

**UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ de ȘTIINȚĂ și
TEHNOLOGIE POLITEHNICA BUCUREȘTI**
Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației

Circuite electronice fundamentale 2 - Proiect
Amplificator de tensiune (joasă frecvență)

Ciuhureanu Andrei

Grupa 431D

București 2024

Date inițiale de proiectare: N=9

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

- ◆ Semnal de intrare, ui în gama: 540 [mV];
- ◆ Sarcina la ieșire, RL: 90 [Ω];
- ◆ Rezistența de intrare Ri >150 [k Ω];
- ◆ Rezistența de ieșire Ro < 0,9 [Ω];
- ◆ Amplificare în tensiune, Av: 10;
- ◆ Domeniul temperaturilor de funcționare: 0°-70°C (verificabil prin testare în temperatură);
- ◆ Semnalizarea prezenței tensiunilor de alimentare cu diodă de tip LED.

INTRODUCERE:

Amplificatorul de tensiune este un circuit care are rolul de a furniza la ieșirea sa o tensiune proporțională cu cea de la intrare. Relația de bază este:

$$V_{out} = A_v \cdot V_{in}$$

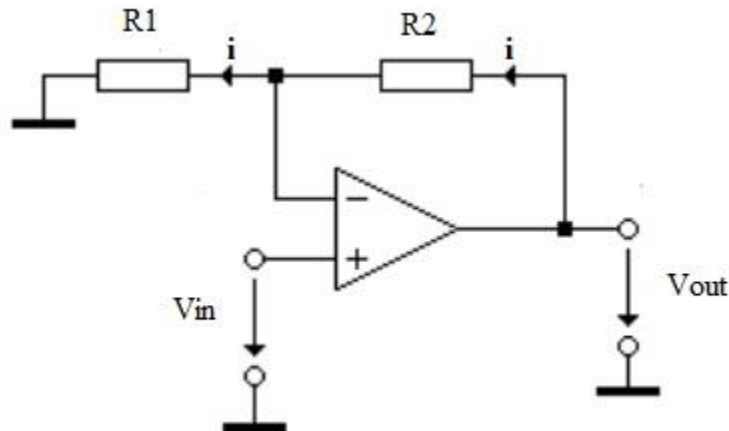
- ◆ V_{out} este tensiunea de ieșire amplificatorului.
- ◆ V_{in} este tensiunea de intrare a amplificatorului.
- ◆ A_v este amplificarea de tensiune a amplificatorului, mărime adimensională.

În practică, este destul de dificil de respectat relația de bază, întrucât amplificarea A_v nu este o mărime constantă. Din acest motiv, amplificatoarele de precizie se realizează cu o reacție negativă puternică. Pentru îndeplinirea acestei cerințe, se utilizează un amplificator (diferențial) cu două intrări: una inversoare și cealaltă neinversoare. Acesta amplifică, de fapt, diferența tensiunilor de pe cele două intrări. La intrarea neinversoare se aplică semnalul de intrare V_{in} , iar pe cealaltă intrare, o fracțiune (f_v) din cel de ieșire a circuitului $V_f = f_v \cdot V_{out}$.

Amplificarea globală a circuitului este: $A_v = \frac{av}{1+f_v \cdot av} = \frac{av}{1+T}$, unde av reprezintă amplificarea în buclă deschisă, iar T este transmisia pe buclă ($T > 0$, pentru o reacție negativă ($|A_v| < |a|$)).

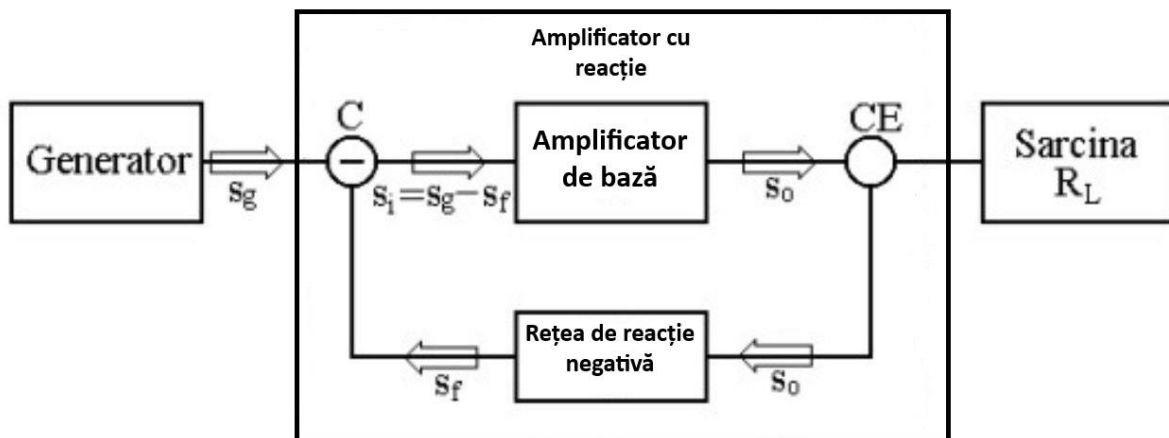
Dacă $av \gg 1 \Rightarrow T \gg 1$, atunci amplificarea cu reacție devine: $Av \cong \frac{1}{fv}$.

Ca urmare, amplificarea Av nu mai depinde de structura amplificatorului de bază **AB**, ci numai de elementele din circuitul rețelei de reacție, deci ușor de controlat și bine definite.

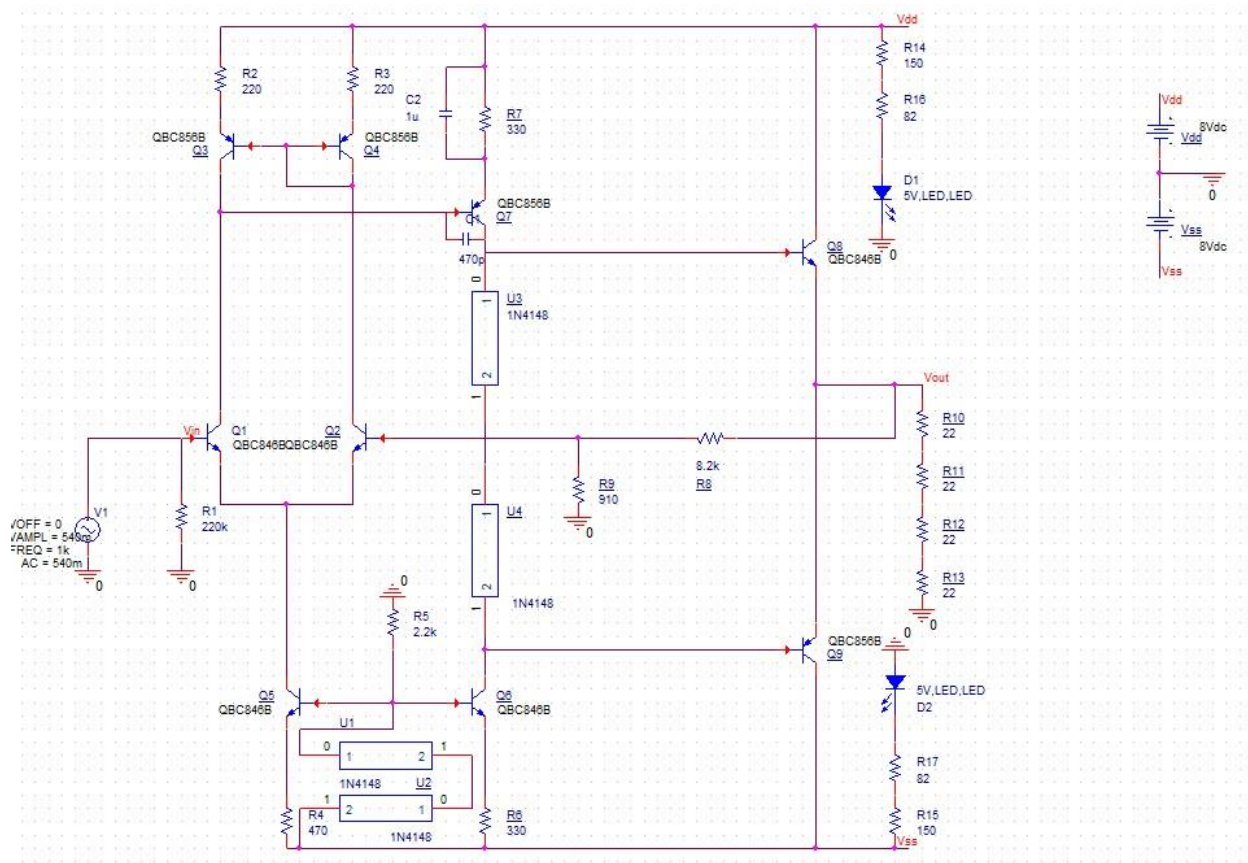


În acest caz: $fv = \frac{R1}{R1+R2} \Rightarrow Av \cong \frac{1}{fv} = 1 + \frac{R2}{R1} = \frac{Vout}{Vin}$ (= 10, conform cerinței noastre), deci alegem $\frac{R2}{R1} \cong 9$.

SCHEMA BLOC A AMPLIFICATORULUI:



SCHEMA ELECTRICĂ A AMPLIFICATORULUI:



La intrarea circuitului se observă etajul diferențial, alcătuit din tranzistoarele bipolare NPN Q1 și Q2. Acesta este alimentat de sursa de curent(Q5), al cărei curent este dat de relația: $I_{c5} = \frac{2V_d - V_{be5}}{R_4}$. Deasupra diferențialului se află o oglindă de curent, alcătuită din 2 tranzistoare PNP identice (Q3 și Q4). Aceasta asigură că cei doi curenți de colector ai tranzistoarelor Q1 și Q2 sunt egali, pentru eficiență.

Următorul etaj este cel de amplificare cu tranzistorul bipolar PNP(Q7) în conexiune emitor-comun. Acesta primește curent de la sursa de curent(Q6).

Relația acestuia este: $I_{c6} = \frac{2V_d - V_{be6}}{R_6}$.

Condensatorul de compensare C1(470pF) asigură stabilitatea sporită a circuitului, modificând semnificativ banda de frecvență (Efectul Miller). Condensatorul de capacitate mai mare C2(1μF) are rolul de a deveni scurtcircuit în modelul de curent alternativ al circuitului; astfel, prin rezistența R7 nu va trece niciun curent alternativ datorită impedenței foarte mici a condensatorului.

Etajul de ieșire în clasă AB, configurație push-pull, este alcătuit din tranzistoarele Q8(NPN) și Q9(PNP) și generatorul BIAS, format din diodele D3 și D4, ce prepolarizează cele două tranzistoare.

Toate diodele cu jonctiuni p-n funcționează în regim de conducție, curenții prin ele fiind dați de relațiile:

$$ID1 = ID2 = \frac{V_{SS} - 2VD}{R5} \text{ și } ID3 = ID4 \cong Ic6, VD \cong 0.6V$$

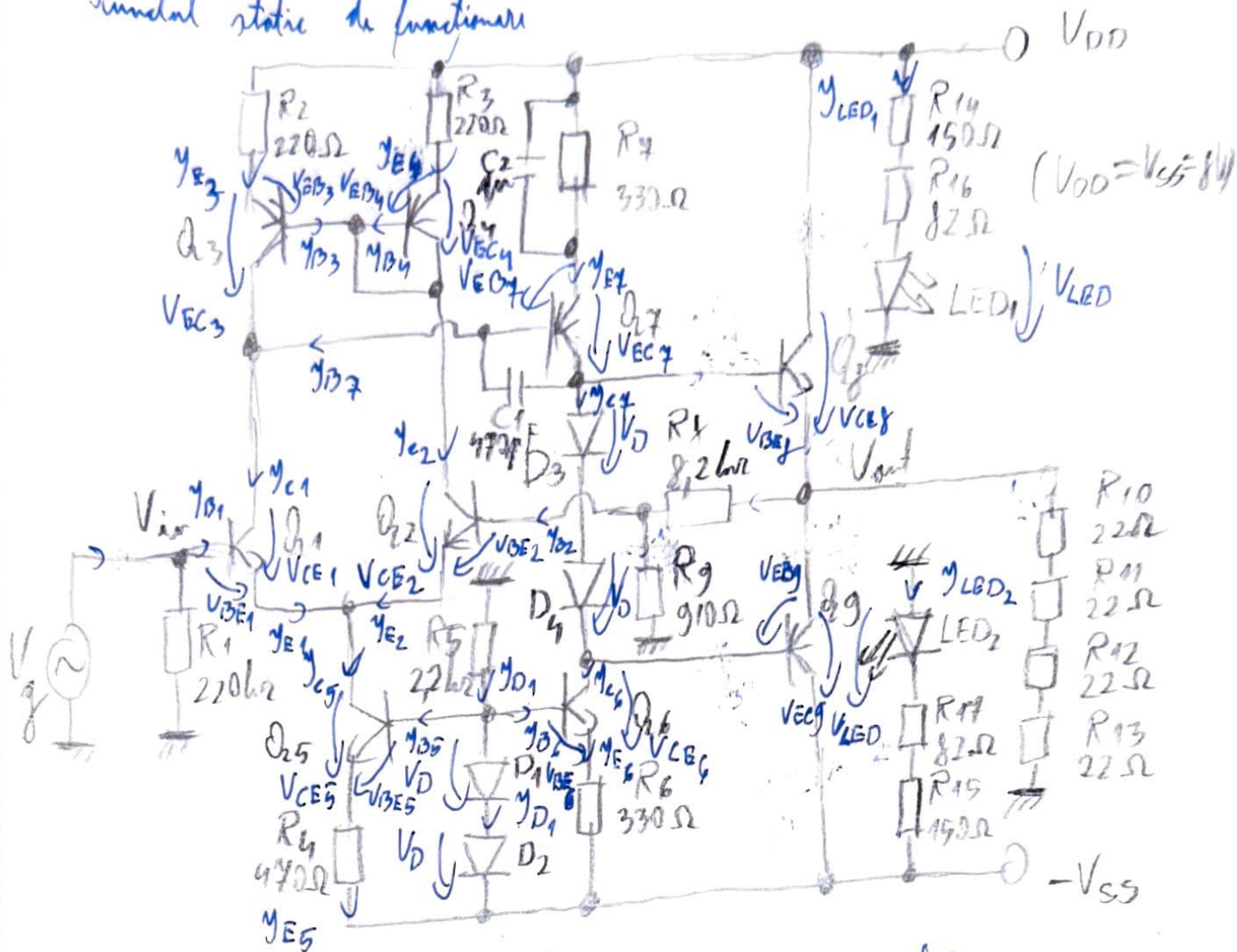
Diodele LED lucrează în conducție, curenții având următoarele relații:

$$I_{led1} = I_{led2} = \frac{V_{dd} - V_{led}}{R14 + R16}, V_{led} \cong 3V.$$

Rețeaua de reacție negativă este de tip serie-paralel și este alcătuită din rezistențele R8 și R9. Pentru satisfacerea cerinței am ales valorile rezistențelor $R8 = 8.2k\Omega$ și $R9 = 910\Omega$.

$$Av \cong \frac{1}{f_v} = 1 + \frac{R8}{R9} \cong 1 + 9.01 = 10.01$$

Punctul static de funcționare



$$\text{BC846B: } \begin{cases} \beta_F = 290 \\ V_{CEmax} = 65V, P_{tot} = 250mW \end{cases}$$

$$\text{B856B: } \begin{cases} \beta_F = 290 \\ V_{CEmax} = 65V, P_{tot} = 250mW \end{cases}$$

$$1N4148: V_D \approx 0,6V, \text{ SF-SMD2012B(LED}_1, \text{LED}_2): V_D \approx 3V$$

$$P.p. \text{ c\^a toate tranzistorele sunt \^n R.A.N(=) } \gamma_B = \frac{\gamma_C}{\beta_F}, V_{BE} = 0,6V; V_{EB} = 0,6V, \gamma_C \approx \gamma_E$$

$$P.p. \text{ c\^a toate diodele sunt direct polarizate(=) } V_D = 0,6V, V_{LED} = 3V$$

$$\text{Condensiunile le consider\^am goluri \^n C.C.; } P.p. \gamma_{D1} \ll \gamma_{B5}, \gamma_{B6}$$

$$\Rightarrow \gamma_{D1} R_5 + 2V_D = V_{SS} (=) \gamma_{D1} = \frac{V_{SS} - 2V_D}{R_5} = \frac{8 - 1,2}{2,2}$$

$$\gamma_{D1} = 3,09 \text{ mA}$$

$$V_{BE5} + \gamma_{E5} R_4 = 2V_D (=) \gamma_{E5} = \frac{2V_D - V_{BE5}}{R_4} = \frac{0,6}{0,97}$$

$$I_{E5} \approx I_{E6} = 1,276 \text{ mA}$$

$$\text{P.p. } I_{B4} \ll I_{C1}, I_{B4}, I_{B3} \ll I_{C2} \Rightarrow I_{C3} = I_{C1}, I_{C4} = I_{C2}$$

$$I_{C3} = I_0 \exp\left(\frac{V_{EB3}}{V_{TH}}\right), I_{C4} = I_0 \exp\left(\frac{V_{EB4}}{V_{TH}}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{I_{C3}}{I_{C4}} = \frac{I_0 \exp\left(\frac{V_{EB3}}{V_{TH}}\right)}{I_0 \exp\left(\frac{V_{EB4}}{V_{TH}}\right)} = 1 \Rightarrow I_{C3} = I_{C4}$$

$$\Rightarrow I_{C1} = I_{C2} = I_{C3} = I_{C4}, I_{E5} = I_{E1} + I_{E2}$$

$$\Rightarrow 2I_{C1} = I_{E5} \Rightarrow I_{C1} = I_{C2} = I_{C3} = I_{C4} = 638 \mu\text{A} = 0,638 \text{ mA}$$

In regime de C.C., $I_L \cdot R_L \approx 0 \Rightarrow$ Volt point virtuel de massi
 $I_{E8}, I_{E9} \approx 0$

$$I_{LED1}(R_{14} + R_{16}) + V_{LED1} = V_{OD} \Rightarrow I_{LED1} = \frac{V_{OD} - V_{LED1}}{R_{14} + R_{16}} = \frac{5}{0,232}$$

$$I_{LED1} = 21,551 \text{ mA}$$

$$I_{LED2} = \frac{V_{OD} - V_{LED2}}{R_{15} + R_{17}} = \frac{5}{0,232} \Rightarrow I_{LED2} = 21,551 \text{ mA}$$

$$V_{BE6} + I_{E6}R_6 = 2V_{OD} \Rightarrow I_{E6} = \frac{2V_{OD} - V_{BE6}}{R_6} = \frac{0,6}{0,33}$$

$$I_{E6} = 1,818 \text{ mA} = I_{C6}$$

$$\text{P.p. } I_{B9} \ll I_{E6}, I_{B8} \ll I_{C7} \Rightarrow I_{C7} = I_{C6} = 1,818 \text{ mA}$$

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_F} = \frac{0,638}{290} \Rightarrow I_{B2} = 2,2 \mu\text{A}$$

$$V_{BE1} - V_{BE2} + I_9 R_9 = 0 \Rightarrow I_9 = 0$$

$$V_{out \text{ pnt. virtual du m\u00e2r}} (=) V_{CE8} \approx V_{DD} = 8V$$

$$V_{EC9} \approx V_{SS} = 8V$$

$$V_{EC4} = V_{EB4} = 0,6V$$

$$(R_9 \approx 0) (=) V_{BE1} + V_{CE5} + I_{E5} R_9 = V_{SS}$$

$$(-) V_{CE5} = V_{SS} - V_{BE1} - I_{E5} R_9 = 8 - 0,6 - 0,6 = 6,8V$$

$$I_{E4} R_3 + V_{EC4} + V_{CE2} - V_{BE1} = V_{DD}$$

$$\Rightarrow V_{CE2} = 8 + 0,6 - 0,6 - 0,14 = 7,86V$$

$$I_{E3} R_2 + V_{EC3} - V_{EB4} - I_{E4} R_7 = 0$$

$$\Rightarrow V_{EC3} = I_{E4} R_7 + V_{EB4} - I_{E3} R_2 = 0,6 + 0,6 - 0,14 = 1,06V$$

$$V_{CE8} + V_{EB9} + V_{CE6} + I_{E6} R_6 = V_{DD} + V_{SS}$$

$$\Rightarrow V_{CE6} = V_{DD} + V_{SS} - V_{EB9} - V_{CE8} - I_{E6} R_6$$

$$= 16 - 0,6 - 8 - 0,6$$

$$V_{CE6} = 6,8V \quad I_{E5} R_2 + V_{EC3} + V_{CE1} - V_{BE1} = V_{DD}$$

$$\Rightarrow V_{CE1} = 8 + 0,6 - 1,06 - 0,14$$

$$I_{E7} R_7 + V_{EC4} + 2V_{DD} + V_{CE6} + I_{E6} R_6 = V_{DD} + V_{SS}$$

$$V_{CE1} = 7,4V$$

$$\Rightarrow V_{EC7} = 16 - 2 \cdot 0,6 - 6,8 - 0,6 - 0,6$$

$$V_{EC7} = 6,8V$$

$$V_{EC} \geq V_{EB} \quad V_{CE} \geq V_{BE} \quad (=) \text{transistorele sunt \u00een R.A.N.} (=) \beta = \frac{\beta_c}{\beta_f}$$

(3)

Power:

$$R_1: P_{R_1} \approx 0 (< 125 \text{ mW})$$

$$R_2: P_{R_2} = I_{E_3}^2 \cdot R_2 = 89,549 \mu\text{W} (< 125 \text{ mW})$$

$$R_3: P_{R_3} = I_{E_4}^2 \cdot R_3 = 89,546 \mu\text{W} (< 125 \text{ mW})$$

$$R_4: P_{R_4} = I_{E_5}^2 \cdot R_4 = 0,76 \text{ mW} (< 125 \text{ mW})$$

$$R_5: P_{R_5} = I_{D_1}^2 \cdot R_5 = 21 \text{ mW} (< 125 \text{ mW})$$

$$R_6: P_{R_6} = I_{E_6}^2 \cdot R_6 = 1,09 \text{ mW} (< 125 \text{ mW})$$

$$R_7: P_{R_7} = I_{E_7}^2 \cdot R_7 = 1,09 \text{ mW} (< 125 \text{ mW})$$

$$R_8: P_{R_8} = I_{B_2}^2 \cdot R_8 = 39,68 \text{ mW} (< 125 \text{ mW})$$

$$R_9: P_{R_9} \approx 0 \text{ W} (< 125 \text{ mW})$$

$$R_{10}, R_{11}, R_{12}, R_{13}: P_{R_{10}} = P_{R_{11}} = P_{R_{12}} = P_{R_{13}} \approx 0 \text{ W} (< 125 \text{ mW})$$

$$R_{14}: P_{R_{14}} = I_{LED_1}^2 \cdot R_{14} = 69,66 \text{ mW} (< 125 \text{ mW})$$

$$R_{15}: P_{R_{15}} = I_{LED_2}^2 \cdot R_{15} = 69,66 \text{ mW} (< 125 \text{ mW})$$

$$R_{16}: P_{R_{16}} = I_{LED_1}^2 \cdot R_{16} = 38,08 \text{ mW} (< 250 \text{ mW})$$

$$R_{17}: P_{R_{17}} = I_{LED_2}^2 \cdot R_{17} = 38,08 \text{ mW} (< 250 \text{ mW})$$

$$Q_1: P_{Q_1} = I_{C_1} \cdot V_{CE_1} = 9,72 \text{ mW} (< 250 \text{ mW})$$

$$Q_2: P_{Q_2} = I_{C_2} \cdot V_{CE_2} = 5,01 \text{ mW} (< 250 \text{ mW})$$

$$Q_3: P_{Q_3} = I_{C_3} \cdot V_{CE_3} = 676,28 \mu\text{W} (< 250 \text{ mW})$$

$$Q_4: P_{Q_4} = I_{C_4} \cdot V_{CE_4} = 382,8 \mu\text{W} (< 250 \text{ mW})$$

$$Q_5: P_{Q5} = I_{C5} \cdot V_{CE5} = 8,67 \text{ mW} (< 250 \text{ mW})$$

$$Q_6: P_{Q6} = I_{C6} \cdot V_{CE6} = 12,36 \text{ mW} (< 250 \text{ mW})$$

$$Q_7: P_{Q7} = I_{C7} \cdot V_{CE7} = 12,36 \text{ mW} (< 250 \text{ mW})$$

$$Q_8: P_{Q8} = I_{C8} \cdot V_{CE8} \approx 0 \text{ W} (< 250 \text{ mW})$$

$$Q_9: P_{Q9} = I_{C9} \cdot V_{CE9} \approx 0 \text{ W} (< 250 \text{ mW})$$

$$D_1: P_{D1} = I_{D1} \cdot V_D = 1,85 \text{ mW} (< 500 \text{ mW})$$

$$D_2: P_{D2} = I_{D2} \cdot V_D = 1,85 \text{ mW} (< 500 \text{ mW})$$

$$D_3: P_{D3} = I_{D3} \cdot V_D = 1,09 \text{ mW} (< 500 \text{ mW})$$

$$D_4: P_{D4} = I_{D4} \cdot V_D = 1,09 \text{ mW} (< 500 \text{ mW})$$

$$\text{LED1}: P_{\text{LED1}} = I_{\text{LED1}} \cdot V_{\text{LED1}} = 69,65 \text{ mW} (< 114 \text{ mW})$$

$$\text{LED2}: P_{\text{LED2}} = I_{\text{LED2}} \cdot V_{\text{LED2}} = 69,65 \text{ mW} (< 114 \text{ mW})$$