

Lucrarea 13.

MULIPLICATOARE ANALOGICE

Circuitul integrat ROB 8095 - principalii parametri

1. Noțiuni teoretice

Multiplicatoarele analogice sunt circuite care generează la ieșire o mărime proporțională cu produsul celor două mărimi de intrare, deci în zona liniară de funcționare un multiplicator analogic va respecta următoarea relație de funcționare: $z = k * x * y$, unde z este mărimea de ieșire, x și y sunt mărimi de intrare și k este factorul de proporționalitate.

Pentru a se lărgi gama aplicațiilor posibile multiplicatoarele analogice sunt prevăzute cu intrări diferențiale, și de cele mai multe ori ieșirea este deasemeni diferențială. În această situație prin mărimea de intrare x se va înțelege diferența de potențial între semnalele aplicate la bornele de intrare U_x , și similar pentru mărimea de intrare y .

Multiplicatoarele analogice nu sunt circuite liniare în sensul larg al termenului, dar relația de proporționalitate și principiul superpoziției li se poate aplica pentru una din mărimile de intrare, dacă se consideră cealaltă mărime de intrare constantă și inclusă în factorul de proporționalitate k' : $z = (k * y) * x = k' * x$.

În forma completă un multiplicator analogic poate lucra în toate cele patru cadrane, deci atât ambele mărimi de intrare cât și mărimea de ieșire pot avea și valori pozitive și valori negative.

Suprafața caracteristică a unui multiplicator analogic este un paraboloid hiperbolic, descris de ecuația: $\frac{x^2}{p} - \frac{y^2}{q} = 2z$.

Pentru realizarea multiplicatoarelor analogice se pot folosi mai multe principii de funcționare dintre care cele mai des utilizate sunt următoarele:

- a. logaritmarea tensiunilor de intrare, adunarea logaritmilor și antilogaritmare;
- b. modularea unui semnal periodic în durată cu semnalul de intrare x , modularea semnalului rezultat în amplitudine cu

semnalul y și extragerea printr-un filtru trece - jos a semnalului de ieșire din semnalul rezultat;

- c. divizarea controlată în tensiune a curentului și conversia diferență de crenți - tensiune.

Datorită posibilităților ridicate de integrare și preciziilor relativ ridicate obținute, cele mai multe multiplicatoare analogice monolitice folosesc principiul de funcționare prezentat la punctul c. În continuare se va prezenta în extenso acest principiu de funcționare.

Pentru a se obține un divizor controlat de curent se poate folosi un etaj amplificator diferențial ca cel prezentat în Fig. 1:

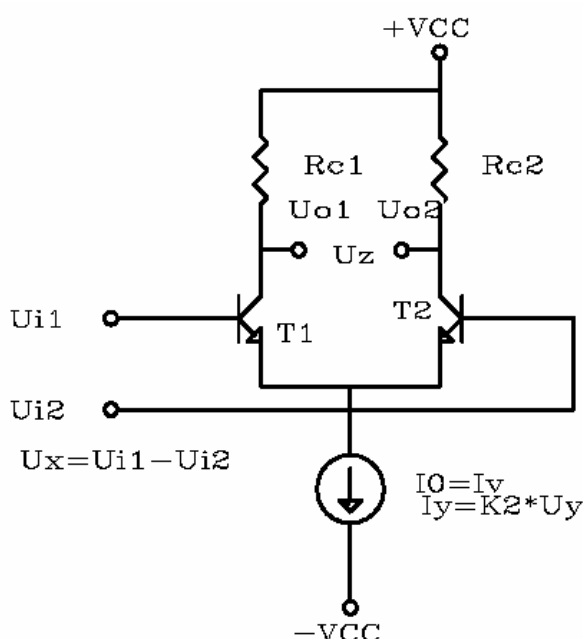


Fig. 1

Curentul generatorului I_0 se divide în funcție de tensiunea de intrare în două fracțiuni notate i_1 și i_2 (curenții de colector ai tranzistoarelor T_1 și T_2):

$i_1 = x * I_0$, respectiv $i_2 = (1 - x)I_0$; diferența celor doi curenți va fi:

$$1. \quad i_1 - i_2 = I_0(2x - 1)$$

Curentul I_0 este curentul de ieșire al unui generator de curent comandat în tensiune, deci este proporțional cu tensiunea de intrare y . Se pot scrie relațiile:

$$2. \quad U_x = k_1(2x - 1); \quad U_y = k_2; \quad U_z = k_3(i_1 - i_2);, \text{ de unde:}$$

$$3. \quad U_z = \frac{k_3}{k_1 * k_2} U_x * U_y.$$

Pentru montajul din Fig. 1, dacă $R_{c1}=R_{c2}$ și se respectă condiția $U_x \ll 2U_T$, deci pentru valori foarte mici ale tensiunii diferențiale de intrare U_x , tensiunea de ieșire va avea valoarea:

$$4. \quad U_z = \frac{R_c}{2U_T} I_y * U_x.$$

Schema prezentată anterior prezintă patru dezavantaje majore care o fac inutilizabilă în aplicații practice:

- a. tensiunea de ieșire este dependentă de temperatura de lucru datorită lui U_T ;
- b. curentul I_y trebuie să fie pozitiv, deci schema nu poate lucra în toate cele patru cadrane față de ambele intrări;
- c. condiția $U_x \ll 2U_T$ este deosebit de restrictivă și limitează puternic domeniul valorilor de intrare pentru intrarea X;
- d. nu cuprinde generatorul de curent comandat în tensiune cu intrare diferențială.

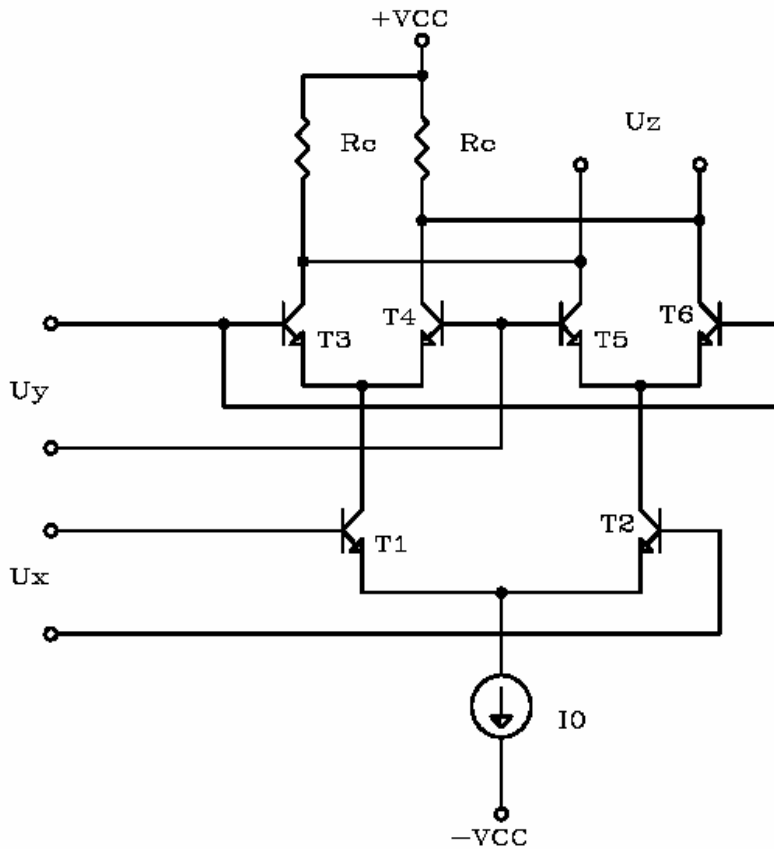


Fig. 2

Montajul prezentat în Fig. 2 rezolvă problemele legate de extinderea domeniului tensiunilor de intrare, de generatorul de curent comandat în tensiune și asigură funcționarea completă în cele patru cadrane.

Se observă că schema conține trei divizoare de curent controlate în tensiune.

Folosind convențiile anterioare se pot scrie ecuațiile:

$$5. \quad I_z = i_1 - i_2 = xyI_0 + (1-x)(1-y)I_0 - (1-x)I_0 - (1-y)I_0 \text{ sau:}$$

$$6. \quad I_z = (2x-1)(2y-1)I_0.$$

Dacă sunt îndeplinite condițiile $U_x \ll U_T$ și $U_y \ll U_T$, tensiunea de ieșire se poate aproxima:

$$7. \quad U_z = \frac{R_c * I_0}{4U_T^2}.$$

Se observă că și acum se păstrează restricțiile cu privire la domeniul tensiunilor de intrare și în plus dependența de temperatură se accentuează datorită apariției termenului $4U_T^2$ la numitorul expresiei tensiunii de ieșire.

Pentru a se elimina inconvenientele prezentate anterior se folosesc divizoare de curent controlate în curent, cu diode de polarizare, tensiunile de intrare fiind aplicate la intrarea unor convertoare tensiune-curent.

Avantajele acestei soluții se datorează compensării neliniarității exponențiale a relației $I_c = f(U_{BE})$ cu ajutorul caracteristicii logaritmice a relației $U_{BE} = f(I_{BE})$.

Schema de principiu a convertorului tensiune - curent este prezentată în Fig. 3

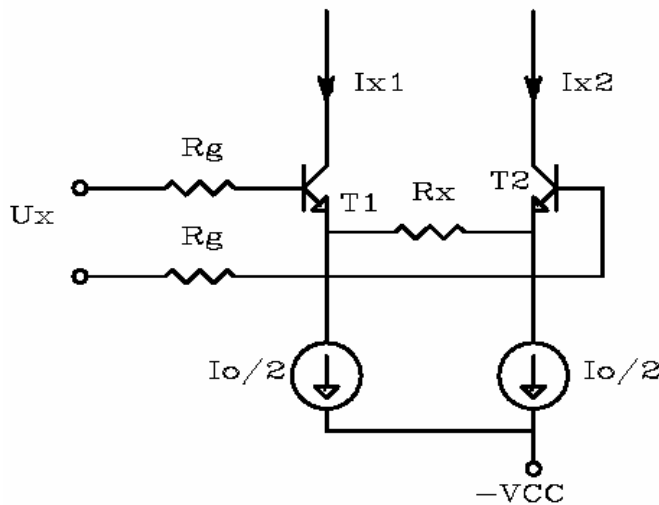


Fig. 3

În Fig. 3 se pot observa cele două borne ale intrării diferențiale de tensiune, cele două ieșiri I_{x1} și I_{x2} (de fapt o ieșire diferențială de curent) și cele două generatoare de curent constant $\frac{I_o}{2}$.

Ecuația de funcționare a schemei de mai sus este:

$$8. \quad \frac{I_x}{I_o} = \frac{2U_x}{4U_T + R_x' I_o} \approx \frac{2U_x}{R_x' I_o}, \text{ dacă } R_x' I_o \gg 4U_T, \text{ unde } R_x'$$

satisface relația:

$$9. \quad \frac{R_x'}{2} = 2r_{ee'} + \frac{R_{bb'} + R_g}{1 + \beta} + R_x. \text{ Se obține deci:}$$

$$10. \quad I_x \approx \frac{2U_x}{R_x},$$

Relația 10 arată dependența liniară a curenților I_x de tensiunea diferențială de intrare, precum și faptul că temperatura nu influențează

semnificativ rezultatul conversiei, condiția din relația 8 fiind ușor de satisfăcut.

Un al doilea convertor, similar celui de mai sus, se folosește pentru intrarea y.

Dacă în schema din Fig. 2 se înlocuiesc Tranzistoarele T_1 și T_2 cu perechi Darlington, și se completează cu două convertore tensiune - curent similare celui din Fig. 3 în care se explicitează generatoarele de curent, se obține schema electrică completă a unui multiplicator analogic cu funcționare în patru cadrane, care poate funcționa liniar pentru un domeniu larg de variație a tensiunii de intrare pentru fiecare intrare, dacă se consideră cealaltă intrare constantă.

O astfel de schemă folosește circuitul integrat ROB 8095, prezentat în Fig. 4:

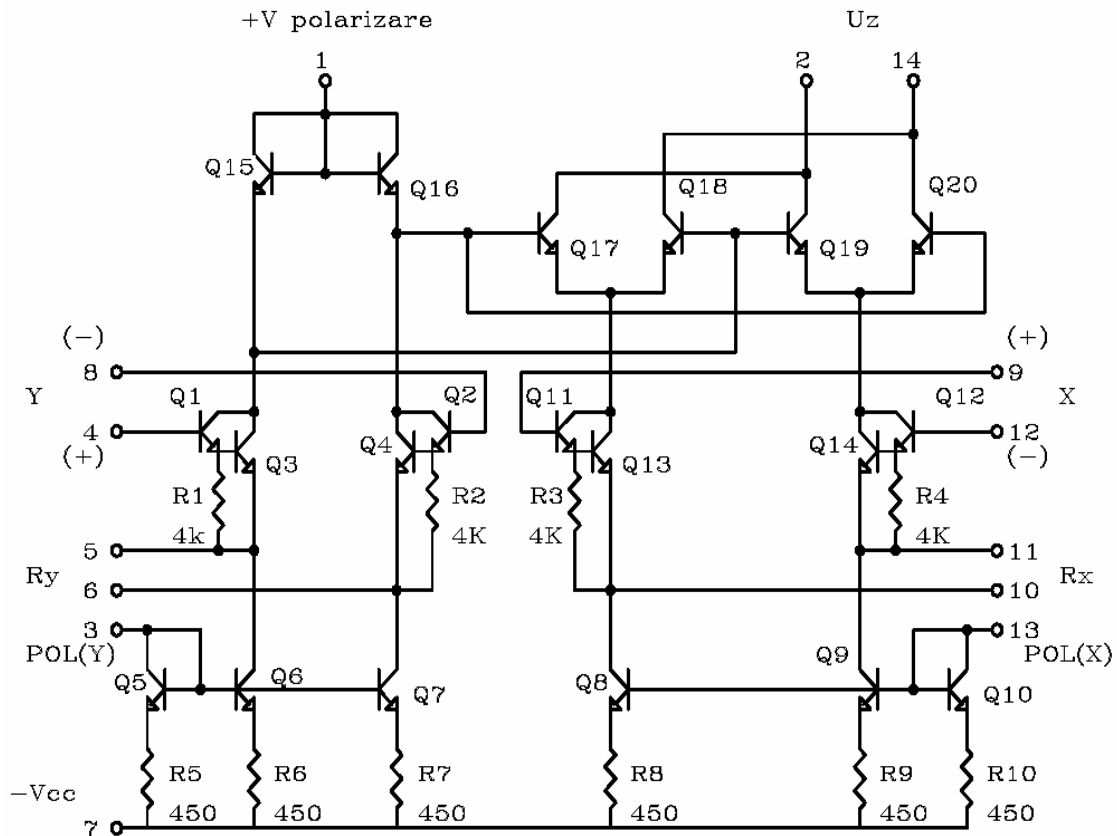


Fig. 4

2. Funcționarea circuitului ROB 8095

Perechile Darlington Q_1, Q_3 și Q_2, Q_4 , împreună cu R_x formează convertorul tensiune - curent pentru intrarea X. Rezistențele R_1 și R_2 îmbunătățesc comportarea dinamică a circuitului pentru intrarea X prin eliminarea sarcinii stocate în bazele tranzistoarelor Q_3 și Q_4 .

Tranzistoarele Q_5, Q_6 și Q_7 formează o oglindă dublă de curent care generează curenții $I_o/2$ necesari funcționării convertorului tensiune - curent din intrarea X. Curentul de referință pentru oglinda de curent se stabilește cu ajutorul unei rezistențe externe cuplată între masă și intrarea 3.

Q_{15} și Q_{16} reprezintă sarcina activă pentru convertorul tensiune - curent din intrarea X.

Similar, perechile Darlington Q_{11}, Q_{13} și Q_{12}, Q_{14} , împreună cu R_y formează convertorul tensiune - curent pentru intrarea Y.

Tranzistoarele Q_8, Q_9 și Q_{10} formează oglinda dublă de curent care generează curenții $\frac{I_o}{2}$ necesari funcționării convertorului tensiune - curent din intrarea Y. Curentul de referință pentru oglinda de curent se stabilește cu ajutorul unei rezistențe externe cuplată între masă și intrarea 13.

Tranzistoarele Q_{17}, Q_{18}, Q_{19} și Q_{20} formează divizorul propriu-zis de curent.

Trebuie remarcată adaptarea schemei interne la tehnologia monolitică prin folosirea unui număr mare (20) de componente active (tranzistoare) și a unui număr relativ redus de rezistoare (10). Acest tip de schemă prezintă avantajul că permite o bună împerechere atât termică cât și a parametrilor tranzistoarelor ceea ce minimizează erorile multiplicatorului.

3. Principalii parametri electrici ai multiplicatoarelor analogice

Pentru a se putea aprecia calitatea unui multiplicator analogic și a se aprecia în ce măsură acesta satisface necesitățile unei aplicații anume s-au definit o serie de parametri definatorii pentru multiplicatoarele analogice. În continuare vor fi definiți pe scurt acești parametri:

Curentul de alimentare

Datorită faptului că multiplicatoarele analogice se alimentează de la surse diferențiale de tensiune se consideră curent de alimentare maximul dintre curentul absorbit de la sursa pozitivă și curentul injectat în sursa negativă. În cazul celor mai multe multiplicatoare analogice, datorită curenților de polarizare a convertoarelor U-I de intrare, curentul injectat în

sursa negativă este mai mare decât cel absorbit din sursa pozitivă. Curentul de alimentare depinde de tensiunea de alimentare și de valoarea aleasă pentru factorul de scală deci implicit pentru curenții de polarizare ai convertoarelor U-I.

Curenții de alimentare au uzual valori de ordinul miliamperilor.

Curenții de polarizare a intrărilor

Acești curenți se definesc ca fiind curenții injectați sau absorbiți de intrări atunci când acestea sunt conectate la potențialul de referință (GND). Pentru un multiplicator ideal acești curenți sunt nuli. În cazul multiplicatoarelor reale valoarea cât mai mică a curenților de polarizare este considerată un factor de merit. Valoarea parametrului este dată de cel mai mare dintre cei patru curenți de polarizare (două intrări diferențiale).

Valori uzuale pentru curenții de polarizare: 10... 20 μA .

Curentul de decalaj la intrare

Curentul de decalaj la intrare reprezintă diferența dintre valorile curenților de polarizare ai intrărilor aceleiași variabile. Valoarea parametrului este dată de maximul dintre curentul de decalaj al intrărilor X și curentul de decalaj al intrărilor Y.

$I_{di} = \max\{|I_{pX}^+ - I_{pX}^-|, |I_{pY}^+ - I_{pY}^-|\}$, ideal curentul de decalaj la intrare este nul.

Valori uzuale ale curentului de decalaj la intrare: 0...5 μA .

Curentul de decalaj la ieșire

Acest parametru arată valoarea diferenței curenților de ieșire atunci când nu se aplică semnal diferențial sau de mod comun pe nici una dintre intrări și se presupune curentul de decalaj la intrare nul. Pentru măsurarea curentului de decalaj la ieșire se compensează cu montaje speciale, similare montajelor de compensare a offsetului pentru amplificatoare operaționale, curenții de decalaj la intrări. Se măsoară ca raport între tensiunea de offset a ieșirii și valoarea rezistenței de sarcină. Ideal curentul de decalaj la ieșire este nul.

Valori uzuale: 10... 200 μA

Amplificarea de mod comun

Ca și în cazul amplificatoarelor analogice intrările diferențiale ale multiplicatorului trebuie să fie insensibile la tensiunea de mod comun, mărimea de intrare fiind tensiunea diferențială. Se poate vorbi și aici de o rejecție a tensiunilor de mod comun. Amplificarea de mod comun se

calculează pentru fiecare intrare diferențială cu formula: $A_{CMX(Y)} = 20 \log \frac{V_z}{V_{iX(Y)}}$,

atunci când produsul dintre tensiunea diferențială aplicată celeilalte intrări și factorul de scală este unitar și pe intrarea testată se aplică doar tensiune de mod comun.

Valori uzuale -30... -50dB.

Rezistența de intrare

Prin rezistență de intrare se înțelege în mod uzual rezistență diferențială de intrare, adică rezistența de sarcină vazută de un generator cuplat între intrarea inversoare și intrarea neinversoare a aceleiași variabile de intrare în multiplicator (X sau Y). Datorită faptului că intrările multiplicatoarelor analogice sunt intrări de tensiune se dorește ca rezistența lor de intrare să fie cât mai mare, ideal infinită.

Se consideră rezistența de intrare a unui multiplicator analogic minimul rezistențelor de intrare ale celor două intrări diferențiale.

Valorile uzuale ale rezistenței de intrare sunt de ordinul 5... 20MΩ.

Banda de frecvență

Acest parametru arată posibilitatea multiplicatorului de a lucra la frecvențe ridicate. Datorită faptului că multiplicatoarele analogice sunt realizate exclusiv cu cuplaje galvanice nu se pune problema răspunsului la frecvențe joase. În mod uzual banda de frecvență se definește pentru o atenuare de 3dB față de semnalul de ieșire de la frecvențe joase (1kHz). Măsurătorile se fac pe rând pentru ambele intrări și se consideră valoarea minimă obținută. Este preferabil ca multiplicatorul să aibă o bandă de frecvențe cât mai largă.

Valori uzuale: 0,5... 10MHz

Eroarea de neliniaritate

Eroarea de neliniaritate se măsoară separat pentru fiecare intrare a multiplicatorului. Acest parametru se definește ca fiind abaterea maximă a tensiunii de ieșire de la o caracteristică liniară față de intrarea pentru care se face măsurătoarea, cu cealaltă intrare comandată astfel încât să se obțină un factor de scară unitar. Se exprimă în procente față de tensiunea maximă de ieșire la cap de scală. Uzual eroarea de liniaritate este mai mare pentru intrarea Y

Valori uzuale 0.1... 5%.

4. Desfășurarea lucrării

1. Se identifică pe placa de circuit imprimat montajul din Fig. 5 și se notează valorile componentelor folosite.
2. Se alimentează montajul de la o sursă diferențială de +/- 15V.
3. Cu intrările VX+, VX-, VY+, VY- legate la masă se reglează din R8 și R14 curenții de polarizare ai convertoarelor U-I la valoarea de 1mA. Valoarea curentului se determină citind căderea de tensiune pe rezistențele R₁₀ și R₁₃.
4. Se înserează un ampermetru cu sursa de +15V și se măsoară curentul consumat. Se măsoară curentul consumat din sursa de -15V. Se determină curentul de alimentare și puterea consumată de montaj.
5. Se intercalează succesiv un microampermetru între intrările 4, 8, 9 și 12 și masă pentru a se citi valorile curenților de polarizare a intrărilor. Stabilește valoarea parametrului curent de polarizare a intrărilor și se calculează curenții de decalaj la intrare.

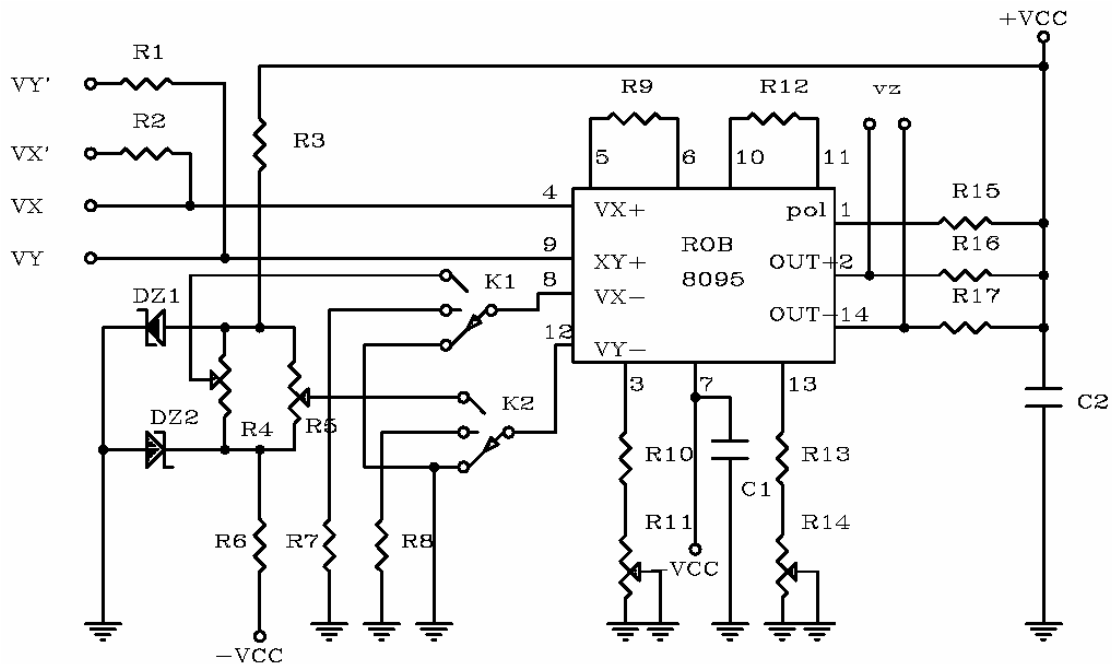


Fig. 5

6. Pentru măsurarea curentului de decalaj la ieșire este necesară compensarea curenților de decalaj la intrări. Acest lucru se realizează conectând intrările VX- și VY- la cursorile

potențioanelor R5 și R4. Pentru anularea curentului de decalaj al intrării X se procedează astfel:

- ↪ -se conectează pe intrarea Y un semnal dreptunghiular cu amplitudinea de $5V_{VV}$ și frecvența de 1KHz;
- ↪ -se conectează VX+ (9) la masă;
- ↪ -se reglează R₄ până la dispariția semnalului alternativ de la ieșire;
- ↪ -se repetă operațiile anterioare pentru intrarea Y.

După ce au fost anulați curenții de decalaj la intrare se conectează intrările VX+ și VY+ la masă și se măsoară valoarea tensiunii diferențiale de ieșire. Curentul $I_{d0z} = I_2$ $I_4 = \frac{V_z}{R_{16}}$ de decalaj la ieșire se calculează cu formula:

7. Pentru măsurarea amplificării de mod comun se aplică pe intrarea Y o tensiune diferențială de +10V (VY- la masă, +10V pe VY+). Se conectează împreună VX+ și VX- și se aplică un semnal dreptunghiular cu amplitudinea de $5V_{VV}$ și frecvența de 1KHz. Se măsoară amplitudinea vârf la vârf a semnalului de ieșire. Se calculează amplificarea de mod comun cu formula dată la definirea parametrului.
8. Se repetă punctul 6 inversând intrările X cu intrările Y pentru a măsura amplificarea de mod comun corespunzătoare intrării Y.
9. Se conectează intrările VX- și VY- la masă prin rezistențele de 1MΩ. Se aplică pe intrarea VX'+, față de masă, un semnal dreptunghiular cu amplitudinea de $5V_{VV}$ și frecvența de 1KHz. Se măsoară amplitudinea semnalului între pinul 8 (VX-) și masă. Rezistența diferențială a intrării X se calculează cu relația $r_{dx} = \frac{U_{VX'}}{U_{VX}} \cdot 2$. Se repetă măsurătoarea pentru intrările VY'+ și VY- pentru a calcula rezistența diferențială a intrării Y. Care este explicația acestui mod de măsurare a rezistențelor diferențiale de intrare?
10. Pentru a măsura banda de frecvențe la 3dB se aplică la intrarea VX+, față de masă, un semnal sinusoidal cu amplitudinea de $1V_{VV}$ și frecvența de 100Hz. Pe Y se aplică o tensiune diferențială, continuă, de +5V. Se măsoară tensiunea de ieșire și apoi se crește

frecvența până când tensiunea de ieșire scade la 0,707 din tensiunea de ieșire de la 100Hz. Frecvența generatorului în acest moment este frecvența la care multiplicatorul introduce o atenuare de 3dB pe intrarea X. Se măsoară similar banda de frecvențe a intrării Y și se deduce banda de frecvențe a multiplicatorului.

11. Măsurarea factorului de scală se efectuează aplicând pe intrările VX+ și VY+ o tensiune continuă de +10V față de masă. Se măsoară tensiunea de ieșire VZ. Din relația de funcționare a multiplicatorului analogic, $V_z = kV_xV_y$, se calculează valoarea factorului de scală k.
12. Pentru măsurarea erorii de neliniaritate a intrării X se aplică pe intrarea Y o tensiune diferențială astfel ca produsul VY*K să fie unitar. Se aplică la intrarea X o tensiune diferențială de 12V și se măsoară tensiunea VZ. Eroarea de neliniaritate se calculează cu relația $\varepsilon_x = \frac{V_z - V_x}{V_x} * 100$ [%]. Se trasează graficul $V_z = f(V_x)$ pentru cel puțin 10 valori în intervalul 0... 10V și se calculează eroarea medie pătratică a ieșirii față de intrarea X cu formula: $\varepsilon_x = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (V_n - kV_x)^2$. Se repetă măsurătorile de mai sus pentru determinarea erorii de neliniaritate și a erorii medii pătratice a ieșirii față de intrarea Y.