

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Μελετάται η συμπεριφορά ενός μετατροπέα με θετικό θερμοκρασιακό συντελεστή. Σαν συσκευή μέτρησης της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας αντίστασης πλατίνας.

ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Περιγραφή	Ποσότητα
Μονάδα οργάνων TK2941A	1
Ράβδος θερμότητας	1
Θερμόμετρο	1
Δοχείο βαθμονόμησης θερμοκρασίας	1
Μετατροπέας – αντίσταση πλατίνας με ελεύθερους αγωγούς. Κίτρινη θήκη.	1
Βάση μετατροπέα	1
Κουτί δεκαδικών αντιστάσεων από 1 Ω ως 100 kΩ	
Τροφοδοτικό, $\pm 15V$ dc	1
Ψηφιακό πολύμετρο (DMM)	1

ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Ανάψτε τη ράβδο θερμότητας και αφήστε τη να ξεσταθεί ώσπου να φτάσει σε μια σταθερή θερμοκρασία. Αυτό θα πάρει περίπου 45 λεπτά.

ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

- 21.1 Σταθερά Απωλειών
- 21.2 Χρήση του Θερμόμετρου Αντίστασης Πλατίνας
- 21.3 Ένα Θερμόμετρο Άμεσης Ένδειξης

ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

- Να μετρήσετε τη σταθερά απωλειών για το μετατροπέα αντίστασης πλατίνας.
- Να φτιάξετε ένα θερμόμετρο άμεσης ένδειξης της θερμοκρασίας βασισμένο σε έναν μετατροπέα αντίστασης πλατίνας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλά αγώγιμα υλικά έχουν θετικό θερμοκρασικό συντελεστή αντίστασης, δηλαδή, η αντίστασή τους αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η ποσοστιαία μεταβολή της αντίστασης ανά °C είναι, συνήθως, πολύ μικρότερη από ότι είναι για τα υλικά με αρνητικό συντελεστή, όπως το θερμίστορ που μελετήσαμε στην Εργασία 20. Τυπικά, ένα καθαρό μέταλλο μπορεί να έχει ένα θετικό συντελεστή της τάξης του 0.4%/°C ενώ ο ελάχιστος συντελεστής για ένα συνηθισμένο θερμίστορ στους 100°C μπορεί να είναι -2.5%/°C, περίπου. Επομένως, ένα θερμόμετρο βασισμένο σε ένα καθαρό μέταλλο θα είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητο.

Γιατί, τότε, να μπορούμε στον κόπο να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο;

Η απάντηση είναι ότι, ειδικά για ορισμένα υλικά, η σχέση μεταξύ της ειδικής αντίστασης και της θερμοκρασίας είναι με μεγάλη ακρίβεια καθορισμένη, παραμένει δε σε μεγάλο βαθμό σταθερή από το ένα δείγμα μετάλλου στο άλλο και για μεγάλες χρονικές περιόδους. Επομένως, τα θερμόμετρα αντίστασης (resistance thermometers), όπως αποκαλούνται, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν δευτερεύοντα ή ακόμη και σαν πρωτεύοντα πρότυπα θερμοκρασίας¹.

Η πλατίνα (platinum) είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο μέταλλο επειδή δεν διαβρώνεται, ούτε γενικά αλλοιώνεται με το χρόνο και η σχέση της αντίστασής της με τη θερμοκρασία είναι σχεδόν γραμμική σε μια μικρή κλίμακα θερμοκρασιών και με μεγάλη ακρίβεια παραβολική στη κλίμακα θετικών τιμών θερμοκρασίας από του 0°C ως τους 630°C.

Σ'αυτήν την κλίμακα ισχύει η εξής εξίσωση:

$$R_{\theta} = R_0(1 + A \cdot \theta + B \cdot \theta^2)$$

όπου R_0 = η αντίσταση στους 0°C και
 R_{θ} = η αντίσταση σε θερμοκρασία θ °C.

A και B είναι σταθερές με τυπικές τιμές:

$$A \approx 0.00398$$

$$B \approx -0.588 \times 10^{-6}.$$

Για θερμοκρασίες κάτω από 0°C, εμφανίζεται ένας τρίτος όρος, εξαρτώμενος από το θ^3 .

Θέτοντας στην παραπάνω εξίσωση $\theta = 100^\circ\text{C}$ έχουμε:

$$R_{100} = R_0(1 + 0.398 - 0.588 \times 10^{-2})$$

Βλέπουμε, δηλαδή, ότι, ακόμα και σ'αυτήν τη θερμοκρασία, ο όρος θ^2 συνεισφέρει περίπου 0.006 συγκριτικά με το 0.4 του όρου θ . Εφόσον στον 1°C αντιστοιχεί μεταβολή αντίστασης 0.004, η μεταβολή 0.006 αντιστοιχεί 1.5°C, αρκετά σημαντικό μέγεθος που δεν μπορούμε να αγνοήσουμε σε μια μέτρηση ακριβείας.

¹ Fluke Corporation, "Calibration: Philosophy in Practice", ISBN: 0-9638650-0-5.

Αυτο-Θέρμανση (Self-Heating)

Είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίσουμε ότι το ρεύμα ενεργοποίησης του θερμομέτρου αντίστασης πλατίνας, δηλαδή, το ρεύμα που χρησιμοποιούμε για να μετρήσουμε την αντίσταση R_θ , θα είναι αρκετά μικρό ώστε να μην έχουμε απώλειες σε θερμότητα στην πλατίνα ικανές να προκαλέσουν σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας της (αυτο-θέρμανση της πλατίνας).

Αν κάνατε την Εργασία 20, θα θυμάστε ότι η σταθερά θερμικών απωλειών (dissipation constant) είναι η ισχύς που χρειάζεται να καταναλωθεί για να προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C και ότι η σταθερά εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα του μέσου που περιβάλλει την αντίσταση.

Ας υποθέσουμε ότι χρειάζεται ισχύς P (σε mW) για να προκαλέσει αύξηση 1°C , τότε, αν η προσδοκώμενη ακρίβεια της μέτρησης είναι, ας πούμε, $\pm 0.2^\circ\text{C}$, η ισχύς που καταναλώνεται στην αντίσταση της πλατίνας από το ρεύμα μέτρησης πρέπει να είναι μικρότερη από $0.2 \cdot P$ mW.

Θα ξεκινήσουμε μετρώντας τη σταθερά θερμικών απωλειών του θερμομέτρου πλατίνας.

ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 21.1**Σταθερά Θερμικών Απωλειών**

Πραγματοποιήστε τη συνδεσμολογία του κυκλώματος που δείχνεται στην Εικ. 5.21.1 και χρησιμοποιήστε το διακόπτη του ποτενσιόμετρου πάνω στον Τελεστικό Ενισχυτή (Operational Amplifier) για να δώσετε 2Vdc στα άκρα της γέφυρας. Στηρίξτε την άκρη της αντίστασης πλατίνας (platinum resistance) σε ένα σημείο χωρίς ρεύματα αέρα στη θερμοκρασία του δωματίου και ισορροπήστε προσεκτικά τη γέφυρα χρησιμοποιώντας στον ενισχυτή ενίσχυση 100. Εικ. 5.21.1

Πάνω στη Γέφυρα Wheatstone βάλτε τους διακόπτες SW1 και SW5 'in' και τους υπόλοιπους διακόπτες 'out'.

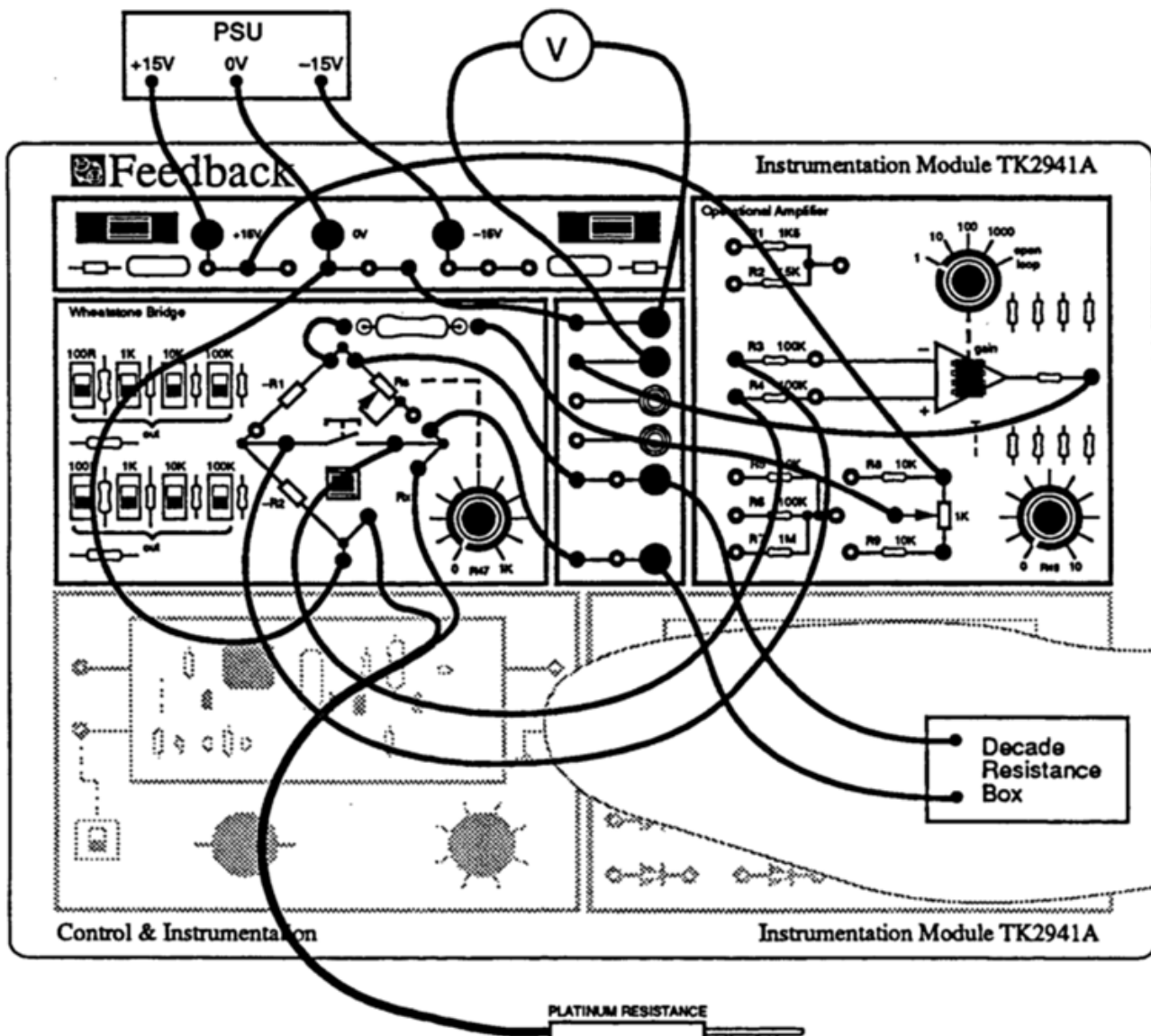
Αν το δεκαδικό κιβώτιο αντιστάσεων (decade resistance box) δεν έχει βήματα μικρότερα του $1\ \Omega$, εκτιμήστε μόνοι σας πόσα περίπου δέκατα του Ω χρειάζονται για να ισορροπήσει η γέφυρα. Παρατηρήστε την ένδειξη που προκαλείται στο όργανο από μεταβολή $1\ \Omega$ και συγκρίνετέ τη με την ένδειξη που εκτιμάτε ότι χρειάζεται για την ισορροπία.

Τώρα, αυξήστε την τροφοδοσία της γέφυρας στα 10 Vdc. Θα πρέπει παρατηρήσετε αύξηση της R_x και θα πρέπει να επανισορροπήσετε τη γέφυρα αμέσως μόλις φτάσει σε σταθερές συνθήκες (σε περίπου 10-15 δευτερόλεπτα).

Πρόβλημα 21.1 Υπολογίστε την τάση στα άκρα της αντίστασης πλατίνας, R_x , για κάθε τιμή της τάσης τροφοδοσίας και, έτσι, βρείτε την ισχύ σε mW που καταναλώνεται σε κάθε περίπτωση. Ονομάστε τις τιμές αυτές ισχύος P_2 και P_{10} . Επίσης, υπολογίστε την επι τοις εκατό μεταβολή της R_x , δηλαδή,

$$\frac{R_{10} - R_2}{R_2} \times 100 = Y\% \text{ (ας πούμε)}$$

Τώρα, αν υποθέσουμε ότι μια μεταβολή 0.4% στην R_x σημαίνει μεταβολή 1°C στη θερμοκρασία, μπορούμε να πούμε ότι μια αύξηση της ισχύος $P_{10} - P_2$ προκαλεί $Y\%$ μεταβολή της αντίστασης και αυτό αντιστοιχεί σε αύξηση της θερμοκρασίας κατά $\frac{Y}{0.4}^\circ\text{C}$.



Εικόνα 5.21.1

Επομένως, η σταθερά απωλειών είναι:

$$\frac{(P_{10} - P_2)0.4}{Y} \text{ mW}/^\circ\text{C}$$

Υπολογίστε την τιμή αυτή από τα αποτελέσματά σας. Όταν από τον υπολογισμό βρείτε ένα νούμερο, χρησιμοποιήστε το για να αποφασίσετε ποιά είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση ενεργοποίησης, που

μπορείτε να εφαρμόσετε στη γέφυρα της Εικ. 5.21.1, ώστε να μην προκαλέσετε σφάλμα αυτο-θέρμανσης μεγαλύτερα από 0.2°C .

Τώρα, βάλτε την τάση της γέφυρας σ' αυτήν την τιμή που βρήκατε.

ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 21.2

Χρήση του Θερμομέτρου Αντίστασης Πλατίνας

Ο ρόλος ενός θερμομέτρου είναι, φυσικά, να διαβάξει τη θερμοκρασία. Στην περίπτωση του θερμομέτρου πλατίνας επιθυμούμε να μετρήσουμε την αντίστασή του και μετά να πούμε – «αυτή αντιστοιχεί σε $x^{\circ}\text{C}$ ».

Ερώτηση 21.1 Μπορείτε να το κάνετε αυτό εύκολα από την εξίσωση παραπάνω; Αν όχι, τι διαδικασία θα μπορούσατε να ακολουθήσετε;

Η απάντησή σας θα πρέπει να είναι ότι δεν είναι εύκολο να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση αυτή άμεσα αφού εκφράζει την αντίσταση R σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας θ παρά σαν το αντίστροφο, δηλαδή, τη θερμοκρασία θ σαν συνάρτηση της αντίστασης R . Μια δυνατή λύση είναι να λύσουμε την εξίσωση σαν δευτέρου βαθμού στο θ για να δώσει τη θ σαν συνάρτηση των R_{θ} , R_0 , A και B . Αν και αυτό μπορεί να γίνει, οι υπολογισμοί είναι βαρετοί αν απαιτούμε ακριβή αποτελέσματα.

Εναλλακτικά, θα μπορούσαμε να φτιάξουμε μια λεπτομερή γραφική παράσταση του R_{θ} για διάφορες τιμές του θ και να τη χρησιμοποιήσουμε για να βρίσκουμε τη θερμοκρασία θ για τις διάφορες μετρούμενες τιμές της αντίστασης R_{θ} . Αυτή η λύση πάλι είναι δυνατή αλλά, λόγω των γραφικών σφαλμάτων, δεν αξιοποιεί πλήρως την ακρίβεια, που ενυπάρχει, στο θερμόμετρο πλατίνας.

Η μέθοδος, που χρησιμοποιείται στην πράξη, είναι η παρακάτω:

Γράφουμε μια εξίσωση για τη θερμοκρασία των 100°C και μια για $\theta^{\circ}\text{C}$.

$$R_{100} = R_0(1 + 100 \cdot A + 10^4 \cdot B)$$

οπότε,

$$R_{100} - R_0 = R_0(100 \cdot A + 10^4 \cdot B)$$

Όμοια,

$$R_{\theta} - R_0 = R_0(\theta \cdot A + \theta^2 \cdot B)$$

Διαιρώντας τις εξισώσεις και πολλαπλασιάζοντας επί 100, έχουμε:

$$100 \frac{R_{\theta} - R_0}{R_{100} - R_0} = \frac{\theta \cdot A + \theta^2 \cdot B}{A + 100 \cdot B}$$

Το αριστερό μέλος αυτής της εξίσωσης ονομάζεται **‘θερμοκρασία πλατίνας’** (‘platinum temperature’) και συμβολίζεται με θ_P .

Δηλαδή,

$$\theta_P = 100 \frac{R_\theta - R_0}{R_{100} - R_0}$$

Στη συνέχεια, αναπτύσσοντας αυτήν τη σχέση, παίρνουμε:

$$\begin{aligned} \theta - \theta_P &= \theta - 100 \frac{R_\theta - R_0}{R_{100} - R_0} \\ &= \frac{\theta(A + 100 \cdot B) - \theta \cdot A + \theta^2 \cdot B}{A + 100 \cdot B} \\ &= \frac{\theta \cdot A + \theta \cdot 100 \cdot B - \theta \cdot A + \theta^2 \cdot B}{A + 100 \cdot B} \end{aligned}$$

Δηλαδή,

$$\theta - \theta_P = \frac{\theta(100 \cdot B + \theta \cdot B)}{A + 100 \cdot B}$$

Για να απλοποιήσουμε τους υπολογισμούς, εισάγουμε μια εξίσωση, που αποκαλούμε **‘εξίσωση διαφοράς’** (‘difference equation’), χρησιμοποιώντας μια σταθερά D, όπου $D = \frac{-10^4 B}{A + 100 \cdot B}$.

Αντικαθιστώντας $D = \frac{-10^4 B}{A + 100 \cdot B}$ στο δεξί μέλος της προηγούμενης εξίσωσης, παίρνουμε:

$$\theta - \theta_P = \frac{D \cdot \theta}{100} \left(\frac{\theta}{100} - 1 \right)$$

Από τις τιμές για τις παραμέτρους A και B, που δόθηκαν στην εισαγωγή αυτής της άσκησης, $D = 1.5$.

Η εξίσωση διαφοράς χρησιμοποιείται με διαδοχικές προσεγγίσεις ώστε να δώσει ακριβή υπολογισμό της θ για δεδομένη τιμή θ_P . Την πρώτη προσέγγιση συνήθως την παίρνουμε από έναν πίνακα, ένα μέρος του οποίου δίνεται εδώ.

θ	0	20	40	60	80	100	120	140
θ_P	0	19.76	39.64	59.64	79.76	100	120.4	140.9

Η πρώτη προσέγγιση αντικαθίσταται στην εξίσωση για το D για να δώσει μια δεύτερη προσέγγιση, η οποία πάλι αντικαθίσταται στην εξίσωση για το D, κ.ο.κ., ως ότου να μην αλλάζει περαιτέρω η τιμή.

Παράδειγμα Υποθέστε $R_0 = 100 \Omega$

$$\begin{aligned} \text{Τότε, } R_{100} &= R_0(1 + 100 \cdot A + 10^4 \cdot B) \\ &= 100(1 + 0.398 - 0.00588) \\ &= 139.2 \Omega. \end{aligned}$$

Αν R_θ είναι, ας πούμε, 105.5 Ω, πόση είναι η θ ;

Πρώτα, υπολογίζεται η θ_p σαν:

$$\begin{aligned}\theta_p &= 100 \frac{R_\theta - R_0}{R_{100} - R_0} \\ &= 100 \frac{105.5 - 100}{139.2 - 100} \\ &= 14.03^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Από τον πίνακα παραπάνω, με γραμμική παρεμβολή (απλή μέθοδο των τριών), μπορούμε να πάρουμε

$$\frac{19.76 \times 14.03}{20} = 13.86^\circ\text{C}$$

Βάζοντας την τιμή αυτή στην εξίσωση, παίρνουμε:

$$\begin{aligned}\theta - \theta_p &= \frac{1.5 \cdot \theta}{100} \left(\frac{\theta}{100} - 1 \right) \\ &= \frac{1.5 \times 13.86}{100} (0.1386 - 1) \\ &= -0.179\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Συνεπώς,} \quad \theta &= \theta_p - 0.179 \\ &= 14.03 - 0.179 \\ &= 13.851^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

Η τιμή αυτή είναι πολύ κοντά στην πρώτη προσέγγιση αλλά μπορούμε να δοκιμάσουμε έναν ακόμα υπολογισμό

$$\begin{aligned}\theta - \theta_p &= \frac{1.5 \times 13.851}{100} (0.13851 - 1) \\ &= -0.17899\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Συνεπώς,} \quad \theta &= \theta_p - 0.17899 \\ &= 14.03 - 0.17899 \\ &= 13.851^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

Προφανώς, αυτή είναι η μεγαλύτερη ακρίβεια που μπορούμε να πάρουμε καθώς ήδη έχουμε δύο δεκαδικά ψηφία ίδια ενώ στο φαινόμενο της αυτοθέρμανσης από μόνο του μπορεί να προκαλέσει σφάλμα ως και 0.2°C.

Καθώς το θερμόμετρο πλατίνας είναι από τη φύση του ακριβές, θα είναι άστοχο να προσπαθήσουμε να το βαθμονομήσουμε ως προς ένα υδραργυρικό θερμόμετρο που είναι μικρότερης ακρίβειας. Συνεπώς, σε αυτή την πρακτική άσκηση, απλά θα επιβεβαιώσουμε τη σχέση μεταξύ R_{100} και R_0 και, μετά, θα χρησιμοποιήσουμε το θερμόμετρο για να κάνουμε ακριβείς μετρήσεις μερικών τυχαίων θερμοκρασιών.

Με τη γέφυρα συνδεδεμένη όπως στην Εικ. 5.21.1 και τροφοδοτούμενη με την τάση, που υπολογίσατε ότι θα έδινε ένα σφάλμα αυτοθέρμανσης μικρότερο από 0.2°C , τοποθετήστε το θερμόμετρο σε τηκόμενο πάγο (αν είναι εφικτό) και ισορροπήστε τη γέφυρα προσεκτικά για να βρείτε την R_0 .

Σημείωση Ίσως χρειαστείτε να αυξήσετε το κέρδος του ενισχυτή στο 1000 για να έχετε αρκετή ευαισθησία. Κένετε γραμμική παρεμβολή (απλή μέθοδο των τριών) στην ένδειξη του οργάνου για να πάρετε την τιμή R_0 στο πλησιέστερο 0.1Ω .

Τώρα, τοποθετήστε το δοχείο νερού στο θερμό άκρο της ράβδου θέρμανσης και περιμένετε ως ότου το νερό αρχίσει να βράζει. Εισάγετε το θερμόμετρο στο βραστό νερό και ισορροπήστε τη γέφυρα για να βρείτε την R_{100} .

Πρόβλημα 21.2 Υπολογίστε με ακρίβεια 3 ή 4 δεκαδικών ψηφίων το λόγο $\frac{R_{100}}{R_0}$

Ερώτηση 21.2 Συμφωνεί ο λόγος με την τιμή που δόθηκε στη συζήτηση παραπάνω;

Τώρα, βάλτε το θερμόμετρο στη βάση του μετατροπέα και τοποθετήστε το σε ένα αυθαίρετο σημείο στη ράβδο θέρμανσης, ξανα-ισορροπώντας τη γέφυρα, όταν σταθεροποιηθεί, για να δώσει την R_0 .

Ερώτηση 21.3 Εκτελέστε τη μέθοδο των διαδοχικών προσεγγίσεων, που εξηγήθηκε στο παράδειγμα παραπάνω, για να βρείτε τη θερμοκρασία σ' αυτό το σημείο της ράβδου.

Επαναλάβετε το πείραμα τοποθετώντας τη θερμόμετρο στο πιο καυτό άκρο της ράβδου – μ' αυτόν τον τρόπο μπορείτε να μετρήσετε με ακρίβεια την υψηλότερη θερμοκρασία (αυτή είναι πάνω από το σημείο βρασμού του νερού).

Μετρήστε τη θερμοκρασία του σώματός σας, χρησιμοποιώντας το όπως θα κάνατε με ένα ιατρικό θερμόμετρο.

ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 21.3

Ένα Θερμόμετρο Άμεσης Ένδειξης

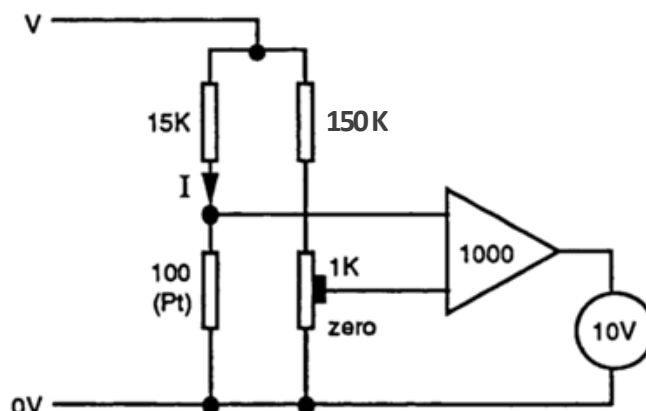
Επειδή η απόκριση του θερμομέτρου πλατίνας είναι σχεδόν γραμμική, μπορούμε αρκετά εύκολα να φτιάξουμε ένα καλό θερμόμετρο άμεσης ένδειξης της θερμοκρασίας.

Αν ένα αρκούντως σταθερό ρεύμα περάσει μέσα από το θερμόμετρο πλατίνας, οι μεταβολές της αντίστασής του μπορούν να μετατραπούν γραμμικά σε μεταβολές τάσης, τις οποίες ενισχύουμε και εμφανίζουμε σε ένα βολτόμετρο.

Το στοιχείο που μετράει (δηλαδή η αντίσταση πλατίνας), όπως θα έχετε ήδη βρει στις προηγούμενες πρακτικές ασκήσεις, μεταβάλλεται τυπικά από 100Ω στους 0°C στα 138.5Ω στους 100°C .

Αν θέλουμε η κλίμακα $0 - 100^{\circ}\text{C}$ να αντιστοιχεί σε τάση εξόδου $0 - 10\text{mV}$, έτσι ώστε με ενίσχυση 1000 να παίρνουμε έξοδο $0 - 10\text{V}$, η τάση τροφοδοσίας (V), που απαιτείται, είναι περίπου 4V (γιατί;)

Η μεγάλη σε σειρά αντίσταση ($15\text{k}\Omega$) θα κρατήσει το ρεύμα σχεδόν σταθερό (περίπου $(4\text{V})/(15000\Omega + 100\Omega) \approx 0.26\text{mA}$).



Εικόνα 5.21.2

Αν αυτή η ίδια τάση χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει το ποτενσιόμετρο που κάνει τη βαθμονόμηση, οποιεσδήποτε μικρές μεταβολές στη V θα έχουν μικρή επίπτωση. Το ποτενσιόμετρο αντισταθμίζει την παραμένουσα τάση που προκαλείται από το ρεύμα I που ρέει στα 100Ω στους 0°C .

Φτιάξτε αυτό το κύκλωμα, όπως δείχνεται στην Εικ. 5.21.3. Προχωρήστε ως εξής:

Βάλτε τη μεταβλητή d.c. τάση στα περίπου 4V .

Βάλτε το κουμπί ρύθμισης της ενίσχυσης (gain) στη μονάδα του τελεστικού ενισχυτή (Operational Amplifier) στο 1000.

Βάλτε προσωρινά στη θέση του θερμομέτρου μια δεκαδική ρυθμιστική αντίσταση (decade resistance box) και βάλτε την στα 100Ω .

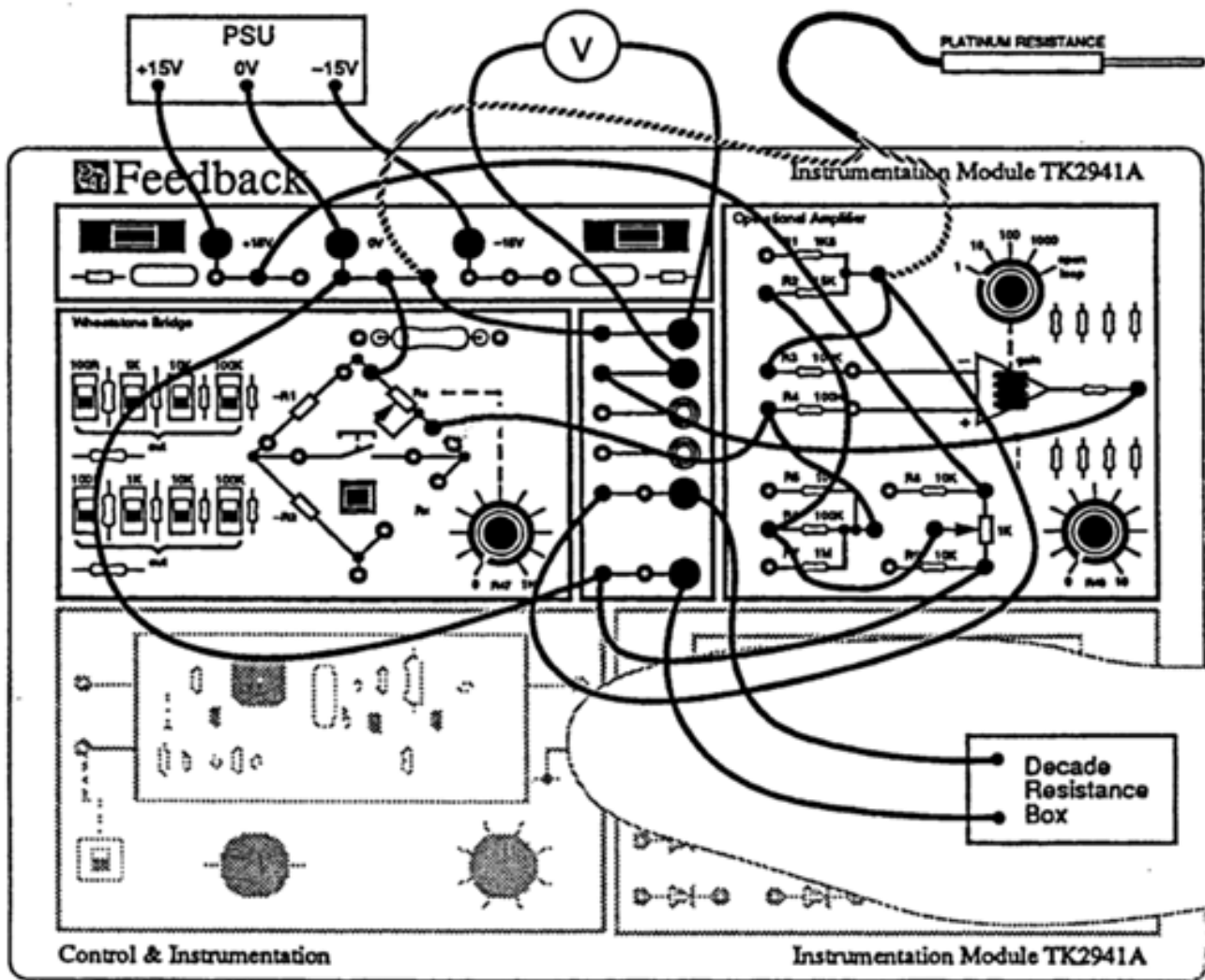
Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο R47 ώστε να δίνει μηδενική τάση εξόδου στο βολτόμετρο.

Βάλτε το δεκαδικό κιβώτιο αντιστάσεων στα 138Ω .

Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο στη μονάδα του τελεστικού ενισχυτή (Operational Amplifier), ώστε το βολτόμετρο να δείχνει -10V .

Επαναλάβετε αυτή τη διαδικασία ως ότου και οι δύο ρυθμίσεις (στα 100Ω και στα 138Ω) να είναι σωστές.

Αντικαταστήστε πάλι το δεκαδικό κιβώτιο αντιστάσεων με το θερμόμετρο. Τώρα, θα πρέπει να μπορείτε να διαβάσετε οποιαδήποτε θερμοκρασία μεταξύ 0 και 100°C άμεσα με μια ακρίβεια περίπου $\pm 0.5^\circ\text{C}$.



Εικόνα 5.21.3