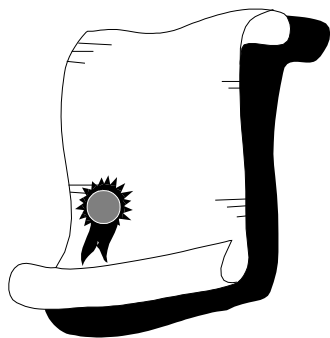


CIRCUITE DE CONDIȚIONARE A SEMNALELOR



Subiecte

1.1. Introducere

1.2. Amplificatoare de izolare

1.2.1. Amplificator de izolare cu cuplaj optic și modulație în intensitate luminoasă

1.2.2. Amplificator de izolare cu cuplaj prin transformator și modulație de impulsuri în durată

1.3. Amplificatoare cu modulare-demodulare

1.3.1. Amplificator cu modulare-demodulare cu chopper

1.3.2. Amplificator stabilizat cu chopper

1.3. Convertor tensiune-frecvență

1.1. Introducere

Rolul principal al circuitelor de condiționare a semnalelor este conversia semnalelor de la ieșirea traductoarelor în semnale compatibile cu intrările circuitelor de conversie analog-numerice. Alte funcții ale acestor circuite sunt:

- separarea galvanică a sistemului de achiziție și prelucrare numerică a semnalelor de sursa de semnal;
- rejectia zgomotelor de joasă și înaltă frecvență;
- procesarea analogică a semnalului (de ex. liniarizarea caracteristicii unui traductor);
- amplificarea semnalelor cu nivel mic.

În acest capitol vor fi prezentate amplificatoare de izolare, amplificator pentru semnale mici, lent variabile și convertorul tensiune-frecvență.

1.2. Amplificatoare de izolare

În cazul în care în cadrul procesului fizic la care sunt conectate traductoarele pot apare tensiuni de mod comun de nivel foarte ridicat este necesară separarea galvanică a acestuia de sistemul de achiziție și prelucrare a semnalelor. De asemenea, în cazul aparaturii biomedicale unde traductoarele sunt în contact cu ființe umane (pacienți) este necesară separarea galvanică a etajului de intrare conectat la traductoare de cel de ieșire respectiv, de sursa de alimentare. Separarea galvanică se face cu ajutorul amplificatoarelor de izolare.

Pe lângă protecția sistemului de achiziție și prelucrare sau a pacienților față de tensiunile ridicate de mod comun, izolarea galvanică asigură și întreruperea buclelor de masă din circuitul de cuplare a sursei de semnal. Acest lucru conduce la reducerea perturbațiilor.

În figura 1.1 se prezintă structura de principiu a unui amplificator de izolare. Pentru a evidenția izolarea galvanică a

Modulul 1

Circuite de condiționare a semnalelor

circuitului de intrare față de circuitul de ieșire și față de sursa de alimentare s-au utilizat simboluri de masă diferite pentru cele 3 componente prezentate.

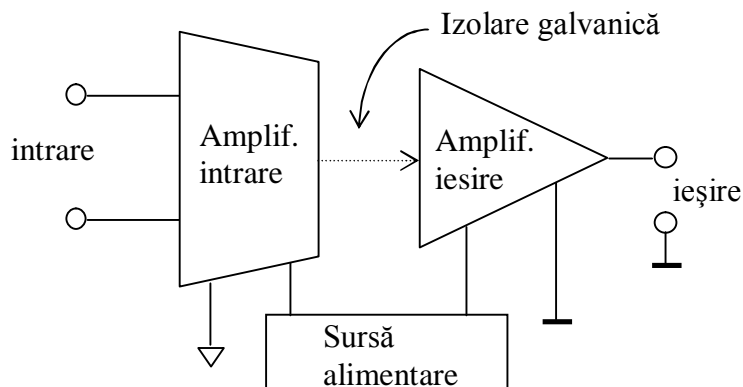


Fig. 1.1. Structura de principiu a unui amplificator de izolare.

Transferul semnalului util de la amplificatorul de intrare la cel de ieșire se poate realiza prin cuplaj inductiv sau optic. În cazul cuplajului inductiv se utilizează transformatoare miniaturale. Acestea asigură izolarea pentru tensiuni de până la 5 kV. În cazul cuplajului optic, amplificatorul de intrare comandă o diodă electroluminiscentă ce transmite informația spre o fotodiodă sau un fototranzistor conectat la intrarea amplificatorului de ieșire. În acest caz se asigură izolarea pentru tensiuni până la 2,5 kV.

Dacă se dorește un amplificator de izolare de bandă largă și viteze mari de răspuns se utilizează cuplajul optic. Dacă se dorește o precizie mare și o liniaritate mai bună, dar de bandă mai îngustă, se folosește cuplajul prin transformator.

Transferul semnalului de la amplificatorul de intrare la cel de ieșire se face prin:

- în cazul cuplajului optic:
 - modulația de impulsuri în durată;
 - modulația în intensitate luminoasă;
- în cazul cuplajului inductiv:
 - modulația de impulsuri în durată;
 - modulația în amplitudine a unei purtătoare sinusoidale.



- Care este rolul unui amplificator de izolare?
- Ce fel de amplificator de izolare se alege în cazul în care este necesară o precizie mare în transferul informației?
- Cum se poate face transferul semnalului util de la amplificatorul de intrare la cel de ieșire?

Modulul 1

Circuite de condiționare a semnalelor

1.2.1. Amplificator de izolare cu cuplaj optic și modulație în intensitate luminoasă

În figura 1.2 se prezintă un amplificator de izolare cu cuplaj optic ce conține două fotocuploare. Fotocuplorul FC_1 face parte din bucla de reacție negativă a amplificatorului de intrare AO_i . Fotocuplorul FC_2 face legătura dintre etajul de intrare și cel de ieșire. Acest fotocuplor asigură izolarea galvanică între aceste etaje ale amplificatorului de izolare.

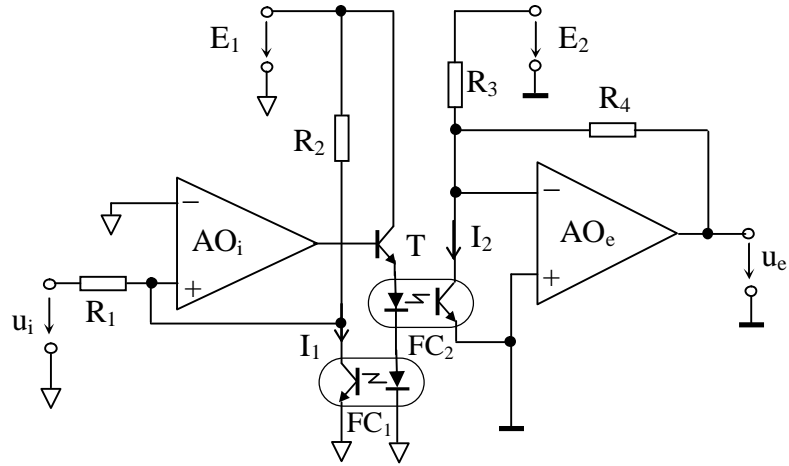


Fig. 1.2. Structura amplificatorului de izolare cu cuplaj optic și modulație în intensitate luminoasă.

Caracteristicile celor două fotocuploare trebuie să fie identice pentru ca funcția de transfer a amplificatorului să nu depindă de caracteristicile acestora. În acest caz, funcția de transfer va depinde doar de rezistențele din circuit și prin urmare va fi liniară. În continuare se va deduce această funcție de transfer. Din figura 1.2 rezultă:

$$I_1 = \frac{u_i}{R_1} + \frac{E_1}{R_2}, \quad (1.1)$$

$$I_2 = \frac{u_e}{R_4} + \frac{E_2}{R_3}. \quad (1.2)$$

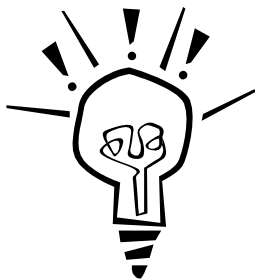
Diodele electroluminiscente sunt comandate cu același curent prin urmare, curenții de colector I_1 și I_2 corespunzătoare FC_1 și FC_2 sunt egali. Rezultă funcția de transfer a amplificatorului de izolare

$$u_e = \frac{R_4}{R_1} u_i + R_4 \left(\frac{E_1}{R_2} - \frac{E_2}{R_3} \right). \quad (1.3)$$

Modulul 1

Circuite de condiționare a semnalelor

Din relația (1.3) se poate observa că pe lângă amplificarea egală cu raportul rezistențelor R_4 și R_1 se poate face și o schimbare de nivel cu ajutorul termenului al doilea din dreapta egalității.



Aplicație:

Se consideră un amplificator de izolare cu cuplaj optic având schema din figura 1.2, unde $E_1 = E_2 = 12\text{ V}$ și $R_1 = 1\text{ k}\Omega$. Se cere:

a) Să se explice scopul utilizării a două fotocuploare în structura amplificatorului. Să se determine caracteristica de transfer. Cele două fotocuploare se consideră identice.

b) Să se determine valorile componentelor R_2 , R_3 și R_4 astfel încât amplificatorul să prezinte caracteristica de transfer din figura a1 iar curentul minim prin cele două fotocuploare să fie $I_{\min} = 10\text{ }\mu\text{A}$. Cele două amplificatoare operaționale se consideră ideale.

c) Să se determine și să se reprezinte grafic funcția de transfer a amplificatorului de izolare dacă AO_2 are curentul de polarizare $I_p = 1\text{ }\mu\text{A}$ cu sensul din figura a2.

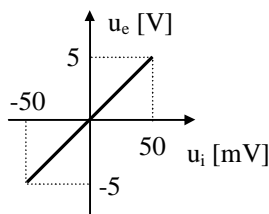


Fig. a1.

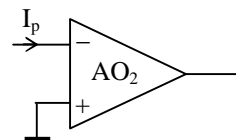


Fig. a2.

Indicații:

b) Din figura a1 pentru $u_i = 0$, $u_e = 0 \Rightarrow R_2 = R_3$; pentru $u_i = 50\text{ mV}$, $u_e = 5\text{ V}$ din relația (1.3) $\Rightarrow R_4$.

Din relația (1.1) I_1 este minim pentru $u_{i\min} = -50\text{ mV}$. Se înlocuiește în relația (1.1) u_i cu $u_{i\min}$ și rezultă valoarea rezistenței R_2 .

c) Se rescrie relația (1.2) sub forma

$$I_2 = \frac{u_e}{R_4} + \frac{E_2}{R_3} - I_p.$$

Deoarece $I_1 = I_2$ și $R_2 = R_3$ rezultă

$$u_e = \frac{R_4}{R_1} u_i + I_p R_4.$$

Reprezentarea grafică a funcției de transfer este o dreaptă paralelă cu cea din figura 1a care trece prin punctul dat de coordonatele $u_i = 0\text{ V}$, $u_e = I_p R_4$.

1.2.2. Amplificator de izolare cu cuplaj prin transformator și modulație de impulsuri în durată

În continuare se prezintă structura de principiu și funcționarea unui amplificator de izolare cu cuplaj prin transformator ce utilizează

Modulul 1

Circuite de condiționare a semnalelor

modulația de impulsuri în durată pentru transferul semnalului de la etajul de intrare la cel de ieșire.

Pentru alimentarea circuitelor de intrare și ieșire se utilizează un generator de impulsuri conectat la o înfășurare a transformatorului miniatural. Prin același transformator se face și transmiterea informației. Fronturile de cădere ale impulsurilor sunt utilizate pentru sincronizarea modulatorului în durată și a celor două demodulatoare.

Modulatorul în durată generează impulsuri negative a căror durată depinde de valoarea semnalului util.

Demodulatorul de intrare face parte din bucla de reacție negativă a amplificatorului de intrare. Demodulatorul de ieșire este conectat la intrarea neînversoare a amplificatorului de ieșire AO_e. Cele două demodulatoare trebuie să aibă caracteristici identice astfel încât să genereze la ieșiri tensiuni de valoare egale. În acest mod funcția de transfer a amplificatorului de izolare este liniară.

În figura 1.3 se prezintă structura de principiu a unui amplificator de izolare cu cuplaj prin transformator în configurație de amplificator neînversor.

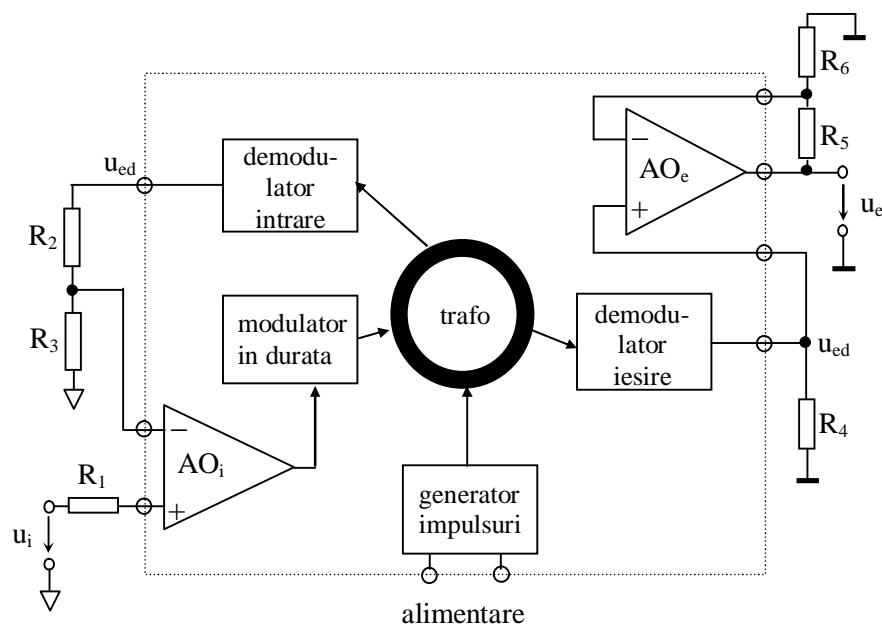


Fig. 1.3. Conectarea amplificatorului de izolare în configurație de amplificator neînversor.

În continuare se prezintă deducerea relațiilor de calcul a valorilor rezistențelor R_1 la R_6 .

Amplificarea etajului de intrare este stabilită cu ajutorul rezistențelor R_2 și R_3 iar cea a etajului de ieșire cu ajutorul rezistențelor R_5 și R_6 .

Rezistența R_1 este utilizată pentru a compensa efectul curenților de polarizare a intrărilor amplificatorului de intrare AO_i. Prin urmare valoarea rezistenței R_1 se stabilește cu relația

$$R_1 = R_3 \parallel (R_2 + R_{ed}), \quad (1.4)$$

Modulul 1

Circuite de condiționare a semnalelor

unde R_{ed} este rezistența de ieșire a demodulatorului.

Pentru reducerea erorilor de decalaj datorate curenților de polarizare de la intrările amplificatorului de ieșire AO_e trebuie satisfăcută relația

$$R_4 \parallel R_{ed} = R_5 \parallel R_6. \quad (1.5)$$

Rezistența R_4 se utilizează pentru a încărcă demodulatorul de ieșire identic cu demodulatorul de intrare astfel,

$$R_4 = R_2 + R_3. \quad (1.6)$$

Amplificatoarele de intrare și de ieșire se consideră ideale. Acest lucru înseamnă că diferența de potențial între intrarea inversoare și cea neinversoare este zero. Pentru divizorul din etajul de intrare se poate scrie:

$$u_i = \frac{u_{ed}}{R_2 + R_3} R_3. \quad (1.7)$$

Pentru divizorul din etajul de ieșire se poate scrie:

$$u_{ed} = \frac{u_e}{R_5 + R_6} R_6. \quad (1.8)$$

Cele două demodulatoare având caracteristici identice și aceeași valoare a rezistenței de sarcină la ieșire, u_{ed} din relațiile (1.7) și (1.8) sunt identice. Astfel, rezultă funcția de transfer a amplificatorului de izolare sub forma:

$$u_e = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) u_i. \quad (1.9)$$

Din relația (1.9) se obține factorul de amplificare și anume:

$$A = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right). \quad (1.10)$$

Structura de principiu a unui amplificator de izolare inversor este prezentată în figura 1.4.

Etajul de intrare realizează funcția de inversare prin conexiunile realizate. Divizorul format cu rezistențele R_2 și R_3 stabilește amplificarea etajului de intrare. Avem succesiv:

$$\frac{u_i}{R_3} = -\frac{u_{ed}}{R_2}, \quad (1.11)$$

Modulul 1

Circuite de condiționare a semnalelor

$$A_{in} = \frac{u_{ed}}{u_i} = -\frac{R_2}{R_3}. \quad (1.12)$$

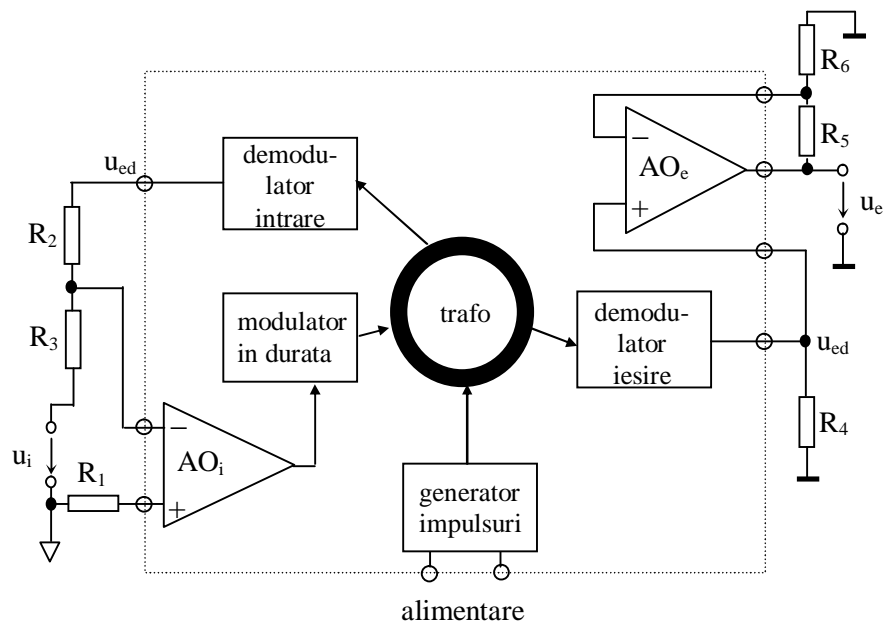


Fig. 1.4. Conectarea amplificatorului de izolare în configurație de amplificator inversor.

Divizorul format cu rezistențele R_5 și R_6 stabilește amplificarea etajului de ieșire. Avem succesiv:

$$\frac{u_{ed}}{R_6} = \frac{u_e}{R_5 + R_6}, \quad (1.13)$$

$$A_{out} = \frac{u_e}{u_{ed}} = 1 + \frac{R_5}{R_6}. \quad (1.14)$$

Rezultă amplificarea amplificatorului de izolare

$$A = \frac{u_e}{u_i} = A_{in} \cdot A_{out} = -\frac{R_2}{R_3} \left(1 + \frac{R_5}{R_6} \right). \quad (1.15)$$

Relațiile (1.4), (1.5) și (1.6) rămân valabile și în acest caz astfel, ieșirile demodulatoarelor sunt încărcate identic și se reduc erorile de decalaj datorate curenților de polarizare de la intrările amplificatoarelor AO_i și AO_e .



- Cum se realizează alimentarea amplificatorului de izolare cu cuplaj prin transformator ?
- Care este motivul pentru care demodulatoarele din etajele de intrare și ieșire trebuie să aibe caracteristici identice ?
- Care este rolul rezistenței R_4 din figura 1.3 ?

Modulul 1

Circuite de condiționare a semnalelor

1.3. Amplificatoare cu modulare-demodulare

Amplificatorul cu modulare-demodulare (AMD) este utilizat pentru amplificarea cu $60 \div 100$ dB ($1.000 \div 100.000$) a unor tensiuni de nivel foarte mic (microvolți sau milivolți) și de joasă frecvență. Acest lucru este posibil deoarece permite obținerea unor valori reduse ale derivatei tensiunii de decalaj în timp și cu temperatura.

Tensiunea de decalaj este tensiunea ce trebuie adusă la intrarea unui amplificator real pentru ca la ieșire să obținem zero volți. Tensiunea de decalaj este cunoscută, prin urmare poate fi "eliminată" prin proiectarea corespunzătoare a montajului din care va face parte amplificatorul.

Deriva este o variație aleatoare lentă. Fiind aleatoare este o necunoscută. Prin urmare, dacă se dorește amplificarea unor semnale ce conțin componente de joasă frecvență trebuie să folosim un amplificator ce are o derivă redusă a tensiunii de decalaj.

În figura 1.5 se prezintă structura de principiu a unui AMD.

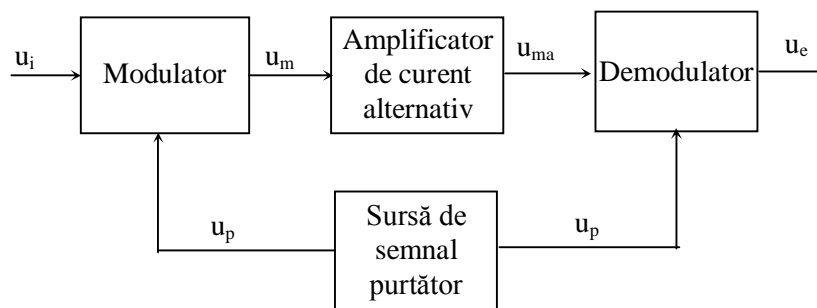


Fig. 1.5. Structura de principiu a unui amplificator cu modulare-demodulare.

Cu ajutorul modulatorului se modulează un semnal purtător u_p cu semnalul de intrare u_i . Semnalul u_p are o frecvență mult mai mare decât frecvența maximă din spectrul semnalului u_i . Semnalul modulat, notat u_m , este amplificat de către un amplificator de curent alternativ. Semnalul modulat și amplificat, notat u_{ma} , este adus la intrarea demodulatorului pentru a obține semnalul de intrare amplificat, notat u_e .

Prin această schemă de realizare a AMD, deriva tensiunii de decalaj a acestuia este dată în principal de circuitul modulator. Deriva circuitului demodulator se raportează la intrare prin factorul de amplificare al amplificatorului de curent alternativ. În proiectarea AMD se impune condiția ca modulatorul să aibă o derivă a tensiunii de decalaj redusă.

1.3.1. Amplificator cu modulare-demodulare cu chopper

AMD cu chopper utilizează un semnal purtător de formă dreptunghiulară. Astfel, modulatorul și demodulatorul pot fi realizate simplu cu ajutorul unor comutatoare notate în figura 1.6 cu K_1 și respectiv K_2 .

Modulul 1

Circuite de condiționare a semnalelor

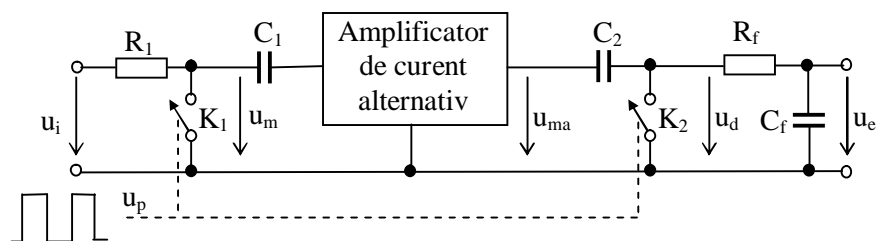


Fig. 1.6. Structura de principiu a unui AMD cu chopper.

Funcționarea AMD cu chopper rezultă pe baza diagramelor de timp din figura 1.7.

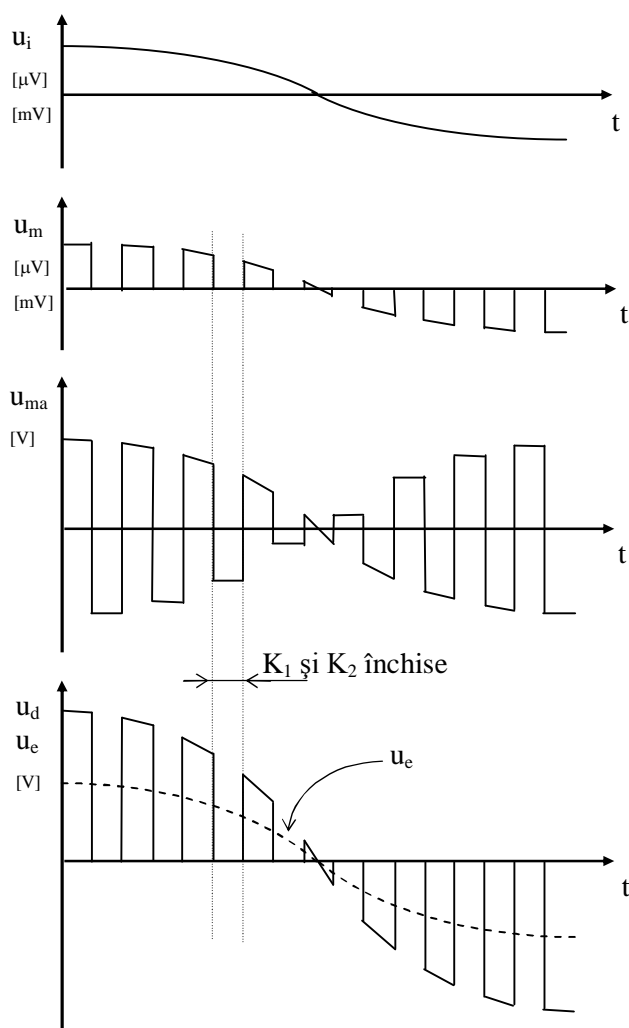


Fig. 1.7. Diagramele de timp corespunzătoare unui amplificator cu modulare-demodulare cu chopper.

Rezistența R_1 este utilizată pentru limitarea curentului absorbit la intrare atunci când comutatorul K_1 este închis. Semnalul de intrare u_i modulează prin "choppare" semnalul purtător u_p rezultând semnalul modulat u_m . Condensatorul C_1 elimină componenta continuă din semnalul u_m (axează semnalul pe zero) astfel, la intrarea amplificatorului de curent alternativ ajunge un semnal cu aceeași

Modulul 1

Circuite de condiționare a semnalelor

formă de variație ca a semnalului u_{ma} de la ieșirea amplificatorului. Banda de frecvență a amplificatorului de curent alternativ este suficient de mare astfel încât semnalul dreptunghiular modulat să treacă fără distorsiuni. Prin intermediul condensatorului C_2 și a comutatorului K_2 se face demodularea obținându-se tensiunea u_d care este adusă la intrarea unui filtru trece jos format din componentele R_f și C_f . Semnalul u_e de la ieșirea filtrului trece jos este semnalul u_i amplificat.

În continuare se prezintă modul în care se face demodularea adică, obținerea tensiunii u_d din tensiunea u_{ma} . Se consideră u_i cu valori pozitive. Comutatoarele K_1 și K_2 sunt comandate în fază.

Considerăm K_1 și K_2 închise. Rezultă că $u_m = 0$ și la ieșirea amplificatorului de curent alternativ avem semnal negativ notat u_{ma-} . Condensatorul C_2 se încarcă cu această tensiune cu sensul prezentat în figura 1.8. Pe această perioadă de timp tensiunea u_d are valoarea zero volți.

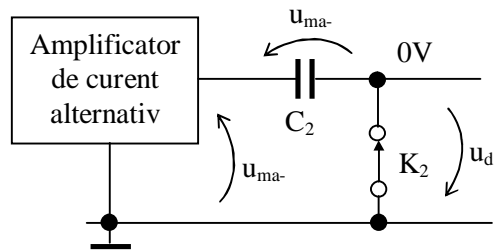


Fig. 1.8. Funcționare demodulator, K_2 închis.

Pe perioada cât comutatoarele K_1 și K_2 sunt deschise tensiunile u_m și u_{ma} au valori pozitive. Notăm tensiunea de la ieșirea amplificatorului de curent alternativ u_{ma+} . În acest interval de timp descărcarea condensatorului C_2 este nesemnificativă. Rezultă că tensiunea u_d va avea valoarea

$$u_d = u_{ma-} + u_{ma+} . \quad (1.16)$$

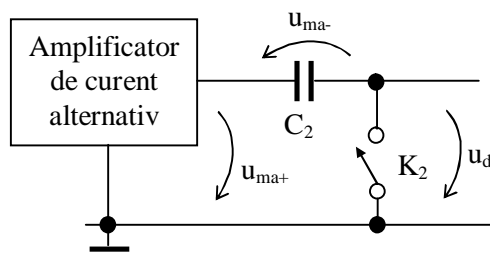


Fig. 1.9. Funcționare demodulator, K_2 deschis.

Deoarece u_i variază lent față de u_p rezultă că $|u_{ma-}| \cong |u_{ma+}|$. Prin urmare amplitudinea tensiunii u_d este aproximativ egală cu dublul amplitudinii tensiunii u_{ma} .

Filtrul trece jos face o integrare a tensiunii u_d rezultând tensiunea u_e . În funcție de factorul de umplere a tensiunii u_p ,

Modulul 1

Circuite de condiționare a semnalelor

tensiunea u_e poate avea o valoare instantanee mai mare, egală sau mai mică față de amplitudinea (anvelopa) tensiunii u_{ma} .

Dacă comutatoarele K_1 și K_2 sunt comandate în antifază se obține un amplificator cu modulare-demodulare cu chopper inversor.



- În ce scop se utilizează amplificatoarele cu modulare demodulare ?
- Ne deranjează tensiunea de decalaj a unui amplificator operațional ? Dar deriva tensiunii de decalaj ? De ce da, de ce nu ?
- Se poate ajusta amplificarea amplificatorului stabilizat cu chopper prin modificarea factorului de umplere a semnalului purtător u_p ? De ce da, de ce nu ?

1.3.2. Amplificator stabilizat cu chopper

Amplificatorul stabilizat cu chopper utilizează metoda Goldberg pentru îmbunătățirea performanțelor de curent continuu ale unui amplificator de bandă largă (ABL) prin utilizarea unui AMD cu chopper.

Structura de principiu a unui amplificator stabilizat cu chopper este prezentată în figura 1.10.

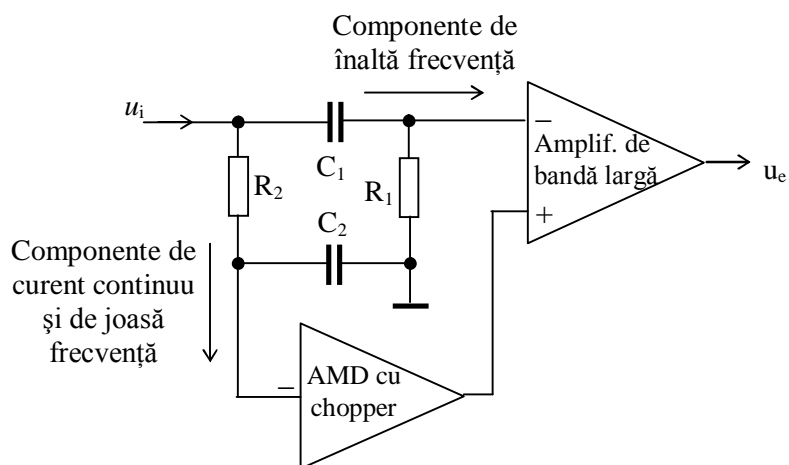


Fig. 1.10. Structura de principiu a unui amplificator stabilizat cu chopper.

Semnalul de intrare u_i ajunge la intrarea a două filtre, unul trece sus realizat cu R_1 și C_1 și unul trece jos realizat cu R_2 și C_2 . Astfel se face separarea componentelor de înaltă frecvență de cele de joasă frecvență. Componentele de înaltă frecvență sunt amplificate de ABL. Componentele de curent continuu și de joasă frecvență sunt amplificate de un AMD cu chopper în conexiune inversoare și apoi sunt aduse la intrarea neinversoare a ABL. Astfel, deriva ABL se raportează la intrarea amplificatorului stabilizat cu chopper prin factorul de amplificare al AMD cu chopper.

1.3. Convertor tensiune-frecvență

Convertoarele tensiune-frecvență realizează conversia unui semnal analogic într-un semnal dreptunghiular a cărui frecvență depinde de amplitudinea semnalului analogic. Semnalul de la ieșirea convertorului poate fi utilizat pentru obținerea unui semnal numeric sau poate fi transmis la distanță. Semnalul dreptunghiular este practic imun la perturbații, informația utilă fiind transmisă prin intermediul frecvenței instantanee a semnalului și nu prin amplitudinea sa la un moment dat. Aceste semnale pot trece prin amplificatoare de izolare fără să fie afectate de erori de frecvență.

Structura de principiu a unui convertor tensiune-frecvență este prezentată în figura 1.11.

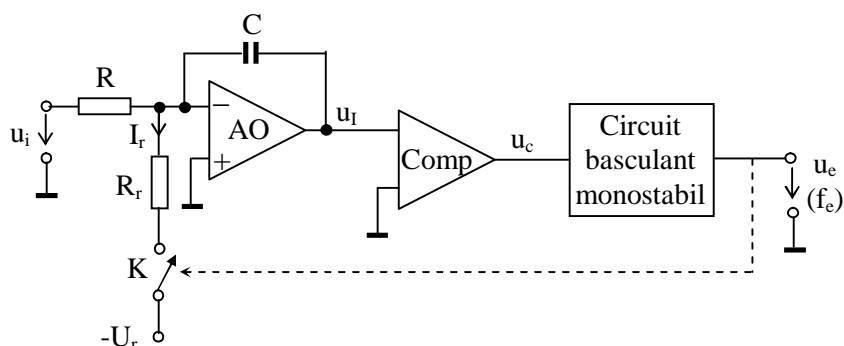


Fig. 1.11. Structura de principiu a unui convertor tensiune-frecvență.

Amplificatorul operațional AO împreună cu condensatorul C conectat în bucla de reacție negativă și rezistențele R și R_r formează un integrator. Ieșirea acestuia, notată u_1 , este comparată de comparatorul $Comp$ cu 0 V . Ieșirea comparatorului comandă un circuit basculant monostabil care la rândul său acționează asupra comutatorului K . În același timp, ieșirea monostabilului este ieșirea convertorului tensiune-frecvență.

Tensiunea de intrare u_i este aplicată în permanență la intrarea integratorului. Pentru ca circuitul să funcționeze u_i trebuie să aibă polaritate pozitivă. Pentru simplificarea calculelor și a diagramei de timp corespunzătoare tensiunii u_1 se consideră că tensiunea de intrare este constantă în intervalul corespunzător unei perioade a tensiunii de la ieșirea convertorului. Această aproximare este aplicabilă în cazul în care frecvența maximă din spectrul semnalului de la intrare este mult mai mică decât frecvența semnalului de ieșire.

Din figura 1.11 și considerația de mai sus rezultă că integrarea tensiunii de intrare are ca rezultat variația liniară și cu pantă negativă a tensiunii u_1 de la ieșirea integratorului. Când această tensiune ajunge la 0 V comparatorul $Comp$ dă comandă circuitului basculant monostabil să treacă în stare cvasistabilă (ieșire pe tensiune ridicată). Această stare durează un timp t_r stabilit de utilizator, timp în care comutatorul K este închis. Astfel, în procesul de integrare intervine și

Modulul 1

Circuite de condiționare a semnalelor

tensiunea de referință $-U_r$ prin curentul I_r . Pentru o bună funcționare a circuitului trebuie ca să fie satisfăcută inegalitatea:

$$\frac{U_r}{R_r} = I_r > \frac{u_{i\max}}{R} \quad (1.17)$$

unde $u_{i\max}$ este valoarea maximă a tensiunii de intrare.

Pe perioada t_r tensiunea u_i de la ieșirea integratorului are o variație liniară cu pantă pozitivă.

În figura 1.12 se prezintă diagramele de timp ale tensiunilor u_i , u_c , și u_e corespunzătoare funcționării convertorului tensiune-frecvență.

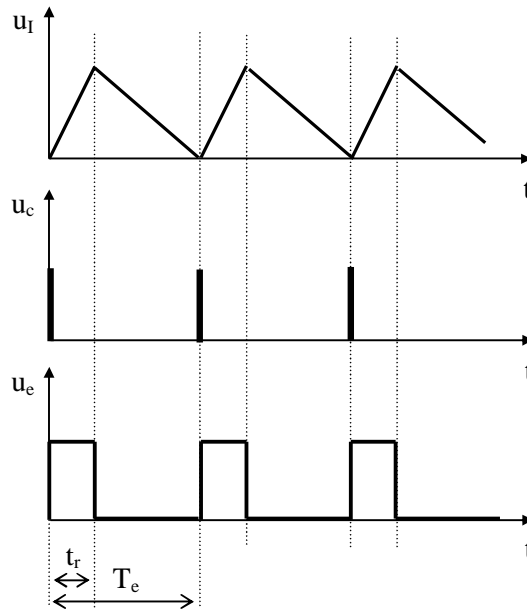


Fig. 1.12. Diagrame de timp.

Funcția de transfer se obține în urma aplicării principiului conservării sarcinii electrice la bornele capacității integratorului în intervalul corespunzător unei perioade T_e a tensiunii de ieșire u_e :

$$\frac{u_i}{R} T_e = \frac{U_r}{R_r} t_r, \quad (1.18)$$

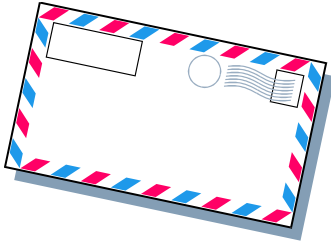
$$f_e = \frac{R_r}{RU_r t_r} u_i. \quad (1.19)$$

Relația (1.19) reprezintă funcția de transfer a convertorului tensiune-frecvență cu structura din figura 1.11.

- În ce scop se utilizează convertoarele tensiune-frecvență?
- De ce curentul de referință I_r trebuie să fie mai mare decât cel mai mare curent ce trece prin rezistența R a integratorului?
- Funcția de transfer a convertorului tensiune-frecvență este una liniară?

Modulul 1

Circuite de condiționare a semnalelor



TEMĂ:

Se consideră un convertor tensiune-frecvență având schema din figura 1.11 în care $R = 1 \text{ k}\Omega$, $U_r = 12 \text{ V}$, $t_r = 150 \text{ }\mu\text{s}$. Circuitul este destinat conversiei tensiunilor pozitive din intervalul $[0 \dots +5 \text{ V}]$. Se cere:

- Să se determine caracteristica de transfer $f_e = f(u_i)$ și să se deseneze formele de variație ale tensiunilor $u_I(t)$, $u_c(t)$, $u_e(t)$.
- Știind că frecvența maximă de ieșire a convertorului se impune a fi $f_{\text{emax}} = 5 \text{ kHz}$, să se determine valoarea rezistenței R_r .
- Să se determine valoarea capacității C astfel încât pentru valoarea maximă a tensiunii de intrare, tensiunea de la ieșirea integratorului să aibe valoarea maximă (la sfârșitul intervalului t_r) de 2 V .