

Laboratorul 5.

Circuite Elementare cu Amplificatoare Operaționale.

1 Scopul lucrării

În cadrul acestui laborator veți studia circuite elementare care au la bază amplificatoare operaționale (AO).

2 Noțiuni teoretice

Amplificatorul operațional, reprezentat în figura următoare, este un circuit integrat, cu două intrări și cu o ieșire. Intrarea notată cu + se numește intrare neinversoare¹, iar cea notată cu - se numește intrare inversoare². În continuare vom folosi notațiile V_{i+} pentru potențialul din borna de intrare neinversoare (potențial măsurat față de masa circuitului), V_{i-} pentru potențialul din borna de intrare inversoare și V_o pentru potențialul din borna de ieșire.

Tensiunea generată de amplificatorul operațional la ieșire este de sute de mii de ori mai mare decât diferența dintre intrări ($V_{i+} - V_{i-}$). Altfel spus, amplificatorul operațional este un amplificator diferențial care amplifică foarte mult (A_d este de ordinul 10^5) tensiunea diferențială de intrare.

Amplificatoarele operaționale sunt montaje electronice care sunt alimentate de la surse de tensiune cu tensiune finită. Ele generează la ieșire tensiuni cuprinse în intervalul generat de cele două tensiuni de alimentare.

Un amplificator **ideal**, are următoarele proprietăți teoretice:

- Amplificarea tensiunii diferențiale de intrare (A_d), în buclă deschisă, tinde la ∞ .
- Impedanța de intrare diferențială (raportată la o conexiune între borna inversoare și cea neinversoare), dar și impedanțele de intrare ale intrărilor (raportate față de masă) sunt ∞ . Astfel, curentul prin bornele de intrare inversoare (-) și neinversoare (+) este 0.
- Impedanța de ieșire este 0.

¹en. non-inverting input

²en. inverting input

- Bandă de trecere infinită, adică funcționarea amplificatorului ideal este independentă de frecvența semnalelor de la intrare.
- Tensiunea de ieșire poate varia între orice limite.

Un amplificator operațional **real**, are următoarele proprietăți:

- Amplificarea tensiunii diferențiale de intrare (Ad) este de ordinul sutelor de mii (10^5).
- Impedanța de intrare este de ordinul $G\Omega$ spre $T\Omega$ ($10^{12} - 10^{13}\Omega$), iar în cazul amplificatoarelor mai vechi, implementate în tehnologie cu tranzistoare bipolare, aceasta poate să scadă până la ordinul de $M\Omega$.
- Curenții de intrare sunt de ordinul pA sau nA , iar în cazul amplificatoarelor mai vechi pot ajunge până la valori de μA .
- Impedanța de ieșire este de ordinul zecilor de Ω .
- Banda de trecere poate varia de la ordinul MHz până la ordinul de GHz.
- Tensiunea de ieșire poate varia până aproape de tensiunile de alimentare.

Este important de menționat faptul că parametrii amplificatoarelor operaționale reale sunt specificați ca valori tipice. Aceștia pot varia în funcție de temperatura componentei, de lotul de producție, de tensiunile de alimentare și în funcție de mulți alți factori.

În cadrul circuitelor studiate la laborator, vom considera că amplificatoarele operaționale utilizate au impedanță de intrare neglijabilă ($G\Omega$) în comparație cu rezistențele utilizate în montaj ($k\Omega$) și impedanță de ieșire apropiată de 0. De asemenea, considerăm că amplificarea în buclă deschisă este de ordinul sutelor de mii.

ATENȚIE: Amplificatoarele operaționale sunt alimentate, în circuite, de la o sursă ce produc tensiune finită! Tensiunea de ieșire nu poate, fizic, să depășească limitele tensiunii de alimentare (V_+ sau V_-). Datorită implementării (folosind TBIP sau J-FET sau CMOS) ieșirea circuitului, în general, se află într-un interval mai restrâns decât cel definit de tensiunea de alimentare.

Anumite amplificatoare operaționale (numite rail to rail output) au proprietatea că tensiunea de ieșire poate fi foarte apropiată sau chiar egală cu tensiunea de alimentare (V_+ sau V_-), dar nu toate. Consultați datasheet-ul componentei utilizate pentru a verifica dacă acesta are caracteristică rail to rail output.

Din punct de vedere al intrărilor, amplificatoarele permit o anumită plajă a tensiunii de mod comun. Nu toate amplificatoarele suportă ca intrările să aibă o tensiune de mod comun apropiată de alimentări. Cele care permit ca intrările să aibă tensiuni de mod comun egale cu alimentările spunem că au proprietatea de rail to rail input. La fel ca în cazul anterior, trebuie să consultați datasheetul pentru a afla dacă amplificatorul are această proprietate.

Reacția în amplificatoare

Având în vedere instabilitatea parametrilor amplificatorului operațional, dar mai ales amplificarea acestuia foarte mare (pentru $1mV$ diferență a potențialelor la intrare obținem $100V$ tensiune de ieșire), este greu să folosim amplificatorul operațional pentru a obține circuite liniare. Așadar, trebuie să adaptăm circuitul pentru a scădea amplificarea și pentru a stabili montajul. Este așadar necesar să realizăm o corelare între variația ieșirii și intrare, adică să întoarcem o parte din mărimea de ieșire la una dintre intrări. Întoarcerea ieșirii la una dintre intrări se numește buclă de reacție sau buclă de feedback.

În funcție de tipul mărimii fizice a ieșirii și a intrării, bucla de feedback poate prelua, fie informație despre curentul de ieșire, fie informații despre tensiunea de ieșire și poate influența tensiunea de la intrare sau curentul de la intrare.

Pentru a pune în evidență importanța reacției în amplificatoare, vom prezenta reacția de tensiune.

În figura următoare notăm cu A blocul de amplificare (intrarea amplificatorului este amplificată de A ori) și cu β blocul de feedback (la intrarea amplificatorului se aduce a β -a parte din ieșire) și cu S circuitul electronic ce are rolul de a realiza diferența dintre U_i (tensiunea de intrare în circuit) și tensiunea generată prin bucla de reacție de valoare $\beta \cdot U_o$. Amplificatorul va genera la ieșire tensiunea U_o proporțională cu diferența dintre tensiunea de intrare și feedback.

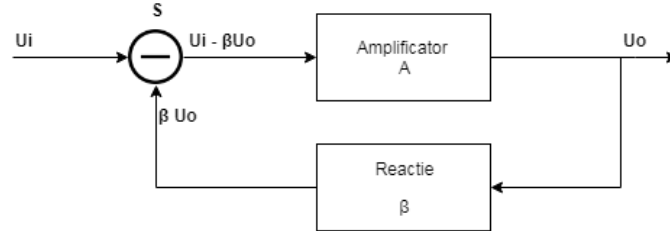


Figura 1

$$U_o = A(U_i - \beta \cdot U_o) \quad (1)$$

$$U_o \cdot (1 + A \cdot \beta) = A \cdot U_i \quad (2)$$

$$U_o = \frac{A}{1 + A \cdot \beta} \cdot U_i \quad (3)$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{A} + \beta} \cdot U_i \quad (4)$$

Observăm că pentru o amplificare foarte mare, termenul $1/A$ este neglijabil, astfel putem aproxima că $U_o = U_i/\beta$. Folosind criteriile de stabilitate, putem demonstra că sistemul este stabil dacă reacția este negativă, adică β rămâne pozitiv. Rolul reacției negative este de a limita amplificarea. Observăm că amplificarea circuitului devine $1/\beta$.

Utilizarea reacției negative ne permite să obținem o amplificare mai mică a sistemului, uzuală practic în montajele electronice. Pe lângă aceasta, reacția negativă ne permite să proiectăm un sistem ai cărui parametri (amplificare, bandă de frecvențe, etc) sunt dependenți numai de circuitul exterior (rezistențe de reacție, etc), și sunt independenți de variațiile caracteristicilor amplificatorului A . În practică, amplificatorul A împreună cu funcția de scădere sunt înlocuite de amplificatorul operațional iar blocul de reacție este înlocuit de o rețea de componente electronice (e.g. rezistențe, condensatoare, bobine, diode, tranzistoare, etc).

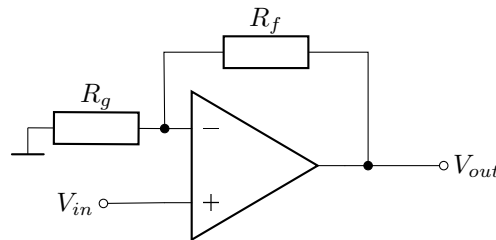


Figura 2

Pentru circuitul prezentat, calculăm $V_r = V_- = R_g/(R_f + R_g)U_o$ folosind formula divizorului de tensiune format din R_f și R_g ce generează reacția. Așadar factorul de reacție este $\beta = R_g/(R_f + R_g)$, iar amplificarea este $1/\beta = (R_g + R_f)/R_g = (1 + R_f/R_g)$.

Observăm că amplificarea depinde numai de componentele exterioare amplificatorului. Comportamental, putem spune că amplificatorul va crește tensiunea de ieșire ca urmare a diferenței dintre cele două intrări ($V_+ - V_-$). Această creștere a tensiunii de ieșire va genera o creștere a lui V_- în timp ce V_+ rămâne constant. Creșterea tensiunii de ieșire se va opri când V_+ și V_- vor fi foarte apropiate (putem aproxima că ele vor fi egale), iar tensiunea de ieșire se va păstra constantă. Pe baza acestei observații - în reacție negativă, amplificatorul operațional va modifica V_o până când va obține egalitatea tensiunii pe cele două intrări - vom prezenta metodele de calcul a amplificării pentru circuitele amplificatoare inversoare, neinversoare și repetoare.

Reguli de analiză a circuitelor cu AO utilizate în buclă de reacție negativă:

- În buclă de reacție negativă căderea de tensiune între borna inversoare și cea neinversoare este 0 (ieșirea amplificatoarelor încearcă să mențină diferența de tensiune între cele două intrări 0. Dacă diferența între intrări crește, datorită amplificării foarte mari, ieșirea crește foarte mult până când intrările devin egale);
- Curentul prin bornele de intrare ale amplificatorului este neglijabil (0).

Circuit amplificator inversor

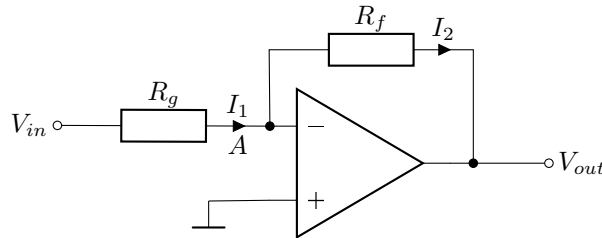


Figura 3: AO inversor

Descrierea circuitului:

- Semnalul V_{in} se conectează la borna inversoare (-) prin intermediul rezistenței R_g ;
- Se utilizează o conexiune în buclă de reacție negativă realizată prin intermediul lui R_f ;
- Borna neinversoare (+) este conectată la masă.

Formula care descrie, pentru acest circuit, dependența tensiunii de ieșire în funcție de componente și de tensiunea de intrare este:

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_g} V_{in} \quad (5)$$

Demonstrație:

1. Folosim prima regulă de analiză a amplificatoarelor și observăm că tensiunea din borna (-) este egală cu tensiunea din borna (+), adică 0V;
2. Folosim legea lui Ohm și calculăm curentul prin R_g :

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_g} \quad (6)$$

3. În punctul A aplicăm prima lege a lui Kirchhoff și ținând cont de a doua regulă obținem egalitatea:

$$I_1 = I_2 \quad (7)$$

4. Calculăm curentul prin rezistența R_f cu ajutorul legii lui Ohm:

$$I_2 = \frac{0 - V_o}{R_f} \quad (8)$$

5. Calculăm valoarea tensiunii la ieșirea AO prin înlocuirea în ecuația 7 a lui I_1 și I_2 conform ecuațiilor 6 și 8.

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_g} V_i \quad (9)$$

Circuit amplificator neinvertor

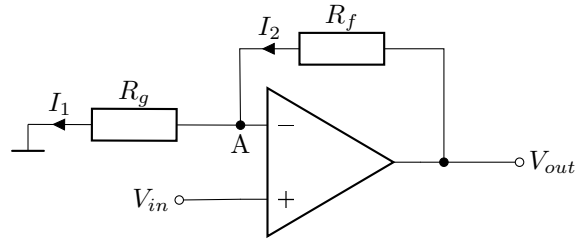


Figura 4: AO neinvertor

Descrierea circuitului:

- Semnalul V_{in} se conectează la borna neinvertoare (+);
- Borna invertoare este conectată la masă prin intermediul rezistenței R_g ;
- Se utilizează o conexiune în buclă închisă cu reacție negativă realizată prin intermediul lui R_f .

Formula care descrie, pentru acest circuit, dependența tensiunii de ieșire în funcție de componente și de tensiunea de intrare este:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) V_{in} \quad (10)$$

Demonstrație:

1. Folosim prima regulă de analiză a amplificatoarelor și observăm că tensiunea din borna (-) este egală cu tensiunea din borna (+), adică valoarea tensiunii din punctul A va fi egală cu V_{in} (măsurată față de masă);
2. Folosim legea lui Ohm și calculăm curentul prin R_g :

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_g} \quad (11)$$

3. În punctul A aplicăm prima lege a lui Kirchhoff și ținându-se cont de a doua regulă obținem egalitatea:

$$I_1 = I_2 \quad (12)$$

4. Calculăm căderea de tensiune pe rezistența R_f cu ajutorul legii lui Ohm:

$$U_{R_f} = R_f \cdot I_2 \quad (13)$$

5. Calculăm valoarea tensiunii la ieșirea AO:

$$V_{out} = U_A + U_{R_f} = V_{in} + U_{R_f} = V_{in} + \frac{V_{in}}{R_g} R_f = V_{in} \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) \quad (14)$$

Circuit repetor

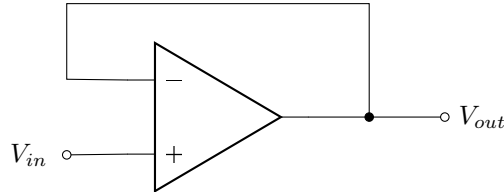


Figura 5: AO repetor

Descrierea circuitului:

- Semnalul de intrare se aplică pe borna neinvertoare (+);
- Se folosește o conexiune în buclă închisă cu reacție negativă.

Mod de funcționare

Pe baza primei reguli se poate observa că V_{out} este egal cu V_{in} . Principalul avantaj al acestui circuit este că la ieșire poate furniza un curent mult mai mare față de curentul de intrare al circuitului, fără a fi afectată tensiunea de ieșire.

Acest circuit mai poate juca rolul unui buffer datorită proprietăților sale izolatoare (impedanță mare de intrare, impedanță de ieșire mică).

El este bazat pe circuitul de amplificator neinvertor cu $R_f = 0$ și $R_g = \infty$.

Circuit comparator

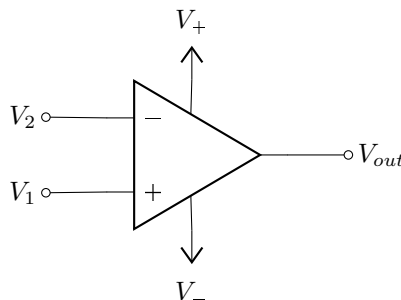


Figura 6: Comparator

Mod de funcționare

Pe baza primei reguli se poate observa că V_{out} este egal cu V_{in} . Principalul avantaj al acestui circuit este că la ieșire poate furniza un curent mult mai mare față de curentul de intrare al circuitului, fără a fi afectată tensiunea de ieșire.

Acest circuit mai poate juca rolul unui buffer datorită proprietăților sale izolatoare (impedanță mare de intrare, impedanță de ieșire mică). În concluzie, funcționarea acestui circuit se poate descrie în felul următor:

$$V_{out} = V_+, \text{ dacă } V_1 > V_2 \quad (15)$$

$$V_{out} = V_-, \text{ dacă } V_1 < V_2 \quad (16)$$

Datorită factorului mare de amplificare, acest circuit are următorul comportament nedorit: când cele două intrări sunt aproximativ egale și supuse zgomotului, la ieșire se pot observa comutări rapide între V_+ și V_- .

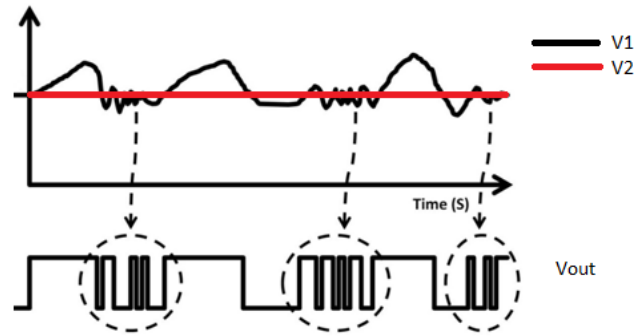


Figura 7: Comutarea ieșirii comparatorului când valorile intrărilor sunt egale și supuse unui zgomot

Pentru a elimina comutările nedorite cauzate de zgomot se utilizează comparatorul cu histerezis (Trigger Schmitt).

Circuit comparator cu histerezis

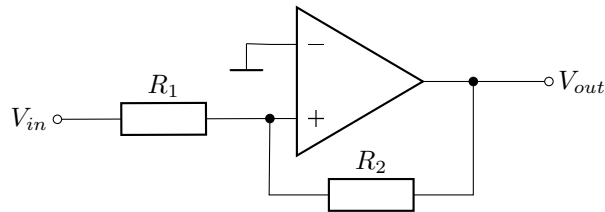


Figura 8: Comparatorul cu histerezis

Circuitele cu histerezis sunt cele care nu depind doar de semnalele de intrare, ci și de stările anterioare.

Descrierea circuitului

- Semnalul de intrare se aplică la borna neinversoare prin rezistența R_1 ;
- Borna inversoare se conectează la masă;
- Se utilizează o conexiune în buclă închisă cu reacție pozitivă.

Mod de funcționare

Pentru a putea descrie modul de funcționare al comparatorului cu histerezis, la intrarea circuitului se va aplica un semnal sinusoidal ca în Figura 9. Inițial ieșirea circuitului este V_- . Aceasta comută în V_+ când V_{in} depășește pragul superior. Pentru a comuta din nou ieșirea în V_- trebuie ca V_{in} să aibă o valoare mai mică decât a pragului inferior.

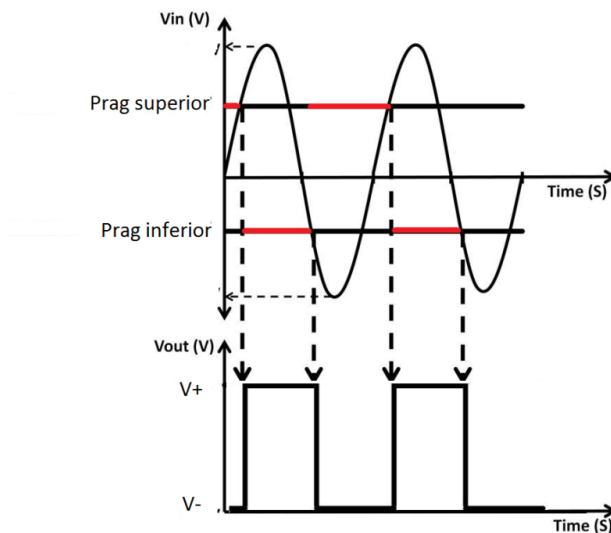


Figura 9: Semnalul de la intrarea comparatorului cu histerezis și ieșirea acestuia

Circuit integrator

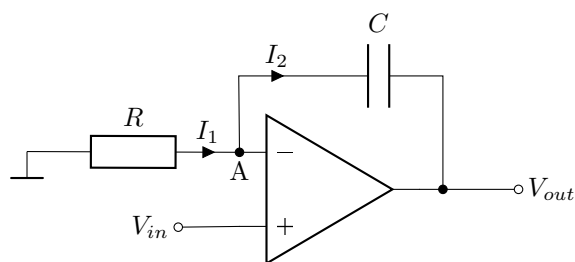


Figura 10: AO integrator

Descrierea circuitului:

- Semnalul de intrare se conectează la borna inversoare (-) prin rezistența R ;
- Borna neinversoare (+) se conectează la masă;
- Se utilizează o conexiune în buclă închisă cu reacție negativă realizată prin intermediul condensatorului C .

Formula care descrie, pentru acest circuit, dependența tensiunii de ieșire în funcție de componente și de tensiunea de intrare este:

$$V_{out}(t) = - \int_0^t \frac{V_{in}(t)}{R \cdot C} dt \quad (17)$$

având condiții inițiale nule.

Demonstrație:

1. Folosim prima regulă și observăm că tensiunea din borna (-) va fi egală cu tensiunea din borna (+), adică în punctul A valoarea tensiunii va fi 0V;
2. Folosim legea lui Ohm și calculăm curentul prin R_{in} :

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R} \quad (18)$$

3. În punctul A aplicăm prima lege a lui Kirchhoff și tinându-se cont de a doua regulă obținem egalitatea:

$$I_1 = I_2 \quad (19)$$

4. Condensatorul nu este caracterizat de rezistență, ci de impedanță, care este egală cu:

$$Z_C = \frac{1}{sC} \quad (20)$$

5. Calculăm valoarea căderii de tensiune pe condensator:

$$U_C = I_1 \cdot Z_C \quad (21)$$

și determinăm:

$$V_{out} = -I_1 \cdot Z_C \quad (22)$$

Observație: Funcția de transfer $\frac{1}{s}$ este transformata Laplace inversă (din domeniul frecvență în domeniul timp) a operației de integrare.

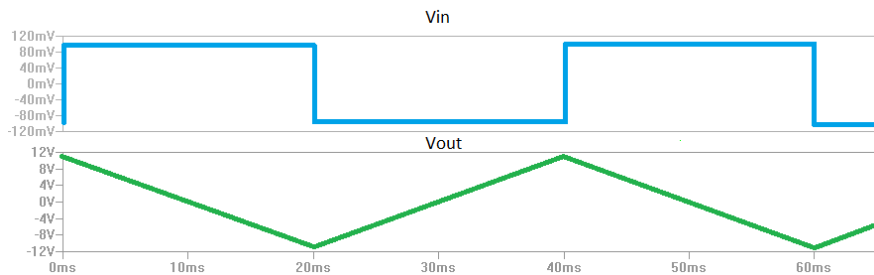


Figura 11: Semnalele de intrare și de ieșire ale circuitului integrator

Observație: Atât semnalul de intrare cât și cel de ieșire sunt caracterizate de aceeași frecvență, dar semnalul de ieșire este defazat cu 90° față de cel de intrare.

Amplitudinea semnalului de ieșire scade o dată cu creșterea frecvenței de intrare. De aceea, circuitul integrator are comportamentul unui filtru trece jos.

Pentru a observa aceste proprietăți puteți realiza diagramele Bode pentru funcția de transfer a circuitului ($H = \frac{1}{sRC}$).

Amplificatorul diferențial

Amplificatorul diferențial realizat cu AO este reprezentat în figura 12.

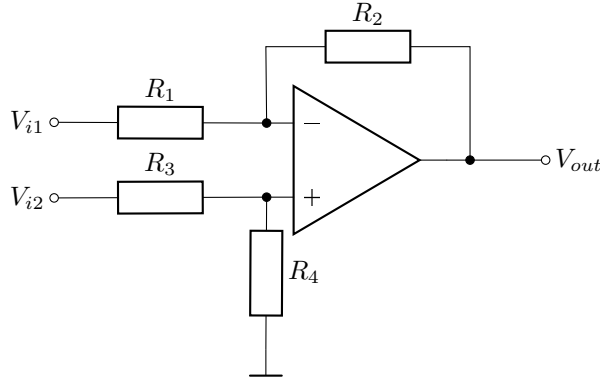


Figura 12: Amplificatorul diferențial

Pentru un AO ideal, tensiunea de ieșire se poate scrie sub forma:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1}V_{i1} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{i2} \quad (23)$$

Condiția ca circuitul să se comporte ca un amplificator diferențial este:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \quad (24)$$

Astfel, tensiunea de ieșire va fi:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1}(V_{i1} - V_{i2}) \quad (25)$$

Tensiunea de mod comun este rejectată în măsura în care este îndeplinită Ecuația 25.

Amplificatorul de instrumentație

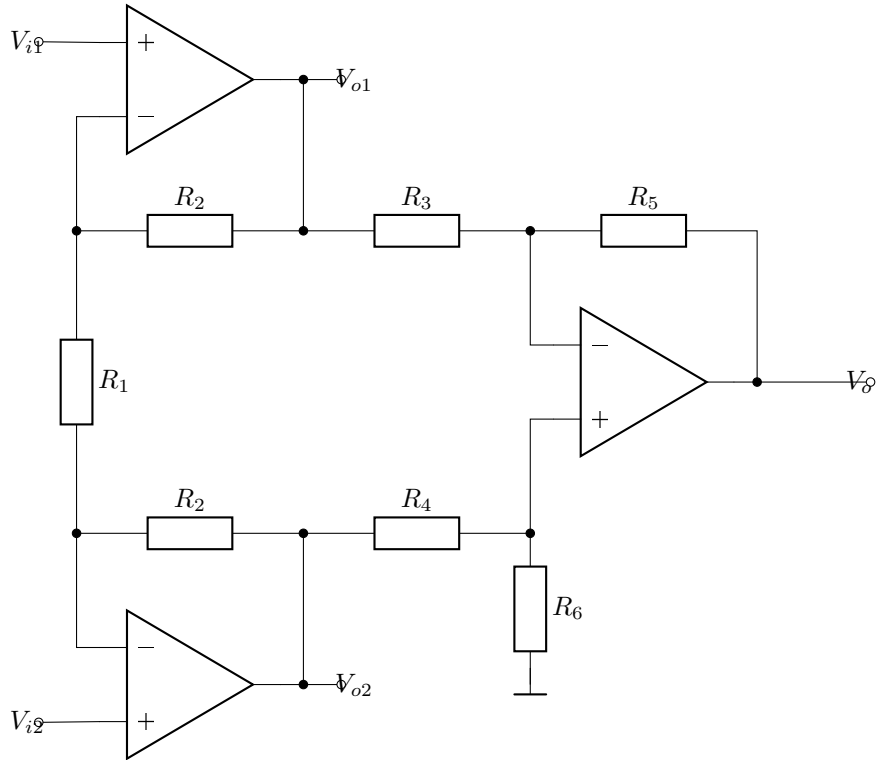


Figura 13: Amplificatorul de instrumentație

Amplificatorul diferențial are impedanța de intrare dată de rezistențele utilizate în circuit, iar în circuitele de achiziții de date (plăci de sunet, aparate de EKG, EEG, etc.) impedanța de intrare în amplificator trebuie să fie cât mai mare posibil. În practică, în locurile unde este necesară o impedanță de intrare mărită se utilizează o structură cu trei amplificatoare operaționale, cu două etaje de amplificare. Primul etaj (numit și etajul de amplificare) amplifică ambele semnale (și modul lor comun), dar asigură o impedanță de intrare foarte mare, iar ieșirile din primul etaj sunt introduse într-un etaj de amplificator diferențial care are rolul de eliminare a modului comun și eventual de amplificare suplimentară a semnalului. Această structură se numește structură de amplificator de instrumentație. Amplificatoarele de instrumentație au componente simetrice ($R_4 = R_3$, $R_5 = R_6$) în etajul de amplificator diferențial.

$$V_o = \left(\frac{R_5}{R_3} \right) \left(\frac{R_1 + 2R_2}{R_1} \right) (V_{i2} - V_{i1}) \quad (26)$$

2.1 Amplificatorul de transimpedanță

Amplificatorul de transimpedanță este un montaj de convertor curent-tensiune realizat adesea cu amplificatoare operaționale. El este utilizat pentru conversia curentului în tensiune pentru dispozitivele care au răspuns liniar în curent, dar

nu și în tensiune. Exemplu de astfel de dispozitive sunt detectoarele Geiger-Muller, fotodiodele, etc.

De exemplu, fotodiodele sunt utilizate la polarizare inversă, curentul de saturație fiind direct proporțional cu iluminarea.

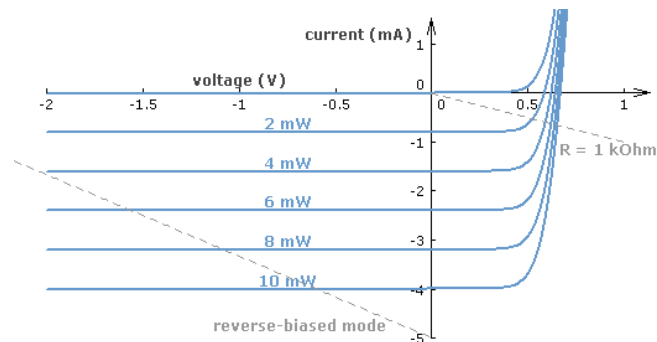


Figura 14

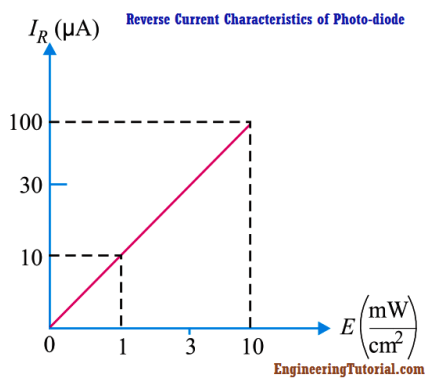


Figura 15

Montajul pentru conversia curentului de saturație (la polarizare inversă) în tensiune este realizat conform schemei următoare:

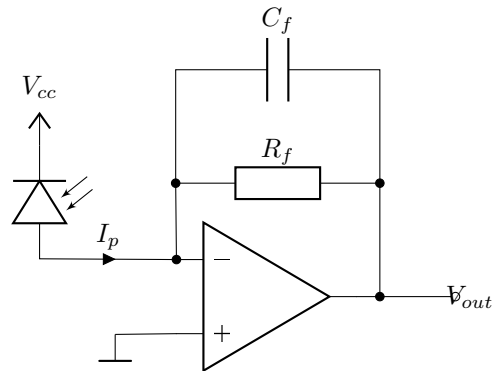


Figura 16

Ieșirea montajului este în tensiune și are următoarea formulă:

$$V_i = -I_p R_f \quad (27)$$

Unde I_p este curentul la polarizare inversă a fotodiodei, măsurat la tensiunea de polarizare V_b .

3 Desfășurarea lucrării

În cadrul lucrării curente, dorim realizarea conexiunilor cu amplificatoare operaționale prezentate în partea teoretică a îndrumarului și observarea caracteristicilor importante ale amplificatoarelor (limitarea Gain-Bandwidth Product, caracteristica Rail to Rail output, limitarea ieșirii la potențialele date de sursele de alimentare).

Aveți la dispoziție fișierele:

- *inverting_opamp.asc* - pentru studierea caracteristicilor amplificatorului în regim inversor realizat cu amplificator operațional (simulare de tip transient)
- *non-inverting_opamp.asc* - pentru studierea caracteristicilor amplificatorului în regim neinversor realizat cu amplificator operațional (simulare de tip transient)
- *GBW_opamp.asc* - pentru studierea caracteristicilor gain-bandwidth ale amplificatorului în regim inversor realizat cu amplificator operațional (simulare de tip AC)
- *comparator.asc* - pentru studierea caracteristicilor comparatorului realizat cu amplificator operațional (simulare de tip transient)

3.1 Amplificatorul inversor realizat cu amplificator operațional

Deschideți fișierul pentru studierea caracteristicilor amplificatorului în regim inversor realizat cu amplificator operațional. Rulați simularea și vizualizați semnalele de intrare în montaj și semnalul de la ieșirea amplificatorului operațional.

1. Măsurați raportul tensiunilor și determinați amplificarea folosind un cursor pe semnalul de intrare și un cursor pe semnalul de ieșire. Comparați valoarea obținută cu din măsurători cu cea teoretică obținută conform formulei aferente amplificatorului inversor.
2. Reglați semnalul de intrare la amplitudinea de 1.2V. Rulați simularea și observați forma semnalului de la ieșire. Înlocuiți amplificatorul utilizat inițial cu modelul OP07 (ștergeți componenta și adăugați o componentă nouă). Rulați simularea din nou. Ce observați referitor la semnalul de la ieșire? Ce putem spune despre tensiunea de ieșire a amplificatorului și relația acesteia cu valorile tensiunilor de alimentare?

3.2 Amplificatorul neinversor realizat cu amplificator operațional

Deschideți fișierul pentru studierea caracteristicilor amplificatorului în regim neinversor realizat cu amplificator operațional. Rulați simularea și vizualizați semnalele de intrare în montaj și semnalul de la ieșirea amplificatorului operațional.

1. Măsurați raportul tensiunilor și determinați amplificarea folosind un cursor pe semnalul de intrare și un cursor pe semnalul de ieșire. Comparați valoarea obținută cu din măsurători cu cea teoretică obținută conform formulei aferente amplificatorului neinversor.
2. Reglați semnalul de intrare la amplitudinea de 1.2V. Rulați simularea și observați forma semnalului de la ieșire. Înlocuiți amplificatorul utilizat inițial cu modelul OP07 (ștergeți componenta și adăugați o componentă nouă). Rulați simularea din nou. Ce observați referitor la semnalul de la ieșire? Ce putem spune despre limitarea semnalului în cele două cazuri: Se limitează la aceeași valoare (în cazul montajului inversor și neinversor)? Depinde valoarea de montaj sau de tensiunile de alimentare?

3.3 Comparatorul realizat cu amplificator operațional

Deschideți fișierul pentru studierea caracteristicilor comparatorului realizat cu amplificator operațional. Rulați simularea și vizualizați semnalele de intrare în montaj și semnalul de la ieșirea amplificatorului operațional. Identificați semnalul variabil și limita de comparație, precum și semnalul de ieșire. Adăugați toate aceste 3 tensiuni în același grafic. Inițial sursa Noise este reglată la amplitudine 0 (semnalul de comparat este considerat fără zgomot). Rezistența de Histerezis este de $10\text{M}\Omega$, mult mai mare decât R_3 și nu va avea niciun efect.

1. Observați și notați comportamentul montajului. Ce se întâmplă cu tensiunea de ieșire pentru cazurile când $V_i < V_{limit}$ și $V_i > V_{limit}$
2. Modificați sursa de zgomot (click dreapta pe ea) astfel încât zgomotul să fie de 100mV. Rerulați simularea. Ce observați că se întâmplă cu tensiunea de ieșire când tensiunea de intrare (acum cu zgomot suprapus peste valoarea utilă) se apropie de prag?
3. Folosind același zgomot de 100mV, modificați valoarea rezistenței de histerezis la $100\text{k}\Omega$. Ce observați că se întâmplă cu tensiunea de ieșire când tensiunea de intrare (acum cu zgomot suprapus peste valoarea utilă) se apropie

de prag? Observați cum se modifică tensiunea din borna neînversoare a amplificatorului. Cum a fost influențată tensiunea din borna neînversoare?

3.4 Studiarea caracteristicii Gain Bandwidth Product (GBP/GBW) a amplificatoarelor

Trebuie avut în vedere faptul că amplificatoarele operaționale au o rampă de modificare a ieșirii (slew rate) limitată (nu răspund instantaneu la semnalele de excitație aplicate intrărilor). În cadrul acestui exercițiu vom observa aspectul practic al limitării GBP pentru un amplificator. Este evident faptul că pentru un semnal cu amplitudine mare, dându-se o rată de creștere limitată a tensiunii, ieșirea va ajunge la valoarea dorită într-un timp mai mare comparativ cu cazul în care semnalul are amplitudine mică. Așadar, este trivial faptul că de la o anumită limită superioară de frecvență (a semnalului), amplificatorul nu va apuca să comute ieșirea astfel încât să păstreze amplificarea dorită.

Pentru a putea exprima capacitatea de răspuns a amplificatorului în frecvență, la modul general se utilizează noțiunea de Gain Bandwidth Product (Produs Amplificare-Bandă).

GPW reprezintă produsul între amplificare și banda de frecvență la care amplificarea scade cu 3dB. De exemplu, dacă avem un amplificator cu $GBP=100\text{kHz}$, el poate să amplifice cu un factor de amplificare 1, un semnal 100kHz, sau poate să amplifice cu un factor de amplificare de 10 un semnal de numai 10kHz.

Simularea pentru GBW_opamp.asc este o simulare ce ne va genera graficul amplificării în funcție de frecvență (diagrama Bode).

1. Alegeți valorile rezistențelor (de ordinul zecilor de $K\Omega$) astfel încât amplificarea să fie 1 (amplificator inversor). Măsurați, folosind cursoarele (ambele pe aceeași diagramă, un cursor mutat în cel mai din stânga punct de pe grafic și al doilea cursor la poziția în care amplificarea scade cu 3dB (față de cursorul inițial)), frecvența la care amplificarea scade cu 3dB.
2. Alegeți valorile rezistențelor (de ordinul zecilor de $K\Omega$) astfel încât amplificarea să fie 2 (amplificator inversor). Măsurați, folosind cursoarele (ambele pe aceeași diagramă, un cursor mutat în cel mai din stânga punct de pe grafic și al doilea cursor la poziția în care amplificarea scade cu 3dB (față de cursorul inițial)), frecvența la care amplificarea scade cu 3dB. Având în vedere că a crecut amplificarea de 2 ori, ce putem spune, comparativ cu cazul anterior, referitor la frecvență?
3. Alegeți valorile rezistențelor (de ordinul zecilor de $K\Omega$) astfel încât amplificarea să fie 4 (amplificator inversor). Măsurați, folosind cursoarele (ambele pe aceeași diagramă, un cursor mutat în cel mai din stânga punct de pe grafic și al doilea cursor la poziția în care amplificarea scade cu 3dB (față de cursorul inițial)), frecvența la care amplificarea scade cu 3dB.
4. Propuneți un circuit (compus din mai multe blocuri de amplificare) care să poată amplifica un semnal de 4 ori pentru o frecvență de 250kHz și care să utilizeze circuitul OP07. Circuitul **NU** poate fi realizat cu un singur amplificator operațional.