

Laboratorul 2.

Circuite elementare de prelucrare a impulsurilor.

1 Scopul lucrării

Studierea comportării unor circuite RC de prelucrare liniară a impulsurilor, precum și a funcționării unor circuite de axare și de limitare cu diode. De asemenea, se urmărește deprinderea utilizării osciloscopului în scopul măsurării parametrilor impulsurilor.

2 Noțiuni teoretice

2.1 Caracteristicile semnalelor logice

Un circuit RC sau o rețea RC reprezintă un circuit electric compus din rezistențe (R) și din condensatoare (C). Un circuit RC de ordin 1 este compus dintr-o rezistență și un condensator. În cadrul laboratorului accentul este pus pe determinarea practică a comportamentului circuitelor RC serie. În cazul circuitelor RC serie, tensiunea de intrare se aplică pe gruparea serie, iar tensiunea de ieșire o reprezintă căderea de tensiune de pe unul dintre elemente. Astfel, putem avea circuit RC serie cu ieșirea pe rezistență și circuit RC serie cu ieșirea pe condensator.

2.2 Constanta de timp

Constanta de timp (notată cu τ) este un parametru ce caracterizează răspunsul unui sistem liniar, invariant în timp, de ordinul întâi, la o intrare de tip treaptă.

Din punct de vedere fizic, constanta τ reprezintă timpul necesar ca răspunsul sistemului la intrarea treaptă să ajungă la $1 - e^{-1} (\approx 63.2\%)$ din valoarea finală.

Din punct de vedere al circuitului RC, putem spune că constanta τ reprezintă timpul necesar condensatorului să se încarce până la $1 - e^{-1} (\approx 63.2\%)$ din capacitatea totală, sau să se descarce cu $e^{-1} (\approx 36.8\%)$ din valoarea energiei stocate.

Pentru a înțelege cum sunt determinate formele de undă la ieșirea diferitelor circuite prezентate în îndrumar, trebuie să analizăm variația căderii de tensiune pe diferite componente (condensator și rezistență) în timp. Cu alte cuvinte, ne interesează răspunsul circuitului la un semnal de tip impuls sau treaptă (adică răspunsul tranzitoriu).

Considerând circuitul din Figura 1a, vom determina răspunsul tranzistoriu la un impuls treaptă utilizând transformatele Laplace ale expresiilor V_R și V_C

(unde V_R este căderea de tensiune pe rezistență și V_C este căderea de tensiune pe condensator). Folosim substituția $j\omega \rightarrow s$ și obținem:

$$V_i(s) = E \frac{1}{s} \quad (1)$$

$$V_C(s) = E \frac{1}{1 + sRC} \frac{1}{s} \quad (2)$$

$$V_R(s) = E \frac{sRC}{1 + sRC} \frac{1}{s} \quad (3)$$

În Figura 1 sunt ilustrate căderile de tensiune pe condensator și pe rezistență.

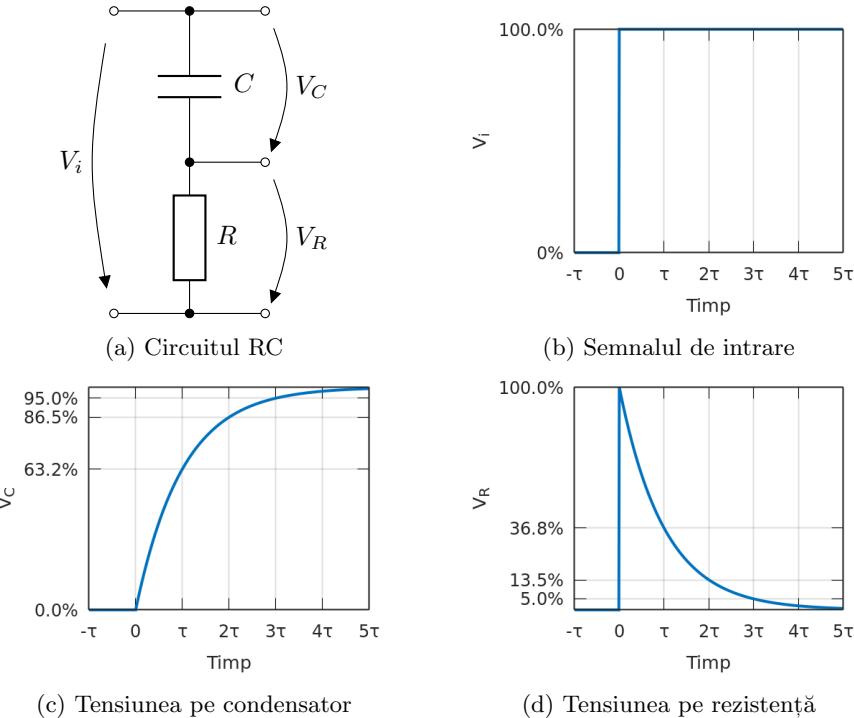


Figura 1: Răspunsul tranzistorului al circuitului RC

Aplicând transformata Laplace inversă obținem expresiile căderilor de tensiune pe condensator și pe rezistență în domeniul timp:

$$V_C(t) = E \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (4)$$

$$V_R(t) = E e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5)$$

2.3 Circuitul RC serie cu ieșirea pe rezistență

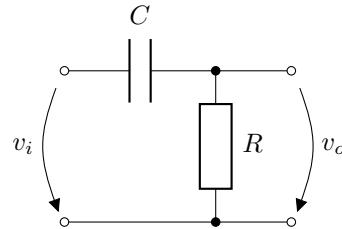


Figura 2: Circuitul RC cu ieșirea pe rezistență

Circuitul, reprezentat în Figura 2, are comportări diferite în funcție de raportul dintre constanta de timp a circuitului $\tau = RC$ și durata impulsurilor (T_{on}) și a intervalului (T_{off}) dintre impulsurile aplicate la intrare.

2.3.1 Cazul $\tau \ll T_{on}, T_{off}$

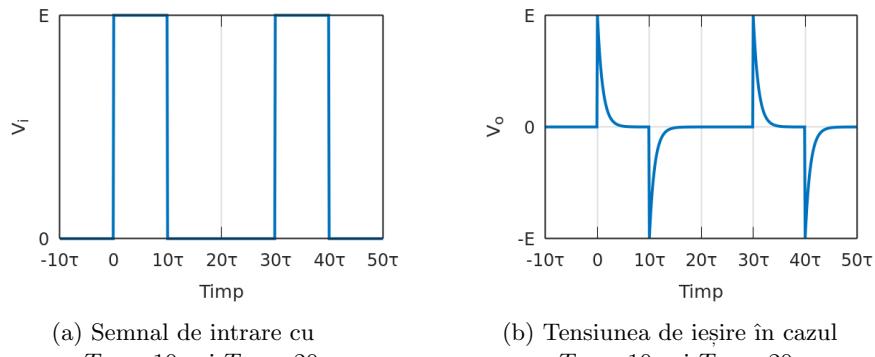


Figura 3: Circuitul RC cu ieșirea pe rezistență în cazul $\tau \ll T_{on}, T_{off}$

Dacă $\tau \ll T_{on}, T_{off}$ (ca în Figura 3a), impulsurile de la ieșire au forma din Figura 3b. În acest caz, circuitul RC se comportă ca un circuit de derivare (de diferențiere) a impulsurilor.

2.3.2 Cazul $\tau \approx T_{on}, T_{off}$

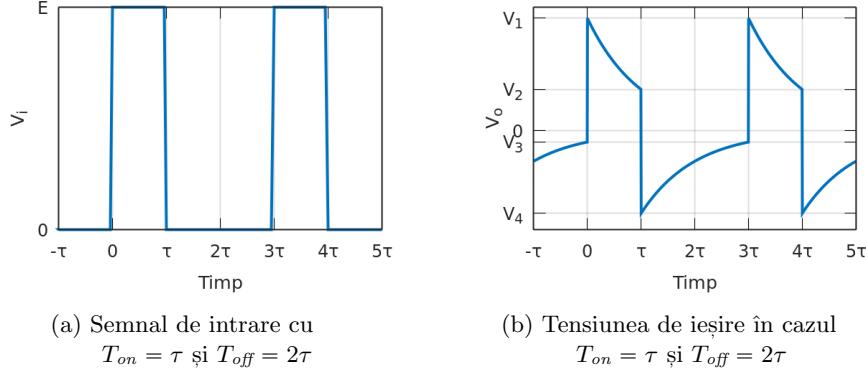


Figura 4: Circuitul RC cu ieșirea pe rezistență în cazul $\tau \approx T_{on}, T_{off}$

În cazul în care constanta de timp τ este comparabilă cu T_{on} și cu T_{off} , în regim staționar, se obține forma de undă din Figura 4b, tensiunile V_1, V_2, V_3 și V_4 fiind dependente de constanta de timp τ , de intervalele de timp T_{on}, T_{off} și de amplitudinea E a acestora.

În acest caz, se obține:

$$V_1 = E \frac{1 - e^{-\frac{T_{off}}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T_{on}+T_{off}}{\tau}}} \quad (6)$$

$$V_2 = V_1 e^{-\frac{T_{on}}{\tau}} \quad (7)$$

$$V_3 = V_4 e^{-\frac{T_{off}}{\tau}} \quad (8)$$

$$V_4 = -E \frac{1 - e^{-\frac{T_{on}}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T_{on}+T_{off}}{\tau}}} \quad (9)$$

2.3.3 Cazul $\tau \gg T_{on}, T_{off}$

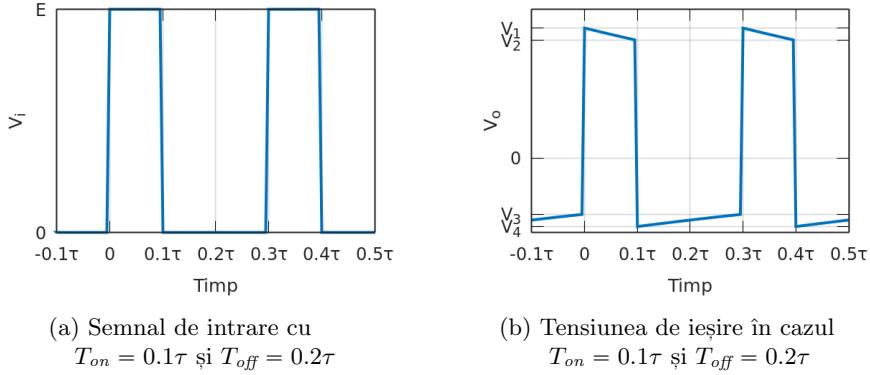


Figura 5: Circuitul RC cu ieșirea pe rezistență în cazul $\tau \gg T_{on}, T_{off}$

Dacă $\tau \gg T_{on}, T_{off}$ (ca în Figura 5a), se obține la ieșire, în regim staționar, forma de undă din Figura 5b.

Stim că:

$$\frac{T_{off} + T_{on}}{\tau} \rightarrow 0 \quad (10)$$

Și folosim următoarea aproximare:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - e^{\alpha x}}{1 - e^x} = \alpha \quad (11)$$

Unde:

- x - este substituit cu $-\frac{T_{off} + T_{on}}{\tau}$;
- α - este substituit pe rând, cu $\frac{T_{off}}{T_{on} + T_{off}}$ și cu $\frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$ (factorul de umplere).

Folosind Ecuațiile 6, 9 și 11, obținem:

$$V_1 = E \frac{T_{off}}{T_{on} + T_{off}} \quad (12)$$

$$V_4 = -E \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (13)$$

$$V_1 - V_3 = V_2 - V_4 = E \quad (14)$$

Din Ecuațiile 12, 13 și 14 deducem:

$$V_3 = V_1 - E = E \frac{T_{off}}{T_{on} + T_{off}} - E = -E \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \Rightarrow V_3 = V_4 \quad (15)$$

$$V_2 = E + V_4 = E - E \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = E \frac{T_{off}}{T_{on} + T_{off}} \Rightarrow V_1 = V_2 \quad (16)$$

Se consideră că, practic, impulsurile nu își schimbă formă, circuitul RC comportându-se ca un circuit de trecere (de cuplaj).

2.3.4 Considerante practice

În toate cazurile, în regim statționar, impulsurile de la ieșire (de pe rezistență) au componentă continuă nulă, componenta continuă a impulsurilor de la ieșire rămânând pe capacitate.

În cazul circuitului de derivare, pentru impulsuri caracterizate prin intervale de timp T_{on} și T_{off} relativ mici, îndeplinirea condiției $\tau \ll T_{on}, T_{off}$ se realizează mai greu.

Micșorarea valorilor elementelor circuitului RC are ca efect creșterea ponderii elementelor parazite (capacitatea de intrare, C_p , care apare în paralel cu rezistența R și rezistența internă a generatorului de semnal, R_g , care apare în serie cu capacitatea C).

În acest caz, pentru circuitul de derivare real, reprezentat în Figura 6, se va constata atât o micșorare a amplitudinii impulsurilor cât și a duratei lor. De asemenea, aşa cum se observă în Figura 7, impulsurile derivate vor avea un front diferit de zero, determinat, practic, de constanta de timp $C_p R_g$.

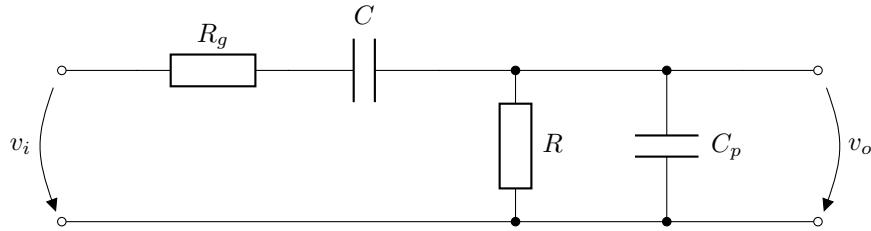


Figura 6: Circuit de derivare real

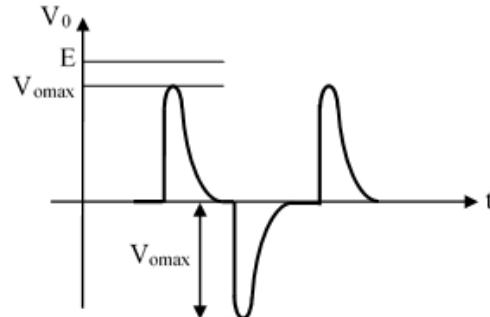


Figura 7: Tensiunea de ieșire reală a unui derivator

Rezultă necesitatea îndeplinirii condițiilor:

$$R \gg R_g \text{ și } C \gg C_p \text{ (sau } R_g \rightarrow 0 \text{ și } C_p \rightarrow 0\text{)} \quad (17)$$

Asta înseamnă că elementele adăugate în circuit să fie mult mai mari decât elementele parazite, deja prezente în circuit.

2.3.5 Aplicații practice

În electronica digitală circuitul RC cu ieșire pe rezistență are mai multe aplicații practice:

- Transmiterea impulsurilor de declanșare de la diferite tipuri de senzori;
- Cuplarea semnalelor de mare frecvență și decuplarea componentei continue în transmisii de date - Figura 8;

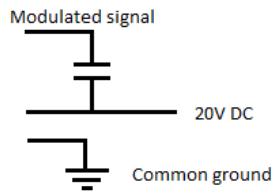


Figura 8: Cuplarea liniei de înaltă frecvență

- Cuplajul parazit capacitiv între mai multe linii de semnal (efect nedorit dar întâlnit în transmiterea semnalelor) - Figura 9;

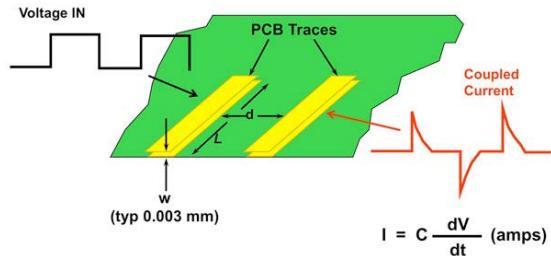


Figura 9: Cuplarea capacitivă la nivel de trasee pe circuite imprimante

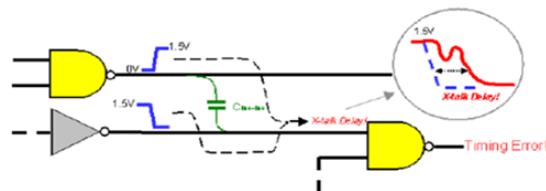


Figura 10: Crosstalk

2.4 Circuitul RC serie, cu ieșirea pe condensator

2.4.1 Cazul $\tau \gg T_{on}, T_{off}$

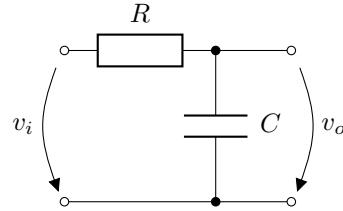


Figura 11: Circuitul RC cu ieșire pe capacitate

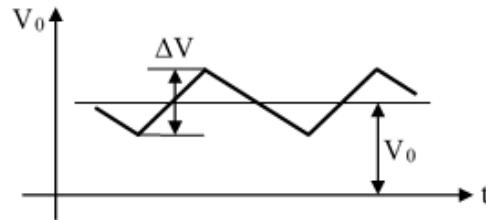


Figura 12: Tensiunea de ieșire în cazul $\tau \gg T_{on}, T_{off}$

Circuitul prezentat în Figura 11, se comportă ca un circuit de integrare (Figura 12) în cazul în care constanta de timp a circuitului, $\tau = RC$, este mare în comparație cu durata impulsurilor de intrare (T_{on}) și cu intervalul de timp dintre ele (T_{off}).

Mărimele caracteristice tensiunii de ieșire a circuitului de integrare vor fi:

$$V_o = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} E \quad (18)$$

$$\Delta V = \frac{ET_{on}T_{off}}{\tau(T_{on} + T_{off})} \quad (19)$$

2.4.2 Cazul $\tau \ll T_{on}, T_{off}$

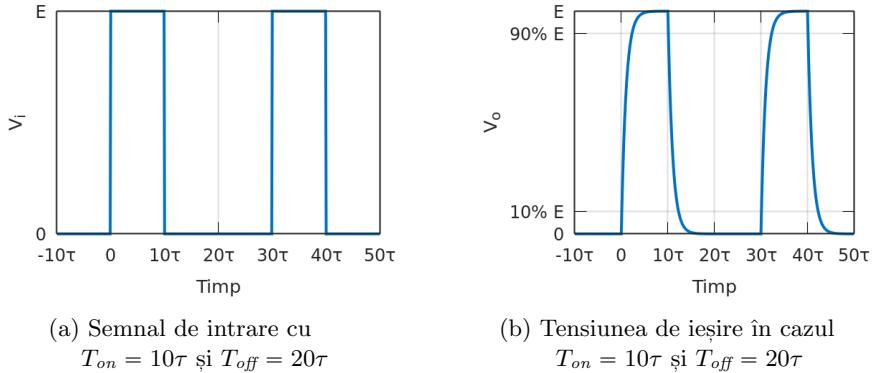


Figura 13: Circuitul RC cu ieșirea pe condensator în cazul $\tau \ll T_{on}, T_{off}$

În cazul în care constanta de timp $\tau = RC$ este foarte mică în comparație cu T_{on} și T_{off} ($\tau \ll T_{on}, T_{off}$), impulsurile de la ieșire, asemănătoare cu cele de la intrare, vor fi deformate prin apariția fronturilor finite, ca în Figura 13b.

Pentru cazul în care $\tau \ll T_{on}, T_{off}$ ne interesează să determinăm timpul celor două fronturi (crescător t_f^+ și descrescător t_f^-). Timpul de front se măsoară de la 10% din valoarea maximă a amplitudinii vârf la vârf a semnalului E până la 90% din această valoare pentru frontul crescător sau de la 90% E până la 10% E pentru frontul descrescător:

$$t_f^+ = t_f^- = 2.3\tau = 2.3RC \quad (20)$$

2.4.3 Aplicații practice

Aplicații practice în electronica digitală a circuitelor RC cu ieșirea pe capacitate:

- Proiectarea circuitelor imprimante pentru a asigura transmiterea corectă a semnalului la frecvențe mari, unde capacitatea parazită a traseelor de pe cablaj influențează forma semnalului;
- Comanda portilor și a circuitelor logice, având în vedere capacitatea pinilor de intrare. Portile manifestă pe intrare o capacitate parazită datorată modalității de construcție internă. În cazul circuitelor digitale, trebuie ținut cont de capacitatea de intrare parazită și de rezistența conductorilor. Se formează un circuit RC cu ieșire pe capacitatea care întârzie propagarea semnalului și poate duce la hazarduri în ceea ce privește comportamentul circuitelor.

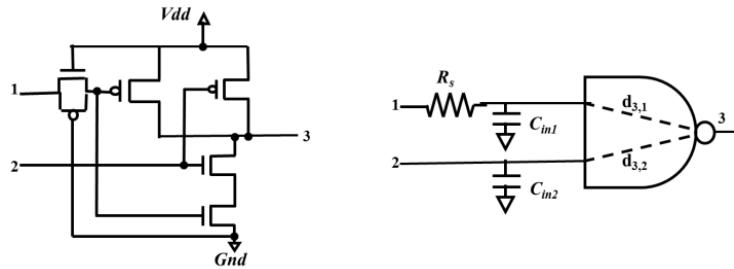


Figura 14

- Circuite de ”debounce” pentru elementele mecanice (butoane, senzori mecanici) sau componentelete electromecanice, în momentul acționării prezintă fenomenul de bounce - vibrație mecanică, care generează un tren de impulsuri. Folosind un simplu circuit RC, evităm să introducem impulsuri în intrarea unui dispozitiv digital;

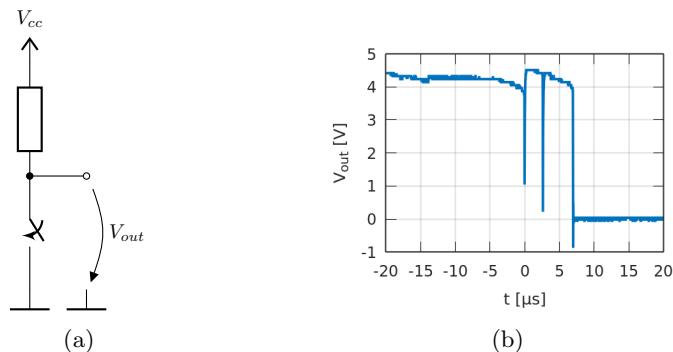


Figura 15: Bounce cauzat de comutatorul mechanic

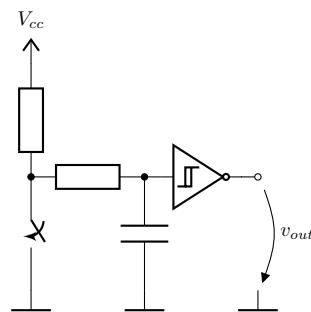


Figura 16: Circuit pentru ”debounce”

2.5 Divizorul compensat

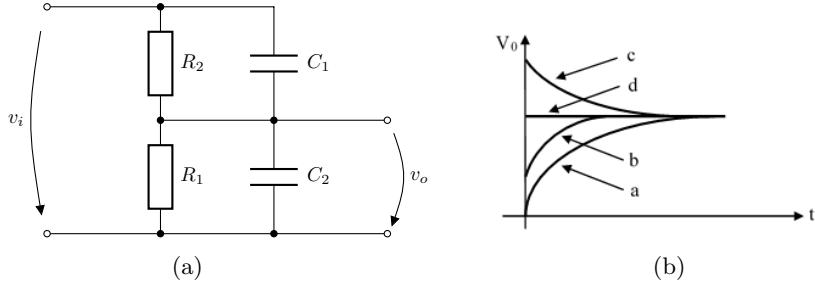


Figura 17: Schema divizorului compensat și formele de front crescător măsurate la ieșirea divizorului

Pentru reducerea amplitudinii impulsurilor vizualizate pe osciloscop, se folosește un divizor compensat, a cărui schemă este reprezentată în Figura 17, unde R_2 și C_2 reprezintă, de obicei, rezistența de intrare (de ordinul a $1M\Omega$) respectiv capacitatea de intrare (de circa $10...30pF$) ale osciloscopului. La aplicarea unui salt treaptă de tensiune, de valoare E , tensiunea de ieșire va avea expresia:

$$v_o(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}E + \frac{C_1 R_1 - C_2 R_2}{(C_1 + C_2)(R_1 + R_2)}E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (21)$$

cu $\tau = (C_1 + C_2)(R_1 \parallel R_2)$

În funcție de raportul $\frac{C_1}{C_1+C_2}$ (care dă saltul inițial al tensiunii de ieșire) și de raportul $\frac{R_2}{R_1+R_2}$ (care dă valoarea finală a tensiunii de ieșire), se obțin următoarele cazuri, reprezentate în Figura 17:

- $C_1 = 0$: divizor necompensat (Figura 17b - a);
- $\frac{C_1}{C_1+C_2} < \frac{R_2}{R_1+R_2}$: divizor subcompensat (Figura 17b - b);
- $\frac{C_1}{C_1+C_2} > \frac{R_2}{R_1+R_2}$: divizor supracompensat (Figura 17b - c);
- $C_1 R_1 = C_2 R_2$: divizor compensat (Figura 17b - d).

Utilizarea divizorului compensat de impulsuri prezintă și avantajul unei capacitați echivalente de valoare redusă, ceea ce este important la vizualizarea unor fenomene rapid variabile în timp.

Aplicabilitatea directă în electronica digitală o reprezintă compensarea sondelor de osciloscop care atenuează semnalul. Atenuarea semnalului se face folosind principiul divizorului de tensiune. În afară de rezistențele din divizorul de tensiune, mai apare și capacitatea de intrare a osciloscopului, modelată în exemplul anterior de C_2 . Astfel, este necesar să ajustăm valoarea lui C_1 astfel încât semnalul care este preluat de etajul de intrare al osciloscopului să aibă aceeași formă (nu rotunjită, fără supracreșteri, etc.) ca cel de intrare. Același principiu se aplică și în cazul dispozitivelor de achiziții de date a căror intrare trebuie atenuată.

2.6 Circuitul de axare

Pentru modificarea componentei continue a impulsurilor de la ieșire, se poate folosi un circuit de axare, de tipul celui din Figura 18, în care, dacă se îndeplinește condiția: $\tau = RC \gg T_{on}, T_{off}$, la impulsurile de comandă din Figura 19a, aplicate la intrare, se obține răspunsul din Figura 19b (s-a presupus că dioda este ideală, altfel apare o translatare suplimentară a componentei continue cu V_D).

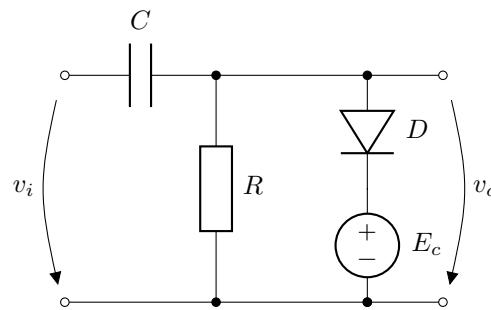


Figura 18: Schema circuitului de axare

Utilitatea practică în electronică este modificarea componentei continue a semnalului fără a afecta forma, frecvența sau amplitudinea acestuia. Este utilizat în etajele de intrare ale osciloscoapelor analogice pentru a modifica poziția semnalului pe afișaj (realizează translatărea pe axa OY - axa tensiunii).



Figura 19: Parametrii semnalului de comandă și semnalul axat

2.7 Circuitele de limitare cu diode

Circuitele de limitare cu diode pot realiza limitare superioară, inferioară sau bilaterală, aşa cum reiese din caracteristicile de transfer, $v_o(v_i)$, reprezentate în Figura 20.

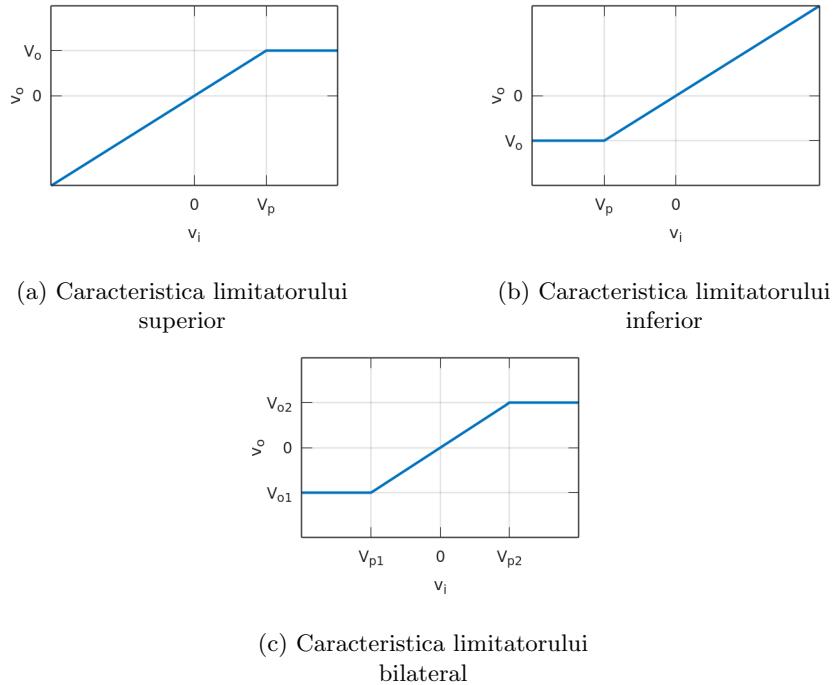


Figura 20: Caracteristicile de transfer pentru cele 3 tipuri de circuite de limitare

Din punct de vedere practic, circuitele de limitare cu diode se pot realiza în variante serie sau în variante paralel (fiind posibile, pentru limitatoarele bilaterale, și variante combinate), aşa cum se observă în Figura 21.

Parametrii cei mai importanți ai unui limitator cu diode sunt: tensiunea (sau tensiunile) de prag, panta caracteristicii de transfer în zona de limitare (care trebuie să fie cât mai aproape de zero), panta caracteristicii de transfer în zona liniară (care trebuie să fie cât mai aproape de 1) precum și viteza de comutare în cazul aplicării unor semnale rapid variabile.

Circuitele de limitare care se testează în cadrul lucrării sunt desenate în Figura 21.

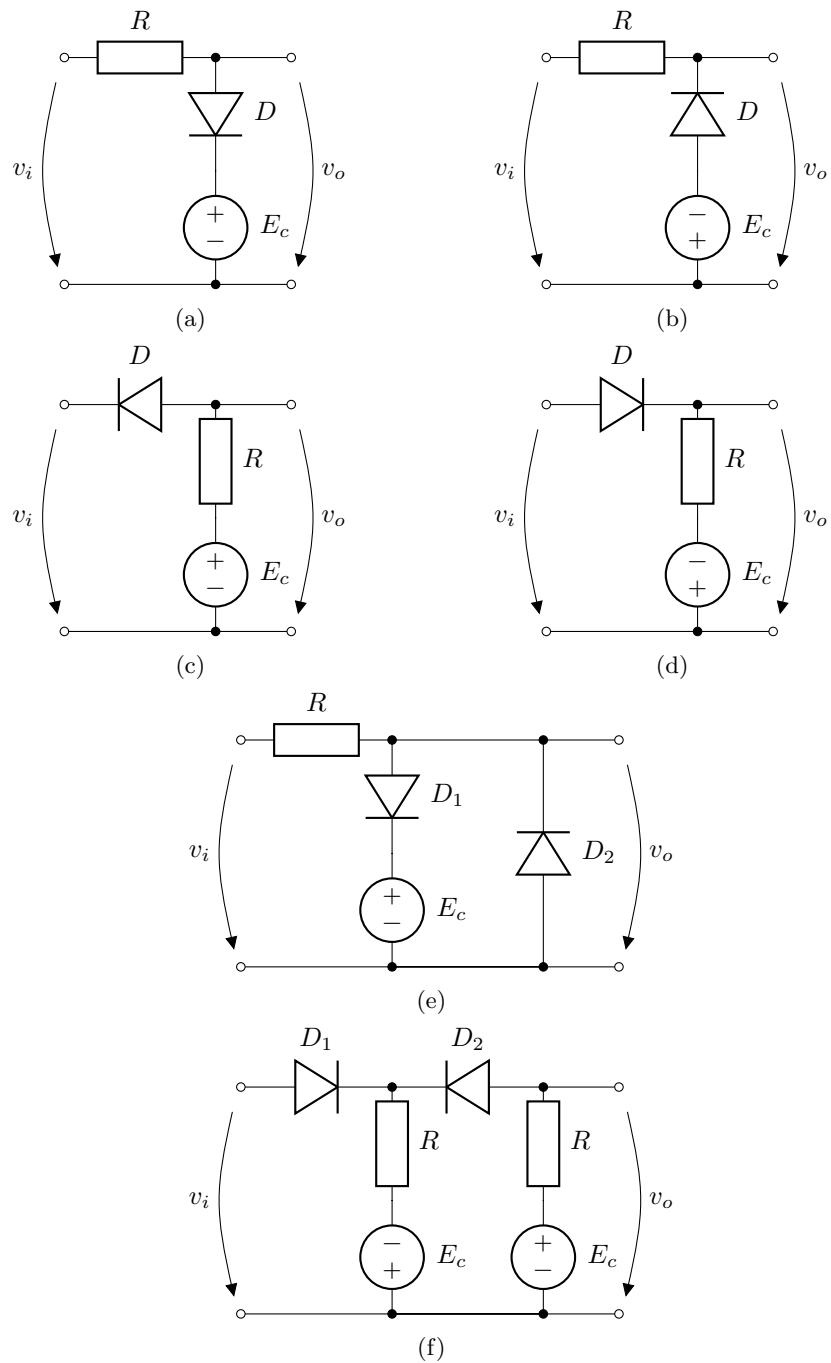


Figura 21: Circuite de limitare cu diode

3 Desfășurarea lucrării

Pentru realizarea circuitelor descrise în lucrarea curentă de laborator utilizați platforma cu breadboard.

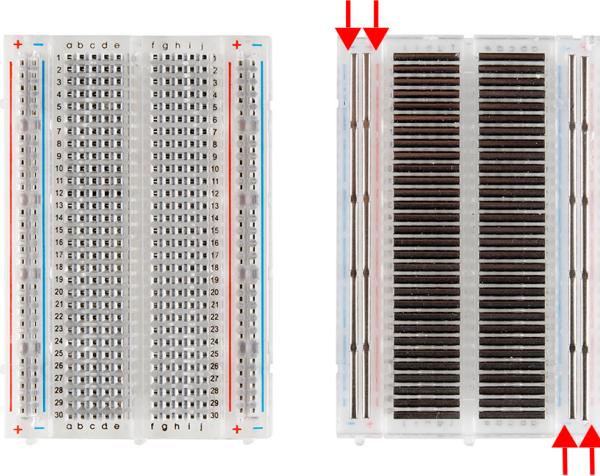


Figura 22: Breadboard

3.1 Circuite RC serie - calculul parametrilor

Pentru $E = 5V$, $C = 10nF$, $R = 10k\Omega$ calculați:

- Constanta de timp τ , frecvențele și factorul de umplere ce caracterizează semnalul de intrare pentru următoarele valori ale intervalor de timp T_{on} și T_{off} :
 - $T_{on} = 100\mu s$; $T_{off} = 200\mu s$;
 - $T_{on} = 10\mu s$; $T_{off} = 20\mu s$;
 - $T_{on} = 1\mu s$; $T_{off} = 2\mu s$;
- Parametrii semnalului la ieșire, conform Ecuațiilor 6 - 16, pentru circuitul RC cu ieșire pe rezistență.
- Parametrii semnalului de ieșire, conform Ecuațiilor 18 și 20, pentru circuitul RC cu ieșire pe condensator.

3.2 Circuite RC serie - caracteristicile semnalului de ieșire

Se realizează montajul circuitului RC serie cu ieșire pe rezistență ($C = 10nF$, $R = 10k\Omega$), conform Figurii 2. La intrarea circuitului se aplică, succesiv, semnal treaptă cu parametrii menționați în Paragraful 3.1.

Pentru cele 3 cazuri se măsoară parametrii semnalului de ieșire: V_1 , V_2 , V_3 , V_4 și timpul de cădere t_f^- . Se compară măsurătorile, acasă, cu valorile calculate în Paragraful 3.1 folosind ecuațiile 6 - 16.

Se realizează montajul circuitului RC serie cu ieșire pe condensator ($C = 10nF$, $R = 10k\Omega$), conform cu Figura 11. La intrarea circuitului se aplică, succesiv, semnal treaptă cu parametrii menționați la Paragraful 3.1.

Pentru cele 3 cazuri se măsoară parametrii semnalului de ieșire: V_0 , ΔV , timpul de creștere t_f^+ și timpul de cădere t_f^- . Se compară măsurătorile, acasă, cu valorile calculate la Paragraful 3.1 folosind Ecuațiile 18 - 20.

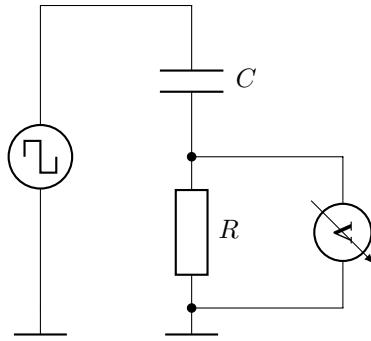


Figura 23: Circuitul RC

Simulați acasă comportamentul schemelor utilizate în exercițiul de laborator și comparați parametrii obținuți din simulări cu cei din experimentele de laborator.

3.3 Divizorul compensat

Experimentați divizorul de impulsuri din Figura 17a. Calculați, acasă, valoarea inițială $\left(\frac{EC_1}{C_1+C_2}\right)$ și cea finală $\left(\frac{ER_2}{R_1+R_2}\right)$ a tensiunii de ieșire pentru $E = 5V$, $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 1k\Omega$, $C_2 = 1nF$, $C_{1min} = 47pF$, $C_{1max} = 220pF$ și $C_{1opt} = 100pF$.

Vizualizați formele de undă obținute la ieșire atunci când la intrare se aplică impulsuri de amplitudine $E = 5V$, cu durată și perioada suficient de mari; se vor realiza cele patru situații din Figura 17b și se vor compara rezultatele cu cele teoretice.

3.4 Circuitul de axare

Realizați circuitul de axare din Figura 18 cu $E = 0V$ și $E = 5V$.

Aplicați impulsuri cu parametrii de la Paragraful 3.1, de amplitudine $5V$ și observați și desenați formele de undă de la ieșire pentru fiecare caz în parte, punând în evidență și componenta continuă a impulsurilor.

Simulați acasă comportamentul schemelor utilizate în exercițiul de laborator și comparați parametrii obținuți din simulări cu cei din experimentele de laborator. Realizați simularea pentru frecvențe joase ($10Hz$), medii ($5kHz$) și înalte ($10MHz$). Sunt asemănătoare rezultatele? Motivați ingineresc răspunsul.

3.5 Circuitul de limitare

Folosiți osciloscopul pentru a trasa caracteristicile de transfer ale circuitelor de limitare din Figura 21. Pentru aceasta, conectați la intrare un generator de semnal sinusoidal de frecvență $1kHz$ și cu amplitudine mai mare de $E = 3V$; semnalul de la intrare se măsoară pe intrarea A a osciloscopului iar semnalul de la ieșire pe intrarea B a osciloscopului. Se va considera $R = 10k\Omega$.

Unuia dintre limitatoarele bilaterale i se aplică semnal sinusoidal de frecvență $1kHz$ și se vizualizează forma de undă de la ieșirea circuitului; se măsoară fronturile impulsurilor obținute și se studiază influența amplitudinii semnalului de la intrare asupra acestora.

Măriți frecvența semnalelor de comandă și observați influența acesteia asupra formelor de undă de la ieșire.

Aplicați circuitului de limitare superioară cu diodă serie impulsuri caracterizate prin $E = 5V$, $T_{on} = T_{off} = 5\mu s$. Ce se modifică față de frecvența joasă? Ce observați?

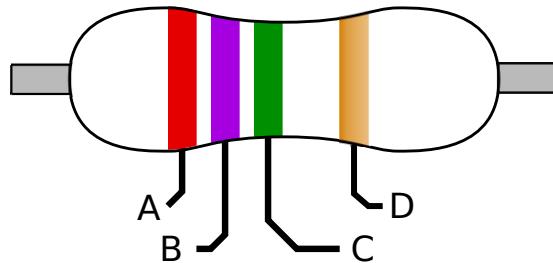
Simulați acasă comportamentul schemelor utilizate în exercițiul de laborator și comparați parametrii obținuți din simulări cu cei din experimentele de laborator. Utilizați mai multe modele de diode pentru diferite frecvențe (ex: $10kHz$, $1MHz$, $10MHz$, $100MHz$). Sunt asemănătoare rezultatele? Motivați ingineresc răspunsul.

3.6 Cerințe

Referatul va conține:

- Scurt rezumat al teoriei lucrării;
- Schema circuitului pus la dispoziție în laborator;
- Schema electronică aferentă fiecărui punct, cu menționarea conexiunilor făcute pentru a face funcțională fiecare schemă;
- Rezultatele măsurătorilor aferente fiecărui punct;
- Rezultatele calculelor teoretice aferente fiecărui punct;
- Simulările - scheme și rezultatele simulărilor aferente fiecărui punct
- Comparații între cele trei tipuri de rezultate (calculat, măsurat, simulat); observații.

Anexa A Codul culorilor pentru rezistențe



Citirea valorii, în Ω :

$$R = (A \cdot 10 + B) \cdot 10^C \pm D$$

Interpretarea benzilor A, B și C:

Culoare	Valoare numerică
Negru	0
Maro	1
Rosu	2
Portocaliu	3
Galben	4
Verde	5
Albastru	6
Mov	7
Gri	8
Alb	9

Interpretarea benzii D:

Culoare	Valoare numerică
Argintiu	$\pm 10\%$
Auriu	$\pm 5\%$