

LUCRAREA NR. 7

FILTRE ACTIVE CU AMPLIFICATOARE OPERAȚIONALE

Scopul lucrării: Studiul filtrelor active realizate cu amplificatoare operaționale prin ridicarea caracteristicilor lor de frecvență.

1. Filtrele active

Filtrele active (cu tranzistoare bipolare, cu tranzistoare cu efect de câmp sau cu amplificatoare operaționale) realizează aceleași funcții ca și filtrele cu elemente pasive – filtre trece jos, trece sus, trece bandă, etc. – dar sunt capabile să asigure o amplificare de putere supraunitară și acoperă un domeniu de frecvențe mult mai larg, în special spre frecvențe joase (fără a necesita bobine și condensatoare de dimensiuni foarte mari).

Realizarea filtrelor active cu amplificatoare operaționale prezintă și avantajul unei mai bune independențe a caracteristicii de transfer și a parametrilor filtrelor de parametrii elementelor active utilizate și, implicit, de variația acestora la modificări ale mediului ambiant.

2. Realizarea filtrelor active cu amplificatoare operaționale

Sunt mai multe posibilități de realizare a filtrelor active cu amplificatoare operaționale caracterizate printr-o funcție de transfer cu doi poli, după modul de utilizare a amplificatorului operațional și de structura rețelei pasive selective utilizate. În lucrare, amplificatorul operațional este folosit ca o sursă de tensiune comandată în tensiune (deci ca un amplificator ideal de tensiune) conform schemei din *figura 7.1.a*.

Amplificatorul din *figura 7.1.a* este caracterizat prin:

- amplificare de tensiune, $A_u = k$, dependentă de cele două rezistențe din rețeaua de reacție, R_a și R_b :

$$k = 1 + \frac{R_b}{R_a} \quad (7.1)$$

- impedanța de intrare, $Z_i \rightarrow \infty$, foarte mare;

- impedanța de ieșire, $Z_o \rightarrow 0$, foarte mică.

În acest fel, impedanța de intrare și impedanța de ieșire nu vor afecta circuitele de reacție selective conectate la ieșirea și la intrarea amplificatorului. În continuare, pentru amplificatorul din *figura 7.1.a*, realizat cu amplificator operațional, va fi folosit simbolul din *figura 7.1.b*.

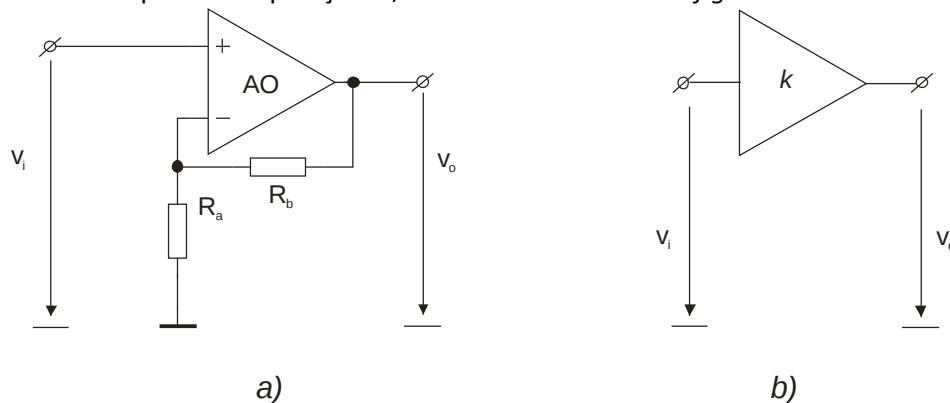


Fig. 7.1. Amplificatorul de tensiune realizat cu AO

3. Schema de principiu a filtrelor active cu AO

Schema de principiu a filtrelor active realizate cu amplificator operațional folosit amplificator de tensiune, este reprezentată în *figura 7.2*.

Funcția de transfer a circuitului se obține sub forma :

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{k \cdot Y_1 \cdot Y_4}{Y_5(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_4 \cdot Y_1 + Y_3 + Y_2(1 - k)} \quad (7.2)$$

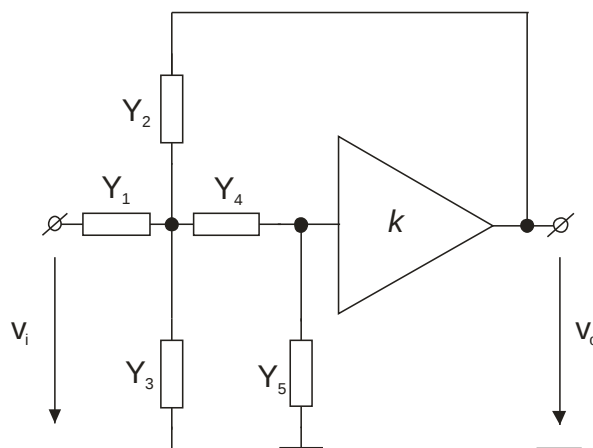


Fig. 7.2. Schema de principiu a filtrelor active cu AO

Prin particularizarea admitanțelor Y_i se pot obține filtre cu diverse caracteristici de frecvență.

4. Funcția de transfer a unui filtru trece jos (FTJ)

Funcția de transfer a unui filtru trece jos (FTJ), având numitorul un polinom de gradul 2 este:

$$H(s) = \frac{k\omega_0^2}{s^2 + \alpha\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (7.3)$$

în care :

- k este amplificarea în bandă, la frecvențe joase ;
- ω_0 este frecvența caracteristică a filtrului ;
- α este coeficientul de amortizare.

Variația modulului funcției de transfer, pentru un regim sinusoidal permanent, la scară dublu logaritmică, este reprezentată în *figura 7.3*, pentru mai multe valori ale factorului de amortizare. Amplificarea la frecvența caracteristică va fi :

$$|H(j\omega_0)| = \frac{k}{\alpha} \quad (7.4)$$

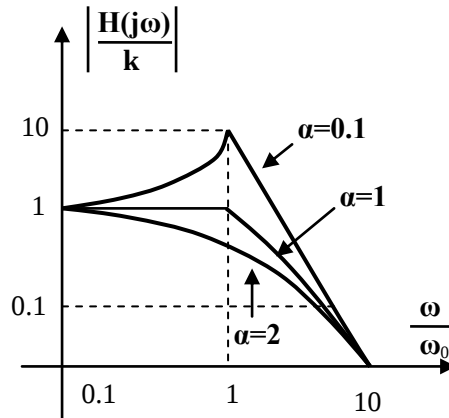


Fig. 7.3. Modulul funcției de transfer pentru diferite valori ale factorului de amortizare α (FTJ)

Aceasta înseamnă că, pentru $\alpha < 1$, se obțin caracteristici de frecvență cu supracreșteri în bandă, dar cu o scădere mai rapidă a amplificării în afara benzii de trecere.

Se observă că, pentru $\alpha \rightarrow 0$, la frecvența caracteristică, amplificarea de tensiune tinde către infinit, ceea ce arată că circuitul oscilează pe frecvența caracteristică.

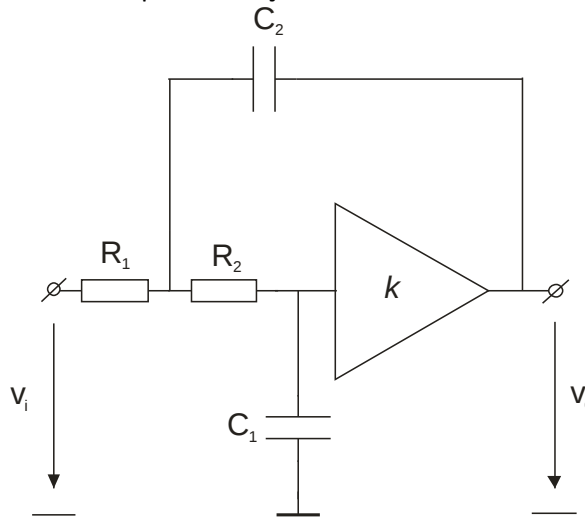


Fig. 7.4. Filtru trece-jos

În figura 7.4 este desenată schema unui filtru trece jos corespunzător schemei de principiu din figura 7.2, pentru care se deduc relațiile :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (7.5)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} \left[1 + (1-k) \cdot \frac{R_1 C_1}{R_2 C_2} + \frac{R_1}{R_2} \right] \quad (7.6)$$

Amplificarea în bandă este k iar în afara benzii, la frecvențe suficient de mari față de ω_0 , amplificarea scade cu 40 db pe decadă, scădere specifică funcției de transfer cu doi poli.

5. Funcția de transfer a unui filtru trece sus (FTS)

Funcția de transfer a unui filtru trece sus (FTS) având numitorul un polinom de gradul 2 este :

$$H(s) = \frac{ks^2}{s^2 + \alpha\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (7.7)$$

în care:

- k este amplificarea în bandă, la frecvențe înalte ;
- ω_0 este frecvența caracteristică a filtrului ;
- α este coeficientul de amortizare al filtrului.

Variația modului funcției de transfer, pentru un regim sinusoidal permanent, la scară dublu logaritmică, este reprezentată în figura 7.5 pentru mai multe valori ale factorului de amortizare.

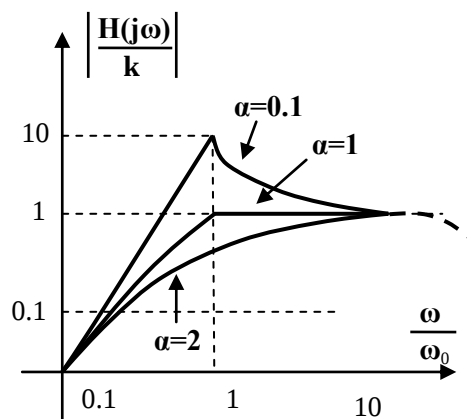


Fig. 7.5. Modulul funcției de transfer pentru diferite valori ale factorului de amortizare α (FTS)

Amplificarea de tensiune la frecvența caracteristică devine :

$$|H(j\omega_0)| = \frac{k}{\alpha} \quad (7.8)$$

Din figura 7.5 se constată că, pentru $\alpha < 1$, se obțin caracteristici de frecvență cu supracreșteri în bandă, dar cu o scădere mai pronunțată a amplificării pentru $\omega > \omega_0$. Pentru $\alpha \rightarrow 0$, amplificarea de tensiune la frecvența caracteristică tinde spre infinit, ceea ce înseamnă că circuitul oscilează pe această frecvență.

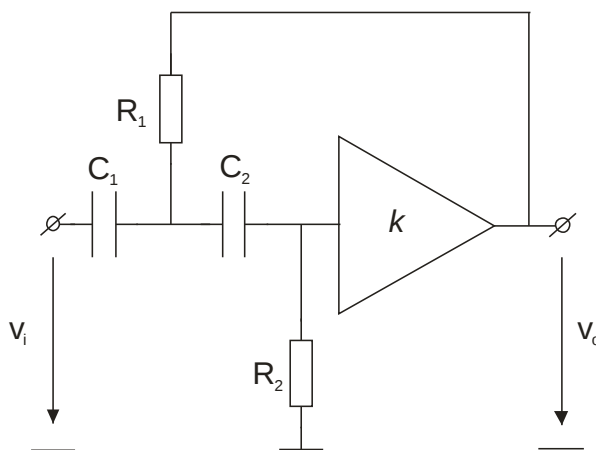


Fig. 7.6. Filtru trece-sus

În figura 7.6, este desenată schema unui filtru trece sus corespunzătoare schemei de principiu din figura 7.2, pentru care se deduc relațiile :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (7.9)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \left[1 + \frac{C_2}{C_1} + (1-k) \frac{R_2 C_2}{R_1 C_1} \right] \quad (7.10)$$

Pentru filtrul trece sus, la frecvențe mari, începe să se producă scăderea amplificării, determinată de banda de frecvențe limitată a amplificatorului operațional real utilizat; în figura 7.5, această scădere este reprezentată punctat.

6. Funcția de transfer a unui filtru trece bandă (FTB)

Funcția de transfer a unui filtru trece bandă (FTB), având numitorul un polinom de gradul 2, este:

$$H(s) = \frac{k \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot s + \omega_0^2} \quad (7.11)$$

în care:

- ω_0 este frecvența caracteristică (sau de acord, de rezonanță, centrală) a filtrului;
- Q este factorul de calitate al circuitului (inversul coeficientului de amortizare, α , folosit pentru celelalte filtre);
- k este amplificarea la acord a filtrului.

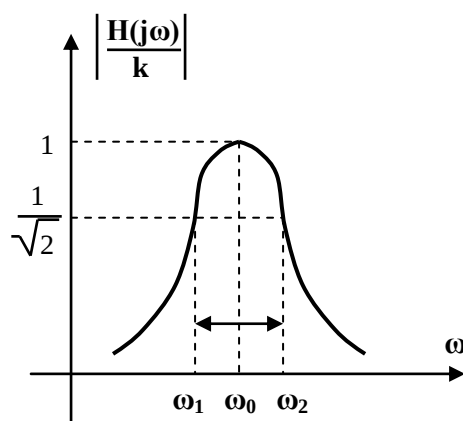


Fig. 7.7. Modulul funcției de transfer (FTB)

Variația modului funcției de transfer, la scară liniară pe ambele coordonate, este reprezentată în figura 7.7; se definește banda de trecere a filtrului ca fiind domeniul de frecvențe pentru care modulul amplificării este mai mare decât $\frac{1}{\sqrt{2}}$ din valoarea maximă a amplificării :

$$B = \omega_2 - \omega_1 = \frac{\omega_0}{Q} \quad (7.12)$$

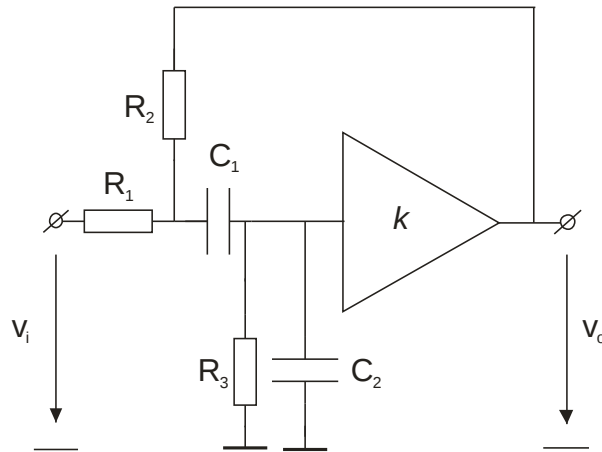


Fig. 7.8. Filtru trece-bandă

În figura 7.8 este desenată schema unui filtru trece bandă corespunzătoare schemei de principiu din figura 7.2, pentru care se deduc următoarele relații :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_3 R_1 \parallel R_2}} \quad (7.13)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_3 R_1 \parallel R_2} \left(\frac{1-k}{C_2 R_2} + \frac{1}{R_1 \parallel R_3} \cdot \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2} \right)} \quad (7.14)$$

Banda la 3 db, definită cu relația (7.12) se obține sub forma :

$$B = \omega_2 - \omega_1 = 2\pi f_B = \frac{1-k}{C_2 R_2} + \frac{1}{R_1 \parallel R_3} \cdot \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2} \quad (7.15)$$

Pentru fiecare parametru al filtrului activ (de exemplu, frecvență caracteristică, factor de calitate, etc.) se poate defini un factor de sensibilitate față de unul dintre parametrii schemei (rezistențe, capacități, etc.).

Pentru filtrul trece bandă, se calculează factorul de sensibilitate al factorului de calitate, Q, în raport cu variațiile amplificării amplificatorului de bază, conform relației :

$$S_Q^k = \frac{\Delta Q / Q}{\Delta k / k} \quad (7.16)$$

Acest factor de sensibilitate se poate deduce din relația (7.14).

DESFĂȘURAREA LUCRĂRII

1. Se identifică montajul din figura 7.9. Amplificatorul operațional AO₁ se folosește ca repetor de tensiune pentru a asigura comanda filtrelor cu generator de tensiune cu o impedanță de ieșire cât mai mică. Amplificatorul operațional AO₂ este folosit cu o reacție negativă de tensiune neselectivă prin rezistența R_b, liniară și cu o reacție negativă neliniară, prin diodele ZENER, care intră în funcțiune numai pentru semnale mari la ieșire; acest circuit permite limitarea amplitudinii oscilațiilor atunci când se măsoară frecvența caracteristică filtrului.

Prin modificarea rezistenței R_a se obțin trei valori ale amplificării de tensiune :

- pentru R_a → ∞ , R_b = 1,8 kΩ ; k = 1 ;
- pentru R_a = 1,8 kΩ, R_b = 1,8 kΩ ; k = 2 ;

- pentru $R_a = 900 \Omega$, $R_b = 1,8 \text{ k}\Omega$; $k = 3$.

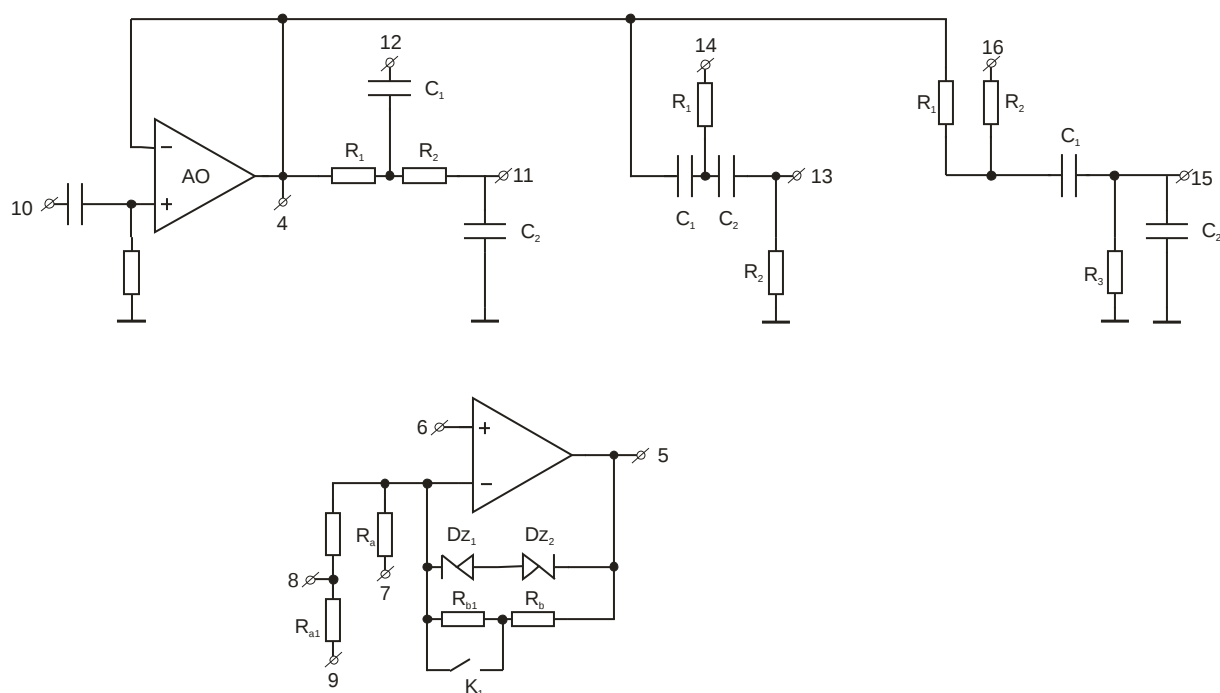


Figura 7.9. Montajul de laborator

Rezistența $R_{b1} = 200 \Omega$, în mod normal scurt circuitată de comutatorul K_1 , se folosește pentru mărirea amplificării de tensiune, k , peste valoarea 3, în așa fel încât filtrul să oscileze, în scopul măsurării frecvenței caracteristice.

Rezistența $R_{a1} = 20 \Omega$ se folosește pentru a realiza o mică variație a amplificării de tensiune pentru a determina factorul de sensibilitate al filtrului trece bandă.

Se alimentează circuitul cu tensiunile de alimentare $+12 \text{ V}$ (la borna 2) și -12 V (la borna 3), borna comună a celor două surse de alimentare fiind masa (borna 1).

2. Se realizează filtrul trece jos din figura 7.4, conectând 6 cu 11 și 5 cu 12.

Se măsoară frecvența caracteristică a filtrului, pentru care se realizează $\alpha \leq 0$ (sau $k \geq 3$) în condițiile în care $R_1 = R_2$ și $C_1 = C_2$. Pentru acesta se deschide comutatorul K_1 , ceea ce asigură valoare maximă pentru rezistența R_b și se ia pentru R_a valoarea minimă; frecvența se măsoară cu ajutorul figurilor Lissajous sau cu un frecvențmetru numeric.

Se trasează caracteristica de frecvență a filtrului pentru cele trei valori ale amplificării k obținute la punctul 1. Se aplică, la intrare, la borna 10, tensiune sinusoidală de 100 mV și frecvență variabilă (aceeași tensiune se regăsește la borna 4). Se modifică frecvența în scară logaritmică (începând cu 20 Hz) și se măsoară tensiunea de ieșire (borna 5). Se vor face măsurători și pentru alte frecvențe situate în jurul frecvenței caracteristice a filtrului. Se va nota frecvența la care tensiunea de ieșire devine maximă (dacă este cazul).

3. Se realizează filtrul trece sus din figura 7.6, conectând 6 cu 13 și 5 cu 14.

Se măsoară frecvența caracteristică și caracteristicile de frecvență pentru cele trei valori ale amplificării (și deci și ale coeficientului de amortizare, α) ca și pentru filtrul trece jos.

4. Se realizează filtrul trece bandă (6 cu 15, 5 cu 16).

Se măsoară frecvența caracteristică (sau de acord). Se trasează cele trei caracteristici de frecvență. La fiecare dintre ele, se vor determina și frecvențele la care amplificarea de tensiune scade cu 3 dB față de valoarea maximă, de la acord.

Se trasează caracteristica de frecvență în cazul în care $R_b = 1,8 \text{ k}\Omega$ și $R_a = 953 + 20 \Omega$, ceea ce determină o mică variație a amplificării de tensiune, în cazul în care $k = 2$ față de cazul în care $k = 3$. Se determină banda de trecere și frecvența de acord și se determină noua valoare a factorului de calitate, cu relația (12).

Referatul va conține:

- schemele electrice ale celor trei filtre studiate ;
- tabele cu frecvența caracteristică, factorul de amortizare, respectiv factorul de calitate, Q și amplificarea în bandă (pentru FTJ și FTS) respectiv la acord (pentru FTB), valori măsurate și valori calculate pentru toate cele trei valori ale lui k ;
- caracteristicile de frecvență ale celor trei filtre ;
- determinarea teoretică, conform relațiilor (7.16) și (7.14) și compararea experimentală cu valoarea experimentală a factorului de sensibilitate al factorului de calitate Q în raport cu amplificarea de tensiune, k , pentru filtrul trece bandă, cu $k = 3$;
- rezultatele simulării
- să se calculeze caracteristica de transfer a filtrului trece bandă, în cazul în care amplificatorul operațional este caracterizat prin funcția de transfer în buclă deschisă :

$$A_u = \frac{A_0}{1 + j \cdot f / f_{\max}} \quad (7.17)$$

și să se calculeze noua frecvență de acord, dacă $A_0 = 100.000$ și $f_{\max} = 10 \text{ Hz}$ (valori tipice pentru $\beta A 741$, utilizat în lucrare).

Datasheet-uri:

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXssuwx.pdf>