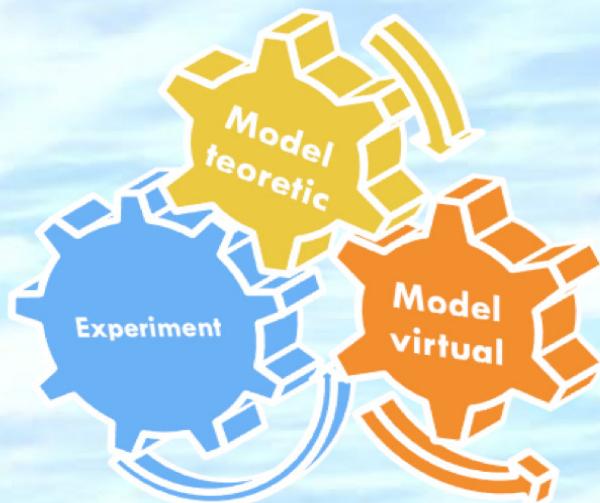


LABORATOR DE CIRCUITE ELECTRICE

- CONCEPTE, SIMULĂRI, EXPERIMENTE -

VERSIUNE DIN 9 MARTIE 2020 (v2)



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

Cuprins



1	Divizorul de tensiune	5
1.1	Introducere	5
1.2	Concepțe	6
1.3	Simulații	14
1.4	Experimente practice	19
1.5	Validarea rezultatelor experimentale	27
1.6	Aplicații practice ale divizorului de tensiune	30
1.7	Proiectarea unui divizor de tensiune	31
1.8	Pregătirea și notarea laboratorului	33
	Referințe	33

1. Divizorul de tensiune



1.1	Introducere	5
1.2	Concepțe	6
1.3	Simulații	14
1.4	Experimente practice	19
1.5	Validarea rezultatelor experimentale	27
1.6	Aplicații practice ale divizorului de tensiune	30
1.7	Proiectarea unui divizor de tensiune	31
1.8	Pregătirea și notarea laboratorului	33

1.1 Introducere

Divizorul de tensiune se bazează pe distribuirea unei tensiuni u între componentecele 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 Calculelor științifice în inginerie (CSE – Computational science and engineering): concepcile (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.

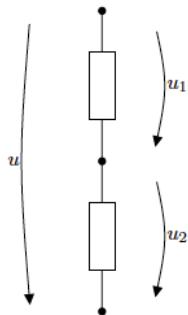


Figura 1.1: Divizorul de tensiune.

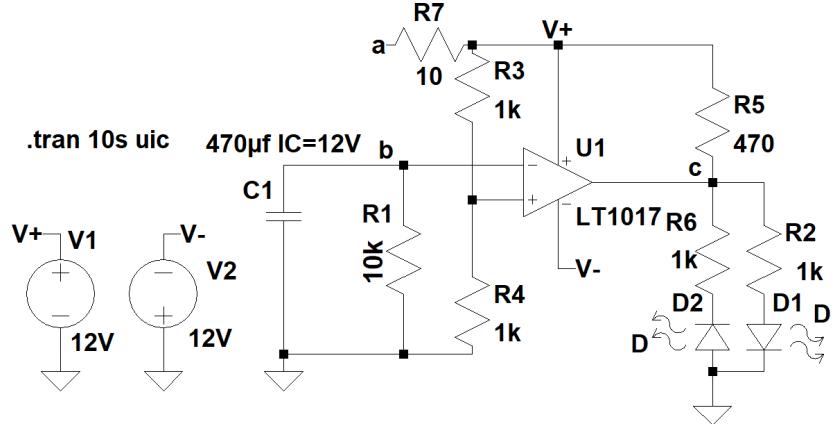


Figura 1.2: Circuit comparator cu tensiunea de referință dată de un divizor de tensiune format din R_3 și R_4 .

1.2 Concepte

Această secțiune descrie conceptele necesare înțelegерii lucrării. Sunt analizate circuitele care vor fi studiate, prezentându-se nu numai aspectele strict legate de teoria circuitelor, dar și conexiunile cu teoria sistemelor. Tot aici sunt explicate și 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 și $U_2 = V_a - V_- = V_a|_{V_-=0}$.

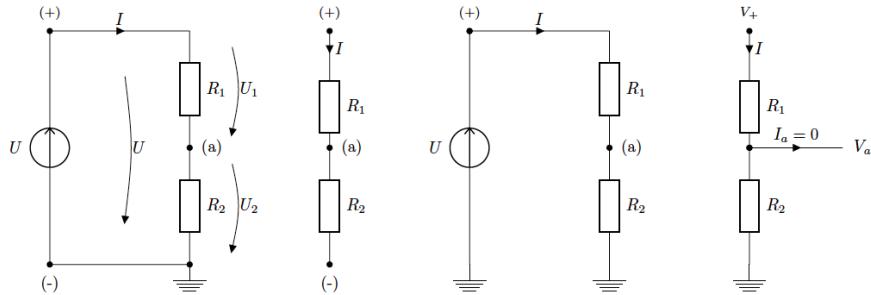


Figura 1.3: Divizorul de tensiune – schema de principiu în diferite variante de desenare.

Cu notațiile din Fig. 1.3 se demonstrează ușor că:

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \quad (1.1)$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U. \quad (1.2)$$

Exercitiul 1.1 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 rezistență 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 :

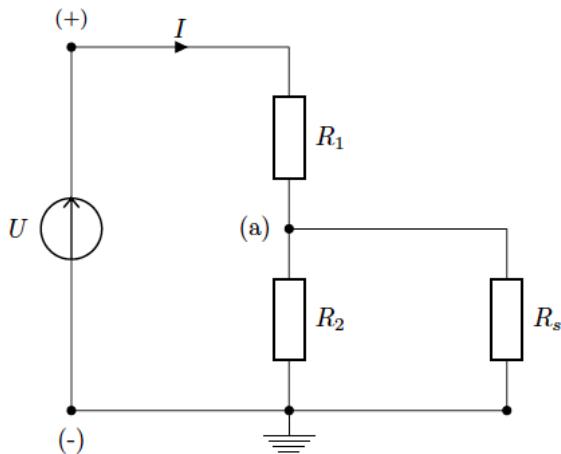


Figura 1.4: Divizorul de tensiune în sarcină – schema de principiu.

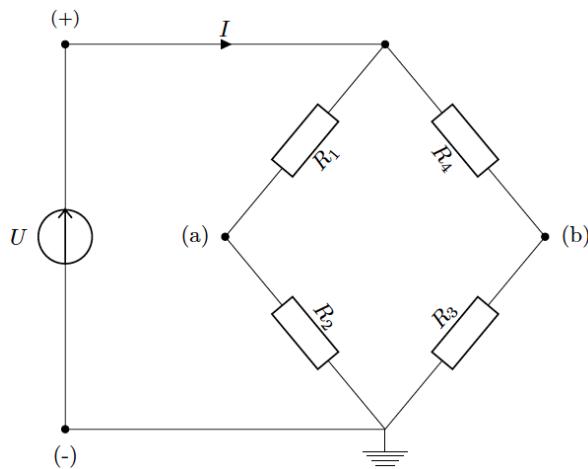


Figura 1.5: Puntea rezistivă – schema de principiu. Tensiunea între (a) și (b) este zero dacă $R_1R_3 = R_2R_4$.

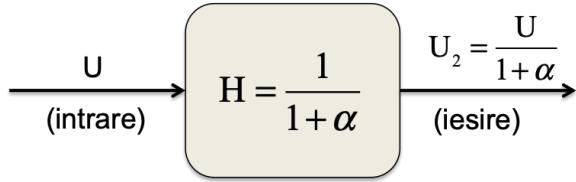


Figura 1.6: Divizorul de tensiune ca sistem e caracterizat de $\alpha = \frac{R_1}{R_2}$.

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

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

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: $R_1 R_3 = R_2 R_4$.

Exercitiul 1.2 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 sursă ideală de tensiune (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 mărurile 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 $U_2 = HU$.

Exercitiul 1.3 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.

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 $R_1 \in [1.9, 2.1] \text{ k}\Omega$.

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:

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

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

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

De unde:

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

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

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

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

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 :

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

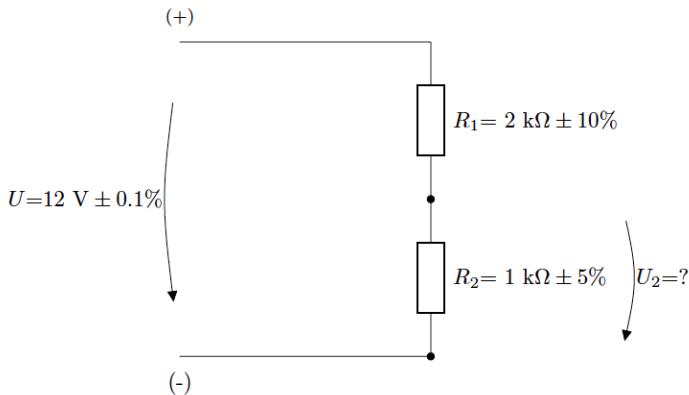


Figura 1.7: Divizor de tensiune, elemente cu toleranțe.

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.

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

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

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

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

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

Eroarea relativă

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

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

La împărțire marginile erorilor relative se adună, deci:

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

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

La înmulțire marginile erorilor relative se adună.

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

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.

Exercitiul 1.4 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: $R_1 = 2 \Omega \pm 5\%$, $R_2 = 4 \Omega \pm 10\%$, $R_s = 4 \text{ k}\Omega \pm 10\%$, $U = 18 \text{ V} \pm 0.5\%$.

Exercitiul 1.5 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 toleranță 5%, iar $U = 20 \text{ V} \pm 0.1\%$.

Chestionar preliminar: Concepte

Exercitiul 1.6 Efectuați chestionarul de antrenament de pe moodle ("Concepte").

1.3 Simulări

LTS spice

LTS spice 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* [2]. 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, LTS spice, 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 migrația 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 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.

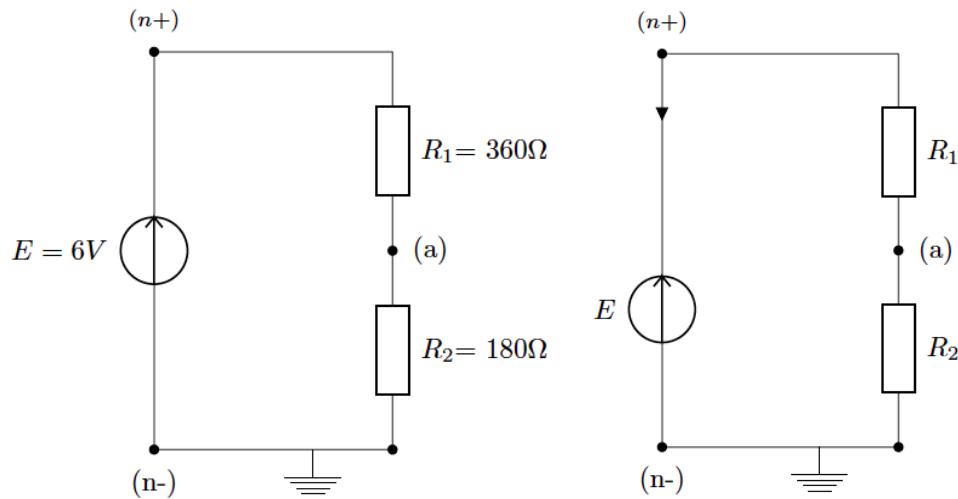


Figura 1.9: Divizor de tensiune în gol, exemplu. Stânga: circuit cu noduri etichetate, dreapta: sens curent pentru SIT.

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 în sens opus sensului tensiunii electromotoare (ca în Fig. 1.9 dreapta).

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

* Divizorul de tensiune
* in gol

VE n+ 0 6

R1 n+ a 360

```
divizor_gol.cir
* Divizor de tensiune
* in gol
VE n+ 0 6
R1 n+ a 360
R2 a 0 180
.op
.end
```

* Divizor de tensiune

--- Operating Point ---

V(n+):	6	voltage
V(a):	2	voltage
I(R2):	0.0111111	device_current
I(R1):	0.0111111	device_current
I(Ve):	-0.0111111	device_current

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

R2 a 0 180

.op
.end

- Liniile care încep cu * reprezintă comentarii.
- Prima linie din fișier este intotdeauna 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 rezistență.
- Nodul de masă are intotdeauna 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 $V_a = 2$ V, așa cum era așteptat, divisorul fiind cu 3.

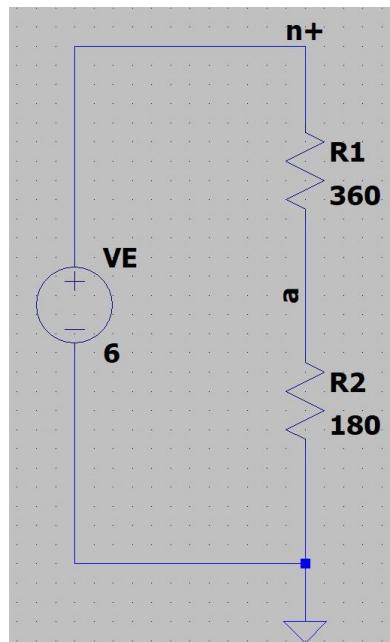


Figura 1.11: Divizor de tensiune în gol – circuitul în *schematics*.

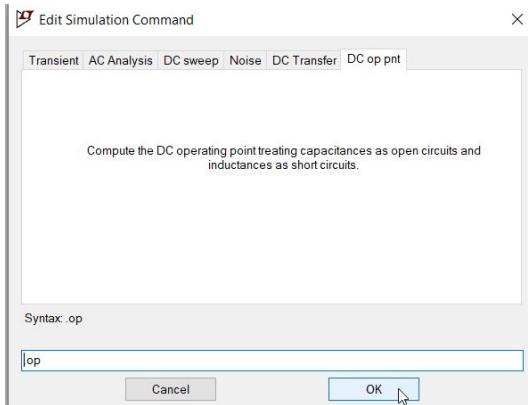


Figura 1.12: Divizor de tensiune în gol – fereastră de stabilire a tipului de simulare.

Generarea schemei se poate face și printr-o interfață grafică (Fig. 1.11). Rularea se face apasând 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 [2] și [3].

Paranteza 1.2 (facultativ) Toleranțe în Spice

LTS spice 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 toleranță 5%, iar tensiunea de alimentare U are marginea erorii absolute egală cu 0.1 V. Remarcați că de această dată este data eroarea absolută pentru tensiunea de intrare, nu cea relativă ca până acum. Toleranțele definite în Spice sunt relative, deci trebuie calculată marginea erorii relative pentru U , 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 și valoarea maximă pentru tensiunea de ieșire $U_2 = V_u$, 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 simulații de acest tip. Valorile tensiunii de ieșire sunt în intervalul [1.8365, 2.17], ceea ce corespunde unei erori relative de $V_a \in [2 - 6.95\%, 2 + 7.325\%]$.

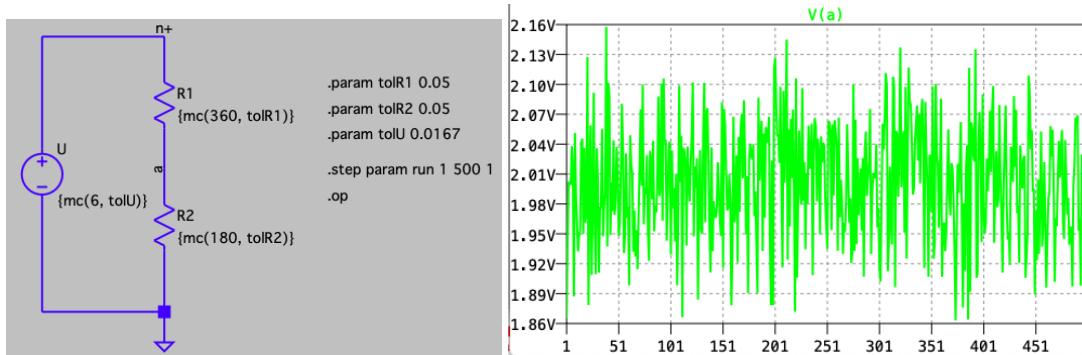


Figura 1.13: Divizor de tensiune în gol – mărimi cu toleranțe, *schematics* și rezultate.

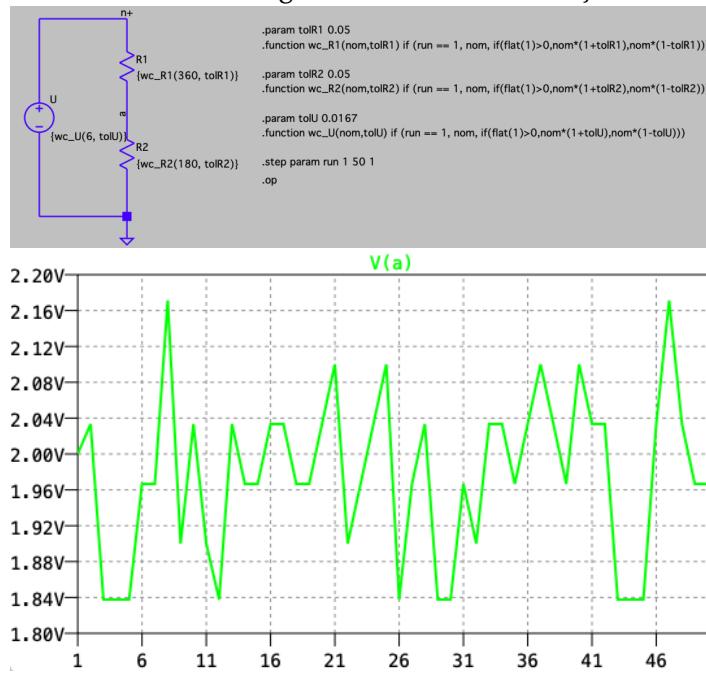


Figura 1.14: Divizor de tensiune în gol – mărimi cu toleranțe, *worst-case scenario*, *schematics* și rezultate.

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.

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

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

Exercitiul 1.7 Analizați și simulați divizorul de tensiune în sarcină. Pregătiți o foaie de calcul potrivită.

Exercitiul 1.8 Analizați și simulați puntea rezistivă. Pregătiți o foaie de calcul potrivită.

1.4 Experimente practice

Aparate, componente și software necesar

Pachetul (*kit-ul*) de laborator pe care îl veți primi conține:

- o unitate multifuncțională ANALOG DISCOVERY 2 (Fig. 1.16, stânga) [1]; unitatea va fi utilizată ca sursă de tensiune variabilă și voltmetru;
- un multimetru digital (Fig. 1.16, dreapta) [5]. Acest aparat va fi folosit pentru măsurarea curenților și a rezistențelor;
- o placă de test (*breadboard*) pe care se va executa montajul experimental, conform schematicelor electrice descrise în lucrare;
- un set de rezistoare din care se vor selecta doar cele necesare rezolvării cerințelor lucrării.

În plus, aveți nevoie de

- interfață software "WaveForms" ce reprezintă setul de instrumente virtuale asociat unității ANALOG DISCOVERY 2 [9] ;
- software de simulare a circuitelor electrice - LTspice [2];
- o foaie de calcul electronică (MsExcel, OpenOffice Calc, etc.).

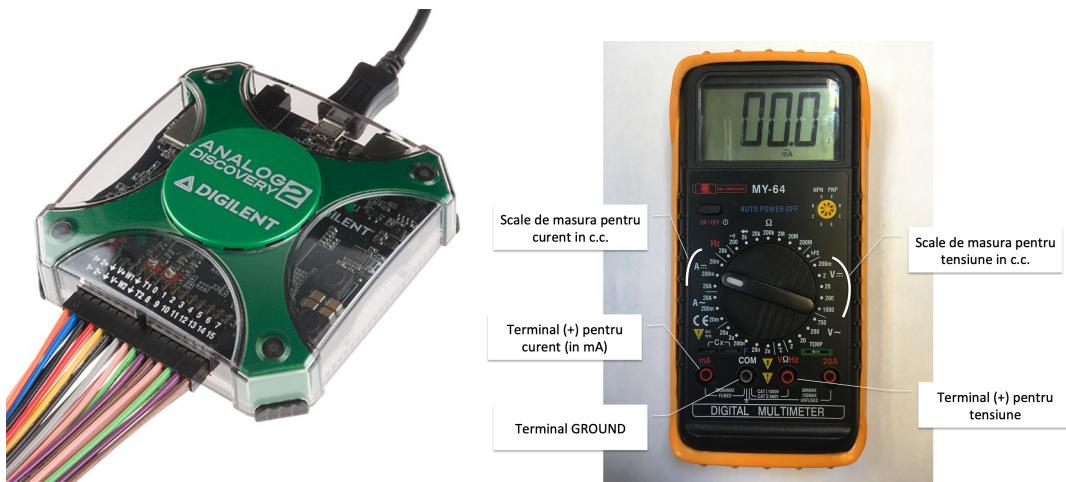


Figura 1.16: Unitatea multifuncțională ANALOG DISCOVERY 2 (stânga) și multimetrul (dreapta).

Lucrarea de laborator – pas cu pas

Experimentele pe care trebuie să le realizați sunt descrise mai jos. În paralel cu ele trebuie să completați chestionarul corespunzător de pe platforma Moodle.

Atenție! Acest chestionar îl puteți completa o singură dată, în timpul laboratorului.

Deschideți chestionarul de pe moodle și începeți a-l completa strict în ordinea apariției problemelor de abordat. Este importantă păstrarea acestei ordini întrucât rezultatele obținute la un moment dat vor folosi pentru etape următoare ale aceluiși chestionar.

Acest chestionar este un "formular de lucru" care trebuie completat pas cu pas.

Exercitiul 1.9 (Pasul 1. Deschiderea chestionarului și rezolvarea chestiunilor teoretice.)
Deschideți chestionarul de pe moodle și răspundeți la primele întrebări care se referă la teoria lucrării.

Fiecare student deschide un astfel de chestionar. Întrebările teoretice primite sunt, în general, diferite. Puteți lucra în echipă pentru a decide răspunsurile corecte.

Exercitiul 1.10 (Pasul 2. Pregătirea componentelor.) Înaintea începerii părții practice a oricărei lucrări de laborator este necesară inventarierea componentelor cu care se va realiza montajul experimental. În acest scop va trebui să determinați, pe baza codului culorilor (Fig. 1.17), valorile rezistențelor înscrise pe corpurile rezistoarelor din kitul primit. Pentru validarea corectitudinii citirilor puteți folosi funcția de ohmetru a multimetrului digital. Constațați faptul că valorile măsurate diferă de cele înscrise prin codul culorilor, în limita toleranței de fabricație indicată tot printr-o culoare.

Observații Pe foaia de calcul electronică puteți verifica, pentru fiecare rezistor, înscriverea valorii determinate cu ohmetrul în limitele toleranței specificate pe corpul rezistorului prin cod de culoare; verificarea se poate face prin implementarea, pe foaia de calcul electronică, a relațiilor din capitolul dedicat propagării erorilor.

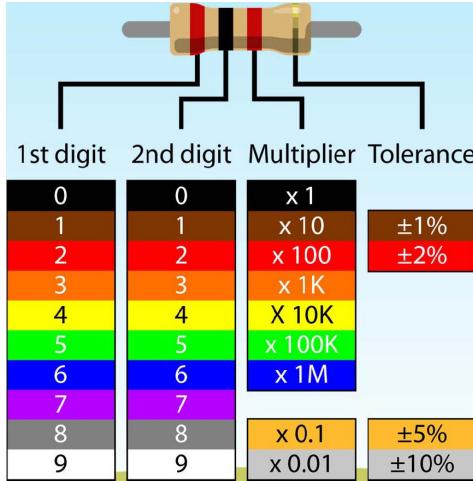


Figura 1.17: Codul de culori pentru un rezistor are 4 benzi. Primele două benzi indică primele două cifre semnificative, iar a treia bandă reprezintă puterea lui 10 cu care se multiplică numărul întreg de 2 cifre codificat de primele două benzi. A patra bandă reprezintă toleranță în procente. Valoarea rezistenței din figură este de $20 \cdot 10^2 \Omega = 2 k\Omega$, cu o toleranță de 5%. Pe scurt: $2 k\Omega \pm 5\%$.

Exercițiul 1.11 (Condiții de proiectare a circuitului) Din setul de rezistoare primite selectați-le pe cele care vă permit realizarea unui divizor cu un raport $k = U_1/U_2$ indicat în enunțul exercițiului. Alegera trebuie să fie făcută astfel încât curentul prin divizor să nu fie mai mic de o valoare $I_{\text{div}_{\min}}$ indicată în formular.

Indicație Determinați mai întâi rezistența totală maximă a divizorului din relația

$$(R_1 + R_2) \leq U_1/I_{\text{div}_{\min}}. \quad (1.15)$$

În continuare, utilizând relațiile (1.2), determinați raportul dintre cele două rezistențe, imediat rezultând și valorile teoretice pentru fiecare dintre ele. În final nu rămâne decât să selectați, din setul disponibil, rezistoarele care au cele mai mari rezistențe apropiate de valorile teoretice determinate, dar mai mici decât acestea, a.î. să fie satisfăcută condiția (1.15).

Exercițiul 1.12 (Verificarea teoretică a circuitului proiectat) Aplicând relația (1.1), determinați valorile curentului prin divizorul de tensiune I_{div} , respectiv a tensiunii U_2 de la ieșirea acestuia, în condițiile în care tensiunea de intrare este cea specificată la exercițiul 1.11. Pentru R_1 , respectiv R_2 folosiți valorile rezistențelor alese în același exercițiu.

Exercițiul 1.13 (Simularea unui model virtual al circuitului proiectat) Folosind una din tehniciile descrise în secțiunea 1.3, conform Fig. 1.10 și/sau Fig. 1.11, simulați funcționarea în gol a divizorului de tensiune, cu valorile date, respectiv determinate la exercițiul 1.11. Completați formularul de lucru cu rezultatele obținute din simulare.

Exercitiul 1.14 (Realizarea circuitului pe placa de test și verificarea parametrilor funcționali la mersul în gol) Pentru a efectua cu ușurință procedurile de măsurare ce vor urma, precum și pentru a reduce posibilitățile de a greși, este foarte important să desenați pe hârtie schema divizorului, etichetând fiecare nod de circuit cu numărul nodului corespunzător de pe placa de test. În acest mod veți putea:

- detecta cu ușurință eventuale erori de montaj;
- stabili clar noduri importante utile pentru a măsură curenți, tensiuni, potențiale;
- urmări în mod coerent și ordonat toate modificările pe care le veți opera în topologia circuitului experimental.

O recomandare a unei posibile așezări (pozări) a componentelor este dată în Fig. 1.18. Tensiunea de intrare U_1 este asigurată din sursa de tensiune continuă pozitivă a unității AD2, între bornele $V+$ și GND. Pentru determinarea curentului prin divizorul de tensiune, conectați multimetrul (setat pe funcția 200mA/cc) în serie cu gruparea $R_1 - R_2$. Pentru măsurarea tensiunii U_2 , folosiți primul canal de măsură al AD2 între bornele +1 și -1.

De reținut Orice modificare în schemă se va efectua fie cu portul USB al AD2 deconectat, fie cu sursele de tensiune operte ("MASTER ENABLE" - în stare OFF).

Pentru efectuarea montajului și a măsurărilor urmați următorii pași:

1. Asigurați-vă că AD2 are cablul USB deconectat din calculator;
2. Realizați montajul experimental conform schemei;
3. Verificați corectitudinea conexiunilor (corespondența dintre schemă și montaj); dacă nu sunteți siguri pe ce ați realizat practic, discutați cu profesorul îndrumător;
4. Conectați cablul AD2 în portul USB al calculatorului;
5. Lansați panoul virtual de instrumente al AD2 din meniul *Windows –> Digilent –> WaveForms*;
6. După ce interfața pornește, se va conecta automat la AD2; acest lucru este confirmat de o diodă luminiscentă (LED) care se aprinde intermitent în unitatea AD2;
7. Deschideți interfața voltmetrului - *Voltage* și activați-o cu "click" pe butonul *Run*;
8. Deschideți interfața surselor de tensiune ("Supplies") și în fereastra *Voltage* a primei surse, setați tensiunea U_1 la valoarea indicată la exercițiul 1.11;
9. Activăți sursa de tensiune prin "click" pe "Positive Supply ($V+$) Rdy", iar apoi pe "Master Enable" care din starea OFF va trece în starea ON.
10. Dacă totul este corect, pe afișajul DC al voltmetrului 1 va apărea tensiunea U_2 , iar pe afișajul multimetrului va apărea intensitatea curentului prin divizor.

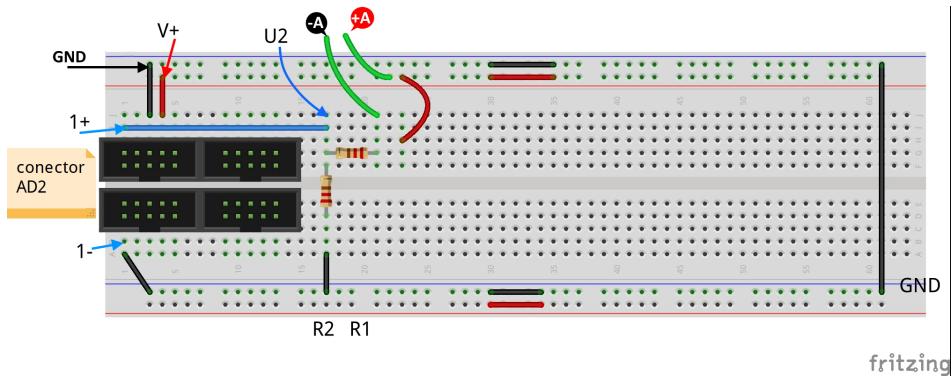


Figura 1.18: Amplasamentul componentelor pentru divizorul de tensiune. Curentul se măsoară conectând multimetru pe scara de mA/cc între bara de alimentare V+ (roșie) și R1. Tensiunea se măsoară prin canalul de măsură 1 al AD2, conectând intrarea 1- la baza rezistorului R2 și intrarea 1+ la ieșirea divizorului de tensiune.

11. Cele două valori trebuie să fie apropiate de valorile determinate din ecuații și prin simulare cu LTspice; dacă acest lucru nu se întâmplă, verificați din nou corectitudinea montajului, respectiv valorile componentelor utilizate;
12. Verificați dacă intensitatea curentului prin divizor este mai mare sau egală cu $I_{div,min}$;
13. Pentru determinarea cu precizie bună a tensiunii de ieșire U_2 , eliminați ampermetrul din circuit, încrât rezistența sa internă modifica raportul de divizare a divizorului de tensiune;
14. Notați pe formularul de lucru valorile măsurate;
15. Dezactivați sursa de alimentare ("Master Enable" în stare OFF).

Observații

- Orice modificare în schemă se va efectua fie cu portul USB al AD2 deconectat, fie cu sursele de tensiune operte ("MASTER ENABLE" - în stare OFF).
- notați-vă pe foaia de calcul electronică rezultatele măsurărilor;
- ca schemă de referință, în loc de schema pe hârtie, puteți folosi și schema generată cu interfață grafică a LTspice, cu condiția de a eticheta și acolo nodurile (butonul *Label Net*) cu aceleași etichete numerice ca ale nodurilor corespunzătoare de pe placă de test.

Exercițiul 1.15 (Stabilirea modului de testare a circuitului în sarcină) Determinați rezistența de sarcină R_s , astfel încât $I_s \leq 50 \cdot I_{div}$. Unde pentru I_{div} considerați valoarea măsurată la exercițiul (1.14). Înțelegeți că rezistența are o toleranță de $\pm 5\%$.

Indicație

Pentru determinările de mai jos, folosiți foaia electronică de calcul.

Calculați mai întâi limita inferioară teoretică a rezistenței de sarcină din condiția:

$$R_s \geq 50 \cdot I_{\text{div}_{\text{masurat}}}. \quad (1.16)$$

Determinați apoi valoarea teoretică ce ar putea fi înscrisă pe un rezistor cu toleranță $\pm 5\%$ astfel ca, în cel mai defavorabil caz, condiția (1.16) să fie respectată.

Exercitiul 1.16 (Testarea circuitului în sarcină) Alegeți rezistorul, cu cea mai mică valoare de rezistență, disponibil în kit-ul primit, care îndeplinește condiția impusă în exercițiul (1.15). Determinați intensitatea curentului de sarcină teoretic folosind pentru rezistență valoarea înscrisă pe rezistorul ales:

$$I_{s_{\text{teoretic}}} = U_{2_{\text{masurat}}} / R_{s_{\text{real}}}. \quad (1.17)$$

Conectați rezistorul de sarcină ales, la ieșirea divizorului deja construit. Măsurați curentul de sarcină $I_{s_{\text{masurat}}}$ și calculați eroarea relativă față de valoarea teoretică determinată. Efectuați aceeași comparație și pentru tensiunea de ieșire U_2 . Selectați (în formularul de lucru) gama de valori corespunzătoare erorilor relative obținute pentru cele două mărimi.

Observații I_s se măsoară cu multimetrul setat pe scala de măsură 2 mA/cc, respectiv tensiunea cu ajutorul canalului de măsură 1 al AD2;

- Orice modificare în schemă se va efectua fie cu portul USB al AD2 deconectat, fie cu sursele de tensiune oprite ("MASTER ENABLE" - în stare OFF).
- Este deosebit de important să respectați procedurile de lucru indicate la exercițiul 1.14;
- Notați-vă pe foaia de calcul electronică rezultatele măsurărilor;

Indicație În Fig. 1.19 este recomandată o posibilă dispunere a componentelor pentru măsurările propuse. De ce, în acest caz, nu este neapărat necesară eliminarea ampermetrului atunci când se măsoară tensiunea de ieșire U_2 ?

Exercitiul 1.17 (Simularea unui model virtual al circuitului la funcționarea în sarcină) Folosind una din tehniciile descrise în secțiunea "LTspice", conform Fig. 1.10 și/sau Fig. 1.11, simulați funcționarea în sarcină a divizorului de tensiune, cu valorile alese pentru rezistențe, respectiv determine la exercițiile 1.11 și 1.16. Completați formularul de lucru cu rezultatele obținute din simulare.

Exercitiul 1.18 (Aplicații ale divizorului de tensiune: puntea rezistivă) Alegeți din kitul de laborator alte două rezistoare, cu rezistențele $R_4 > R_3$, cu care să puteți construi un al doilea divizor de tensiune. Acestea va fi montat în paralel cu primul astfel încât să formeze o punte echilibrată (vedeți și schema electrică de pe formularul de lucru). Alimentați puntea cu tensiunea U_1 indicată la exercițiul 1.11 și măsurați curentul total I_p prin puntea rezistivă astfel construită. Selectați intervalul potrivit din formularul de lucru.

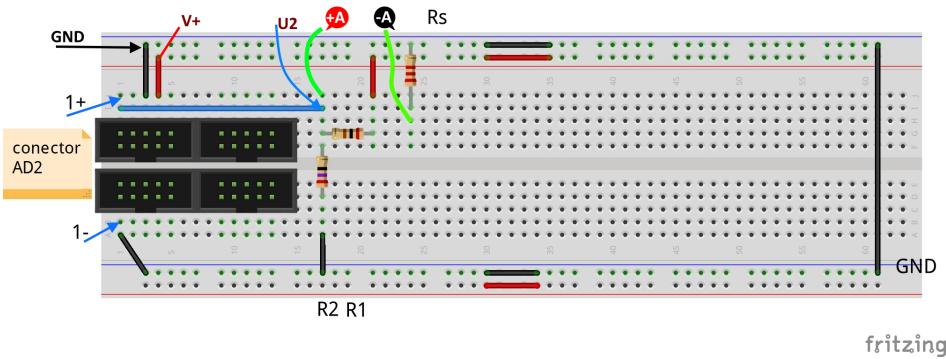


Figura 1.19: Montaj pentru măsurarea parametrilor electrici de ieșire ai divizorului de tensiune în sarcină.

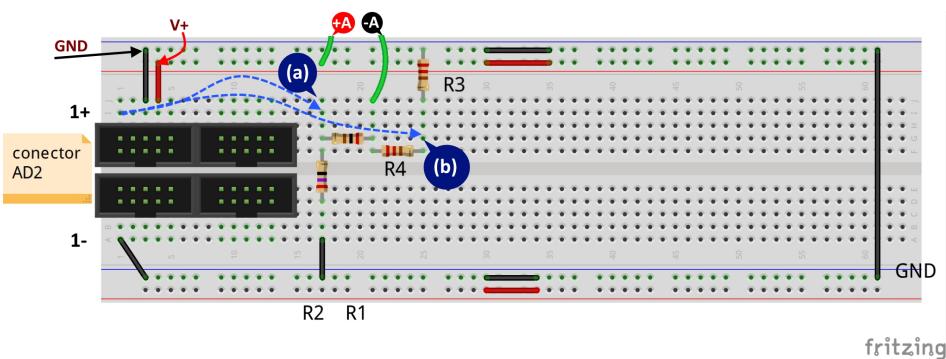


Figura 1.20: Montaj pentru măsurarea parametrilor electrici de ieșire ai punții rezistive în sarcină.

Observații I_p se măsoară cu multimetru setat pe scala de măsură 200 mA/cc;

- Orice modificare în schemă se va efectua fie cu portul USB al AD2 deconectat, fie cu sursele de tensiune opriate ("MASTER ENABLE" - în stare OFF).
- Este foarte important să respectați procedurile de lucru indicate la exercițiul 1.14;
- Notați-vă pe foaia de calcul electronică rezultatele măsurărilor;

Indicație Pentru ca puntea să fie echilibrată este suficient ca cele două divizoare conectate în paralel să aibă același raport de divizare. În Fig. 1.20 este recomandată o posibilă dispunere a componentelor.

Exercițiul 1.19 (Simularea modelului virtual al aplicației) Folosind una din tehniciile descrise în secțiunea 1.3, conform Fig. 1.10 și 1.11, simulați funcționarea în sarcină a punții rezistive construite. Completați formularul de lucru cu rezultatele obținute din simulare.

Exercitiul 1.20 (Caracteristici principale ale funcționării aplicației) Pentru același montaj experimental de la exercițiul 1.18 măsuраti tensiunea între nodurile (a) și (b) ale punții rezistive (Fig. 1.20). Răspundeți cerințelor specificate în formularul de lucru pentru acest exercițiu.

Exercitiul 1.21 (Utilizări ale aplicației: măsurarea de rezistențe) Cea mai răspândită aplicație a punții rezistive este cea de determinare de precizie a unor rezistențe necunoscute; valorile necunoscute pot reprezenta rezistențe ale unor rezistoare electrice liniare, sau rezistențe ale unor senzori rezistivi a căror valoare este proporțională cu mărimi neelectrice (presiune, forță, temperatură, intensitate luminoasă) măsurate cu ajutorul acestor senzori. Exercițiul presupune măsurarea rezistenței cunoscute a unui rezistor și compararea valorilor măsurată și reală. Urmăriți pașii indicați în formularul de lucru pentru acest exercițiu.

Observații Rezistența se măsoară cu multimetru setat pe scara de măsură 2k;

- tensiunea U_{ab} se determină cu ajutorul canalului de măsură 1 al AD2, conectând nodurile (a) și (b) la bornele +1, respectiv -1 ale acestuia (v. fig. 1.21);
- Respectați procedurile de lucru indicate la exercițiul 1.14;
- Orice modificare în schemă se va efectua fie cu portul USB al AD2 deconectat, fie cu sursele de tensiune operte ("MASTER ENABLE" - în stare OFF).
- Notați-vă pe foaia de calcul electronică rezultatele măsurărilor;

Indicație În Fig. 1.21 este recomandată o posibilă dispunere a componentelor.

Potențiometrul este o componentă rezistivă cu rezistență variabilă prin deplasarea rotativă sau liniară a unui contact mobil numit *cursor* între două contacte cu poziție extremă: *valoare 0*, respectiv *valoare maximă*. Valoarea maximă este cea care caracterizează potențiometrul respectiv. Dacă reglajul nu este accesibil decât limitat, direct pe placă de montaj, spunem că acest potențiometru este *semireglabil*. În cazul în care cursorul formează un nod cu una din bornele extreme spunem că avem o *rezistență variabilă simplă*. În cazul în care cursorul este nelegat de contactele extreme, potențiometrul poate fi privit ca un divizor de tensiune, cu tensiunea de ieșire reglabilă între 0 și tensiunea aplicată între bornele extreme, în funcție de poziția cursorului relativ la acestea din urmă (Fig. 1.22).

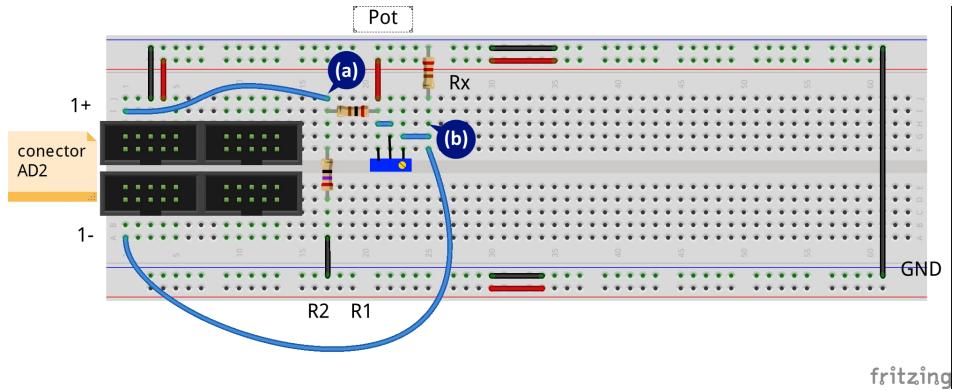


Figura 1.21: Montaj pentru măsurarea unei rezistențe necunoscute.

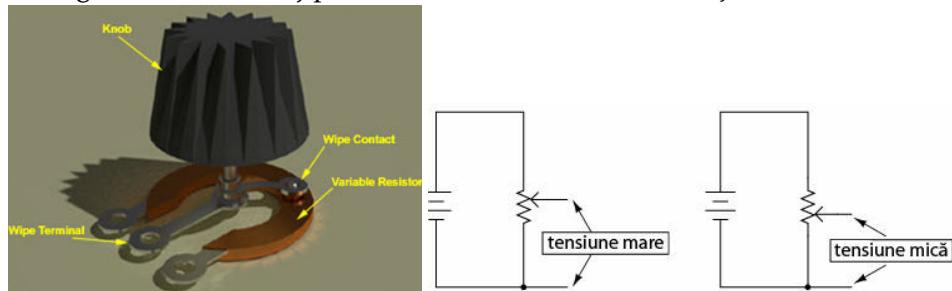


Figura 1.22: Potențiometrul. Tensiunea de ieșire se modifică în funcție de poziția cursorului între bornele extreme. [6].

Exercitiul 1.22 (Ultimul pas) La finalul lucrării, revedeți răspunsurile completeate în chestionarul de laborator, finalizați și închideți chestionarul. Nota obținută va fi afișată imediat.

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 aparatelor 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, ca o rezistență de sarcină.

Exercitiul 1.23 Ce valoare indică voltmetrul din Fig. 1.23, 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 Valoarea 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 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

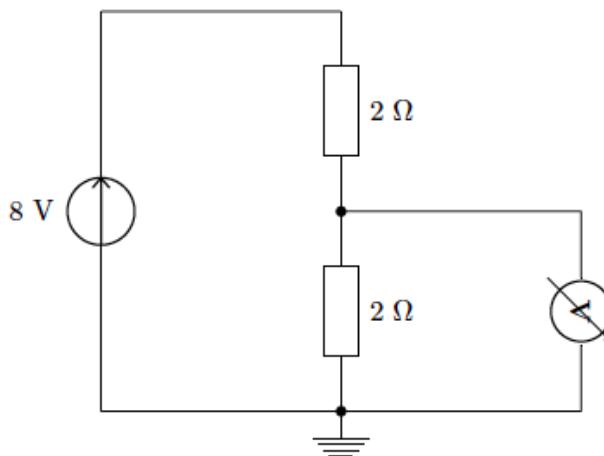


Figura 1.23: Divizorul de tensiune – influența aparatului de măsură.

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

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 intermedii și se ajustează cifrele semnificative numai pentru rezultatele finale.

Exemplul 1.10 Cifre semnificative în operații elementare:

$$\begin{aligned} 3.5 \cdot 22.3 &= 78, \text{ nu } 78.05; \\ 6.2/833 &= 0.0074, \text{ nu } 0.007442977; \\ 42.4 - 41.62 &= 0.8, 4256 - 24.7 = 4231, 33.8 + 15.63 = 49.4. \end{aligned}$$

Exercitiul 1.24 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 (correct)

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.

Exercitiul 1.25 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 [6]. Potențiometrul este o componentă rezistivă cu rezistență variabilă prin deplasarea rotativă sau liniară a unui contact mobil numit cursor între două contacte cu poziție extremă: valoare 0, respectiv valoare maximă. Valoarea maximă este cea care caracterizează potențiometrul respectiv. Dacă reglajul nu este accesibil decât limitat, direct pe placa de montaj, spunem că acest potențiometru este semireglabil. În cazul în care cursorul formează un nod cu una din bornele extreme spunem că avem o rezistență variabilă simplă. În cazul în care cursorul este nelegat de contactele extreme, potențiometrul poate fi privit ca un divizor de tensiune, cu tensiunea de ieșire reglabilă între 0 și tensiunea aplicată între bornele extreme, în funcție de poziția cursorului relativ la acestea din urmă.

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

Senzori rezistivi

O mare parte din senzorii din lumea reală sunt dispozitive rezistive [8]. 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. Fotocelula 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 rezistență 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. 1.24).

Exemplul 1.11 O fotocelulă are rezistență variabilă între 1 kΩ la lumină și aproximativ 10 kΩ la întuneric. Dacă se montează în serie o rezistență de valoare fixată la 5.6 kΩ 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 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

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

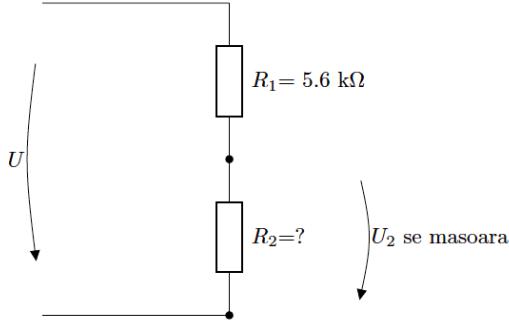


Figura 1.24: Senzor rezistiv. Valoarea rezistenței R_2 a senzorului poate fi determinată prin crearea unui divizor de tensiune.

Puntea Wheatstone

Puntea Wheatstone [7] a fost inițial dezvoltată de Charles Wheatstone pentru a măsura valoarele 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. 1.25).

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).

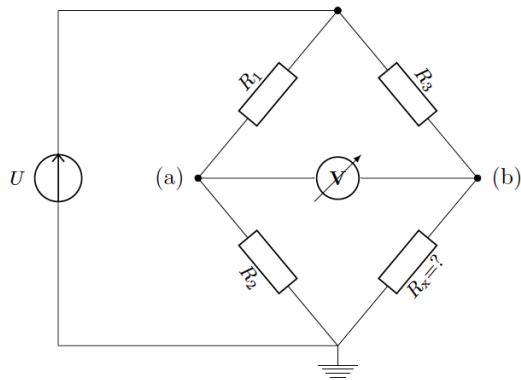


Figura 1.25: Puntea Wheatstone. Valoarea rezistenței R_x se determină prin echilibrarea punții și folosind relația între rezistoare pentru punte echilibrată.

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, atât 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.

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. Aceasta înseamnă că, pe lângă faptul că energia absorbită de la sursa de alimentare este mai mare, puterea consumată de către rezistențe $P = RI^2$ va fi mai mare, deci ele se vor încălzi mai mult și se pot distrugere. Dimensiunea rezistoarelor arată maximul de putere care e disipată înainte ca temperatura să crească excesiv de mult (Fig. 1.26).

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

Exercitiul 1.26 Determinați curentul maxim care poate străbate un rezistor cu rezistență de 180Ω și o putere maximă admisă de 0.25W .

În alegerea valorilor rezistențelor trebuie căutat echilibrul între precizie și putere consumată/disipată. Ca regulă practică, se alege un rezistor a cărui putere disipată maxim admisă este de cel puțin 2-3 ori mai mare decât cea determinată teoretic. Alegerea depinde însă și de

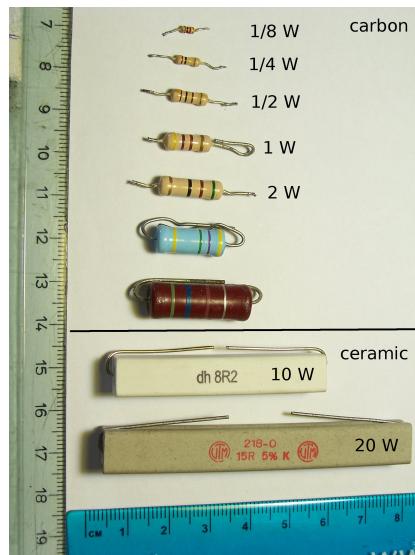


Figura 1.26: Rezistoare – puteri maxim admise [4].

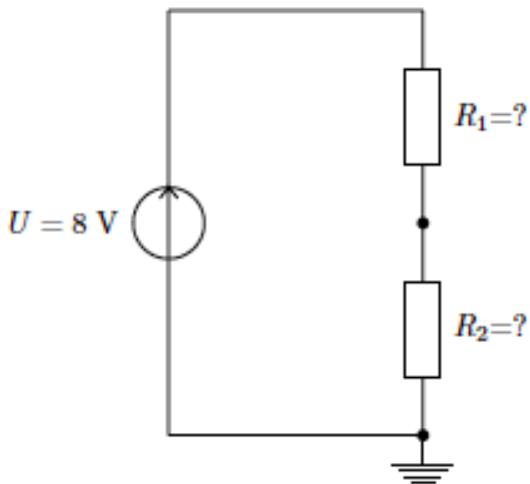


Figura 1.27: Proiectarea unui divizor de tensiune cu 4. Rezistențele au o putere maximă admisă de 0.25 W.

posibilitățile de răcire disponibile în circuit (radiatoare pentru disiparea căldurii, ventilație, etc.)

Exercitiul 1.27 Proiectați un divizor de tensiune cu 4, care va fi alimentat cu o tensiune de 8 V, conform Fig. 1.27. Rezistențele folosite au o putere maximă admisă de 0.25 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:

- 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.
- Rezolvați exercițiile scriind răspunsuri pe foi, pregătind foi de calcul *.xls*, circuite (*.cir* sau *.asc*). Prindeți toate foi încrucișate 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.

Referințe



- [1] *Analog Discovery 2, Reference manual.* URL: <https://reference.digilentinc.com/reference/instrumentation/analog-discovery-2/reference-manual>.
- [2] Analog Devices Linear Technology. *LTspice.* URL: <http://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators.html#LTspice>.
- [3] LTwiki. *LTSpice Wiki.* URL: http://ltwiki.org/index.php?title=LTspice_Annotated_and_Expanded_Help.
- [4] David Ludovino. *Own work, CC BY-SA 3.0.* URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27918950>.
- [5] *Multimeter Manuals.* URL: <https://www.manualslib.com/products/Mastech-MY-64-3912087.html>, <https://www.opel.ece.vt.edu/reference/Multimeter/MultimeterUse.pdf>.
- [6] *Potentiometru.* URL: <https://www.elprocus.com/voltage-divider-rule-with-examples/>, <http://www.creeaza.com/tehnologie/electronica-electricitate/Potentiometrul851.php>.
- [7] *Puntea Wheatstone.* URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/wheatstone-bridge.html>.
- [8] *Senzori rezistivi.* URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/voltage-dividers/all>.
- [9] *WaveForms 2015, Reference manual.* URL: <https://reference.digilentinc.com/reference/software/waveforms/waveforms-3/start>.

