

Laboratorul 3.

Tranzistorul bipolar.

1 Scopul lucrării

Măsurarea performanțelor amplificatoarelor elementare realizate cu tranzistoare bipolare în două dintre cele trei conexiuni fundamentale (emitor la masă, colector la masă), precum și ale amplificatorului cu sarcină distribuită.

2 Noțiuni teoretice

2.1 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 semnalul direct de la alimentare, pastrând 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.

f Tensiunea dintre două potențiale este indicată de un dublu indice:

- U_{BE} pentru tensiunea bază-emitor;
- U_{CE} pentru tensiunea colector-emitor, etc.

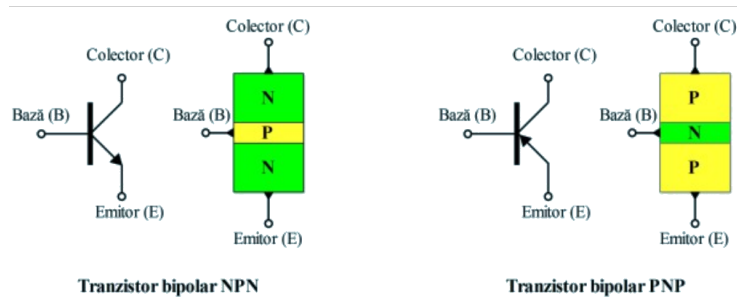


Figura 1: Simbolul și structura tranzistorului bipolar

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 ($I_E \cdot U_{CE}$), temperatura de funcționare, etc;
4. Dacă primele 3 reguli sunt respectate, I_C este direct proporțional cu I_B și poate fi scris sub forma:

$$I_C = h_{fe} \cdot I_B = \beta I_B \quad (1)$$

unde h_{fe} este amplificarea de curent (în general, de ordinul sutelor). Atât I_C cât și I_E circulă înspre emitor.

Observație: Curentul de colector I_C , nu se datorează polarizării directe a "diodelor" bază-colector, ci altor fenomene specifice tranzistorului. Joncțiunea bază-colector se află în conducție inversă.

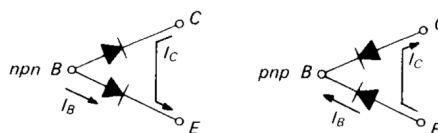


Figura 2: Tranzistorul măsurat folosind un multimetru setat pe modul "tester de diodă"

Ultima regulă ne arată și utilitatea tranzistorului: un curent mic aplicat în bază poate controla un curent mult mai mare care circulă prin colector!

Observație: h_{fe} nu este un parametru în jurul căruia am vrea să construim un circuit (adică un circuit care se bazează pe o anumită valoare a lui h_{fe}). El variază odată cu temperatura, curentul de colector I_C , și cu tensiunea colector-emitor U_{CE} (direct proporțional).

În concluzie:

- tranzistorul bipolar este un element de circuit, activ, cu 3 terminale: Bază, Emitor și Colector.
- Prin construcția sa fizică, el amplifică curentul din bază, curentul comandat (amplificat) fiind cel din Colector, curentul de comandă fiind cel din Bază.
- Montajele cu tranzistor le putem privi ca un cuadripol, de tip black box care au **o intrare și o ieșire** și care, în funcție de semnalul aplicat pe intrare, generează un semnal de ieșire de amplitudine mai mare, sau mai mică, în fază sau în antifază cu intrarea.

Datorită regulii 2 nu putem aplica o tensiune mare între bază și emitor deoarece dacă valoarea tensiunii din bază este mai mare cu mai mult de $0.6V - 0.8V$ decât cea din emitor, curentul crește semnificativ și poate fi depășit ușor pragul de curent maxim (ceea ce duce la distrugerea tranzistorului). De aceea, considerăm că în cazul unui tranzistor care funcționează normal $V_B \approx V_E + 0.6V$. Rezultă:

$$V_B = V_E + U_{BE} \quad (2)$$

Impedanța (Z)

Circuitele care conțin condensatoare și bobine sunt mai complicate decât cele care conțin doar rezistențe deoarece condensatorul și bobina sunt componente reactive (adică comportamentul lor este dependent de frecvență). Cu toate acestea, ele sunt elemente liniare.

Ieșirea unui circuit liniar (adică format doar din componente liniare precum: rezistențe, condensatoare, bobine și amplificatoare liniare) la intrarea căruia aplicăm un semnal sinusoidal este tot un semnal sinusoidal (își păstrează forma de undă), de aceeași frecvență. (ideal) Semnalul de ieșire poate să difere față de semnalul de la intrare din punct de vedere al amplitudinii și al fazei (poate fi defazat față de semnalul de la intrare).

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

$$I = \frac{U}{Z} \quad (3)$$

unde U este tensiunea printr-un circuit de impedanță Z , pentru un curent I .

Puteți privi impedanța ca o "rezistență generalizată"; rezistorii au rezistență electrică, condensatoarele și bobinele au reactanță. Cu alte cuvinte:

impedanța = rezistența + reactanță.

Putem, astfel, să folosim termenul impedanță când vorbim doar de rezistențe sau doar de condensatoare deoarece le include pe amândouă (rezistență și reactanță).

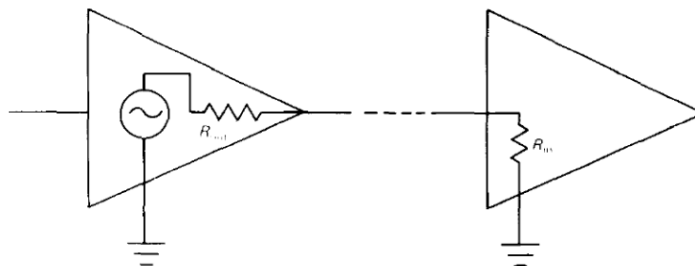


Figura 3: Etaje/blocuri într-un circuit care au impedanțe de intrare și de ieșire

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.

Pentru a înțelege de ce este corectă afirmația de mai sus trebuie să ne întoarcem la sursele de tensiune. Fie divizorul de tensiune din Figura 4a. Acesta poate fi echivalat conform teoremei lui Thevenin cu o singură sursă de tensiune în serie cu o rezistență, pe care o considerăm rezistența internă a sursei Thevenin (Figura 4b).

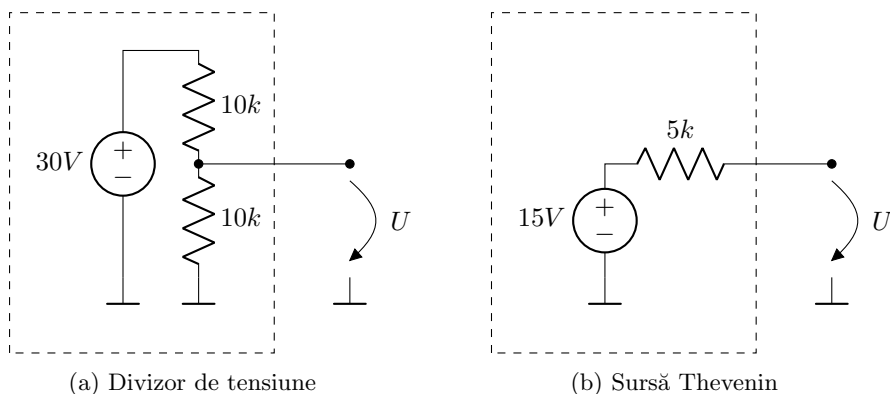


Figura 4: Divizor de tensiune echivalat cu Thevenin

Dacă conectăm o sarcină la ieșirea sursei echivalate Thevenin, tensiunea de ieșire va scădea considerabil (amintiți-vă exercițiul, de la prima lucrare, cu sursa de tensiune din care trăgeam curent printr-o rezistență de sarcină). Acest lucru se datorează rezistenței interne foarte mari a sursei Thevenin ($5k\Omega$).

Ce ne dorim să obținem este o sursă ideală de tensiune, la care ieșirea nu se modifică indiferent de curentul tras de sarcină. Știm că o astfel de sursă are rezistența internă 0. Deci, ar trebui și ca rezistența internă a sursei noastre Thevenin să fie cât mai mică. Dacă înlocuim termenul "rezistență" cu "impedanță" rezultă că **impedanța de ieșire trebuie să fie cât mai mică**.

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.

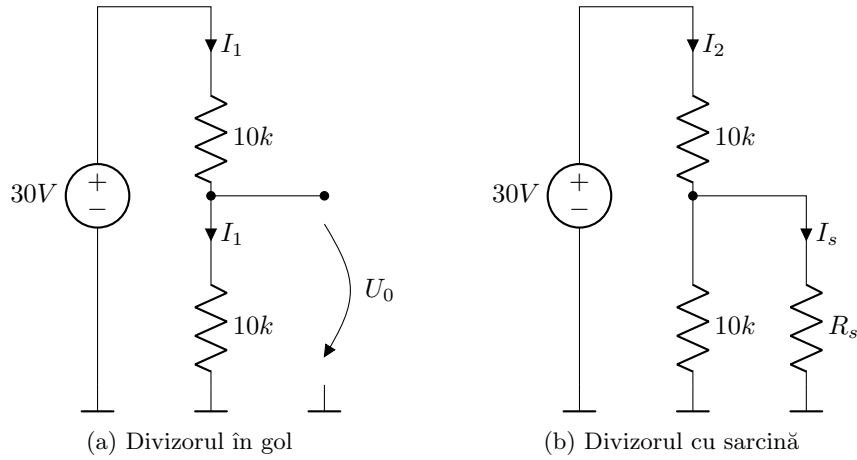


Figura 5: Divizorul de tensiune

Observație: Putem explica deteriorarea tensiunii la ieșirea sursei Thevenin folosind schema divizorului de tensiune. Știm că în demonstrarea formulei divizorului de tensiune presupunem că nu avem nicio sarcină la ieșirea divizorului (Figura 5a), de unde rezultă curentul prin rezistențele de $10k\Omega$:

$$I_1 = \frac{30V}{10k\Omega + 10k\Omega} \quad (4)$$

Dacă conectăm o sarcină, curentul prin rezistențele de $10k\Omega$ nu va mai fi cel din formula 4, deoarece va trece curent și prin sarcină. Adică va fi egal cu:

$$I_2 = \frac{30V}{10k\Omega + 10k\Omega || R_{sarcina}} \quad (5)$$

Adică valoarea tensiunii la ieșire va depinde de valoarea curentului prin rezistența de jos (cea în paralel cu R_s). Curentul prin ea va fi egal cu $I_2 - I_1$, adică ne dorim ca I_s să fie cât mai mic. Acest lucru înseamnă o rezistență de sarcină cât mai mare. **Rezultă că impedanța de intrare a următorului etaj trebuie să fie cât mai mare pentru a nu influența (degrada) semnalul de la ieșirea etajului anterior (adică să tragă cât mai puțin curent).**

2.2 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 - impedanța de ieșire a generatorului de semnal - utilizată pentru a modela un generator neideal;
- Z_i - impedanța de intrare a amplificatorului;
- u_o - tensiunea de ieșire generată de amplificator, înainte de Z_o ;
- Z_o - impedanța de ieșire a amplificatorului;
- Z_s - impedanța de sarcină (în general un amplificator va avea conectată pe ieșire o sarcină; exemplu: o boxă audio, în cazul unui amplificator audio).

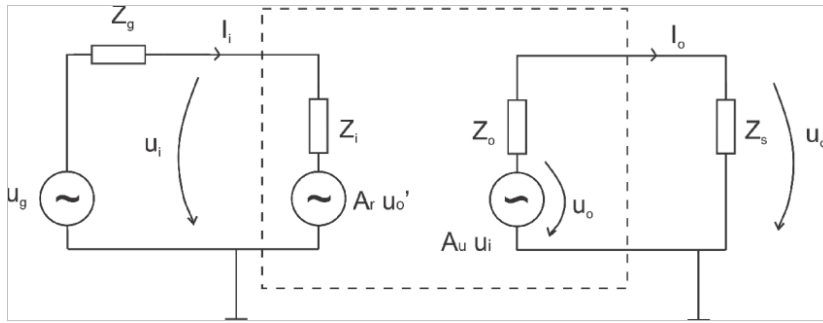


Figura 6: Modelul general pentru un amplificator electronic

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, $Z_o = 0$.

Montaje fundamentale

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:

$$\frac{U_o}{U_i} \quad (8)$$

(pentru Z_s dat);

- amplificarea de curent:

$$\frac{I_o}{I_i} \quad (9)$$

(pentru Z_s dat);

- impedanța de intrare:

$$\frac{U_i}{I_i} \quad (10)$$

(pentru Z_s dat) ;

- impedanța de ieșire:

$$\frac{U_o}{I_o} \quad (11)$$

(pentru Z_g dat).

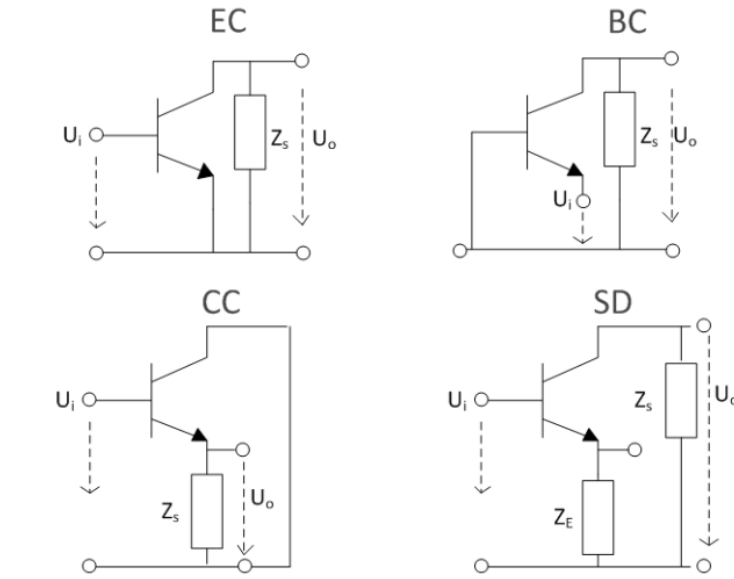


Figura 7: Conexiunile fundamentale ale tranzistorului bipolar (scheme de principiu)

Parametrii tranzistorului bipolar în regim dinamic

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

$$u_{be} = h_i i_b + h_r u_{ce} \quad (12)$$

$$i_c = h_f i_b + h_o u_{ce} \quad (13)$$

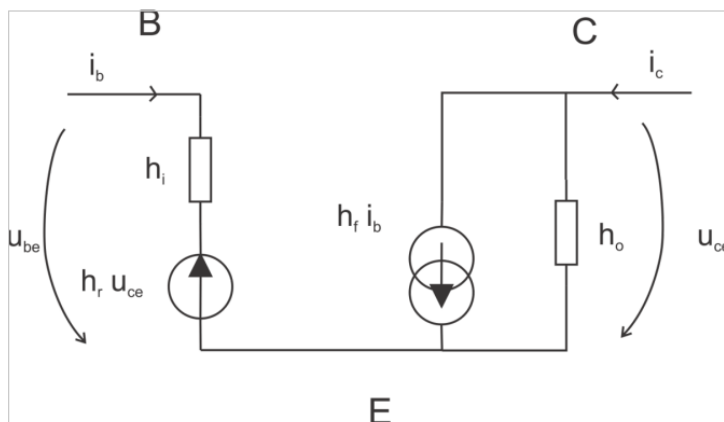


Figura 8: Modelul TBIP cu parametri hibrizi

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.

Punctul Static de Funcționare (PSF) și importanța acestuia Este important de reținut faptul că montajele cu amplificatoare pe care le vom avea în vedere la acest laborator sunt utilizate în regim dinamic. Inițial, când montajele sunt alimentate în curent continuu. Peste acest regim de curent continuu, aplicăm o variație la intrare (semnal de intrare/comandă) și obținem un semnal la ieșire (amplificat față de intrare în tensiune și/sau curent). Totuși, trebuie să ne punem problema cum alegem acest punct static de funcționare. În circuitul următor (Figura 9) vom poziționa tranzistorul într-un circuit de c.c. cu o rezistență în colector și una în emitor, și vom aplica o tensiune în bază, față de masă. Vom analiza cum se comportă tensiunea U_{CE} , parametrul de ieșire, comparativ cu tensiunea aplicată la intrare (U_i).

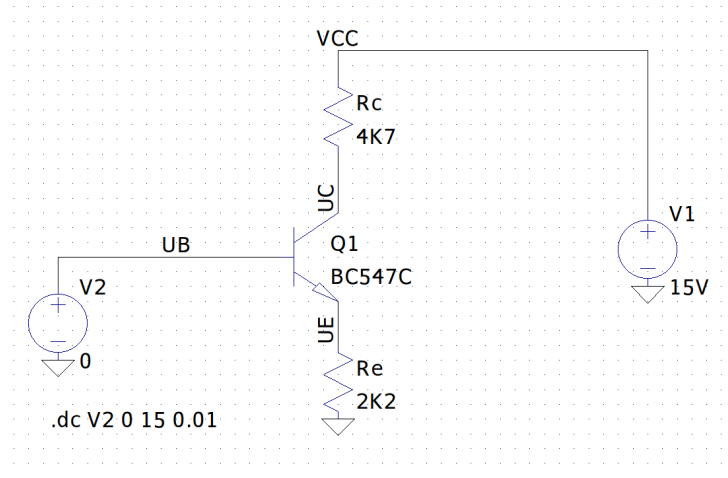


Figura 9: Montajul de polarizare și determinare a caracteristicii de transfer în c.c.

Observăm în graficul(Figura22) ce ne arată caracteristica de transfer faptul că de la o anumită limită a lui U_i tranzistorul intră în conducție, curentul pe ieșire (I_C) crește, și U_{CE} scade (tensiunea se pierde pe R_C și pe R_E). De la o anumită limită a lui U_i tensiunea pe ieșire rămâne constantă, apropiată de 0.

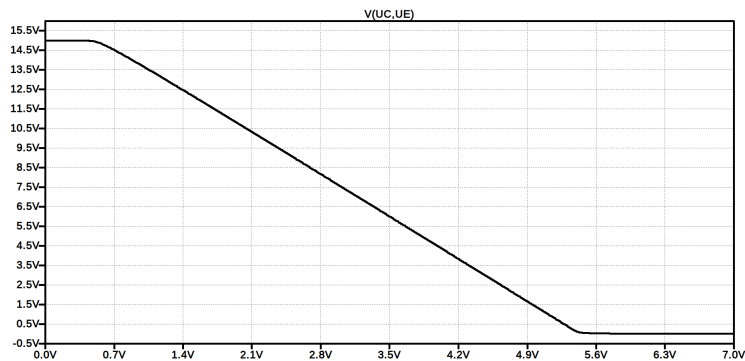


Figura 10: Caracteristica U_{CE} (U_i)

Așadar, având în vedere faptul că am dori să folosim amplificatorul pentru o gamă cât mai mare (o variație cât mai mare) a lui U_i , și că pentru această gamă de variație a intrării ne dorim un comportament cât mai liniar, punctul static de funcționare optim ar fi situat la mijlocul pantei descrescătoare de pe grafic (pentru o variație simetrică a intrării în jurul PSF). El va fi realizat folosind un divizor de tensiune ce va comanda tensiunea din bază, cu rezistențe alese astfel încât să obținem în bază tensiunea optimă. Altfel spus, alegem o tensiune ce va fi aplicată în bază astfel încât $U_{CE} = \frac{V_{CC}}{2}$, adică U_{CE} să poată varia cât se poate de mult.

Circuitul de polarizare utilizat pentru montajul din această lucrare, ce va avea o influență directă asupra parametrilor, este prezentat în Figura 11.

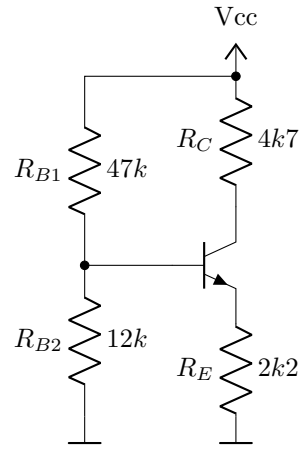


Figura 11: Schema de polarizare utilizată pentru lucrarea de laborator

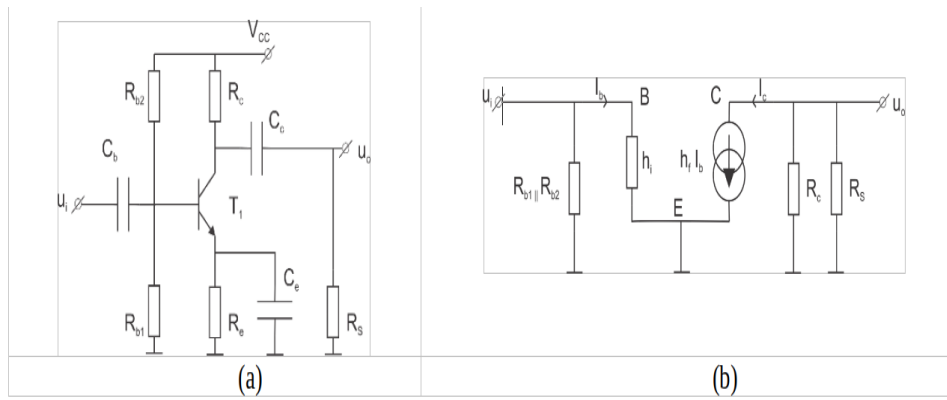


Figura 12: Schema completă pentru conexiunea emitor comun, inclusiv schema de polarizare (a), respectiv schema echivalentă în regim dinamic (b), utilizând modelul cu parametri h simplificat

În relațiile de calcul, date în Tabelul 1:

- Z_s reprezintă impedanța de sarcină;
- Z_g reprezintă impedanța generatorului de semnal;
- R_B reprezintă notația folosită pentru $R_{B1} \parallel R_{B2}$

Pentru determinarea amplificării de tensiune, a amplificării de curent și a impedanței de intrare se folosește schema de măsurare din Figura 13, în care mărimile ce pot fi măsurate direct sunt tensiunile U_g , U_i , U_o .

| | EC | BC | CM | SD |
|-------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|----------------------------------|
| A_u | $-\frac{h_f}{h_i} R_C \parallel Z_S$ | $\frac{(R_C \parallel Z_S) h_f}{h_i}$ | ≈ 1 | $-\frac{R_C \parallel Z_S}{R_E}$ |
| A_i | $\approx h_f$ | ≈ -1 | $\approx -h_f$ | $\approx h_f$ |
| Z_i | $\approx h_i$ | $\approx \frac{h_i}{h_f}$ | $R_B \parallel (h_i + (R_E \parallel R_S) h_f)$ | $R_B \parallel (h_i + R_E h_f)$ |
| Z_o | $\approx R_C$ | $\approx R_C$ | $R_E \parallel (\frac{R_B + h_i}{h_f})$ | $\approx R_C$ |

Tabela 1: Aproximații pentru A_u , A_i , Z_i , Z_o , utilizând modelul simplificat și considerând schema de polarizare

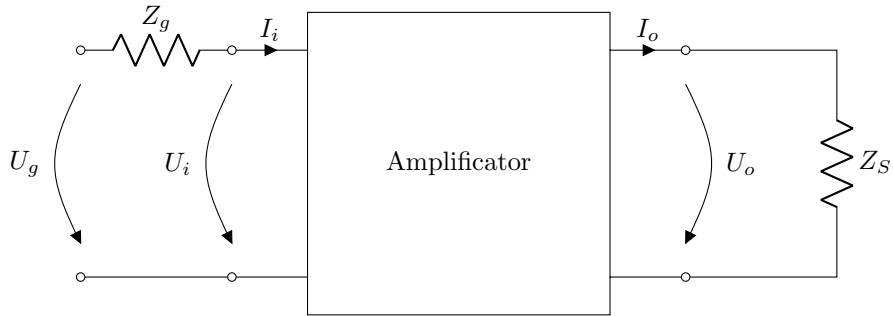


Figura 13: Schema pentru determinarea A_u , A_i , Z_i

Se deduc ușor relațiile:

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \quad (14)$$

$$A_i = \frac{U_o}{U_g - U_i} \frac{Z_g}{Z_s} \quad (15)$$

$$Z_i = \frac{U_i}{U_g - U_i} Z_g \quad (16)$$

Impedanța de ieșire

Pentru măsurarea impedanței de ieșire se folosește schema de măsură din Figura 14, în care este rezistența de ieșire a generatorului de semnal.

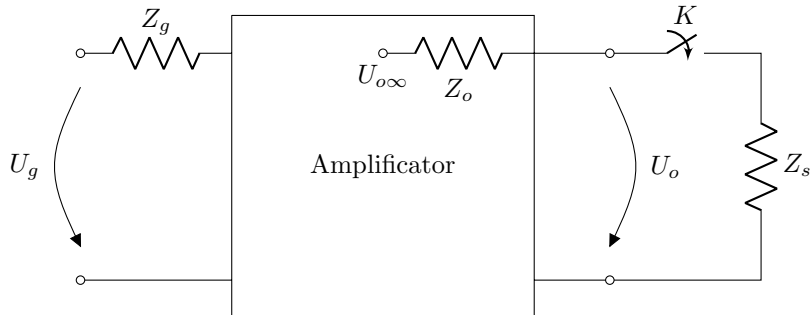


Figura 14: Schema pentru măsurarea impedanței de ieșire

$$Z_o = \frac{U_{o\infty} - U_o}{\frac{U_o}{Z_s}} \quad (17)$$

$$Z_o = Z_s \left(\frac{U_{o\infty}}{U_o} - 1 \right) \quad (18)$$

Unde:

- $U_{o\infty}$ este tensiunea de ieșire în gol ($Z_s \rightarrow \infty$);
- U_o este aceeași tensiune de ieșire, măsurată cu rezistența de sarcină Z_s (ambele pentru aceeași tensiune de intrare U_g).

De remarcat, conform Tabelului 1, faptul că impedanța de ieșire (Z_{out}) este puternic dependentă de valorile rezistențelor din circuitul de polarizare.

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

- În circuitele electronice importanța amplificărilor în circuit este puternic dependentă de tipul aplicației. De exemplu în cazul aparatelor care amplifică un semnal de amplitudine de ordinul milivolților - aparate de electrocardiogramă (EKG), electroencefalogramă (EEG), citirea semnalelor de la termocuple, etc - în scopul vizualizării și analizei semnalului de la intrare **ne interesează amplificarea în tensiune**. Întrucât ieșirea este utilizată de către un bloc de măsură (curentul absorbit de acesta este maximum de ordinul miliamperilor), amplificarea de putere nu este relevantă pentru acest exemplu. Următorul **parametru important este impedanța de intrare**, care trebuie să fie cât mai mare posibil (de ordinul $M\Omega$ / $G\Omega$) pentru a nu afecta calitatea semnalelor.
- În cazul circuitelor în care o ieșire de semnal - sau o referință de tensiune - (care nu este proiectată să mențină tensiunea constantă la ieșire pentru curenți mai mari de ordinul miliamperilor) trebuie utilizată de către un circuit cu o impedanță de intrare mică (de ordinul zecilor sau sutelor de Ω), care ar consuma curenți de zeci de miliamperi din sursa de semnal, se utilizează amplificatoare repetitoare, unde parametrii de interes sunt **amplificarea de curent și impedanța de intrare**. Amplificatorul de curent, numit și **repetor de tensiune**, are amplificarea în tensiune unitară, adică repetă tensiunea de la intrare, asigurând o impedanță mare la intrare, ceea ce permite minimizarea curentului absorbit de la sursa de comandă. Circuitul repetor furnizează pe ieșire un semnal de amplitudine aproximativ egală cu cel de la intrare, în fază și asigură o impedanță mică a ieșirii.
- În **circuitele unde semnalul de intrare trebuie amplificat atât în tensiune, cât și în curent** - e.g. amplificatoarele audio care folosesc un semnal de intrare de ordinul sutelor de milivolți, îl amplifică, obținând la ieșire tensiuni de ordinul zecilor de volți și curenți de ordinul amperilor sau zecilor de amperi - este importantă **atât amplificarea în tensiune, cât și cea în curent**, precum și **cea de putere**. Este necesar impedanța de intrare să fie mare, și cea de ieșire mică.

O alta caracteristică importantă a amplificatoarelor o reprezintă **distorsiunile** (factorul de distorsiune) care ne oferă detalii legate de modificările introduse de circuit asupra semnalului. Cu cât distorsiunile sunt mai mici, cu atât semnalul de la ieșire este mai asemănător cu cel de la intrare din punct de vedere al formei de undă (amplificatorul are o fidelitate mai mare).

2.3 Circuite cu tranzistoare bipolare

Tranzistorul bipolar folosit ca întrerupător

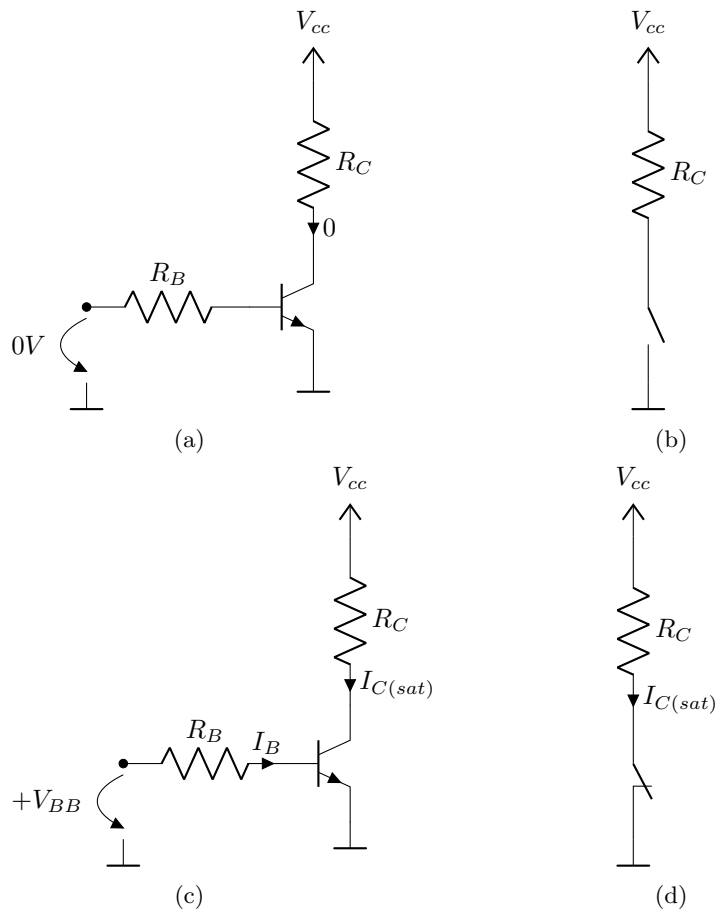


Figura 15: Tranzistor blocat vs Tranzistor saturat

Pe lângă regimul de funcționare în care tranzistorul se comportă (pseudo)liniar pentru semnale mici din punct de vedere al dependenței curentului de ieșire față de cel de intrare, în multe aplicații (simple, dar des utilizate), tranzistorul este folosit în regim de saturație (o explicație simplistă a regimului ar fi că nu mai poate crește curentul de colector dacă este crescut în continuare curentul din bază), rolul acestuia fiind de comutator închis. Când tensiunea din bază este mică (apropiată de 0V) tranzistorul este blocat și el nu conduce curent, comportându-se asemănător unui întrerupător deschis.

Tranzistorul bipolar folosit ca întrerupător - amplificator de curent - senzor de atingere

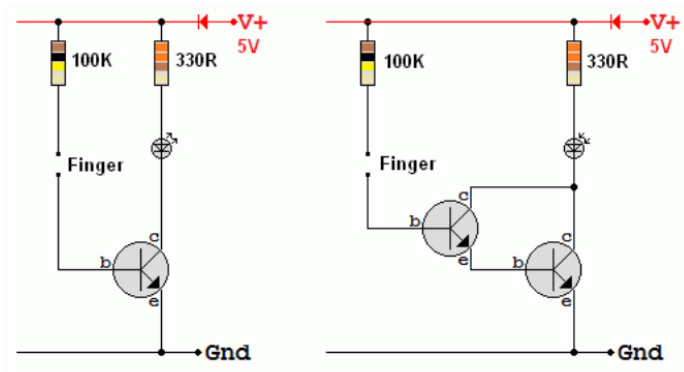


Figura 16: Circuite de realizare a întrerupătorului electronic declanșat prin atingere

În diferite dispozitive electronice tranzistorul este utilizat cu rolul de senzor de atingere. În momentul în care o persoană atinge cele 2 contacte din dreptul marcajului "Finger" rezistența degetului (de obicei de ordinul sutelor de $k\Omega$ sau de ordinul $M\Omega$) conduce curentul de la linia V+ de alimentare către baza tranzistorului. Acesta amplifică curentul și LED-ul se aprinde. În circuitul din dreapta este utilizat tranzistorul compus Darlington a cărui amplificare în curent este mai mare decât în cazul folosirii unui singur tranzistor. În acest caz curentul este amplificat cu o valoare mai mare, astfel că, și pentru rezistențe mari la atingere, LED-ul se aprinde puternic. Circuitul poate fi folosit, de asemenea și pentru a semnaliza atingerea către microprocesoare.

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

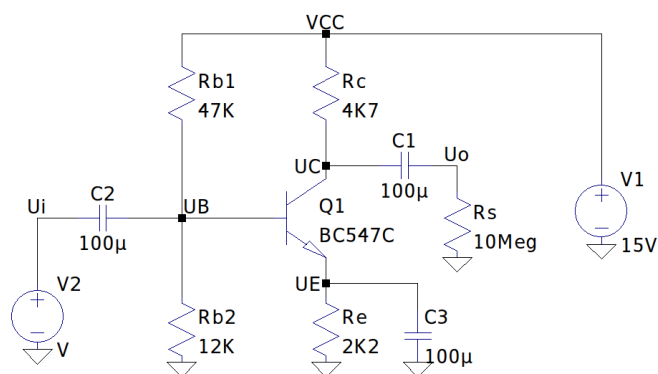


Figura 17: Montajul pentru Emitter Comun (Emitter la Masă)

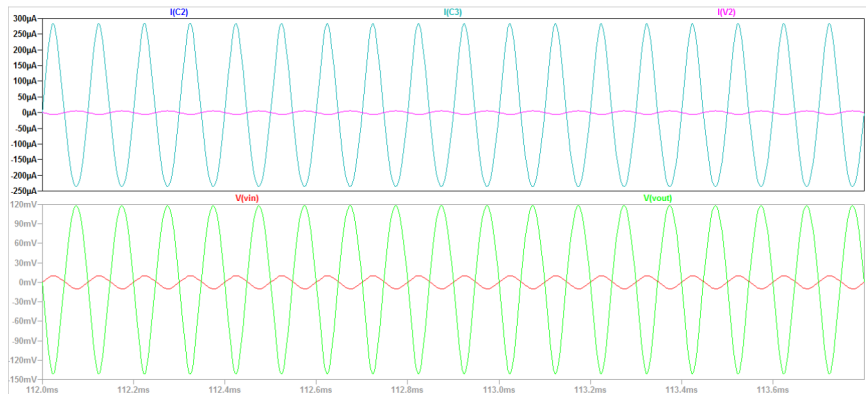


Figura 18: Graficele curentului de intrare - $I(C2)$ și a curentului de ieșire - $I(C3)$ precum și a tensiunii de intrare $V(vin)$ și a tensiunii de ieșire $V(vout)$

Amplificatorul realizat folosind conexiunea Emitor Comun este un amplificator puternic dependent de tensiunea de alimentare și dependent și de factorul de amplificare h_{fe} al tranzistorului. O schemă similară, care utilizează o rezistență de degenerare a emitorului elimină aceste neajunsuri și ne asigură o amplificare mai predictibilă, tolerantă la variații ale alimentării și la modificarea parametrilor tranzistorului. Această schemă nu are cuplat emitorul la masă (în regim alternativ) ci se folosește și de rezistența din emitor, atât în CC cât și în regim variabil. Conexiunea se numește *Sarcină Distribuită* și este reprezentată în figura 19.

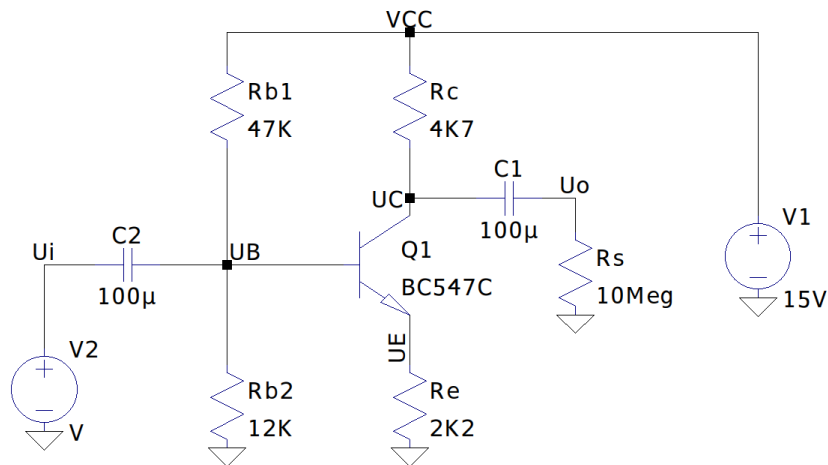


Figura 19: Montajul complet (regim continuu + alternativ) pentru conexiunea Sarcină Distribuită

Tranzistorul bipolar utilizat ca repeto de tensiune

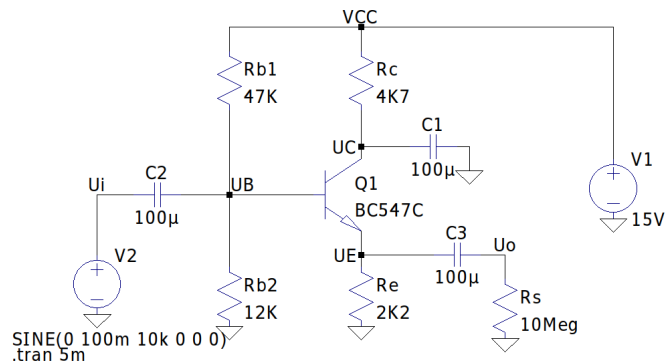


Figura 20: Schema montajului Repeto pe Emitter - Colector la masă

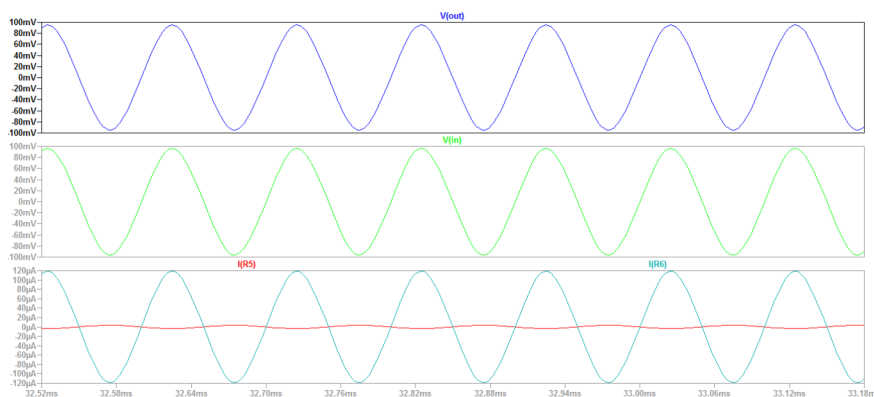


Figura 21: Comparație între tensiunea de intrare și ieșire precum și a curenților de intrare $I(R5)$ și de ieșire $I(R6)$

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 veți studia, folosind simulatorul LTSpice comportamentul cantitativ și calitativ al montajelor realizate cu tranzistoare bipolare:

- Emitter Comun (Emitter la masă) - EC
- Sarcină Distribuită - SD (EC cu rezistență de degenerare în emitor)
- Colector Comun (Repetor pe emitor) - CC.

3.1 Determinarea punctelor statice de funcționare (PSF)

Implementați în simulator schema pentru polarizare în curent continuu pentru un tranzistor de tip NPN. Folosind acest circuit fixăm un **Punct Static de Funcționare** pentru tranzistor. Utilizați valorile rezistențelor pentru montaj (valori din Figura 11). Tranzistorul utilizat în cadrul montajului va fi BC547C.

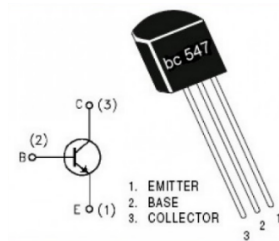


Figura 22: Identificarea pinilor pentru BC547

Observație: Ca montajul cu tranzistor să poată să amplifice tensiunea și curentul, el trebuie să aibă de unde să ia energie electrică pentru acest lucru. De aceea, orice montaj de amplificator trebuie alimentat în curent continuu. Alimentarea în curent continuu va stabili un punct static de funcționare în jurul căruia montajul va funcționa. Punctul static de funcționare se alege astfel încât, în caracteristica de transfer, acesta să se afle în zona de liniaritate (sau în zona cât mai liniară a ei).

Dorim observarea comportării tranzistorului ca amplificator în diferite montaje elementare și influența punctului static de funcționare asupra caracteristicilor amplificatorului. Pentru aceasta se măsoară amplitudinea semnalelor de intrare (U_i), de ieșire (U_o) și din generatorul de semnal (U_g) și se calculează amplificările de tensiune (A_u), de curent (A_i), impedanța de intrare (Z_i) și impedanța de ieșire (Z_o) pentru fiecare dintre cele trei conexiuni fundamentale.

Se determină, întâi două puncte statice de funcționare, pentru cazurile $V_{CC} = 15V$ și $V_{CC} = 30V$.

În acest scop veți măsura diferența de potențial între bornele C și E , și curentul prin rezistența R_C , în scopul determinării I_C .

(a) Măsurați parametrii tranzistorului în punctele statice de funcționare:

- tensiunea colector-emitor (U_{CE}) și

- curentul prin colector (I_C).
- (b) Comparați tensiunea colector-emitor (U_{CE}) cu V_{CC} (raportul V_{CC}/U_{CE}) în ambele cazuri. Ce observați? Este acest punct de funcționare aproape de valoarea optimă? Care ar fi aceasta, în relație cu V_{CC} ? Motivați răspunsul în maximum 2 rânduri.
- (c) Pentru cazul $V_{CC} = 15V$ înlocuiți modelul tranzistorizat utilizat (click dreapta → Pick New Transistor) cu alt model al unui tranzistor de semnal mic (ex: 2N2222, 2N3904, BC847B). Se modifică raportul V_{CC}/U_{CE} cu mai mult de 10%?

3.2 Studiarea comportamentului în regim dinamic - EC, SD, CC.

Calcularea impedanțelor, măsurarea tensiunilor și a curenților: Măsurati tensiunile și curenții în același mod (fie Vârf la Vârf, fie valoare la Vârf, fie valoare eficace). Este recomandat să măsurati toți parametrii în valoare eficace (RMS) sau valoare la vârf. Impedanța de intrare se va determina folosind formula

$$Z_i = \frac{U_i}{I_i} \quad (19)$$

unde U_i și I_i sunt valorile tensiunii generatorului de semnal și a intensității curentului electric prin acesta. Impedanța de ieșire va fi determinată folosind

$$Z_o = \frac{U_{o\infty} - U_o}{\frac{U_o}{Z_s}} \quad (20)$$

unde $U_{o\infty}$ este tensiunea de pe sarcină în cazul sarcinii foarte mari (mers în gol), U_o este tensiunea pe sarcină la o valoare de ordinul $10K\Omega$, Z_s este valoarea sarcinii utilizate.

Pentru a măsura valoarea RMS a unui parametru măsurat într-o simulare de tip transient dați click după ce ați simulat circuitul pe punctul unde doriți să măsurati tensiunea/curentul (tensiunile se măsoara implicit față de GND) pentru a reprezenta pe grafic acel parametru. Apoi, ținând tasta CTRL Left apăsată dați click pe numele din grafic al parametrului a cărui valoare RMS o doriți, și va fi deschisă o fereastră ce vă va afișa acea valoare.

Dacă alegeți să calculați impedanțele folosind valorile la vârf, utilizați valorile în modul.

În cadrul următoarelor exerciții puteți fie să modificați schema anterioară și să adăugați componentele necesare, conectându-le corespunzător, fie să utilizați fișierele puse la dispoziție pe platforma de curs: `emitor_comun.asc`, `colector_comun.asc`, `sarcina_distribuita.asc`

Pentru exercițiile de determinare a parametrilor de regim dinamic, realizați, pe rând, montajele pentru emitor comun, sarcină distribuită și colector comun (sau deschideți schemele corespunzătoare din fișierele puse la dispoziție).

Pentru cuplarea regimului alternativ cu regimul continuu în care se afla tranzistorul, în scheme sunt utilizate condensatoare *de cuplaj* ale căror valori

sunt alese astfel încât acestea să permită trecerea regimului alternativ, comportându-se la frecvența de lucru ca o impedanță mică.

3.2.1 Conexiunea Emitor Comun și Sarcină Distribuită

Pentru conexiunea Emitor Comun, se aduce tranzistorul în fiecare dintre cele două puncte statice de funcționare ($V_{CC} = 15V$ și $V_{CC} = 30V$) apoi se măsoară parametrii intrărilor și ai ieșirilor.

Amplitudinea semnalului U_i se setează, pentru ambele cazuri, la $1mV$ pentru EC, SD. Frecvența semnalului de intrare va fi setată la $10kHz$.

Pentru fiecare dintre acestea măsoarăți amplitudinile semnalelor (curent și tensiune):

- de intrare(U_i),
- de ieșire ($U_{o\infty}$), la mersul în gol (cu sarcină de $10M\Omega$ (10Meg)),
- de ieșire cu sarcină de $10K\Omega$.

Calculați amplificările de tensiune ($A_{U\infty}$), de curent (A_I), impedanța de intrare (Z_i) și impedanța de ieșire (Z_o) **pentru conexiunile EC și SD.**

- Pentru $V_{CC} = 15V$, și $V_{CC} = 30V$, cu ieșirea în gol (rezistența de sarcină foarte mare), comparați cum se modifică tensiunea de ieșire ($U_{o\infty}$) pentru două tensiuni de alimentare.
- Observați diferența de fază între intrare și ieșire. Când tensiunea de la intrare se află la valoarea pozitivă maximă, cum este tensiunea de la ieșire (pozitivă sau negativă)?
- Care dintre aceste două montaje este mai stabil (mai puțin influențat) în raport cu variația tensiunii de alimentare? Cum se corelează observațiile cu formulele din Tabelul 1?

3.2.2 Conexiunea Colector Comun (Repetor pe Emitor)

Pentru conexiunea Colector Comun, se aduce tranzistorul în fiecare dintre cele două puncte statice de funcționare ($V_{CC} = 15V$ și $V_{CC} = 30V$) apoi se măsoară parametrii intrărilor și ai ieșirilor.

Amplitudinea semnalului U_g se setează, la $0.1V$. Frecvența semnalului de intrare va fi setată la $10kHz$.

Pentru fiecare dintre aceste tensiuni de alimentare măsoarăți amplitudinile semnalelor(curent și tensiune):

- de intrare(U_i),
- de ieșire ($U_{o\infty}$), la mersul în gol (cu sarcină de $10M\Omega$ (10Meg)),
- de ieșire cu sarcină de $10K\Omega$.

Calculați amplificările de tensiune ($A_{U\infty}$), de curent (A_I), impedanța de intrare (Z_i) și impedanța de ieșire (Z_o) **pentru conexiunea CC.**

- Comparați amplificarea de tensiune pentru cele două valori de tensiune de alimentare cu amplificarea de tensiune din montajul CC. Ce observați? Motivați de ce această conexiune mai este denumită și Repetor pe Emitor (Emitter Follower).

3.2.3 Construcția amplificatoarelor - scheme de principiu

Propuneți o schemă (completă sau la nivel bloc - ex. bloc de amplificator EC, CC, SD) din mai multe blocuri (de ex: un EC și un CC, ieșirea EC (care primește semnalul de intrare) este cuplată de intrarea în CC) care amplifică semnalul de intrare de 2 ori și care nu își modifică amplificarea pentru sarcini de 10K 100K și 500K. Ce bloc de amplificare alegeți pentru a putea genera curenții mai mari pe ieșire pentru sarcinile mici? Ce bloc alegeți pentru a amplifica semnalul? Motivați în 1-2 rânduri schema propusă.