

## Laboratorul 4.

### Aplicații de regim dinamic. Amplificatoare cu tranzistoare bipolare. Studiu de caz: Amplificatorul audio cu câștig fix și fără sistem de feedback.

## 1 Scopul lucrării

Măsurarea performanțelor amplificatoarelor elementare realizate cu tranzistoare bipolare în două montaje elementare utilizate ca amplificator: colector la masă (repetor pe emitor) și amplificator cu sarcină distribuită.

## 2 Noțiuni teoretice

### 2.1 Reamintire: Tranzistorul bipolar

Tranzistorul este o componentă de circuit activă, adică poate produce la ieșire un semnal de o putere mai mare decât semnalul de la intrarea lui. Această putere suplimentară provine dintr-o sursă externă (o sursă de tensiune). În montajele electronice, tranzistoarele sunt poziționate în schemă astfel încât, în funcție de semnalul de comandă, acestea distribuie către ieșire a semnalului direct de la alimentare, păstrând pe intrare o impedanță mare (consumă un curent foarte mic din semnalul de la intrare).

Tranzistorul are trei terminale: bază, emitor și colector. Pentru a evita confuziile, vom nota potențialul dintr-un terminal cu  $V$  și indice numele terminalului:

$V_B$  pentru potențialul din bază (măsurat față de GND), analog pentru emitor și colector.

$V_{CC}$  este tensiunea de alimentare care intră în colector; este mereu pozitivă;

$V_{EE}$  este tensiunea de alimentare care intră în emitor; este, de obicei, negativă.

Tensiunea dintre două potențiale este indicată de un dublu indice:

$U_{BE}$  pentru tensiunea bază-emitor;

$U_{CE}$  pentru tensiunea colector-emitor, etc

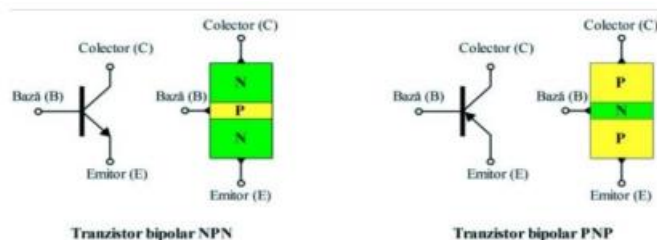


Figura 1: Simbolul și structura tranzistorului bipolar

### Regimurile de funcționare ale tranzistorului bipolar

Tranzistorii bipolari sunt de două tipuri: NPN și PNP (Figura 1). La funcționarea în Regiunea Activ Normală (RAN) cei NPN respectă următoarele reguli (pentru PNP inversați sensul căderilor de tensiune):

1. În colector valoarea potențialului este mai mare decât în emitor;
2. Joncțiunile PN (bază-emitor, bază-colector) pot fi analizate similar diodelor (Figura 2). Dioda bază-emitor este polarizată direct, iar dioda bază-colector este polarizată invers;
3. Orice tranzistor are valori maxime pentru  $I_C$ ,  $I_B$  și  $U_{CE}$ . Depășirea lor va duce la distrugerea tranzistorului. Alți parametri de care trebuie să ținem cont sunt: puterea disipată ( $I_E U_{CE}$ ), temperatura de funcționare, etc;
4. Dacă primele 3 reguli sunt respectate,  $I_C$  este direct proporțional cu  $I_B$

#### 2.1.1 Impedanța (Z)

1. **Rolul în Amplificatoare:** Amplificatoarele sunt folosite atât în regim continuu, cât și în regim alternativ. În special, amplificatoarele cu tranzistoare bipolare sunt adesea utilizate în regim alternativ, operând în jurul unui punct static de funcționare.
2. **Cuplarea Regimului Alternativ:** Pentru a cupla regimul alternativ peste punctul static de funcționare al tranzistorului, se folosesc componente care blochează curentul continuu dar se comportă ca o rezistență mică în regim alternativ. Aceste componente sunt cunoscute ca elemente de cuplaj AC (AC coupling components) și sunt de obicei condensatoare.

#### Condensatoarele în Amplificatoare

1. **Utilizarea Condensatoarelor:** Acestea sunt folosite pentru a cupla semnalul dinamic (semnalul ce trebuie amplificat) în amplificatoare.
2. **Natura Reactivă:** Condensatoarele (și bobinele) sunt componente reactive, adică comportamentul lor depinde de frecvență. Cu toate acestea, sunt considerate elemente liniare.

#### Caracteristicile Circuitelor Liniare

1. **Comportamentul la Semnale Sinusoidale:** La aplicarea unui semnal sinusoidal la intrarea unui circuit liniar (format din rezistențe, condensatoare, bobine și amplificatoare liniare), semnalul de ieșire va fi, de asemenea, sinusoidal, menținând forma de undă și frecvența.
2. **Diferențe în Amplitudine și Fază:** Semnalul de ieșire poate diferi față de cel de intrare în ceea ce privește amplitudinea și faza (putând fi defazat).

## Generalizarea Legii lui Ohm pentru Impedanță

Putem să generalizăm legea lui Ohm, înlocuind termenul "rezistență" cu "impedanță" pentru a descrie orice circuit care conține astfel de componente liniare pasive. Rezultă:

$$I = \frac{U}{Z}$$

1. **Impedanța ca Rezistență Generalizată:** Impedanța poate fi privită ca o rezistență generalizată. Rezistorii au rezistență electrică, în timp ce condensatoarele și bobinele au reactanță. Astfel, impedanța este suma dintre rezistență și reactanță.
2. **Aplicabilitatea Termenului de Impedanță:** Termenul poate fi folosit atât pentru rezistențe, cât și pentru condensatoare, deoarece include ambele aspecte: rezistența și reactanța.

Această sinteză evidențiază importanța și complexitatea conceptului de impedanță în contextul amplificatoarelor, subliniind rolul esențial al condensatoarelor în cuplarea semnalelor și natura lor reactivă, precum și aplicabilitatea generalizată a legii lui Ohm în astfel de sisteme.

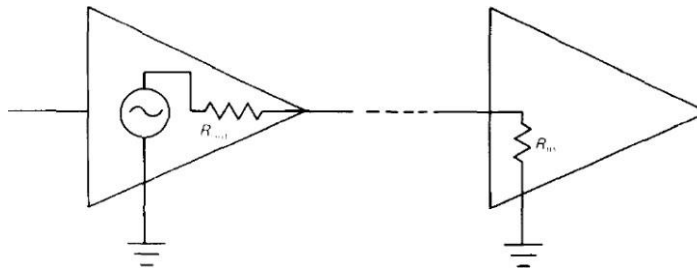


Figura 3: Etaje/blocuri într-un circuit care au impedanțe de intrare și de ieșire

În circuite, ieșirea nu este lăsată în gol. Ea poate fi folosită pentru a comanda un alt etaj de amplificare (a cărui impedanță de intrare este  $Z_{in}$ ) sau debitează putere pe o sarcină (ex: difuzor) (Figura 3). În cazul în care discutăm despre comanda aplicată intrării unui etaj de amplificare folosind ieșirea unui etaj anterior sau a altei surse de semnal, pentru ca semnalul să nu se degradeze, este de preferat ca impedanța de la ieșirea unui etaj să fie foarte mică, iar impedanța de intrare a următorului etaj să fie foarte mare.

**Observație:** Este suficient ca, pentru a nu afecta semnalul, impedanța de ieșire să fie de cel puțin un ordin de mărime mai mică decât impedanța de intrare a următorului etaj.

## 2.2 Aspecte matematice detaliate: Noțiuni generale despre amplificatoare

Modelul general al unui amplificator electronic este prezentat în Figura 6. Se remarcă:

$u_g$  - semnalul preluat de la un generator de semnal (care poate fi un generator de semnal / un senzor / un traductor);

$Z_g$  - impedența de ieșire a generatorului de semnal - utilizată pentru a modela un generator neideal;

$Z_i$  - impedența de intrare a amplificatorului;

$u_o$  - tensiunea de ieșire generată de amplificator, înainte de  $Z_o$ ;

$Z_o$  - impedența de ieșire a amplificatorului;

$Z_s$  - impedența de sarcină (în general un amplificator va avea conectată pe ieșire o sarcină; exemplu: o boxă audio, în cazul unui amplificator audio).

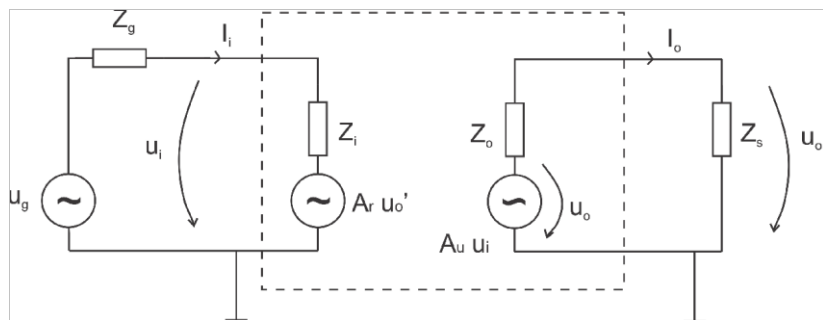


Figura 6: Modelul general pentru un amplificator electronic

Pe baza Figurii 6, se pot defini relațiile:

$$u_i = u_g \frac{Z_i}{Z_i + Z_g} \quad (6)$$

$$u_o' = u_o \frac{Z_s}{Z_s + Z_o} \quad (7)$$

În mod ideal, ne dorim ca  $u_i = u_g$ . Cum  $Z_g$  este specifică generatorului de semnal, se impune astfel condiția ca pentru amplificator ideal,  $Z_i$  să tindă la infinit (conform ecuației 6). Similar, vrem  $u_o' = u_o$ . Cum  $Z_s$  depinde de aplicația pentru care este utilizat amplificatorul, se impune astfel condiția ca  $Z_o$  să fie cât mai mică - preferabil mult mai mică decât sarcina de pe ieșire (conform Ecuației 7). Pentru amplificator ideal,  $Z_o = 0$ .

### 2.2.1 Montaje fundamentale cu tranzistoare bipolare

Cele trei scheme fundamentale și amplificatorul cu sarcină distribuită sunt prezentate în Figura 7, sub forma schemelor de principiu. Pentru fiecare dintre ele se definesc:

amplificarea de tensiune:  $\frac{u_o}{u_i}$  (pentru  $Z_s$  dat);

amplificarea de curent:  $\frac{I_o}{I_i}$  (pentru  $Z_s$  dat);

impedanța de intrare:  $\frac{U_i}{I_i}$  (pentru  $Z_s$  dat) ;

impedanța de ieșire:  $\frac{U_o}{I_o}$  (pentru  $Z_g$  dat).

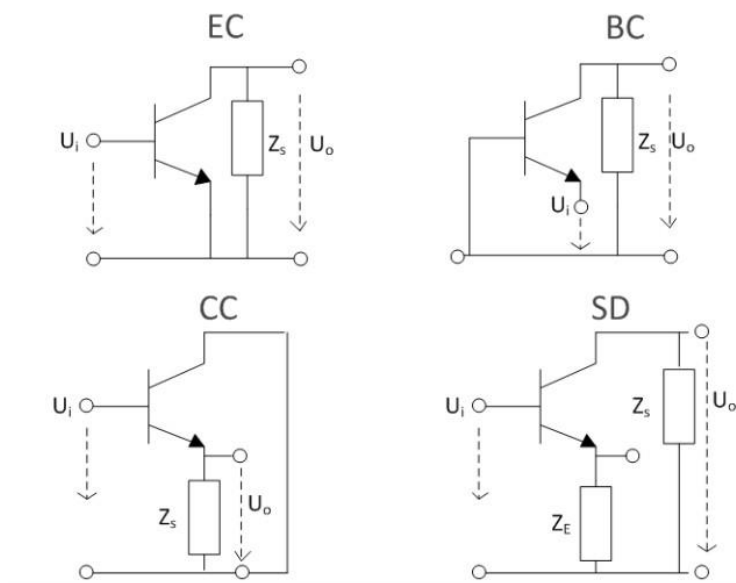


Figura 7: Conexiunile fundamentale ale tranzistorului bipolar (scheme de principiu)

### Parametrii tranzistorului bipolar în regim dinamic

Pentru modelarea funcționării tranzistorului bipolar la frecvențe joase, se poate utiliza modelul cu parametri hibridi:

$$u_{be} = h_{i1}i_b + h_{r1}u_{ce} \quad (8)$$

$$i_c = h_{f1}i_b + h_{o1}u_{ce} \quad (9)$$

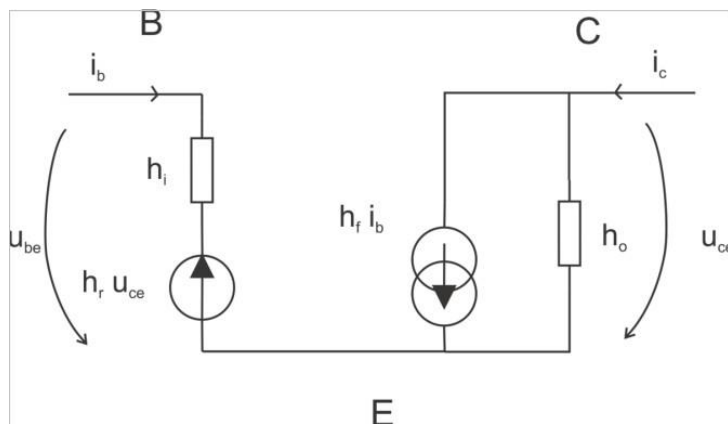


Figura 8: Modelul TBIP cu parametri hibrizi

Se pot determina câte un set de parametri  $h$  pentru fiecare tip de conexiune. În practică, cei mai întâlniți sunt parametrii  $h$  pentru conexiunea emitor comun.

### Mărimile caracteristice amplificatorului cu tranzistor

Pentru cele patru scheme din Figura 7, mărimile caracteristice se determină teoretic, cunoscând parametrii  $h$  ai tranzistorului în punctul static de funcționare și valorile din circuitul de polarizare. Circuitul de polarizare utilizat pentru montajul din această lucrare, ce va avea o influență directă asupra parametrilor, este prezentat în Figura 9.

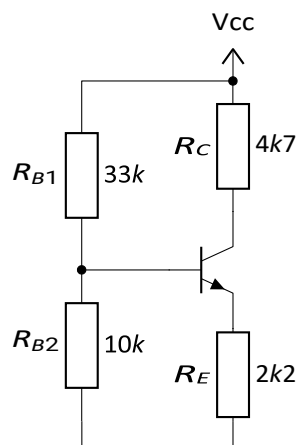


Figura 9: Schema de polarizare utilizată pentru lucrarea de laborator

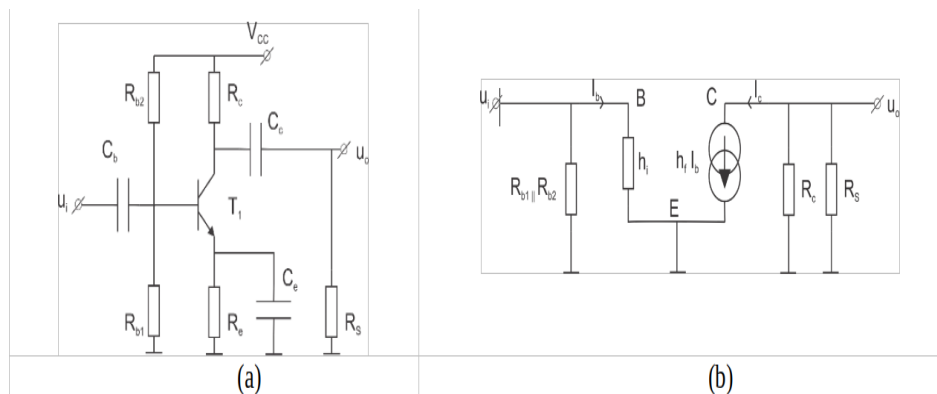


Figura 10: Schema completă pentru conexiunea emitor comun, inclusiv schema de polarizare (a), respectiv schema echivalentă în regim dinamic (b), utilizând modelul cu parametri  $h$  simplificat

Pentru determinarea amplificării de tensiune, a amplificării de curent și a impedanței de intrare se folosește schema de măsurare din Figura 11, în care mărimile ce pot fi măsurate direct sunt tensiunile  $U_g$ ,  $U_i$ ,  $U_o$ .

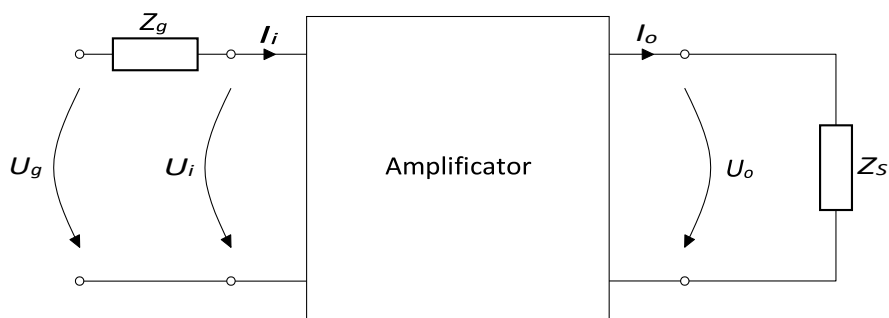


Figura 11: Schema pentru determinarea  $A_u$ ,  $A_i$ ,  $Z_i$

Se deduc ușor relațiile:

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \quad (10)$$

$$A_i = \frac{U_o}{U_g} \frac{Z_g}{U_i Z_s} \quad (11)$$

$$Z_i = \frac{U_i}{U_g} Z_g \quad (12)$$

### Impedanța de ieșire

Pentru măsurarea impedanței de ieșire se folosește schema de măsură din Figura 12, în care este rezistența de ieșire a generatorului de semnal.

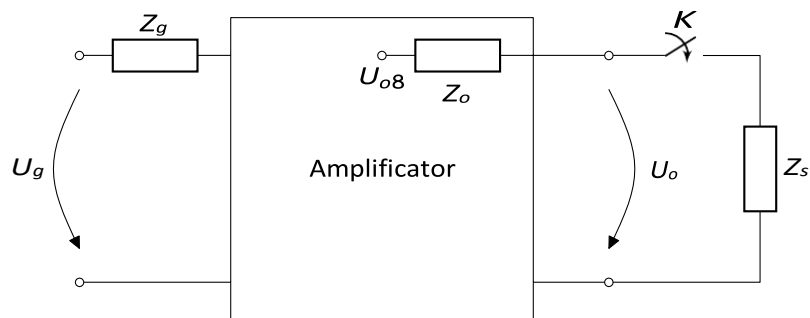


Figura 12: Schema pentru măsurarea impedanței de ieșire

$$Z_o = \frac{U_{o8} - U_o}{\frac{U_o}{Z_s}} \quad (13)$$

$$Z_o = Z_s \frac{U_{o8}}{U_o} - 1 \quad (14)$$

Unde:



$U_{o8}$  este tensiunea de ieșire în gol ( $Z_s = 8$ );

$U_o$  este aceeași tensiune de ieșire, măsurată cu rezistența de sarcină  $Z_s$  (ambele pentru aceeași tensiune de intrare  $U_g$ ).

Din punct de vedere al raportului dintre ieșire și intrare, definim trei tipuri de amplificări: **Amplificare în tensiune, Amplificare în curent, Amplificare de putere.**

#### Dependenta Amplificării de Aplicație

Amplificatoare în Diferite Regimuri: Amplificatoarele sunt utilizate atât în regim continuu, cât și alternativ. Frecvent, amplificatoarele cu tranzistoare bipolare sunt preferate pentru regimul alternativ.

Exemplu Specific: În cazul aparatelor precum EKG, EEG sau citirea semnalelor de la termocuple, care amplifică semnale de ordinul milivolt, se pune accent pe amplificarea în tensiune. Acest lucru este necesar pentru vizualizarea și analiza semnalului de intrare.

#### Importanța Impedanței de Intrare

Impedanță Mare în Anumite Aplicații: Pentru a nu afecta calitatea semnalelor, în cazul aparatelor ca EKG și EEG, este esențial ca impedanța de intrare a amplificatorului să fie cât mai mare posibil, de ordinul  $M\Omega/G\Omega$ .

Circuite cu Impedanță Mică de Intrare: În alte cazuri, unde ieșirea de semnal sau referința de tensiune este utilizată de un circuit cu impedanță de intrare mică (zeci sau sute de  $\Omega$ ), se folosesc amplificatoare repetoare. Acestea se concentrează pe amplificarea de curent și pe o impedanță de intrare mică.

#### Rolul Amplificatoarelor Repetoare

Amplificare și Impedanță: Amplificatorul repetoare de tensiune are o amplificare unitară în tensiune, repetând tensiunea de la intrare și asigurând o impedanță mare la intrare. Acest lucru minimizează curentul absorbit de la sursa de comandă.

Caracteristici de Ieșire: Circuitul repetoare furnizează un semnal de ieșire cu amplitudine aproximativ egală cu cea de intrare și asigură o impedanță mică la ieșire.

#### Amplificatoare în Aplicații Diverse

Amplificatoare Audio: În cazul amplificatoarelor audio, care procesează semnale de intrare de sute de milivolt și furnizează la ieșire tensiuni de zeci de volți și curent de ordinul amperilor sau zecilor de amperi, este esențială amplificarea atât în tensiune, cât și în curent, precum și amplificarea de putere.

Impedanța în Circuite Audio: Este necesar ca impedanța de intrare să fie mare și cea de ieșire să fie mică pentru a asigura eficiența și calitatea sunetului.

#### Distorsiunile în Amplificatoare

Factorul de Distorsiune: Caracterizează modul în care circuitul modifică semnalul. Cu cât distorsiunile sunt mai mici, cu atât semnalul de ieșire este mai fidel formei de undă a semnalului de intrare, indicând o fidelitate mai mare a amplificatorului.

## 2.3 Circuite cu tranzistoare bipolare

Tranzistorul în montaj de amplificator de putere (și de tensiune și de curent)

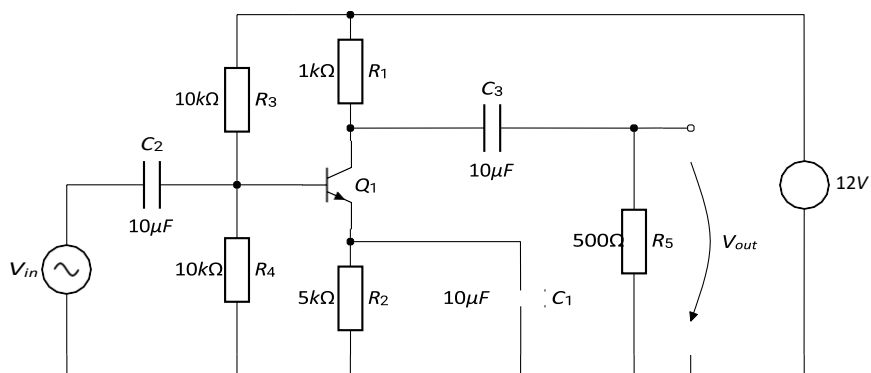


Figura 13: Circuitul complet pentru conexiunea Emitor Comun

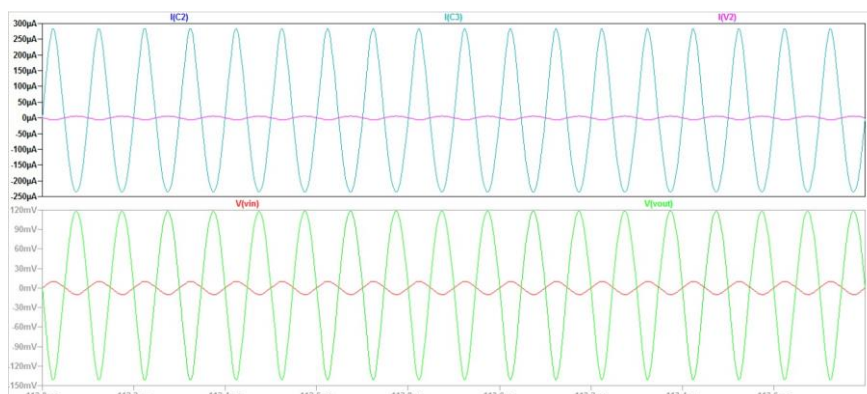


Figura 14: Graficele curentului de intrare -  $I(V2)$  și a curentului de ieșire -  $I(C3)$  precum și a tensiunii de intrare  $V(vin)$  și a tensiunii de ieșire  $V(vout)$

## Tranzistorul bipolar utilizat ca repetor de tensiune

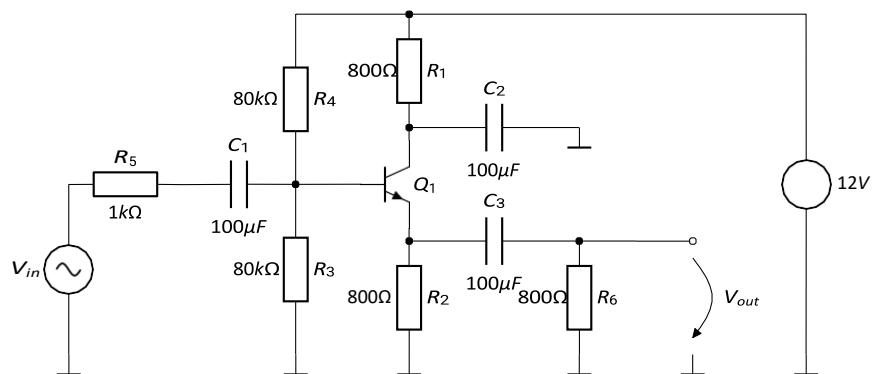


Figura 15: Schema montajului Repetor pe Emitor - Colector la masă

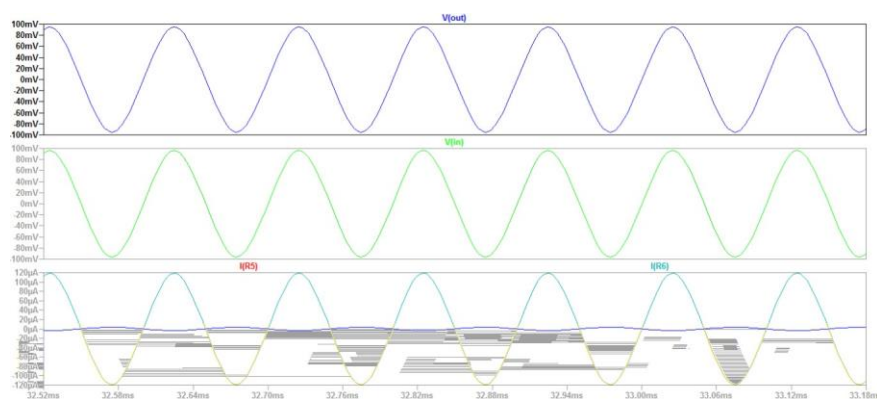


Figura 16: Comparație între tensiunea de intrare și ieșire precum și a curenților de intrare  $I(R5)$  și de ieșire  $I(R6)$

Analizând formele de undă ale tensiunilor de intrare și ieșire observăm că amplitudinea semnalului de ieșire este aproximativ egală cu cea a semnalului de la intrare, iar cele două semnale sunt în fază. Datorită faptului că montajul Colector la masă **repetă** semnalul, el se mai numește **Repetor pe emitor**.

Putem observa în schimb că, deși amplificarea în tensiune este unitară, montajul este caracterizat prin amplificarea în curent. El este utilizat în montaje unde sursa de semnal nu poate furniza curenți mari (microamperi) iar la ieșire semnalul furnizat poate susține curenți de zeci sau sute de ori mai mari.

### 3 Desfășurarea lucrării

În cadrul acestui laborator am construit un amplificator audio format din 2 etaje de amplificare, fără buclă de reglaj (intrarea nu "știe" cum variază ieșirea).

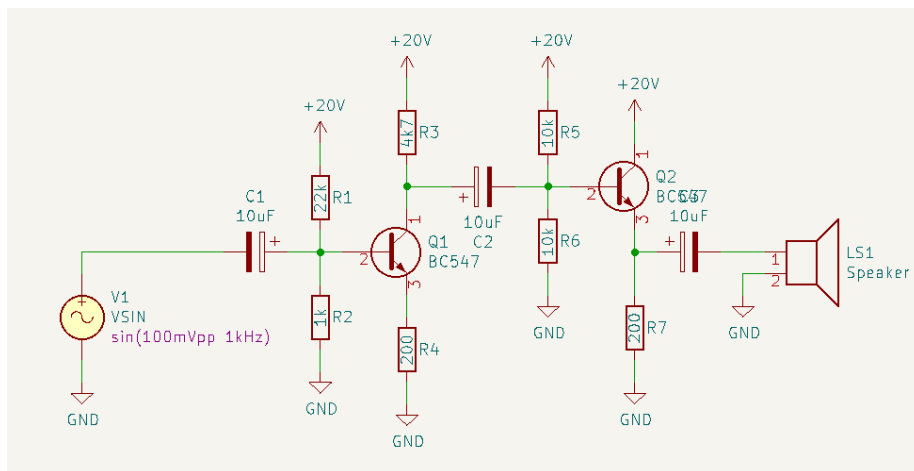


Figura 20: Schema completă a montajului de laborator de amplificator audio

Concluzii: primul etaj amplifica atât tensiunea cât și curentul, pe când cel de-al doilea etaj amplifică doar curentul.

