

Lucrarea 1.

ETAJE COMPONENTE ALE C.I. ANALOGICE

Amplificatorul diferențial

1. PREZENTARE GENERALĂ:

Etajele de intrare în C.I. analogice au de îndeplinit, în general următoarele funcțiuni:

- ↗ să asigure o impedanță de intrare cât mai mare în cazul circuitelor cu intrare de tensiune sau o impedanță de intrare cât mai mică în cazul C.I. cu intrare de curent;
- ↗ să aibă amplificarea constantă într-o bandă de frecvențe cât mai mare, în marea majoritate a cazurilor fiind necesară posibilitatea cuplajului în curent continuu.
- ↗ să asigure o amplificare în tensiune cât mai ridicată;
- ↗ să fie cât mai puțin dependente de variații ale temperaturii;
- ↗ să fie cât mai puțin dependente de variații ale tensiunii de alimentare sau de o eventuală componentă alternativă a tensiunii de alimentare;
- ↗ să asigure posibilitatea conectării în cascadă a mai multor etaje similare în vederea obținerii de amplificări superioare;
- ↗ să aibă caracteristica de transfer liniară într-un domeniu cât mai larg al tensiunilor de intrare;
- ↗ să păstreze nivelul de zero (unui semnal de intrare nul să-i corespundă un semnal de ieșire nul);

2. ETAJELE ASIMETRICE

În cazul folosirii tranzistoarelor bipolare, etajele de amplificare cel mai des întâlnite sunt cele în configurație emitor comun, asimetrice. Caracteristica de ieșire se poate liniariza cu ajutorul reacției negative introdusă de rezistența de emitor, care asigură și o mai bună stabilitate cu temperatura și cu variațiile tensiunii de alimentare. Din păcate, în cazul circuitelor integrate nu este posibilă decuplarea în curent alternativ (pe cip) a rezistenței de emitor, datorită faptului ca integrarea capacitaților este dificilă,

consumând arii mari de siliciu și deci ducând la ridicarea prețului de cost. Tot la ridicarea prețului de cost ar duce și metoda decuplării exterioare, datorită măririi numărului de pini și deci a tipului de capsulă folosit.

Un dezavantaj important al etajelor de amplificare asimetrice constă în faptul că aceste etaje au caracteristica de ieșire decalată față de zero, Acest inconvenient se poate compensa prin utilizarea circuitelor de decalare de nivel. În cazul conectării în cascadă a mai multor etaje apar probleme legate de corecta stabilire a Punctului Static de Funcționare (P.S.F.). Orice abatere de la valorile PSF calculate pentru primele etaje este amplificată de etajele următoare și poate duce la saturarea sau blocarea tranzistoarelor din ultimele etaje. Cel mai mare dezavantaj al acestui tip de amplificatoare rămâne însă deriva termică. În cazul unui etaj amplificator cu amplificarea de 50, creșterea temperaturii cu un grad Celsius determină modificarea U_{BE} cu 2 mV și deci modificarea componentei continue a semnalului de ieșire cu 100 mV (pentru semnal de intrare nul).

3. AMPLIFICATOARELE DIFERENȚIALE DE CURENT CONTINUU (SIMETRICE)

Această categorie de amplificatoare prezintă avantajul de a avea o derivă termică deosebit de mică, cu aproape trei ordine de mărime mai mică decât în cazul amplificatoarelor nesimetrice. Acest lucru este posibil datorită proprietății amplificatoarelor diferențiale de a genera la ieșire un semnal proporțional cu diferența între cele două semnale care le sunt aplicate la intrări. Fiecare ieșire în parte este afectată de deriva termică, la fel ca și în cazul amplificatoarelor nesimetrice, dar ieșirea diferențială nu este afectată decât de diferența derivelor termice ale celor două tranzistoare. În cazul în care tranzistoarele amplificatorului diferențial sunt realizate tehnologic identic și sunt cuplate termic, (ambele condiții sunt realizate automat în cazul circuitelor integrate) se poate obține o deosebit de bună stabilitate termică.

Pe schema de principiu, prezentată în Fig. 1 vor fi analizate principalele mărimi ce definesc funcționarea unui etaj amplificator diferențial. Se poate constata existența a două intrări, în bazele celor două tranzistoare și a două ieșiri, în colectoare. Se consideră că semnalul de intrare este diferența semnalelor din baze iar semnalul de ieșire este diferența semnalelor din colectoarele celor doua tranzistoare.

Se observă că un etaj amplificator diferențial este compus din două etaje de amplificare în configurație emitor comun, cuplate în emitor prin

intermediul unui generator de curent constant. Din acest motiv în literatura de specialitate etajele amplificatoare diferențiale se regăsesc și sub numele de perechi cu cuplaj în emitor, în cazul folosirii tranzistoarelor bipolare sau de perechi cu cuplaj în sursă, în cazul folosirii tranzistoarelor J-FET sau MOS-FET.

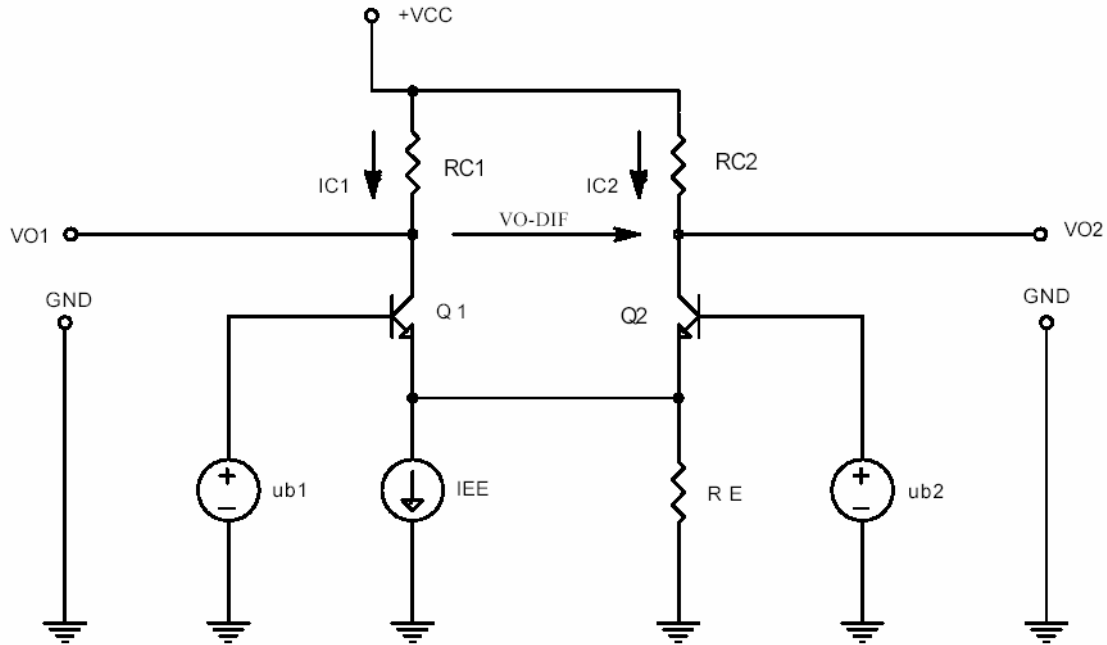


Fig.1

Din punct de vedere al realizării practice, în tehnologie monolitică, de cele mai multe ori se folosesc tranzistoare compuse, în montaj Darlington, pentru a se obține un câștig de tensiune ridicat pe fiecare etaj și o impedanță de intrare cât mai mare atât în mod diferențial cât și în mod comun.

Sursele de curent folosite sunt de cele mai multe ori oglinzi de curent, acestea având avantajul de a ocupa suprafețe de integrare mici și de a asigura parametrii funcționali necesari. În fig. 1, în paralel cu generatorul de curent din emitoarele tranzistoarelor amplificatoare apare rezistorul, care nu se regăsește în structurile integrate, el având rolul de a sugera rezistența de ieșire finită a generatorului real de curent constant.

În fig. 1 nu sunt prezentate circuitele de polarizare a bazelor celor două tranzistoare, putând considera că sursele de semnal u_{b1} și u_{b2} asigură și polarizarea în curent continuu.

Se definesc următoarele mărimi:

1. Semnal de intrare diferențial:

$$u_{id} = \frac{u_{b1} - u_{b2}}{2}$$

2. Semnal de intrare de mod comun:

$$u_{ic} = \frac{u_{b1} + u_{b2}}{2}$$

3. Semnal de ieșire diferențial:

$$u_{od} = \frac{u_{c1} - u_{c2}}{2}$$

4. Semnal de ieșire de mod comun:

$$u_{oc} = \frac{u_{c1} + u_{c2}}{2}$$

5. Amplificare diferențială:

$$A_{DD} = \frac{u_{od}}{u_{id}}; \text{ la } u_{ic} = 0$$

6. Amplificare diferențială a semnalului de intrare de mod comun:

$$A_{DC} = \frac{u_{od}}{u_{ic}}; \text{ la } u_{id} = 0$$

7. Amplificare a semnalului de mod comun:

$$A_{CC} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}}; \text{ la } u_{id} = 0$$

8. Amplificare de mod comun a semnalului de intrare diferențial:

$$A_{CD} = \frac{u_{oc}}{u_{id}}; \text{ la } u_{ic} = 0$$

9. Factor de rejecție (eliminare) a semnalului de mod comun:

$$CMMRR = \frac{A_{DD}}{A_{DC}}$$

10. Factor de discriminare:

$$F = \frac{A_{DD}}{A_{CC}}$$

Se consideră semnal de mod comun, acea componentă a semnalului complex de intrare care are aceeași variație pe ambele intrări.

Modelul ideal al amplificatorului diferențial este presupus a fi absolut simetric, cu alte cuvinte se presupune $u_{b1} = u_{b2}$, $R_{c1} = R_{c2}$, și de aici $i_{c1} = i_{c2}$ în lipsa semnalului de intrare. Se observă că $u_i = 0$ implică $u_o = 0$.

Pentru amplificatorul ideal, deoarece apare o variație identică a tensiunilor de ieșire ca urmare a variației identice a tensiunilor de intrare (presupunem semnalul de intrare de mod comun) rezultă $A_{dc} = 0$ și $CMMRR$ infinit iar caracteristica de transfer traversează originea.

Este foarte important de remarcat că deriva termică duce la efecte de mod comun și deci nu influențează ieșirea diferențială a amplificatorului simetric ideal.

În cazul amplificatorului diferențial real, în mod inerent, apar asimetrii și ca urmare A_{dc} este nenul, $CMMRR$ este finit și în plus apare o tensiune de decalaj la ieșire numită **tensiune de offset** sau uneori doar **offset**.

4. Calculul parametrilor amplificatorului diferențial real

Se folosește schema din fig. 2.

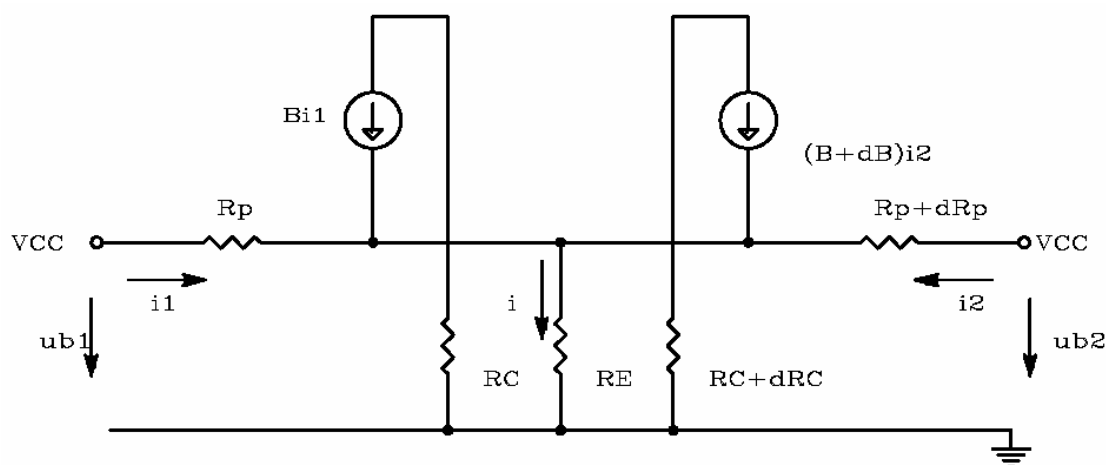


Fig. 2

S-au notat cu Δr , și ΔR_C diferențele de parametri între cele două ramuri ale schemei. Se pot deduce următoarele relații:

$$11. \quad u_{b1} = r_{\pi} i_1 + \beta R_E (i_1 + i_2) + \Delta \beta R_E i_2 ;$$

$$12. \quad u_{b2} = (r_{\pi} + \Delta r_{\pi}) i_2 + \beta R_E (i_1 + i_2) + \Delta \beta R_E i_2 ;$$

$$13. \quad u_{c1} = \beta i_1 R_C ;$$

$$14. \quad u_{c2} = (\beta + \Delta\beta) i_2 (R_C + \Delta R_C) ;$$

Pentru schema perfect simetrică ($\Delta r_\pi = 0; \Delta\beta = 0; \Delta R_C = 0$) rezultă:

$$15. \quad A_{DD} = \frac{\beta R_C (i_1 \quad i_2)}{r_\pi (i_1 \quad i_2)} = \frac{\beta R_C}{r_\pi} ;$$

$$16. \quad A_{DC} = 0 \quad (u_{id} = 0 \Rightarrow u_{b1} = u_{b2} \Rightarrow i_1 = i_2) ;$$

$$17. \quad A_{CC} = \frac{\beta R_C (i_1 + i_2)}{2r_\pi (i_1 + i_2) + 2\beta R_E (i_1 + i_2)} = \frac{\beta R_C}{2(r_\pi + \beta R_E)} \text{ sau, neglijând } r_\pi ,$$

$$A_{CC} \approx \frac{R_C}{2R_E} ;$$

$$18. \quad A_{CD} = 0 \quad (u_{ic} = 0 \Rightarrow i_1 + i_2 = 0 \Rightarrow u_{oc} = 0) ;$$

$$19. \quad CMMRR = \infty ;$$

$$20. \quad F = 2\beta \frac{R_E}{r_\pi} ;$$

Din formulele de mai sus se poate observa că nesimetriile în realizarea componentelor amplificatorului diferențial au un efect semnificativ asupra $CMMRR$ și influențează în mai mică măsură A_{dd} , A_{cc} , și F .

Totodată datorită nesimetriilor în realizarea componentelor amplificatorului diferențial apare și un dezechilibru de curent continuu ceea ce duce la apariția tensiunii de offset și a derivei termice.

Condiția de calcul a A_{DC} este $u_{id} = 0$ sau $u_{b1} = u_{b2}$. Dacă neglijăm Δr_π , atunci $i_1 = i_2 = i$.

$$21. \quad A_{DC} = \frac{\beta i R_C + (\beta + \Delta\beta) i (R_C + \Delta R_C)}{r_\pi i + 2\beta R_E i + 2\Delta\beta R_E i + r_\pi i + \Delta r_\pi i} ;$$

Făcând anumite aproximații permise obținem:

$$22. \quad A_{DC} = \frac{1}{4R_E} * \Delta R_C + \frac{\Delta\beta}{\beta} R_C ;$$

$$23. \quad CMMRR = 4R_E \beta \frac{R_C}{\pi} * \frac{1}{\Delta R_C} + \frac{\beta}{\Delta\beta R_C} ;$$

Din relația 17 rezultă metodele ce pot fi folosite pentru mărirea $CMMRR$ și implicit diminuarea derivei:

↳ simetrizarea cât mai bună a schemei;

- ↪ utilizarea de tranzistoare cu factor de amplificare în curent cât mai mare;
- ↪ utilizarea de tranzistoare compuse, Darlington;
- ↪ mărirea rezistențelor R_E și R_C .

În schemele amplificatoarelor diferențiale din C.I. liniare creșterea valorilor R_E și R_C se obține prin înlocuirea acestora cu generatoare de curent, respectiv sarcini active a căror rezistență internă, teoretic, este infinită practic obținându-se valori de ordinul M sau zecilor de M.

Pentru a elimina decalajul de offset se poate utiliza schema din figura 3.

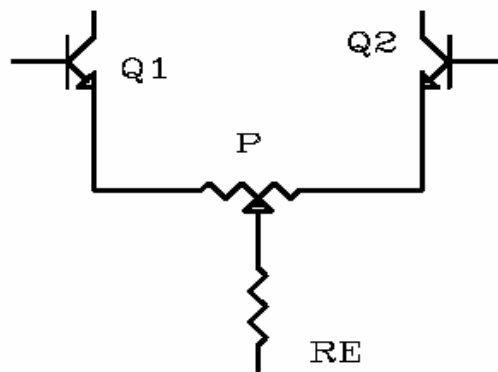


Fig. 3

Potențiometrul P se reglează astfel încât potențialele din colectoarele celor două tranzistoare să fie egale.

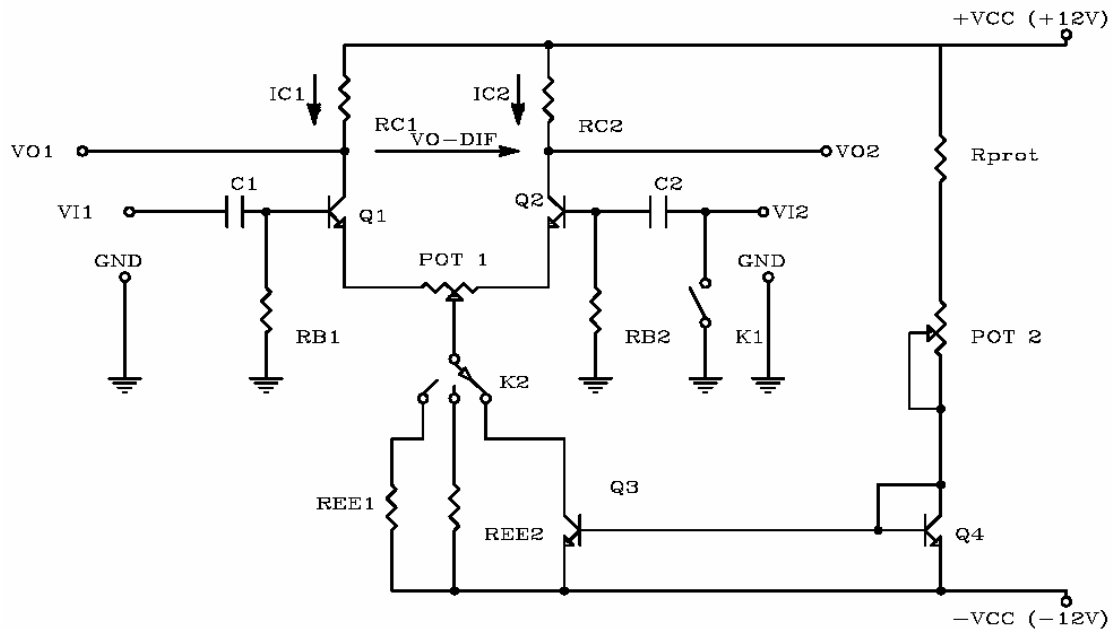


Fig. 5

Amplificatorul diferențial propriu-zis este format din tranzistoarele Q_1 și Q_2 . Rezistoarele R_{C1} și R_{C2} sunt rezistoare de sarcină, fiind parcurse de curenții de colector I_{C1} și I_{C2} ai celor două tranzistoare.

Rezistoarele R_{B1} , respectiv R_{B2} , asigură polarizarea bazelor tranzistoarelor, din sursa de $-12V$, prin circuitul GND - R_B - BE - P_1 - K_2 - CE(Q_3) - $[-VCC]$. Valoarea acestor rezistențe influențează direct impedanța de intrare a amplificatorului.

Condensatoarele C_1 și C_2 au rolul de a separa componenta continuă a semnalului de intrare de componenta sa alternativă, aceasta din urmă fiind aplicată în bazele celor două tranzistoare.

Comutatorul K_1 permite cuplarea la masă a componentei alternative din baza lui Q_2 , permițând astfel realizarea condiției $u_{b2} = 0$, necesară studiului amplificării diferențiale.

Potențiometrul P_1 permite modificarea fină a P.S.F-ului celor două tranzistoare, în acest fel eliminându-se tensiunea de decalaj la ieșire.

Comutatorul K_2 permite studierea funcționării montajului pe o rezistență R_{EE1} de valoare scăzută, pe rezistența R_{EE2} de valoare mare, sau utilizând un generator de curent în emitorul comun al celor două tranzistoare.

Generatorul de curent constant este de tip oglindă de curent și este format din tranzistoarele Q_3 și Q_4 . Valoarea curentului absorbit de colectorul lui Q_3 este stabilită cu ajutorul lui P_2 . Rezistența R_{prot} are rol de rezistență de protecție limitând superior valoarea curentului de referință (pentru cazul în care P_2 ar fi reglat la valoare minimă a rezistenței $P_2 = 0$).

6. MODUL DE LUCRU :

1. Se identifică schema din figura 5 pe placa de circuit imprimat, și se notează pe schemă valorile componentelor folosite.
2. » **ATENȚIE LA REGLAREA SURSELOR DE ALIMENTARE ȘI LA CORECTA LOR CONECTARE !**
3. Se cuplează în circuitul de emitor al perechii de tranzistoare rezistorul de 12 K, cu ajutorul comutatorului K2 și se alimentează montajul de la o sursă diferențială de tensiune de +/- 12 V.
4. Se reglează din potențiometrul POT 1 egalizarea curenților de colector ai celor două tranzistoare până la obținerea egalității tensiunilor de colector.
5. Se notează punctele statice de funcționare ale celor două tranzistoare ce formează etajul amplificator diferențial.
6. Se aplică la intrare semnal sinusoidal de la un generator, asigurând un nivel de ordinul zecilor de mV, în așa fel încât să se obțină la ieșire semnal sinusoidal nedistorsionat. Se va vizualiza și măsura amplitudinea și se va trasa grafic forma semnalelor obținute în bazele, în colectoarele și în emitoarele celor două tranzistoare amplificatoare, folosind un osciloscop cu două spoturi, sincronizat pe canalul ce afișează semnalul de intrare.
7. Folosind formulele 1 - 10 se vor calcula principalii parametri ai amplificatorului.
8. Pentru obținerea modului de intrare diferențial, condensatorul din baza tranzistorului Q_2 se conectează la masă asigurând $u_b = 0$ și se aplică semnal în baza tranzistorului Q_1 prin condensatorul de separare galvanică.
9. Pentru obținerea semnalului de mod comun, același semnal se va aplica în baza ambelor tranzistoare prin cele două condensatoare de separare galvanică.
10. Se va înlocui rezistența de 12 K cu generatorul de curent constant și după reefectuarea reglajului de offset se va relua ciclul de măsurători (punctele 5-7b).

11. Se calculează pentru varianta cu generator de curent constant valoarea principalilor parametri cu formulele 1 - 10.
12. Se vor trasa oscilogramele sincrone ale semnalelor de intrare în colectoarele celor două tranzistoare și în emitorul comun și se va calcula amplificarea diferențială teoretică, folosind formula 11, valorile componentelor din schema și considerând factorul de amplificare în curent al tranzistoarelor $\delta_i = 120$.
13. Explicați diferențele apărute între principalii parametri ai amplificatorului cu rezistența RE de valoare scăzută, respectiv cu generatorul de curent constant în emitor precum și diferențele între rezultatele obținute prin calcul, pornind de la valorile componentelor din montaj și cele obținute experimental prin măsurători.