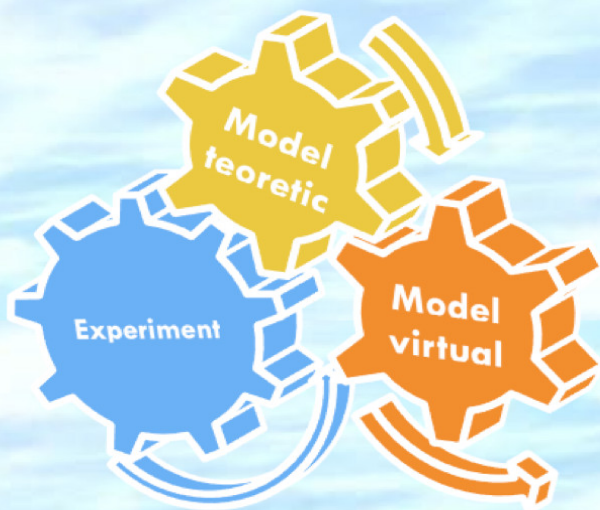


@'

LABORATOR DE CIRCUITE ELECTRICE - CONCEPTE, SIMULĂRI, EXPERIMENTE -

VERSIUNE DIN 7 MARTIE 2020



MIHAI POPESCU, RUXANDRA BĂRBULESCU, SORIN LUP,
GABRIELA CIUPRINA, DANIEL IOAN



Cuprins

1	Divizorul de tensiune	5
1.1	Introducere	5
1.2	Concepte	6
1.3	Simulări	14
1.4	Experimente practice	18
1.5	Validarea rezultatelor experimentale	19
1.6	Aplicații practice ale divizorului de tensiune	22
1.7	Proiectarea unui divizor de tensiune	24
1.8	Pregătirea și notarea laboratorului	25
	Referințe	26

1. Divizorul de tensiune

1.1	Introducere	5
1.2	Concepte	6
1.3	Simulări	14
1.4	Experimente practice	18
1.5	Validarea rezultatelor experimentale	19
1.6	Aplicații practice ale divizorului de tensiune	22
1.7	Proiectarea unui divizor de tensiune	24
1.8	Pregătirea și notarea laboratorului	25

1.1 Introducere

Divizorul de tensiune se bazează pe distribuirea unei tensiuni u între componentele divizorului. Cel mai simplu exemplu în acest sens este un divizor de tensiune format din două rezistoare conectate în serie (Fig. 1.1), având tensiunea de intrare aplicată pe perechea de rezistoare și tensiunea de ieșire extrasă de pe una din componente (u_1 sau u_2). Divizorul rezistiv de tensiune este adesea folosit pentru a crea tensiuni de referință, ca în Fig. 1.2 sau pentru a reduce tensiunea provenită dintr-o rețea complexă.

Scopul lucrării

Obiectivul acestei lucrări de laborator este ilustrarea modului în care se îmbină cele trei aspecte ale domeniului Calculului științific în inginerie (CSE – *Computational science and engineering*): conceptele (lumea ideilor), simulările (lumea virtuală) și experimentele (lumea reală). În acest scop, exemplele folosite sunt simple din punct de vedere conceptual, tocmai pentru a permite nu numai explicarea aspectelor strict legate de teoria circuitelor, dar și evidențierea conexiunilor cu teoria sistemelor, metode numerice, analize pe baza simulărilor în SPICE. Această lucrare de laborator creează o bază solidă de analiză, astfel încât trecerea

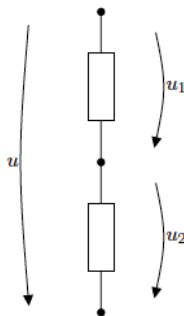


Figura 1.1: Divizorul de tensiune.

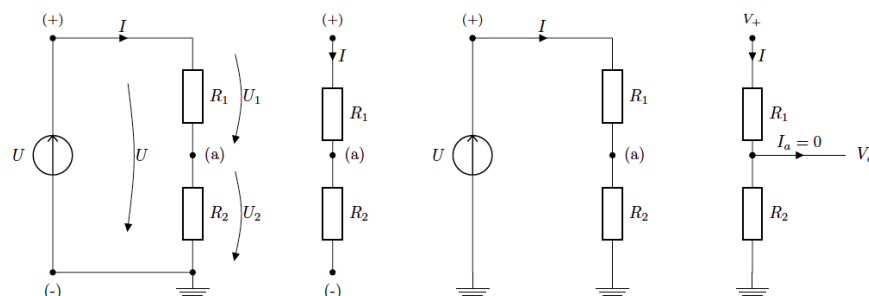


Figura 1.3: Divizorul de tensiune – schema de principiu în diferite variante de desenare.

Exercițiul 1.1 (Pe foaie de hârtie, înainte de laborator) Demonstrați relațiile (1.1) și (1.2).

De reținut Tensiunea pe fiecare rezistor al unui divizor de tensiune e proporțională cu rezistența rezistorului:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$$

Dacă notăm cu α raportul dintre cele două rezistențe astfel:

$$\alpha = \frac{R_1}{R_2}, \quad (1.3)$$

atunci putem rescrie relația (1.2) în funcție de acest raport:

$$U_2 = \frac{1}{1 + \alpha} U. \quad (1.4)$$

Se spune că divizorul este cu $1 + \alpha$. Spunem că avem un *divizor cu 3* dacă valoarea numitorului este 3, deci raportul $\alpha = 2$, adică $R_1 = 2R_2$.

De reținut Este utilă analiza următoarelor cazuri particulare:

1. $R_1 = R_2 \Rightarrow \alpha = 1$, divizor cu 2

$$U_2 = \frac{U}{2}$$

2. $R_1 \gg R_2 \Rightarrow \alpha = 0$, divizor cu 1

$$U_2 \simeq U$$

3. $R_1 \ll R_2 \Rightarrow \alpha \rightarrow \infty$, divizor cu ∞

$$U_2 \simeq 0$$

Divizorul de tensiune rezistiv în sarcină

Divizorului de tensiune i se poate conecta o rezistență de sarcină la ieșire, în paralel cu R_2 , așa cum este arătat în Figura 1.4.

În acest caz, tensiunea de intrare se repartizează între R_1 și grupul R_2 în paralel cu R_s . Relația dintre tensiunea de ieșire și cea de intrare devine:

$$U_2 = \frac{R_2 \parallel R_s}{R_1 + R_2 \parallel R_s} U, \quad (1.5)$$

unde $R_2 \parallel R_s$ este o notație pentru rezistența echivalentă a două rezistoare conectate în paralel $R_2 \parallel R_s = \frac{R_2 R_s}{R_2 + R_s}$.

Dacă se dorește o tensiune de ieșire aproximativ egală cu cea de la secțiunea precedentă (ieșire în gol), atunci rezistența de sarcină R_s trebuie aleasă astfel încât să fie mult mai mare decât R_2 (de exemplu $R_s \approx 100R_2$), ceea ce ar determina ca $R_2 \parallel R_s \approx R_2$:

$$R_2 \parallel R_s = \frac{R_2 R_s}{R_2 + R_s} \approx \frac{R_2 R_s}{R_s} = R_2, \text{ dacă } R_s \gg R_2. \quad (1.6)$$

De reținut Se poate crea un divizor cu $(1 + \alpha)$ doar dacă rezistența de sarcină este suficient de mare.

Puntea rezistivă

Puntea rezistivă poate fi privită ca o extensie a divizorului de tensiune în gol, alcătuită din două divizoare de tensiune în paralel. Grupul de rezistoare (R_1 în serie cu R_2) are în paralel o nouă latură formată din alte două rezistoare conectate în serie (R_3 și R_4). Tensiunea de la bornele celor două grupuri de rezistoare este aceeași și egală cu $U = V_+$. Fiecare grup de rezistoare funcționează ca un divizor de tensiune, astfel că putem extinde relația (1.2) pentru tensiunile caracteristice punții, notate cu V_a și V_b :

$$V_a = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad (1.7)$$

$$V_b = \frac{R_3}{R_3 + R_4} U. \quad (1.8)$$

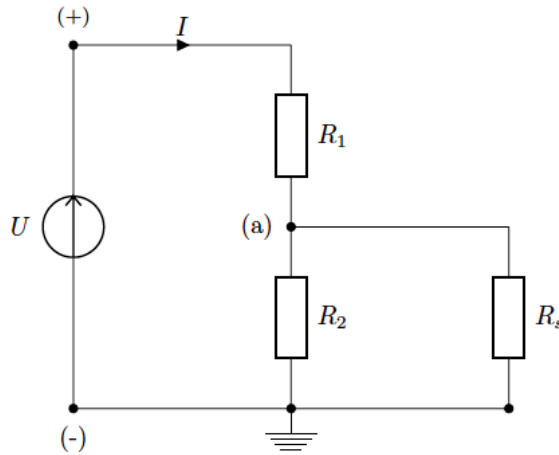


Figura 1.4: Divizorul de tensiune în sarcină – schema de principiu.

Puntea este în echilibru dacă $V_a = V_b$, adică dacă cele două divizoare au același factor de divizare. Egalând relațiile (1.7) și (1.8), reiese ușor că pentru echilibru trebuie să avem relația următoare între rezistențe: $R_1 R_3 = R_2 R_4$.

Exercițiul 1.2 (pe foaie de hârtie, înainte de laborator) Ce se întâmplă dacă între (a) și (b) se conectează o rezistență R_5 ? Dar dacă se face un scurt-circuit? Dar dacă între (a) și (b) se conectează o SIT?

Circuitele ca sisteme

Tensiunile și curenții dintr-un circuit reprezintă *semnale* în circuit, iar circuitul este un *sistem* care răspunde la anumite semnale, producând alte semnale.

Sursele din circuit furnizează *excitațiile* circuitului sau *semnalele de intrare*, iar mărimile de interes (tensiuni sau curenți) reprezintă *semnalele de ieșire* sau *răspunsurile*.

O reprezentare sistemică a divizorului de tensiune este în Fig. 1.6.

Observați că reprezentarea sistemică se face cu un bloc în care se văd semnalele de intrare (unul în acest caz) și semnalele de ieșire (unul în acest caz, tensiunea U_2), iar pe figura care reprezintă sistemul se marchează funcția de transfer, în cazul nostru o constantă $H = \frac{1}{1+\alpha}$, astfel încât $U_2 = HU$.

Exercițiul 1.3 (pe foaie de hârtie, înainte de laborator) Realizați o reprezentare sistemică a punții rezistive.

Propagarea erorilor

Componentele reale folosite în asamblarea circuitelor nu pot fi realizate perfect. Parametrii lor au anumite toleranțe, precizate de fabricant. De aceea, în proiectarea unui circuit, nu este importantă numai verificarea funcționării dorite ci și comportarea circuitului pe întreaga gamă de variație a parametrilor respectivi, impusă de tehnologia de realizare a componentelor.

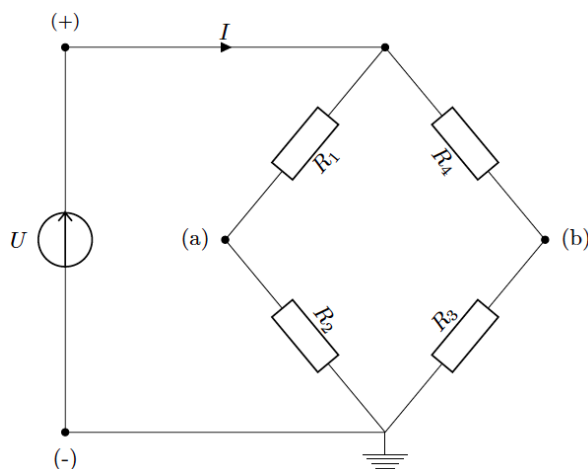


Figura 1.5: Puntea rezistivă – schema de principiu. Tensiunea între (a) și (b) este zero dacă $R_1 R_3 = R_2 R_4$.

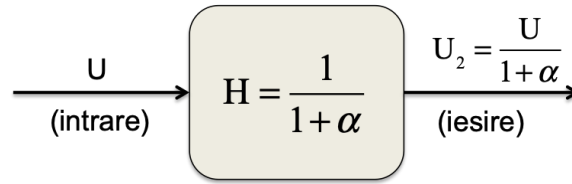


Figura 1.6: Divizorul de tensiune ca sistem e caracterizat de $\alpha = \frac{R_1}{R_2}$.

În cazul exemplelor analizate în această lucrare, rezistoarele sunt realizate cu anumite toleranțe, marcate pe element (de exemplu 5%, 10%). Aceste toleranțe trebuie interpretate ca *margini ale erorilor relative*.

Din această informație putem deduce o margine a erorii absolute:

$$|R_1 - R_{1,\text{nom}}| \leq r_1 R_{1,\text{nom}} \implies a_1 = r_1 R_{1,\text{nom}}$$

De reținut Marginea erorii absolute se calculează ca fiind marginea erorii relative (toleranța) înmulțită cu valoarea nominală.

Putem calcula acum intervalul de incertitudine în care se află valoarea reală a rezistenței:

$$\begin{aligned} |R_1 - R_{1,\text{nom}}| &\leq a_1 \\ -a_1 &\leq R_1 - R_{1,\text{nom}} \leq a_1 \\ R_{1,\text{nom}} - a_1 &\leq R_1 \leq a_1 + R_{1,\text{nom}} \\ R_1 &\in [R_{1,\text{nom}} - a_1, R_{1,\text{nom}} + a_1] \\ &\text{sau} \\ R_1 &\in [R_{1,\text{nom}}(1 - r_1), R_{1,\text{nom}}(1 + r_1)] \end{aligned}$$

Exemplul 1.1 $R_1 = 2 \text{ k}\Omega \pm 5\%$ înseamnă o valoare nominală $R_{1,\text{nom}} = 2 \text{ k}\Omega$ și o margine a erorii relative $r_1 = 5\%$, adică $\left| \frac{R_1 - R_{1,\text{nom}}}{R_{1,\text{nom}}} \right| \leq r_1$.
Marginea erorii absolute este:

$$a_1 = \frac{5}{100} \cdot 2 \cdot 10^3 \Omega = 100 \Omega = 0.1 \text{ k}\Omega$$

Deci valoarea reală $R_1 \in [99.9, 100.1] \text{ k}\Omega$.

De reținut Toate componentele au toleranțe de fabricație! Ce legătură credeți că există între prețul unei componente și toleranța ei?

Pentru a putea estima efectul acestor toleranțe asupra rezultatelor trebuie să folosim teorema de propagare a erorilor.¹

Să presupunem că o anumită marime y (rezultat) depinde de p parametri (date de intrare) independenți:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p).$$

¹ Aceste teoreme le veți studia sau le-ați studiat deja la disciplina Metode numerice

Perturbația absolută a rezultatului Δy se poate aproxima în funcție de perturbațiile absolute ale datelor de intrare ca:

$$\Delta y \simeq \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_p} \Delta x_p.$$

De unde:

$$\begin{aligned} |\Delta y| &\leq \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| |\Delta x_1| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| |\Delta x_2| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_p} \right| |\Delta x_p| \\ &\leq \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| a_{x_1} + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| a_{x_2} + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_p} \right| a_{x_p}. \end{aligned}$$

Marginea erorii absolute a rezultatului este în consecință:

$$a_y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| a_{x_1} + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| a_{x_2} + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_p} \right| a_{x_p}. \quad (1.9)$$

Exemplul 1.2 Adunarea a două numere $x_1, x_2 > 0$ sau $x_1, x_2 < 0$:

$$\begin{aligned} y &= x_1 + x_2, \\ f(x_1, x_2) &= x_1 + x_2 \end{aligned}$$

Din aplicarea (1.9) rezultă:

$$a_y = a_{x_1} + a_{x_2}, \text{ deoarece } \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| = \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| = 1. \quad (1.10)$$

Exemplul 1.3 Scăderea a două numere $x_1, x_2 > 0$ sau $x_1, x_2 < 0$:

$$y = x_1 - x_2, f(x_1, x_2) = x_1 - x_2,$$

atunci din 1.9

$$a_y = a_{x_1} + a_{x_2}, \text{ deoarece } \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| = \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| = 1. \quad (1.11)$$

Paranteza 1.1 Cum se analizează erorile relative?

Din (1.2) rezultă că

$$\begin{aligned} \frac{\Delta y}{y} &\simeq \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_p} \Delta x_p \\ \Rightarrow \frac{\Delta y}{y} &\simeq \frac{x_1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{x_2}{f} \frac{\partial f}{\partial x_2} \frac{\Delta x_2}{x_2} + \dots + \frac{x_p}{f} \frac{\partial f}{\partial x_p} \frac{\Delta x_p}{x_p} \\ \Rightarrow \left| \frac{\Delta y}{y} \right| &\leq \left| \frac{x_1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| \left| \frac{\Delta x_1}{x_1} \right| + \left| \frac{x_2}{f} \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| \left| \frac{\Delta x_2}{x_2} \right| + \dots + \left| \frac{x_p}{f} \frac{\partial f}{\partial x_p} \right| \left| \frac{\Delta x_p}{x_p} \right| \\ &\leq \left| \frac{x_1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| r_{x_1} + \left| \frac{x_2}{f} \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| r_{x_2} + \dots + \left| \frac{x_p}{f} \frac{\partial f}{\partial x_p} \right| r_{x_p}. \end{aligned}$$

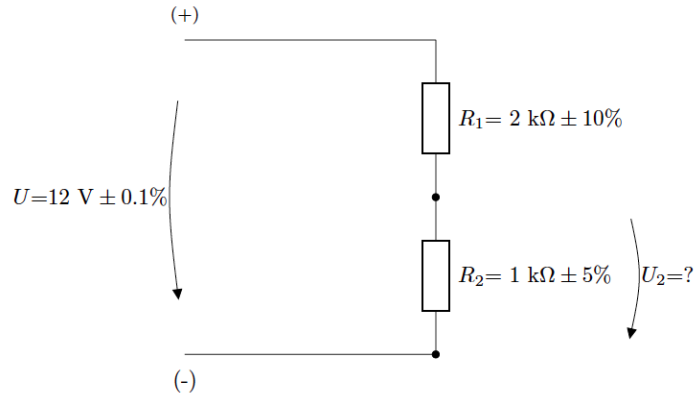


Figura 1.7: Divizor de tensiune, elemente cu toleranțe.

Marginea erorii relative a rezultatului este:

$$r_y = \left| \frac{x_1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| r_{x_1} + \left| \frac{x_2}{f} \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| r_{x_2} + \dots + \left| \frac{x_p}{f} \frac{\partial f}{\partial x_p} \right| r_{x_p}. \quad (1.12)$$

Exemplul 1.4 Înmulțirea a două numere x_1, x_2 :

$$y = x_1 x_2,$$

$$f(x_1, x_2) = x_1 x_2$$

Din aplicarea (1.12) rezultă:

$$r_y = r_{x_1} + r_{x_2}. \quad (1.13)$$

Similar, la împărțirea $y = \frac{x_1}{x_2}$ rezultă $r_y = r_{x_1} + r_{x_2}$.

De reținut

1. La adunare și scădere marginile erorilor **absolute** se adună.
2. La înmulțire și împărțire marginile erorilor **relative** se adună.

Exemplul 1.5 Fie divizorul de tensiune în care datele au toleranțele marcate pe Fig. 1.7.

Să calculăm

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U, \quad (1.14)$$

valoarea nominală și eroarea ei, aplicând cele două reguli de mai sus. vom efectua calculele în următoarea ordine:

1. Adunarea $R_1 + R_2$
2. Împărțirea dintre R_2 și rezultatul adunării de la punctul 1.
3. Înmulțirea dintre U și rezultatul de la 2.

sistemic	parametri				semnal de intrare		semnal de iesire	
	R1	rR1 [%]	R2	rR2 [%]	U	rU [%]	U2	rU2 [%]
	2000	10	1000	5	12	0,1	=D4/(B4+D4)*F4	=E4+(B4*C4/100+D4*E4/100)/(B4+D4)*100+G4
matematic				date				rezultate

Figura 1.8: Divizor de tensiune în gol, foaie de calcul cu mărimi calculate.

Să le luăm pe rând:

1. $R_1 = 2 \text{ k}\Omega \pm 10\%, R_2 = 1 \text{ k}\Omega \pm 5\% \Rightarrow R_1 + R_2 = ?$

Valoarea nominală $R_1 + R_2 = 3 \text{ k}\Omega$.

$$a_{R_1} = e_{R_1} R_1 = \frac{10}{100} \cdot 2 \text{ k}\Omega = 0.2 \text{ k}\Omega$$

$$a_{R_2} = e_{R_2} R_2 = \frac{5}{100} \cdot 1 \text{ k}\Omega = 0.05 \text{ k}\Omega$$

$$\Rightarrow a_{R_1+R_2} = a_{R_1} + a_{R_2} = 0.25 \text{ k}\Omega.$$

La adunare știm că marginile erorilor absolute se adună. De aceea e necesar să calculăm mai întâi aceste margini:

Eroarea relativa

$$r_{R_1+R_2} = \frac{a_{R_1+R_2}}{R_1 + R_2} = \frac{0.25 \text{ k}\Omega}{3 \text{ k}\Omega} = \frac{0.25}{3} = \frac{25}{3}\% \simeq 8.4\%$$

2. $R_2 = 1 \text{ k}\Omega \pm 5\%, R_1 + R_2 = 3 \text{ k}\Omega \pm 8.4\% \Rightarrow \frac{R_2}{R_1+R_2} = ?$

La împărțire marginile erorilor relative se adună, deci:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{3} \pm 13.4\%$$

3. $\frac{R_2}{R_1+R_2} = \frac{1}{3} \pm 13.4\%, U = 12 \text{ V} \pm 0.1\% \Rightarrow U_2 = \frac{R_2}{R_1+R_2} U = ?$

La înmulțire marginile erorilor relative se adună.

Deci $U_2 = \frac{1}{3} 12 \text{ V} \pm 13.5\% = 4 \text{ V} \pm 13.5\%$.

Acest lucru înseamnă de fapt că

$$U_2 \in \left[4 \left(1 - \frac{13.5}{100} \right), 4 \left(1 + \frac{13.5}{100} \right) \right] \text{ V}$$

$$U_2 \in [3.46, 4.54] \text{ V}.$$

În pregătirea laboratorului, vă recomandăm ca toate aceste calcule să le faceți într-o foaie de calcul organizată ca în Fig. 1.8.

Exercițiul 1.4 (fișier .xls, înainte de laborator) Reluați raționamentul de mai sus și completați o foaie de calcul în care să evaluați semnalul de ieșire U_2 pentru un divizor de tensiune în sarcină, considerând următoarele toleranțe pentru parametri și semnalul de intrare: $R_1 = 2 \text{ k}\Omega \pm 5\%$, $R_2 = 4 \text{ k}\Omega \pm 10\%$, $R_s = 4 \text{ k}\Omega \pm 10\%$, $U = 18 \text{ V} \pm 0.5\%$.

Exercițiul 1.5 (fișier .xls, înainte de laborator) Reluați raționamentul de mai sus pentru calculul $V_a - V_b$ pentru o punte rezistivă, unde valorile nominale ale rezistoarelor sunt: $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 6 \Omega$, $R_3 = 9 \Omega$, $R_4 = 3 \Omega$, toate rezistoarele au toleranța 5%, iar $U = 20 \text{ V} \pm 0.1\%$.

Chestionar preliminar: Concepte

Exercițiul 1.6 (Pe moodle, înainte de laborator) Efectuați chestionarul de antrenament de pe moodle ("Concepte") pentru a obține un punctaj cât mai mare.

1.3 Simulări

LTSpice

LTSpice este un simulator de circuite, în care circuitele pot fi descrise ca un fișier text cu o listă de elemente, numit *netlist* sau ca o schema de circuit (desen), numită *schematics* [1]. Este utilă înțelegerea modului de lucru în ambele variante, avantajele și dezavantajele lor.

- Lucrul cu *netlist* are avantajul că fișierul generat este portabil (în proporție destul de mare) între diferitele simulatoare de circuite (PSpice, LTSpice, ngspice, etc.). Dacă schema este foarte complicată, lucrul cu acest fișier devine greoi, eventualele greșeli fiind greu de depistat. În plus, este necesară cunoașterea precisă a sintaxei.

Exemplul 1.6 (Fișier netlist corespunzător circuitului din Fig. 1.2)

* circuit comparator cu tensiunea de referință

* data de un divizor de tensiune

R1 b 0 10k

C1 b 0 470uf IC=12V

R3 V+ N001 1k

R4 N001 0 1k

XU1 N001 b V+ V- c LT1017

R2 P001 c 1k

D1 P001 0 D

D2 0 P002 D

R5 V+ c 470

R6 c P002 1k

R7 V+ a 10

V1 V+ 0 12V

V2 0 V- 12V

.tran 10s uic

.end

- Lucrul cu *schematics* are avantajul că este intuitiv. Dezavantajul provine din faptul că fișierul generat nu este portabil între diferite simulatoare. Dacă se dorește însă migrarea către un alt simulator, atunci se poate exporta netlistul asociat. Un alt dezavantaj

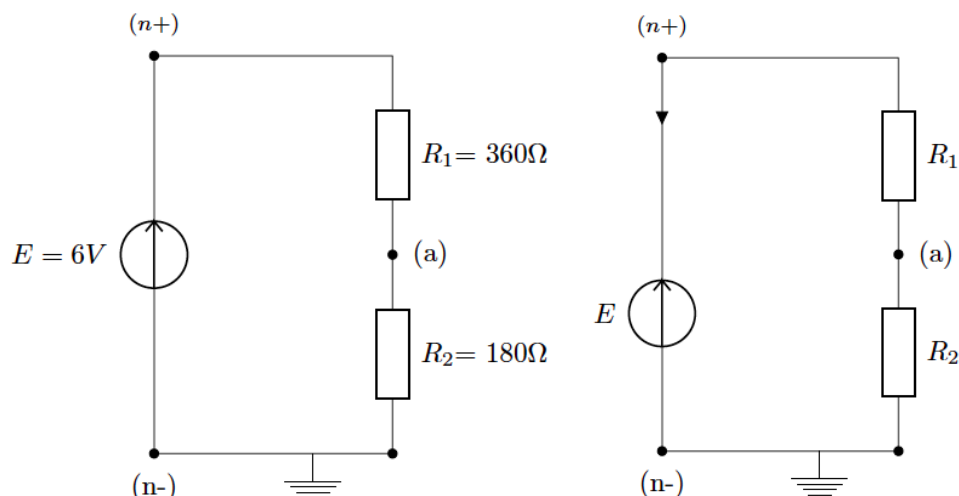


Figura 1.9: Divizor de tensiune în gol, exemplu. Stânga: circuit cu noduri etichetate, dreapta: sens curent pentru SIT.

este acela că, în cazul elementelor nepolarizate (de ex. rezistoarele), utilizatorul nu are un control imediat al sensului de referință al laturii. Pentru a înțelege acest sens de referință trebuie inspectat netlistul.

Hands-on it!

Vom exemplifica generarea unui netlist pentru un divizor de tensiune rezistiv, în gol, format din două rezistoare $R_1 = 360 \Omega$ și $R_2 = 180 \Omega$, la bornele căruia se aplică o tensiune de 6 V, ca în Fig. 1.9 stânga.

Pentru crearea netlistului, circuitul trebuie pregătit astfel:

1. Se pun noduri la bornele tuturor elementelor de circuit.
2. Se alege un nod la masă și se etichetează nodurile. Eticheta nodului de masă va fi obligatoriu 0.
3. Se aleg sensuri de referință pentru curenți. Fiecare latură devine orientată, de la un nod inițial la un nod final.

De reținut În cazul surselor ideale de tensiune este obligatorie reprezentarea sensului de referință al curentului ca în Fig. 1.9 dreapta.

4. Se scrie fișierul netlist (numit de ex. divizorTensiuneGol.cir):

* Divizorul de tensiune

* în gol

VE n+ 0 6

R1 n+ a 360

R2 a 0 180

.op

.end

- Liniile care încep cu * reprezintă comentarii.
- Prima linie din fișier este întotdeauna interpretată ca un comentariu.
- Fiecare linie reprezintă o latură (un element).
- Primul caracter al unei linii indică tipul elementului (de ex. V pentru SIT, R pentru rezistor).
- Sintaxa liniei de tip SIT este:
 $V_{\text{nume}} \ n+ \ n- \ \text{valoare}$
unde $n+$ reprezintă nodul inițial al laturii, $n-$ reprezintă nodul final, iar *valoare* reprezintă tensiunea electromotoare.
- Sintaxa liniei de tip R este:
 $R_{\text{nume}} \ n+ \ n- \ \text{valoare}$
unde $n+$ reprezintă nodul inițial al laturii, $n-$ reprezintă nodul final, iar *valoare* reprezintă rezistența.

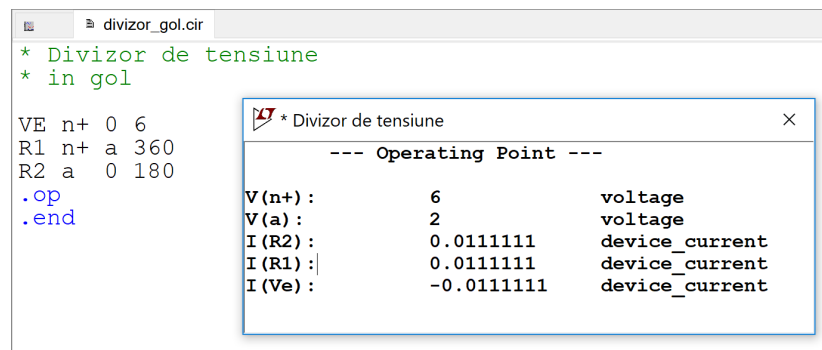


Figura 1.10: Divizor de tensiune în gol – rezultatul simulării.

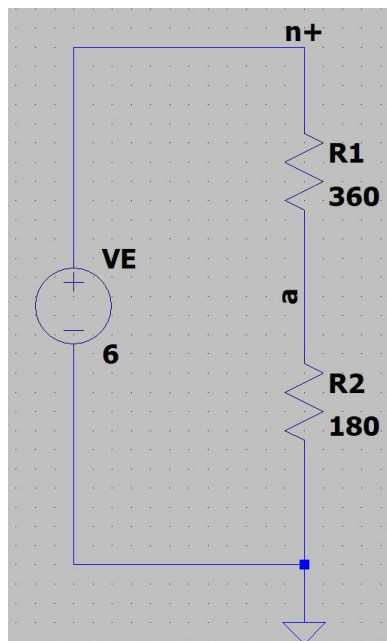


Figura 1.11: Divizor de tensiune în gol – circuitul în schematics.

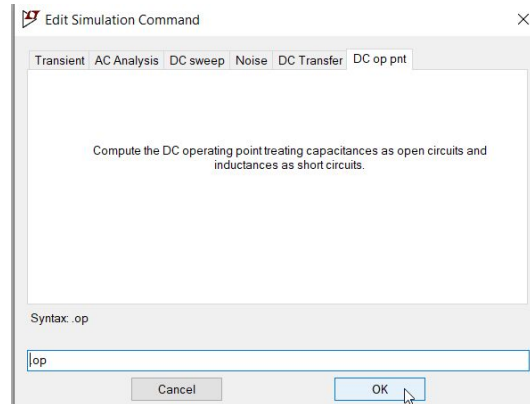



Figura 1.12: Divizor de tensiune în gol – fereastră de stabilire a tipului de simulare.

- Nodul de masă are întotdeauna eticheta 0 și trebuie să existe în circuit.
- Liniile care încep cu `.` reprezintă directive SPICE. În cazul exemplului studiat, `.op` este o directivă de simulare în c.c. (*o.p. = operational point = punct static de funcționare*)
- Liniile de după `.end` sunt ignorate.

Rezultatul simulării acestui netlist este Fig. 1.10. Observați că $V_a = 2\text{ V}$, așa cum era așteptat, divizorul fiind cu 3.

Generarea schemei se face intuitiv, printr-o interfață grafică (Fig. 1.11). Rularea se face apăsând pe butonul Run . Dacă a fost omisă comanda de simulare, atunci programul conduce automat către o fereastră de unde se stabilește tipul de simulare (Fig. 1.12).

În schematics, etichetarea unui nod se face din Meniul **Edit** → **Label Net** sau direct cu **F4**, iar generarea fișierului netlist se face din meniul **View** → **SPICE Netlist**. Netlist-ul poate fi salvat ca fișier separat pentru modificări ulterioare cu click-dreapta în fereastră și alegerea **Edit as Independent netlist**.

Mai multe detalii despre SPICE se găsesc în [1] și [2].

Paranteza 1.2 (facultativ) Toleranțe în Spice

LTSpice permite descrierea elementelor cu toleranțe, una dintre metode fiind analiza Monte Carlo (Fig. 1.13). Se definesc trei parametri care reprezintă toleranțele pentru R_1 , R_2 și U . Valorile celor trei mărimi sunt înlocuite cu un model Monte Carlo, care pentru sintaxa $mc(val, tol)$ variază valoarea val aleatoriu conform unei distribuții uniforme între $val(1 + tol)$ și $val(1 - tol)$. În concluzie, aceste valori reprezintă marginile erorilor relative ale elementelor (toleranțele).

Vom considera că rezistoarele au toleranța 5%, iar tensiunea de alimentare U are marea erorii absolute egală cu 0.1 V. Remarcați că de această dată este dată eroarea absolută pentru tensiunea de intrare, nu cea relativă ca până acum. Toleranțele definite în Spice sunt relative, deci trebuie calculată marea erorii relative pentru U , care este:

$$r_U = \frac{a_U}{U} = 0.0167 = 1.67\%.$$

Directiva:

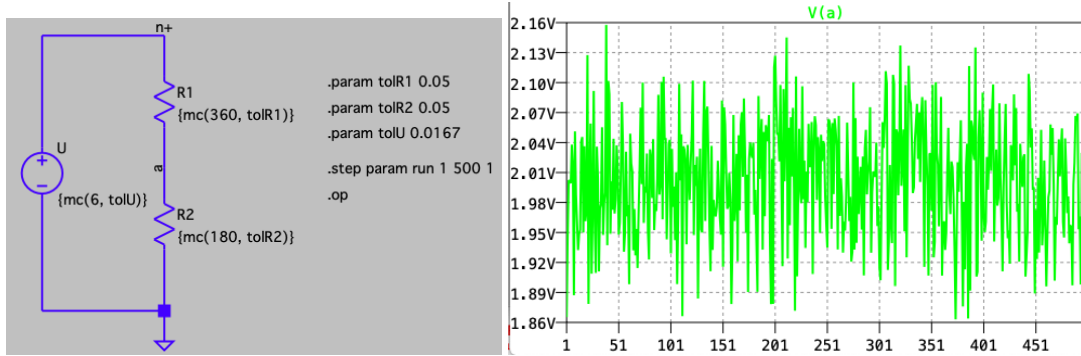


Figura 1.13: Divizor de tensiune în gol – mărimi cu toleranțe, schematics și rezultate.

.step param run 1 500 1

arată că se vor executa 500 de simulări, fiecare simulare folosind pentru valori diferite ale elementelor.

Forma generală a acestei directive SPICE este:

.step param <nume parametru><start><stop><pas>

Dacă din Fig. 1.13 alegem valoarea minimă și valoarea maximă pentru tensiunea de ieșire $U_2 = V_a$, putem calcula marginea erorii relative care nu ar trebui să depășească valoarea calculată de 11.7%. Pentru exemplul considerat, valoarea $U_2 = V_a \in [1.861, 2.1326]$, $V_a \in [2 - 6.91\%, 2 + 6.63\%]$.

Putem analiza în Spice și cazul cel mai defavorabil (*worst-case scenario*), în care datele au valorile minime și maxime. Pentru acest lucru înlocuim modelul Monte Carlo cu o funcție proprie, care pentru prima execuție întoarce valorile nominale, iar pentru următoarele execuții întoarce aleatoriu valorile minime sau maxime pentru cele trei mărimi (funcția *flat* întoarce un număr aleatoriu între -1 și 1).

Fig. 1.14 conține schema și rezultatele pentru 50 de simulări de acest tip. Valorile tensiunii de ieșire sunt în intervalul $[1.8365, 2.17]$, ceea ce corespunde unei erori relative de $V_a \in [2 - 6.95\%, 2 + 7.325\%]$.

În acest moment putem pregăti o foaie de calcul în care să trecem valorile calculate și valorile rezultate în urma simulării, ca în Fig. 1.15.

Exercițiul 1.7 (fișier .cir sau .asc, fișier .xls, înainte de laborator) Analizați și simulați divizorul de tensiune în sarcină. Pregătiți o foaie de calcul potrivită.

Exercițiul 1.8 (fișier .cir sau .asc, fișier .xls, înainte de laborator) Analizați și simulați puntea rezistivă. Pregătiți o foaie de calcul potrivită.

1.4 Experimente practice

Secțiune în curs de editare. Va fi disponibil în momentul efectuării lucrării practice.

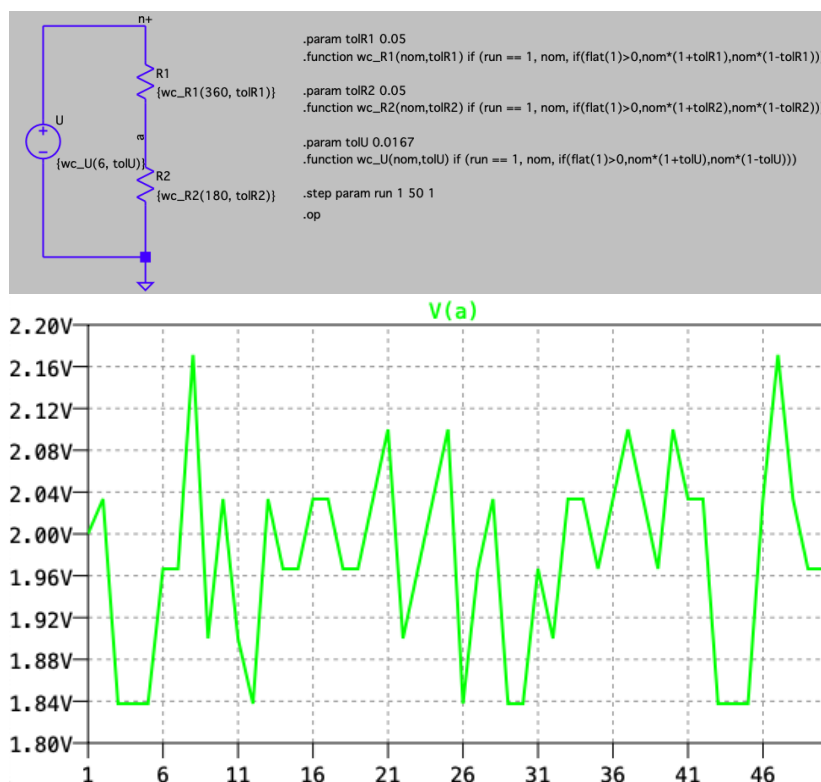


Figura 1.14: Divizor de tensiune în gol – mărimi cu toleranțe, worst-case scenario, schematic și rezultate.

1.5 Validarea rezultatelor experimentale

Influența aparatelor de măsură

Orice aparat de măsură introdus într-un circuit schimbă comportamentul acestuia. Acest lucru se întâmplă din cauză că aparatele de măsură nu sunt elemente ideale, ele având rezistențe interne.

În cazul voltmetrelor, acestea fiind conectate întotdeauna în paralel cu componentele aflate sub test, orice curent prin voltmetru va modifica curentul total din circuit, ducând inevitabil și la modificarea tensiunii reale din circuit. Un voltmetru ideal are o rezistență internă infinită, astfel încât curentul care trece prin acesta să fie zero. În cazul unui voltmetru real, trebuie să ne închipuim rezistența internă a acestuia în paralel cu elementul de interes,

sistemic	parametri				semnal de intrare		semnal de iesire			
							calculat		simulat	
	R1	rR1 [%]	R2	rR2 [%]	U	eU [V]	U2	rU2 [%]	U2	rU2 [%]
	360	5	180	5	6	0,1	2	11,7		
matematic	date					rezultate				

Figura 1.15: Divizor de tensiune în gol – foaie de calcul cu mărimi calculate și simulate.

ca o rezistență de sarcină.

Exercițiul 1.9 Ce valori indică voltmetrul din Fig. 1.16, dacă:

- voltmetrul este ideal (rezistență internă infinită)?
- voltmetrul este real (rezistență internă va fi preluată din manualul multimetrului)?

Validare

Validarea reprezintă o etapă extrem de importantă în modelare, ea confirmând faptul că simulările și experimentele au fost realizate corect. În această etapă se compară rezultatele experimentale cu valorile analitice/simulate.

De reținut Validarea rezultatelor experimentale Valoarea analitică/simulată \pm eroarea ei trebuie să se afle în intervalul [valoare măsurată – toleranță, valoare măsurată + toleranță].

Pentru ca această comparație să fie relevantă, valorile trebuie să aibă același număr de cifre semnificative. Numărul de cifre semnificative este numărul de cifre care sunt cunoscute cu certitudine pentru o anumită valoare.

De reținut Numărul de cifre semnificative nu este doar numărul de cifre de după virgulă (zecimale exacte), ci numărul total de cifre relevante!
Valoarea 2.34 are trei cifre semnificative, și două zecimale exacte.

Numărul *zero* trebuie tratat special în raportarea cifrelor semnificative. Zerourile de dinaintea primei cifre diferite de zero nu sunt semnificative, fără să conteze unde este virgula (ele indică doar ordinul cifrelor următoare și pot fi întotdeauna eliminate folosind un factor

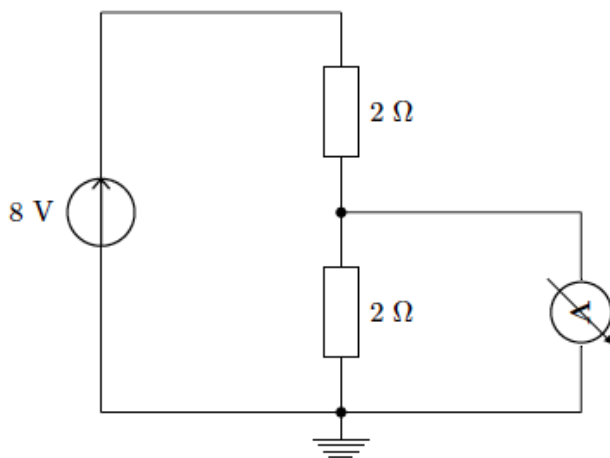


Figura 1.16: Divizorul de tensiune – influența aparatului de măsură.

adecvat 10^k , adică mutând virgula la dreapta). Zerourile de după virgulă sunt semnificative, în timp ce zerourile de dinainte de virgulă pot fi semnificative sau nu.

Exemplul 1.7 Următoarele valori au două cifre semnificative: 34, 3.4, 0.34, 0.0034, $3.4 \cdot 10^{-4}$

Exemplul 1.8 Următoarele valori au trei cifre semnificative: 345, 3.45, 0.345, 0.00345, $3.45 \cdot 10^{-4}$, 3.40, 0.0340, $3.40 \cdot 10^{-7}$, 3.04, 0.000340

De reținut În raportarea unui număr întreg poate fi neclar câte cifre semnificative sunt folosite.

Numărul 450 poate fi scris cu două zecimale exacte: $4.5 \cdot 10^2$ sau cu trei zecimale exacte: $4.50 \cdot 10^2$, dar scrierea 450 este ambiguă din acest punct de vedere.

Modul de raportare a rezultatelor experimentale se face urmând anumite reguli.

1. Erorile absolute ale valorilor determinate experimental nu ar trebui raportate cu mai mult de două cifre semnificative.
2. O valoare și marginea erorii absolute asociată se raportează cu exact același număr de zecimale exacte (număr de cifre după virgulă).

Exemplul 1.9 Scrierea $2.4 \text{ V} \pm 0.16 \text{ V}$ implică faptul că valoarea se află în intervalul $2.24 \text{ V} - 2.56 \text{ V}$. Dar aparatul poate măsura valori cu o singură zecimală exactă, deci modul corect de raportare este $2.4 \text{ V} \pm 0.2 \text{ V}$.

3. Atât valorile măsurate cât și erorile absolute corespunzătoare trebuie să aibă aceeași unitate de măsură.
4. Raportarea trebuie să fie consistentă în notații: dacă o valoare măsurată este scrisă științific ($2.3 \cdot 10^2$) atunci și eroarea absolută va fi scrisă tot științific.
5. La efectuarea de operații elementare, rezultatul nu va avea mai multe cifre semnificative decât operandul cu cele mai puține cifre semnificative. Motivația stă în faptul că rezultatul nu poate fi mai precis decât valoarea de intrare cea mai puțin precisă. Precizia nu poate fi îmbunătățită prin efectuarea de calcule. Pentru minimizarea erorilor de rotunjire, se pot utiliza mai multe cifre semnificative în calculele intermediare și se ajustează cifrele semnificative numai pentru rezultatele finale.

Exemplul 1.10 Cifre semnificative în operații elementare:

$3.5 \cdot 22.3 = 78$, nu 78.05;

$6.2/833 = 0.0074$, nu 0.007442977;

$42.4 - 41.62 = 0.8$, $4256 - 24.7 = 4231$, $33.8 + 15.63 = 49.4$.

Exercițiul 1.10 Exemple de valorile măsurate raportate:

- 0.2 ± 0.321 (incorrect)

- 0 ± 2 (corect)
- 3.14 ± 0.02 (corect)
- 3.1421 ± 0.3214 (incorrect)
- $(2.34 \pm 0.15) \cdot 10^{-4}$ (corect)
- $(2.34 \pm 0.152) \cdot 10^{-4}$ (incorrect)
- 0.2 ± 0.3 (corect)

1.6 Aplicații practice ale divizorului de tensiune (facultativ)

Divizorul de tensiune are o mulțime de aplicații practice, fiind integrat în multe din dispozitivele cu care interacționăm zi de zi.

Exercițiul 1.11 Căutați o aplicație în care apare un divizor de tensiune. Explicați principiul după care este folosit.

Potențiometrul

Una dintre utilizările cele mai comune ale divizorului de tensiune o reprezintă potențiometrul [4]. Cel mai bun exemplu de potențiometru este butonul de reglare a volumului atașat unui sistem de muzică (Fig. 1.17).

Potențiometrul prezintă un buton rotativ care este acționat manual. Elementul mobil, numit și perie, face contact cu un material rezistiv dezizolat, în oricare dintre punctele selectate manual. Rotirea acestuia modifică punctul de contact de pe banda rezistivă continuă, astfel încât se schimbă valorile rezistențelor și implicit coeficientul α de divizare și tensiunea de ieșire (Fig. 1.18).

Cu alte cuvinte, un potențiometru acționează precum un divizor variabil de tensiune, iar coeficientul de divizare este dat de poziția periei de-a lungul bandei rezistive.

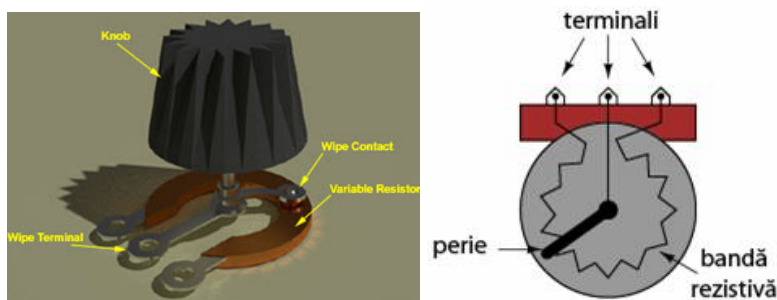


Figura 1.17: Potențiometrul – mod de funcționare

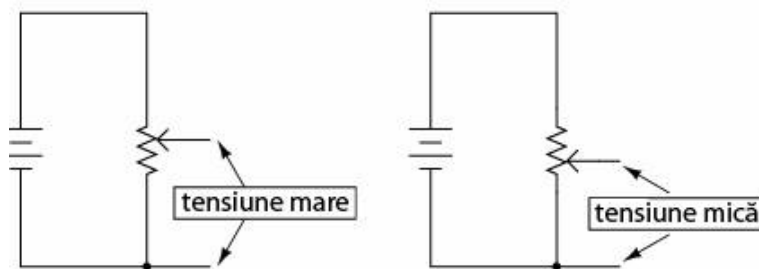


Figura 1.18: Potentiometrul – tensiunea preluată se modifică în funcție de poziția punctului de contact între perie și banda rezistivă.

Senzori rezistivi

O mare parte din senzorii din lumea reală sunt dispozitive rezistive [6]. Să luăm exemplul unui senzor de control al luminii (fotocelulă), care poate aprinde sau stinge becul unei veioze/lustre automat, în funcție de lumina ambientală. Focelula conține o rezistență variabilă, proporțională cu cantitatea de lumină captată.

Tensiunea fiind mult mai ușor de măsurat decât rezistența, pentru determinarea rezistenței fotocelulei se adaugă un alt rezistor (cu rezistența fixă și cunoscută) în circuit în serie cu senzorul, formându-se astfel un divizor de tensiune. Prin măsurarea tensiunii de ieșire, rezistența senzorului poate fi calculată ușor, folosind relațiile divizorului de tensiune (Fig. 1.19).

Exemplul 1.11 O fotocelulă are rezistența variabilă între $1\text{ k}\Omega$ la lumină și aproximativ $10\text{ k}\Omega$ la întuneric. Dacă se montează în serie o rezistență de valoare fixată la $5.6\text{ k}\Omega$ și se măsoară tensiunea de ieșire, se poate determina valoarea rezistenței variabile și a nivelului de lumină asociat (tabelul 1.11).

Nivel lumină	R_2 (senzor)	R_1 (fixat)	$\alpha = \frac{R_1}{R_2}$	V_{out} (măsurat)
Lumină	$1\text{ k}\Omega$	$5.6\text{ k}\Omega$	5.6	0.76 V
Semiobscur	$7\text{ k}\Omega$	$5.6\text{ k}\Omega$	0.8	2.78 V
Întuneric	$10\text{ k}\Omega$	$5.6\text{ k}\Omega$	0.56	3.21 V

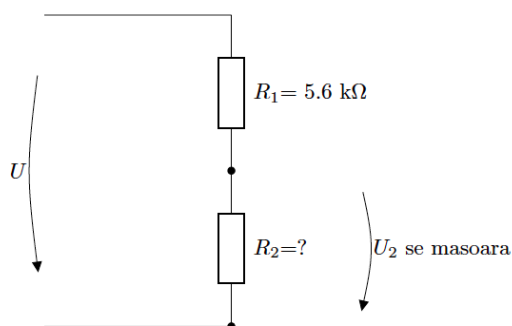


Figura 1.19: Senzor rezistiv. Valoarea rezistenței R_2 a senzorului poate fi determinată prin crearea unui divizor de tensiune.

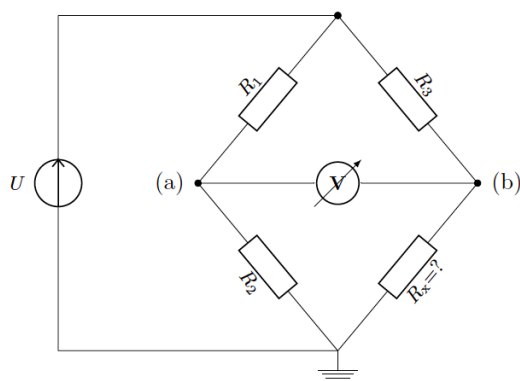


Figura 1.20: Puntea Wheatstone. Valoarea rezistenței R_x se determină prin echilibrarea punții și folosind relația între rezistoare pentru punte echilibrată.

Alte exemple de acest tip sunt senzori care conțin rezistențe sensibile la umiditate, temperatură, forțe.

Puntea Wheatstone

Puntea Wheatstone [5] (descrisă în secțiunea ??) a fost inițial dezvoltată de Charles Wheatstone pentru a măsura valorile unor rezistențe și ca mijloc de calibrare a instrumentelor de măsurare (voltmetre, ampermetre).

Puntea este în echilibru dacă $V_a = V_b$, ceea ce se întâmplă dacă relația dintre rezistențe este $R_1 R_x = R_2 R_3$. Pe același principiu ca senzorii rezistivi, dacă una dintre rezistențe este variabilă (de exemplu cu valoarea dependentă de lumină), valoarea ei poate fi determinată prin echilibrarea punții și folosirea relației între rezistoare pentru o punte echilibrată (Fig. 1.20).

Deși astăzi multimetrele digitale reprezintă cea mai simplă modalitate de a măsura o rezistență, puntea Wheatstone poate fi utilizată în continuare pentru a măsura valori foarte mici ale rezistențelor (de ordinul miliohmilor).

1.7 Proiectarea unui divizor de tensiune (facultativ)

În secțiunea 1.2 (Fig. 1.6) am considerat divizorul de tensiune ca un sistem, în care (tensiunea de) ieșire depinde de (tensiunea de) intrare prin funcția de transfer $H = \frac{1}{1+\alpha}$, unde $\alpha = \frac{R_1}{R_2}$ reprezintă raportul între rezistoarele R_1 și R_2 .

Astfel, pare că modul de comportare a circuitului este determinat doar de acest raport α , rezistențele R_1 și R_2 putând lua orice valoare, atâta timp cât se păstrează raportul dintre ele.

În realitate lucrurile sunt însă ceva mai complicate. Divizorul de tensiune este de obicei integrat în circuite mai mari, către care furnizează o anumită tensiune, deci este folosit în sarcină (vezi secțiunea ??).

Relația 1.6 arată că tensiunea de ieșire nu este afectată de sarcină dacă rezistența de sarcină R_s este mult mai mare decât R_2 , sau altfel spus, dacă $R_2 \ll R_s$. Dacă R_s este impusă și cunoscută, atunci e indicat să alegem R_2 (și implicit R_1 în funcție de raportul α dorit) cât mai mică.

De reținut Valori mici ale rezistențelor R_1 și R_2 cresc precizia circuitului divizor de tensiune.

Pe de altă parte, cu cât alegem rezistențele R_1 și R_2 mai mici, cu atât curentul care le străbate este mai mare. Asta înseamnă că puterea consumată de către rezistențe $P = RI^2$ va fi mai mare, deci ele se vor încălzi mai mult și se pot distruge. Dimensiunea rezistoarelor arată maximum de putere care e disipată înainte ca temperatura să crească excesiv de mult (Fig. 1.21).

De reținut Valori mari ale rezistențelor R_1 și R_2 scad curentul deci și puterea consumată.

Exercițiul 1.12 Determinați curentul maxim care poate străbate un rezistor cu rezistența de $180\ \Omega$ și o putere maximă admisă de $0.25\ \text{W}$.

În alegerea valorilor rezistențelor trebuie căutat echilibrul între precizie și putere consumată.

Exercițiul 1.13 Proiectați un divizor de tensiune cu 4, care va fi alimentat cu o tensiune de $8\ \text{V}$, conform Fig. 1.22. Rezistențele folosite au o putere maximă admisă de $0.25\ \text{W}$.

1.8 Pregătirea și notarea laboratorului

Înainte de lucrarea practică: recomandare

Fără o pregătire prealabilă a laboratorului, nu veți avea timp să terminați lucrarea practică. De aceea vă recomandăm următoarele:

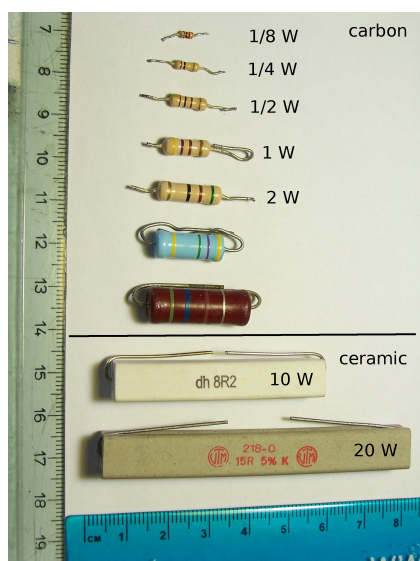


Figura 1.21: Rezistoare – puteri maxim admise [3].

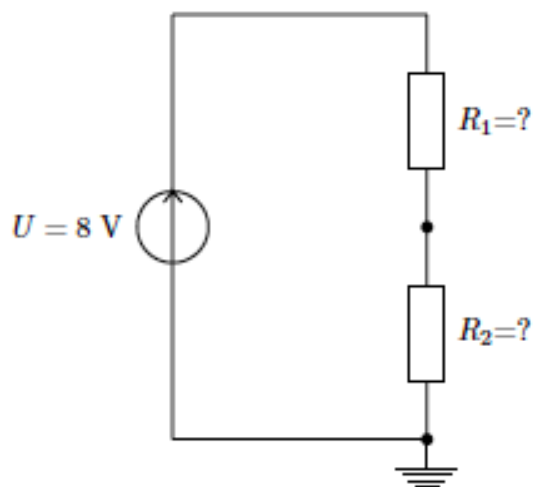


Figura 1.22: Proiectarea unui divizor de tensiune cu 4. Rezistențele au o putere maximă admisă de 0.25 W.

- Citiți cu atenție secțiunile 1.1, 1.2, 1.3 ale acestei lucrări.
- Rezolvați cele două chestionare de antrenament de pe moodle până în preziua laboratorului.
- Pentru bonus. Rezolvați exercițiile scriind răspunsuri pe foi, pregătind foi de calcul *.xls*, circuite (*.cir* sau *.asc*). Prindeți toate aceste foi într-un dosar de laborator.

În timpul lucrării practice: 100%

Acest punctaj va fi acordat în urma experimentelor și completării celui de-al treilea chestionar, în timpul laboratorului.

După lucrarea practică: pentru bonus

Completați un referat de laborator cu rezultatele experimentelor și concluzii personale. Documentul va fi scris de mână și va conține foi imprimate acolo unde este cazul. Referatul trebuie să aibă un cuprins coerent, de exemplu:

1. Introducere
2. Rezolvarea exercițiilor
3. Rezultate experimentale
4. Concluzii personale



Referințe

- [1] Analog Devices Linear Technology. *LTspice*. URL: <http://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators.html#LTspice>.
- [2] LTwiki. *LTSpice Wiki*. URL: http://ltwiki.org/index.php?title=LTspice_Annotated_and_Expanded_Help.
- [3] David Ludovino. *Own work*, CC BY-SA 3.0. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27918950>.
- [4] *Potentiometru*. URL: <https://www.elprocus.com/voltage-divider-rule-with-examples/>,%20<http://www.creeaza.com/tehnologie/electronica-electricitate/Potentiometrul851.php>.
- [5] *Puntea Wheatstone*. URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/wheatstone-bridge.html>.
- [6] *Senzori rezistivi*. URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/voltage-dividers/all>.

