

1.1. Principiile Măsurărilor Electronice

1.1.1. Curentul Continuu (C.C.)

1.1.2. Elemente ale Circuitului Electric

1.1.3. Curentul alternativ (C.A.)

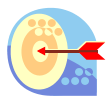
1.1.4. Bazele Măsurărilor Electrice

2. Punți de măsurare



Introducere capitol 2

Aceste circuite de punte erau în trecut cele mai precise aparate cu care se măsura rezistența (și, în general, impedanța). Circuitele de punte sunt de obicei utilizate ca și convertoare de rezistență (impedanță) în tensiune iar principiul punții este utilizat în aparatele RLC digitale.



Obiective capitol 2

Obiectivele capitolului sunt:

- Sinteza principalelor tipuri de punți C.C. și C.A. utilizate în măsurări electrice (cum ar fi, punțile Wheatstone, Thomson, Maxwell, Wien și Hay)
- Analiza principiului de funcționare și a caracteristicilor de performanță a punților echilibrate și neechilibrate.

Un circuit de punte este în principiu este o pereche de divizoare de tensiune unde ieșirea circuitului este luată ca diferență de potențial între cei doi divizori. Circuitele de punte pot fi desenate ca o schemă cu forma de H sau de diamant, deși configurația de tip diamant este mai utilizată:

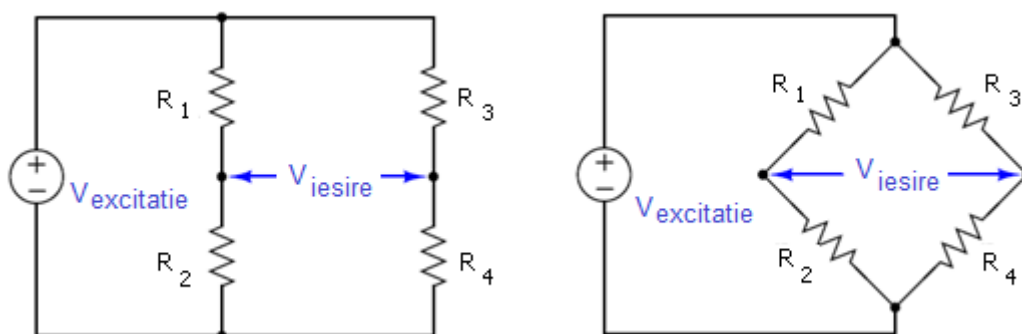


Fig.2.1 Circuitul de punte C.C.

Sursa de tensiune care alimentează circuitul de punte se numește sursă de excitație. Această sursă poate fi C.C. sau C.A. în funcție de aplicația cu circuitul de punte. Componentele care formează puntea nu trebuie să fie neapărat rezistențe, pot fi: condensatori, inductoare, lungimi de sârmă, elemente sensibile, dar și alte forme de componente sunt posibile, în funcție de aplicație.

2.1. Punți C.C.

2.1.1. Puntea Wheatstone echilibrată

Punțile C.C. sunt alcătuite din două divizoare rezistive conectate în paralel, formând un circuit cu patru brațe, ca în Figura 2.1.

Puntea Wheatstone bridge este folosită de regulă ca punte C.C.



Istoric

Puntea Wheatstone este un circuit electric inventat de Samuel Hunter Christie în 1833 și îmbunătățit și popularizat de Sir Charles Wheatstone în 1843. Cu aceasta se măsoară o rezistență electrică necunoscută prin echilibrarea a două laturi ale circuitului de punte, o latură va conține componenta necunoscută. Funcționarea sa se aseamănă cu a unui potențiomtru.

Schema electrică a punții Wheatstone constă din rețeaua **cu patru brațe** de rezistori (R_1, R_2, R_3, R_4) alimentate la B, D iar indicatorul de nul (de obicei un galvanometru) este plasat între A și C.

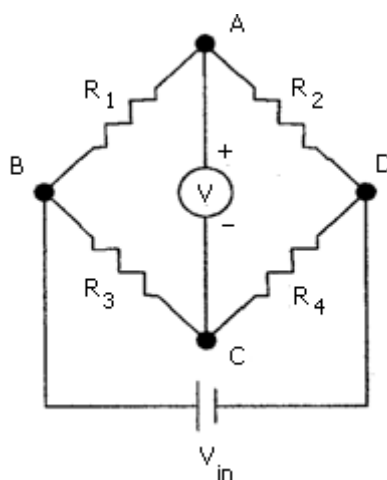


Fig.2.2 Circuitul de punte Wheatstone

Principiul metodei (de echilibrare automată) constă în obținerea **deviației de zero** a indicatorului de nul.

$$R_1 = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_4} \quad \text{este } \textbf{conditia de echilibru}$$

Pentru măsurări $R_4 = R_x$ (este rezistența necunoscută). Astfel că relația de sus devine:

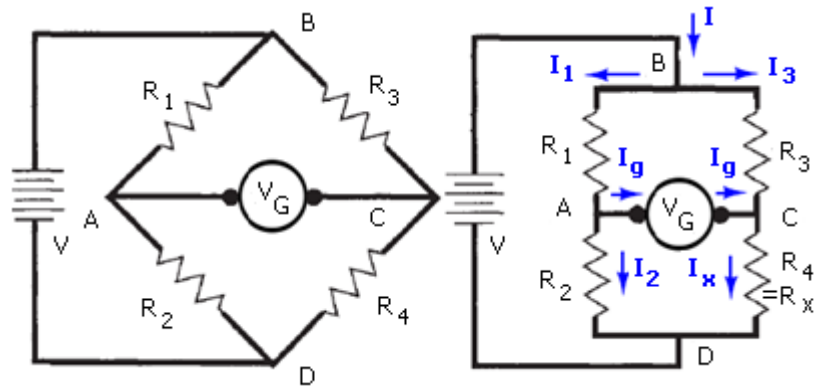
$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$



Funcționare

În figură, R_x este rezistența de măsurat necunoscută; R_1, R_2 și R_3 sunt rezistori cu rezistență cunoscută iar rezistența lui R_2 este reglabilă. Dacă raportul celor două rezistențe din latura cunoscută (R_2 / R_1) este egal cu raportul celorlalte două din latura

necunoscută (R_x / R_3), atunci tensiunea dintre cele două puncte de mijloc (**A** și **C**) va fi zero și nu va trece curent prin galvanometrul V_g . Dacă puntea nu este echilibrată ($I_g \neq 0$), direcția curentului va indica dacă R_2 este prea mare sau prea mică. R_2 este variată până când nu va trece curent prin galvanometru, care va citi zero. Detectarea unui curent de zero cu galvanometru poate fi efectuată cu acuratețe extrem de mare.



Prin urmare, dacă R_1 , R_2 și R_3 sunt cunoscute foarte precis, atunci și R_x va fi măsurat cu precizie ridicată. Variațiile foarte mici ale lui R_x vor perturba echilibrul și sunt ușor de detectat. La punctul de echilibru, raportul lui $R_2 / R_1 =$ raportul lui R_x / R_3

Prin urmare,

$$R_x = (R_2 / R_1) \cdot R_3$$

Pe de altă parte, dacă R_1 , R_2 , și R_3 se cunosc, dar R_2 nu poate fi reglat, atunci și diferența de tensiune pe și curentul prin aparat pot fi folosite pentru a calcula valoarea lui R_x , folosind legile lui Kirchhoff (sau regulile lui Kirchhoff).

Prin a doua regulă a lui Kirchhoff se pot determina curenții din joncțiunile **C** și **A**:

$$I_3 - I_x + I_g = 0$$

$$I_1 - I_2 - I_g = 0$$

Apoi, prima regulă a lui Kirchhoff este folosită pentru a afla tensiunea din buclele **BCA** și **CDA**:

$$(I_3 \cdot R_3) - (I_g \cdot R_g) - (I_1 \cdot R_1) = 0$$

$$(I_x \cdot R_x) - (I_2 \cdot R_2) + (I_g \cdot R_g) = 0$$

Puntea este echilibrată iar $I_g = 0$, astfel că al doilea set de ecuații poate fi rescris astfel:

$$R_1 \cdot I_1 = R_3 \cdot I_3 \quad \text{si} \quad R_2 \cdot I_2 = R_x \cdot I_x$$

Apoi, ecuațiile se împart și se rearanjează, și astfel se obține:

$$R_x = \frac{R_2 \cdot I_2}{I_x \cdot R_1 \cdot I_1} \cdot R_3 \cdot I_3$$

Conform primei reguli, $I_3 = I_x$ și $I_1 = I_2$. Valoarea pentru R_x poate fi acum determinată astfel:

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3$$

Circuitele de punte, ca puntea Wheatstone, pot fi utilizate pentru a testa componente. Pentru acest lucru, unul din “brațele” circuitului de punte este alcătuit din componenta testată, în timp ce unul din celelalte “brațe” este reglabil. Circuitul de punte Wheatstone folosit de obicei pentru măsurarea rezistenței este prezentat mai jos:

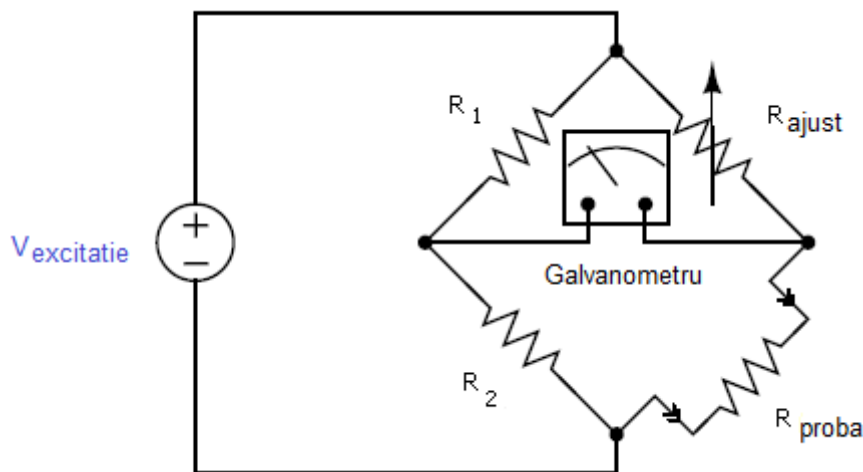


Fig.2.3 Circuit de punte Wheatstone pentru tesarea componentelor

Rezistoarele fixe R_1 și R_2 au o valoare bine cunoscută și sunt de înaltă precizie. Rezistorul variabil R_{ajust} are un buton marcat ce permite unei persoane ajustarea și citirea valorii lui cu un anumit grad de precizie. Când raportul dintre rezistența ajustabilă și cea de probă este egală cu raportul celor două rezistențe fixe, galvanometrul sensibil va înregistra exact zero volți indiferent de valoarea sursei de excitație. Aceasta este condiția de echilibru pentru un circuit de punte:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_{ajust}}{R_{proba}}$$

Când cele două rapoarte de rezistență sunt egale, căderile de tensiune pe rezistențele respective vor fi și ele egale. Legea lui Kirchhoff pentru Tensiune afirmă că diferența de tensiune dintre două căderi de tensiune opuse și egale va fi zero, luând în calcul indicația de echilibru a aparatului.



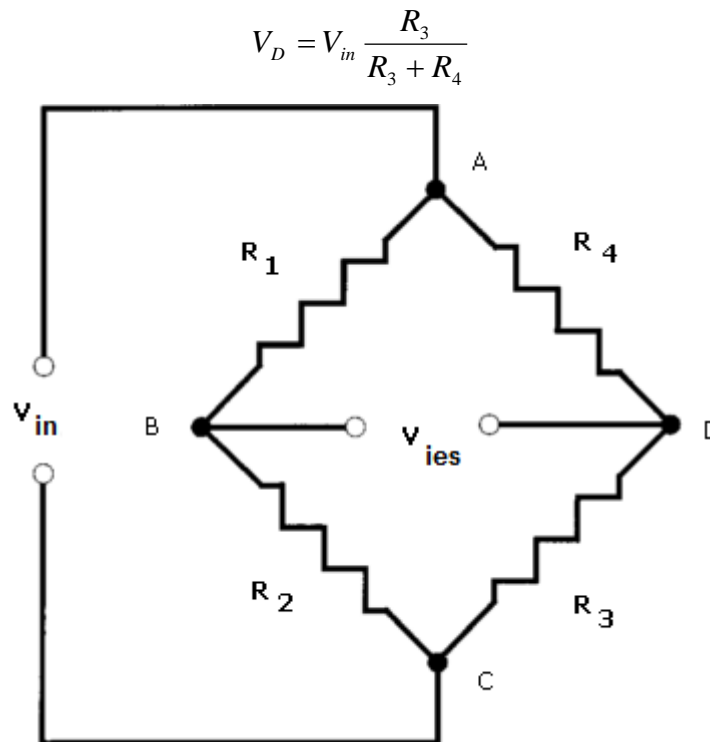
Exemplu

Rezistorii din circuitul de punte din figura de mai jos au toți valoarea de 2.7 kΩ, exceptând R_1 care este 2.2 kΩ. Dacă $V_{in} = 15$ V, ce va indica voltmetrul?

Leșirea punții este diferența dintre tensiunea la punctele B și D.

$$V_B = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Căile ABC și ADC sunt divizoare de tensiune astfel încât V_B și V_D sunt date de:



Tensiunea la punctul D va fi 7.5 V, deoarece $R_3 = R_4$, iar tensiunea la B este egală cu 1/2 din tensiunea de alimentare. Tensiunea la B este dată de:

$$V_B = 15V \frac{2.7 \text{ k}\Omega}{2.2 \text{ k}\Omega + 2.7 \text{ k}\Omega} = 8.26 \text{ V}$$

Voltmetrul va citi: $V_{ies} = V_B - V_D = 8.26 - 7.5 \text{ V} = 0.76 \text{ V}$ (se va reține polaritatea!)

Toate cele 4 valori ale rezistențelor și tensiunea de alimentare (V_{in}) se cunosc, iar rezistența galvanometrului este suficient de mare pentru ca I_g să fie neglijabil. Tensiunea pe punte (V_{ies}) se află prin determinarea tensiunii din fiecare divizor de potențial și prin scăderea unuia la celălalt. Relația în acest caz devine:

$$V_{ies} = V_{in} \frac{R_2}{R_x + R_2} - V_{in} \frac{R_3}{R_4 + R_3}$$

Totuși poate fi simplificată astfel:

$$V_{ies} = V_{in} \left(\frac{R_2}{R_x + R_2} - \frac{R_3}{R_4 + R_3} \right)$$

Caracteristicile acestei punți sunt următoarele:

Domeniul de măsurare acoperă intervalul de la 10^{-2} la $10^6 \Omega$. Aceste valori reprezintă valori medii de rezistență.

Sensibilitatea S a punții depinde de rezistența măsurată (R_x). Dacă R_x este variabilă, atunci:

$$S = \lim_{\Delta R_x \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta \alpha}{\Delta R_x}}{\frac{R_x}{d R_x}} = R_x \frac{d \alpha}{d R_x}$$

Caracteristica punții Wheatstone este obținută experimental prin intermediul sensibilității, pentru care $R_4 = R_x$:

$$S = R_4 \frac{\alpha' + \alpha''}{R_4'' - R_4'}$$

unde α' este deviația cauzată de micșorarea lui R_4 (R_4') iar α'' este deviația cauzată de creșterea lui R_4 (R_4'') cu aceeași valoare, $\Delta R_4'' = \Delta R_4' = R_4 - R_4' = R_4'' - R_4$ (Figura 2.4).

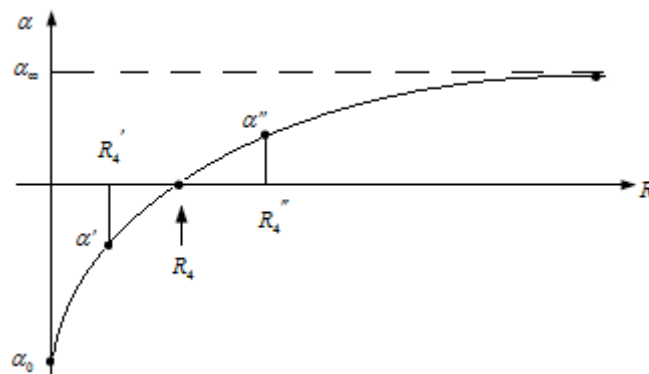
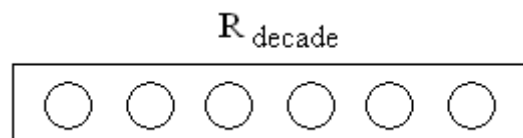


Fig.2.4 Caracteristica de sensibilitate a punții Wheatstone

Valorile sensibilității variază de la 100 la 10^4 . După cum se poate vedea în figură, cele mai bune valori de sensibilitate se obțin pentru variații mai mari de R_x . Deci, pentru un număr mai mare de decade a rezistenței măsurate R_x , se vor obține valori mai mari de sensibilitate.



În practică, se caută condițiile de sensibilitate maximă. Acestea pot fi obținute astfel:

- prin folosirea unui galvanometru cu o sensibilitate mai mare
- prin aplicarea unei tensiuni de alimentare mai mari

Acuratețea acestei punți C.C. depinde de rezistorii componenți și de galvanometrul folosit. Eroarea relativă maximă când se măsoară rezistența ($R_4 = R_x$) este:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta \alpha}{S}$$

Toate cele trei erori relative $\frac{\Delta R}{R}$ sunt pierderi de construcție: 0.06 % este eroarea maximă pentru laborator. $\frac{\Delta \alpha}{S}$ este eroarea de măsurare. $\Delta \alpha$ este o diviziune și depinde de galvanometru.

S este sensibilitatea și depinde de modul în care se face măsurarea. De regulă, domeniul acurateții este: **0.001 ... 0.1%**, ceea ce arată că punțile Wheatstone pot fi foarte exacte când măsoară rezistențe.

2.1.2. Puntea Wheatstone neechilibrată

Puntea Wheatstone poate lucra și în modul neechilibrat pentru a măsura variații mici ΔR_x în jurul unei valori de echilibru, R_{x0} . De regulă, această punte este utilizată pentru a măsura o **mărimă care nu este electrică** (de exemplu, temperatura) a cărei variație este convertită într-o variație a rezistenței ΔR_x . În figura de mai sus (Figura 2.5), $R_1 = R_{x0} + \Delta R_x$. Dacă am avea $R_1 = R_{x0}$, atunci acest lucru s-ar întâmpla numai dacă puntea ar fi echilibrată, prin urmare $\Delta R_x = 0$. Dar, cel mai mult din timp $\Delta R_x \neq 0$, deoarece puntea operează în regimul neechilibrat cu scopul de a calcula aceste mici variații ΔR_x . Astfel, cum se pot oare calcula aceste variații mici ale lui R_1 ?

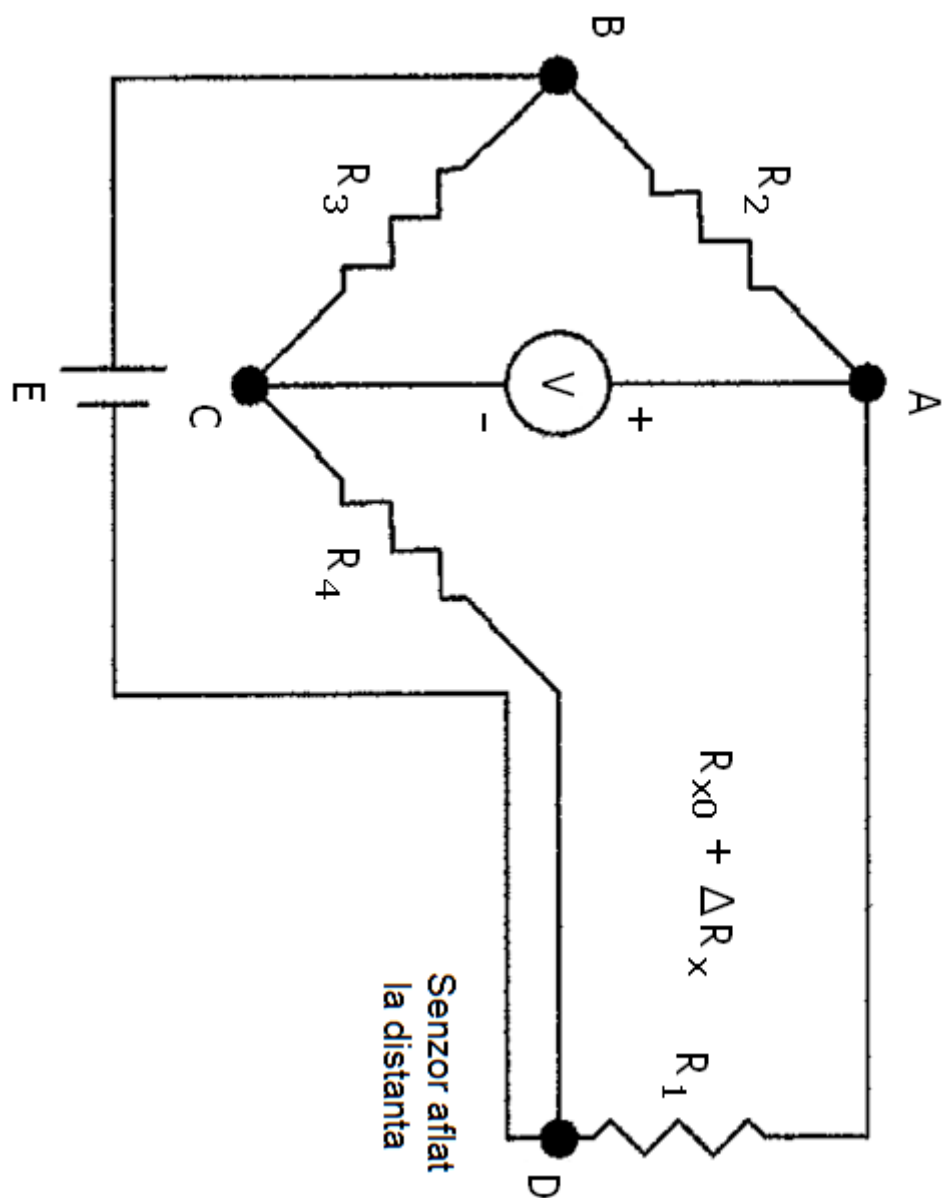
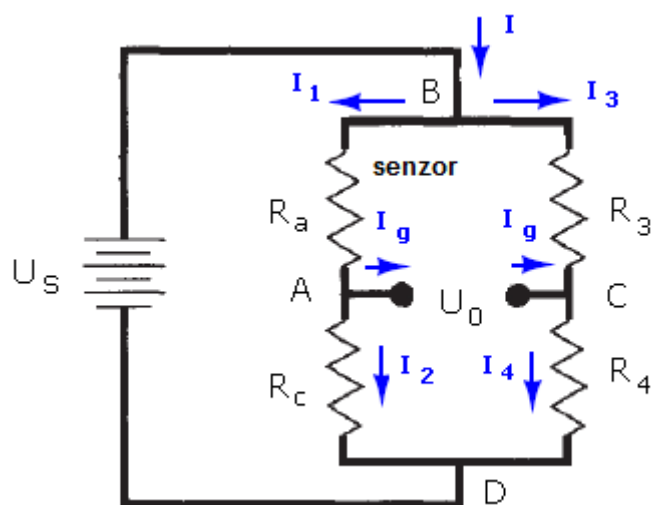


Fig.2.5 Puntea Wheatstone neechilibrată pentru măsurarea rezistenței unui senzor



Pentru a înțelege cum funcționează puntea Wheatstone neechilibrată, se va considera o astfel de punte cu un element (senzor) activ R_a . Se folosește rezistența R_c pentru compensare termică. Se știe că $R_3 = R_4 = R_c = R$ și $R_a = R + \Delta R$. Care este oare formula pentru tensiunea de ieșire dacă curentul de ieșire se consideră a fi neglijabil?

Dacă $I_g = 0$, astea înseamnă că $I_1 = I_2$ și $I_3 = I_4$. Așadar, în BAD și BCD, se obține:

$$U_s = I_1 (R_a + R_c)$$

$$U_s = I_3 (R_3 + R_4)$$

Tensiunea de ieșire U_0 (tensiunea dintre A și C) este egală cu:

$$U_0 = U_{AC} = U_{BA} - U_{CB} = I_1 \cdot R_a - I_3 \cdot R_3$$

Folosind formulele pentru căile BAD și BCD, se va obține:

$$U_0 = U_s \frac{R_a}{R_a + R_c} - U_s \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

Deoarece $R_3 = R_4 = R$, rezultă că:

$$U_0 = U_s \frac{R_a}{R_a + R_c} - U_s \frac{1}{2} = U_s \frac{1}{2} \frac{R_a - R_c}{R_a + R_c}$$

Se știe de asemenea că:

R_c nu se modifică cu mărimea măsurată (în cazul nostru, temperatura). Prin urmare, $R_c = R$.

R_a este elementul de detectare activ (sesizează variația temperaturii). Astfel că, $R_a = R + \Delta R$.

Prin urmare, relația de sus devine:

$$U_0 = U_s \frac{\Delta R}{2R + \Delta R}$$

Deoarece se măsoară variații de rezistență foarte mici, se pot face următoarele presupuneri:

$$\Delta R \rightarrow 0, R_a \approx R_c = R$$

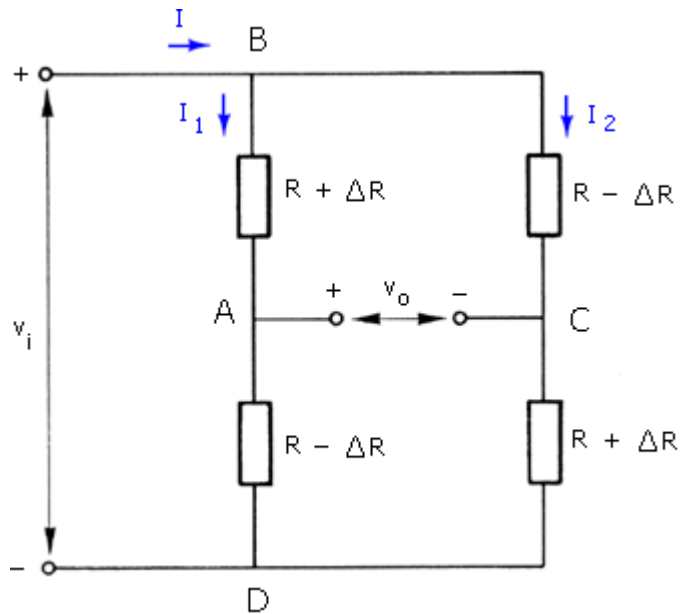
În final, se va obține:

$$U_0 = \frac{U_s}{2} \frac{\Delta R}{R}$$



Exemplu

Care este tensiunea de ieșire a circuitului de punte de detectare (punte Wheatstone neechilibrată) cu patru senzori activi? Pentru a-i afla formula, următoarea schemă prezentată mai jos se va dovedi utilă.

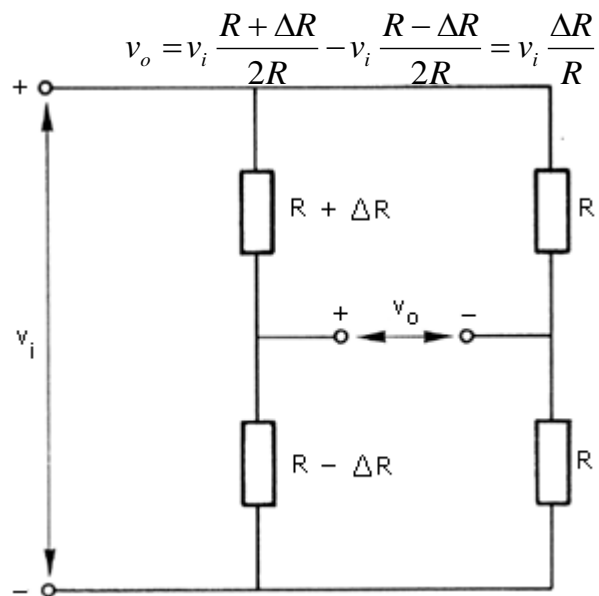


Aplicând regulile lui Kirchhoff pentru căile BAD și BCD, se obține:

$$v_i = I_1(R + \Delta R) + I_1(R - \Delta R) = I_1 \cdot 2R$$

$$v_i = I_2(R - \Delta R) + I_2(R + \Delta R) = I_2 \cdot 2R$$

Prin urmare, tensiunea de ieșire poate fi exprimată astfel:



A se vedea schema de mai sus. Pentru o punte de detectare cu doi senzori activi, tensiunea de ieșire va fi descisă de următoarea formulă:

$$v_o = v_i \frac{\Delta R}{2R}$$

Testarea cunoștințelor (Cursul 3)

Teorie :

Care este rolul circuitelor de punte?

Care este condiția de echilibru în circuitele de punte? Poți explica cum a fost obținută condiția?

Care sunt principalele moduri de funcționare a unui circuit de punte?

Câte divizoare de tensiune folosește un circuit de punte obișnuit?

Care sunt compenentele de bază ale unui circuit de punte?

Ce este puntea Wheatstone?

Care este condiția de echilibru pentru puntea Wheatstone (pentru a obține o punte echilibrată)?

Cât este valoarea curentului care parcurge galvanometrul unei punți Wheatstone echilibrate?

Cât este domeniul de măsurare al punții Wheatstone?

Cum poți calcula sensibilitatea punții Wheatstone?

Cât este domeniul de sensibilitate al punții Wheatstone?

Cum poate fi îmbunătățită sensibilitatea unei punți Wheatstone?

Acuratețea punții Wheatstone depinde de rezistoarele componente și de galvanometrul folosit. Cât este eroarea relativă maximă când este măsurată rezistența R_4 (necunoscută)?

Cât este domeniul de acuratețe tipic punților Wheatstone din laboratoare?

Cât este domeniul de acuratețe al punților Wheatstone? Așadar, poate fi considerată puntea Wheatstone suficient de precisă pentru măsurarea rezistențelor?

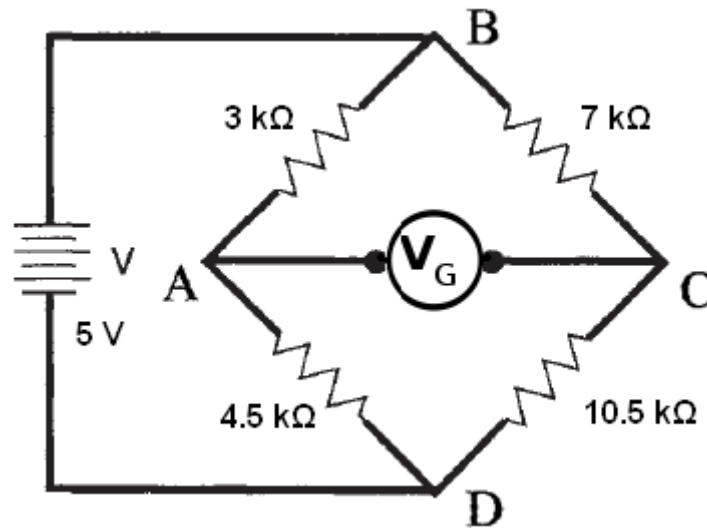
Cum poți folosi puntea Wheatstone în modul neechilibrat?

Cum poți măsura variații mici ale rezistenței cu puntea Wheatstone?

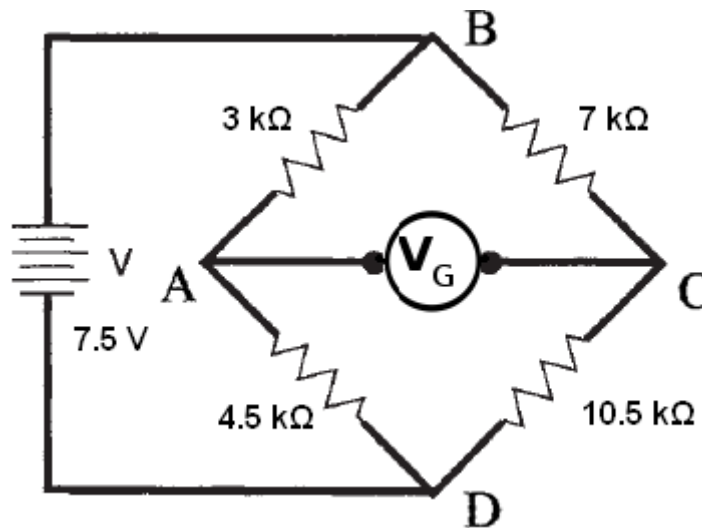
Cum funcționează puntea Wheatstone cu un element activ (senzor)? Care este formula pentru tensiunea la ieșire?

Exerciții:

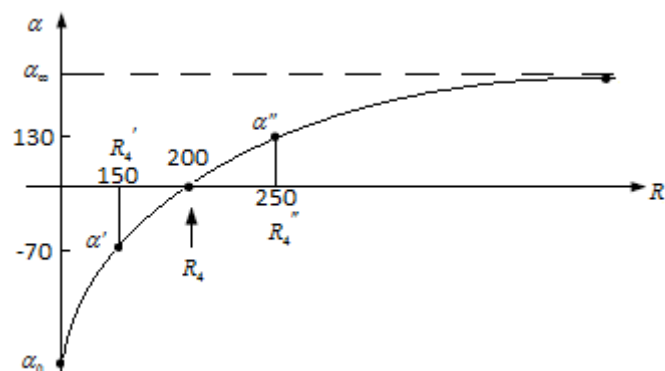
Este următoarea punte CC echilibrată? Efectuează calculele corespunzătoare.



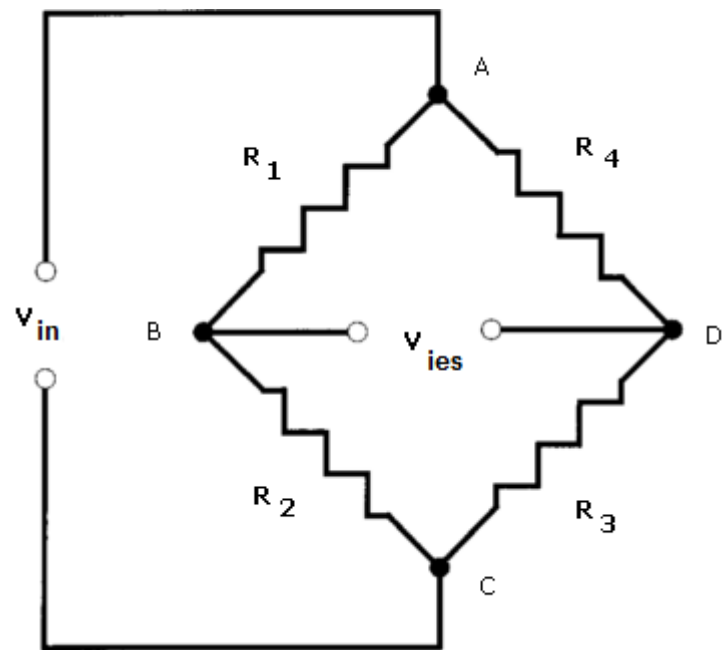
Cât este tensiunea pe brațul AB (V_{AB})? Efectuează calculele corespunzătoare.



Cât este sensibilitatea (S) punții Wheatstone cu următoarea caracteristică?



Rezistențele din circuitul de punte din figura de mai jos sunt toate de $5\text{ k}\Omega$, exceptând R_1 care este de $3\text{ k}\Omega$. Dacă $V_{in} = 10\text{ V}$ ce valoare va indica voltmetrul (V_{ies})?



Care este formula pentru tensiunea de ieșire a punții Wheatstone neechilibrate de mai jos?

