

Universitatea Nationala de Stiinta si Tehnologie Politehnica din București
Facultatea de Electronică și Telecomunicații

Proiect Dispozitive și Circuite Electronice

Amplificator joasa tensiune (joasa frecventa)

Profesori coordonatori:
Conf.Dr.Ing. Draghici Florin
Sl.Dr.Ing. Pantazica Mihaela

Nume: Adamescu Andrei-Cosmin
Grupa: 433E

1. Tema proiectului

N=1

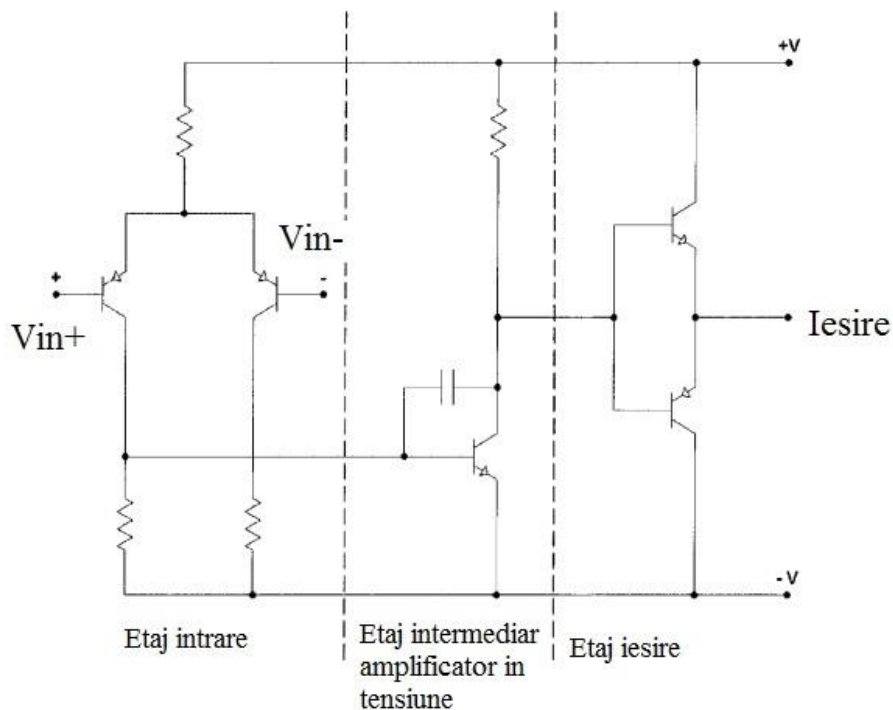
Tema 2 - Amplificator de tensiune (joasă frecvență)

Să se proiecteze și realizeze un **amplificator de tensiune (joasă frecvență)** având următoarele caracteristici:

- ◆ Semnal de intrare, u_i în gama: 50N [mV];
- ◆ Sarcina la ieșire, R_L : 5N [Ω];
- ◆ Rezistența de intrare $R_i > 0,1$ [M Ω];
- ◆ Rezistența de ieșire $R_o < 0,1$ N [Ω];
- ◆ Amplificare în tensiune, A_v : 10;
- ◆ Domeniul temperaturilor de funcționare: 0⁰-70⁰C (verificabil prin testare în temperatură);
- ◆ Semnalizarea prezenței tensiunilor de alimentare cu diodă de tip LED.

- Semnal de intrare $U_i=50$ [mV];
- Sarcina la iesire $R_L=5$ [Ω];
- $R_i>0,1$ [M Ω];
- $R_o<0,1$ [Ω];
- $A_v=10$;

2. Schema bloc



Amplificatorul utilizeaza o schema bloc de amplificator in clasa AB, aceasta este impartita in principal in doua sectiuni: partea intrare si semnal mic si partea de amplificare in tensiune. Aceasta impartire este realizata tocmai pentru a utiliza etaje specializate fie pentru a realiza amplificare in curent fie pentru a realiza o amplificare in tensiune.

Etajul de intrare are rolul de a realiza adaptarea de impedanta intre sursa de semnal si urmatorul etaj, adica o adaptare de la impedanta mare la impedanta mica.

Al doilea etaj are o amplificare foarte mare in bucla deschisa, de aceea este obligatoriu sa se utilizeze o bucla de reactie negativa pentru a reduce amplificarea la o valoare utila.

Cele doua etaje sunt conectate in cascada, din acest motiv factorii lor de amplificare se inmultesc, totusi primul etaj este responsabil pentru toata amplificarea in tensiune.

Pentru a tine fixa valoarea amplificarii, vom utiliza o retea de reactie negativa globala, acesta retea de reactie culege o fractiune din semnalul de la iesire si il intoare la intrare neinversoare pentru a inchide bucla.

Reteaua de reactie negativa reduce amplificarea la o valoare utilizabila dar in acelasi timp are si un rol important in ceea ce priveste stabilitatea amplificatorului si imunitatea sa la oscilatii.

3. Etajul de intrare

Rolul acestui amplificator este de a realiza atat o amplificare in tensiune cat si una in curent, din acest motiv se utilizeaza etaje dedicate pentru fiecare dintre aceste sarcini.

Etajul de intrare are ca rol principal realizarea unei adaptari intre sursa de semnal si amplificator dar acesta este in acelasi timp principalul etaj responsabil pentru rejectarea riplului sursei de alimentare deci cel care stabileste raportul semnal-zgomot.

Etajul diferential este cel mai performant tip de etaj utilizat la intrare, insa caracteristicile acestuia pot fi mult imbunatatite utilizand anumite elemente aditionale.

Etajul amplificator diferential este realizat in principal cu tranzistoarele Q_1 si Q_2 . Pentru a imbunatati performantele acestuia in ceea ce priveste stabilitatea, viteza, castigul si raportul semnal zgomot, vom utiliza alte etaje auxiliare (sursa de curent constant si oglinda de curent).

Tranzistoarele Q_1 si Q_2 sunt de tipul BC846, tranzistoare bipolare NPN in capsula SOT23 SMD. Sursa de curent constant furnizeaza aproximativ 1mA prin fiecare din tranzistoarele Q_1 si Q_2 iar tensiunea colector-emitor este mult mai mica decat valoarea maxima admisa, asadar acestea functioneaza fara risc de defectare.

Curentii prin etajul diferential respecta urmatoarea relatie:

$$I_{C1} + I_{C2} = I_{C5}$$

Rezistorul R_{20} este dimensionat astfel incat pe el sa se produca o cadere de tensiune de circa 0.6V astfel incat sa se deschida tranzistorul Q_6 ce formeaza urmatorul etaj de amplificare.

Pentru a echilibra caderea de tensiune pe care R_{20} o produce in colectorul lui Q_1 , am prevazut dioda $D1$ in colectorul lui Q_2 care va produce aceeasi cadere de tensiune, astfel functionarea etajului diferential nu este perturbata.

Sursa de curent constant realizata cu Q_5 , R_3 si are ca referinta de tensiune diodele $D2$ si $D3$. Aceasta sursa are rolul de a furniza un curent de valoare fixa prin etajul diferential indiferent de valoarea sarcinii sau a tensiunii de alimentare, astfel etajul de intrare este imun la variatiile tensiunii de alimentare.

Curentul prin Q_5 nu depinde de tensiunea de alimentare si se poate calcula dupa formula:

$$I_{C5} = (2 \cdot V_F - V_{BE}) / R_3 = 0,6 \text{mA}$$

In aceasta ecuatie tensiunea $2 \cdot V_F$ reprezinta caderea de tensiune pe cele doua diode 1N4148, acestea fiind polarizate in conductie prin intermediul rezistorului R_{22} .

4.Etajul amplificator in tensiune

Etajul emitor comun este una dintre cele mai utilizate configurații pentru tranzistoarele bipolare, oferind o amplificare în tensiune și servind adesea ca etaj de amplificare intermediar în circuitul unui amplificator.

Etajul pilot sau amplificator in tensiune este realizat cu tranzistorul Q6, acesta alcatuieste un etaj de tip emitor comun cu o amplificare foarte mare in tensiune si are ca sarcina un generatorul de curent constant realizat cu Q7.

Pentru funcționarea corectă a etajului emitor comun, tranzistorul trebuie să fie polarizat corespunzător astfel încât să opereze în regiunea activă. Acest lucru se realizează prin intermediul unor etaje auxiliare care determină curentul de bază și curentul de colector, stabilind astfel punctul de lucru al tranzistorului.

Pentru a putea furniza curentul necesar sarcinii, dorim un curent de macar 10mA prin tranzistorul Q6, astfel folosim o sursa de curent constant realizata cu un tranzistorul Q7.

Etajul EC oferă o amplificare în tensiune, dar și o inversiune de fază, ceea ce înseamnă că semnalul de ieșire este defazat cu 180 de grade față de semnalul de intrare. Amplificarea în tensiune este dată de raportul dintre rezistența de încărcare la colector și rezistența de emitor. Din acest motiv preferam sa avem rezistenta nula in emitor, pentru a maximiza amplificarea in tensiune.

Folosirea unei surse de curent constant, cum ar fi cea descrisă cu Q7, pentru a alimenta un etaj EC este o tehnică foarte utilă pentru a obține o amplificare stabilă și liniară.

Sursa de curent constant asigură că tranzistorul Q6 primește un curent constant, indiferent de variațiile externe sau ale tensiunii de alimentare. Aceasta înseamnă că caracteristicile amplificatorului rămân constante și independente de fluctuațiile sursei de alimentare.

Deoarece curentul furnizat etajului EC este constant, amplificarea va fi mai liniară și distorsiunile vor fi reduse.

O sursa de curent constant îmbunătățește eficiența etajului, deoarece tranzistorul Q6 va funcționa în cea mai eficientă zonă a caracteristicii sale.

Sursa de curent constant realizata cu Q7, R21 si are aceeasi referinta de tensiune formata din diodele D2 si D3. Aceasta sursa are rolul de a furniza un curent de valoare fixa prin etajul diferential indiferent de valoarea sarcinii sau a tensiunii de alimentare, astfel etajul de intrare este imun la variatiile tensiunii de alimentare. Curentul prin Q7 nu depinde de tensiunea de alimentare si se poate calcula dupa formula:

$$I_{C7} = (2 \cdot V_F - V_{BE}) / R_{21} = 6 \text{mA}$$

5.Etajul amplificator in curent

Etajul amplificator in curent (Q8 si Q9), numit mai adesea etaj final, are rolul de a realiza o adaptare intre etajele de curent mic si impedanta redusa a sarcinii. Dorim ca acest etaj sa amplifice doar in curent iar amplificarea in tensiune sa fie unitara.

Pentru a indeplini conditia amplificarii in tensiune vom utiliza o conexiune de tip colector comun utilizand o pereche de tranzistoare bipolare complementare.

Cele doua tranzistoare complementare Q8 si Q9 sunt legate intr-o configuratie push-pull specifica amplificatoarelor in clasa B. In aceasta configuratie, Q9 conduce pentru alternantele pozitive si Q8 conduce pentru alternantele negative ale semnalului.

Amplificatoarele care funcționează în clasa B sunt adesea folosite în etajele finale ale amplificatoarelor audio datorită eficienței lor ridicate. Cu toate acestea, aceste amplificatoare pot prezenta distorsiuni de trecere prin zero, cunoscut și sub numele de distorsiune de crossover.

Distorsiunea de trecere prin zero apare atunci când semnalul de intrare trece prin valoarea sa zero și schimbă tranzistorul care amplifică semnalul. În acea clipă, ambele tranzistoare pot fi dezactivate simultan pentru o scurtă perioadă, cauzând o mică gaură sau discontinuitate în forma de undă de ieșire.

Reacția negativă, sau feedback-ul negativ, este o tehnică folosită pentru a reduce distorsiunile și pentru a îmbunătăți liniaritatea unui amplificator si a elimina aceste distorsiuni fara a mai folosi alte etaje auxiliare.

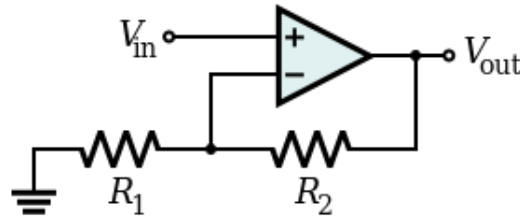
Un feedback negativ ia o porțiune din semnalul de ieșire, o inversează și o reintroduce în semnalul de intrare. Prin compararea semnalului de ieșire cu cel de intrare, orice distorsiune introdusă de amplificator este, în principiu, anulată.

Datorită feedback-ului negativ, amplificatorul va lucra într-o regiune mai liniară a caracteristicii sale, reducând astfel distorsiunile.

6. Reteaua de reactie negativa

Pentru a controla si a tine stabila valoarea amplificarii, vom utiliza o retea de reactie negativa globala, acesta retea de reactie culege o fractiune din semnalul de la iesire si il intoarce la intrarea inversoare pentru a inchide bucla.

Reteaua de reactie negativa face ca valoarea amplificarii sa fie data doar de valoarea unor componente pasive, astfel incat sa nu depinda de alti factori.



Am folosit o configuratie de amplificator neinversor la care valoarea amplificarii in tensiune este data de relatia:

$$A_v = 1 + R_2/R_1$$

In schema reala, reteaua de reactie este alcatuita din R17, R29 si R16 :

$$A_v = 1 + R_{17} + R_{29}/R_{16}$$

Pentru determinarea valorilor necesare obtinerii unei amplificari $A_v=10$ fixam $R_{16}=910\Omega$ $R_{17}=8.2k\Omega$ si $R_{29}=150\Omega$.

C6 are rol de condensator Miller. Acesta este un condensator conectat între colectorul și baza unui tranzistor în configurație de emitor comun. Rolul său este complex și are implicații semnificative asupra performanței circuitului:

Compensare de Fază: Acesta introduce o compensare de fază în circuit, reducând astfel riscul de oscilații nedorite în răspunsul în frecvență al amplificatorului. Cu alte cuvinte, ajută la stabilizarea amplificatorului.

Reducerea câștigului la frecvențe înalte: Pe măsură ce frecvența crește, efectul condensatorului Miller devine mai evident, ceea ce duce la o reducere a câștigului la frecvențe înalte și previne apariția de oscilații parasite.

Valoarea lui C6 este aleasa pentru a stabili amplificarea globala, astfel din valoarea lui C6 se poate stabili F_{max} la circa 20kHz. Valoarea lui C6 depinde de curentul de baza a etajului final si se determina experimental, prin simulare.

In cerinta este specificat un nivel al tensiunii de intrare de 50mV, acesta corespunde unei amplitudini varf la varf de circa 100mV iar la iesire va rezulta o amplitudine de 0.5V ($a_v=10$) Si 1V varf la varf.

Pentru ca amplificatorul să funcționeze corect fără a satura, tensiunea de alimentare trebuie să fie mai mare decât tensiunea de ieșire maximă. De asemenea,

trebuie să ținem cont de pierderile în tranzistoare și alte componente (de exemplu, tranzistoarele pot avea o cădere de tensiune în funcționare).

Să presupunem o cădere de tensiune totală de 2V pentru tranzistoare și alte componente asociate.

Astfel, pentru a acoperi tensiunea de ieșire și căderea de tensiune, vom avea nevoie de: $V_{cc} = V_{out} + 2V$

De asemenea, trebuie să avem o marjă suplimentară pentru a evita distorsiunile și a ne asigura că amplificatorul funcționează într-un regim liniar. O marjă de siguranță de 5V pare adecvată în această situație deoarece vor trebui să funcționeze și sursele de curent constant pe lângă etajele ce realizează amplificarea.

Sumând marja de siguranță cu tensiunea calculată: $V_{lim} = 3V + 5V = 8V$ dar alegem valoarea standard de 9V pentru tensiunea de alimentare.

Compatibilitate: Multe baterii standard oferă o tensiune de 9V, facilitând alimentarea circuitului.

Curentul de ieșire prin etajul final:

$$I_o = V_{out}/R_L = 1V/5\Omega = 200mA$$

pt $I_c = 200mA$, $V_T = 25mV$ și $R_{in} = 1k$

$$R_{in} = \beta * r_E \text{ unde } r_E = V_T/I_c$$

Rezulta $r_E = 0.125\Omega$

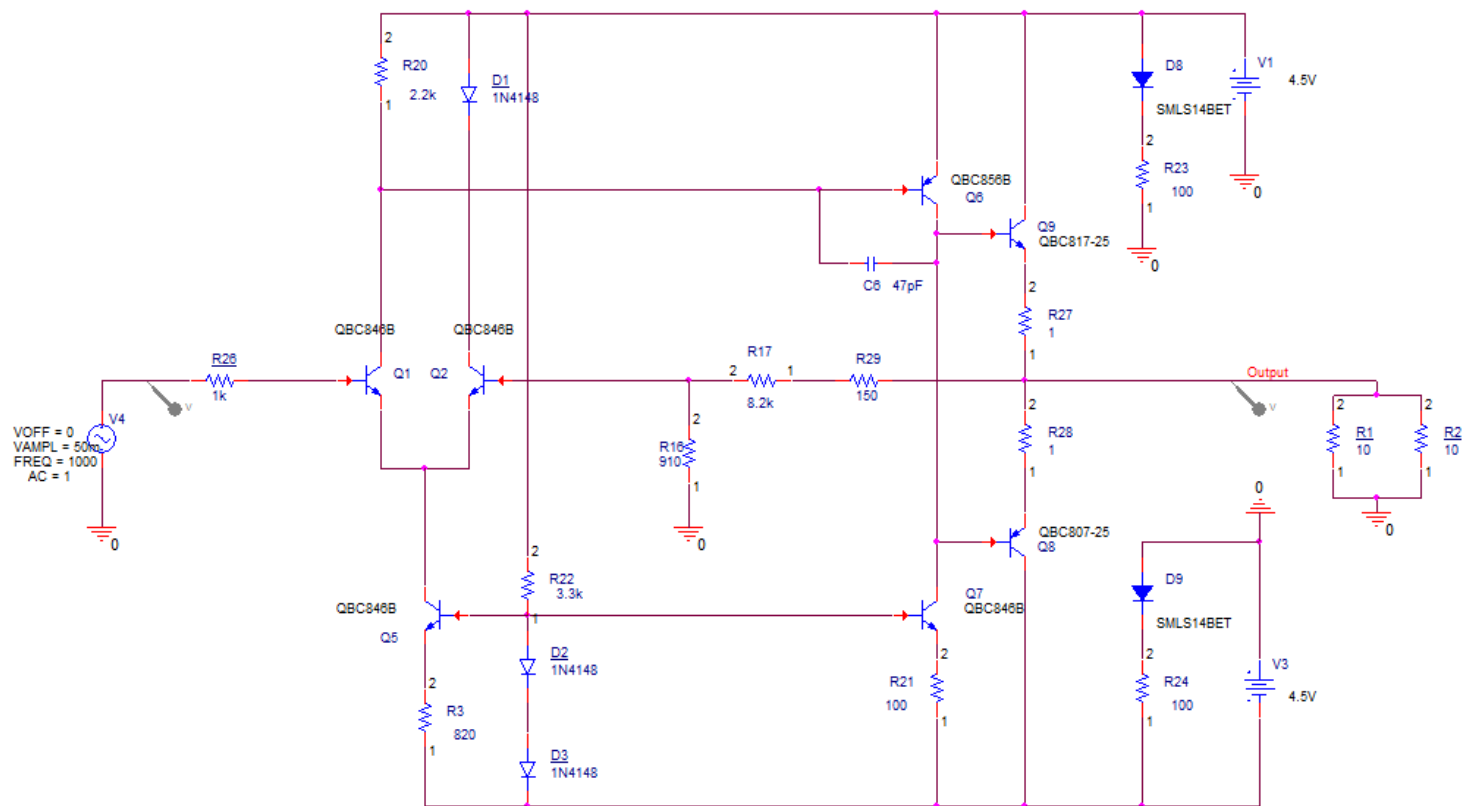
Rezistența de ieșire a etajului colector comun este dată de valoarea rezistenței văzute în baza etajului și de factorul de amplificare în curent:

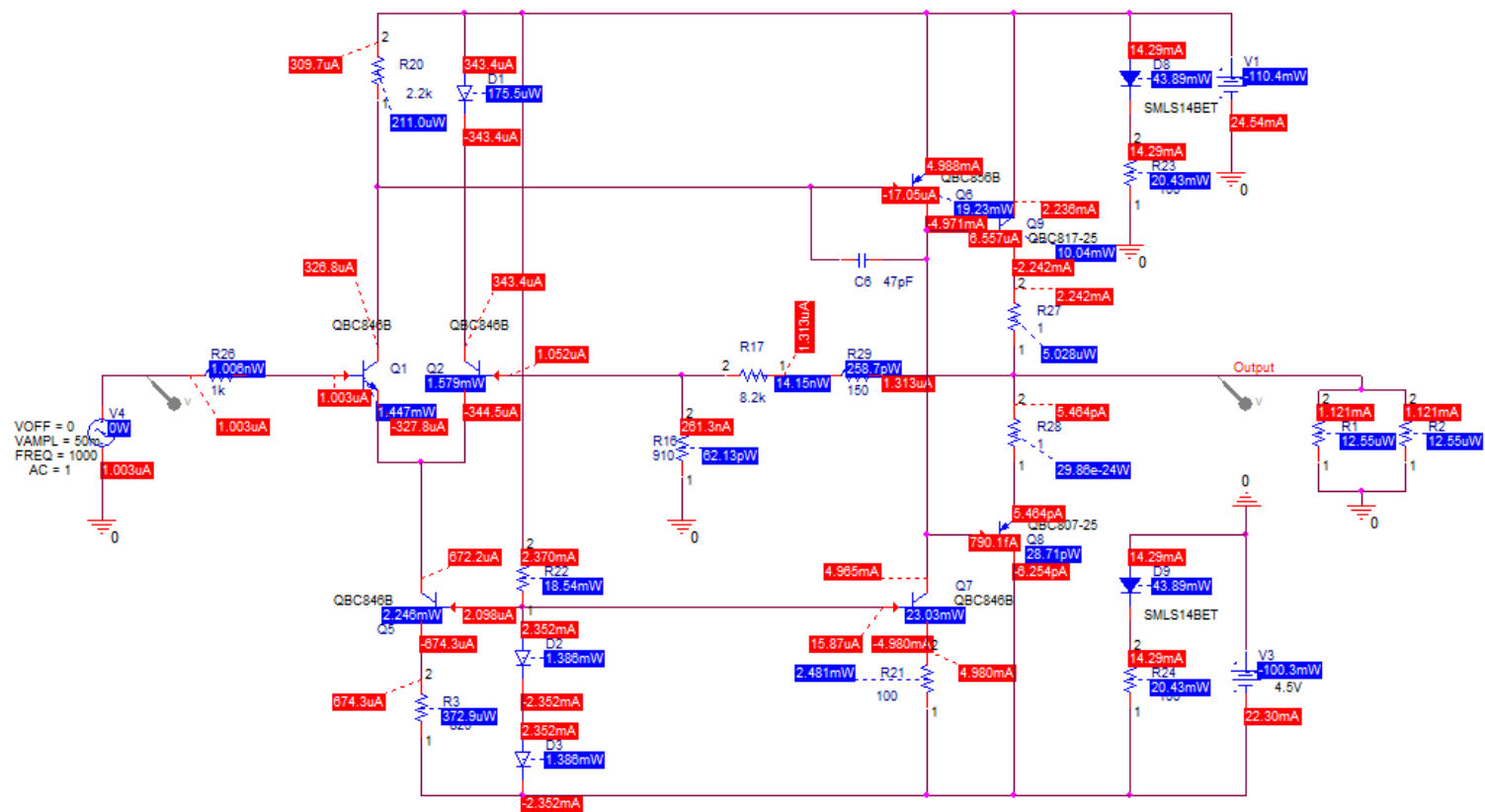
$$R_o = r_E || R_b / \beta$$

Rezulta rezistența de ieșire pentru final etajul colector comun de:

$$R_o = r_E + R_b / \beta = 0.125 \Omega, \text{ Factorul } R_b / \beta \text{ devine neglijabil.}$$

7.Schema finală a amplificatorului utilizata in simulari





Punctul static de funcționare (PSF)

$$V_{BE5} + I_{C5}R_3 - V_{D2} - V_{D3} = 0$$

$$I_{C5} = \frac{2V_D - V_{BE5}}{R_3} = \frac{0,6}{820} = 0,73 \text{ mA}$$

$$V_{BE7} + I_{C7}R_{21} - V_{D2} - V_{D3} = 0$$

$$I_{C7} = \frac{2V_D - V_{BE7}}{R_{21}} = \frac{0,6}{100} = 6 \text{ mA}$$

$$I_{C6} = I_{C7} = 6 \text{ mA}$$

$$I_{C1}R_{20} = V_{EB6} \Rightarrow I_{C1} = \frac{V_{EB6}}{R_{20}} = \frac{0,6}{2,2\text{k}} = 0,27 \text{ mA}$$

$$I_{C5} = I_{C1} + I_{C2} \Rightarrow I_{C2} = I_{C5} - I_{C1} = 0,73 - 0,27 = 0,46 \text{ mA}$$

$$-V_1 + I_{22}R_{22} + V_{D2} + V_{D3} - V_3 = 0$$

$$I_{22} = \frac{9 - 1,2}{3,3\text{k}} = \frac{7,8}{3,3\text{k}} = 2,36 \text{ mA}$$

$$-V_1 + I_{C1}R_{20} + V_{CB1} = 0 \Rightarrow V_{CB1} = V_1 - I_{C1}R_{20} = 4,5 - 0,27 \cdot 2,2 = 4,5 - 0,6 = 3,9 \text{ V}$$

$$V_{CE1} = V_{CB1} + V_{BE1} = 3,9 + 0,6 = 4,5 \text{ V}$$

$$-V_1 + V_{D1} + V_{CB2} + V_{BE2} - V_{BE1} = 0$$

$$V_{CB2} = V_1 - V_{D1} = 4,5 - 0,6 = 3,9 \text{ V}$$

$$V_{CE2} = V_{CB2} + V_{BE2} = 3,9 + 0,6 = 4,5 \text{ V}$$

$$-V_1 + V_{D1} + V_{CE2} + V_{CE5} + I_{C5}R_3 - V_3 = 0$$

$$V_{CE5} = 9 - 0,6 - 4,5 - 0,73 \cdot 10^{-3} \cdot 820 = 9 - 4,5 - 1,2 = 3,3 \text{ V}$$

$$-V_1 + I_{C1}R_{20} + V_{BC6} + V_{BE9} = 0$$

$$V_{BC6} = 4,5 - 0,6 - 0,6 = 3,3 \text{ V}$$

$$V_{EC6} = V_{EB6} + V_{BC6} = 0,6 + 3,3 = 3,9 \text{ V}$$

$$-V_1 + V_{EC6} + V_{CE7} + I_{C7}R_{21} - V_3 = 0$$

$$V_{CE7} = 9 - 3,9 - 0,6 = 4,5 \text{ V}$$

$$-V_1 + V_{CE9} + V_{EC8} - V_3 = 0$$

$$V_{CE9} + V_{EC8} = 9 \text{ V} \Rightarrow V_{CE9} = V_{EC8} = 4,5 \text{ V}$$

$$I_{C8} = I_{C9} = 2,24 \text{ mA}$$

Poterele disipate

$$P_{d1} = V_{CE1} \cdot i_{C1} = 4,5 \cdot 0,27 \cdot 10^{-3} = 1,215 \text{ mW}$$

$$P_{d2} = V_{CE2} \cdot i_{C2} = 4,5 \cdot 0,46 \cdot 10^{-3} = 2,07 \text{ mW}$$

$$P_{d5} = V_{CE5} \cdot i_{C5} = 3,3 \cdot 0,73 = 2,409 \text{ mW}$$

$$P_{d6} = V_{CE6} \cdot i_{C6} = 3,9 \cdot 6 = 23,4 \text{ mW}$$

$$P_{d7} = V_{CE7} \cdot i_{C7} = 4,5 \cdot 6 = 27 \text{ mW}$$

$$P_{d8} = V_{CE8} \cdot i_{C8} = 4,5 \cdot 2,25 = 10,08 \text{ mW}$$

$$P_{d9} = V_{CE9} \cdot i_{C9} = 4,5 \cdot 2,24 = 10,08 \text{ mW}$$

8. Simularea circuitului in Orcad

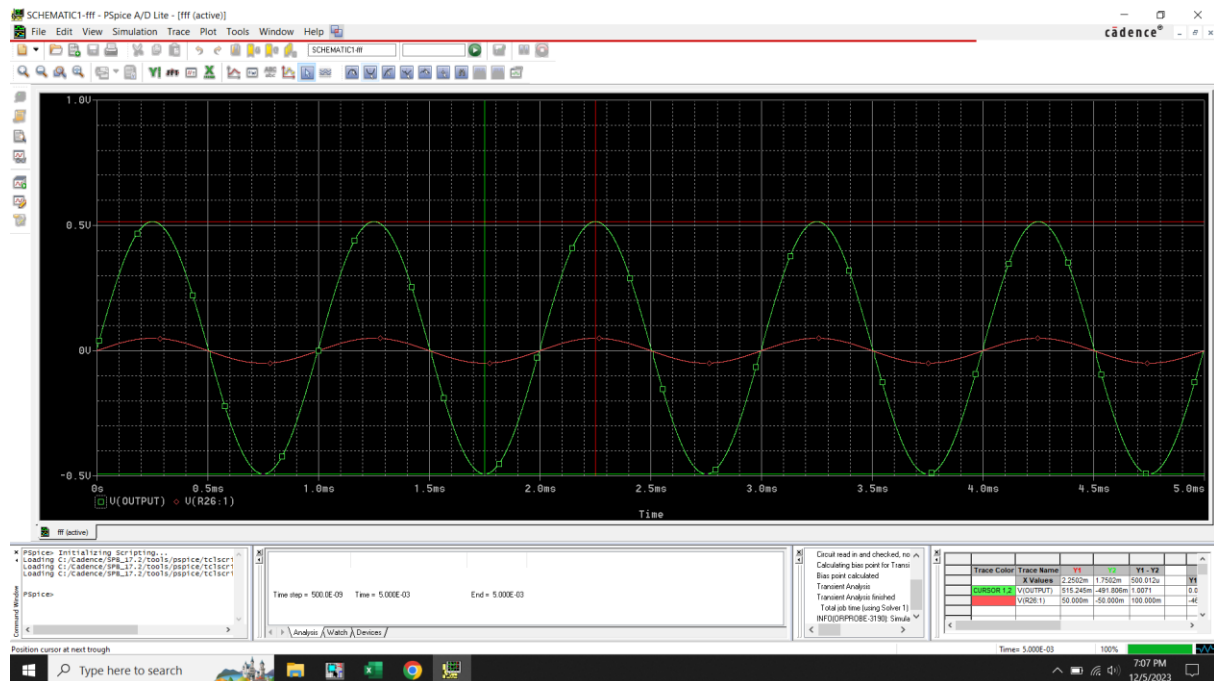


Fig.1 Tensiunea de iesire si intrare in amplificator

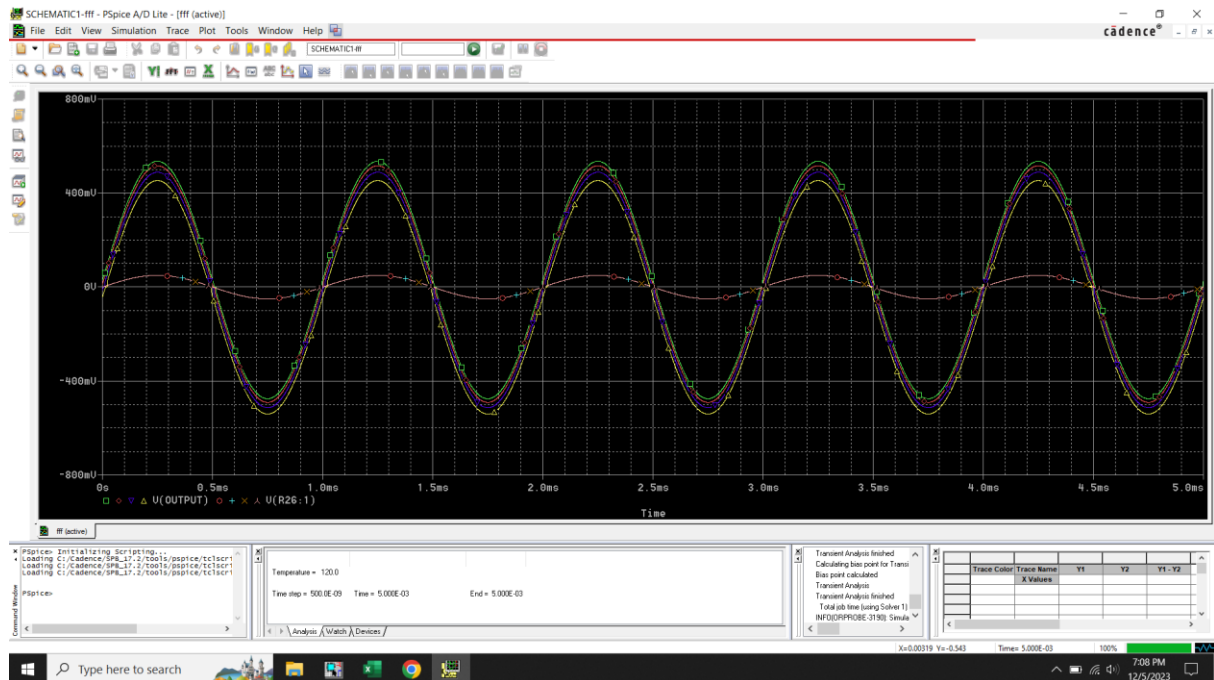


Fig.2 Simulare la temperaturile -40,25,75,120 grade



Fig.3 DC Sweep

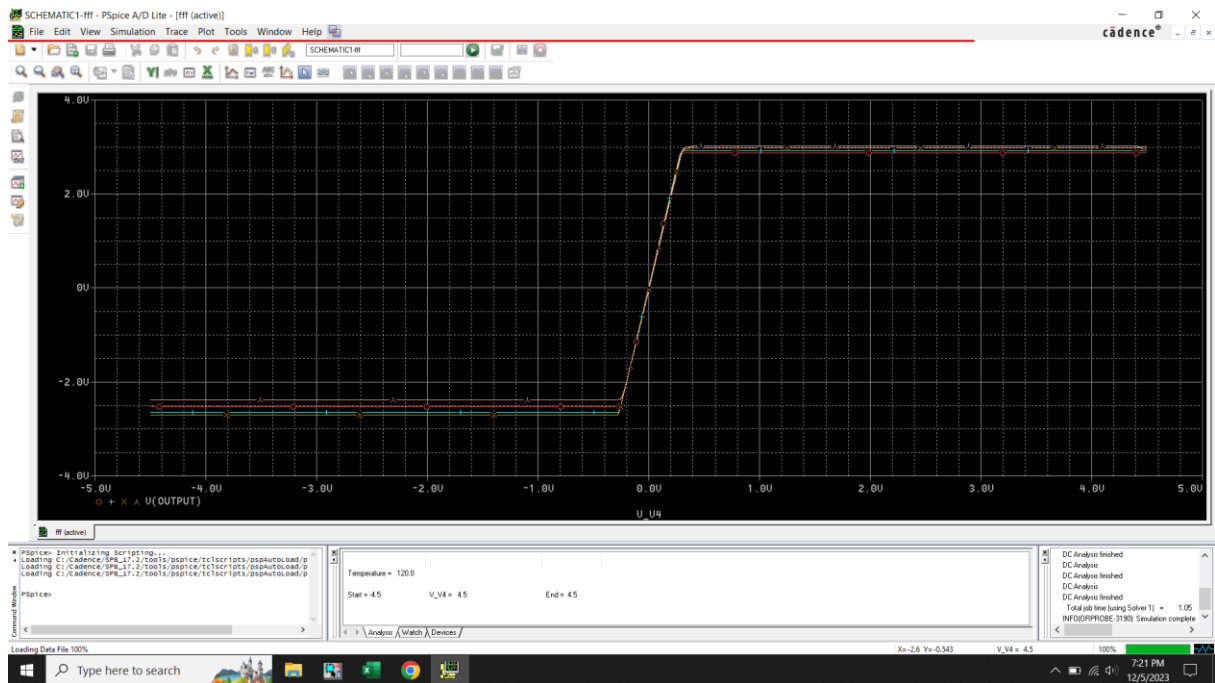


Fig.4 DC Sweep Temperature

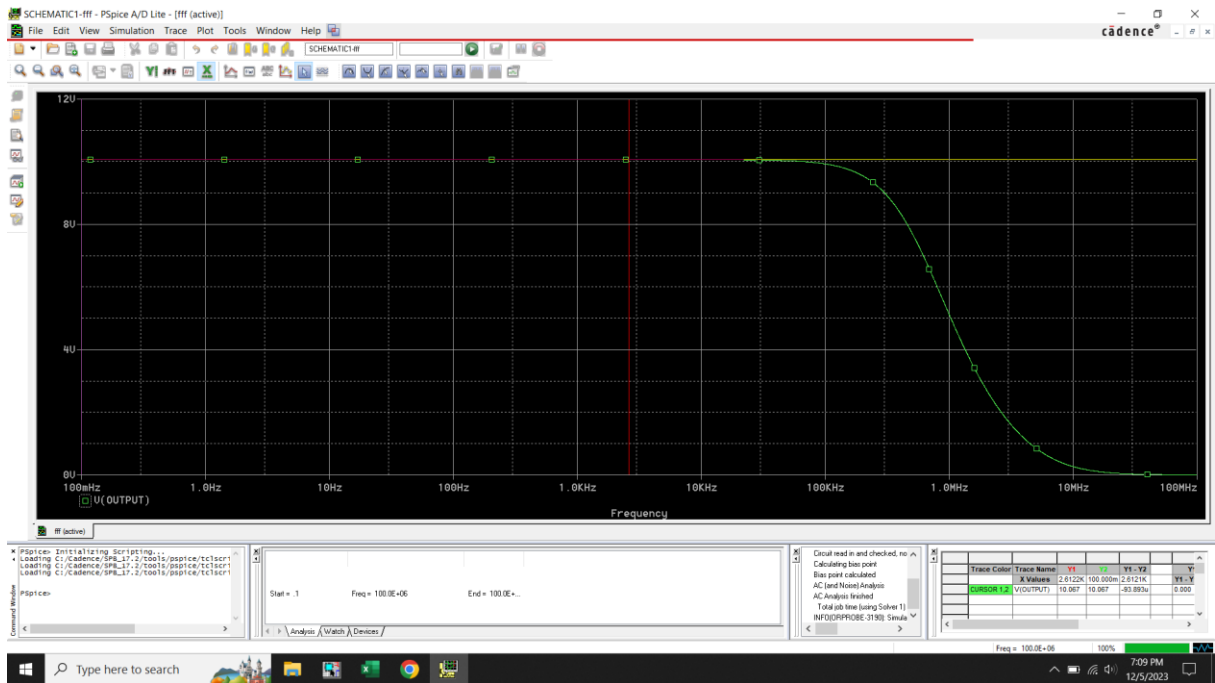


Fig.5 Raspunsul in frecventa al amplificatorului

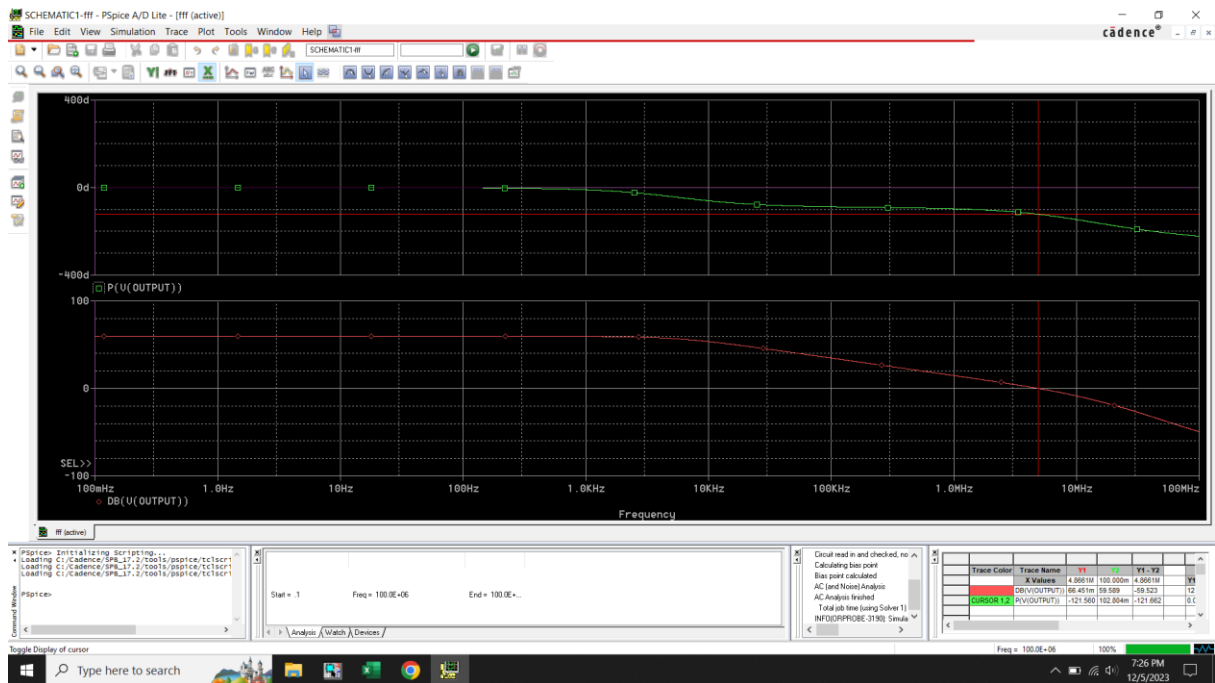


Fig.6 Limita de faza

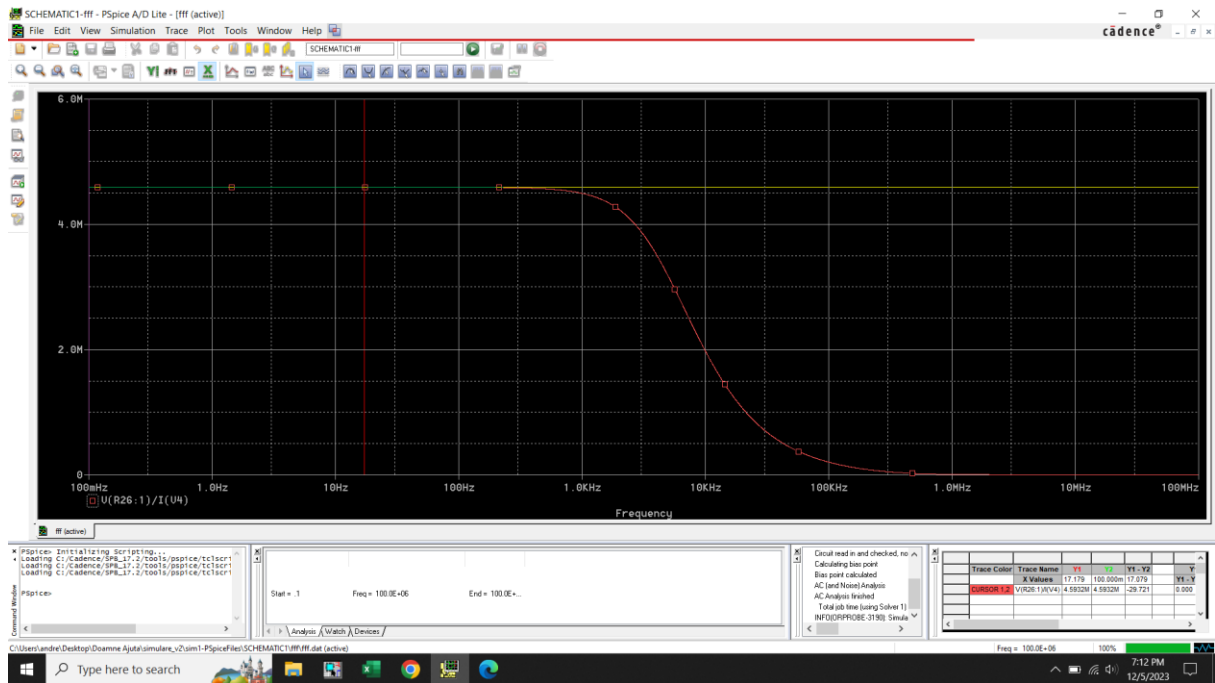


Fig.7 Rezistenta de intrare

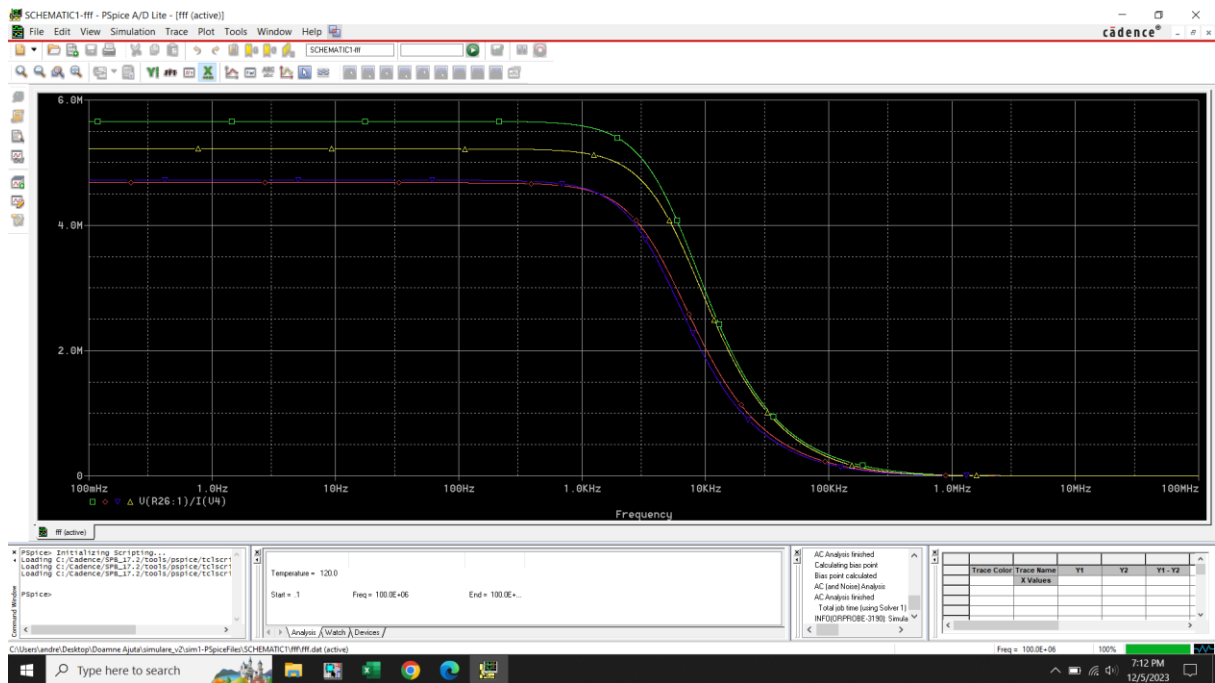


Fig.8 Rezistenta de intrare temperaturi

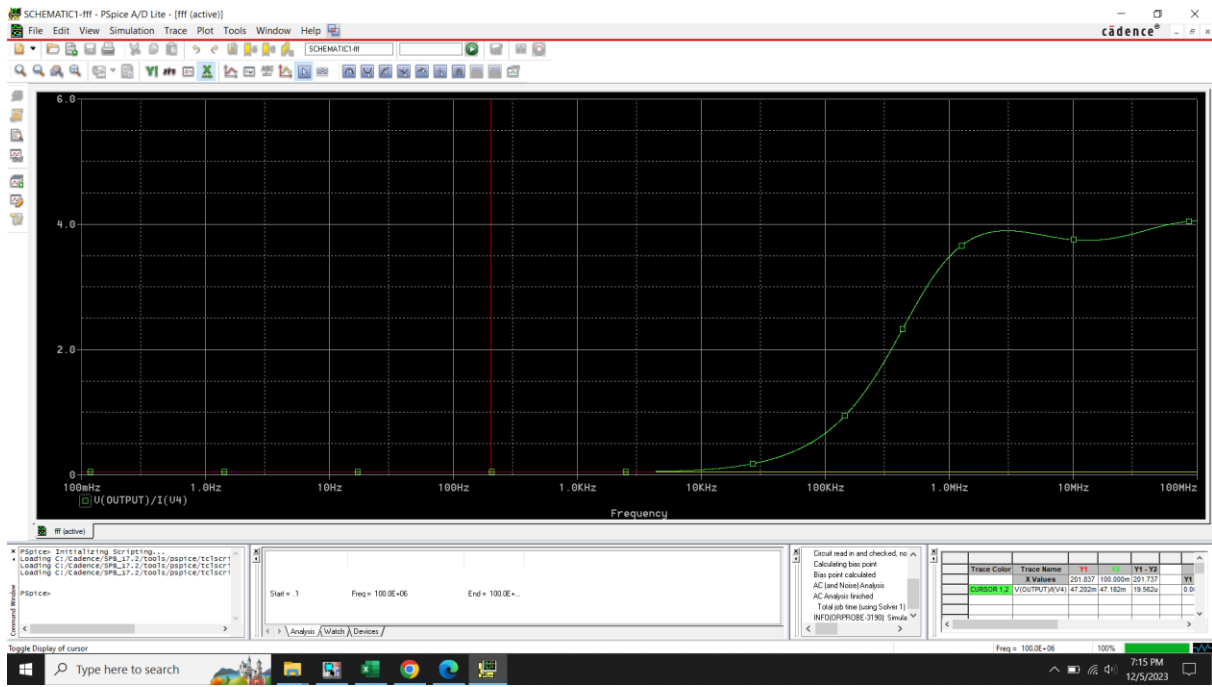


Fig.9 Rezistenta de iesire

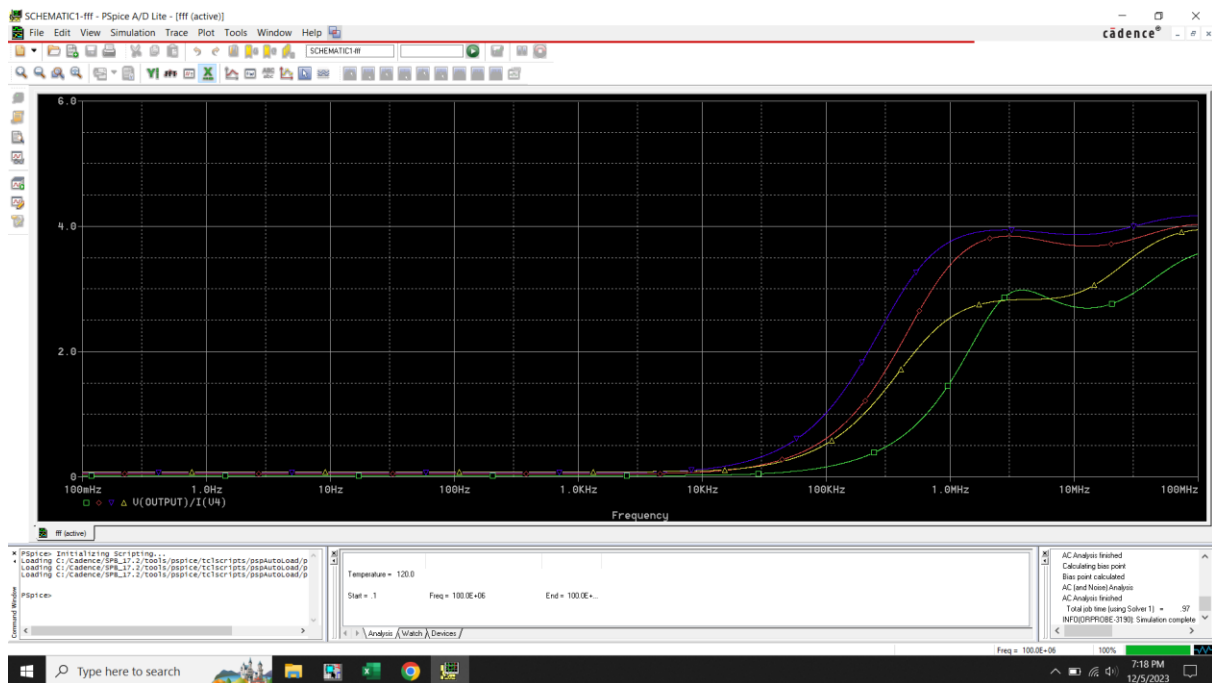
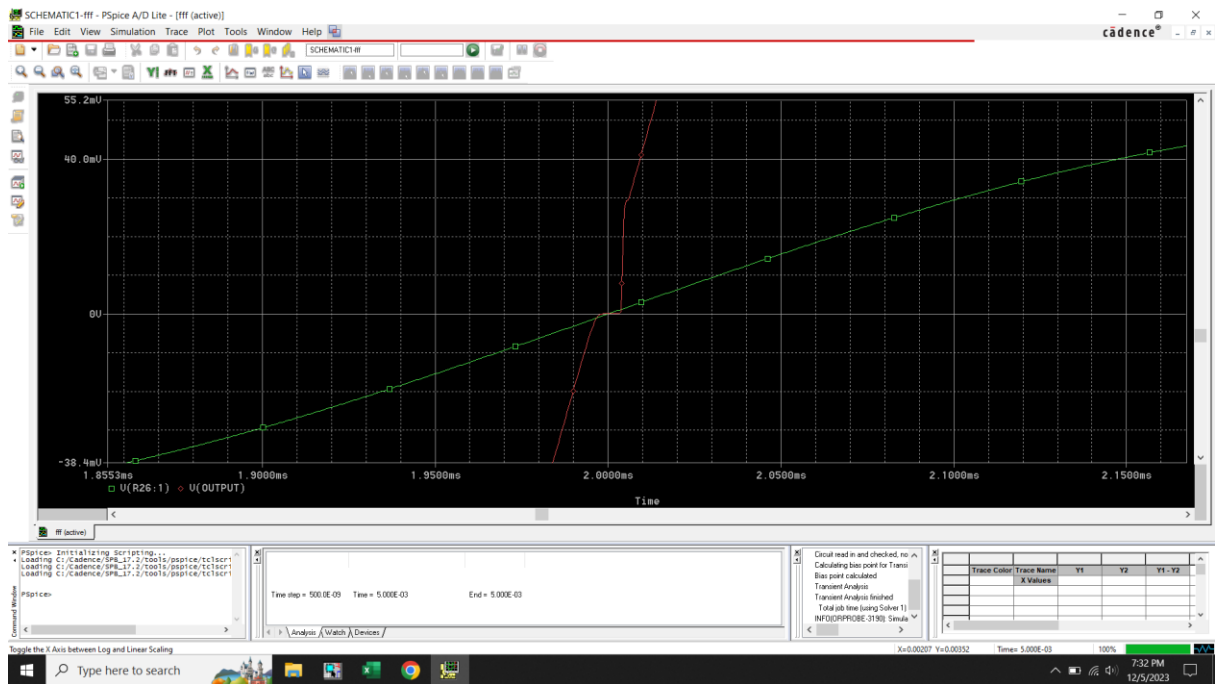
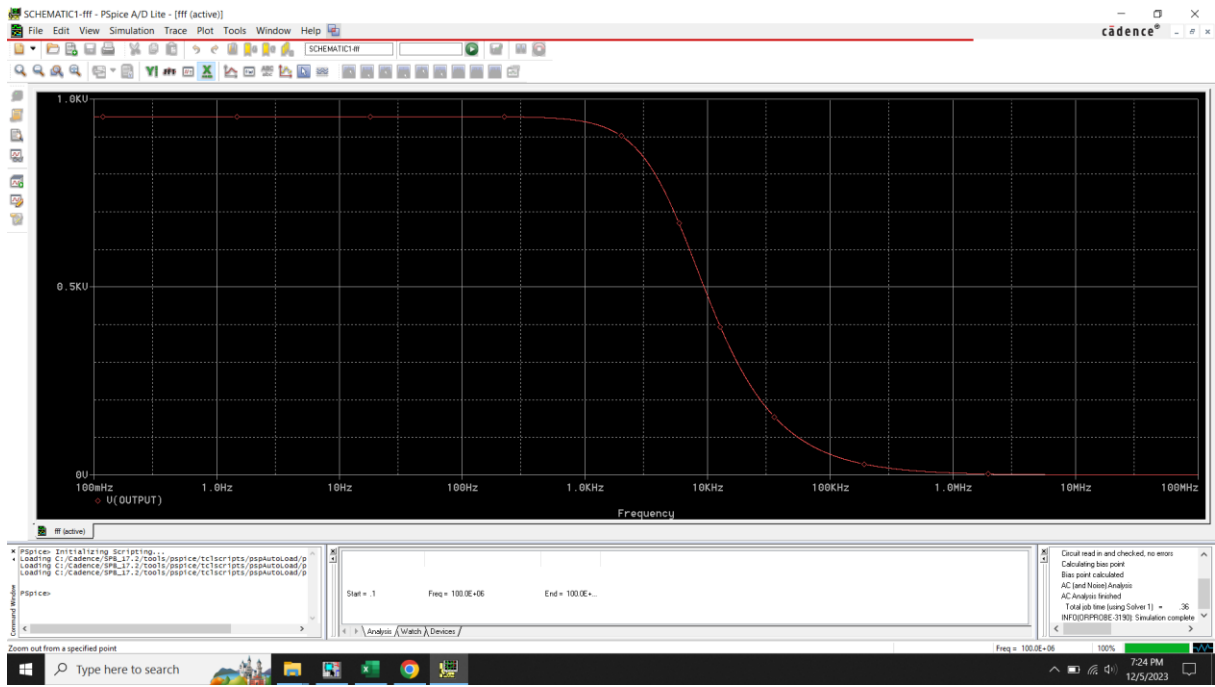


Fig.10 Rezistenta de iesire temperaturi



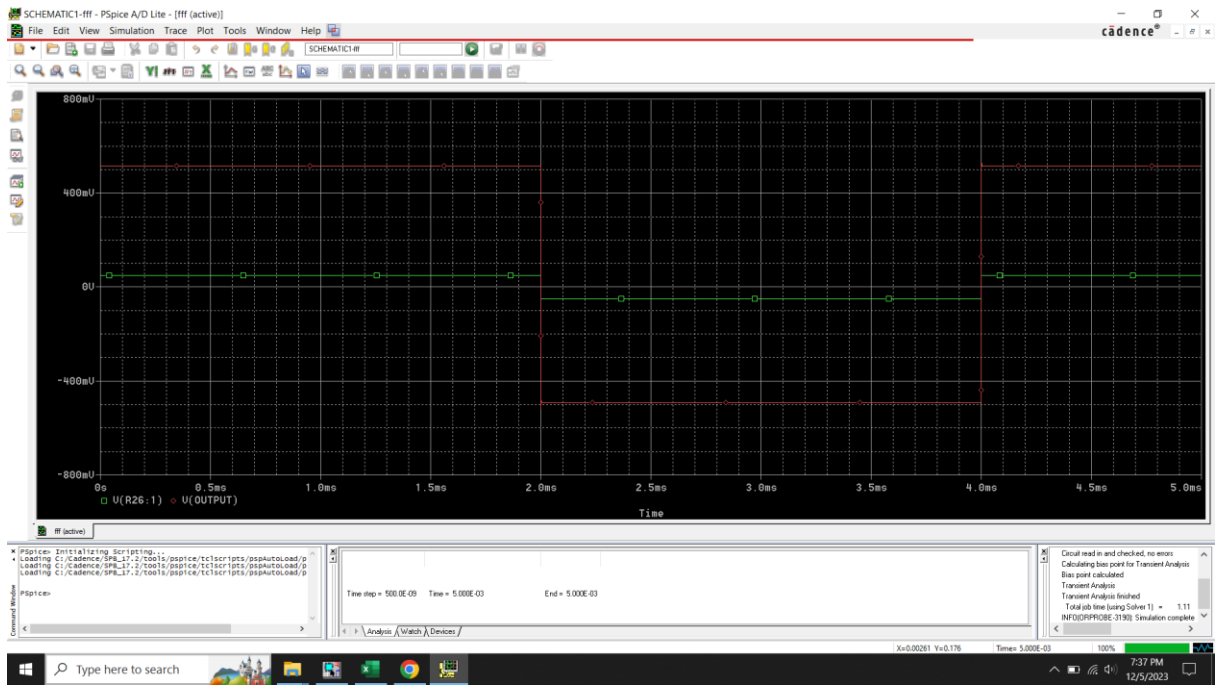


Fig.13 Semnal dreptunghiular

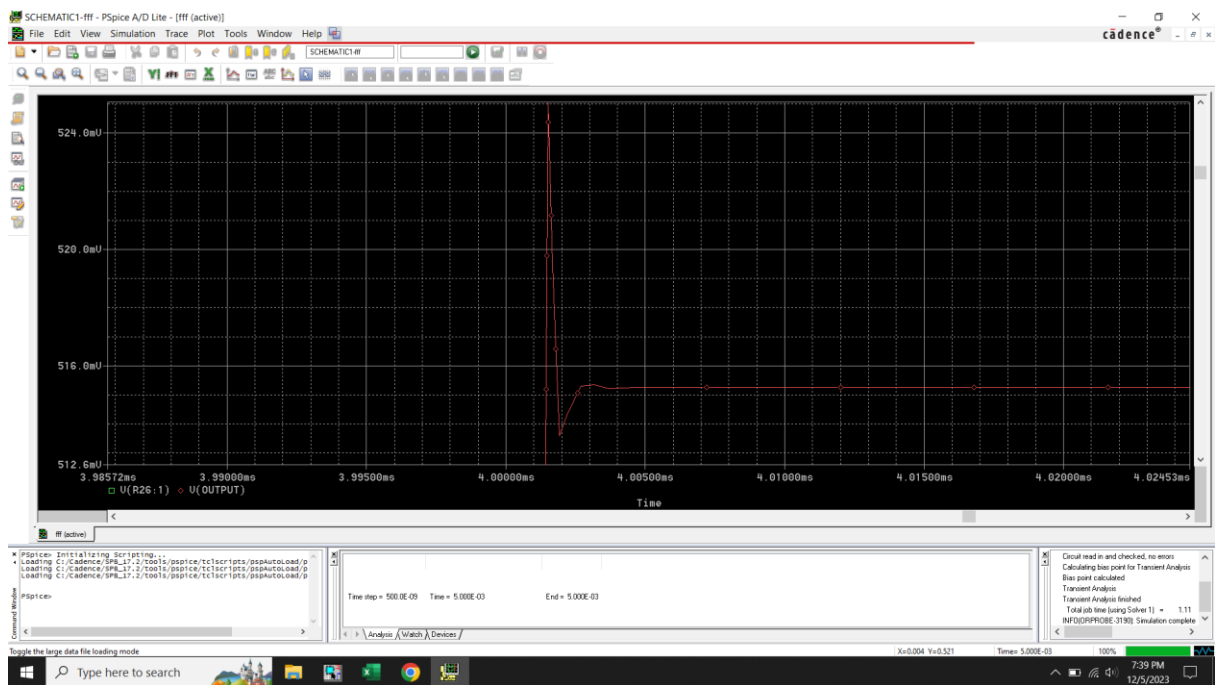
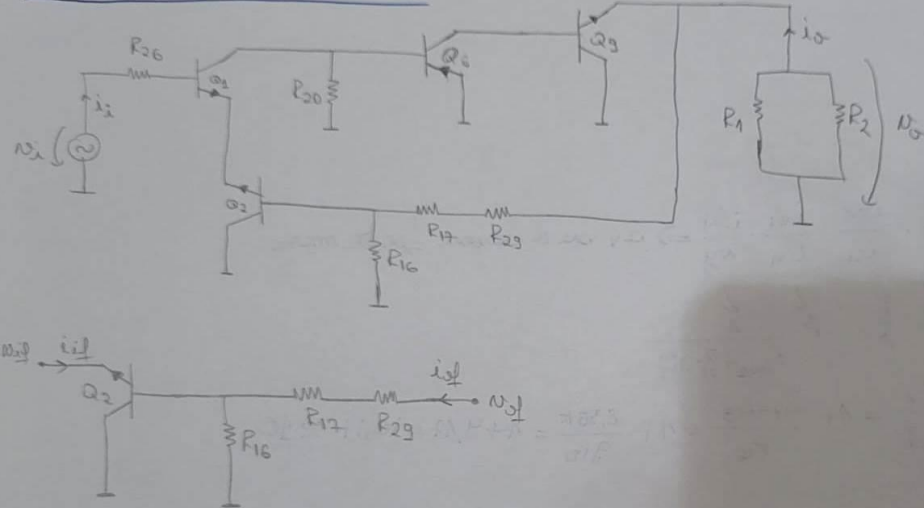


Fig.14 Semnal dreptunghiular zoom

Schema curent alternativ:

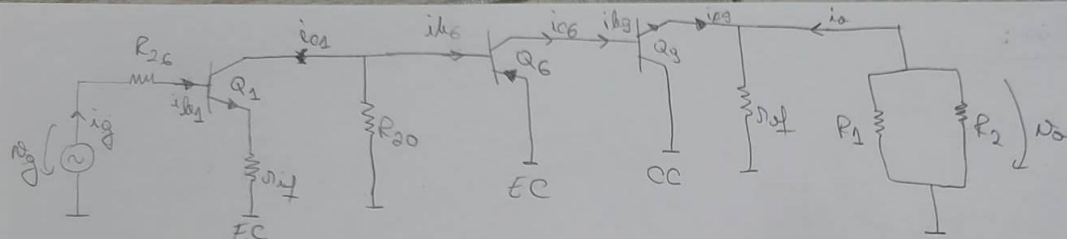


$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{v_{if}}{v_{if}} \bigg|_{i_{if}=0} = \frac{R_{16}}{R_{16} + R_{17} + R_{23}} = \frac{910}{910 + 82k + 150} = 0,098 \approx 0,1$$

$$r_{if} = \frac{v_{if}}{i_{if}} \bigg|_{v_{of}=0} = \frac{r_{be} + R_{16} \parallel (R_{17} + R_{23})}{\beta_0 + 1} = \frac{1,8 \cdot 10^3 + 829,3}{200} = 58,10 \Omega$$

$$r_{be} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\beta}{40 I_{C2}} = \frac{200}{40 \cdot 0,46 \cdot 10^{-3}} = 10,8 k\Omega$$

$$r_{of} = (R_{17} + R_{23}) + R_{16} \parallel r_{be} = 8,35 \cdot 10^3 + 839,3 = 9,18 k\Omega$$



$$A_v = \frac{v_o}{v_g} = \frac{v_o}{i_{e1}} \cdot \frac{i_{e1}}{i_{e6}} \cdot \frac{i_{e6}}{i_{b6}} \cdot \frac{i_{b6}}{i_{c1}} \cdot \frac{i_{c1}}{i_{b1}} \cdot \frac{i_{b1}}{v_g} \Rightarrow A_v \text{ are a value foarte mare}$$

$$\begin{matrix} \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ -R_L \parallel R_2 \approx \beta & \approx \beta & \frac{1}{\beta} & \beta & \frac{1}{\beta} & \frac{1}{R_{be1} + \beta \cdot R_L} \end{matrix}$$

$$A_v \rightarrow \infty \Rightarrow A = \frac{A_v}{1 + A_v \cdot f} \approx \frac{1}{f} = 1 + \frac{R_{17} + R_{29}}{R_{16}} = 1 + \frac{8,35k}{910} = 1 + 9,17 = 10,17 \approx 10$$

$$R_{ia} = R_{26} \parallel (R_{be} + \beta \cdot R_L)$$

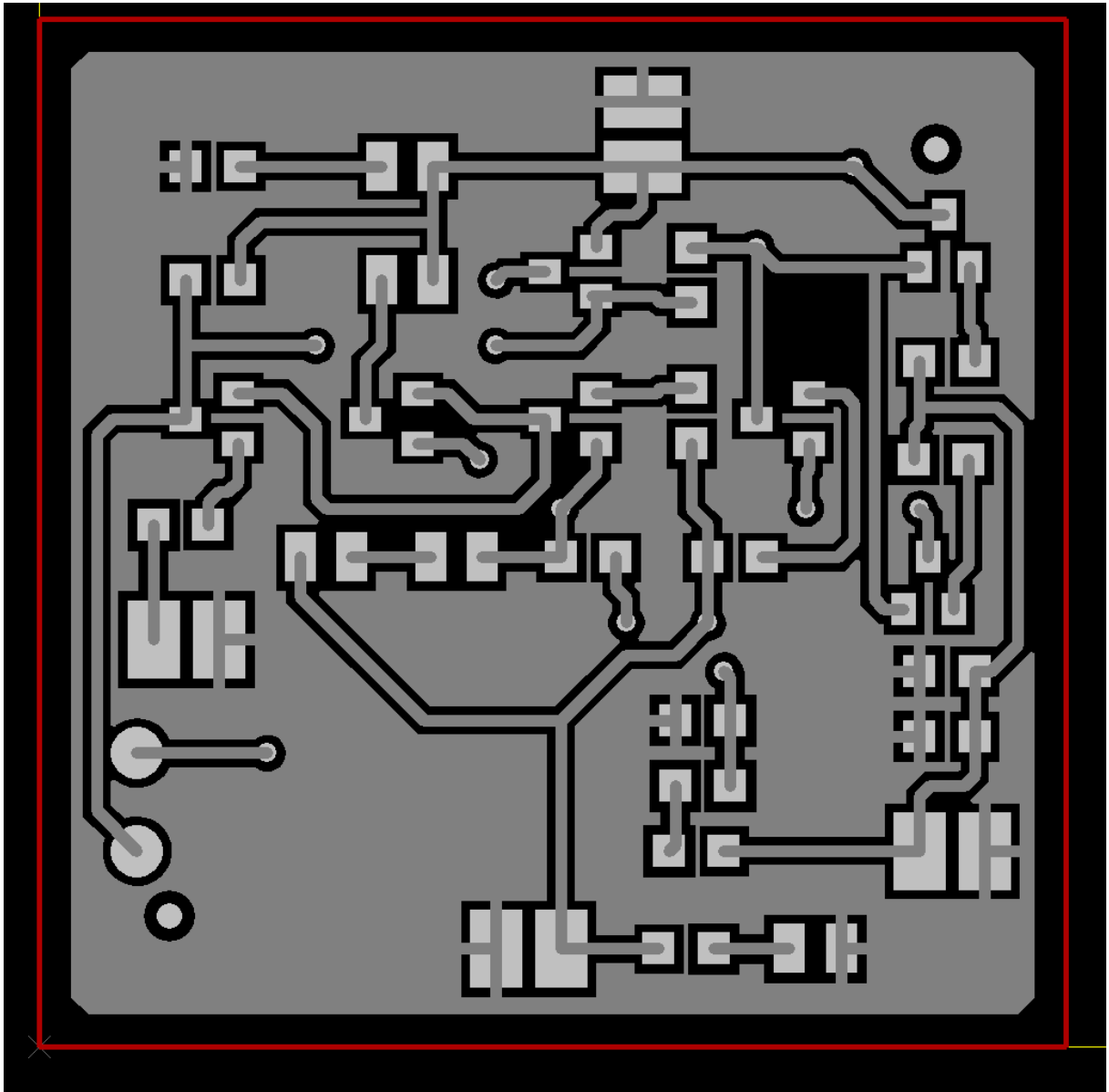
$$R_{oa} = R_L \parallel R_{af} = (R_{11} \parallel R_{12}) \parallel R_{af}$$

$$R_i = R_{ia} (1 + T) - R_g$$

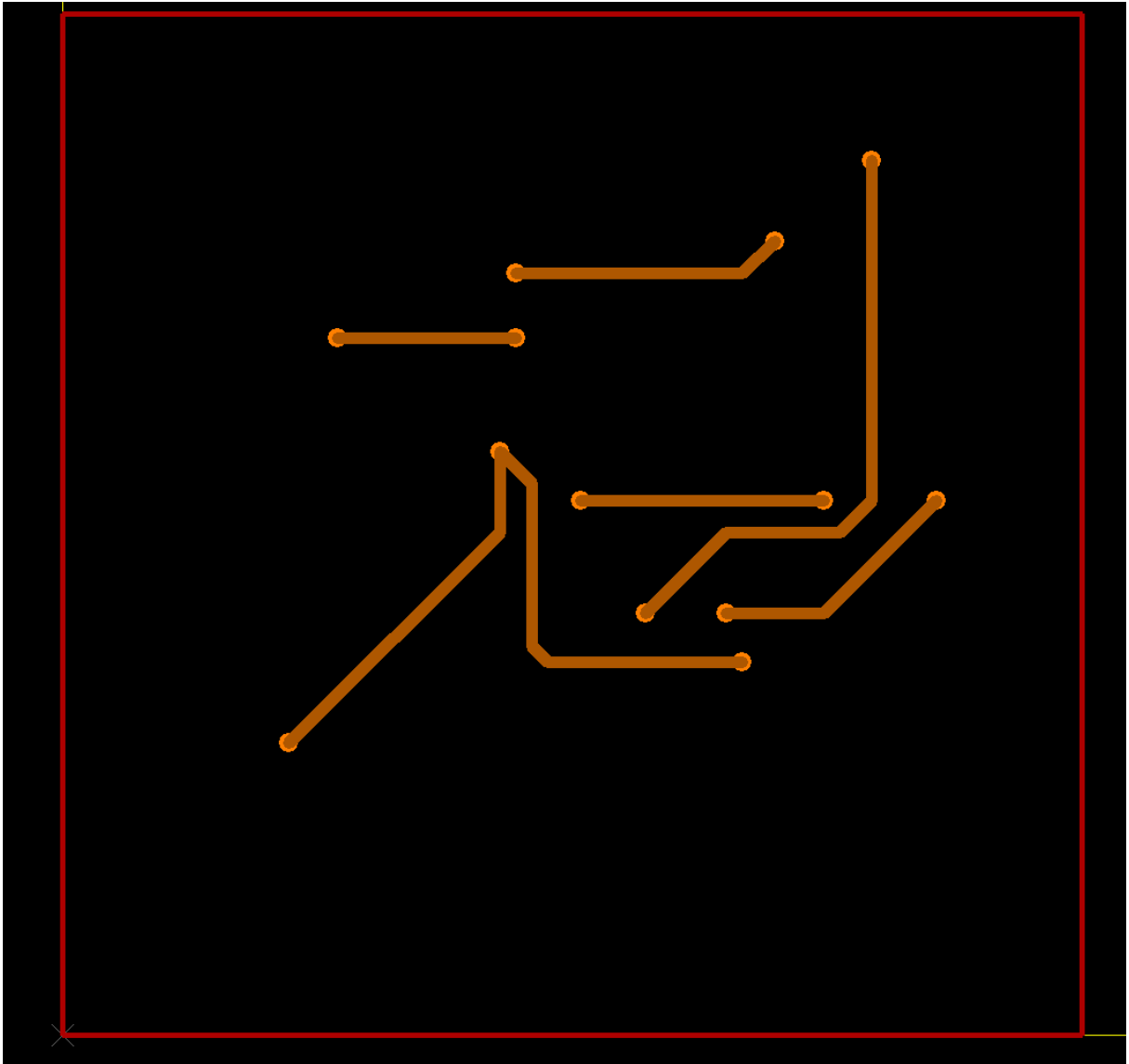
$$R_o = R_{oa}^{-1} (1 + T) - R_L$$

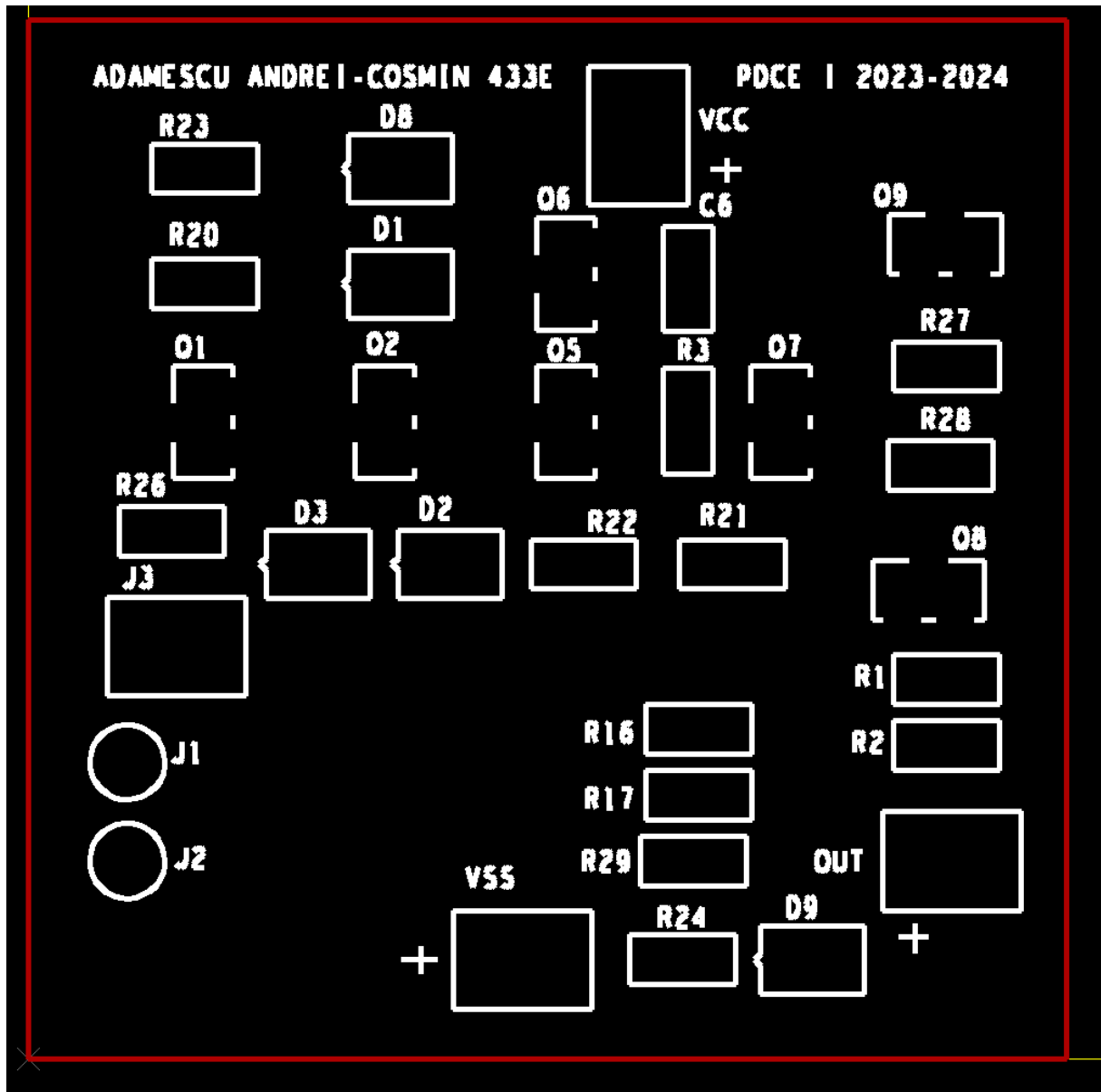
9. Layout

Layer electric TOP

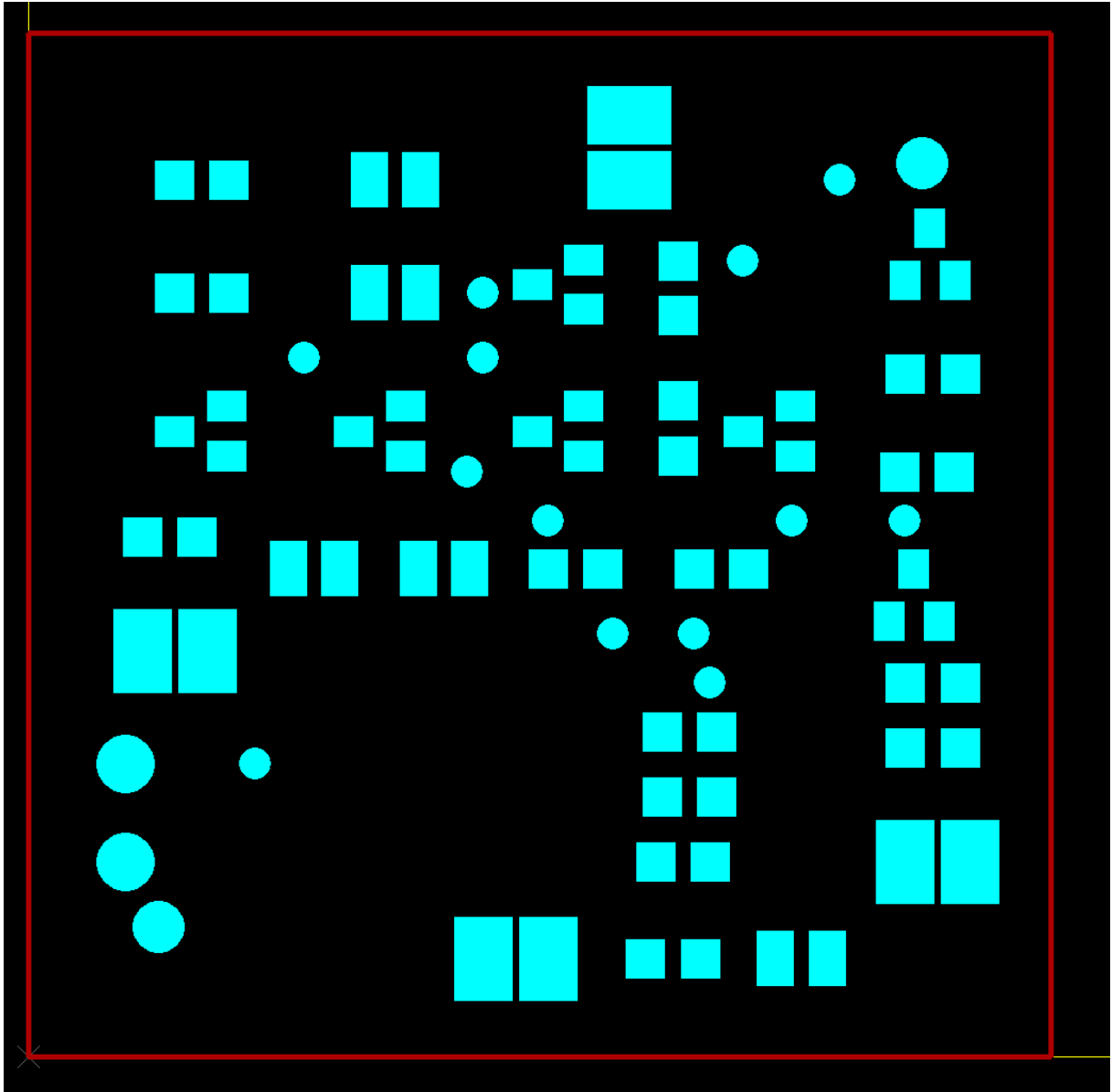


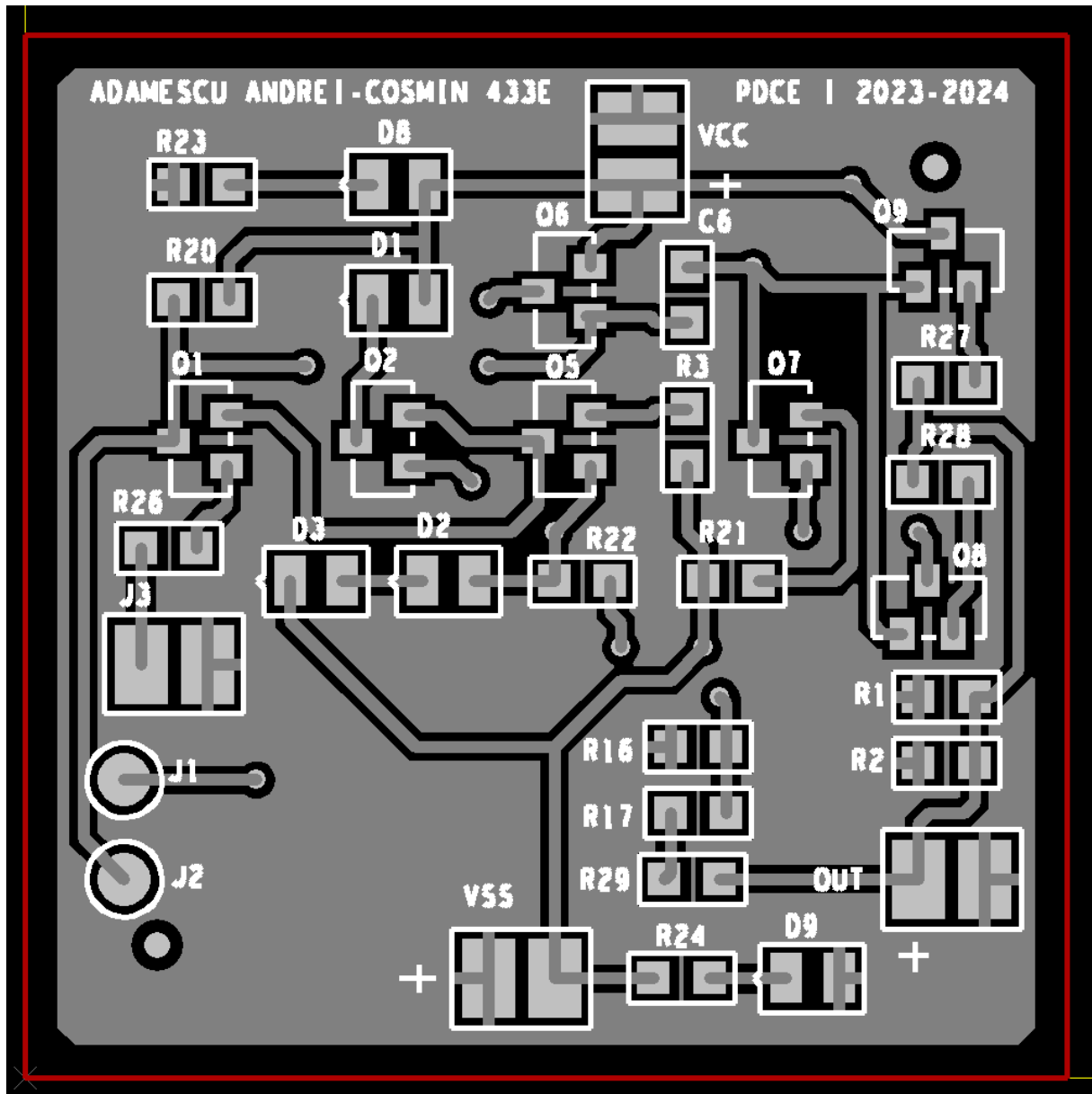
Layer electric BOTTOM





Layer neelectric Solder Mask TOP





Bill of materials

#	Nr bucati	ID schema	Valoare
1	1	C6	47pF
2	3	D1,D2,D3	D1N4148
3	2	D8,D9	SMLS14BET
4	4	Q1,Q2,Q5,Q7	QBC846B
5	1	Q6	QBC856B
6	1	Q8	QBC807-25
7	1	Q9	QBC817-25
8	2	R1,R2	10 Ω
9	1	R26	1k Ω
10	1	R16	910 Ω
11	1	R17	8.2k Ω
12	1	R29	150 Ω
13	3	R21,R23,R24	100 Ω
14	1	R20	2.2k Ω
15	1	R22	3.3k Ω
16	2	R27,R28	1 Ω
17	1	R3	820 Ω