάζεται να ρυθμίζετε πλέον τα δύο ποτενσιόμετρα.
- B.2.9** Το ηλεκτρονικό θερμόμετρο είναι τώρα βαθμονομημένο, εντός του εύρους θερμοκρασιών μεταξύ TL και TH.
- B.2.10** Για να επαληθεύσετε τη βαθμονόμηση, βάλτε στο κιβώτιο αντιστάσεων μια οποιαδήποτε τιμή αντίστασης  $R_x$  μεταξύ  $R_{TL}$  και  $R_{TH}$  και, χρησιμοποιώντας το διάγραμμα απόκρισης θερμίστορ, επιβεβαιώστε ότι η ένδειξη θερμοκρασίας στην οθόνη ταιριάζει με την αντίστοιχη θερμοκρασία  $T_x$  στο διάγραμμα.
- B.2.11** Αποσυνδέστε το κιβώτιο αντιστάσεων από τη γέφυρα Wheatstone και συνδέστε το θερμίστορ στη θέση του.
- B.2.12** Βυθίστε το θερμίστορ στο γυάλινο δοχείο, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.7 και διαβάστε τη θερμοκρασία του νερού απευθείας από την οθόνη. Βυθίστε επίσης το θερμόμετρο αναφοράς, περιμένετε λίγο για να σταθεροποιηθεί η ένδειξή του και διαβάστε ξανά τη θερμοκρασία του νερού. Συμπίπτουν οι δύο ενδείξεις;
- B.2.13** Αφαιρέστε τα δύο θερμόμετρα, προσθέστε λίγο νερό βρύσης στο γυάλινο δοχείο (για να μειώσετε ελαφρώς τη θερμοκρασία του νερού), βυθίστε τα ξανά στο νερό και λάβετε άλλες δύο μετρήσεις. Αυτή τη φορά προσέξτε και πόσος χρόνος απαιτείται για να σταθεροποιηθούν οι δύο ενδείξεις.
- B.2.14** Γιατί, νομίζετε, ότι υπάρχει διαφορά στο χρόνο απόκρισης μεταξύ των δύο θερμόμετρων;

Τώρα είναι ώρα να εξηγήσουμε γιατί πραγματοποιήσαμε τη βαθμονόμηση χρησιμοποιώντας το κιβώτιο αντιστάσεων και όχι απευθείας το θερμίστορ. Θα μπορούσαμε να πραγματοποιήσουμε τη βαθμονόμηση με το θερμίστορ συνδεδεμένο με τη γέφυρα Wheatstone, αν είχαμε ετοιμάσει δύο υδατόλουτρα, ένα, ας πούμε, στους 25 °C και ένα άλλο στους 45 °C. Θα μπορούσαμε κατόπιν να βυθίσουμε το θερμίστορ στο πρώτο υδατόλουτρο και να ακολουθήσουμε τη διαδικασία που περιγράφεται στο βήμα B.2.5, στη συνέχεια να το βυθίσουμε στο δεύτερο και να ακολουθήσουμε τη διαδικασία που περιγράφεται στο βήμα B.2.7 και τέλος να επαναλάβουμε αυτά τα βήματα 2-3

φορές, μέχρι να ολοκληρωθεί η βαθμονόμηση. Στην πραγματικότητα, αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο οι κατασκευαστές ηλεκτρονικών θερμόμετρων βαθμονομούν τα θερμόμετρα που λειτουργούν με θερμίστορ. Για τους σκοπούς του πειράματός μας όμως, και επειδή δεν είχαμε διαθέσιμα υδατόλουτρα ακριβείας, ήταν πολύ πιο βολικό να χρησιμοποιήσουμε το κιβώτιο αντιστάσεων το οποίο είχαμε ρυθμίσει στις τιμές αντίστασης που αντιστοιχούσαν στις συγκεκριμένη χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.



Εικόνα 2.7. Το βαθμονομημένο πλέον ηλεκτρονικό θερμόμετρο σε χρήση.

---

Η εικόνα 2.2 δημιουργήθηκε με συνδυασμό των: “Thermometer”, με άδεια Public Domain license - Creative Commons 1.0 Universal (CCo 1.0) Public Domain Dedication και “Thermometer Digital Temperature”, εικόνα Pixabay διαθέσιμη για δωρεάν λήψη, με άδεια Pixabay.

<https://www.publicdomainpictures.net/en/view-image.php?image=3459&picture=thermometer>

<https://pixabay.com/vectors/thermometer-digital-temperature-36852/>