محمد اعرابیان

جزوه درس الکترونیک کاربردی

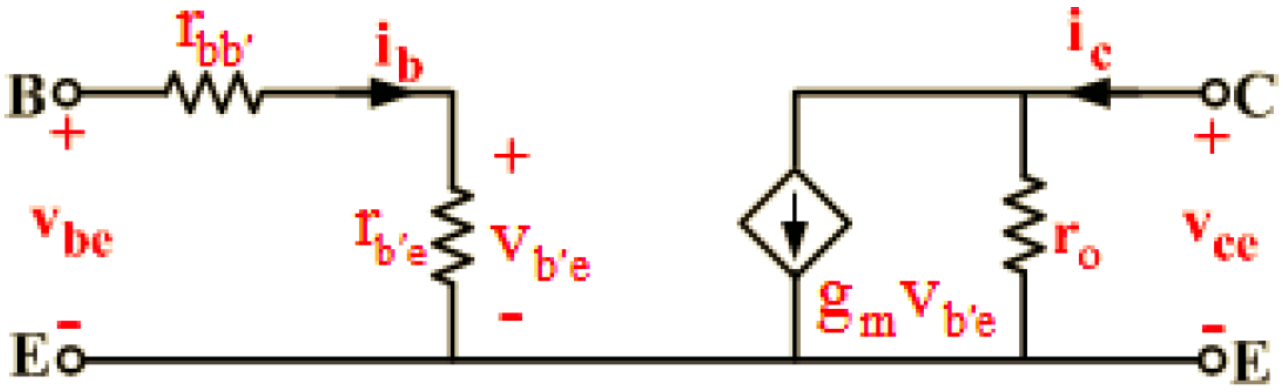
جلسه دهم

برای جزئیات بیشتر **اسکن کنید**

نسخه ۱.۱ | تهیه شده در بهمن ۱۴۰۰

تمامی حقوق این جزوه برای **محمد اعرابیان** محفوظ است.

سیگنال کوچک ترانزیستور مدل g



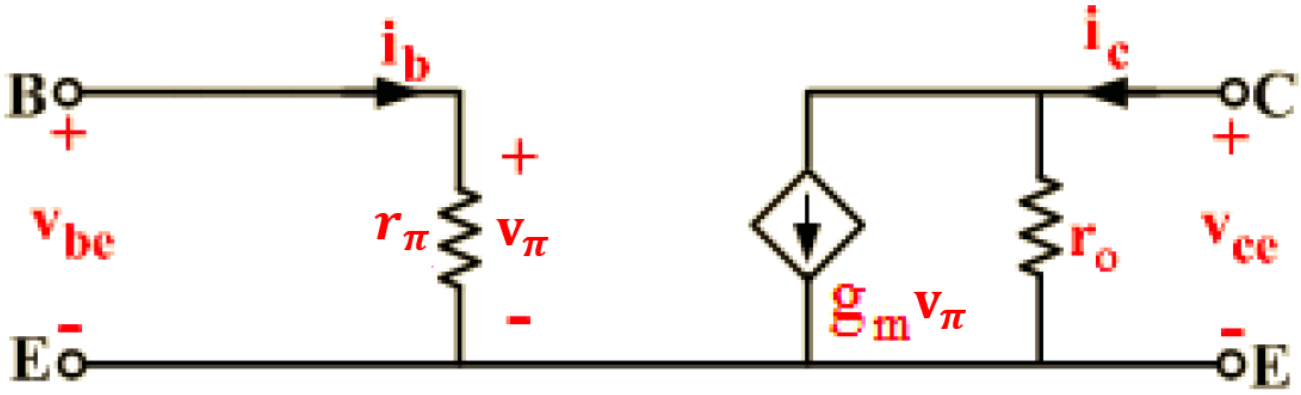
قابلیت هدایت انتقالی ترانزیستور g_m: از نسبت $\frac{\beta}{r_\pi}$ و واحد آن زیمنس $(\mho)$ یا $\frac{A\ \text{آمپر}}{V\ \text{ولت}}$ می‌باشد

$r_{bb'}$ مقاومت عمودی پایه، ثابت است و مقدار ناچیزی دارد. اگر این مدل را با مدل H امیترمشترك مقایسه کنیم، خواهیم داشت :

$$\begin{cases} r_{bb'} + r_{b'e} = h_{ie} \\ g_m V_{b'e} = h_{fe} i_b \\ r_o = h_{oe}^{-1} \end{cases} \Longrightarrow r_{b'e} \approx h_{ie} \ , \ g_m \approx \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$$

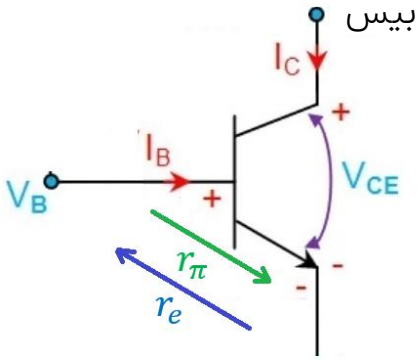
از این مدل معمولا به همراه اثر خازنی دیودهای BE و BC در کاربرد ترانزیستور در فرکانس‌های بالا استفاده می‌شود.

سیگنال کوچک ترانزیستور مدل π



این مدل شبیه مدل **g** است. فقط به جای دو مقاومت بیس از r_π در بیس استفاده شده است.

r_π مقاومت دینامیکی: نسبت تغییرات ولتاژ بیس امیتر به تغییرات جریان بیس



$$r_\pi = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{V_T \beta}{I_C} = h_{ie} \ , \ g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{\beta}{r_\pi} \approx \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$$

$$r_e = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_C} = \frac{V_T}{I_C}$$

تحلیل مدارهای ترانزیستوری

معمولا منظور از تحلیل مدارهای ترانزیستوری تعیین موارد ذیل است :

۱) نقطه کار هر ترانزیستور

۲) بهره ولتاژ با بار و بدون بار

۳) بهره جریان با بار و بدون بار

۴) امپدانس ورودی که نشان می‌دهد منبع ورودی مناسب باید چگونه باشد.

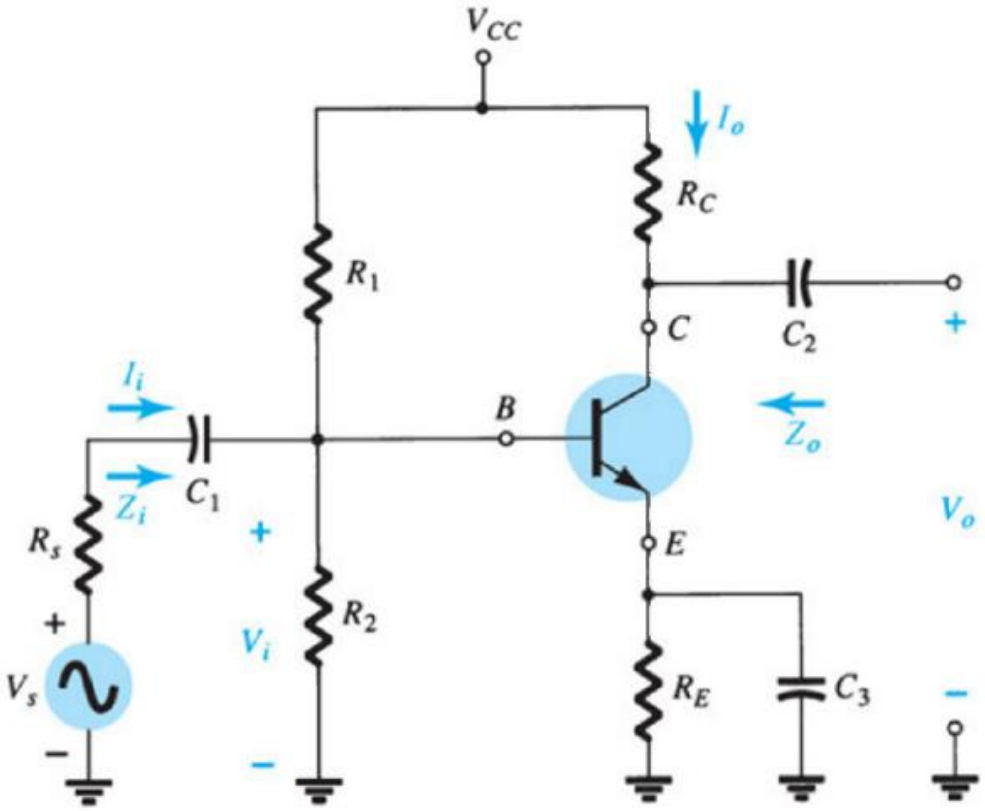
۵) امپدانس خروجی که نشان می‌دهد بار مناسب چیست.

۶) ماکزیمم ولتاژ خروجی

سه مدار اساسی وجود دارد که به تحلیل پارامتری هر یك از آنها می‌پردازیم.

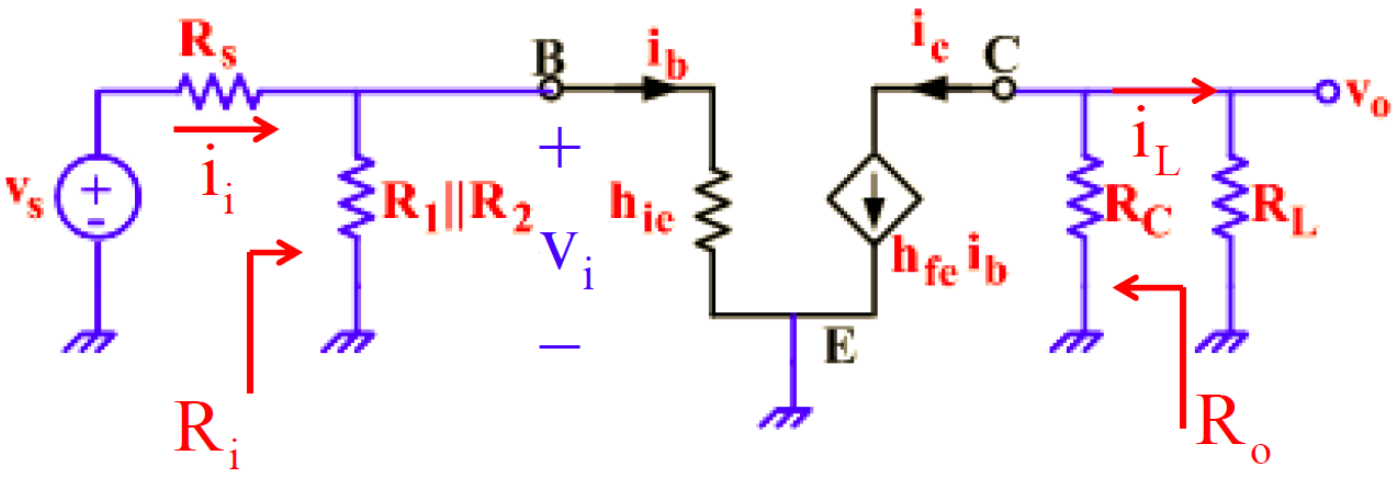
۱- تقویت کننده امیتر مشترك CE

در این تقویت کننده ، ورودی بیس و خروجی کلکتور است.



خازن های کوپلینگ ، سیگنال های با فرکانس پایین DC را بلاک کرده و از خود عبور نمی دهد و در عوض سیگنال های با فرکانس بالاتر AC را از خود عبور می دهد.در فرکانس های پایین خازن کوپلینگ از خود مقاومت بینهایت نشان می دهد و در مورد سیگنال های با فرکانس بالا ، مقاومت بسیار ناچیزی دارد.

خازن های دکوپل اجازه عبور سیگنال های *DC* را میدهند و سیگنال های *AC* را به زمین متصل می کنند. معمولا خازن هایی که به عنوان کنار گذر (*bypass*) استفاده می شوند، باعث گرفتن نویز سیگنال *AC* می‌شوند تا به یک سیگنال *DC* تمیز تر دست یابیم. خازن های کنار گذر معمولا به صورت موازی با یک مقاومت در مدار قرار می گیرند و در مقابل سیگنال با فرکانس بالا مقاومت بی نهایت و در برابر سیگنال با فرکانس پایین مقاومت ناچیزی نشان می دهند.



$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(-h_{fe} i_b)(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} i_b} = \frac{-h_{fe}(R_C \parallel R_L)}{h_{ie}}$$

$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_L}{i_c} \times \frac{i_c}{i_b} \times \frac{i_b}{i_i} = \frac{-R_C}{R_C + R_L} \times h_{fe} \times \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2 + h_{ie}}$$

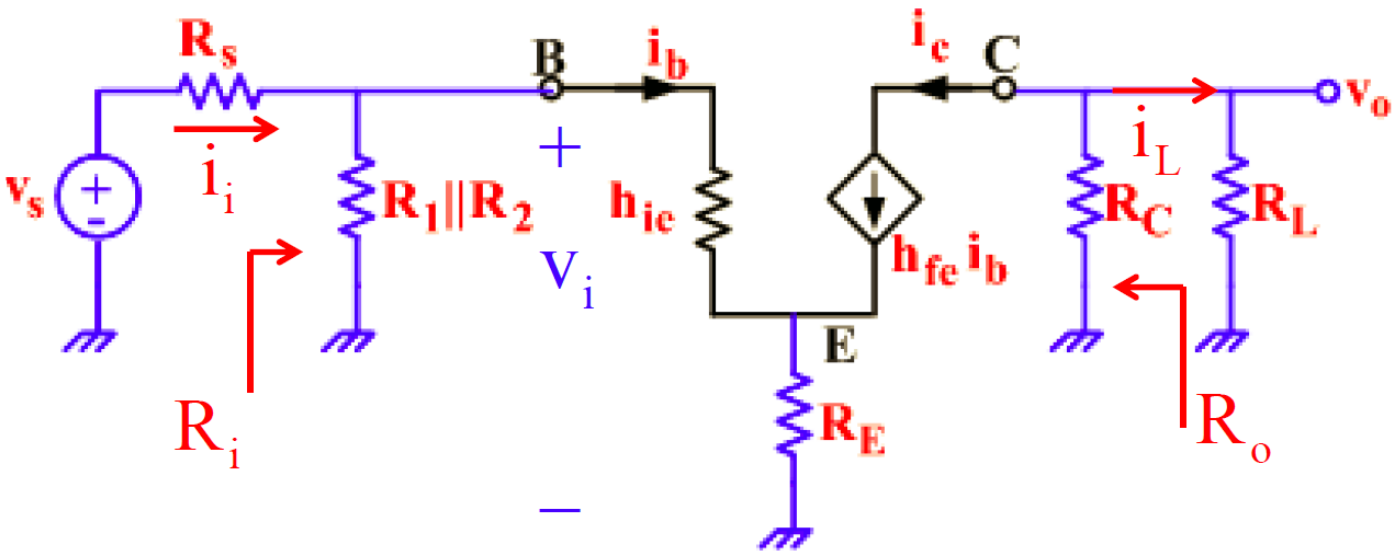
$$R_o = R_C$$

$$R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel h_{ie}$$

شیب خط بار AC:

$$\frac{-1}{R_C \parallel R_L}$$

اگر خازن امیتر وجود نداشته باشد، مدار معادل چنین است :



$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(-h_{fe} i_b)(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} i_b + (1+h_{fe}) i_b R_E} = \frac{-h_{fe}(R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + (1+h_{fe}) R_E} \approx \frac{-(R_C \parallel R_L)}{R_E}$$

$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_L}{i_c} \times \frac{i_c}{i_b} \times \frac{i_b}{i_i} = \frac{-R_C}{R_C + R_L} \times h_{fe} \times \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2 + \left(h_{ie} + (1+h_{fe}) R_E\right)}$$

از بیس به R_E امیتر نگاه می‌کنیم. i_b به i_i می‌خواهیم و $i_b = \frac{i_e}{(1+h_{fe})}$ پس باید R_E را در $(1+h_{fe})$ ضرب کنیم

$$R_o = R_C$$

$$R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel \left(h_{ie} + (1+h_{fe}) R_E\right)$$

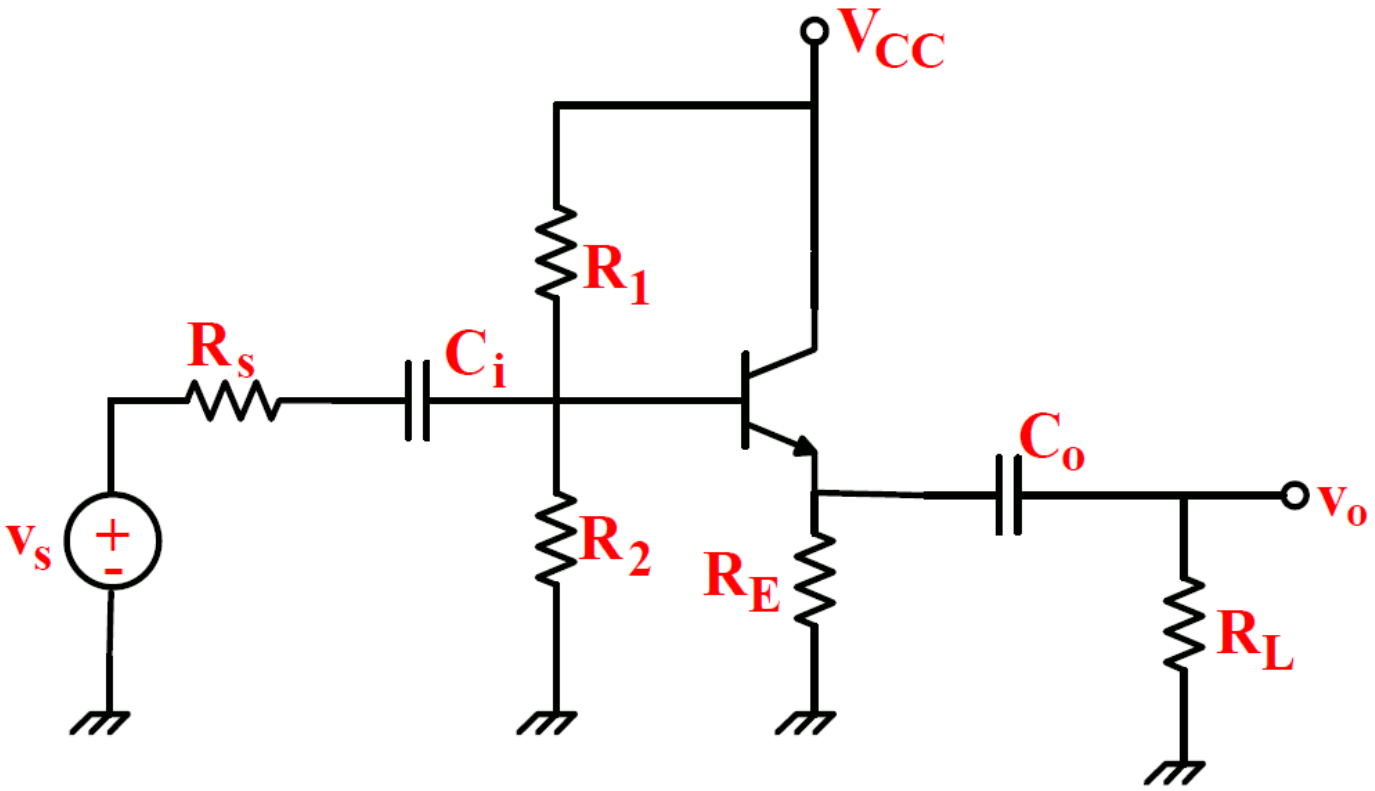
شیب خط بار AC:

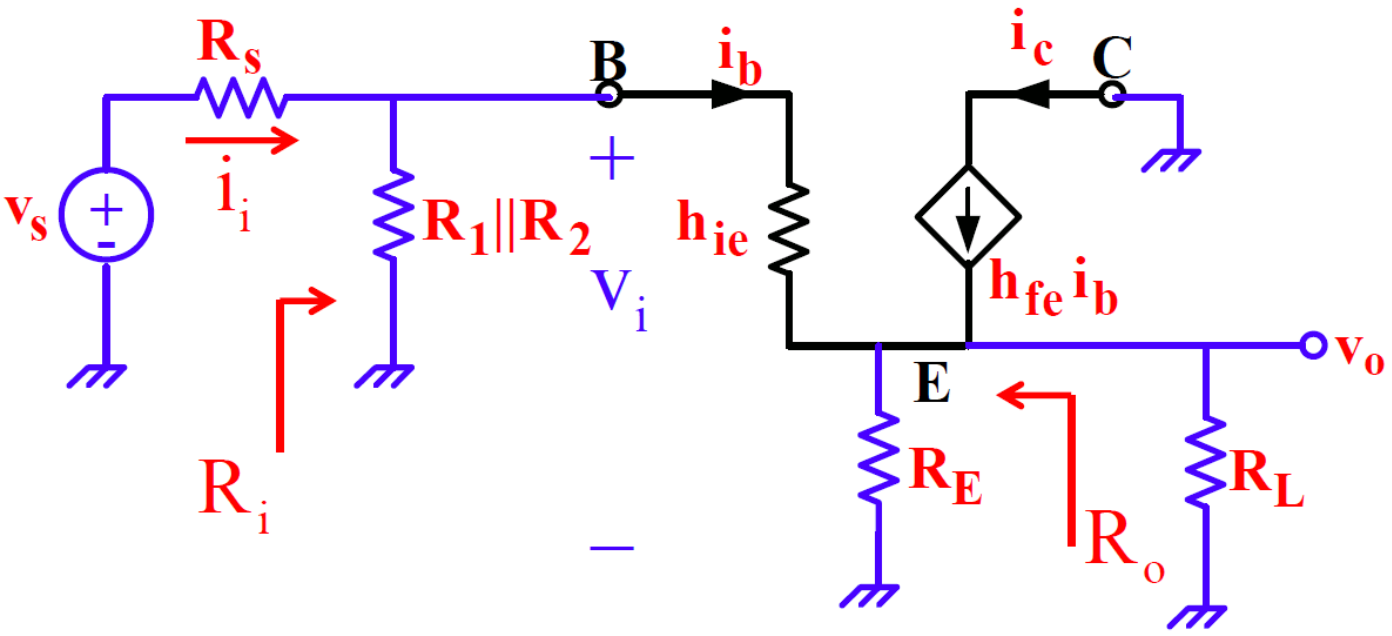
$$\frac{-1}{R_C \parallel R_L + R_E}$$

بهره ولتاژ و جریان نسبت به حالت قبل خیلی کمتر است.

۲- تقویت کننده کلکتور مشترک CC

در این تقویت کننده ، ورودی بیس و خروجی امیتر است.





$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\left((h_{fe}+1)i_b\right)(R_E \parallel R_L)}{h_{ie}i_b + (1+h_{fe})i_b(R_E \parallel R_L)} = \frac{(h_{fe}+1)(R_E \parallel R_L)}{h_{ie} + (1+h_{fe})(R_E \parallel R_L)} \approx 1$$

$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_L}{i_e} \times \frac{i_e}{i_b} \times \frac{i_b}{i_i}$$

$$= \frac{R_E}{R_E + R_L} \times (1+h_{fe}) \times \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2 + \left(h_{ie} + (1+h_{fe})R_E \middle| \middle| R_L\right)}$$

$$R_o = \frac{V_o}{i_o} = \frac{V_o}{i_e} = \frac{R_s \parallel R_1 \parallel R_2 + h_{ie}}{(1+h_{fe})} \parallel R_E$$

تقسیم بر $\left(1+h_{fe_1}\right)$ به دلیل نگاه کردن از امیتر می‌باشد.

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} = R_1 \parallel R_2 \parallel \left(h_{ie} + (1+h_{fe})(R_E \parallel R_L)\right)$$

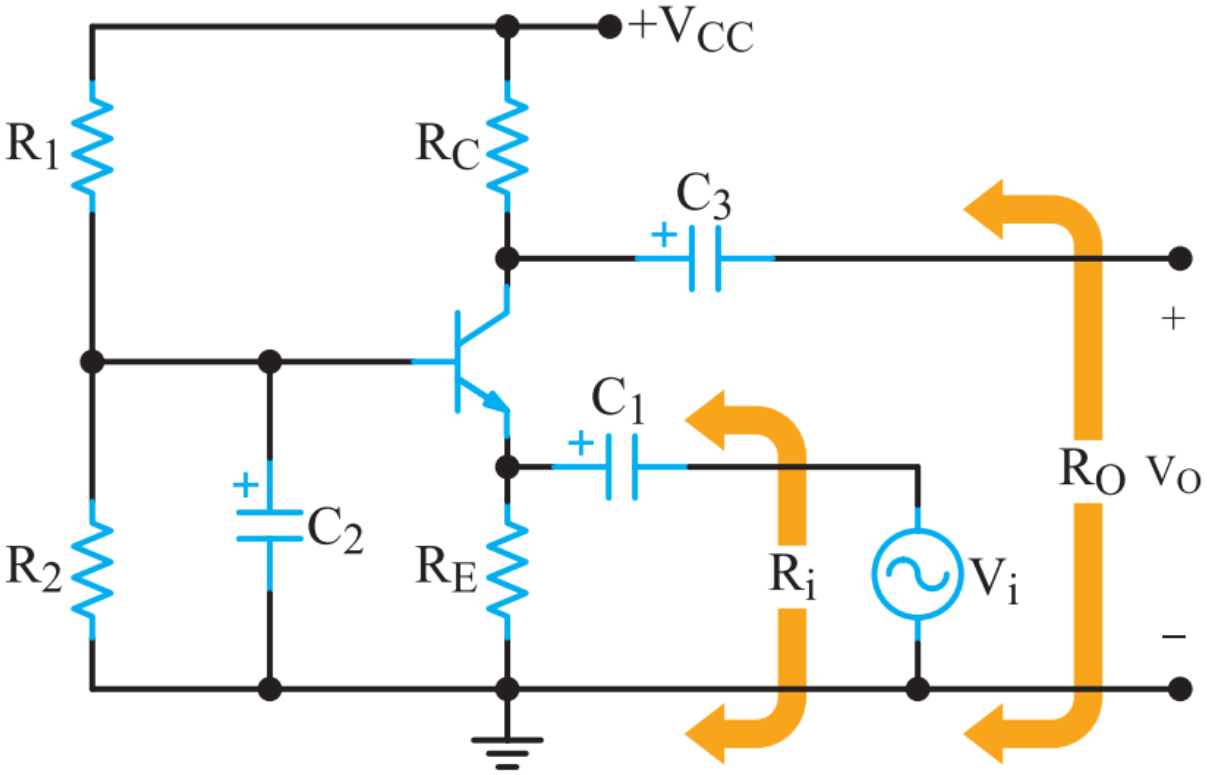
ضرب در $\left(1+h_{fe_1}\right)$ به دلیل نگاه کردن از بیس می‌باشد.

شیب خط بار AC:

$$\frac{-1}{R_E \parallel R_L}$$

۳- تقویت کننده بیس مشترک CB

در این تقویت کننده ، ورودی امیتر و خروجی کلکتور است. بیس زمین شده است، پس مقامت‌های بایاس در مدل AC حذف می‌شوند.



$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(-h_{fe} i_b)(R_C \parallel R_L)}{(-i_b)(h_{ie})} = \frac{(h_{fe})(R_C \parallel R_L)}{h_{ie}}$$

$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_L}{i_c} \times \frac{i_c}{i_e} \times \frac{i_e}{i_i} = \frac{-R_C}{R_C + R_L} \times \frac{h_{fe}}{h_{fe}+1} \times \frac{-R_E}{R_E + \frac{h_{fe}}{h_{fe}+1}}$$

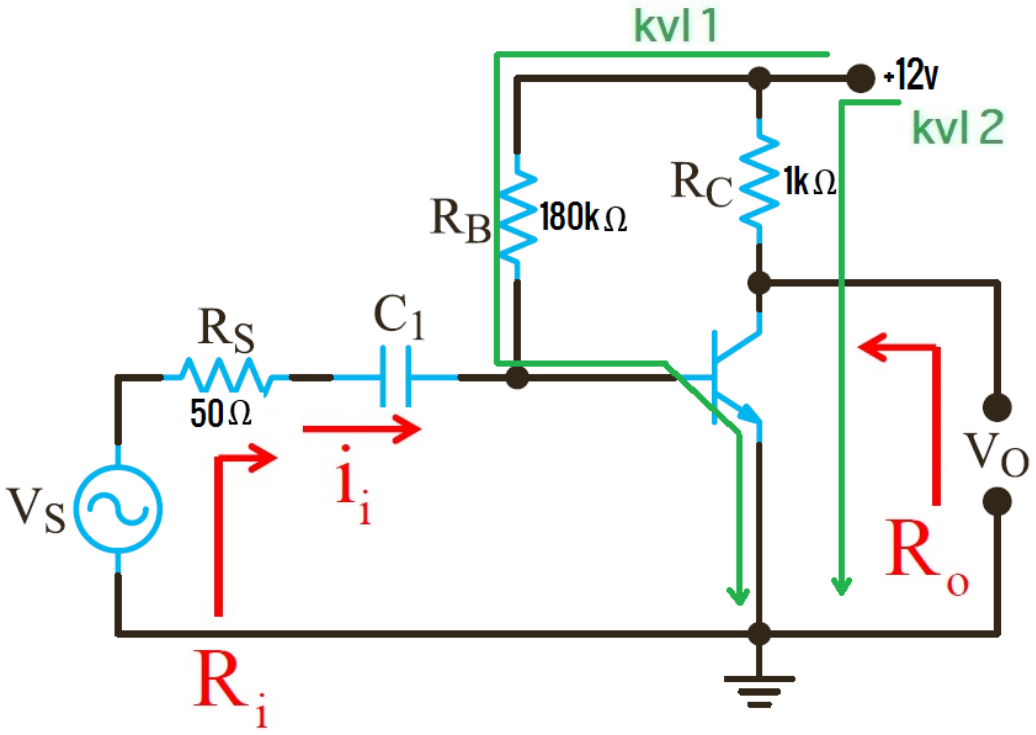
$$R_o = R_C$$

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} = \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} \parallel R_E$$

شیب خط بار:

$$\frac{-1}{R_C \parallel R_L}$$

مثال: مدار زیر را تحلیل کنید.محل نقطه کار ، خط بار AC ، شیب خط بار، مقاومت ورودی، مقاومت خروجی، تحلیل AC در شرایط $\beta = h_{fe} = 100$ و $V_{BE} = 0.6\ v$ و $\eta V_T = 52mV$ بدست آورید.



تحلیل DC:

$$kvl1: -V_{CC} + R_B(I_B) + V_{BE} = 0 \implies -12 + 180k(I_B) + 0.6 = 0$$

$$\implies I_B = \frac{12 - 0.6}{180k} = 63.3\mu A \implies I_E = (1 + 100)63.3\mu A = 6.39mA$$

$$\implies I_C = (100)\ 63.3\mu A = 6.33mA$$

$$\text{kvl2}: -V_{CC} + R_C(I_C) + V_{CE} = 0 \implies -12 + 1k(6.33mA) + V_{CE} = 0$$

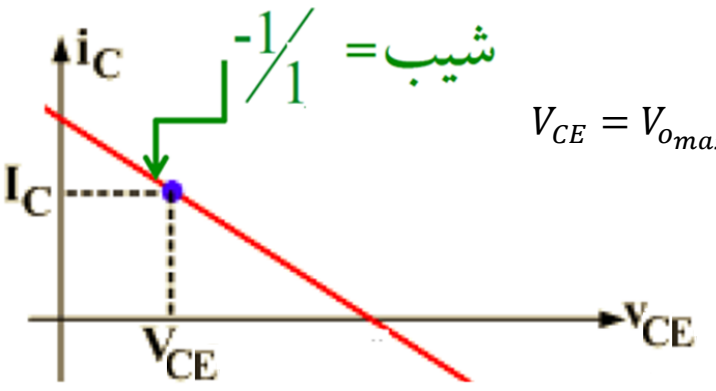
$$V_{CE} = 12v - 6.33v = 5.67v$$

$$\text{kvl2}: -12 + 1k(I_C) + V_{CE} = 0 \quad \text{خط بار}$$

$$\text{خط بار AC} \implies V_{CE} = 0 \rightarrow I_{C_{V_{CE}=0}} = \frac{12}{1k} = 12mA$$

$$\text{خط بار AC} \implies I_C = 0 \rightarrow V_{CE_{I_C=0}} = 12v$$

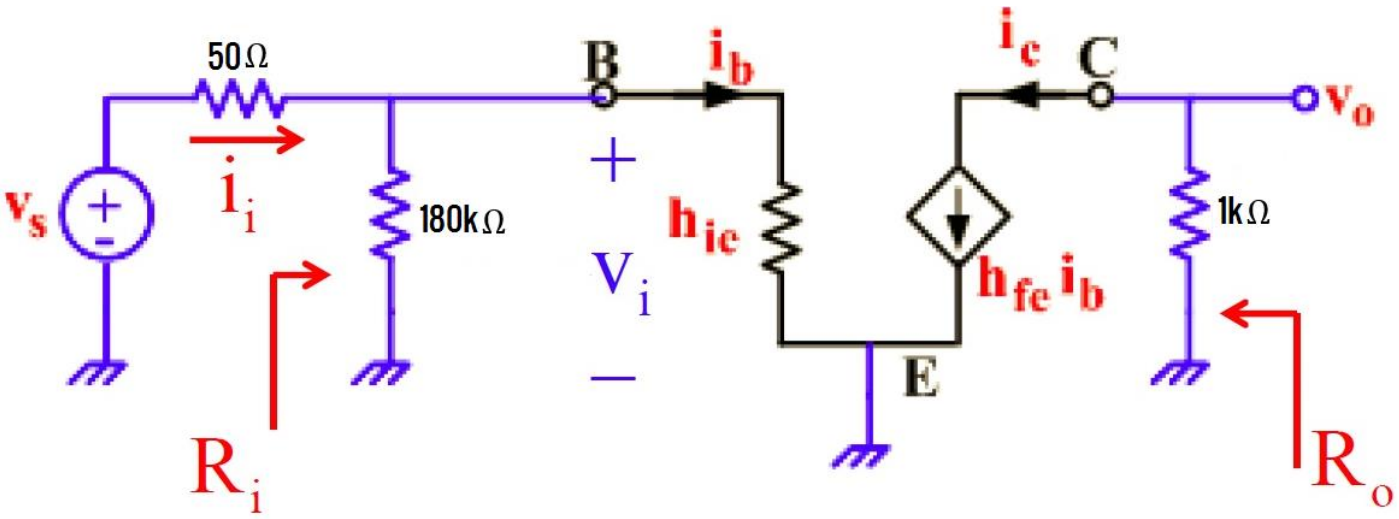
$$V_{CE} = V_{o_{max}} = V_P = 5.67\ , V_{P-P} = 5.67 \times 2 = 11.34$$



شیب خط بار AC:

$$\frac{-1}{R_C} = \frac{-1}{1k}$$

تحلیل AC:



$$h_{ie} = \frac{\eta V_T \beta}{I_C} = \frac{52mV \times 100}{6.33mA} = 821.48\Omega$$

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(-h_{fe} i_b)(R_C)}{h_{ie} i_b} = \frac{-h_{fe}(R_C)}{h_{ie}} = \frac{-100 \times 1k}{821.48} = \frac{-100 \times 1000}{821.48} = -121.7$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_c}{i_i} = \frac{i_c}{i_b} \times \frac{i_b}{i_i} = h_{fe} \times \frac{R_B}{R_B + h_{ie}} = 100 \times \frac{180k}{180k + 821.48} = 99.54$$

یادآوری تقسیم جریان

$$i_b = \frac{i_i \times 180k}{180k + h_{ie}} \Longrightarrow i_i \times 180k = i_b(180k + h_{ie}) \Longrightarrow \frac{i_b}{i_i} = \frac{180k}{180k + h_{ie}}$$

$$R_o = R_C = 1k$$

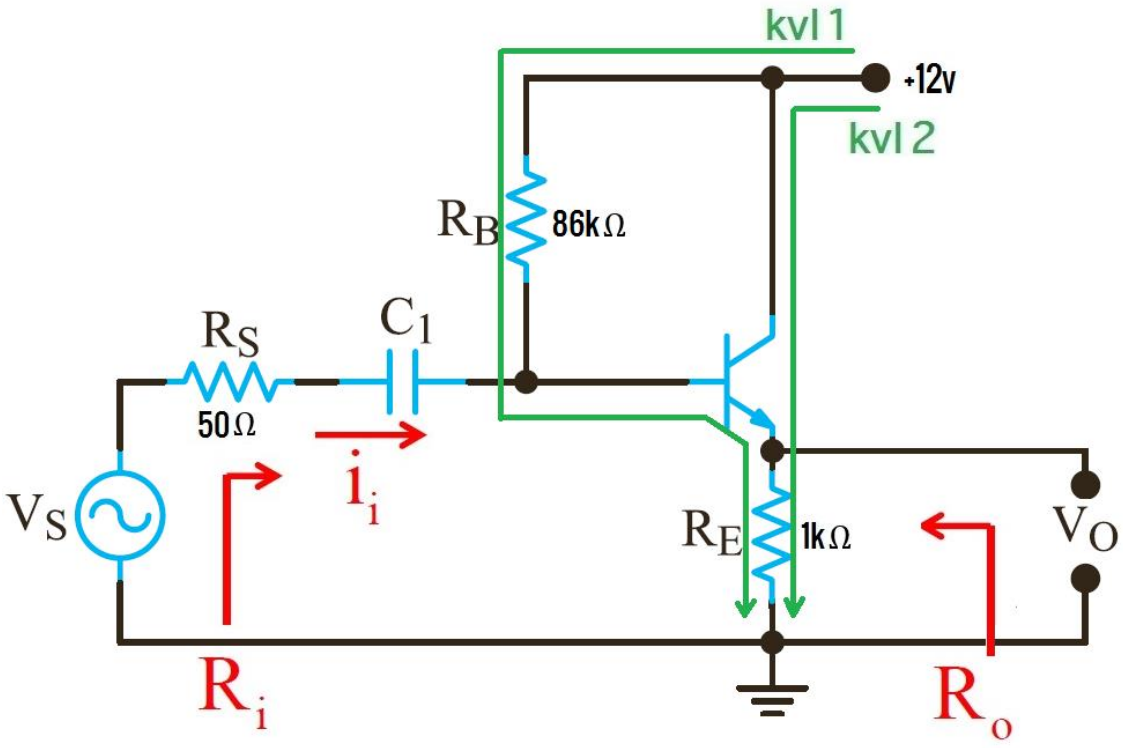
$$R_i = R_B \parallel h_{ie} = 180k \parallel 821.48 = \frac{180k \times 821.48}{180k + 821.48} = 817.74$$

$$A_{v_s} = \frac{V_o}{v_s} = \frac{V_o}{V_i}\frac{V_i}{v_s} = \frac{-h_{fe}(R_C)}{h_{ie}} \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -121.7 \times \frac{817.74}{817.74 + 50} = -114.68$$

یادآوری تقسیم ولتاژ

$$v_i = \frac{v_s \times R_i}{R_i + R_s} \Longrightarrow v_s \times R_i = v_i(R_i + R_s) \Longrightarrow \frac{V_i}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

مثال: مدار زیر را تحلیل کنید.محل نقطه کار ، خط بار AC ، شیب خط بار، مقاومت ورودی، مقاومت خروجی، تحلیل AC در شرایط $\beta = h_{fe} = 100$ و $V_{BE} = 0.6\ v$ و $\eta V_T = 52mV$ بدست آورید.



تحلیل DC:

$$kvl1: -V_{CC} + R_B(I_B) + V_{BE} + R_E(I_E) = 0 \rightarrow -V_{CC} + R_B(I_B) + V_{BE} + R_E(1+\beta)I_B = 0$$

$$\Longrightarrow kvl1: -12 + 86k(I_B) + 0.6 + 1k(1+100)I_B = 0$$

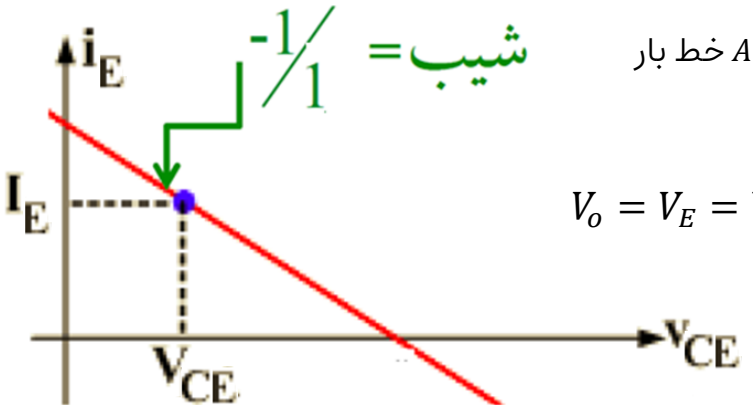
$$\Longrightarrow I_B = \frac{12 - 0.6}{86k + 1k(101)} = 60.96\mu A \Longrightarrow I_E = (1+100)60.96\mu A = 6.15mA$$

$$\Longrightarrow\ I_C = (100)\ 60.96\mu A = 6.096mA\ \Longrightarrow I_C \approx I_E$$

$$\text{kvl2}: -V_{CC} + V_{CE} + R_E(I_E) = 0 \Longrightarrow -12 + V_{CE} + 1k(6.15mA) = 0$$

$$V_{CE} = 12v - 6.15v = 5.85v$$

$$\text{kvl2}: : -V_{CC} + V_{CE} + 1k(I_E) = 0 \quad \text{خط بار}$$



$$AC \text{ خط بار} \Longrightarrow V_{CE} = 0 \rightarrow I_{E_{V_{CE}=0}} = \frac{12}{1k} = 12mA$$

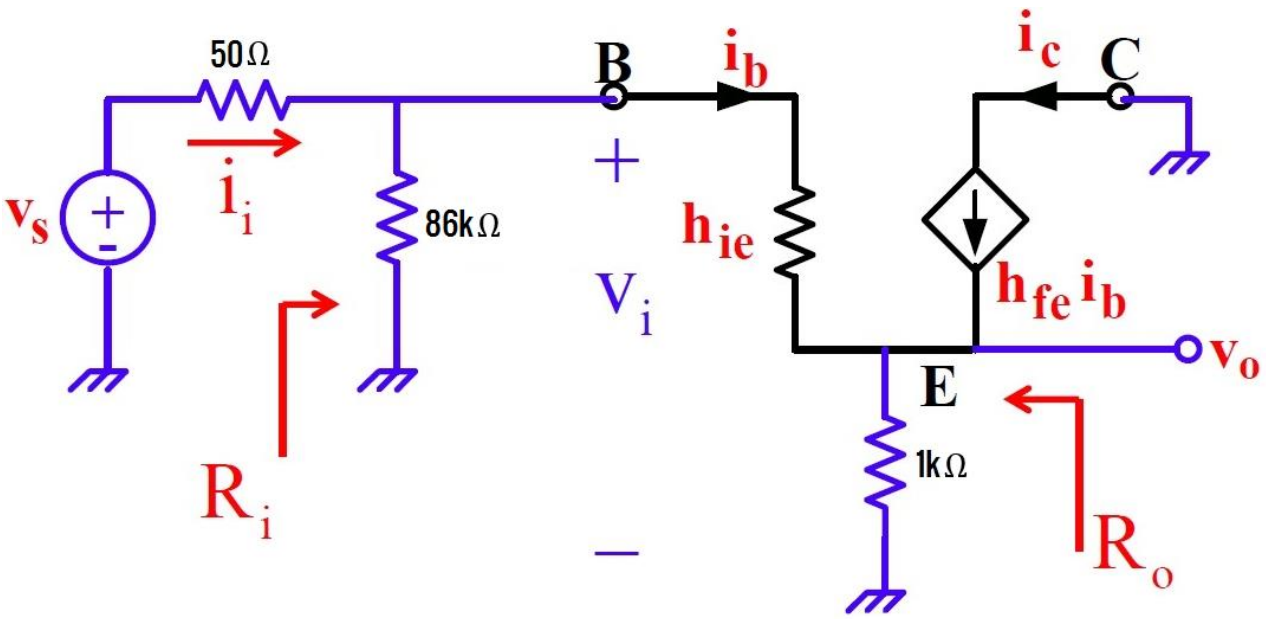
$$\text{AC خط بار} \Longrightarrow I_E = 0 \rightarrow V_{CE_{I_E=0}} = 12v$$

$$V_o = V_E = V_P = 6.15v\ , V_{P-P} = 6.15 \times 2 = 12.3v$$

شیب خط بار AC:

$$\frac{-1}{R_E} = \frac{-1}{1k}$$

تحلیل AC:



$$h_{ie} = \frac{\eta V_T \beta}{I_C} = \frac{52mV \times 100}{6.096mA} = 853\Omega$$

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\left(i_b + \left(h_{fe} i_b\right)\right)(R_E)}{h_{ie} i_b + \left(i_b + \left(h_{fe} i_b\right)\right)(R_E)} = \frac{i_b(1 + h_{fe})(R_E)}{h_{ie} i_b + i_b(1 + h_{fe})(R_E)}$$

$$\Rightarrow \frac{(1 + h_{fe})(R_E)}{h_{ie} + (1 + h_{fe})(R_E)} = \frac{101 \times 1k}{853 + (101 \times 1k)} = 0.991$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_e}{i_i} = \frac{i_e}{i_b} \times \frac{i_b}{i_i} = \frac{i_b + \left(h_{fe} i_b\right)}{i_b} \times \frac{R_B}{R_B + \left(h_{ie} + \left(1 + h_{fe}\right)R_E\right)}$$

$$\rightarrow (1 + h_{fe}) \times \frac{R_B}{R_B + \left(h_{ie} + \left(1 + h_{fe}\right)R_E\right)} = (101) \times \frac{86k}{86k + (853 + (101)1k)} = 46.23$$

$$R_o = \frac{V_o}{i_o} = \frac{V_o}{i_e} = \frac{R_s \parallel R_B + h_{ie}}{(1 + h_{fe})} \parallel R_E = \frac{49.97 + 853}{(101)} \parallel R_E = \frac{902.97}{(101)} \parallel 1k$$

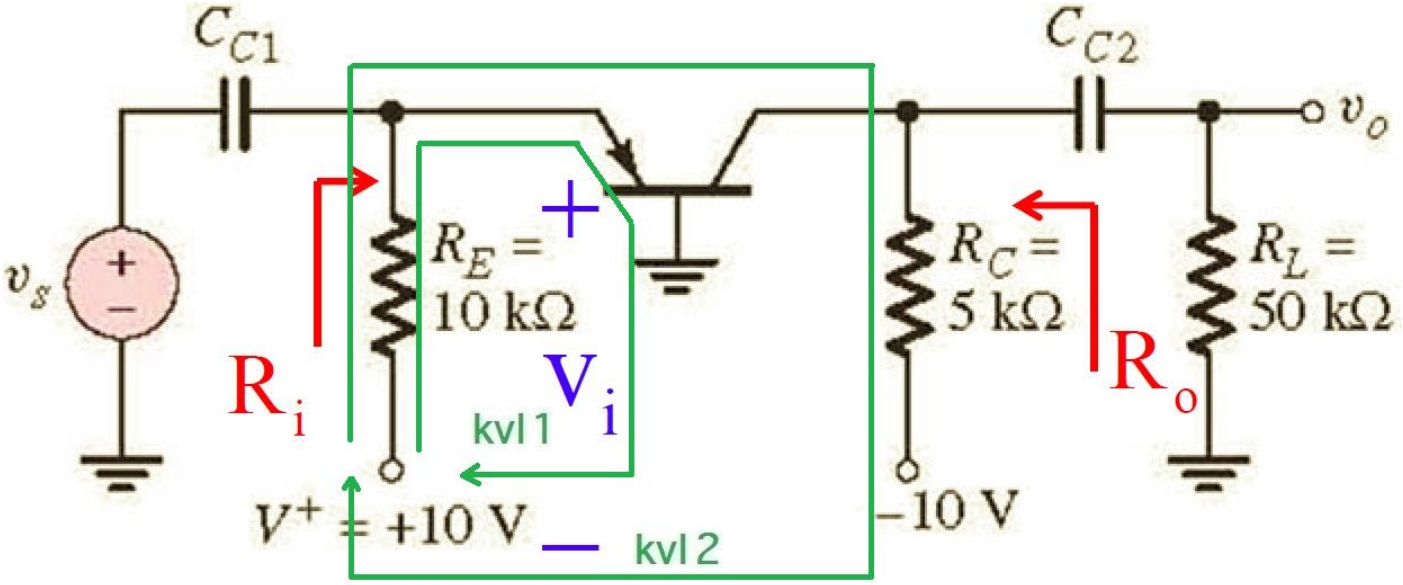
$$\Rightarrow 8.94 \parallel 1k = \frac{8.94 \times 1k}{8.94 + 1k} = 8.86\Omega$$

$$R_i = R_B \parallel \left(h_{ie} + \left(1 + h_{fe}\right)R_E\right) = 86k \parallel (853 + (101)1k)$$

$$\Rightarrow 86k \parallel 101.853k = \frac{86k \times 101.853k}{86k + 101.853k} = 46.628k\Omega$$

$$A_{v_s} = \frac{V_o}{v_s} = \frac{V_o}{V_i}\frac{V_i}{v_s} = \frac{(1 + h_{fe})(R_E)}{h_{ie} + (1 + h_{fe})(R_E)} \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = 0.991 \times \frac{46.628k}{46.628k + 50} = 0.99$$

مثال: مدار زیر را تحلیل کنید.محل نقطه کار ، خط بار AC ، شیب خط بار، مقاومت ورودی، مقاومت خروجی، تحلیل AC در شرایط $\beta = h_{fe} = 100$ و $V_{EB} = 0.6\,v$ و $\eta V_T = 52mV$ بدست آورید.



تحلیل DC:

$$kvl1: -V^+ + R_E(I_E) + V_{EB} = 0 \rightarrow -V^+ + R_E(1+\beta)I_B + V_{EB} = 0$$

$$\Longrightarrow kvl1: -V^+ + R_E(I_E) + V_{EB} = 0 \rightarrow -10 + 10k(101)I_B + 0.6 = 0$$

$$\Longrightarrow I_B = \frac{10 - 0.6}{10k(101)} = 9.3\mu A \Longrightarrow I_E = (1+100)9.3\mu A = 0.94mA$$

$$\Longrightarrow\ I_C = (100)\ 9.3\mu A = 0.93mA\ \Longrightarrow I_C \approx I_E$$

$$\text{kvl2}: -V^+ + R_E(I_E) + V_{EC} + R_C(I_C) - 10 = 0$$

$$\Longrightarrow -10 + 10k(0.94mA) + V_{EC} + 5k(0.93mA) - 10 = 0$$

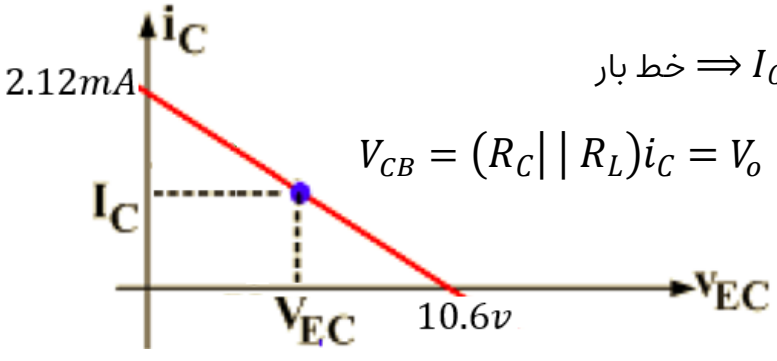
$$\Longrightarrow V_{EC} = 10 - 9.4 - 4.65 + 10 \Longrightarrow V_{CE} = 20v - 6.096v = 5.95v$$

$$\text{kvl2}: -V^+ + R_E(I_E) + V_{EC} + R_C(I_C) - 10 = 0 \quad \text{خط بار}$$

$$\text{kvl2}: -10 + 9.4 + V_{EC} + 5k(I_C) - 10 = 0 \quad \text{خط بار}$$

$$\text{خط بار} \Longrightarrow V_{EC} = 0 \rightarrow I_{C_{V_{EC}=0}} = \frac{20 - 9.4}{5k} = 2.12mA$$

$$\text{خط بار} \Longrightarrow I_C = 0 \rightarrow V_{EC_{I_C=0}} = 20 - 9.4 = 10.6v$$



$$V_{CB} = (R_C \| R_L)i_C = V_o = V_P = \frac{5k \times 50k}{5k + 50k} \times 0.93mA = 4.22v$$

شیب خط بار AC:

$$\frac{-1}{R_C \parallel R_L} = \frac{-1}{5k \parallel 50k} \approx \frac{1}{5} \times 10^{-3}$$

تحلیل AC:

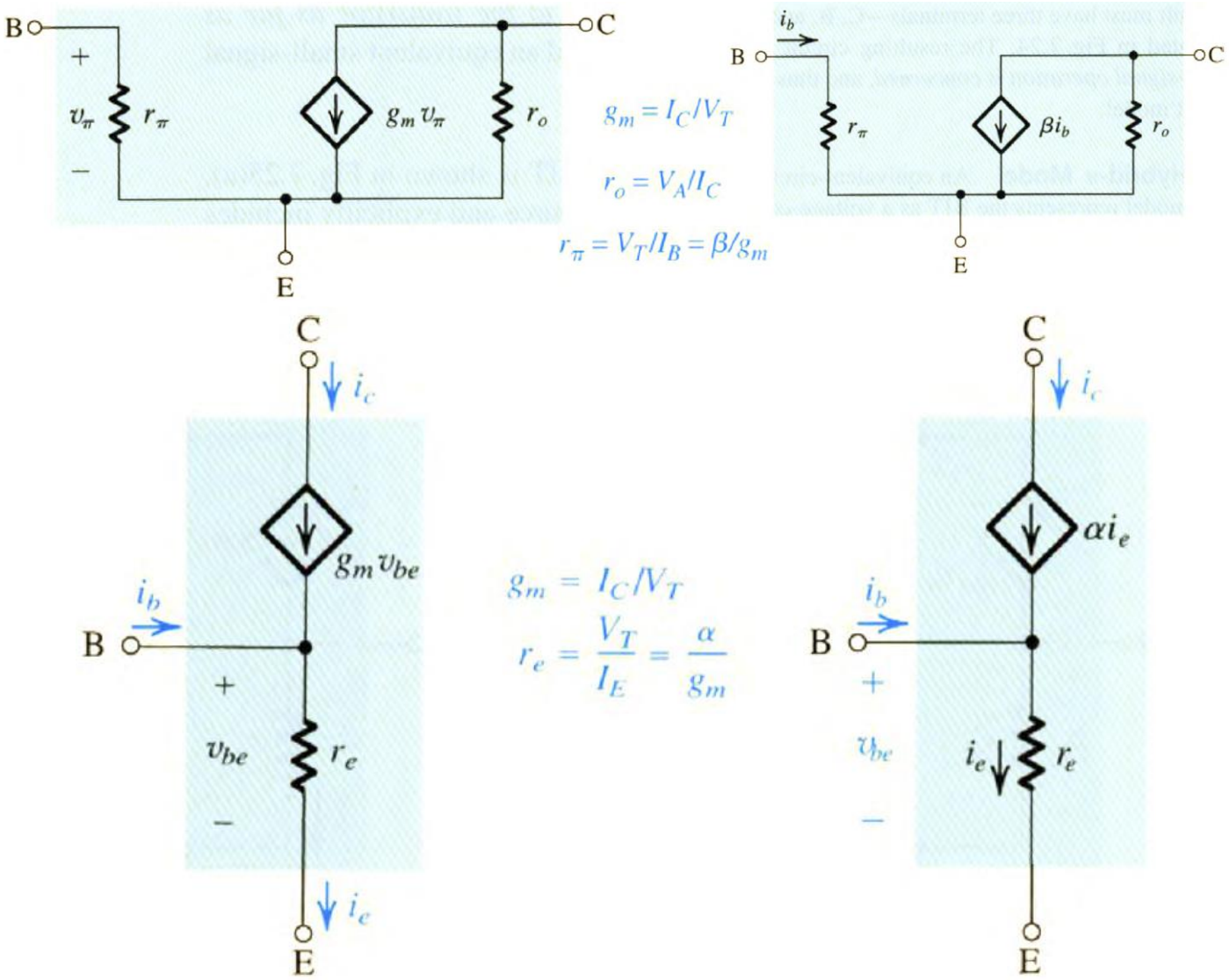
$$h_{ie} = \frac{\eta V_T \beta}{I_C} = \frac{52mV \times 100}{0.93mA} = 5591\Omega = 5.591\text{k}\Omega$$

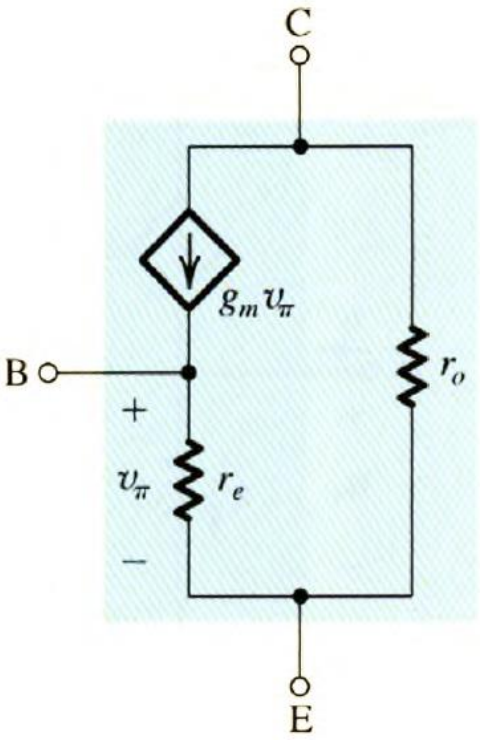
$$A_{v_s} = \frac{V_o}{v_s} = \frac{(h_{fe})(R_C \parallel R_L)}{h_{ie}} = \frac{(100)(4545.45)}{5591} = 81.299$$

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} \parallel R_E = \frac{5591}{101} \parallel R_E = 55.35 \parallel 10k = \frac{55.35 \times 10k}{55.35 + 10k} = 54\Omega$$

$$R_o = R_C = 5k\Omega$$

تبدیل سیگنال کوچک ترانزیستور BJT به مدل سیگنال کوچک T

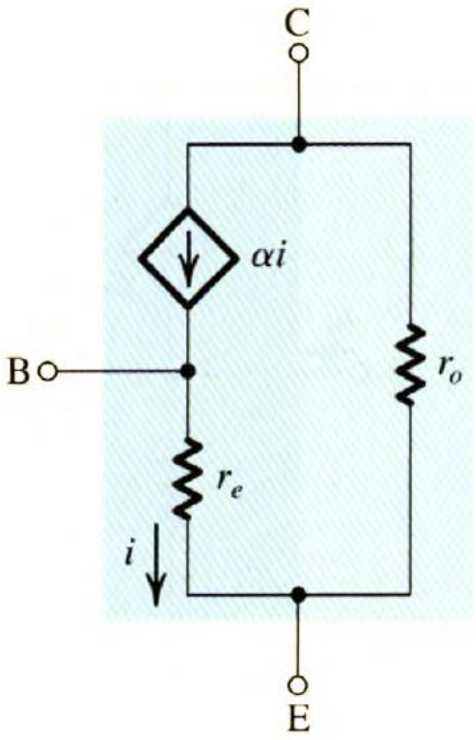


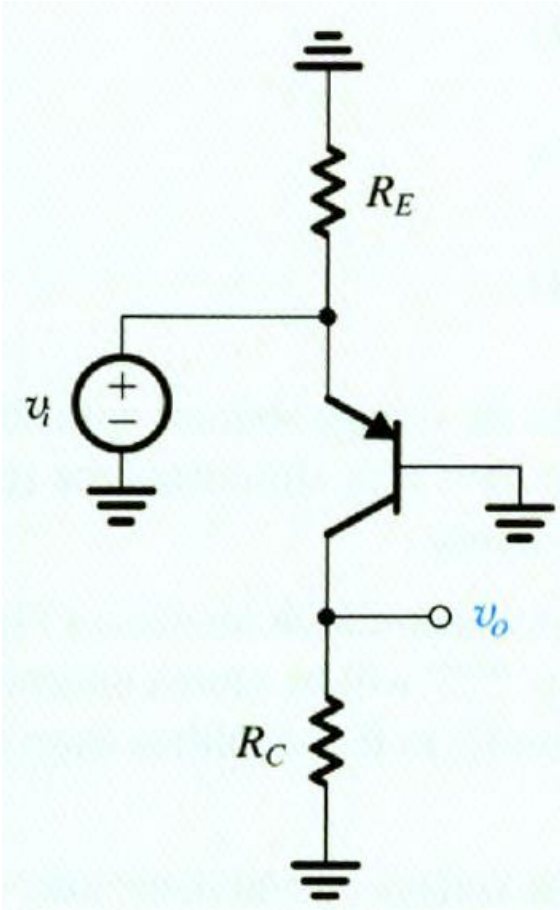


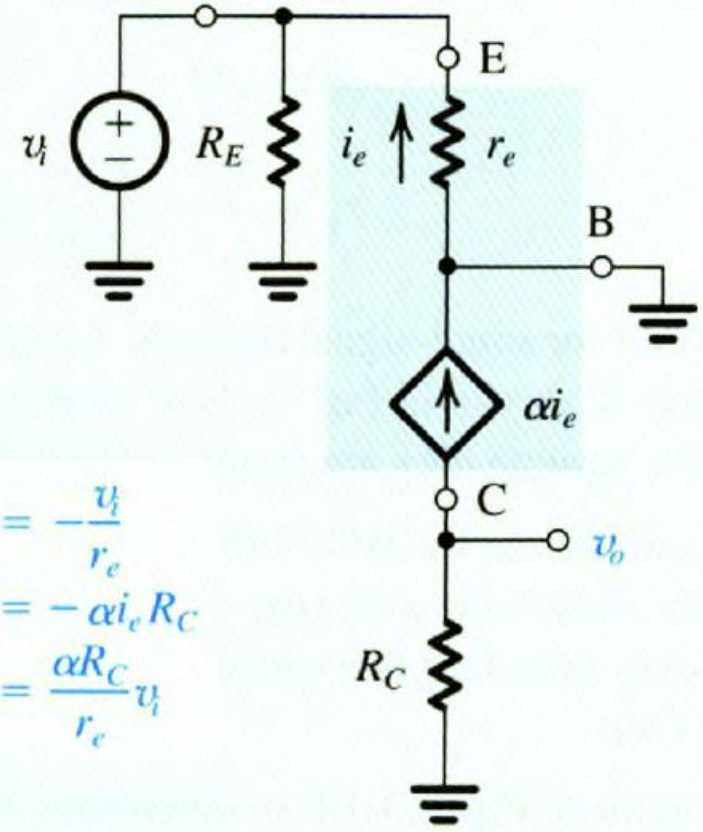
$$g_m = I_C/V_T$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{\alpha}{g_m}$$

$$r_o = V_A/I_C$$





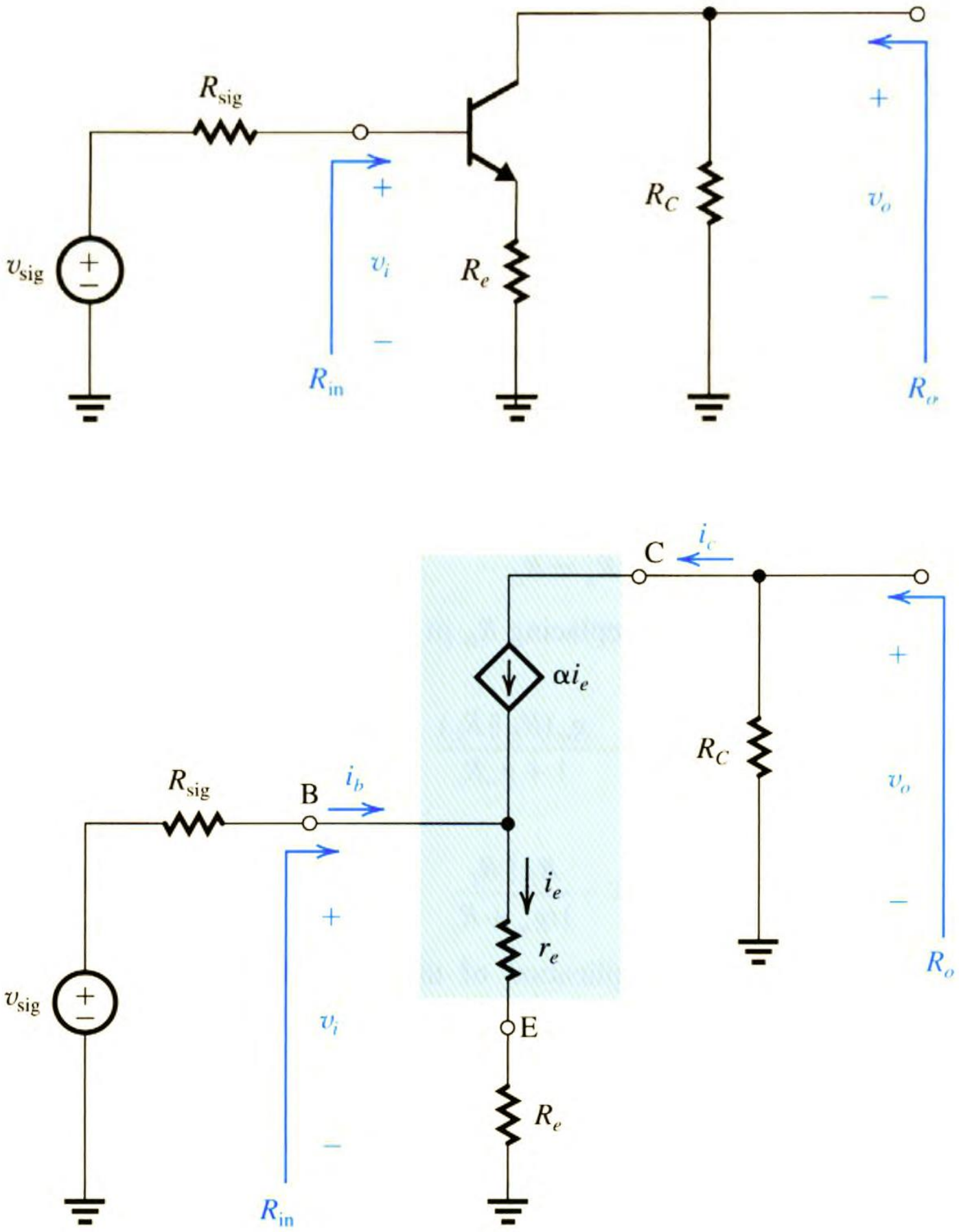


$$i_e = -\frac{v_i}{r_e}$$

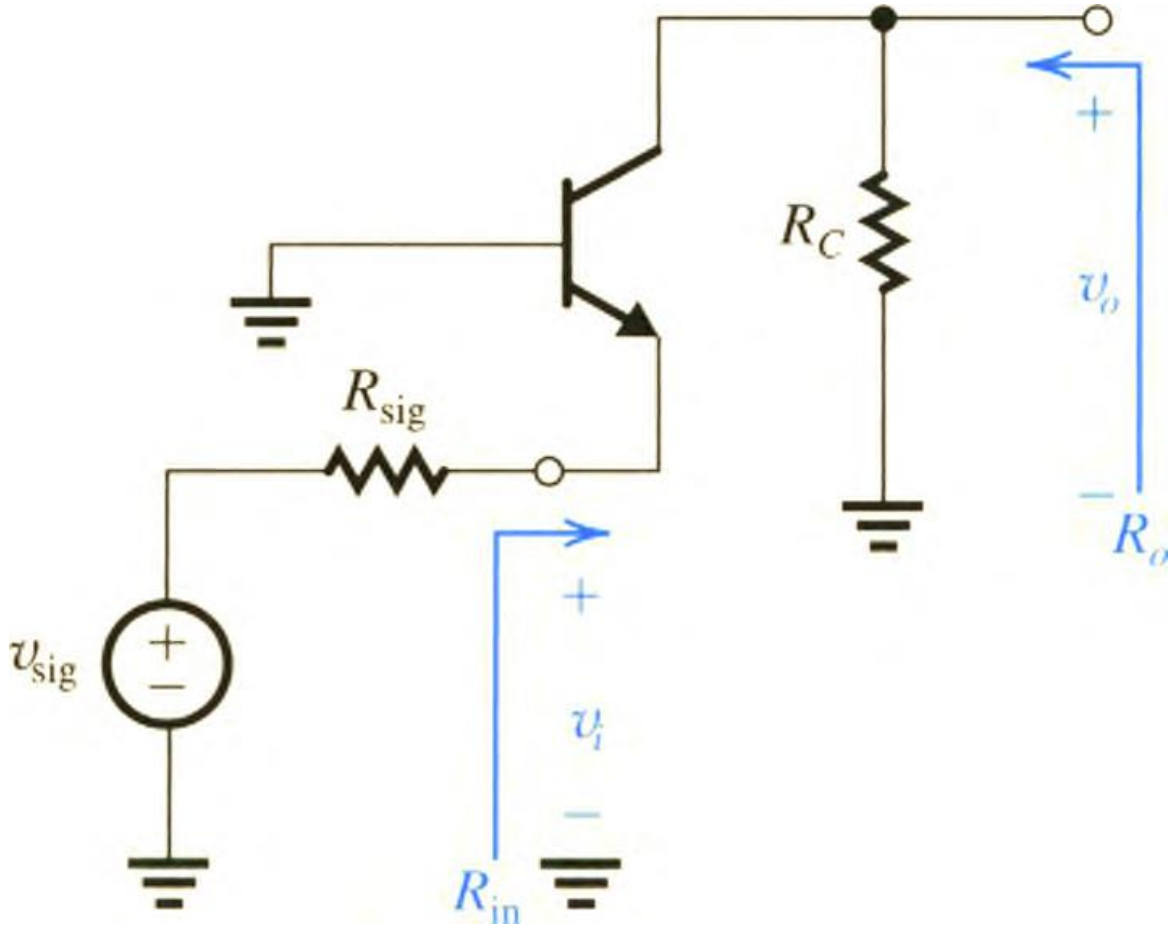
$$v_o = -\alpha i_e R_C$$

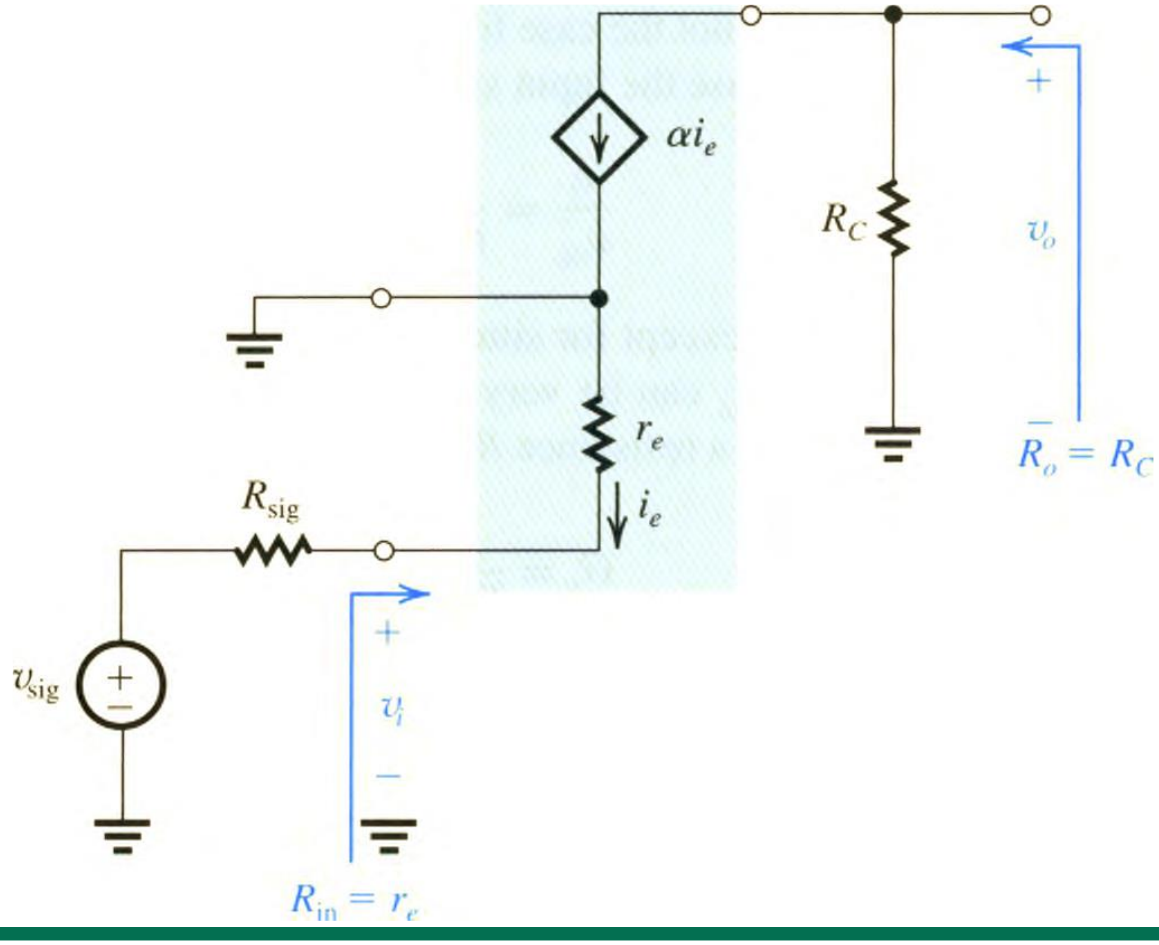
$$= \frac{\alpha R_C}{r_e} v_i$$

امیتر مشترک با سیگنال کوچک T

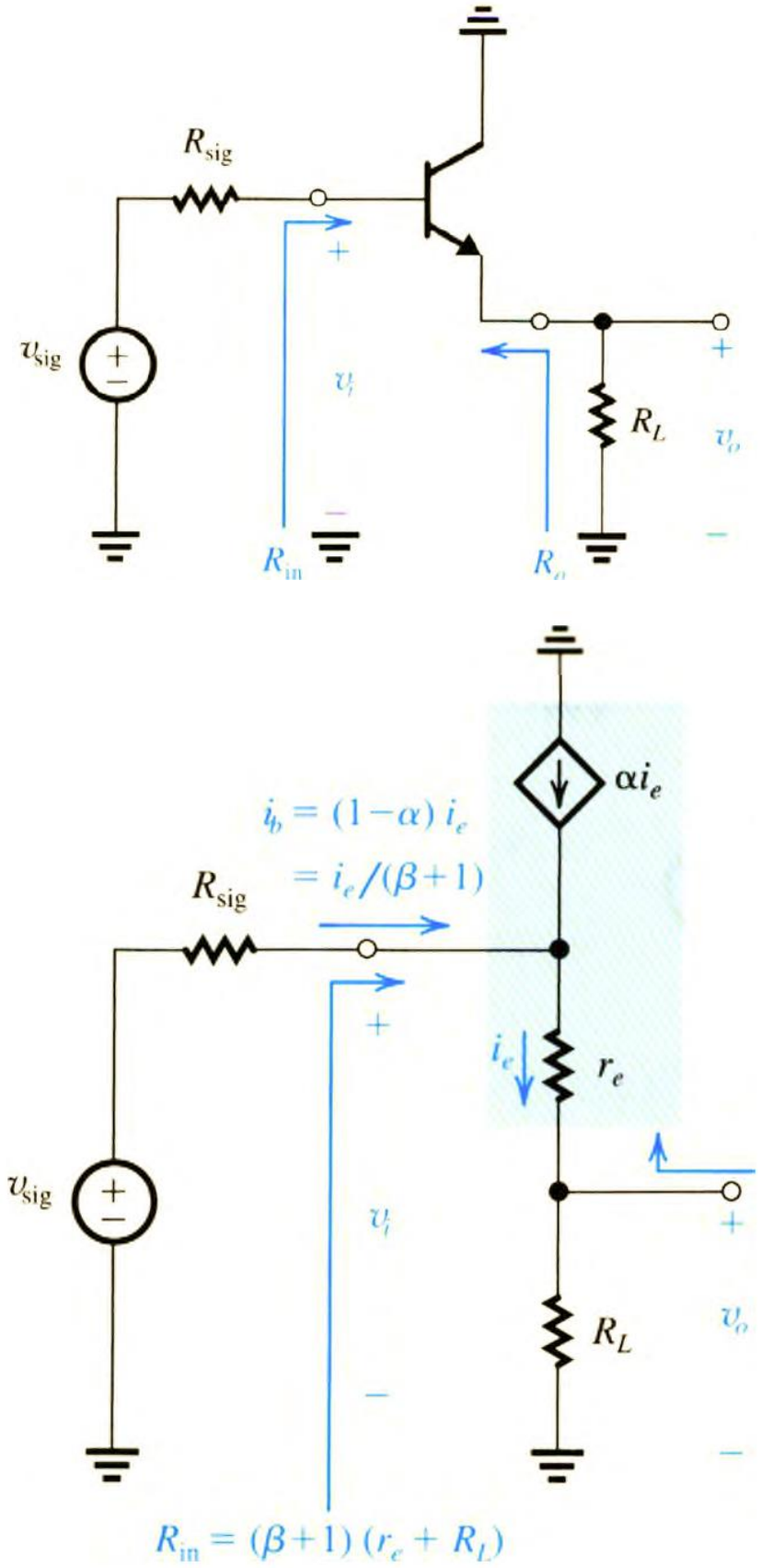


بیس مشترک سیگنال کوچک مدل T





کلکتور مشترک مدل سیگنال کوچک T



منابع:

۱- جزوه استاد دلیر روی‌فرد

پایان جلسه دهم

روزگار خوشی را برای شما آرزومندم.

محمد اعرابیان