

## Lucrarea 23

### FILTRE ACTIVE DE TIP SALLEN-KEY

#### 23.A. OBIECTIVE

1. Analiza filtrelor de tip Sallen-Key în domeniul timp.
2. Analiza filtrelor de tip Sallen-Key în domeniul frecvență.

#### 23.B. CONSIDERAȚII TEORETICE

Funcția de circuit a filtrelor bicuad se poate exprima prin raportul a două polinoame de gradul doi:

$$H(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^2 + b_1 s + b_0} \quad (23.1)$$

Funcția (23.1) este cunoscută sub denumirea de *funcție bipătratică*.

Anulând corespunzător coeficienții  $a_k$  de la numărător, se obțin: *filtru trece-jos* ( $a_1 = a_2 = 0$ ), *filtru trece-sus* ( $a_1 = a_0 = 0$ ), *filtru trece-bandă* ( $a_0 = a_2 = 0$ ) sau *filtru oprește-bandă* ( $a_1 = 0$ ).

Funcția bipătratică poate fi utilizată în realizarea corectoarelor de atenuare sau de fază, alegând în modul dorit coeficienții  $a_k$  și  $b_k$ . Filtrele bicuad sunt ușor de proiectat și sunt folosite în foarte multe aplicații. Configurațiile mai des utilizate sunt cele de tipul Sallen-Key.

► **FILTRE TRECE-JOS DE TIP SALLEN-KEY**

În Figura 23.1.a este prezentat un filtru trece-jos de tip Sallen-Key, iar în Figura 23.1.b – graful de semnal asociat, unde  $k$  reprezintă factorul de amplificare:

$$k = \frac{V_{out}}{V^-} = 1 + \frac{R_3}{R_4} \quad (23.2)$$

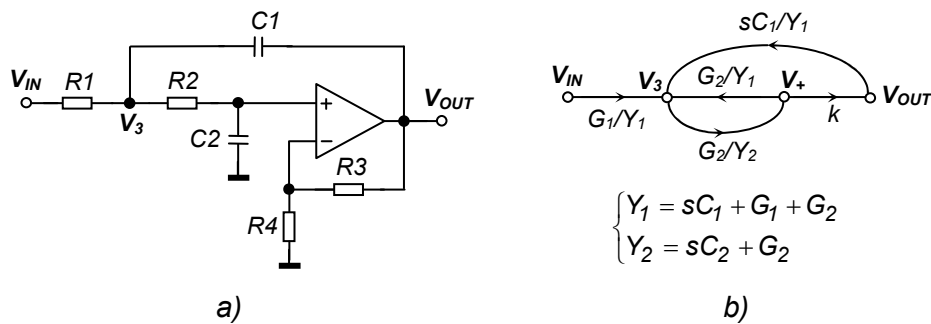


Figura 23.1

Funcția de transfer a acestui filtru este dată de expresia:

$$H(s) = \frac{V_{OUT}(s)}{V_{IN}(s)} = \frac{k \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}{s^2 + s \frac{(G_1 + G_2) C_2 + C_1 G_2 (1 - k)}{C_1 C_2} + \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} \quad (23.3)$$

Forma standard a funcției de transfer pentru un filtru trece-jos de ordinul doi este de forma:

$$H_{TJ}(s) = H_0 \cdot \frac{\omega_0^2}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (23.4)$$

unde  $H_0$  este o constantă,  $\omega_0$  este frecvența de rezonanță, iar  $Q$  este factorul de calitate al circuitului.

Identificând relația (23.3) cu (23.4), se obține:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (23.5)$$

$$H_0 = H_{TJ}(j0) = k \quad (23.6)$$

$$\frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} + (1-k) \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \quad (23.7)$$

► **FILTRE TRECE-BANDĂ DE TIP SALLEN-KEY**

În Figura 23.2 este prezentat un *filtru trece-bandă* de tip Sallen-Key, împreună cu graful de semnal asociat, în care am notat cu  $k$  factorul de amplificare:

$$k = \frac{V_{out}}{V^-} = 1 + \frac{R_3}{R_4} \quad (23.8)$$

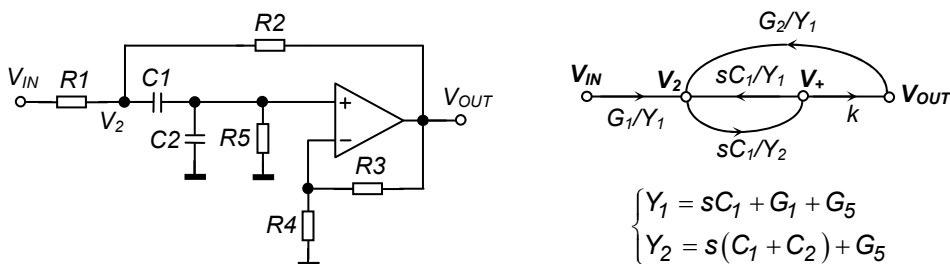


Figura 23.2

Funcția de transfer în tensiune a acestui tip de filtru este dată de:

$$H(s) = \frac{ksG_1 / C_2}{s^2 + s \frac{(C_1 + C_2)G_1 + C_2G_2 + C_1G_5 + C_1G_2(1-k)}{C_1C_2} + \frac{G_5(G_1 + G_2)}{C_1C_2}} \quad (23.9)$$

Identificând relația (23.9) cu forma standard a funcției de transfer pentru un filtru trece-bandă de ordinul doi, dată de expresia:

$$H_{TB}(s) = H_0 \cdot \frac{s \frac{\omega_0}{Q}}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (23.10)$$

se obține:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{G_5(G_1 + G_2)}{C_1C_2}} = \sqrt{\frac{1 + R_1/R_2}{R_5R_1C_1C_2}} \quad (23.11)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{\sqrt{\frac{R_5C_2}{R_1C_1}} + \sqrt{\frac{R_5C_1}{R_1C_1}} + \sqrt{\frac{R_1C_1}{R_5C_2}} + \frac{1 + (1-k) \frac{C_1}{C_2}}{R_2} \sqrt{\frac{R_1R_5C_2}{C_1}}}{\sqrt{1 + R_1/R_2}} \quad (23.12)$$

$$H_0 = H_{TB}(j\omega_0) = \frac{k}{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) + \frac{R_1C_2}{R_2C_1} + \frac{R_1}{R_5} + \frac{R_1}{R_2}(1-k)} \quad (23.13)$$

Sistemul format din ecuațiile (23.11), (23.12) și (23.13) are 6 necunoscute. Se pot impune trei constrângeri. Uzual se folosește  $k = 2$ , se iau două condensatoare egale și se alege o rezistență, celelalte elemente de circuit rezultând prin calcul.

Alegerea lui  $k = 2$  este o alegere convenabilă, deoarece în schema din *Figura 23.2.a* se folosesc rezistențe egale  $R_1 = R_2$  și, astfel, ecuațiile de proiectare devin mai simple.

► **FILTRE TRECE-SUS DE TIP SALLEN-KEY**

În *Figura 23.3* este prezentat un *filtru trece-sus* de tip Sallen-Key, împreună cu graful de semnal asociat.

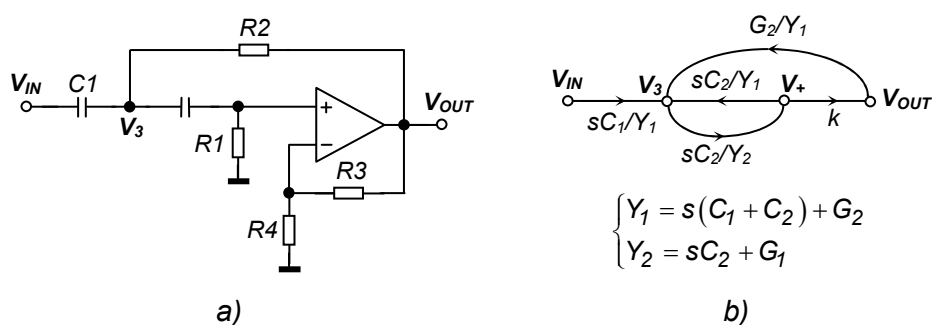


Figura 23.3

Funcția de transfer în tensiune a acestui filtru este:

$$H(s) = \frac{V_{OUT}(s)}{V_{IN}(s)} = \frac{ks^2}{s^2 + s \frac{(C_1 + C_2)G_1 + C_2G_2(1-k)}{C_1C_2} + \frac{G_1G_2}{C_1C_2}} \quad (23.14)$$

Identificând relația (23.14) cu forma standard a funcției de transfer pentru un filtru trece-sus de ordinul doi, dată de expresia:

$$H_{TS}(s) = H_0 \cdot \frac{s^2}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (23.15)$$

se obține:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (23.16)$$

$$\frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}} + \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} + (1-k) \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \quad (23.17)$$

$$H_0 = H_{TS}(j\infty) = k \quad (23.18)$$

Procedura de proiectare, folosind ecuațiile (23.16), (23.17) și (23.18), este asemănătoare cu cea utilizată în cazul filtrelor trece-jos și trece-bandă.

### 23.C. PROBLEME PREGĂTITOARE

**23.C.1.** Să se dimensioneze cele trei tipuri de filtre din *Figurile 23.1, 23.2 și 23.3*, pentru frecvența de rezonanță  $f_0 = 1\text{KHz}$  și factorul de calitate  $Q$  în două cazuri:

- $Q = 1$  (valoare mică)
- $Q = 100$  (valoare mare)

Pentru *FTJ* și *FTS* se vor considera:  $R_1 = R_2 = R$  și  $C_1 = C_2 = C$ , iar pentru *FTB*:  $R_1 = R_2 = R_5 = R$  și  $C_1 = C_2 = C$  (în această situație, una dintre componente se va alege arbitrar).

**23.C.2.** Să se determine expresia benzii de frecvență (frecvențele de tăiere) în funcție de  $R$  și  $C$  pentru cele 3 tipuri de filtre.

### 23.D. DESFĂȘURAREA LUCRĂRII

Vom studia, pe rând, comportamentul în domeniul timp și în domeniul frecvență al celor trei tipuri de filtre studiate anterior, folosind datele obținute la *problema 23.C.1*.

Pentru analiza în domeniul timp, creați 3 profiluri de simulare identice, având numele: "*timp\_FTJ*", "*timp\_FTS*" și "*timp\_FTB*", de tip *Time Domain* (durata maximă =  $20\text{ms}$ , pasul maxim =  $10\text{us}$  și bifați *SKIPBP*).

Pentru analiza în domeniul frecvență, creați 3 profiluri de simulare având numele: "*frecv\_FTJ*", "*frecv\_FTS*" și respectiv "*frecv\_FTB*", de tip AC Sweep/Noise (frecvența minimă = 1Hz, frecvența maximă = 100MHz, cu 100 puncte/decadă).

**23.D.1.** Realizați în ORCAD schema pentru FTJ din Figura 23.1, folosind datele obținute la problema 23.C.1. Amplificatorul operațional (AD741 din biblioteca OPAMP) trebuie alimentat cu două surse VDC de 15V.

Vom studia pentru început comportamentul în **domeniul timp** al filtrului, prin analiza răspunsului indicial și a funcției pondere.

Pentru vizualizarea **răspunsului indicial**, legați la intrarea circuitului o sursă de tip VDC de 1V (cu care vom simula treapta unitate).

Activați profilul " *timp\_FTJ*", apăsați **RUN** și vizualizați răspunsul indicial în cele două cazuri de la problema 23.C.1.

Măsurați frecvența de oscilație activând butonul FFT (obținându-se astfel reprezentarea spectrală continuă a răspunsului indicial), după care poziționând cursorul la valoarea maximă a spectrului se va citi frecvența corespunzătoare. Măsurătoarea se va efectua pentru ambele cazuri după Q.

**23.D.2.** Pentru studiul **funcției pondere**, aplicăm la intrarea circuitului o sursă VPULSE (cu care vom impulsiona Dirac), având următorii parametri:

$$\begin{array}{lll} V1 = 0V & TD = 0 & PW = 10\mu s \\ V2 = 1V & TR = 1\mu s & PER = 1s \\ & TF = 1\mu s & \end{array}$$

Pentru perioadă am fixat o valoare cât mai mare, deoarece impulsul Dirac trebuie să apară o singură dată pe durata simulării.

Apăsați **RUN** și vizualizați răspunsul Dirac pentru ambele cazuri.

**23.D.3.** Pentru studiul comportamentului în domeniul frecvență, activați profilul "*frecv\_FTJ*" și schimbați sursa de la intrare cu o sursă VAC.

Apăsați **RUN** și vizualizați caracteristicile de frecvență în ambele cazuri după Q.

Pe caracteristica amplificării măsurați frecvența de tăiere (banda de frecvență) la  $3dB$ . Comparați această valoare cu cea calculată la *problema 23.C2*.

**ATENȚIE!** Nivelul maxim stabil nu înseamnă valoare maximă a unui eventual riplu pe caracteristică ci valoarea maximă constantă!

O altă variantă de a determina banda de frecvență este folosind funcțiile de căutare *sf le(-3)* (*search forward level(-3)*), respectiv *sb le(-3)* (*search backward level(-3)*). Aceste funcții de căutare permit poziționarea automată a cursorilor.

*sf le(-3)* – înseamnă *caută înainte nivelul (valoare curentă cursor minus 3)*. Această comandă se utilizează la *FTJ*.

*sb le(-3)* – înseamnă *caută înapoi nivelul (valoare curentă cursor minus 3)*. Această comandă se utilizează la *FTS*.

**OBSERVAȚIE:** Pentru folosirea corectă a acestor comenzi trebuie poziționat manual cursorul la nivelul maxim stabil.

În cazul filtrului *trece-bandă*, trebuie folosite ambele comenzi cu observația că cele două cursori se poziționează la valoarea frecvenței centrale (frecvența la care modulul este maxim  $f_0$ ).

Determinați ordinul filtrului (modulul reprezentat pe scară logaritmică) în felul următor: poziționați cele două cursori pe o decadă pe panta caracteristicii de modul și se citește diferența pe verticală. Se obține un număr, care împărțit cu  $\pm 20dB/dec$  (după cum panta este crescătoare sau descrescătoare) rezultă ordinul filtrului.

Afișați caracteristica de fază. Determinați domeniul în care variază funcția de fază și măsurați defazajul la care apare fenomenul de rezonanță.

**23.D.2.** Reluați punctele anterioare pentru *FTS* și *FTB*, activând profilele corespunzătoare: *"timp\_FTS"* și *"frecv\_FTS"*, respectiv *"timp\_FT B"* și *"frecv\_FT B"*.