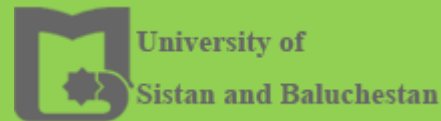
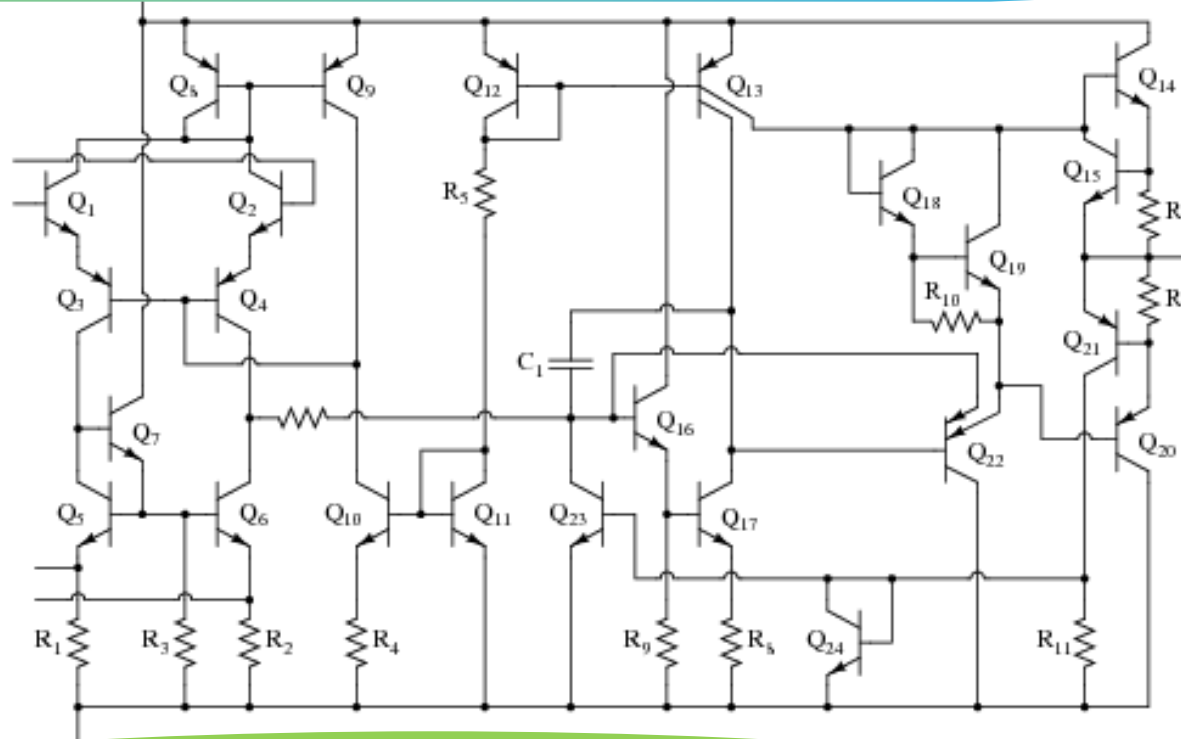


# Analog Electronics (Electronics III)

By: M. Shahraki

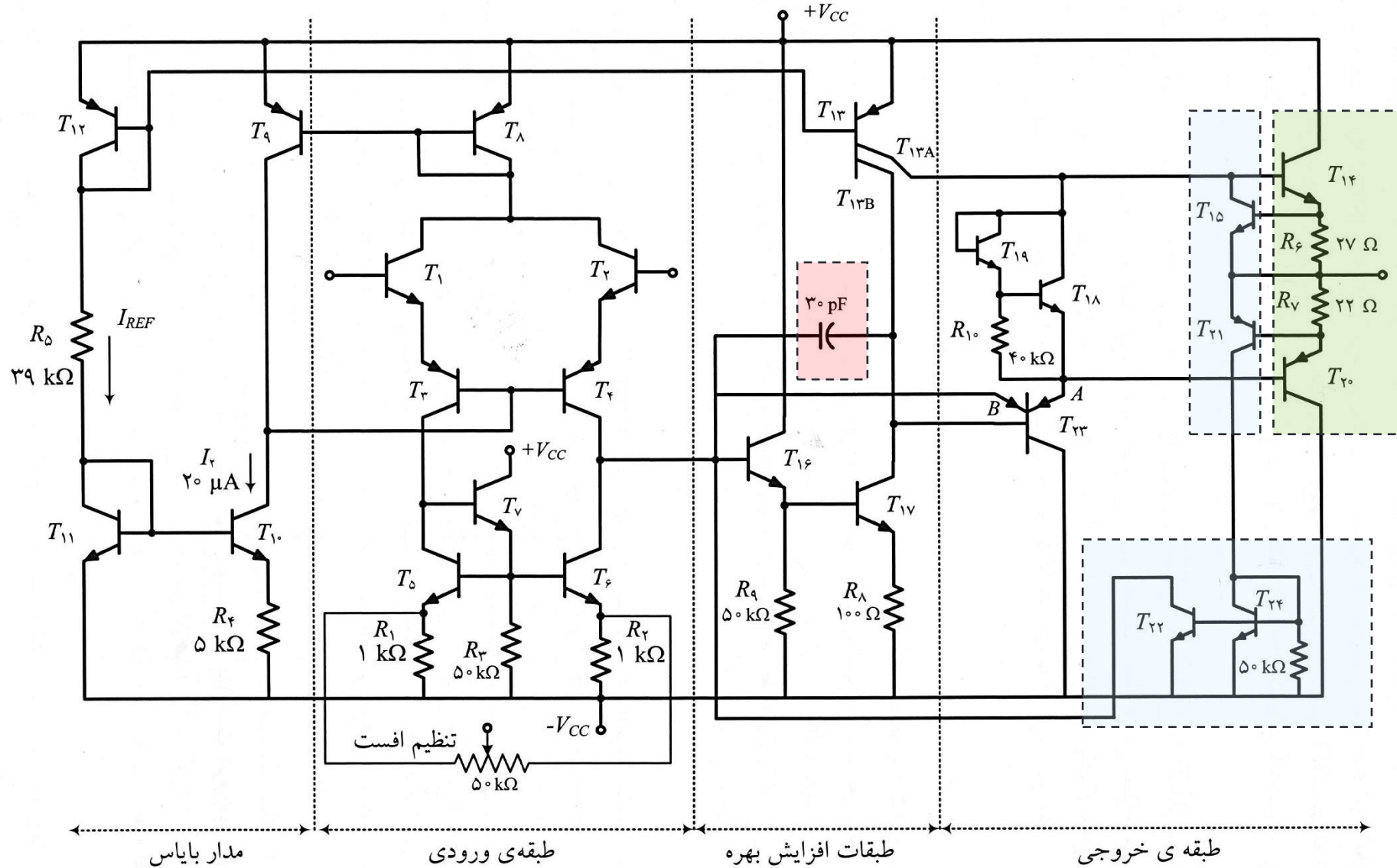


University of  
Sistan and Baluchestan

University of Sistan & Baluchestan  
Faculty of Electrical and Computer Engineering  
Department of Electrical & Electronics Engineering

# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



LM 741

$$A_{V_{OL}} > 200000$$

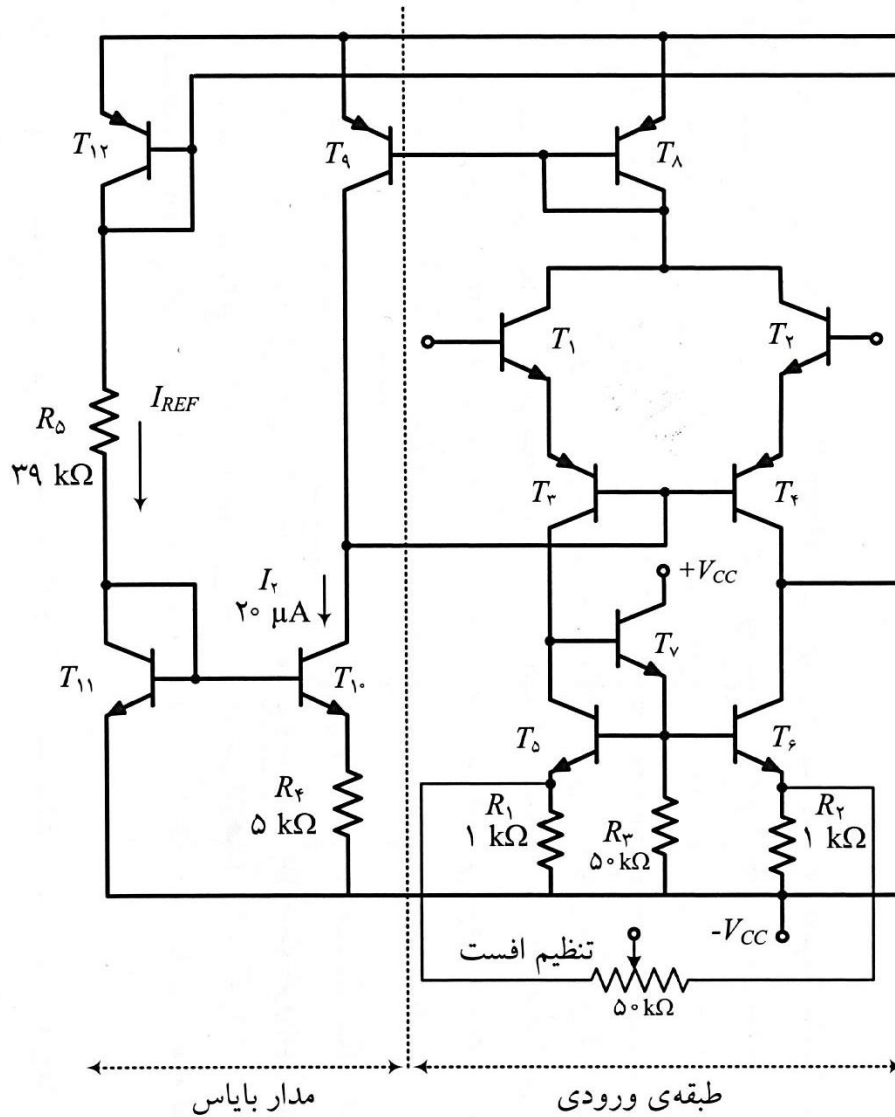
- تقویت کننده کلاس AB
- مدار حفاظت
- جبران ساز داخلی

$$V_{in} = 0 \rightarrow V_{out} = 0$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی کیفی LM 741: مدار بایاس

$T_{11}$  و  $T_{12}$  مدار بایاس.

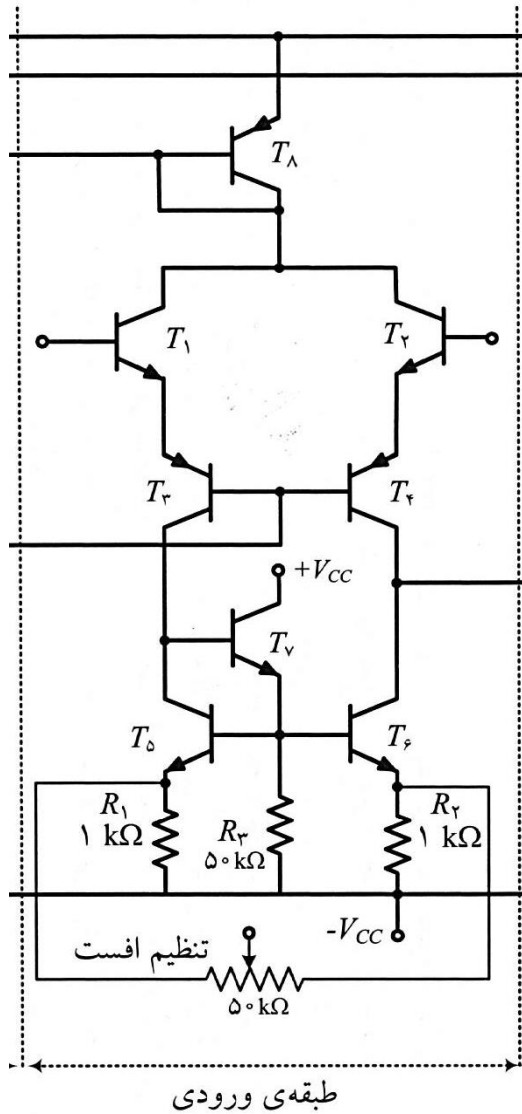
$T_{10}$  و  $T_{11}$  منبع جریان ویدلر با مقاومت خروجی زیاد

این منبع جریان بیس ترانزیستورهای  $T_3$  و  $T_4$  و همچنین تکرار کننده جریان شامل  $T_8$  و  $T_9$  را تغذیه می کند.



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی کیفی LM 741: طبقه تفاضلی ورودی

$T_1$  و  $T_2$  و  $T_3$  و  $T_4$  تقویت کننده کاسکود  
 $T_1$  و  $T_2$  امیتر فالور (کلکتور مشترک): مقاومت ورودی بزرگ (نقش بافر)  
 $T_3$  و  $T_4$  بیس مشترک: بهره طبقه زیاد

$T_5$  و  $T_6$  و  $T_7$  منبع جریان بار فعال با جریان تثبیت شده نسبت به  $\beta$

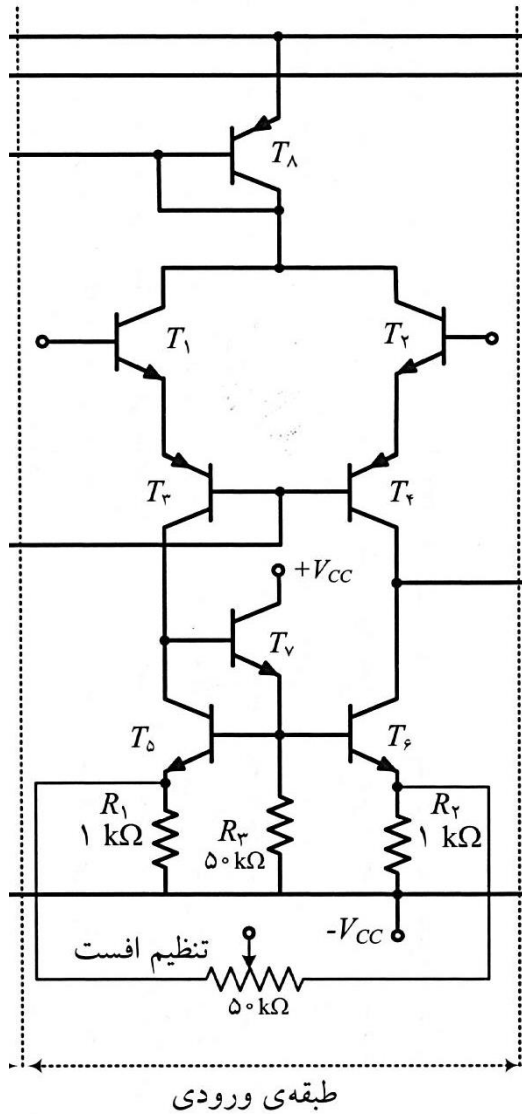
وجود مقاومت های  $1 \text{ k}\Omega$  سبب افزایش مقاومت خروجی و افزایش بهره می شود.

امیتر  $T_5$  و  $T_6$  به عنوان پایه تنظیم آفست به کار می روند.



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

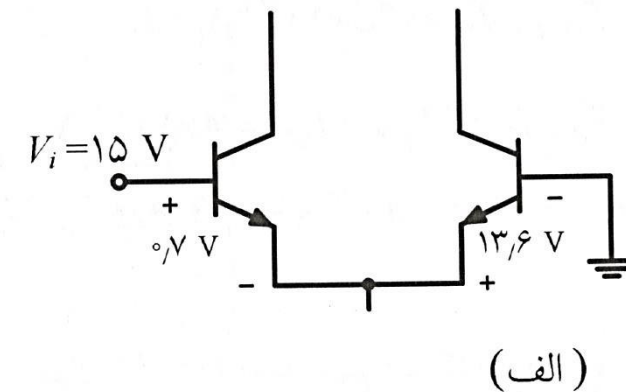
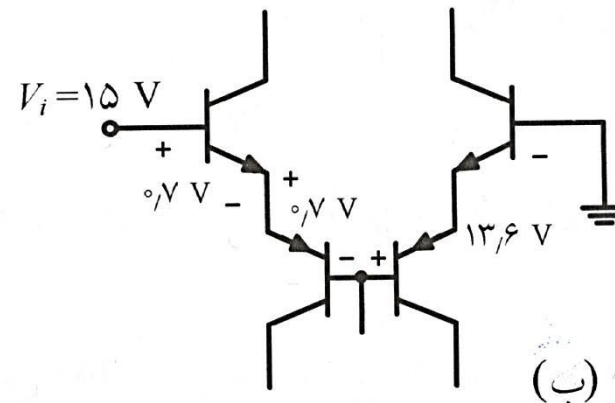


بررسی کیفی LM 741: طبقه تفاضلی ورودی

$T_1$  و  $T_2$  و  $T_3$  و  $T_4$  تقویت کننده کاسکود

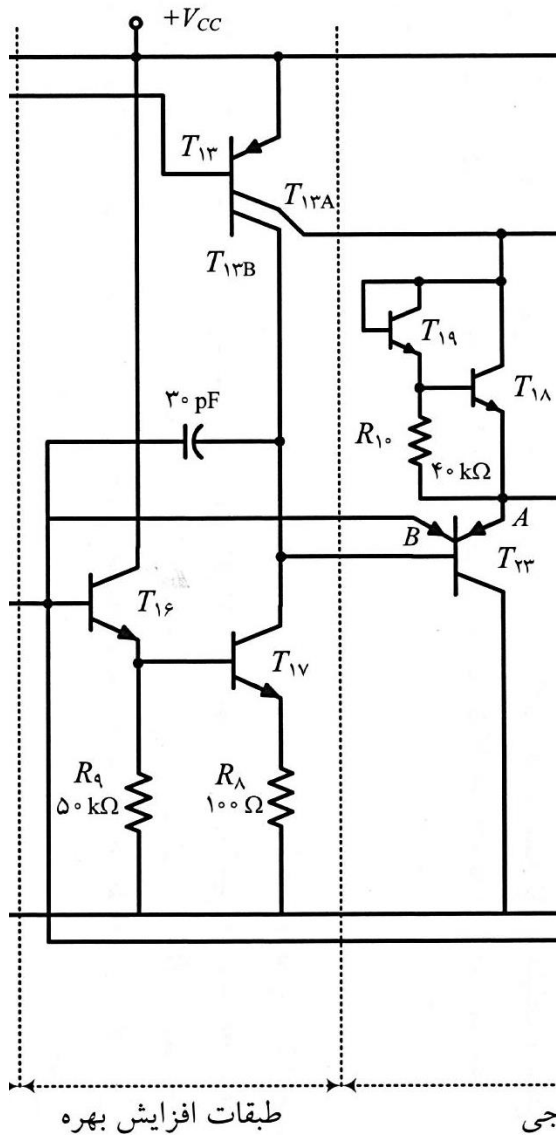
علت این ترکیب خاص: اگر دامنه سیگنال ورودی زیاد باشد،  $T_2$  با ولتاژ زیادی در بایاس معکوس است. که سبب آسیب دیدن آن می شود.

در ترکیب کاسکود، ترانزیستور  $T_4$  در بایاس معکوس است که ولتاژ شکست معکوس خیلی زیاد دارد. (حداقل ۵۰ ولت)



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی کیفی LM 741: طبقه افزایش بهره

$T_{16}$  کلکتور مشترک است که نقش بافر دارد  
 $T_{17}$  تقویت کننده با بار فعال که بار کلکتور آن بخشی از ترانزیستور  $T_{13}$  یعنی  $T_{13B}$  است.

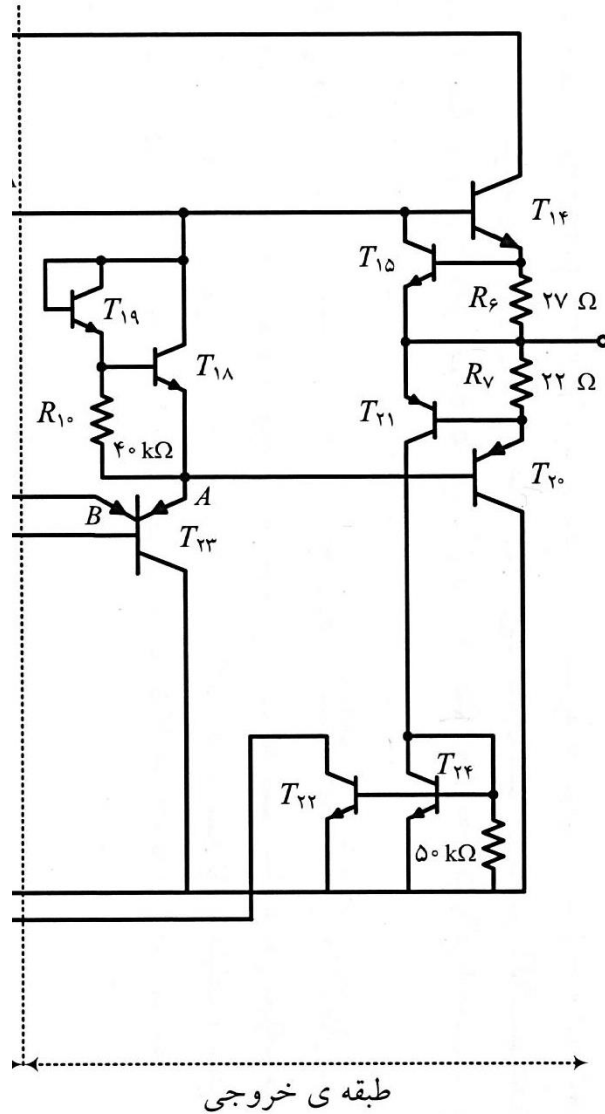
مقاومت  $R_8$  به منظور افزایش مقاومت ورودی  $T_{16}$  و افزایش بهره طبقه تفاضلی است.  
 تغییر سطح DC مدار نیز توسط  $T_{16}$  انجام می شود.

$T_{13A}$  منبع بایاس طبقه خروجی با نسبت سطح مقطع  $0.25$  و  $T_{13B}$  با نسبت سطح مقطع  $0.75$  بار فعال کلکتور  $T_{17}$  است.



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی کیفی LM 741: طبقه خروجی

$T_{14}$  و  $T_{20}$  تقویت کننده کلاس AB  
 $T_{18}$  و  $T_{19}$  ترانزیستورهای  $T_{14}$  و  $T_{20}$  را در آستانه بایاس قرار می دهد.

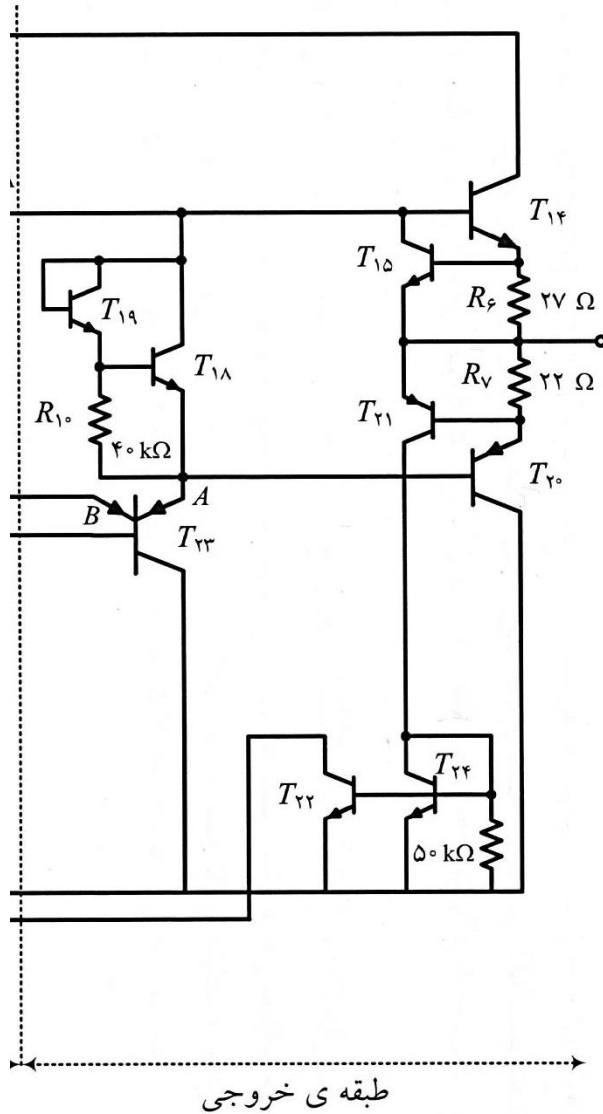
$T_{23}$  دارای دو امیتر است. یکی از امیترها نقش حفاظتی دارد.  
 این ترانزیستور کلکتور مشترک بوده و نقش بافر را ایفا می نماید.





# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی کیفی LM 741: طبقه خروجی (مدار حفاظت)

$T_{21}$  و  $T_{15}$  نقش حفاظتی دارند  
اگر افت ولتاژ روی  $R_6$  زیاد شود،  $T_{15}$  وصل شده و جریان خروجی تقویت کننده را تا حداکثر مقدار زیر محدود می کند.

$$I_o(\max) = \frac{0.6V}{27\Omega} \approx 22mA$$

اگر افت ولتاژ روی  $R_7$  زیاد شود،  $T_{21}$  وصل شده و جریان خروجی محدود خواهد شد. با افزایش جریان کلکتور  $T_{21}$  افت ولتاژ دو سر مقاومت 50 کیلو اهم زیاد شده ترانزیستورهای  $T_{22}$  و  $T_{24}$  ولتاژ بیس کلکتور آنها افزایش می یابد، اما چون ولتاژ امیتر کلکتور آنها ناچیز است به اشباع می روند. بیس  $T_{16}$  و امیتر دوم  $T_{23}$  زمین شده و بهره و در نتیجه جریان خروجی کاهش می یابد.





# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط DC تقویت کننده LM 741: مشخصات ترانزیستورها

$$nnp: V_{BE} = 0.7V \text{ (Active)}, \beta_n = 200, I_{Sn} = 10^{-14} A, V_{AN} = 125V, V_T = 26mV$$

$$pnp: V_{BE} = 0.7V \text{ (Active)}, \beta_p = 50, I_{Sp} = 10^{-14} A, V_{AP} = 50V,$$

$$T_{13A}: I_S = 0.25 \times 10^{-14} A, \quad T_{13B}: I_S = 0.75 \times 10^{-14} A$$

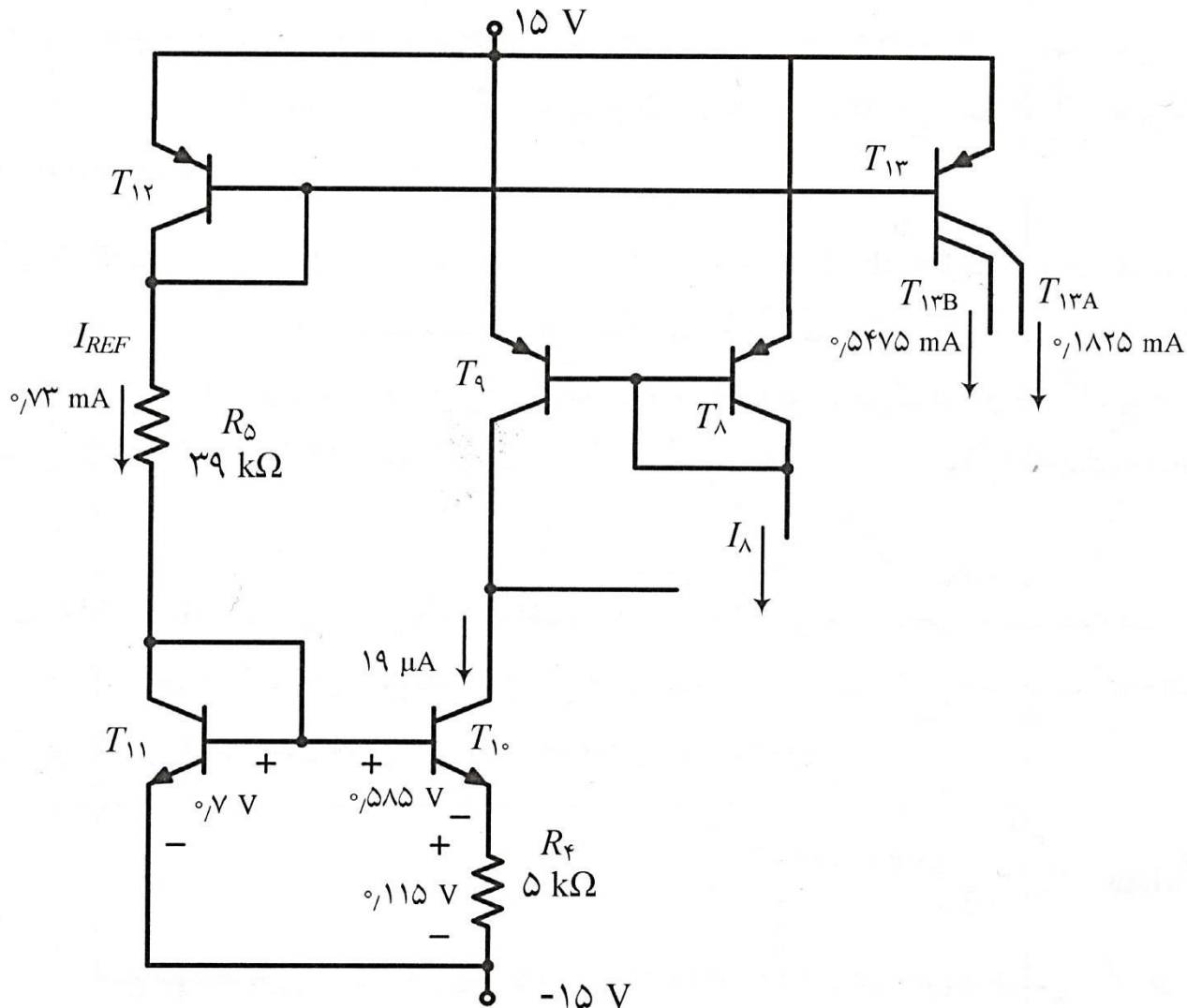
$$T_{14}, T_{20}: I_{S14} = I_{S20} = 3 \times 10^{-14} A$$





# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی شرایط DC تقویت کننده LM 741: مدار بایاس

$$V_{BE(T_{12})} = V_{BE(T_{13})} \quad I_{E(T_{13})} = I_{E(T_{12})} \approx 0.73\text{ mA}$$

$$I_{S(T_{13A})} = \frac{1}{4} I_{S(T_{12})} \quad I_{S(T_{13B})} = \frac{3}{4} I_{S(T_{12})}$$

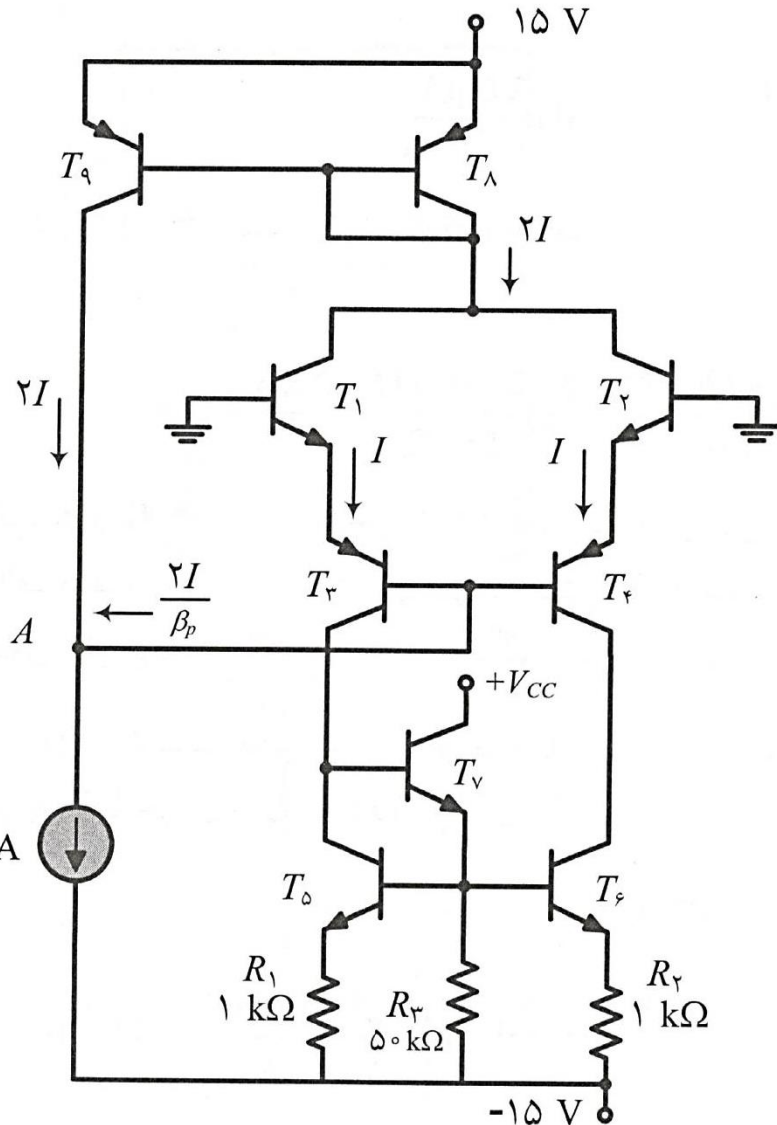
$$I_{C(T_{13A})} = \frac{1}{4} I_{C(T_{12})} = 0.1825\text{ mA}$$

$$I_{C(T_{13B})} = \frac{3}{4} I_{C(T_{12})} = 0.5475\text{ mA}$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی شرایط DC تقویت کننده LM 741: طبقه ورودی

$$2I + \frac{2I}{\beta_p} = 19 \mu A \quad I \approx 9.5 \mu A$$

$$I_{C(T_7)} \approx I_{E(T_7)} = 2 \frac{I}{\beta_n} + \frac{V_{BE(T_6)} + R_2 I}{R_3}$$

$T_7$  پایداری نقطه کار طبقه تفاضلی و مستقل شدن منبع جریان از  $\beta$

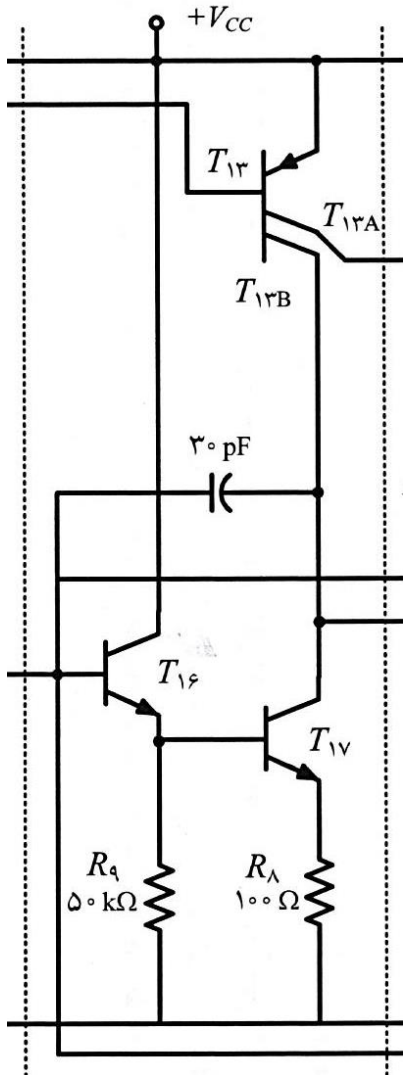
$$V_{BE(T_6)} = V_T \ln \frac{I_{C(T_6)}}{I_S} = 26 mV \ln \frac{9.5 \mu A}{10^{-14}} = 537.5 mV$$

$$I_{C(T_7)} \approx I_{E(T_7)} = 2 \frac{9.5}{200} + \frac{537.5 mV + 1 k\Omega \times 9.5 \mu A}{50 k\Omega} = 11.35 \mu A$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی شرایط DC تقویت کننده LM 741: طبقه افزایش بهره

$$I_{C(T_{17})} = I_{C(T_{13B})} = 0.5475\text{mA}$$

$$V_{BE(T_{17})} = V_T \ln \frac{I_{C(T_{17})}}{I_S} = 26\text{mV} \ln \frac{0.5475\text{mA}}{10^{-14}} = 642.8\text{mV}$$

$$I_{C(T_{16})} \approx I_{E(T_{16})} = I_{B(T_{17})} + \frac{I_{E(T_{17})} R_8 + V_{BE(T_{17})}}{R_9}$$

$$= \frac{0.5475\text{mA}}{200} + \frac{0.5475\text{mA} \times 100 + 642.8\text{mV}}{50\text{k}\Omega} = 16.69\text{ }\mu\text{A}$$

$$V_{CE(T_6)} = 1.8 \text{ Active}$$

$$V_{B(T_{16})} = V_{C(T_6)} = -15 + (I_{E(T_{16})} - I_{B(T_{17})}) R_9 + V_{BE(T_{16})}$$

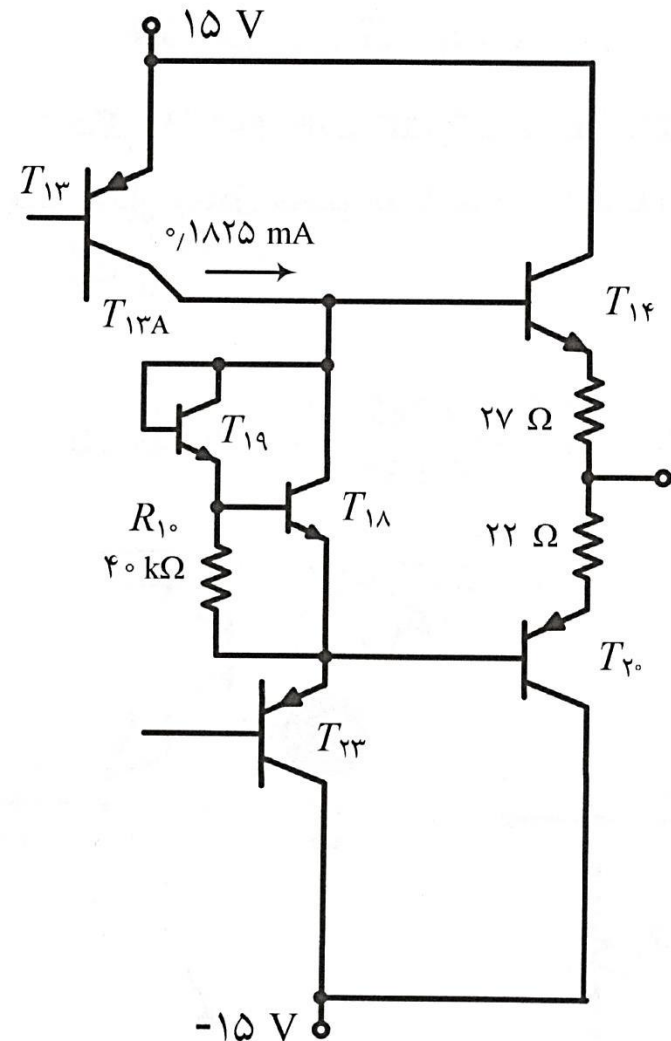
$$= -15 + \left( 16.69\text{ }\mu\text{A} - \frac{0.5475\text{mA}}{200} \right) \times 50\text{k}\Omega + 26\text{mV} \ln \frac{16.69\text{ }\mu\text{A}}{10^{-14} \text{ A}} = -13.26\text{V}$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط DC تقویت کننده LM 741: طبقه خروجی



$$\text{Assume: } I_{B(T_{14})}, I_{B(T_{20})} \ll I_{C(T_{23})}$$

$$I_{C(T_{23})} \approx I_{E(T_{23})} = I_{C(T_{13A})} = 0.1825$$

$$\text{Assume: } V_{BE(T_{18})} = 600\text{mV}$$

$$I_{R10} = \frac{600\text{mV}}{40\text{k}\Omega} = 15\mu\text{A}$$

$$I_{C(T_{18})} \approx I_{E(T_{18})} = 182.5 - 15 = 167.5\mu\text{A}$$

Modified Values:

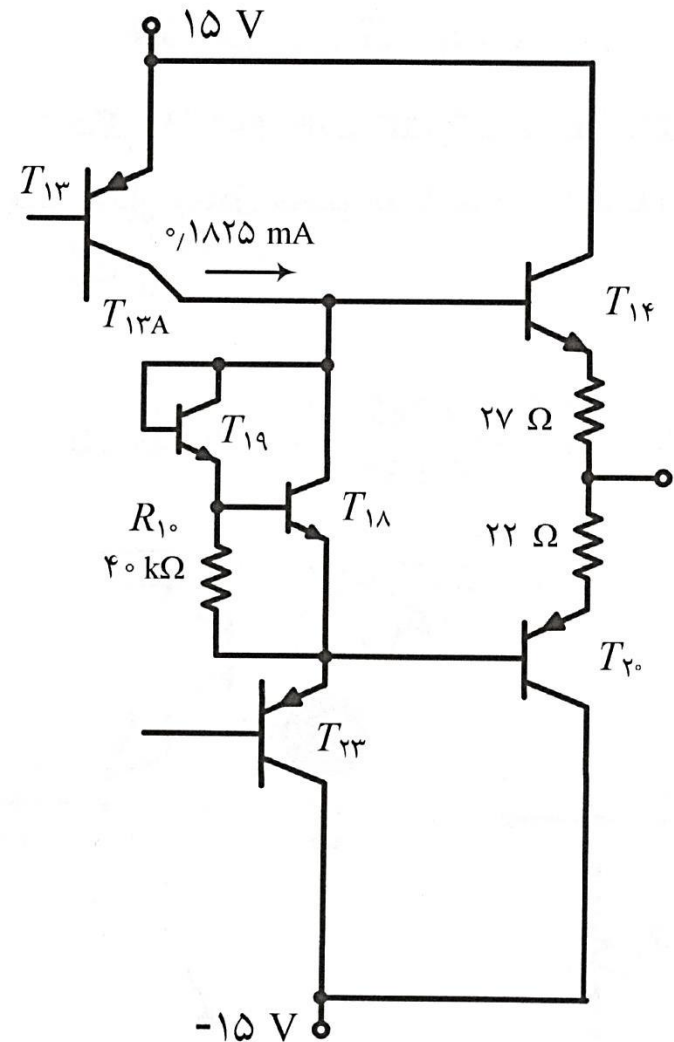
$$V_{BE(T_{18})} = 26\text{mV} \times \ln \frac{167.5\mu\text{A}}{10^{-14}\text{A}} = 612\text{mV}$$

$$I_{R10} = \frac{588\text{mV}}{40\text{k}\Omega} = 14.7\mu\text{A}$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی شرایط DC تقویت کننده LM 741: طبقه خروجی  
*Exact Values:*

$$V_{BE(T_{18})} = V_T \ln \frac{I_{C(T_{18})}}{I_{S(T_{18})}} = R_{10} (I_{C(T_{23})} - I_{C(T_{18})})$$

$$26mV \ln \frac{I_{C(T_{18})}}{10^{-14}} = 40k\Omega (0.1825mA - I_{C(T_{18})})$$

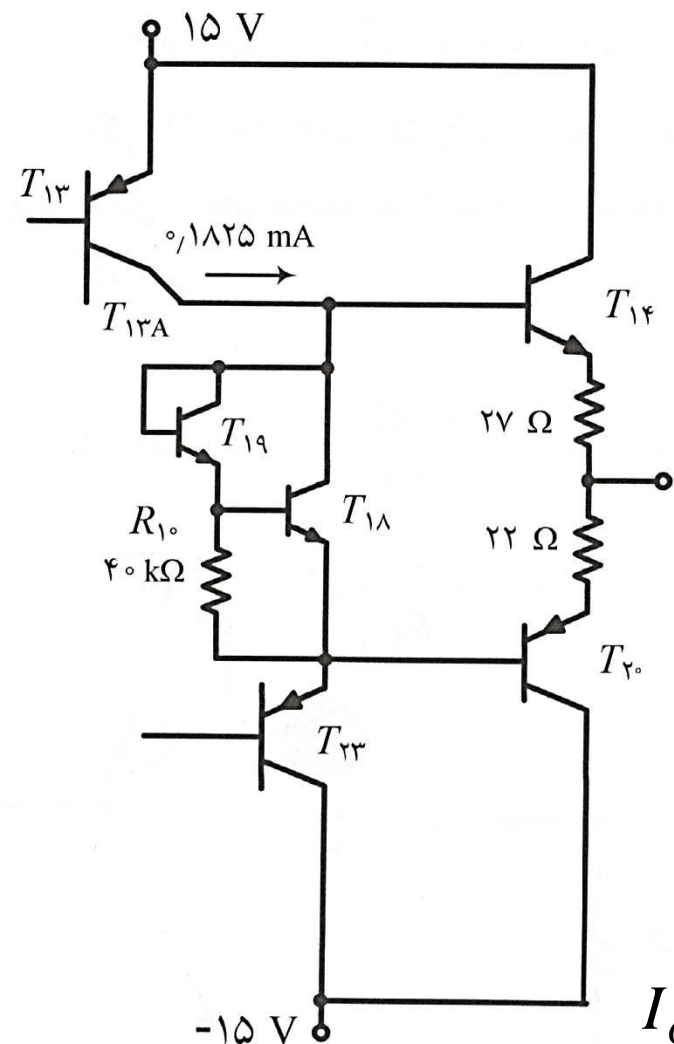
$$I_{C(T_{18})} = 167.2\mu A \quad V_{BE(T_{18})} = 26mV \times \ln \frac{167.2\mu A}{10^{-14} A} = 612mV$$





# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی شرایط DC تقویت کننده LM 741: طبقه خروجی

$$I_{C(T_{19})} = I_{E(T_{19})} = I_{B(T_{18})} + I_{R10} = \frac{I_{C(T_{18})}}{200} + \frac{V_{BE(T_{18})}}{40k\Omega} = 16.1\mu A$$

$$V_{BE(T_{19})} = 26mV \times \ln \frac{16.1\mu A}{10^{-14} A} = 551mV$$

$$V_{CE(T_{18})} = V_{BE(T_{18})} + V_{BE(T_{19})} = 1.163V$$

$$V_{CE(T_{18})} \approx V_{BE(T_{14})} + V_{BE(T_{20})} \quad 1.163 = V_T \ln \left( \frac{I_{C(T_{14})}}{I_{S(T_{14})}} + \frac{I_{C(T_{20})}}{I_{S(T_{20})}} \right)$$

$$I_{C(T_{14})} = I_{C(T_{20})} = 3 \times 10^{-14} \times \exp \left( 0.5 \times \frac{1.163V}{26mV} \right) = 154.9\mu A$$

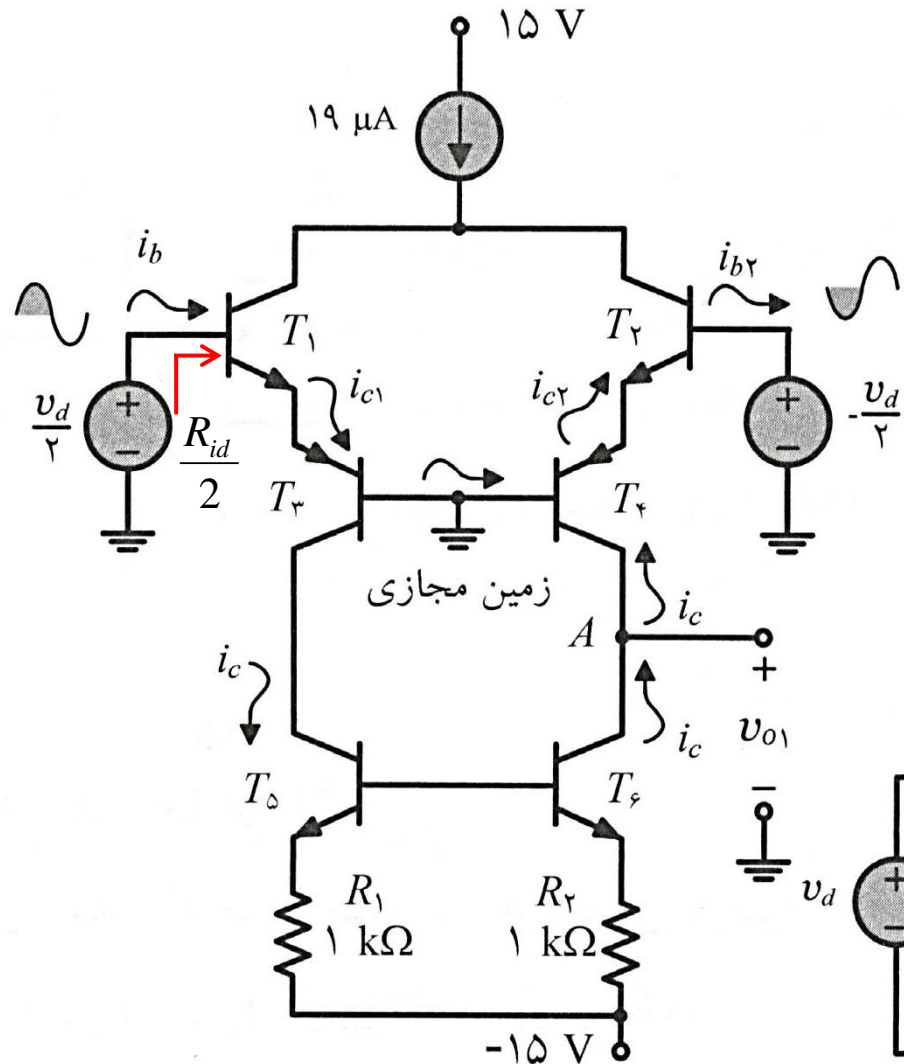
جریان آستانه بایاس



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه ورودی

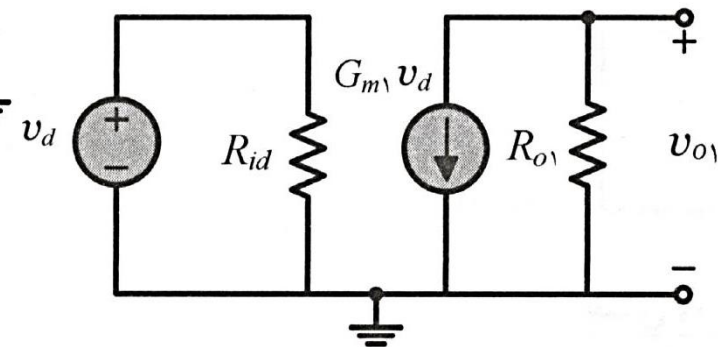


$$R_{id} = 2h_{ie1} + 2(1 + \beta_n) \frac{h_{ie3}}{\beta_p} \quad I_{CQ} \approx 9.5 \mu A$$

$$= 2\beta_n \frac{V_T}{I_{CQ}} + 2(1 + \beta_n) \frac{1}{\beta_p} \beta_p \frac{V_T}{I_{CQ}} \approx 4\beta_n \frac{V_T}{I_{CQ}}$$

$$R_{id} = 4 \times 200 \times \frac{26mV}{9.5 \mu A} = 2.19M\Omega$$

بهره هدایت انتقالی، در شرایطی که خروجی اتصال کوتاه است.



$$G_{m1} = \frac{i_c}{v_d} = \frac{i_c}{2(v_d/2)} = \frac{g_m}{2}$$

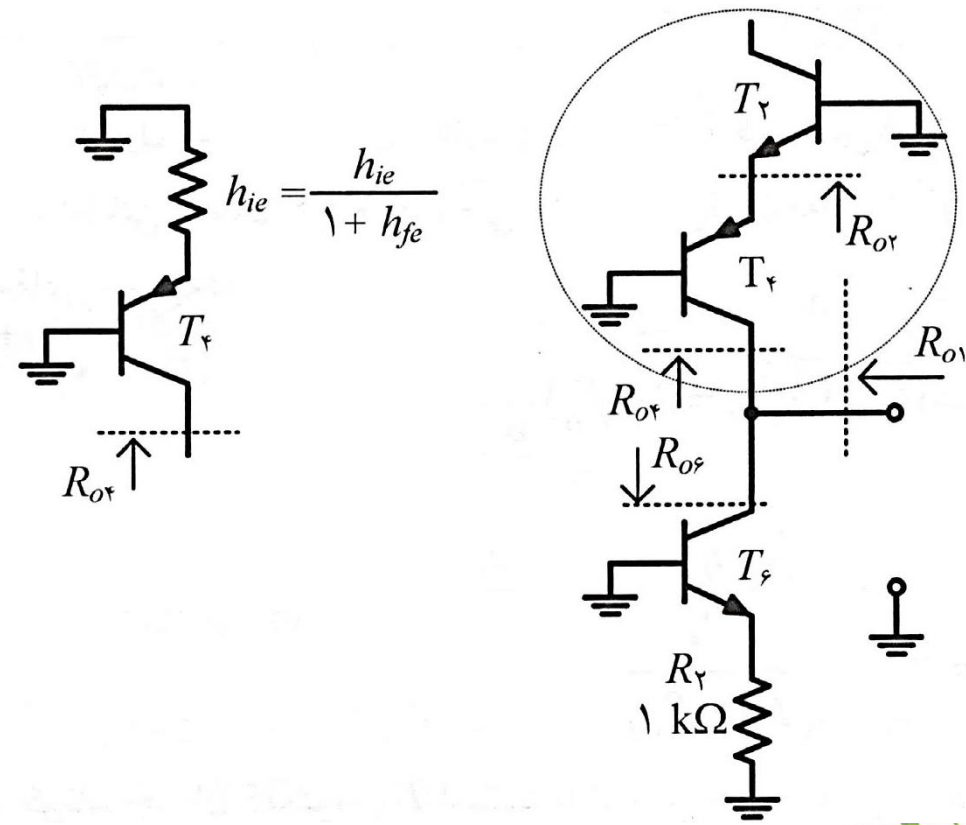
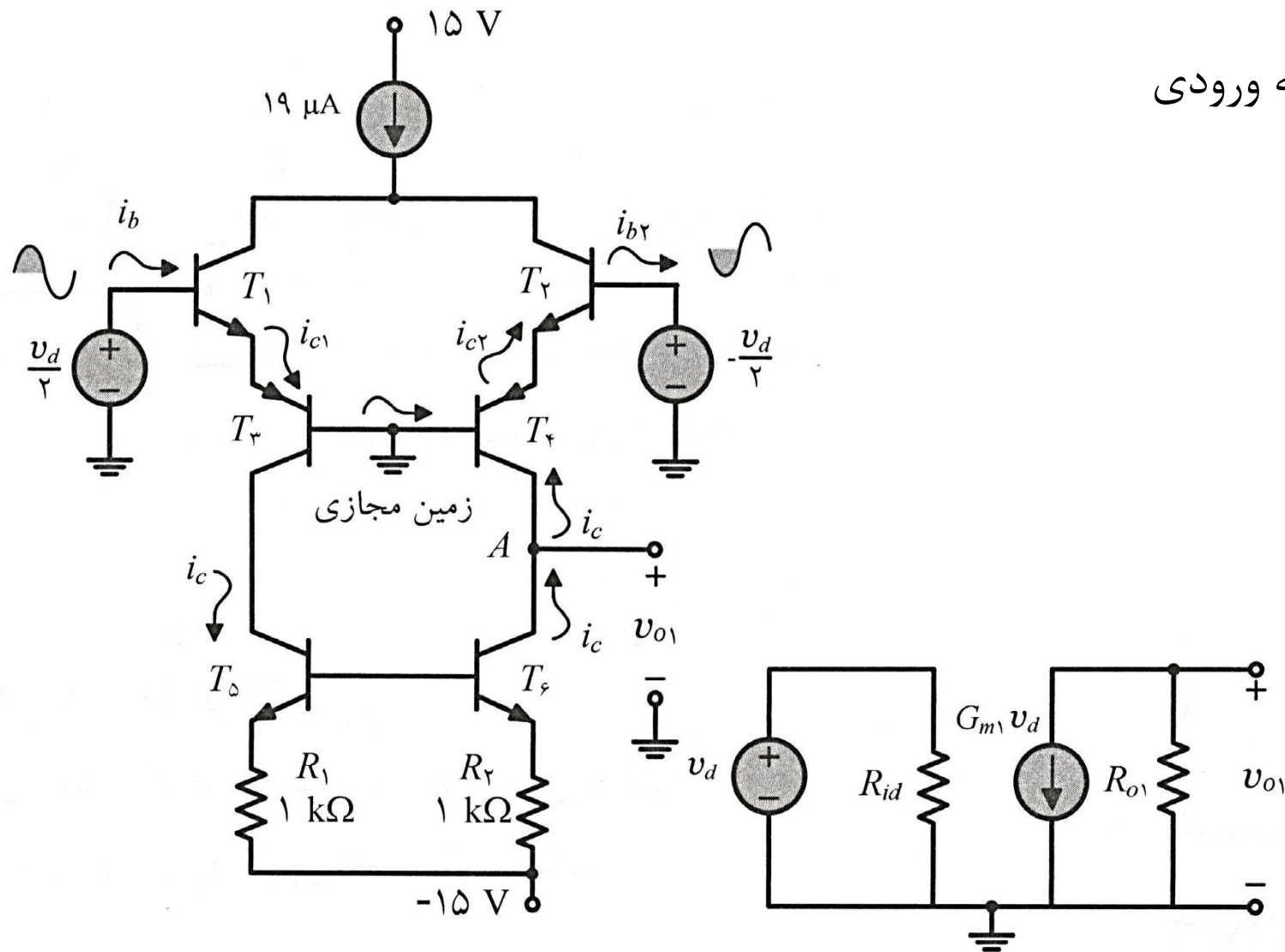
$$G_{m1} = \frac{g_{m(T4)}}{2} = \frac{I_{CQ}}{2V_T} = 0.1827 \frac{mA}{V}$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

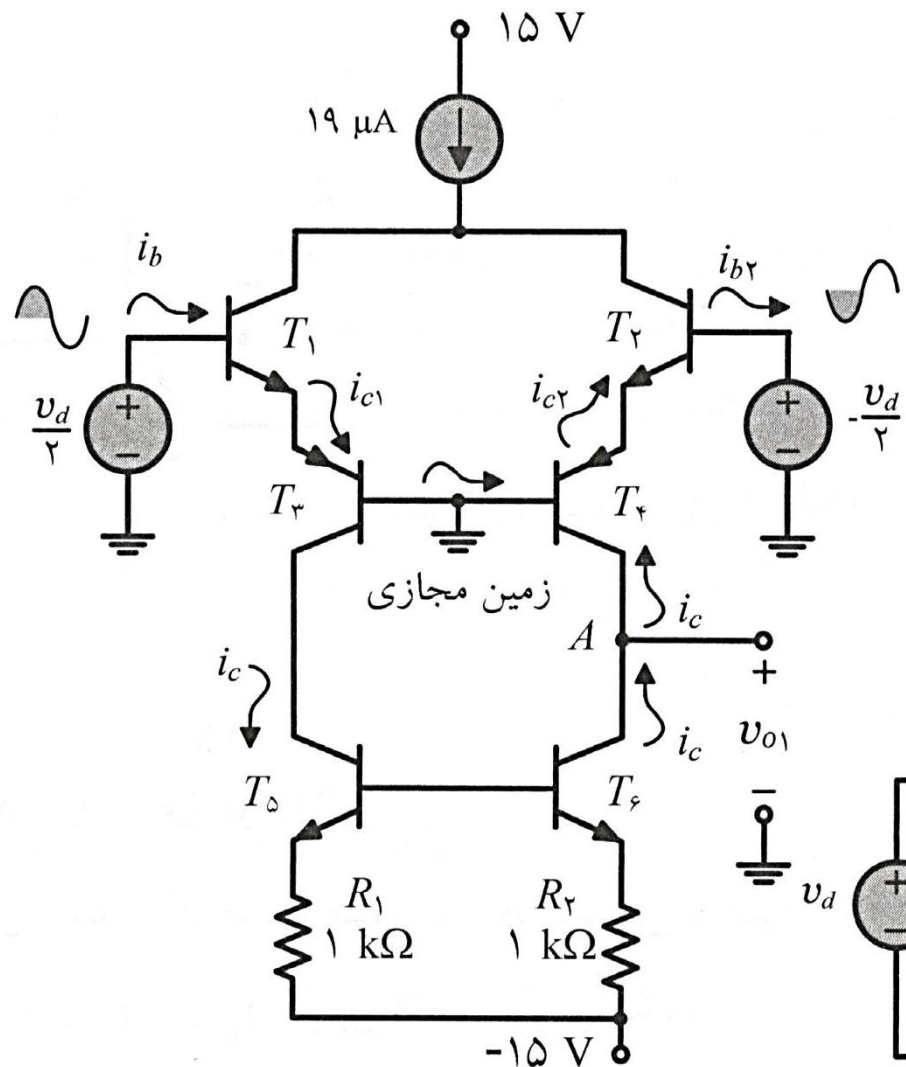
بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه ورودی  
محاسبه مقاومت خروجی



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه ورودی



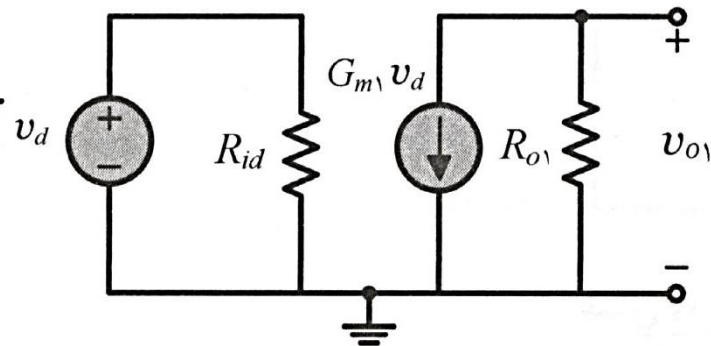
$$r_{o6} = \frac{V_{AN}}{I_{CQ}} = \frac{125V}{9.5\mu A} = 13.158M\Omega$$

$$r_{o4} = \frac{V_{AP}}{I_{CQ}} = \frac{50V}{9.5\mu A} = 5.26M\Omega$$

$$h_{ie6} = \beta_n \frac{V_T}{I_{CQ}} = 200 \frac{26mV}{9.5\mu A} = 547k\Omega$$

$$h_{ie4} = \beta_p \frac{V_T}{I_{CQ}} = 137k\Omega$$

$$R_{o(T_6)} = r_{o6} \left(1 + \frac{\beta_n R_2}{h_{ie6} + R_2}\right) \approx r_{o6} \left(1 + \frac{\beta_n R_2}{h_{ie6}}\right) = 17.96M\Omega$$



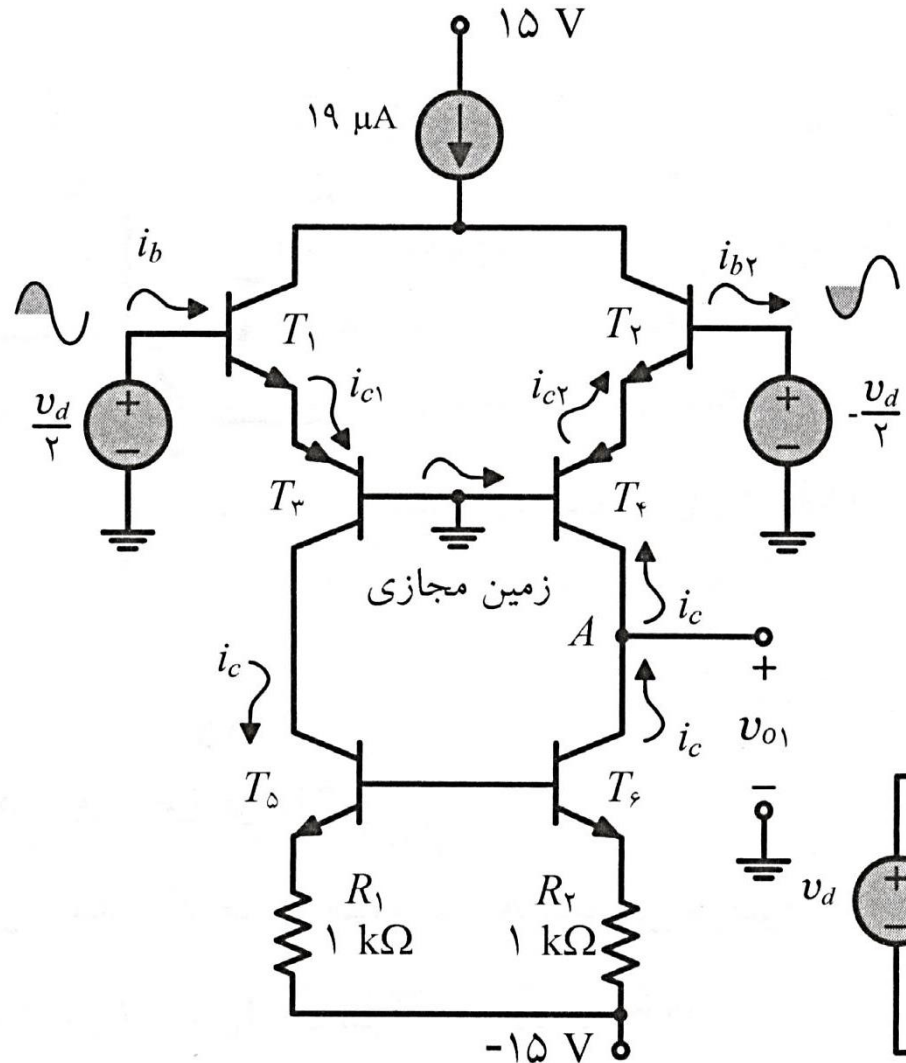
$$R_{o(T_4)} = r_{o4} \left(1 + \frac{\beta_p \frac{h_{i2}}{1 + \beta_n}}{h_{ie4} + \frac{h_{i2}}{1 + \beta_n}}\right) = 10.52M\Omega$$



# Op-Amp Internal Circuitry

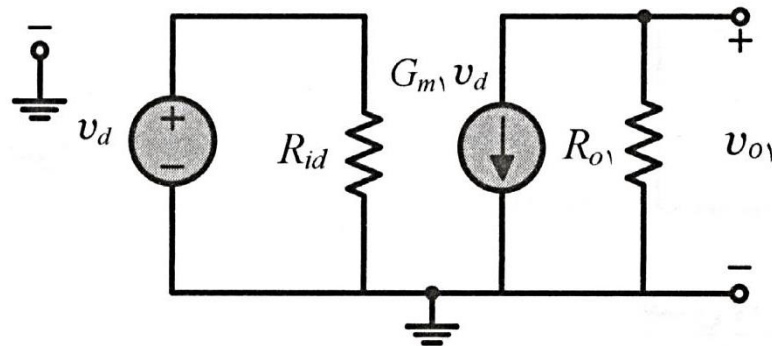
مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه ورودی



$$R_{o1} = R_{o(T_4)} \parallel R_{o(T_6)} = 17.96M\Omega \parallel 10.52M\Omega = 6.63M\Omega$$

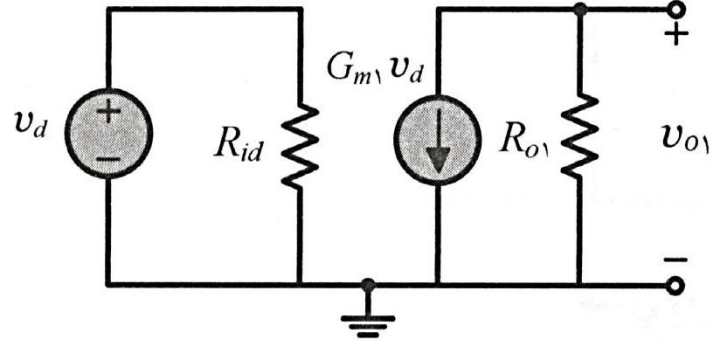
$$A_V = -G_{m1} R_{o1} = -1211.3$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه ورودی



$$R_{id} = 2.19M\Omega$$

$$G_{m1} = 0.1827 \frac{mA}{V}$$

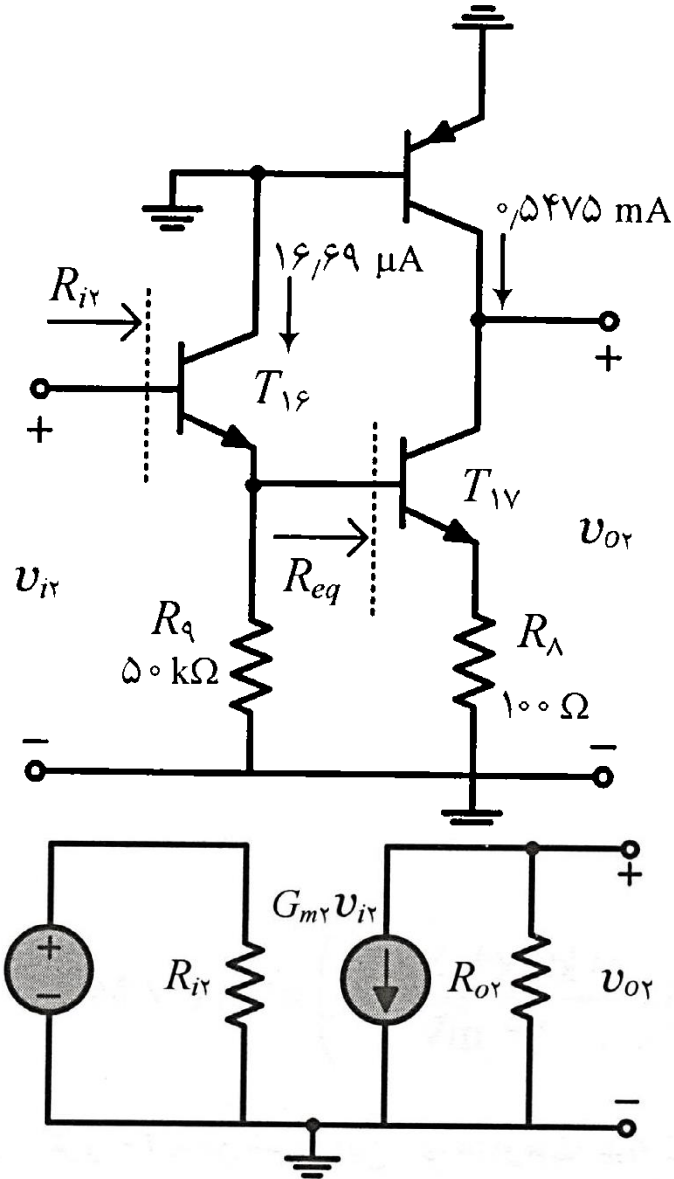
$$R_{o1} = 6.63M\Omega$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه افزایش بهره



$$R_{i2} = h_{ie16} + (1 + \beta_n) [R_9 \parallel R_{eq}]$$

$$R_{eq} = (1 + \beta_n) R_8 + h_{ie17} = (1 + \beta_n) R_8 + \beta_n \frac{V_T}{I_{C(T17)}} = 29.59k\Omega$$

$$R_{i2} = \beta_n \frac{V_T}{I_{C(T16)}} + (1 + \beta_n) [R_9 \parallel R_{eq}]$$

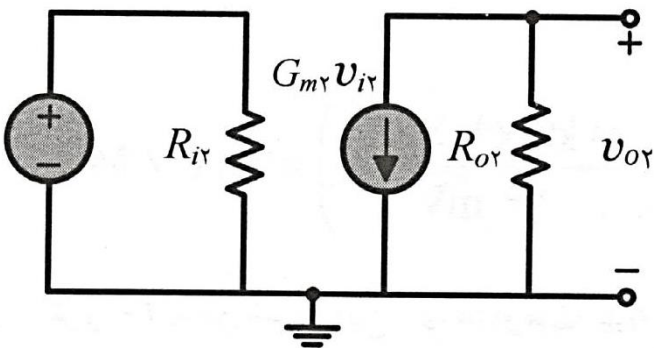
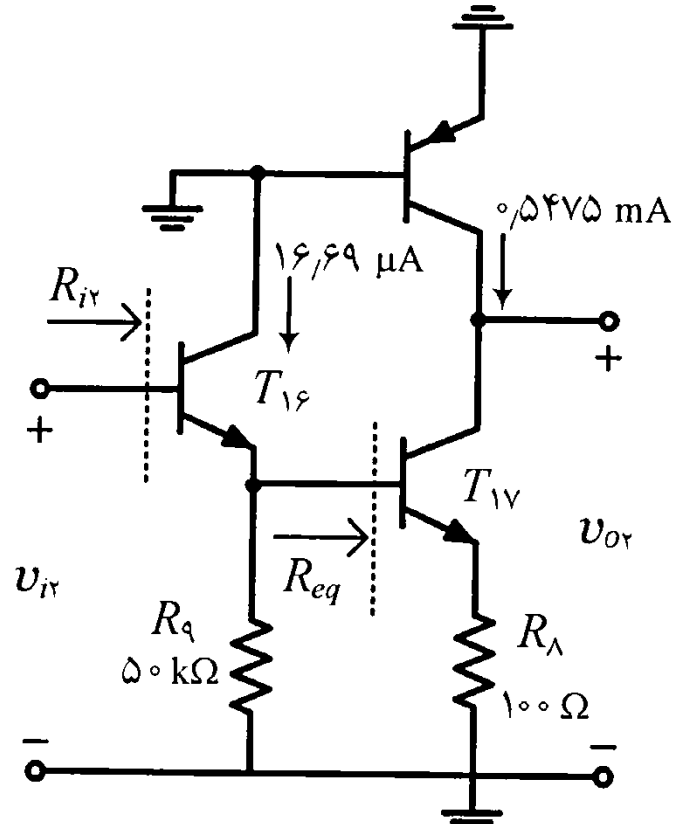
$$= 200 \frac{25mV}{16.69\mu A} + 201 [50k\Omega \parallel 29.59k\Omega] = 4.07M\Omega$$





# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه افزایش بهره

$$G_{m2} = \frac{i_{c17}}{v_{i2}}$$

$$i_{c17} = \beta_n i_{b17} \quad i_{b17} = i_{e16} \frac{R_9}{R_9 + R_{eq}} \quad i_{e16} = (1 + \beta_n) i_{b16} \quad i_{b16} = \frac{v_{i2}}{R_{i2}}$$

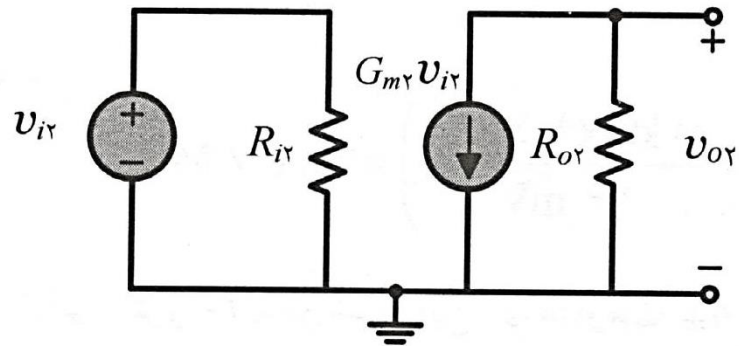
$$G_{m2} = \frac{i_{c17}}{v_{i2}} = \frac{i_{c17}}{i_{b17}} \frac{i_{b17}}{i_{e16}} \frac{i_{e16}}{v_{i2}} = \frac{R_9}{R_9 + R_{eq}} \frac{\beta_n (1 + \beta_n)}{R_{i2}}$$

$$G_{m2} = 6.24 \frac{mA}{V}$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه افزایش بهره محاسبه مقاومت خروجی

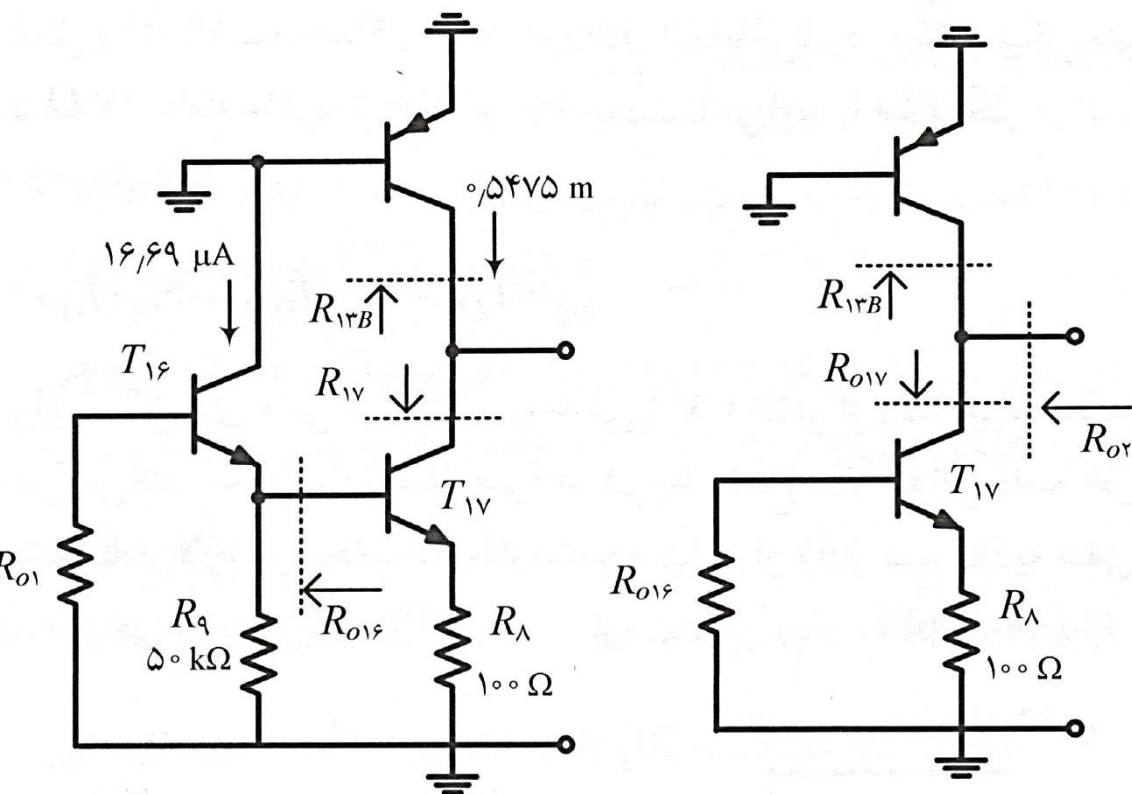
$$R_{o16} = \frac{R_{o1} + h_{ie16}}{1 + \beta_n} \parallel R_9 = \frac{6.63M\Omega + 311k\Omega}{201} \parallel 50k\Omega = 19.87k\Omega$$

$$r_{o17} = \frac{V_{AN}}{I_{C(T17)}} = \frac{125V}{0.5475mA} = 228.3k\Omega$$

$$h_{ie17} = \beta_n \frac{V_T}{I_{C(T17)}} = 200 \frac{26mV}{0.5475mA} = 9.5k\Omega$$

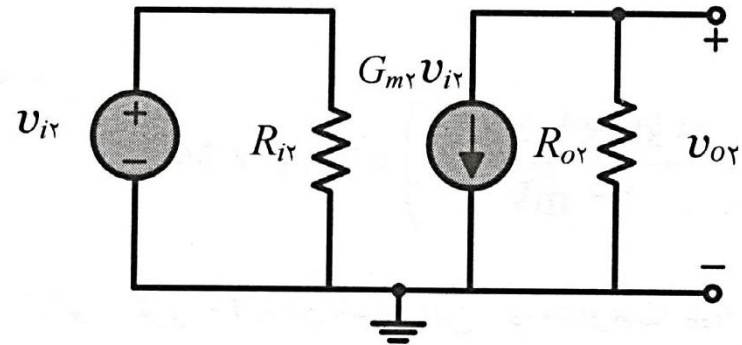
$$R_{o(T17)} = r_{o17} \left( 1 + \frac{\beta_n R_8}{h_{ie17} + R_{o16} + R_8} \right) = 228.3 \left( 1 + \frac{200 \times 100 \times 10^{-3}}{9.5 + 19.87 + 0.1} \right)$$

$$R_{o(T17)} = 382.73k\Omega$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



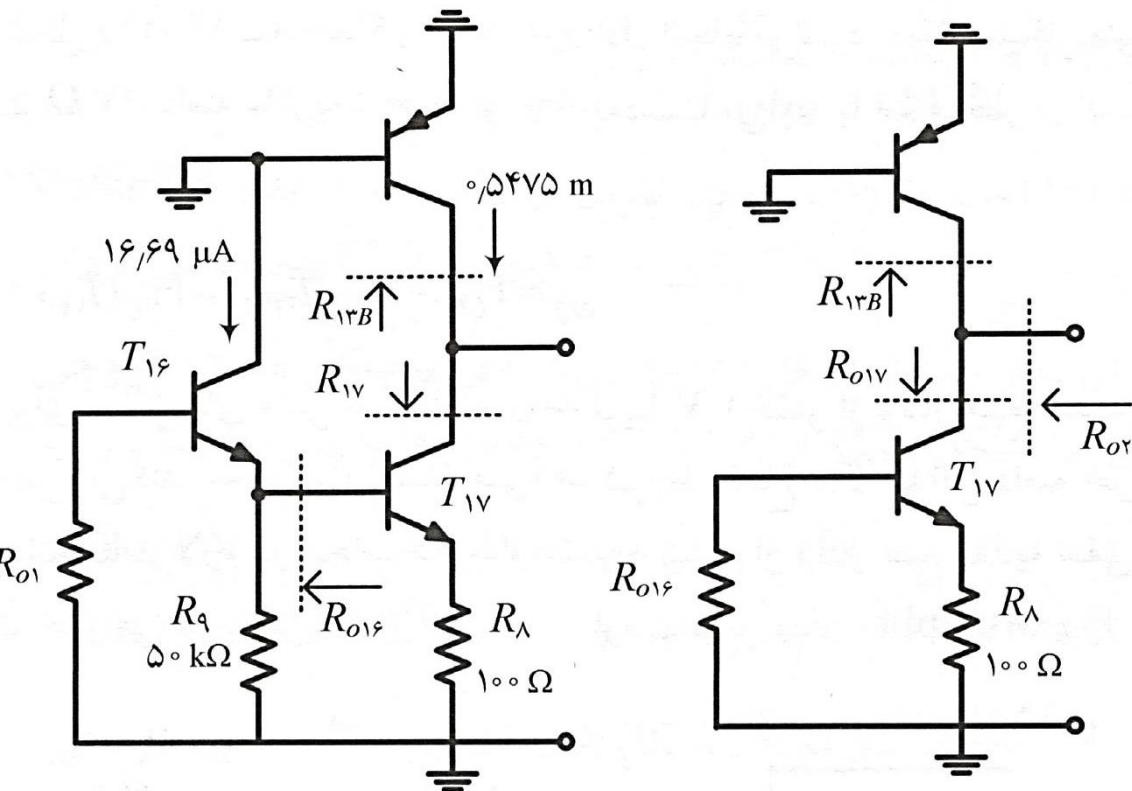
بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه افزایش بهره محاسبه مقاومت خروجی

$$R_{o(T_{17})} = 382.73k\Omega$$

$$R_{o(T_{13B})} = \frac{V_{AP}}{I_{C(T_{13B})}} = \frac{50V}{0.5475mA} = 91.32k\Omega$$

$$R_{o2} = R_{o(T_{13B})} \parallel R_{o(T_{17})}$$

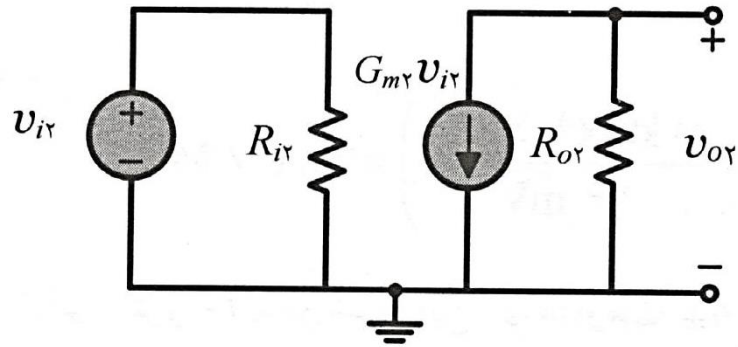
$$R_{o2} = 91.32k\Omega \parallel 382.73k\Omega = 73.72k\Omega$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه افزایش بهره  
محاسبه مقاومت خروجی



$$R_{i2} = 4.07 M\Omega$$

$$G_{m2} = 6.24 \frac{mA}{V}$$

$$R_{o2} = 73.72 k\Omega$$



# Op-Amp Internal Circuitry

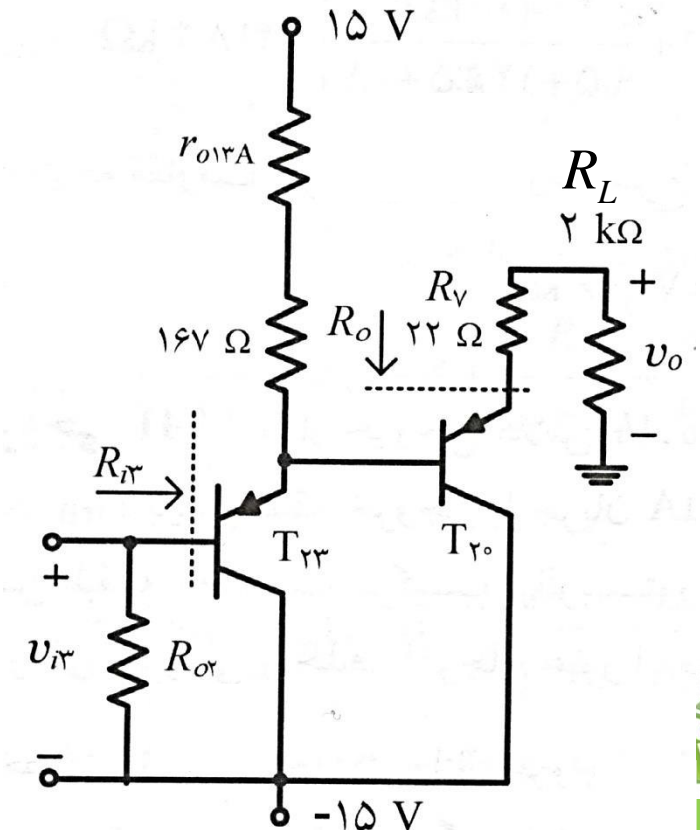
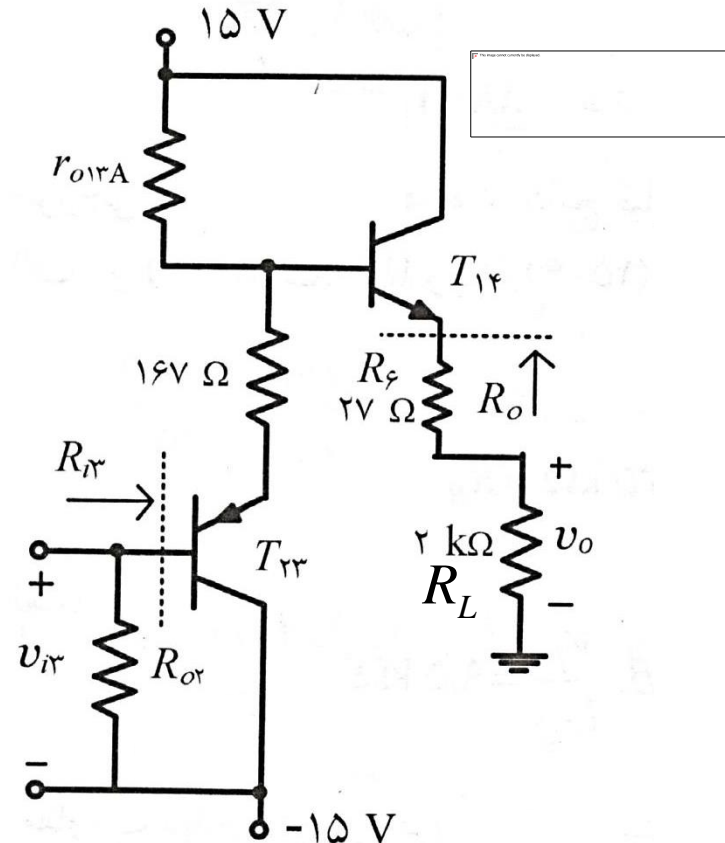
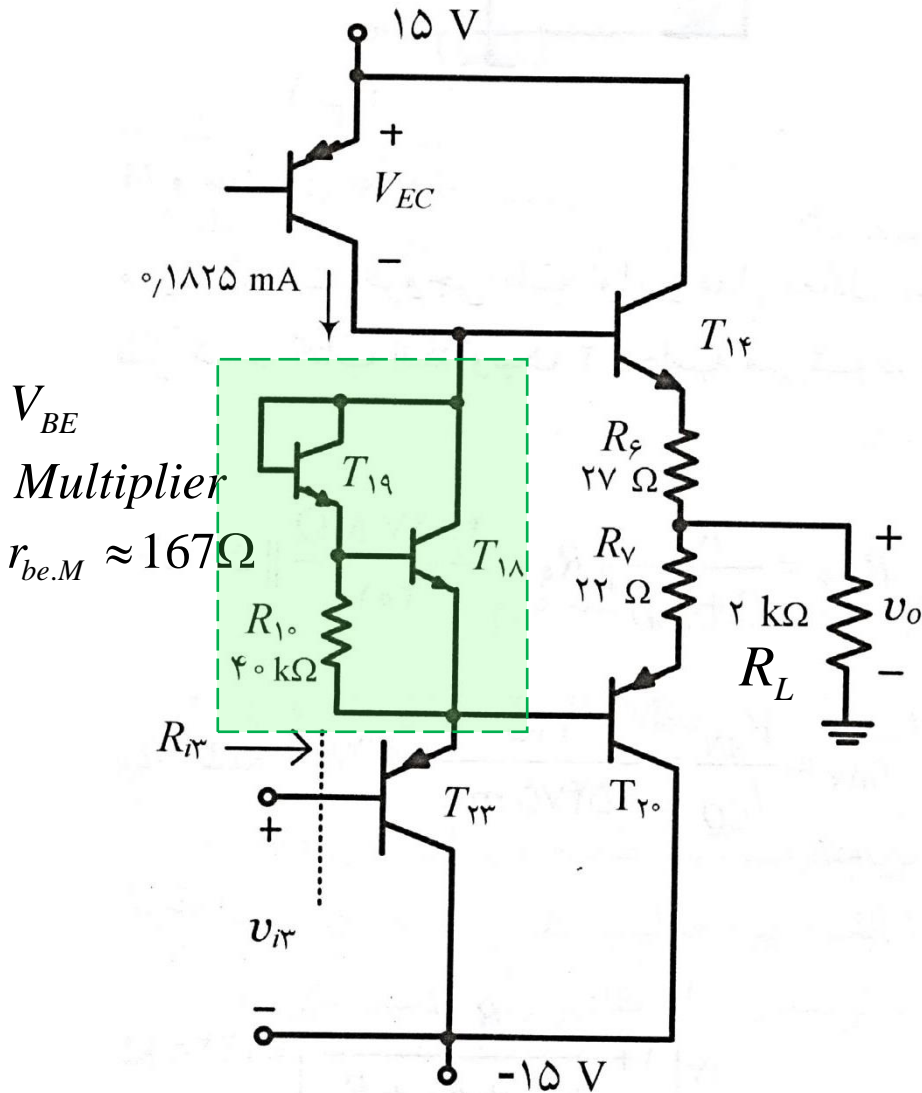
مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه خروجی

تقویت کننده توان بهره ولتاژ نزدیک ۱ دارد اما توانایی عبور توان زیاد از خود دارد  $A_{V3}=1$

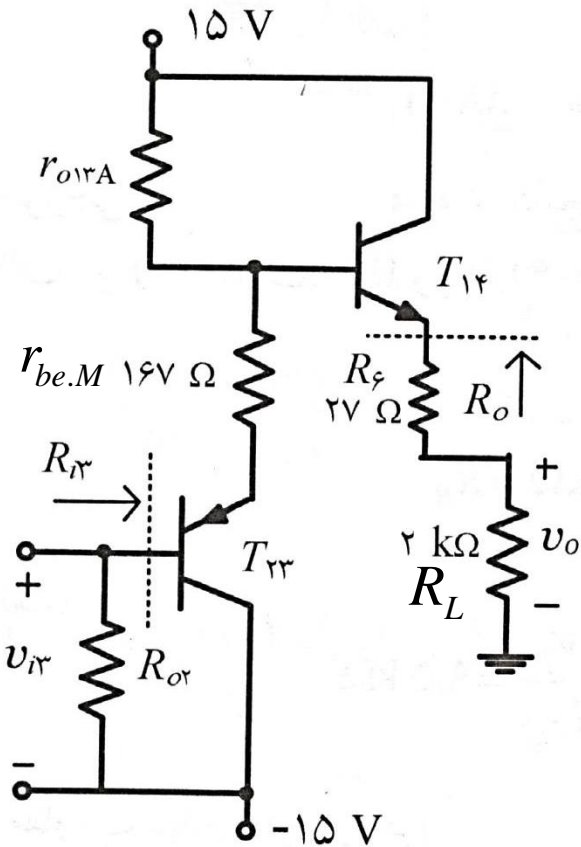
$$V_{o(max)}^+ = V_{CC} - V_{EC(T13B)} - V_{BE(T14)}$$

$$V_{o(max)}^- \approx -13.5V$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه خروجی نیم سسکل مثبت

$$r_{o13A} = \frac{V_{AP}}{I_{C(T_{13A})}} = \frac{50V}{0.1825mA} = 273.97k\Omega \quad R_{o2} = 73.72k\Omega$$

$$R_{i3}^+ = (1 + \beta_{23p}) [r_{be.M} + (r_{o13A} \parallel \{h_{ie14} + (R_6 + R_L)(1 + \beta_{14n})\})] + h_{ie23}$$

$$h_{ie23} = \beta_{23p} \frac{V_T}{I_{C(T_{23})}} = 50 \frac{26}{0.1825} = 7.12k\Omega$$

$$h_{ie14} = \beta_{14} \frac{V_T}{I_{CQ(T_{14})}} = 200 \frac{26}{2} = 2.6k\Omega$$

جریان آستانه بایاس ترانزیستورهای خروجی کم است. اما در حالت ac جریان زیادی از آنها عبور می کند. جریان بایاس آنها را 2mA فرض می کنند.

$$R_{i3}^+ = (51)[0.167 + (273.97 \parallel \{2.6 + (0.027 + 2)(201)\})] + 7.12 = 8.39M\Omega$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه خروجی نیم سیکل مثبت

$$r_{o13A} = \frac{V_{AP}}{I_{C(T_{13A})}} = \frac{50V}{0.1825mA} = 273.97k\Omega \quad R_{o2} = 73.72k\Omega$$

جریان آستانه بایاس ترانزیستورهای خروجی کم است. اما در حالت ac جریان زیادی از آنها عبور می کند. جریان بایاس آنها را 2mA فرض می کنند.

$$h_{ie23} = \beta_{23p} \frac{V_T}{I_{C(T_{23})}} = 50 \frac{26}{0.1825} = 7.12k\Omega \quad h_{ie14} = \beta_{14} \frac{V_T}{I_{CQ(T_{14})}} = 200 \frac{26}{2} = 2.6k\Omega$$

$$21.6 + 27 = 48.6\Omega$$

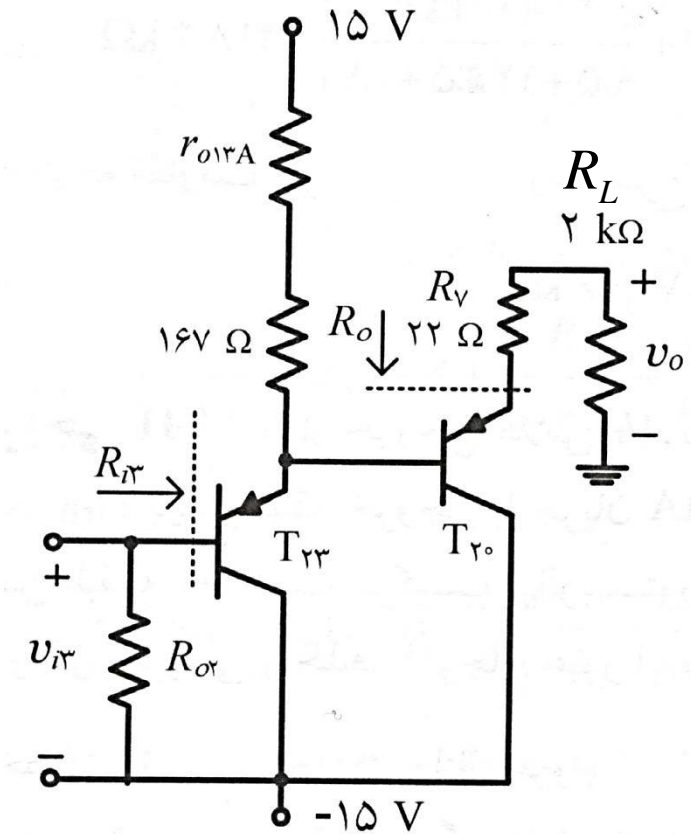
$$R_{o3}^+ = \frac{\left( (r_{be.M} + \frac{R_{o2} + h_{ie23}}{1 + \beta_{23p}}) \parallel r_{o13A} \right) + h_{ie14}}{1 + \beta_{14n}} = \frac{\left( (0.167 + \frac{73.72 + 7.12}{51}) \parallel 273.97 \right) + 2.6}{201} = 21.6\Omega$$





# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه خروجی نیم سیکل منفی

$$r_{o13A} = \frac{V_{AP}}{I_{C(T_{13A})}} = \frac{50V}{0.1825mA} = 273.97k\Omega \quad R_{o2} = 73.72k\Omega$$

$$R_{i3}^- = (1 + \beta_{23p}) \left[ (r_{be.M} + r_{o13A}) \parallel \left\{ h_{ie20} + (R_7 + R_L)(1 + \beta_{20p}) \right\} \right] + h_{ie23}$$

$$h_{ie23} = \beta_{23p} \frac{V_T}{I_{C(T_{23})}} = 50 \frac{26}{0.1825} = 7.12k\Omega$$

$$h_{ie20} = \beta_{20} \frac{V_T}{I_{CQ(T_{14})}} = 50 \frac{26}{2} = 0.65k\Omega$$

جریان آستانه بایاس ترانزیستورهای خروجی کم است.  
اما در حالت ac جریان زیادی از آنها عبور می کند.  
جریان بایاس آنها را 2mA فرض می کنند.

$$R_{i3}^- = (51) \left[ (0.167 + 273.97) \parallel \left\{ 0.65 + (0.027 + 2)(51) \right\} \right] + 7.12 = 3.83M\Omega$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه خروجی نیم سیکل منفی

$$r_{o13A} = \frac{V_{AP}}{I_{C(T_{13A})}} = \frac{50V}{0.1825mA} = 273.97k\Omega \quad R_{o2} = 73.72k\Omega$$

جریان آستانه بایاس ترانزیستورهای خروجی کم است. اما در حالت ac جریان زیادی از آنها عبور می کند. جریان بایاس آنها را 2mA فرض می کنند.

$$h_{ie23} = \beta_{23p} \frac{V_T}{I_{C(T_{23})}} = 50 \frac{26}{0.1825} = 7.12k\Omega \quad h_{ie20} = \beta_{20} \frac{V_T}{I_{CQ(T_{14})}} = 50 \frac{26}{2} = 0.65k\Omega$$

$$43.64 + 22 = 65.64\Omega$$

$$R_{o3}^- = \frac{\left( (r_{be.M} + r_{o13A}) \parallel \left( \frac{R_{o2} + h_{ie23}}{1 + \beta_{23p}} \right) \parallel \right) + h_{ie20}}{1 + \beta_{20p}} = \frac{\left( (0.167 + 273.97) \parallel \frac{73.72 + 7.12}{51} \right) + 0.65}{51} = 43.64\Omega$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: طبقه خروجی

$$R_{i3}^+ = 8.39M\Omega$$

$$R_{i3}^- = 3.83M\Omega$$

$$R_{i3} \equiv \text{Min}(R_{i3}^+, R_{i3}^-) = 3.83M\Omega$$

$$R_{o3}^+ = 48.6\Omega$$

$$R_{o3}^- = 65.64\Omega$$

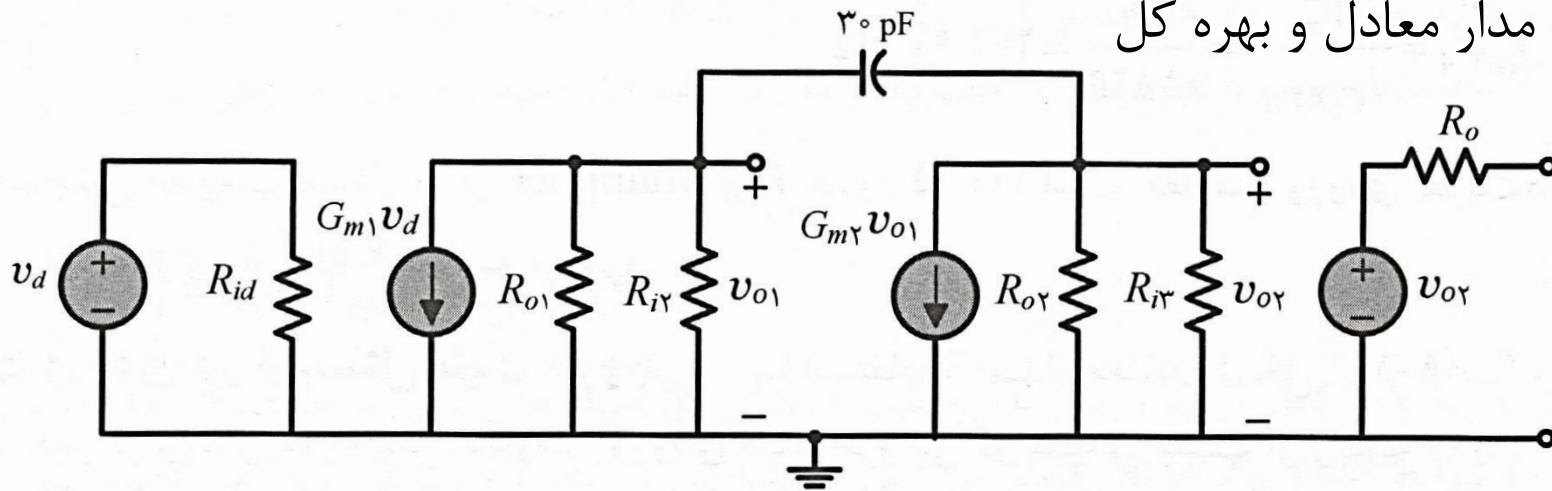
$$R_{o3} \equiv \text{Max}(R_{o3}^-, R_{o3}^+) = 65.64\Omega$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بررسی شرایط ac تقویت کننده LM 741: مدار معادل و بهره کل



$$A_V = G_{m1}(R_{o1} \parallel R_{i2})G_{m2}(R_{o2} \parallel R_{i3})$$

$$R_{id} = 2.19M\Omega$$

$$R_{i2} = 4.07M\Omega$$

$$R_{i3} = 3.83M\Omega$$

$$A_V = 207220$$

$$R_{o1} = 6.63M\Omega$$

$$R_{o2} = 73.72k\Omega$$

$$R_{o3} = 65.64\Omega$$

$$R_i = R_{id} = 2.19M\Omega$$

$$G_{m1} = 0.1827 \frac{mA}{V}$$

$$G_{m2} = 6.24 \frac{mA}{V}$$

$$A_{v3} = 1$$

$$R_o = R_{o3} = 65.64\Omega$$

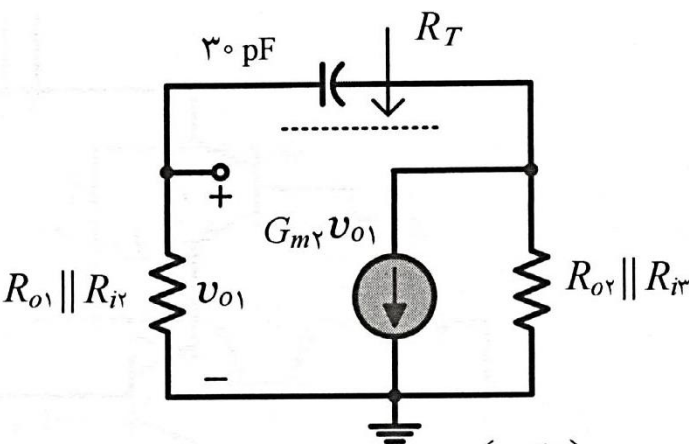
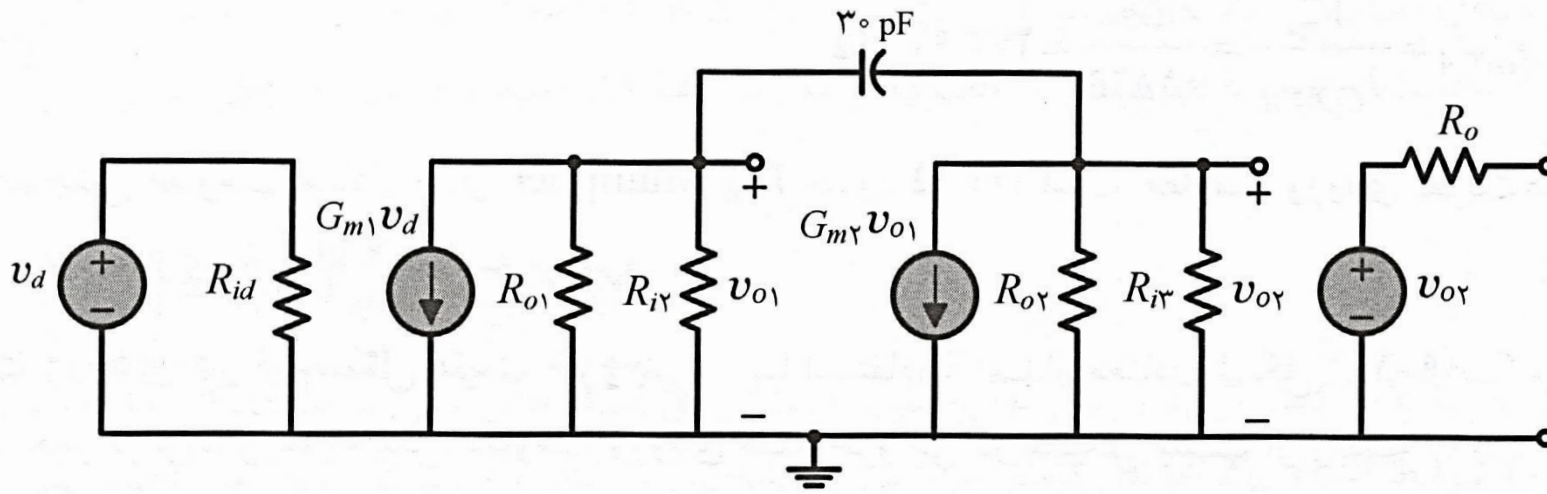


# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

پاسخ فرکانسی LM 741

$$f_T = a_0 f_h = 0.967 \text{ MHz}$$

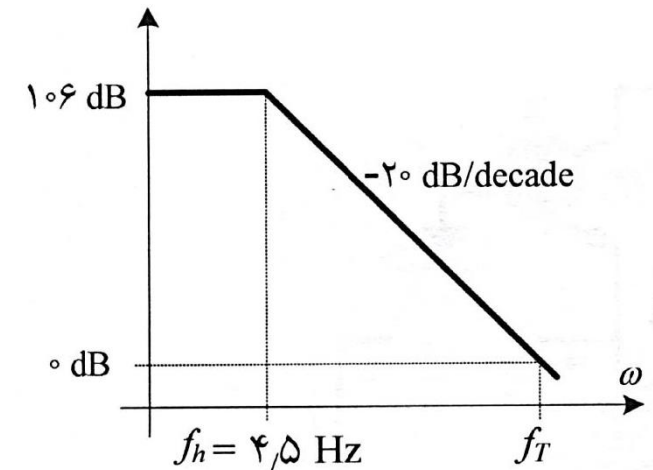


$$R_T = (R_{o2} \parallel R_{i3}) + [1 + G_{m2} (R_{o2} \parallel R_{i3})] (R_{o1} \parallel R_{i2})$$

$$R_T = 1.137 \text{ M}\Omega$$

$$\tau = R_T C = 1.137 \text{ M}\Omega \times 30 \text{ pF} = 34.1 \text{ ms}$$

$$f_h = \frac{\omega_h}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad f_h = 4.66 \text{ Hz}$$

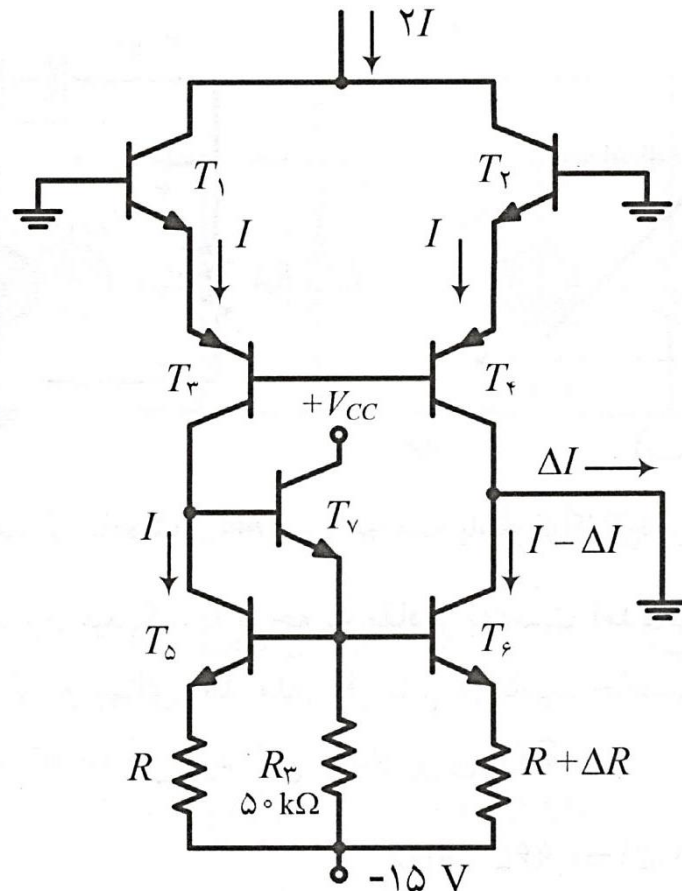


# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

ولتاژ آفست LM 741

ولتاژ آفست: ناشی از عدم تطبیق مقاومت های طبقه تفاضلی



$$V_{BE(T_5)} + RI = V_{BE(T_6)} + (I - \Delta I)(R + \Delta R)$$

$$V_{BE(T_5)} - V_{BE(T_6)} = I\Delta R - \Delta I(R + \Delta R)$$

$$V_{BE(T_5)} - V_{BE(T_6)} = V_T \ln \frac{I_{C(T_5)}}{I_S} - V_T \ln \frac{I_{C(T_6)}}{I_S} = V_T \ln \frac{I_{C(T_5)}}{I_{C(T_6)}} \quad \frac{I_{C(T_5)}}{I_{C(T_6)}} \approx 1$$

$$= V_T \ln \frac{I + \Delta I}{I} \approx V_T \frac{\Delta I}{I}$$

$$V_T \frac{\Delta I}{I} = I\Delta R - \Delta I(R + \Delta R)$$

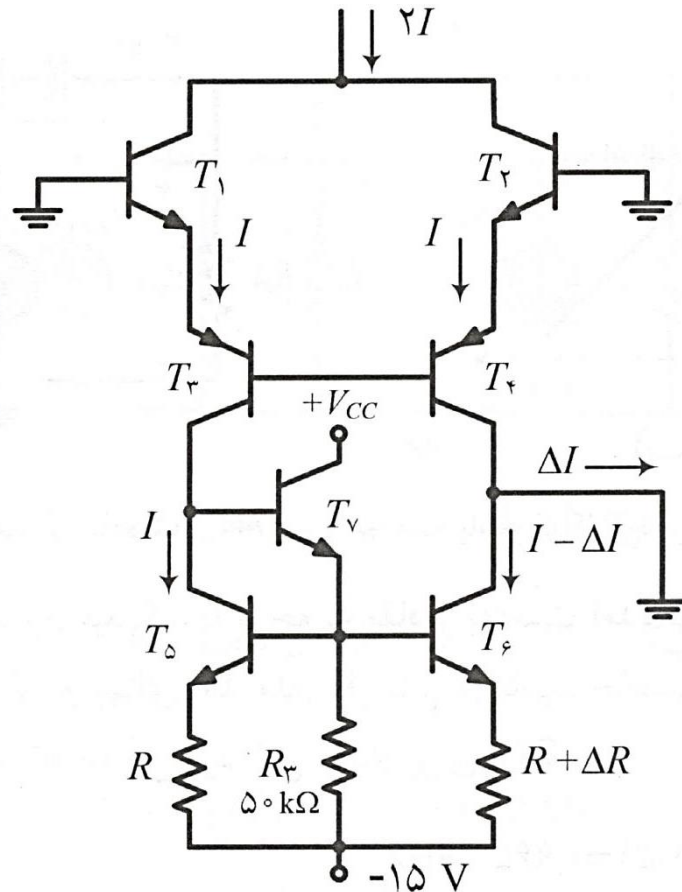
$$\Delta I \left[ \frac{V_T}{I} + (R + \Delta R) \right] = I\Delta R$$

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta R}{\frac{V_T}{I} + (R + \Delta R)}$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta R}{\frac{V_T}{I} + (R + \Delta R)}$$

$$V_{OS} = \frac{\Delta I}{G_{m1}} = \frac{\Delta I}{I} \frac{I}{G_{m1}} = \frac{\Delta R I}{G_{m1} \left[ \frac{V_T}{I} + (R + \Delta R) \right]}$$

ولتاژ آفست LM 741

ولتاژ آفست: ناشی از عدم تطبیق مقاومت های طبقه تفاضلی

$$R = 1k\Omega, \quad \Delta R = 2\% R = 20\Omega, \quad I = 9.5\mu A, \quad G_{m1} = 0.1825 \frac{mA}{V}$$

$$V_{OS} = \frac{20 \times 9.5 \times 10^{-6}}{0.1825 \times 10^{-3} \left[ \frac{26 \times 10^{-3}}{9.5 \times 10^{-6}} + (1000 + 20) \right]} = 0.28mV$$

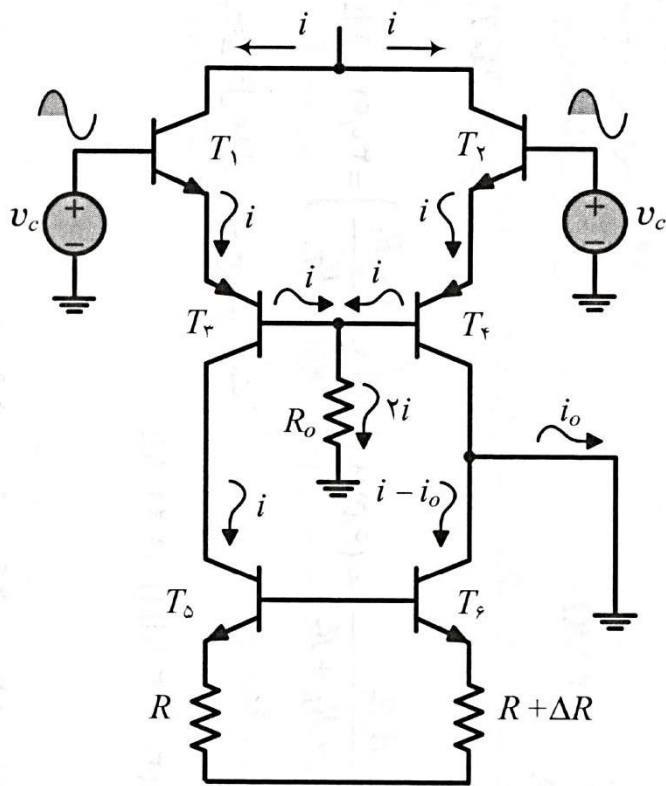
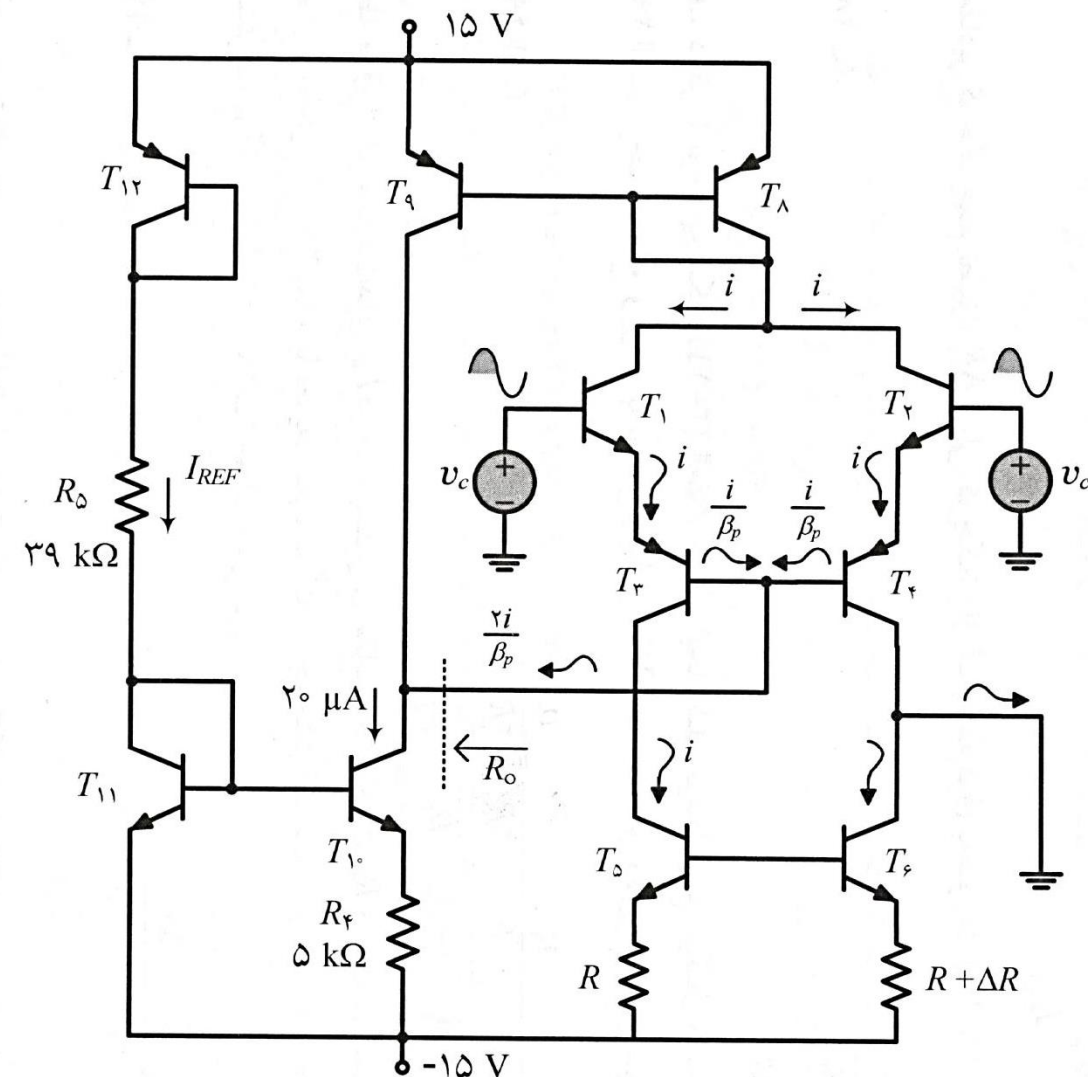




# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

بهره هدایت انتقالی سیگنال وجه مشترک LM 741 مربوط به طبقه اول



$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta R}{\frac{V_T}{I} + (R + \Delta R)}$$

$$\frac{i_o}{i} = \frac{\Delta R}{\frac{V_T}{I_{CQ}} + (R + \Delta R)}$$

$$\frac{i_o}{i} \approx \frac{\Delta R}{\frac{V_T}{I_{CQ}} + R}$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

$$R_o = R_{o9} \parallel R_{o10}$$

بهره هدایت انتقالی سیگنال وجه مشترک LM 741 مربوط به طبقه اول

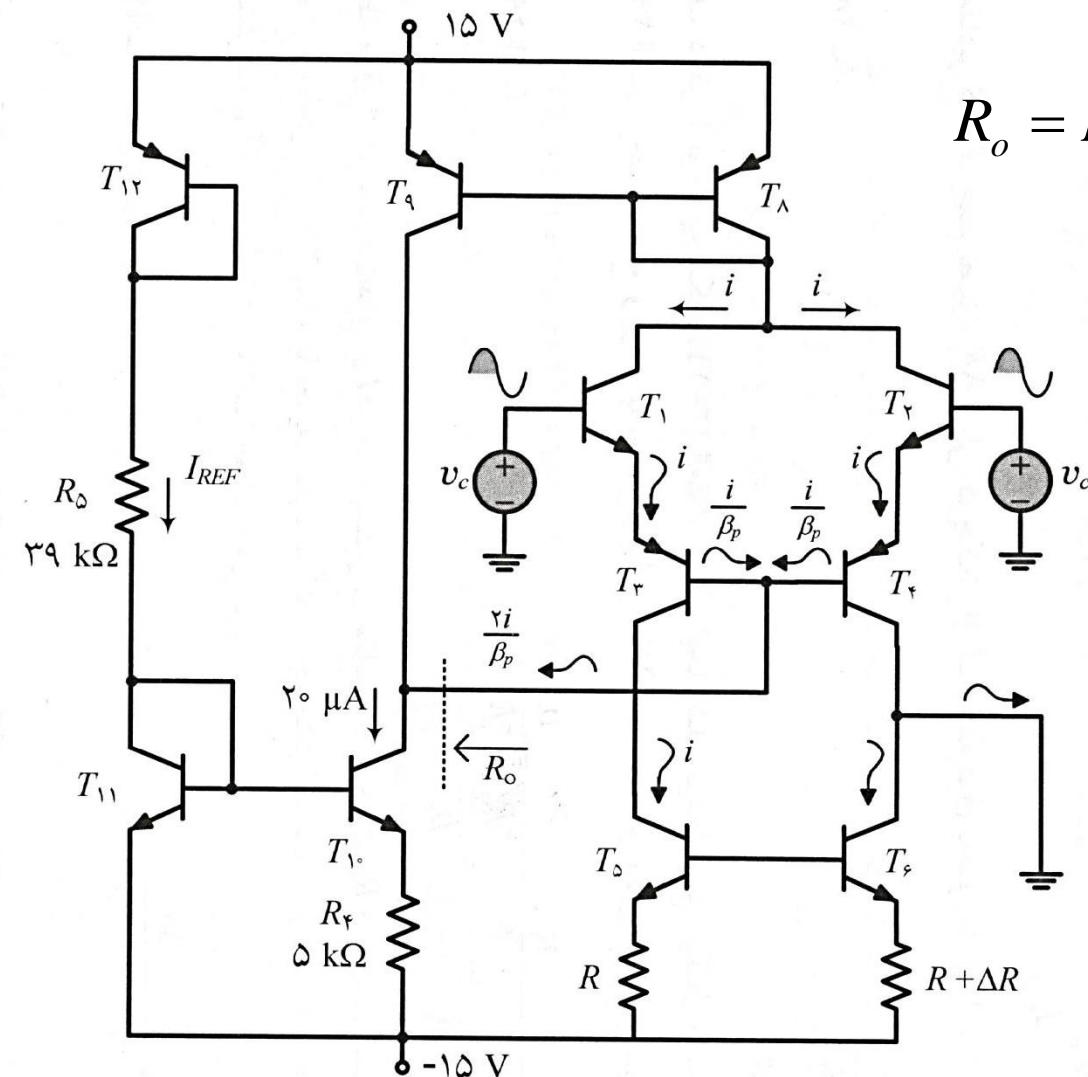
$$R_{o9} = r_{o9} = \frac{V_{AP}}{I_{CQ}} = \frac{50V}{19\mu A} = 2.63M\Omega$$

$$r_{o10} = \frac{V_{AN}}{I_{C(T_{10})}} = \frac{250V}{20\mu A} = 12.5M\Omega$$

$$R_{o10} = r_{o(T_{10})} \left( 1 + \frac{\beta_n R_4}{h_{ie(T_{10})} + R_B + R_4} \right) \approx 12.5M\Omega \left( 1 + \frac{I_{CQ} R_4}{V_T} \right)$$

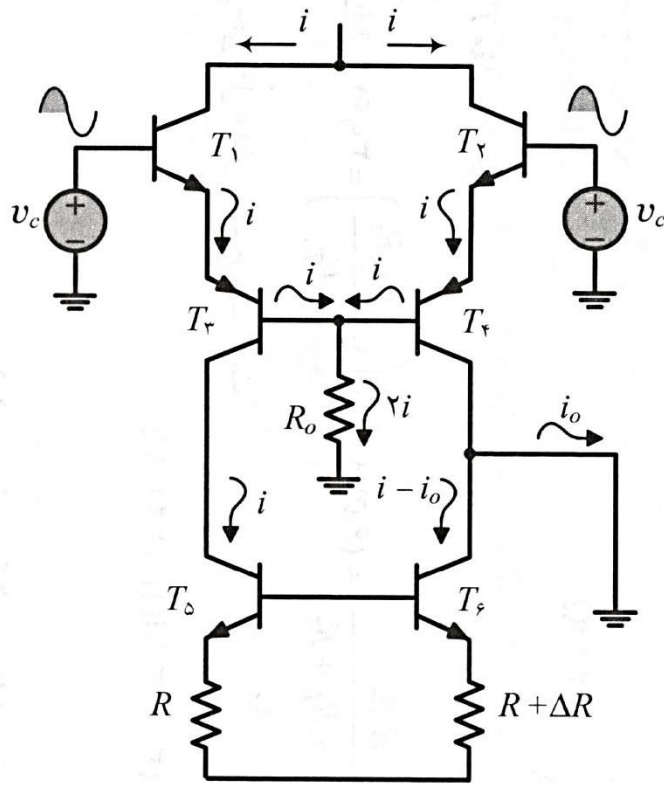
$$R_{o10} = 60M\Omega$$

$$R_o = R_{o9} \parallel R_{o10} = 2.63 \parallel 60 = 2.5M\Omega$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



$$R_o = 2.5M\Omega$$

$$G_{cm} = \frac{i_o}{v_c}$$

$$\frac{i_o}{i} \approx \frac{\Delta R}{\frac{V_T}{I_{CQ}} + R}$$

بهره هدایت انتقالی سیگنال وجه مشترک LM 741 مربوط به طبقه اول

$$i \approx \frac{v_c}{\frac{h_{ie1}}{\beta_n} + \frac{h_{ie3}}{\beta_p} + \frac{2R_o}{\beta_p}}$$

$$i \approx \frac{v_c}{\frac{2R_o}{\beta_p}}$$

$$G_{cm} = \frac{\beta_p}{2R_o} \frac{\Delta R}{\frac{V_T}{I_{CQ}} + R}$$

$$R = 1k\Omega, \quad \Delta R = 2\% R = 20\Omega, \quad I = 9.5\mu A, \quad R_o = 2.5M\Omega$$

$$G_{cm} = 5.51 \times 10^{-8} \frac{A}{V}$$

$$G_{m1} = 0.1825 \frac{mA}{V}$$

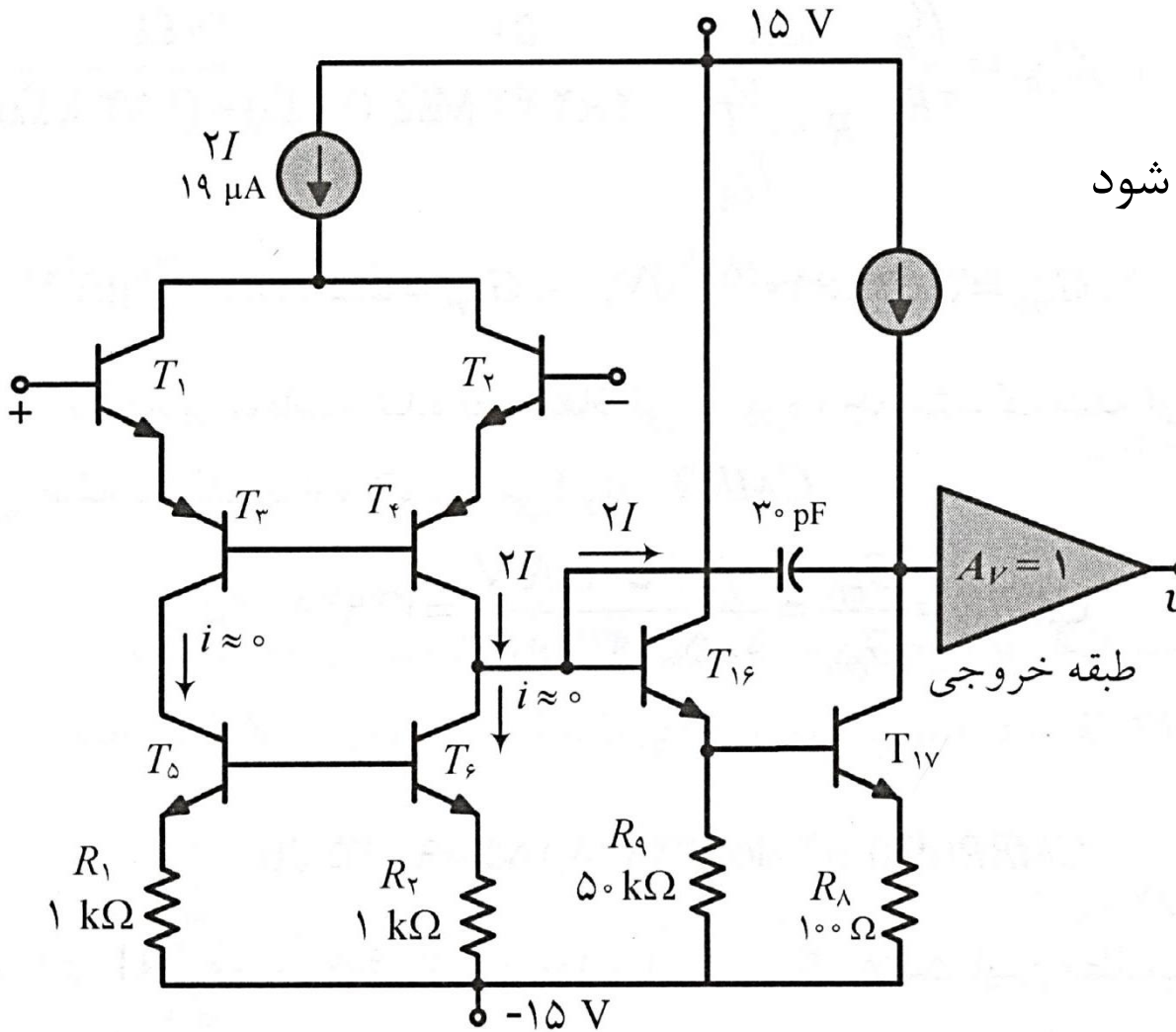
$$CMRR = \frac{G_{m1}}{G_{CM}} = 33121.6$$

$$CMRR = 90.4dB$$

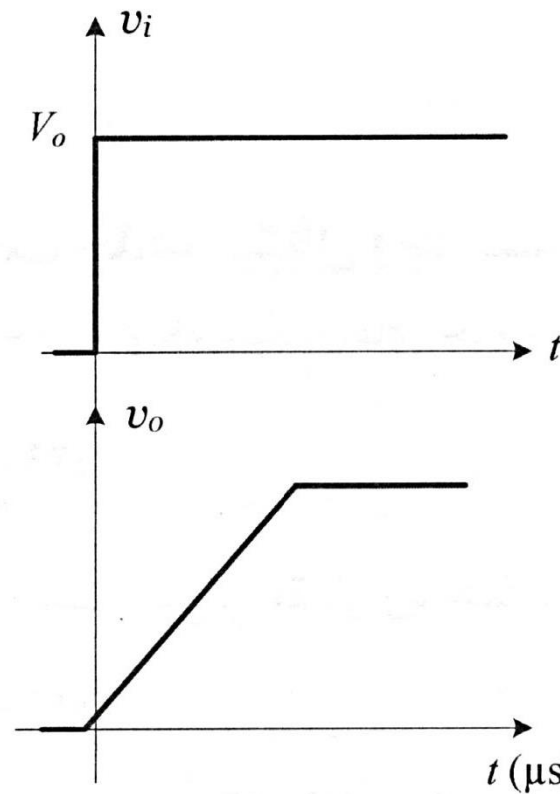


# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی



سرعت چرخش (Slew Rate) مربوط به LM 741 با تغییر ناگهانی ولتاژ خازن به صورت خطی با جریان  $2I$  شارژ می شود



$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{2I}{C}$$

$$SR = \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} = \frac{2I}{C}$$

$$SR = \frac{19 \mu A}{30 pF} = 0.63 \frac{V}{\mu s}$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

$$v_o(t) = V_m \sin(\omega t)$$

$$SR = \frac{19 \mu A}{30 pF} = 0.63 \frac{V}{\mu s}$$

پهنای باند توان کامل مربوط به LM 741

$$\frac{dv_o(t)}{dt} = \omega V_m \cos(\omega t)$$

$$\left. \frac{dv_o(t)}{dt} \right|_{Max} = \omega V_m$$

برای اینکه شکل موج خروجی بدون اعوجاج باشد، باید تغییرات خروجی کمتر از  $SR$  باشد.

$$\omega V_m \leq SR$$

$$f_{full} = \frac{SR}{2\pi V_m}$$

وقتی دامنه ورودی زیاد است، ترانزیستورهای خروجی در مرز اشباع بوده و ولتاژ آن ها به  $V_{CC}-1$  محدود می شود.

$$BW_{full} (Hz) = f_{full} = \frac{SR}{2\pi(V_{CC} - 1)}$$



# Op-Amp Internal Circuitry

مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی

## مشخصات LM 741

مشخصه	واحد	حداقل	نمونه	حداکثر	توضیحات
جریان بایاس ورودی	nA	-	۸۰	۵۰۰	
جریان افست ورودی	nA	-	۲۰	۲۰۰	
تغییرات حرارتی جریان افست	nA/°C	-	۰٫۵	-	
ولتاژ افست ورودی	mV	-	۱	۵	درجه حرارت محیط ۲۵ °C
تغییرات حرارتی ولتاژ افست	μV/°C	-	۱۵	-	
مقاومت ورودی	MΩ	-	۲	-	مدار باز
خازن ورودی	pF	-	-	-	
مقاومت خروجی	Ω	۱٫۵ -	۷۵	-	مدار باز
بهره ولتاژ مدار باز	V/mV	۲۰	۲۰۰	-	
CMRR	dB	۱٫۵ -	۷۰	۹۰	مدار باز
دامنه سیگنال وجه مشترک ورودی	V	±۲	±۲٫۷	-	
پهنای باند	Hz	-	۵	-	مدار باز و افت ۳ dB
پهنای باند بهره واحد	MHz	۱	۲	-	
سرعت چرخش SR	V/μs	-	۰٫۵	-	
PSRR	dB	-	۷۷	۹۶	

