

Laboratorul 4.

Amplificatorul diferențial.

1 Scopul lucrării

Scopul lucrării este studiul funcționării amplificatorului diferențial cu tranzistoare bipolare, măsurarea amplificărilor de tensiune precum și observarea influenței rezistenței de cuplaj asupra coeficientului de respingere a modului comun și a impedanțelor de intrare.

Pentru a putea defini caracteristicile și parametrii amplificatorului diferențial este necesar ca, mai întâi, să prezentăm conceptele de **tensiune diferențială** și **tensiune de mod comun**.

2 Noțiuni teoretice

2.1 Tensiunea diferențială

Prin definiție, tensiunea diferențială a două surse este definită ca **diferența de tensiune dintre cele două**.

Dacă sursele de tensiune generează ieșirile V_1 și V_2 față de masă, atunci spunem că tensiunea diferențială a celor două surse este $V_d = V_1 - V_2$. Această tensiune se măsoară între ieșirile celor două surse, și nu față de masă.

Exemplu: Dacă $V_1 = 5V$ și $V_2 = 3V$, ambele măsurate față de masă, atunci, măsurând tensiunea între V_1 și V_2 vom obține $2V$.

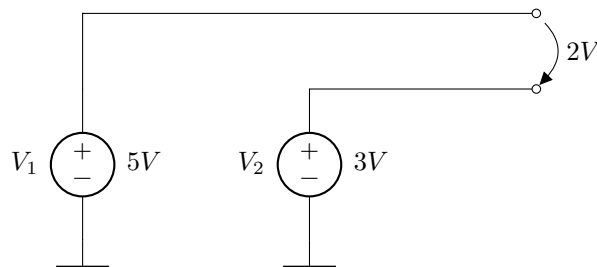


Figura 1: Tensiunea diferențială

2.2 Tensiunea de mod comun

Prin definiție, tensiunea de mod comun este măsurată ca media aritmetică a valorilor surselor de tensiune (semisuma acestora). Aceasta poate fi interpretată ca tensiunea care este "comună" ambelor surse.

Pentru exemplul precedent, tensiunea de mod comun va fi $(V_1 + V_2)/2$, adică $4V$ (mijlocul intervalului dintre cele două semnale).

2.3 Amplificatorul diferențial. Concepte generale de bază.

Amplificatorul diferențial este un montaj electronic cu două intrări care are rolul de a **amplifica diferența dintre semnalele aplicate la intrare**.

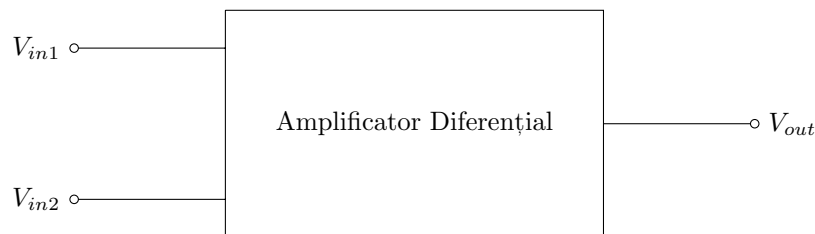


Figura 2

În mod ideal, amplificatorul diferențial amplifică numai diferența dintre semnalele de la intrare $(V_{i1} - V_{i2})$.

2.4 Amplificarea diferențială. Amplificarea modului comun.

Amplificarea diferențială (A_d) reprezintă factorul cu care diferența dintre tensiunile de la intrare este amplificată.

$$V_o = A_d(V_{i1} - V_{i2}) \quad (1)$$

Din cauza modului de construcție, V_o depinde de factorul de amplificare (dat de conexiunea fundamentală a tranzistoarelor întâlnită la fiecare intrare) al fiecărei tensiuni de intrare.

Astfel, vom spune că definim tensiunea de ieșire V_o ca fiind diferența dintre tensiunile amplificate pentru fiecare intrare în parte (V_{o1} și V_{o2}). A_1 și A_2 sunt amplificările date de montaj pentru fiecare tensiune de intrare. **În mod ideal** amplificările pentru ambele intrări trebuie să fie identice:

$$A_1 = A_2 \quad (2)$$

$$V_{o1} = A_1 V_{i1} \quad (3)$$

$$V_{o2} = A_2 V_{i2} \quad (4)$$

$$V_o = A_1 V_{i1} - A_2 V_{i2} \quad (5)$$

În cazul amplificatoarelor reale, din cauza diferențelor dintre componentele utilizate, a toleranțelor componentelor și a altor factori, vom observa că **tensiunea de ieșire depinde nu doar de tensiunea de intrare diferențială** ($V_{i1} - V_{i2}$), **ci și de tensiunea de intrare de mod comun** $((V_{i1} + V_{i2})/2)$.

Astfel, putem spune că, tensiunea de ieșire a amplificatorului diferențial depinde de tensiunea diferențială de intrare și de tensiunea de mod comun a intrărilor în felul următor:

$$V_o = A_d(V_{i1} - V_{i2}) + A_c \left(\frac{V_{i1} + V_{i2}}{2} \right) \quad (6)$$

Unde A_d se numește **amplificare diferențială** a montajului iar A_c se numește **amplificare de mod comun** a amplificatorului. În mod ideal, cum am enunțat anterior, amplificatorul trebuie să amplifice diferența semnalelor de intrare și să nu fie influențat de modul comun al acestora. Deci, **pentru un amplificator ideal**, $A_c = 0$.

Putem exprima tensiunea de ieșire în funcție de tensiunile de intrare, grupăm termenii pentru a obține coeficienții lui V_{i1} și lui V_{i2} .

$$V_o = V_{i1} \left(A_d + \frac{A_c}{2} \right) - V_{i2} \left(A_d - \frac{A_c}{2} \right) \quad (7)$$

2.5 Rejecția modului comun.

Factorul de rejecție al modului comun.

După cum am menționat anterior, ieșirea amplificatorului este influențată și de tensiunea de mod comun a intrărilor. **Este de dorit ca tensiunea de mod comun a intrărilor amplificatorului să aibă o influență cât mai mică asupra ieșirii.** În specificarea amplificatoarelor, utilizăm termenul de **Factor de Rejecție a Modulului Comun** - notat **CMRR**¹. CMRR cuantifică capacitatea amplificatorului diferențial de a anula (sau mai degrabă spus, de a atenua foarte puternic) tensiunea comună ambelor intrări (tensiunea de intrare de mod comun), este exprimat în dB și este calculat în felul următor:

$$CMRR = 10 \log_{10} \left(\frac{A_d}{A_c} \right)^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{A_d}{|A_c|} \right) dB \quad (8)$$

Interpretarea CMRR: Pentru un CMRR de $80dB$, și o amplificare diferențială de 100, amplificarea modului comun va fi de 0.01. Presupunem că semnalul util și zgomotul prezent pe ambele intrări sunt de același ordin de mărime (ex: realizarea unei electrocardiografe care măsoară tensiuni de ordinul mV). Aceasta înseamnă că semnalul va fi amplificat de 100 de ori și zgomotul (modul comun) va fi atenuat de 100 ori, astfel, semnalul util va deveni de 10.000 de ori mai puternic decât zgomotul și mai ușor de prelucrat.

¹CMRR - (en.) Common Mode Rejection Ratio

În alte cazuri este utilă exprimarea factorului de rejecție a modului comun, r , ca raportul amplificării diferențiale și al amplificării de mod comun:

$$r = \frac{A_d}{A_c} \quad (9)$$

Dacă structura amplificatorului este perfect simetrică, și $A_c = 0$, atunci CMRR tinde spre infinit. **În practică A_c este nenul, astfel CMRR este foarte mare. Cu cât CMRR este mai mare, cu atât amplificatorul rejectează mai eficient tensiunile comune ambelor semnale.**

2.6 Rejecția variației alimentării. Factorul de rejecție al alimentării.

O altă caracteristică de bază a amplificatoarelor diferențiale este **rejecția tensiunii de alimentare**, sau, mai complet, **rejecția variației tensiunii de alimentare**. Similar cu CMRR, **Factorul de Rejecție a Tensiunii de Alimentare** - notat **PSRR**¹ sau **SVRR**² definește capacitatea amplificatorului diferențial **de a nu fi influențat de variația tensiunii de alimentare** (zgomote sau variația dată de alți factori).

Factorul de rejecție a alimentării reprezintă, pe scurt, **imunitatea amplificatorului la variații ale tensiunilor de alimentare**. Acesta se calculează prin referire la variația observată la ieșirea amplificatorului datorată variației alimentării, pentru un factor de amplificare diferențial fixat.

PSRR este măsurat în dB și este calculat conform formulei următoare:

$$PSRR = 10 \log_{10} \left(\frac{\Delta V_{alim} \Delta A_d}{\Delta V_o} \right)^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{\Delta V_{alim} \Delta A_d}{\Delta V_o} \right) dB \quad (10)$$

Cu cât PSRR este mai mare, cu atât amplificatorul rejectează mai eficient variațiile de tensiune ale alimentării și are o imunitate crescută la variațiile acesteia.

Interpretarea PSSR: Pentru un PSSR de $80dB$, pentru un amplificator cu o amplificare diferențială de 100, și pentru o variație de $100mV$ a tensiunii de alimentare, variația ieșirii va fi de $1mV$. Adică, deși amplificatorul are o amplificare de 100, o variație de $100mV$ a intrării influențează cu doar $1mV$ ieșirea. Putem spune că variația alimentării este atenuată de 100 de ori.

În practică, amplificatoarele necesită o alimentare bine filtrată, a cărei variație este de sub $10mV$, astfel încât variația ieșirii va fi de sub $100\mu V$.

CMRR și PSRR sunt specificate în documentația tehnică a amplificatoarelor cu valori minime (prima valoare din a treia coloană) și valori tipice (a doua valoare din a treia coloană). În Figura 3 aveți o captură a specificațiilor circuitului LM741.

¹PSRR - (en.) Power Supply Rejection Ratio

²SVRR - (en.) Supply Voltage Rejection Ratio

Common-mode rejection ratio	$R_S \leq 10 \Omega, V_{CM} = \pm 12 \text{ V}, T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$	80	95	dB
Supply voltage rejection ratio	$V_S = \pm 20 \text{ V to } \pm 5 \text{ V}, R_S \leq 10 \Omega, T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$	86	96	dB

Figura 3

2.7 Schema de principiu a amplificatorului diferențial cu tranzistoare bipolare.

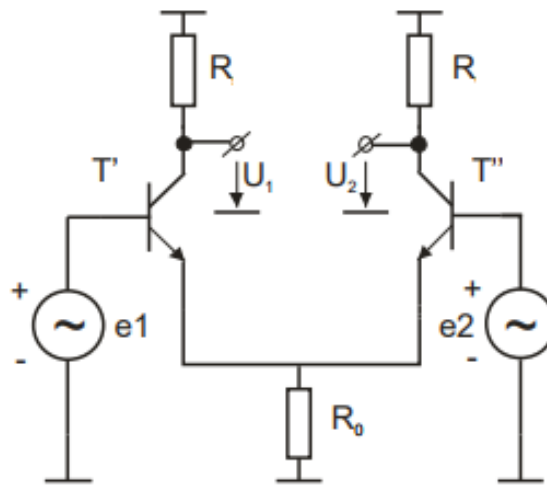


Figura 4

În Figura 4 este prezentată schema de principiu a amplificatorului diferențial. Schema este reprezentată doar pentru regimul alternativ.

Ca amplificatorul să funcționeze, la fel ca pentru orice circuit cu tranzistoare, trebuie să existe un circuit de polarizare corespunzător (nereprezentat în această schemă).

R_0 se numește **rezistența de cuplaj a tranzistoarelor**, unul fiind în conexiune cu colectorul la masă, iar celălalt cu baza la masă. Intrările circuitului sunt generate de sursele e_1 și e_2 , **tensiunea de ieșire diferențială** fiind $U_o = U_1 - U_2$.

Ieșirea amplificatorului diferențial poate fi folosită în modul diferențial, dar și individual față de masă (single ended). În cazul în care se utilizează o singură tensiune de ieșire (de exemplu ieșirea U_2) în defavoarea utilizării diferenței dintre cele două ($U_1 - U_2$), comportamentul acestuia va fi același, dar amplificarea va fi la jumătate față de conexiunea diferențială.

În practică, deseori, pentru amplificatoarele diferențiale cu tranzistoare bipolare se folosește o singură ieșire față de masă. Schema de principiu pentru amplificatorul

diferențial cu ieșire față de masă este prezentată în Figura 5.

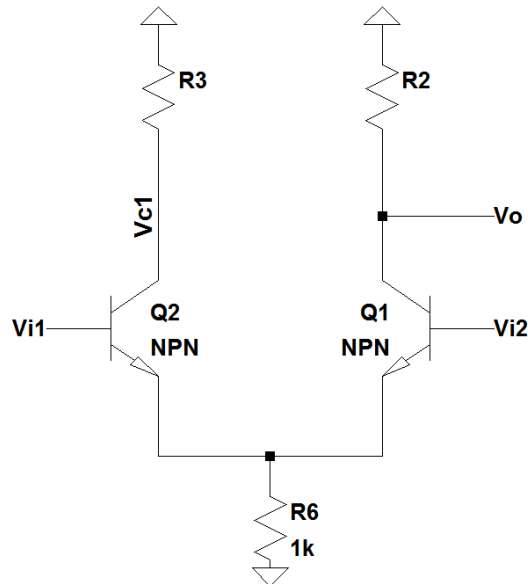


Figura 5

Pentru a putea, pentru un montaj de amplificator dat, să determinăm amplificările diferențiale, de mod comun dar și a factorului de rejecție a modului comun, putem folosi două metode.

1. Determinarea parametrilor folosind superpoziția în regim alternativ (**Atacul nesimetric**): Putem folosi a doua formulă de calcul a ieșirii, care are ca variabile V_{i1} și V_{i2} împreună cu factorii lor $(A_d + A_c/2)$ și $(A_d - A_c/2)$.

Aplicăm un semnal pe una dintre intrări în timp ce a doua intrare este pasivizată (ținută la masă sau folosind un generator de $0V$ - nu avem voie să lăsăm intrarea neconectată) și măsurăm tensiunea de ieșire U_o . Repetăm măsurătoarea inversând între ele intrările.

Obținem astfel un sistem de două ecuații cu două necunoscute (A_d , A_c). Rezolvăm sistemul și determinăm necunoscutele.

2. Determinarea parametrilor folosind **atacul simetric** și **atacul de mod comun**. Folosind atacul simetric (a cărui tensiune de mod comun este de $0V$) tensiunea de ieșire va prezenta exclusiv amplificare diferențială a intrărilor $U_o = A_d(V_{i1} - V_{i2})$.

Măsurând U_o și cunoscând tensiunile aplicate, determinăm A_d . Folosind **atacul de mod comun**, aplicăm același semnal ambelor intrări.

Tensiunea diferențială a acestora este de $0V$, iar tensiunea de ieșire va prezenta exclusiv amplificare a modului comun a intrărilor. Măsurând U_o și cunoscând tensiunea aplicată intrărilor, determinăm A_c .

2.8 Semnale simetrice.

Atacul simetric al amplificatorului.

Atacul simetric, denumit în literatura de specialitate și excitația simetrică, este realizat aplicând la intrarea amplificatorului diferențial, două semnale simetrice $V_2 = -V_1$, de aceeași frecvență (semnalele au aceeași amplitudine, dar sunt defazate cu 180°).

Pentru exemplificare, în Figura 6 observăm că V_1 (primul grafic) și V_2 (graficul al doilea) generează o tensiune cu o amplitudine la vârf de $1V$, dar ele sunt în antifază - observabil în graficul al treilea - (V_2 este defazată față de V_1 cu 180°).

Tensiunea diferențială $V(V_1, V_2)$ este $V_d = V_1 - V_2$ și aceasta are amplitudinea la vârf de $2V$. Tensiunea de mod comun, datorită simetriei semnalelor, va fi de $0V$. Folosind atacul simetric putem determina amplificarea diferențială a amplificatorului.

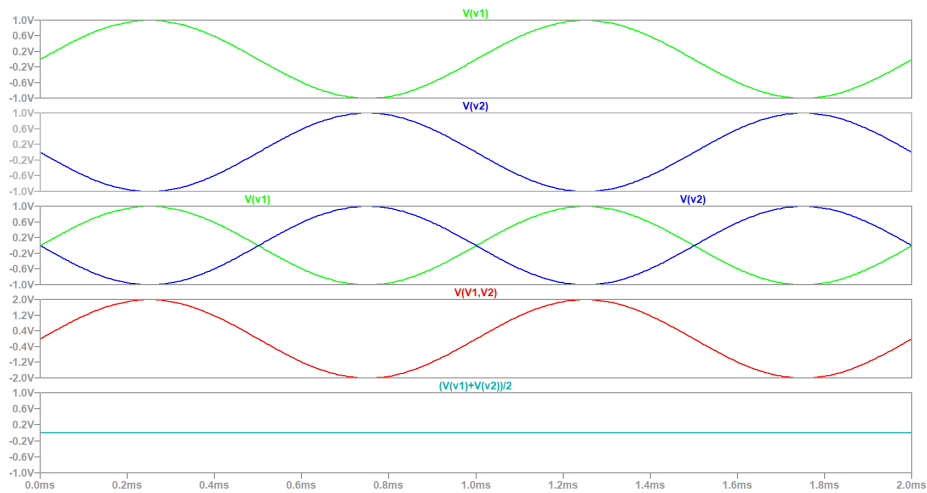


Figura 6

2.9 Semnale comune (identice).

Atacul de mod comun al amplificatorului.

Atacul de mod comun, regăsit în literatura de specialitate și sub numele de excitație de mod comun, asupra amplificatorului diferențial este realizat aplicând două semnale identice ($V_1 = V_2$) la intrarea acestuia.

Astfel, cum se poate observa și în Figura 7, tensiunea diferențială ($V_1 - V_2$) din graficul al treilea $V(V_1, V_2)$ este 0, semnalele fiind suprapuse, dar tensiunea de mod comun (semisuma acestora prezentată în graficul al patrulea) are amplitudine la vârf de $1V$.

Folosind acest tip de atac măsurăm influența modului comun asupra ieșirii amplificatorului.

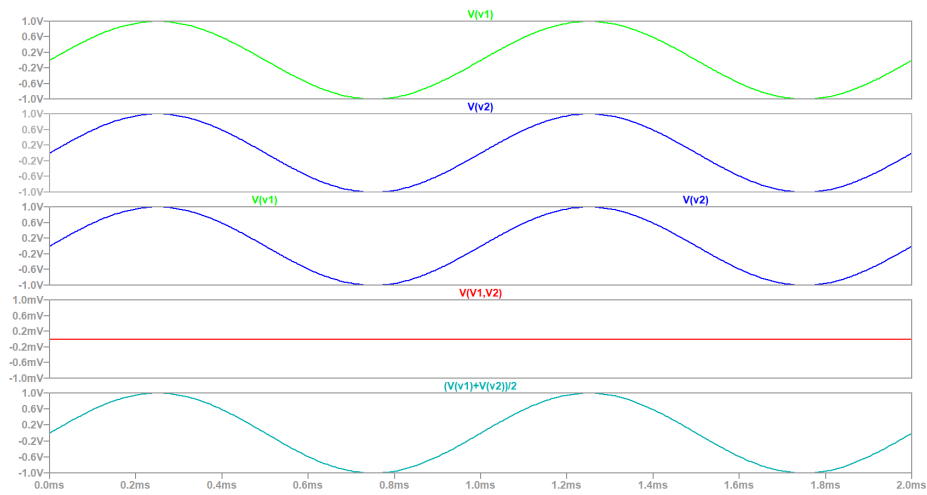


Figura 7

2.10 Semnale nesimetrice.

Atacul nesimetric al amplificatorului.

Atacul nesimetric al amplificatorului, regăsit în literatura de specialitate și sub numele de excitație nesimetrică, presupune aplicarea principiului superpoziției. Se observă că acest mod de atac are atât o componentă diferențială $V(V_1, V_2)$ egală ca amplitudine cu semnalul nenul, cât și o componentă de mod comun $(V_1 + V_2)/2$, cu amplitudinea egală cu jumătate din cea a semnalului nenul. Spre deosebire de metodele precedente, care permit aflarea pe rând a amplificării de mod comun și diferențiale, atacul nesimetric trebuie aplicat folosind principiul superpoziției. Aplicăm semnalele menținând o sursă nulă și una nenulă și măsurăm U_o . Apoi inversăm semnalele și măsurăm iar tensiunea de ieșire. Rezolvând sistemul de două ecuații cu două necunoscute aflăm A_d și A_c .

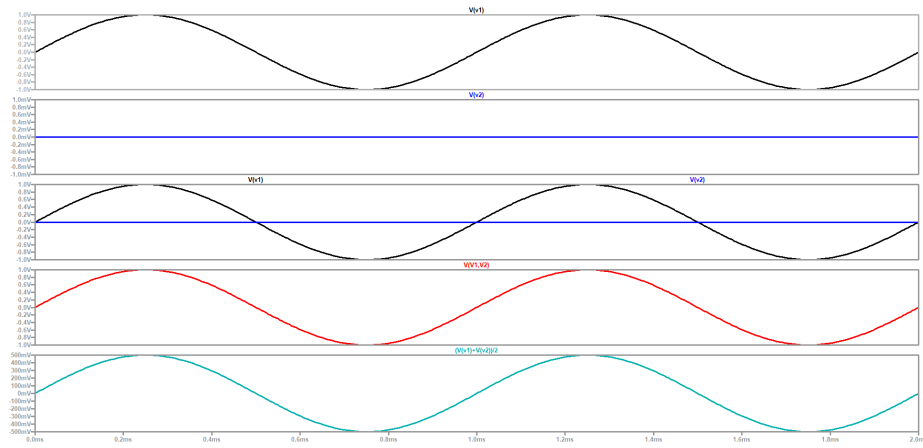


Figura 8

3 Desfășurarea lucrării

Lucrarea curentă presupune determinarea parametrilor de bază ai amplificatorului diferențial folosind simulatorul. Schema amplificatorului diferențial utilizat este una simetrică, cu tranzistoare identice și componente ideale, de valori egale, și este prezentată în figura de mai jos:

3.1 Importanța circuitului de polarizare.

Deschideți circuitul din fișierul `circuit_polarizare_rezistor.asc`, sau realizați schema din Figura 9 în simulator. Polarizarea este realizată folosind o sursă de tensiune fixă ($V_b = 7V$) cu rezistențe în bază ($150k\Omega$).

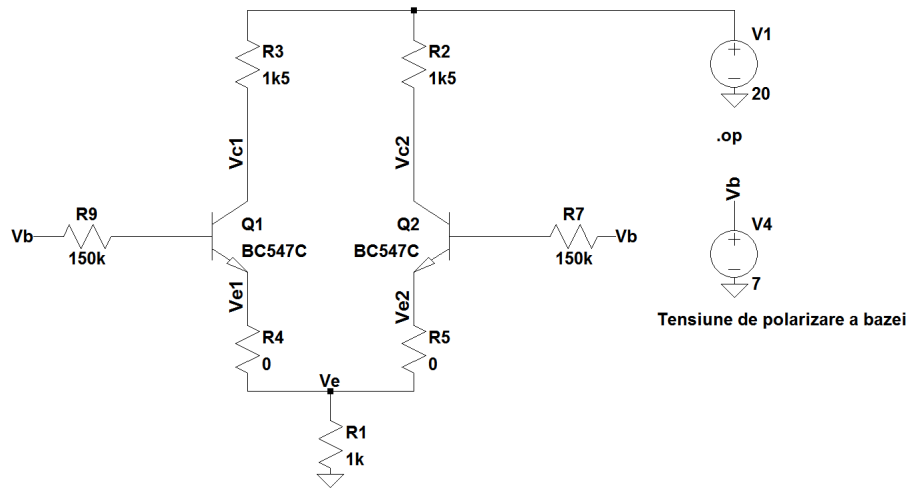


Figura 9

Pentru a realiza schema, puteți folosi următoarele scurtături:

Keyboard shortcuts	Role
F2	Add component
F3	Add wire
F4	Add label
F9	Undo
G	Add GND connection
R	Add resistor
C	Add capacitor
L	Add inductor
Ctrl+R	Rotate
Ctrl+E	Mirror

1. Rulați simularea (calcularea punctului de operare - dc operating point (.op)) și măsurați punctele statice de funcționare ale tranzistoarelor (U_{ce} și I_c).
2. Înlocuiți modelele tranzistoarelor (înlocuiți de exemplu cu 2N2222). Rulați simularea și măsurați punctele statice de funcționare ale tranzistoarelor

(U_{ce} și I_c).

Diferă față de cele măsurate precedent? Ce putem spune referitor la dependența punctelor statice de funcționare față de modelul tranzistoarelor utilizate?

3. Înlocuiți rezistența de cuplaj cu o sursă de curent de $5mA$ (current source), ca în Figura 10. Mășurați punctele statice de funcționare ale tranzistoarelor (U_{ce} și I_c).
4. Înlocuiți modelele tranzistoarelor cu cele din modelul inițial (BC547C) și repetați măsurătorile.

Diferă valorile măsurate față de cele precedente? Care parametru al punctului static de funcționare este neschimbat? Ce îmbunătățire aduce utilizarea sursei de curent în locul rezistenței de cuplaj?

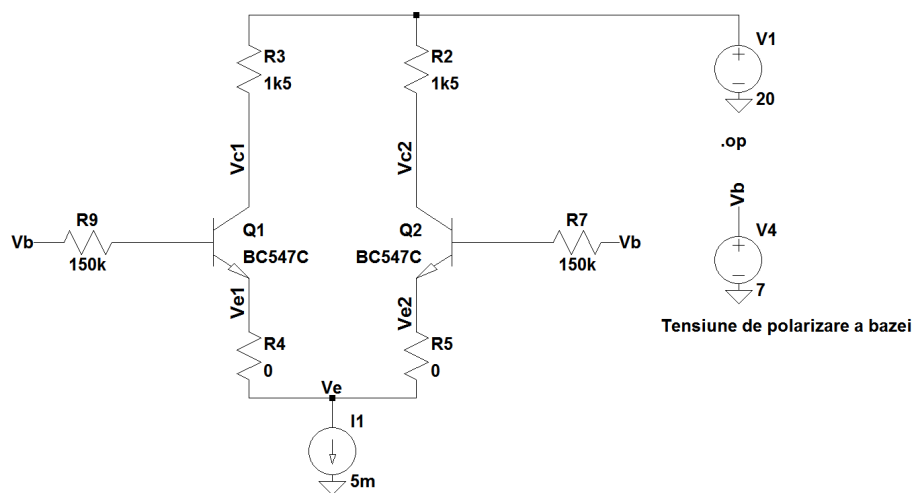


Figura 10

Pentru cerințele 3.2 și 3.3, se va realiza analiza tranzitorie (transient analysis) cu stop time 5 milisecunde (5m), care cuprinde 5 perioade ale semnalului.

3.2 Determinarea amplificării diferențiale.

Amplificatorul este realizat în simulator cu rezistențe de valori ideale, fără toleranțe și fără imperfecțiuni. În acest caz, dacă toate componentele ar fi ideale și schema ar fi **perfect simetrică**, amplificatorul ar avea numai amplificare diferențială, iar factorul de rejecție al modului comun ar fi infinit. **În realitate componentele (tranzistoarele și rezistențele) nu sunt identice, ci au mici diferențe.** Ele pot fi potrivite la fabricație în limitele tehnologiei curente, dar nu pot fi obținute componente perfect identice, deci în realitate tot va exista o diferență între componente.

Pentru studiul amplificatorului diferențial și a comportamentului acestuia, pentru a putea pune în evidență și importanța rejecției modului comun și a sursei de alimentare **vom utiliza configurația de ieșire de tip single-ended** (măsurăm doar U_2 – tensiunea din colectorul lui Q_2 față de masă). Pentru a limita influențele sarcinii, vom folosi R_1 de $1M\Omega$ ca rezistență de sarcină pe ieșire.

Deschideți fișierul de simulare `ad_single_ended_diff.asc` sau realizați în simulator schema din Figura 11.

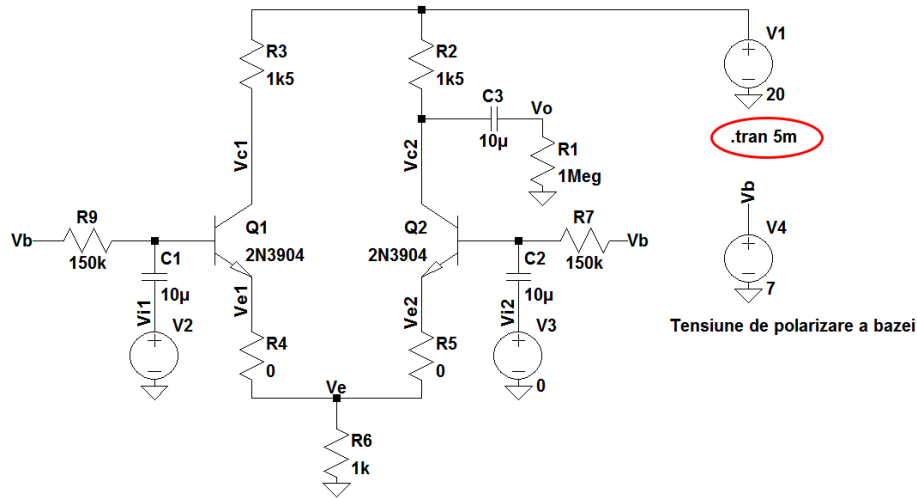


Figura 11

1. Folosind atacul simetric, reglați sursele V_2 și V_3 astfel încât acestea să genereze tensiune de amplitudine de $10mV$ la frecvența de $1kHz$. V_3 trebuie defazată cu 180° .

Măsurați tensiunea de ieșire V_o și calculați amplificarea diferențială.

2. Modificați rezistențele R_4 și R_5 (realizați degenerarea emitorului) și fixați pentru ambele valoarea de 150Ω .

Rulați simularea, măsurați tensiunea de ieșire V_o și calculați amplificarea diferențială. Cum s-a modificat amplificarea față de cazul anterior?

Montajul poate fi văzut ca două circuite tip sarcină distribuită.

Deși amplificarea teoretică ar trebui să fie jumătate din R_c/R_e (măsurăm în regim față de masă în loc să măsurăm tensiunea de ieșire între colectoarele tranzistoarelor, deci amplificarea în acest regim este la jumătate), adică 5, aceasta este totuși mai mică. Care este motivul? Care dintre parametrii din modelul cu parametri hibridi (h_i , h_f , h_o , h_r) al tranzistorului se înseriază cu R_e (R_4 sau R_5)?

3.3 Determinarea amplificării de mod comun.

Influența rezistenței de cuplaj a emitoarelor asupra factorului de rejecție a modului comun.

Pentru această etapă a simulării, folosiți valorile de 150Ω pentru rezistențele din emitor pentru cele două tranzistoare. Folosiți valoarea de $100mV$ pentru noua amplitudine a semnalului pentru atacul de mod comun.

1. Modificați tipul de atac astfel încât ambele semnale de intrare (V_{i1} și V_{i2}) să fie identice, în fază. Ambele semnale fiind egale, tensiunea diferențială de intrare este de $0V$, iar tensiunea de intrare mod comun este egală cu amplitudinea intrărilor.

Măsurati V_o și calculați amplificarea de mod comun a amplificatorului. Calculați CMRR.

2. Înlocuiți rezistența de cuplaj cu o sursă de curent care absoarbe $5mA$

Rulați simularea și recalculați amplificarea de mod comun a amplificatorului și CMRR. Cum este noua valoare a factorului de rejecție a modului comun? Ce putem spune despre dependența CMRR față de rezistența de cuplaj a tranzistoarelor?