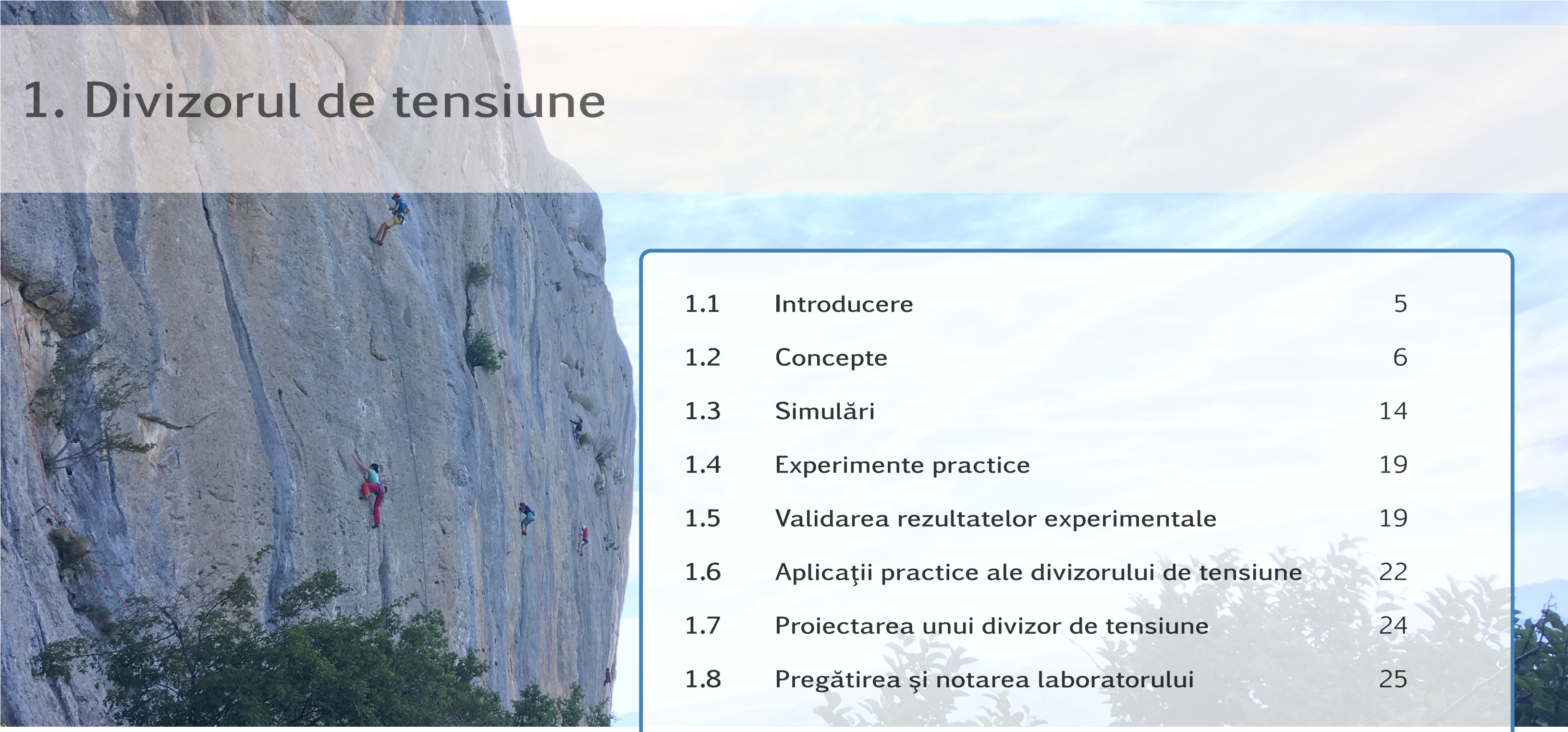
@'

Laborator de circuite electrice
- concepte, simulări, experimente -

versiune din 4 martie 2020

Mihai Popescu, Ruxandra Bărbulescu, Sorin Lup,
Gabriela Ciuprina, Daniel Ioan

Cuprins



1. Divizorul de tensiune

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 şi tensiunea de ieşire extrasă de pe una din componente (u_1 sau u_2). Divizorul rezistiv de tensiune este adesea folosit pentru a crea tensiuni de referinţă, ca în Fig. 1.2 sau pentru a reduce tensiunea provenită dintr-o reţea complexă.

Scopul lucrării

Obiectivul acestei lucrări de laborator este ilustrarea modului în care se îmbină cele trei aspecte ale domeniului Calculelor stiintifice în inginerie (CSE – *Computational science and engineering*): conceptele (lumea ideilor), simulările (lumea virtuala) şi 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 si evidenţierea 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

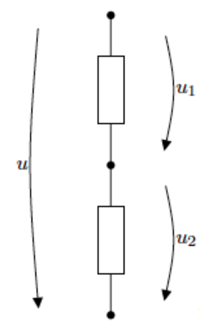


Figura 1.1: Divizorul de tensiune.

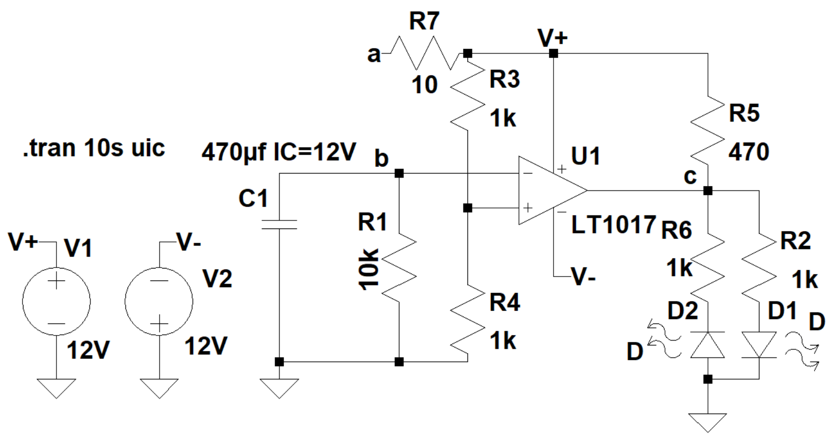


Figura 1.2: Circuit comparator cu tensiunea de referinta data de un divizor de tensiune format din R_3 şi R_4.

la circuite mai complicate, cu elemente neliniare sau mărimi variabile în timp să se facă relativ uşor.

Concepte teoretice utile

Pentru a putea efectua cu succes această lucrare trebuie să revedeţi următoarele concepte prezentate la curs: intensitatea curentului electric, tensiunea electrică, potenţialul electric, legile lui Kirchhoff, rezistorul dipolar liniar, sursa ideală de tensiune.

1.2 Concepte

Această secţiune descrie conceptele necesare înţelegerii lucrării. Sunt analizate circuitele care vor fi studiate, prezentându-se nu numai aspectele strict legate de teoria circuitelor, dar şi conexiunile cu teoria sistemelor. Tot aici sunt explicate şi concepte de metode numerice ce vor permite estimarea cantitativă a preciziei rezultatelor.

Circuitele studiate în această lucrare

Divizorul de tensiune rezistiv în gol

Figura 1.3 prezintă schema de principiu a unui divizor de tensiune rezistiv, în diferite variante de desenare. Tensiunea $U = V_+ - V_- = V_+|_{V_-=0}$ se aplică ansamblului de rezistoare conectate în serie, distribuindu-se în U_1 şi $U_2 = V_a - V_- = V_a|_{V_-=0}$.

Cu notaţiile din Fig. 1.3 se demonstrează uşor că:

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \tag{1.1}$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U. \tag{1.2}$$

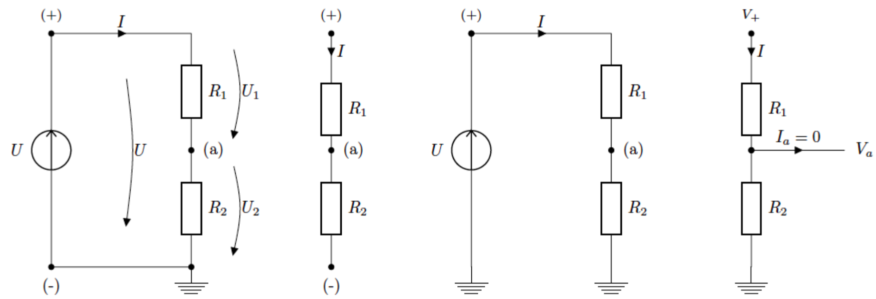


Figura 1.3: Divizorul de tensiune – schema de principiu în diferite variante de desenare.

Exerciţiul 1.1 (Pe foaie de hârtie, înainte de laborator) Demonstraţi relaţiile (1.1) şi (1.2).

De reţinut Tensiunea pe fiecare rezistor al unui divizor de tensiune e proporţională cu rezistenţa rezistorului:

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

Dacă notăm cu α raportul dintre cele două rezistenţe astfel:

$$\alpha = \frac{R_1}{R_2}, \tag{1.3}$$

atunci putem rescrie relaţia (1.2) în funcţie de acest raport:

$$U_2 = \frac{1}{1+\alpha} U. \tag{1.4}$$

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 reţinut 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. $R_1 \ll R_2 \Rightarrow \alpha \to \infty$, divizor cu ∞
$$U_2 \simeq 0$$

Divizorul de tensiune rezistiv în sarcină

Divizorului de tensiune i se poate conecta o rezistenţă de sarcină la ieşire, în paralel cu R_2, aşa cum este arătat în Figura 1.4.

În acest caz, tensiunea de intrare se repartizează între R_1 şi grupul R_2 în paralel cu R_s. Relaţia dintre tensiunea de ieşire şi cea de intrare devine:

$$U_2 = \frac{R_2 \parallel R_s}{R_1 + R_2 \parallel R_s} U, \tag{1.5}$$

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

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

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

De reţinut Se poate crea un divizor cu $(1+\alpha)$ doar dacă rezistenţa 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 şi R_4). Tensiunea de la bornele celor două grupuri de rezistoare este aceeaşi şi egala cu $U = V_+$. Fiecare grup de rezistoare funcţionează ca un divizor de tensiune, astfel că putem extinde relaţia (1.2) pentru tensiunile caracteristice punţii, notate cu V_a şi V_b:

$$V_a = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \tag{1.7}$$

$$V_b = \frac{R_3}{R_3 + R_4} U. \tag{1.8}$$

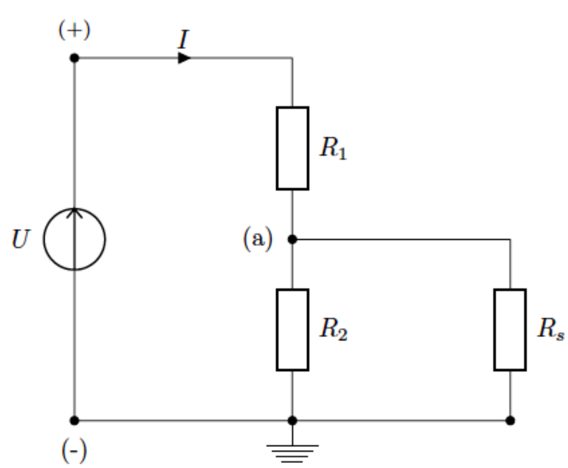


Figura 1.4: Divizorul de tensiune în sarcină – schema de principiu.

Puntea este *în echilibru* dacă $V_a = V_b$, adică dacă cele două divizoare au acelaşi factor de divizare. Egalând relaţiile (1.7) şi (1.8), reiese uşor că pentru echilibru trebuie să avem relaţia următoare între rezistenţe: $R_1R_3 = R_2R_4$.

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

Circuitele ca sisteme

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

Sursele din circuit furnizează *excitaţiile* circuitului sau *semnalele de intrare*, iar mărimile de interes (tensiuni sau curenţi) reprezintă *semnalele de ieşire* sau *răspunsurile*.

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

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

Exerciţiul 1.3 (pe foaie de hârtie, înainte de laborator) Realizaţi o reprezentare sistemică a punţii rezistive.

Propagarea erorilor

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

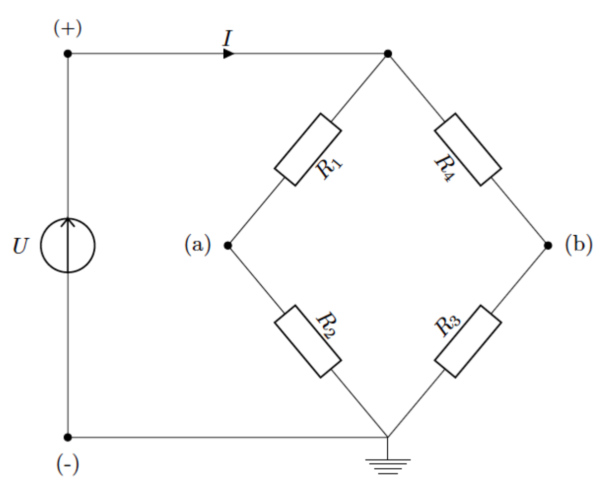


Figura 1.5: Puntea rezistivă – schema de principiu. Tensiunea între (a) şi (b) este zero dacă $R_1R_3 = R_2R_4$.

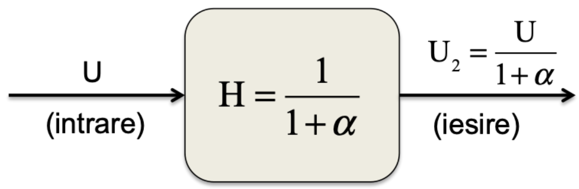


Figura 1.6: Divizorul de tensiune ca sistem e caracterizat de $\alpha = \frac{R_1}{R_2}$.

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

Din această informaţie putem deduce o margine a erorii absolute:

$$\left|R_1 - R_{1,\mathrm{nom}}\right| \leq r_1 R_{1,\mathrm{nom}} \Longrightarrow a_1 = r_1 R_{1,\mathrm{nom}}$$

De reţinut Marginea erorii absolute se calculează ca fiind marginea erorii relative (toleranţa) înmulţită cu valoarea nominală.

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

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

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

Marginea erorii absolute este:

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

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

De reţinut Toate componentele au toleranţe de fabricaţie! Ce legătură credeţi că există între preţul unei componente şi toleranţa ei?

Pentru a putea estima efectul acestor toleranţe 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) independenţi:

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

[1] Aceste teoreme le veţi studia sau le-aţi studiat deja la disciplina Metode numerice

Perturbaţia absolută a rezultatului Δy se poate aproxima în funcţie de perturbaţiile absolute ale datelor de intrare ca:

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

De unde:

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

Marginea erorii absolute a rezultatului este în consecinţă:

$$a_y = \left|\frac{\partial f}{\partial x_1}\right| a_{x_1} + \left|\frac{\partial f}{\partial x_2}\right| a_{x_2} + \ldots + \left|\frac{\partial f}{\partial x_p}\right| a_{x_p}. \tag{1.9}$$

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:

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

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

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

Paranteza 1.1 Cum se analizează erorile relative?
Din (1.2) rezultă că

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

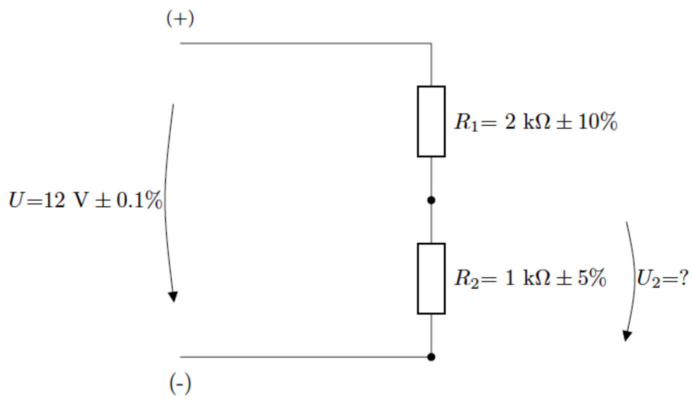


Figura 1.7: Divizor de tensiune, elemente cu toleranţe.

Marginea erorii relative a rezultatului este:

$$r_y = \left|\frac{x_1}{f}\frac{\partial f}{\partial x_1}\right| r_{x_1} + \left|\frac{x_2}{f}\frac{\partial f}{\partial x_2}\right| r_{x_2} + \ldots + \left|\frac{x_p}{f}\frac{\partial f}{\partial x_p}\right| r_{x_p}. \tag{1.12}$$

Exemplul 1.4 Înmulţirea 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:

$$r_y = r_{x_1} + r_{x_2}. \tag{1.13}$$

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

De reţinut

1. La adunare şi scădere marginile erorilor **absolute** se adună.
2. La înmulţire şi împărţire marginile erorilor **relative** se adună.

Exemplul 1.5 Fie divizorul de tensiune în care datele au toleranţele marcate pe Fig. 1.7.
Să calculăm

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U, \tag{1.14}$$

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

1. Adunarea $R_1 + R_2$
2. Împărţirea dintre R_2 şi rezultatul adunării de la punctul 1.
3. Înmulţirea dintre U şi 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. $R_1 = 2\ \text{k}\Omega \pm 10\%, R_2 = 1\ \text{k}\Omega \pm 5\% \implies R_1 + R_2 = ?$
   Valoarea nominală $R_1 + R_2 = 3\ \text{k}\Omega$.

$$a_{R_1} = e_{R_1} R_1 = \frac{10}{100} \cdot 2\ \text{k}\Omega = 0.2\ \text{k}\Omega$$
$$a_{R_2} = e_{R_2} R_2 = \frac{5}{100} \cdot 1\ \text{k}\Omega = 0.05\ \text{k}\Omega$$
$$\implies a_{R_1+R_2} = a_{R_1} + a_{R_2} = 0.25\ K\Omega.$$

   La adunare ştim 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. $R_2 = 1\ \text{k}\Omega \pm 5\%, R_1 + R_2 = 3\ \text{k}\Omega \pm 8.4\% \implies \frac{R_2}{R_1+R_2} = ?$
   La împărţire marginile erorilor relative se adună, deci:

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

3. $\frac{R_2}{R_1+R_2} = \frac{1}{3} \pm 13.4\%, U = 12\ \text{V} \pm 0.1\% \implies U_2 = \frac{R_2}{R_1+R_2} U = ?$
   La înmulţire 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 cacule să le faceţi într-o foaie de calcul organizată ca în Fig. 1.8.

Exerciţiul 1.4 (fişier .xls, înainte de laborator) Reluaţi raţionamentul de mai sus şi completaţi o foaie de calcul în care să evaluaţi semnalul de ieşire U_2 pentru un divizor de tensiune în sarcină, considerând următoarele toleranţe pentru parametri şi semnalul de intrare: $R_1 = 2\ \Omega \pm 5\%$, $R_2 = 4\ \Omega \pm 10\%$, $R_s = 4\ \text{k}\Omega \pm 10\%$, $U = 18\ V \pm 0.5\%$.

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* [**ltspice**]. 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 referinta
* 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
```

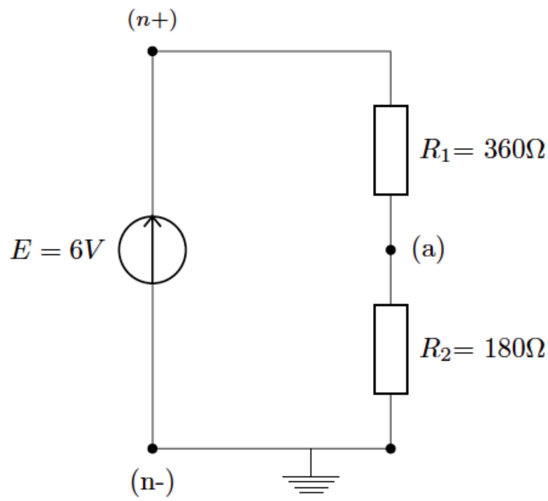


Figura 1.9: Divizor de tensiune în gol, exemplu. Stânga: circuit cu noduri etichetate, dreapta: sens curent pentru SIT.

– Lucrul cu *schematics* are avantajul că este intuitiv. Dezavantajul provine din faptul că fişierul generat nu este portabil între diferite simulatoare. Dacă se doreşte însă migrarea către un alt simulator, atunci se poate exporta netlistul asociat. Un alt dezavantaj este acela că, în cazul elementelor nepolarizate (de ex. rezistoarele), utilizatorul nu are un control imediat al sensului de referinţă al laturii. Pentru a înţelege acest sens de referinţă trebuie inspectat netlistul.

Hands-on it!

Vom exemplifica generarea unui netlist pentru un divizor de tensiune rezistiv, în gol, format din două rezistoare $R_1 = 360\ \Omega$ şi $R_2 = 180\ \Omega$, la bornele căruia se aplică o tensiune de 6 V, ca in 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 şi se etichetează nodurile. Eticheta nodului de masă va fi obligatoriu 0.

3. Se aleg sensuri de referinţă pentru curenţi. Fiecare latură devine orientată, de la un nod iniţial la un nod final.

> **De reţinut** În cazul surselor ideale de tensiune este obligatorie reprezentarea sensului de referinţă al curentului ca în Fig. 1.9 dreapta.

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

```
* Divizorul de tensiune
* in gol

VE n+ 0 6
R1 n+ a 360
```

```
R2 a 0 180
.op
.end
```

– Liniile care încep cu * reprezintă comentarii.

– Prima linie din fişier este intotdeauna interpretată ca un comentariu.

– Fiecare linie reprezintă o latura (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_{nume} n+ n− valoare
unde *n+* reprezintă nodul iniţial al laturii, *n-* reprezintă nodul final, iar *valoare* reprezintă tensiunea electromotoare.

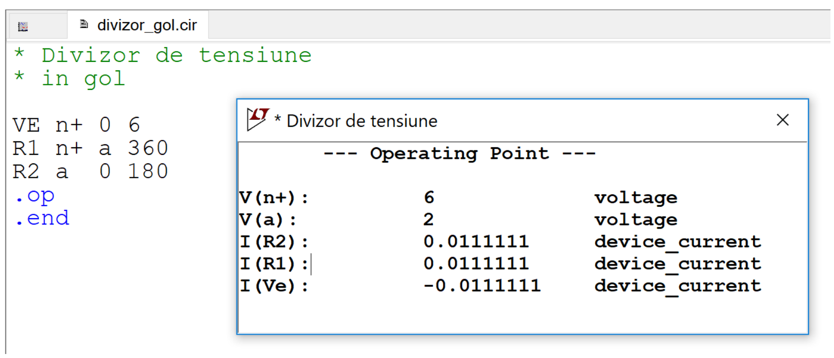


Figura 1.10: Divizor de tensiune în gol – rezultatul simulării.

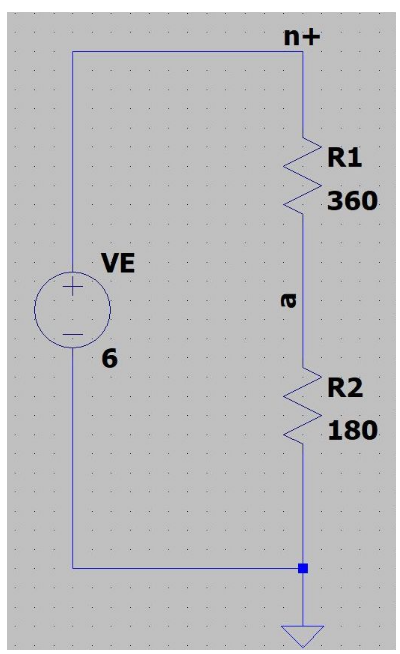


Figura 1.11: Divizor de tensiune în gol – circuitul în *schematics*.

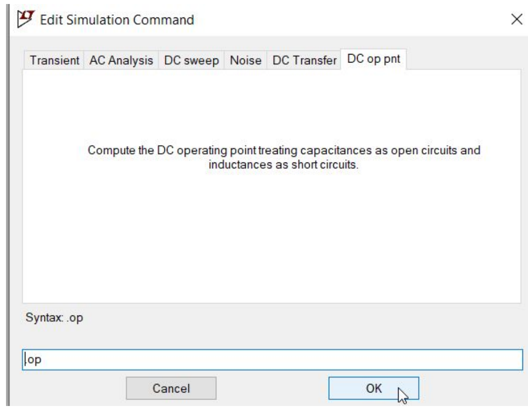


Figura 1.12: Divizor de tensiune în gol – fereastră de stabilire a tipului de simulare.

– Sintaxa liniei de tip R este:
  $\mathrm{R}_{\mathrm{nume}}$ n+ n– valoare
  unde *n+* reprezintă nodul iniţial al laturii, *n-* reprezintă nodul final, iar *valoare* reprezintă rezistenţa.
– Nodul de masă are intotdeauna eticheta 0 şi 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 funcţionare*)
– Liniile de după *.end* sunt ignorate.

Rezultatul simulării acestui netlist este Fig. 1.10. Observaţi că V_a = 2 V, aşa cum era asţeptat, divizorul fiind cu 3.

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

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

Mai multe detalii despre SPICE se găsesc în [**ltspice**] şi [**ltspicewiki**].

Paranteza 1.2 **(facultativ)** Toleranţe în Spice
LTSpice permite descrierea elementelor cu toleranţe, una dintre metode fiind analiza Monte Carlo (Fig. 1.13). Se definesc trei parametri care reprezintă toleranţele pentru R_1, R_2 şi U. Valorile celor trei mărimi sunt înlocuite cu un model Monte Carlo, care pentru sintaxa $mc(val, tol)$ variază valoarea val aleatoriu conform unei distribuţii uniforme între $val(1 + tol)$ şi $val(1 - tol)$. În concluzie, aceste valori reprezintă marginile erorilor relative ale elementelor (toleranţele).

Vom considera că rezistoarele au toleranţa 5%, iar tensiunea de alimentare U are marginea erorii absolute egală cu 0.1 V. Remarcaţi că de această dată este dată eroarea absolută pentru tensiunea de intrare, nu cea relativă ca până acum. Toleranţele definite in Spice sunt relative, deci trebuie calculată marginea erorii relative pentru U,

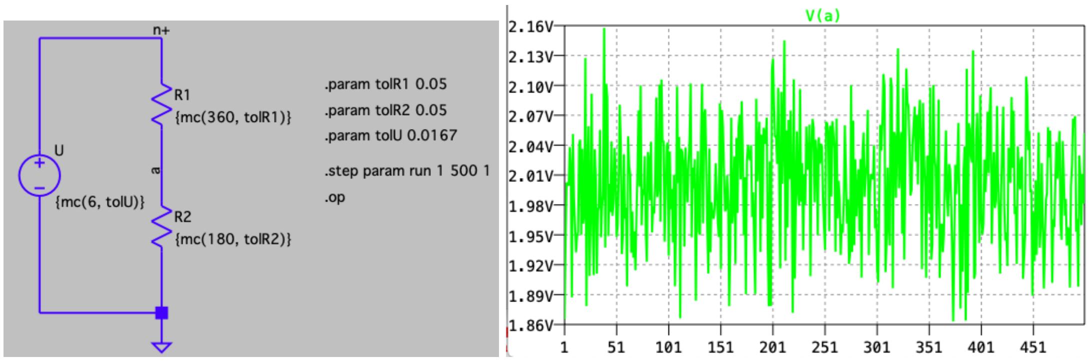


Figura 1.13: Divizor de tensiune în gol – mărimi cu toleranţe, schematics şi rezultate.

care este:

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

Directiva:
.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 şi valoarea maximă pentru tensiunea de ieşire $U_2 = V_a$, putem calcula marginea erorii relative care nu ar trebui să depăşească 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 şi cazul cel mai defavorabil (*worst-case scenario*), în care datele au valorile minime şi maxime. Pentru acest lucru înlocuim modelul Monte Carlo cu o funcţie proprie, care pentru prima execuţie întoarce valorile nominale, iar pentru următoarele execuţii întoarce aleatoriu valorile minime sau maxime pentru cele trei mărimi (funcţia *flat* întoarce un număr aleatoriu între -1 şi 1).

Fig. 1.14 conţine schema şi rezultatele pentru 50 de simulari de acest tip. Valorile tensiunii de ieşire 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 şi valorile rezultate în urma simulării, ca in Fig. 1.15.

Exerciţiul 1.7 (fişier *.cir* sau *.asc*, fişier *.xls*, înainte de laborator) Analizaţi şi simulaţi divizorul de tensiune în sarcină. Pregătiţi o foaie de calcul potrivită.

Exerciţiul 1.8 (fişier *.cir* sau *.asc*, fişier *.xls*, înainte de laborator) Analizaţi şi simulaţi puntea rezistivă. Pregătiţi o foaie de calcul potrivită.

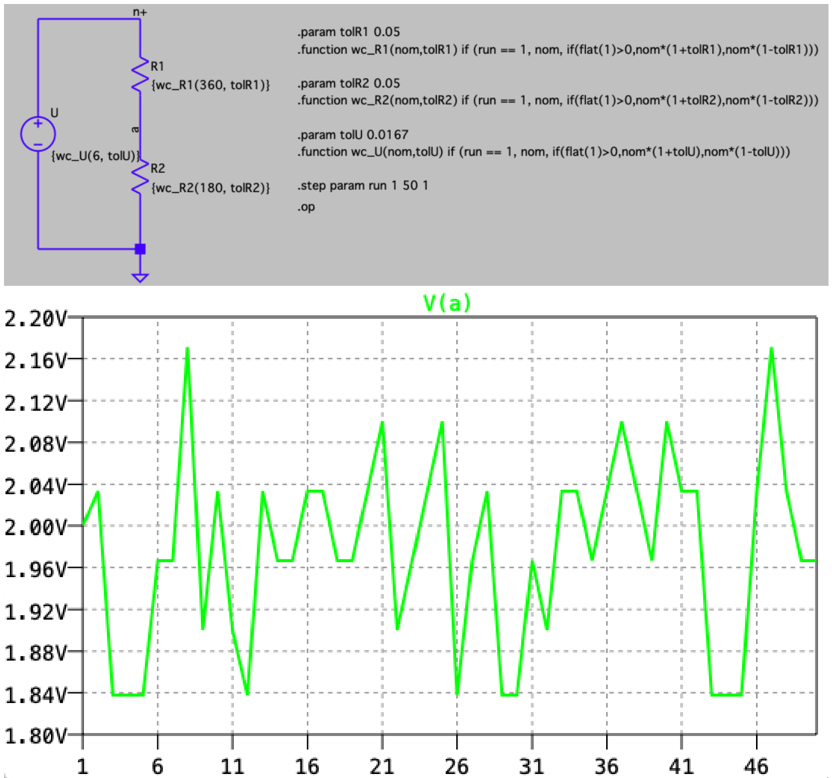


Figura 1.14: Divizor de tensiune în gol – mărimi cu toleranţe, worst-case scenario, schematics şi rezultate.

1.4 Experimente practice

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

1.5 Validarea rezultatelor experimentale

Influenţa 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 rezistenţe interne.

În cazul voltmetrelor, acestea fiind conectate întotdeauna în paralel cu componentele

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 şi simulate.

aflate sub test, orice curent prin voltmetru va modifica curentul total din circuit, ducând inevitabil şi la modificarea tensiunii reale din circuit. Un voltmetru ideal are o rezistenţă internă infinită, astfel încât curentul care trece prin acesta să fie zero. În cazul unui voltmetru real, trebuie să ne închipuim rezistenţa internă a acestuia în paralel cu elementul de interes, ca o rezistenţă de sarcină.

Exerciţiul 1.9 Ce valoare indică voltmetrul din Fig. 1.16, dacă:

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

Validare

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

De reţinut Validarea rezultatelor experimentale Valoarea analitică/simulată ± eroarea ei trebuie să se afle în intervalul [valoare măsurată – toleranţă, valoare măsurată + toleranţă].

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

De reţinut 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 semnficative, şi două zecimale exacte.

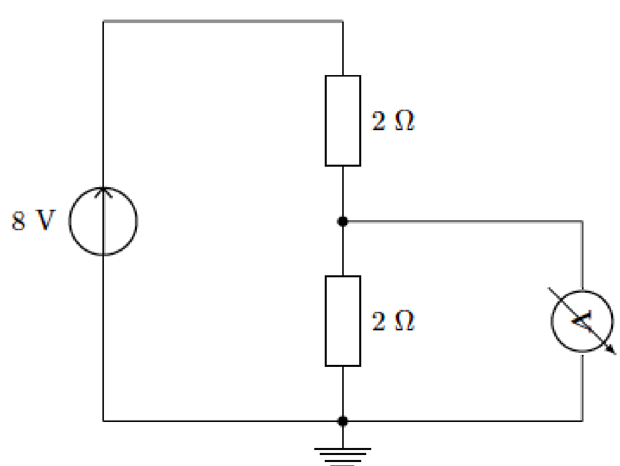


Figura 1.16: Divizorul de tensiune – influenţa aparatului de măsură.

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 şi pot fi întotdeauna eliminate folosind un factor 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 reţinut 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 şi marginea erorii absolute asociată se raportează cu exact acelaşi număr de zecimale exacte (număr de cifre după virgulă).

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

3. Atât valorile măsurate cât şi erorile absolute corespunzătoare trebuie să aibă aceeaşi unitate de măsură.

4. Raportarea trebuie să fie consistentă în notaţii: dacă o valoare masurată este scrisă ştiinţific ($2.3 \cdot 10^2$) atunci şi eroarea absolută va fi scrisă tot ştiinţific.

5. La efectuarea de operaţii elementare, rezultatul nu va avea mai multe cifre semnificative decât operandul cu cele mai puţine cifre semnificative. Motivaţia stă în faptul că rezultatul nu poate fi mai precis decât valoarea de intrare cea mai puţin precisă. Precizia nu poate fi îmbunătăţită prin efectuarea de calcule. Pentru minimizarea erorilor de rotunjire, se pot utiliza mai multe cifre semnificative în calculele intermediare şi se ajustează cifrele semnificative numai pentru rezultatele finale.

   Exemplul 1.10 Cifre semnificative în operaţii elementare:
   $3.5 \cdot 22.3 = 78$, nu 78.05;
   $6.2/833 = 0.0074$, nu 0.007442977;
   $42.4 - 41.62 = 0.8$, $4256 - 24.7 = 4231$, $33.8 + 15.63 = 49.4$.

Exerciţiul 1.10 Exemple de valorile măsurate raportate:

- 0.2 ± 0.321 (incorect)
- 0 ± 2 (corect)
- 3.14 ± 0.02 (corect)
- 3.1421 ± 0.3214 (incorect)
- $(2.34 \pm 0.15) \cdot 10^{-4}$ (corect)
- $(2.34 \pm 0.152) \cdot 10^{-4}$ (incorect)
- 0.2 ± 0.3 (corect)

1.6 Aplicaţii practice ale divizorului de tensiune (facultativ)

Divizorul de tensiune are o mulţime de aplicaţii practice, fiind integrat în multe din dispozitivele cu care interacţionăm zi de zi.

Exerciţiul 1.11 Căutaţi o aplicaţie în care apare un divizor de tensiune. Explicaţi principiul după care este folosit.

Potenţiometrul

Una dintre utilizările cele mai comune ale divizorului de tensiune o reprezintă potenţiometrul [**aplicatii˙potentiometru**]. Cel mai bun exemplu de potenţiometru este butonul de reglare a volumului ataşat unui sistem de muzică (Fig. 1.17).

Potenţiometrul prezintă un buton rotativ care este acţionat manual. Elementul mobil, numit şi 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 rezistenţelor şi implicit coeficientul α de divizare şi tensiunea de ieşire (Fig. 1.18).

Cu alte cuvinte, un potenţiometru acţionează precum un divizor variabil de tensiune, iar coeficientul de divizare este dat de poziţia periei de-a lungul bandei rezistive.

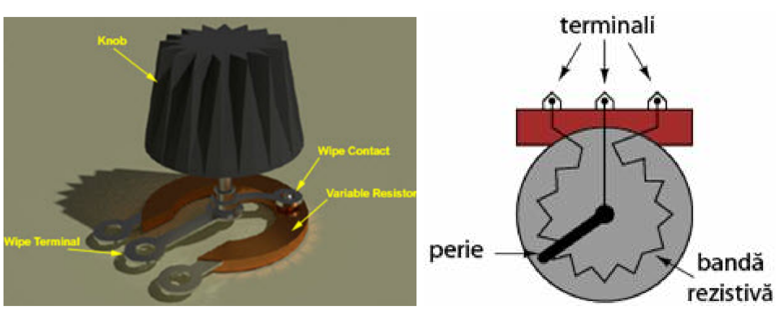


Figura 1.17: Potenţiometrul – mod de funcţionare

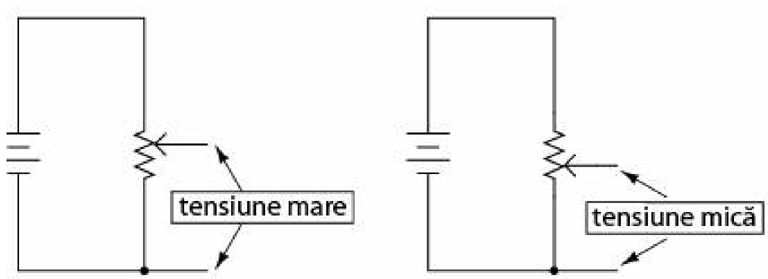


Figura 1.18: Potenţiometrul – tensiunea preluată se modifică în funcţie de poziţia punctului de contact între perie şi banda rezistivă.

Senzori rezistivi

O mare parte din senzorii din lumea reală sunt dispozitive rezistive [**aplicatii˙senzori˙rezistivi**]. Să luăm exemplul unui senzor de control al luminii (fotocelulă), care poate aprinde sau stinge becul unei veioze/lustre automat, în funcţie de lumina ambientală. Fotocelula conţine o rezistenţa variabilă, proporţională cu cantitatea de lumină captată.

Tensiunea fiind mult mai uşor de măsurat decât rezistenţa, pentru determinarea rezistenţei fotocelulei se adaugă un alt rezistor (cu rezistenţa fixă şi cunoscută) în circuit în serie cu senzorul, formându-se astfel un divizor de tensiune. Prin măsurarea tensiunii de ieşire, rezistenţa senzorului poate fi calculată uşor, folosind relaţiile divizorului de tensiune (Fig. 1.19).

Exemplul 1.11 O fotocelulă are rezistenţa variabilă între 1 kΩ la lumină şi aproximativ 10 kΩ la întuneric. Dacă se montează în serie o rezistenţă de valoare fixată la 5.6 kΩ şi se măsoară tensiunea de ieşire, se poate determina valoarea rezistenţei variabile şi 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 kΩ	5.6 kΩ	5.6	0.76 V
Semiobscur	7 kΩ	5.6 kΩ	0.8	2.78 V
Întuneric	10 kΩ	5.6 kΩ	0.56	3.21 V

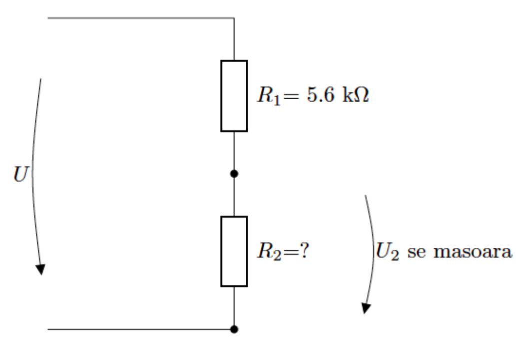


Figura 1.19: Senzor rezistiv. Valoarea rezistenţei R_2 a senzorului poate fi determinată prin crearea unui divizor de tensiune.

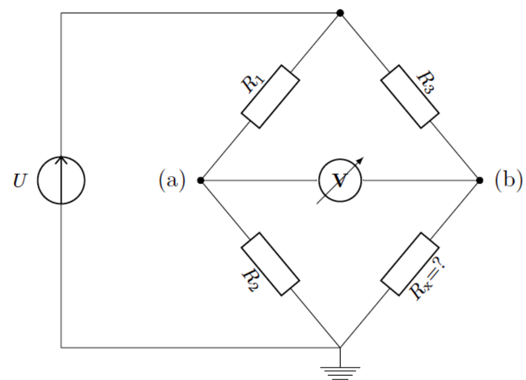


Figura 1.20: Puntea Wheatstone. Valoarea rezistenţei R_x se determină prin echilibrarea punţii şi folosind relaţia între rezistoare pentru punte echilibrată.

Alte exemple de acest tip sunt senzori care conţin rezistenţe sensibile la umiditate, temperatură, forţe.

Puntea Wheatstone

Puntea Wheatstone [**aplicatii˙punte˙wheatstone**] (descrisă în secţiunea **??**) a fost iniţial dezvoltată de Charles Wheatstone pentru a măsura valorile unor rezistenţe şi ca mijloc de calibrare a instrumentelor de măsurare (voltmetre, ampermetre).

Puntea este *în echilibru* dacă $V_a = V_b$, ceea ce se întâmplă dacă relaţia dintre rezistenţe este $R_1 R_x = R_2 R_3$. Pe acelaşi principiu ca senzorii rezistivi, dacă una dintre rezistenţe este variabilă (de exemplu cu valoarea dependentă de lumină), valoarea ei poate fi determinată prin echilibrarea punţii şi folosirea relaţiei între rezistoare pentru o punte echilibrată (Fig. 1.20).

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

1.7 Proiectarea unui divizor de tensiune (facultativ)

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

Astfel, pare că modul de comportare a circuitului este determinat doar de acest raport α, rezistenţele R_1 şi 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 secţiunea **??**).

Relaţia 1.6 arată că tensiunea de ieşire nu este afectată de sarcină dacă rezistenţa de sarcină R_s este mult mai mare decat R_2, sau altfel spus, dacă $R_2 \ll R_s$. Dacă R_s este impusă şi cunoscută, atunci e indicat să alegem R_2 (şi implicit R_1 în funcţie de raportul α dorit) cât mai mică.

De reţinut Valori mici ale rezistenţelor R_1 şi R_2 cresc precizia circuitului divizor de tensiune.

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

De reţinut Valori mari ale rezistenţelor R_1 şi R_2 scad curentul deci şi puterea consumată.

Exerciţiul 1.12 Determinaţi curentul maxim care poate străbate un rezistor cu rezistenţa de 180 Ω şi o putere maximă admisă de 0.25 W.

În alegerea valorilor rezistenţelor trebuie căutat echilibrul între precizie şi putere consumată.

Exerciţiul 1.13 Proiectaţi un divizor de tensiune cu 4, care va fi alimentat cu o tensiune de 8 V, conform Fig. 1.22. Rezistenţele folosite au o putere maximă admisă de 0.25 W.

1.8 Pregătirea şi notarea laboratorului

Înainte de lucrarea practică: recomandare

Fără o pregatire prealabilă a laboratorului, nu veţi avea timp să terminaţi lucrarea practică. De aceea vă recomandăm următoarele:

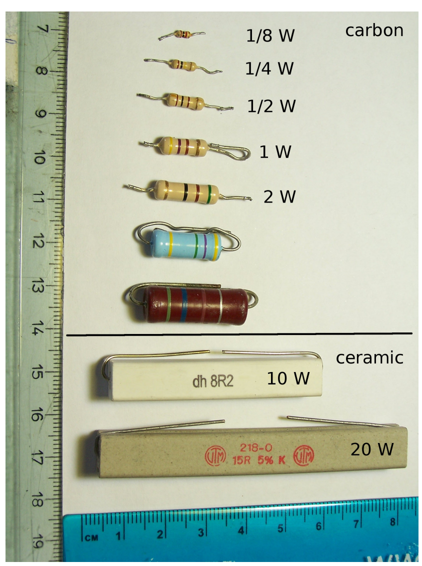


Figura 1.21: Rezistoare – puteri maxim admise [**rezistoare˙puteri**].

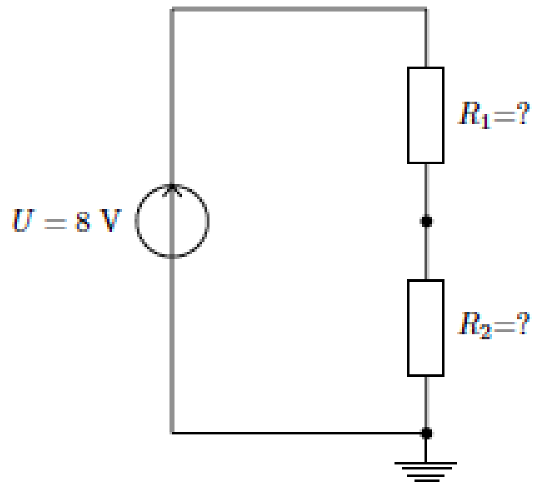


Figura 1.22: Proiectarea unui divizor de tensiune cu 4. Rezistenţele au o putere maximă admisă de 0.25 W.

- Citiţi cu atenţie secţiunile 1.1, 1.2, 1.3 ale acestei lucrări.
- Rezolvaţi cele două chestionare de antrenament de pe moodle până în preziua laboratorului.
- Pentru bonus. Rezolvaţi exerciţiile scriind răspunsuri pe foi, pregătind foi de calcul *.xls*, circuite (*.cir* sau *.asc*). Prindeţi toate aceste foi într-un dosar de laborator.

În timpul lucrării practice: 100%

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

După lucrarea practică: pentru bonus

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

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