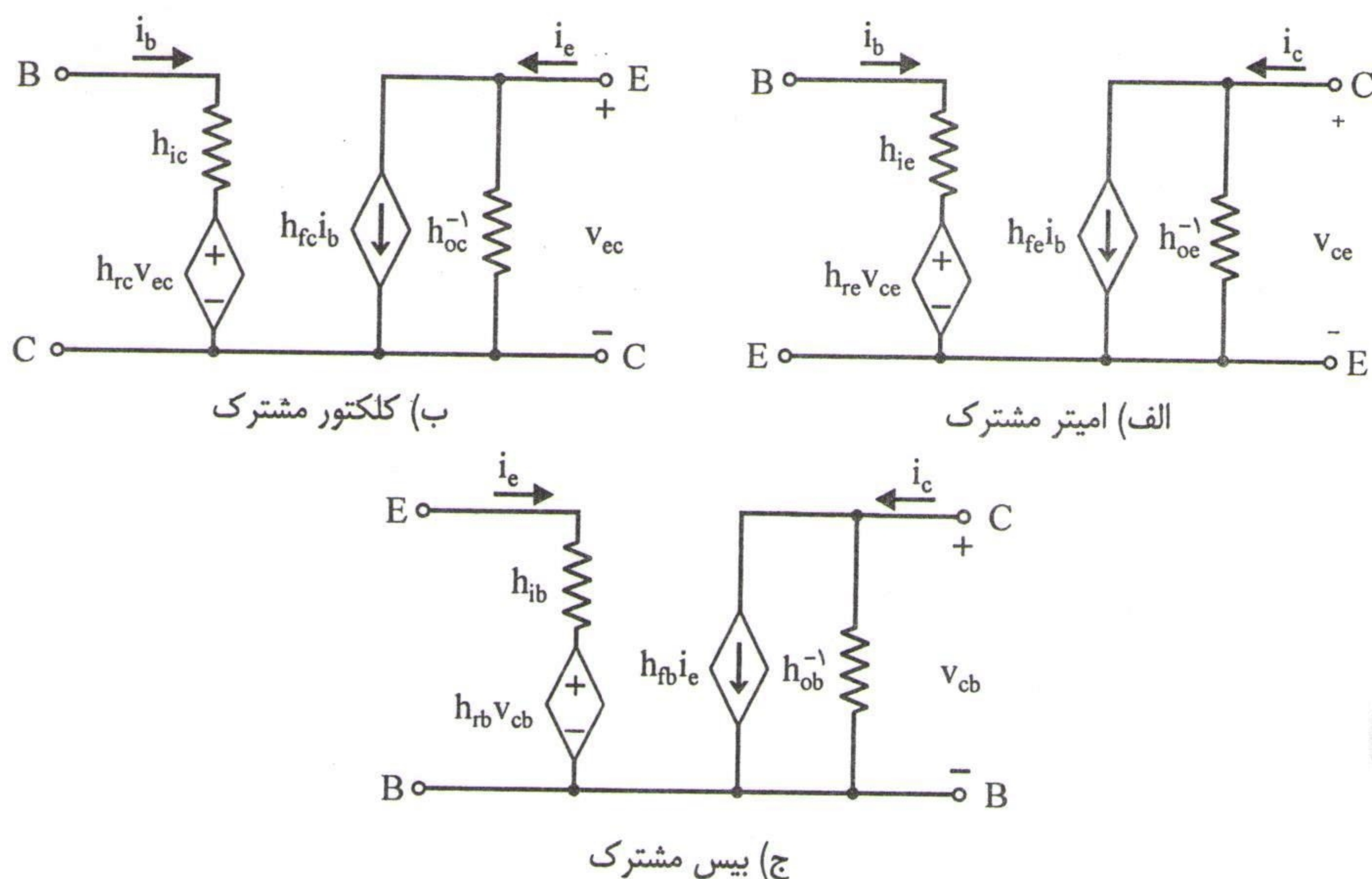


۵

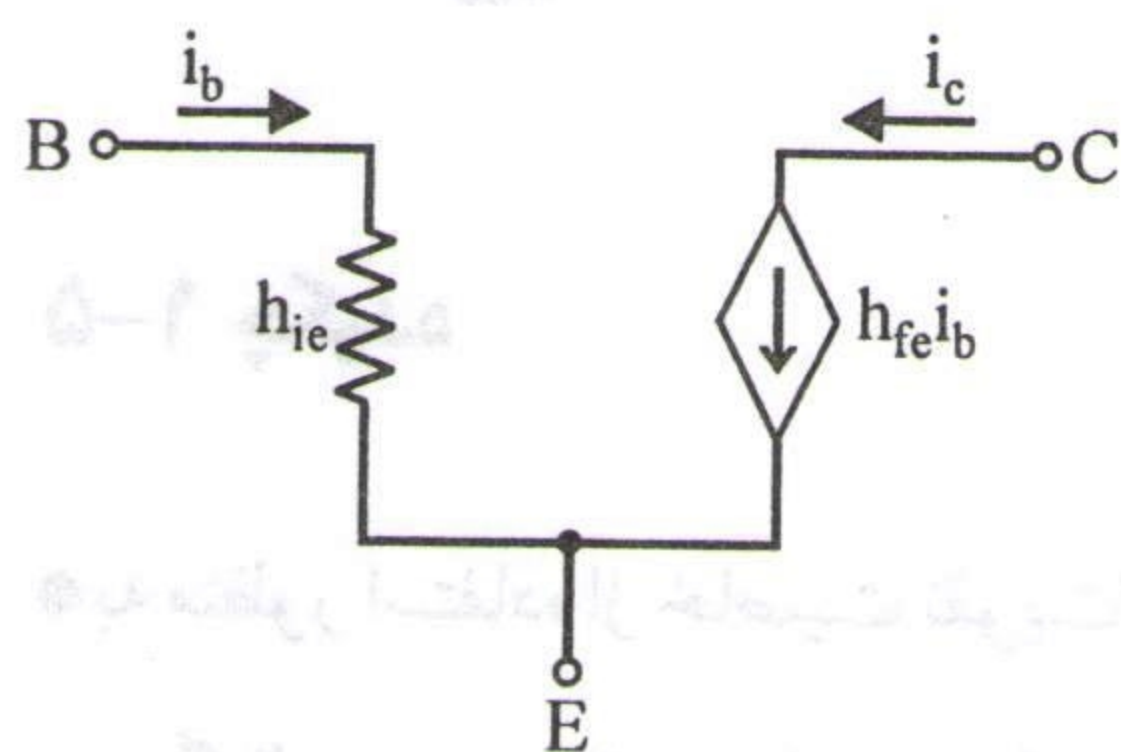
تقویت کننده های ترانزیستوری در فرکانسهای پایین

۱-۵ چکیده

- به منظور استفاده از خاصیت تقویت کنندگی ترانزیستور، این عنصر همواره در ناحیه فعال بایاس می شود.
- سیگنال ورودی تقویت کننده، یک سیگنال کوچک است به طوری که در محدوده تغییرات آن می توان ترانزیستور را با یک مدل خطی جایگزین کرد.
- منظور از تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک یک تقویت کننده، عبارت است از محاسبه مشخصه های آن از قبیل بهره ولتاژ، بهره جریان، مقاومت ورودی و مقاومت خروجی.
- مدل هیبرید h که متداول ترین مدل سیگنال کوچک ترانزیستور در فرکانسهای پایین است در سه ترکیب امیتر مشترک، کلکتور مشترک و بیس مشترک در شکل ۱-۵ نمایش داده شده است. مدل های نشان داده شده برای هر دو نوع ترانزیستور NPN و PNP به کار می روند.
- مشخصه های هیبرید h در هر یک از ترکیب های فوق را می توان بر حسب دو ترکیب دیگر به دست آورد. همواره می توان از مدل هیبرید امیتر مشترک به جای کلکتور مشترک نیز استفاده کرد.
- پارامترهای هیبرید h برخلاف دیگر پارامترها، با استفاده از مشخصه های ورودی و خروجی ترانزیستور قابل محاسبه می باشند و به طور کلی به جریان نقطه کار و دما وابسته هستند.



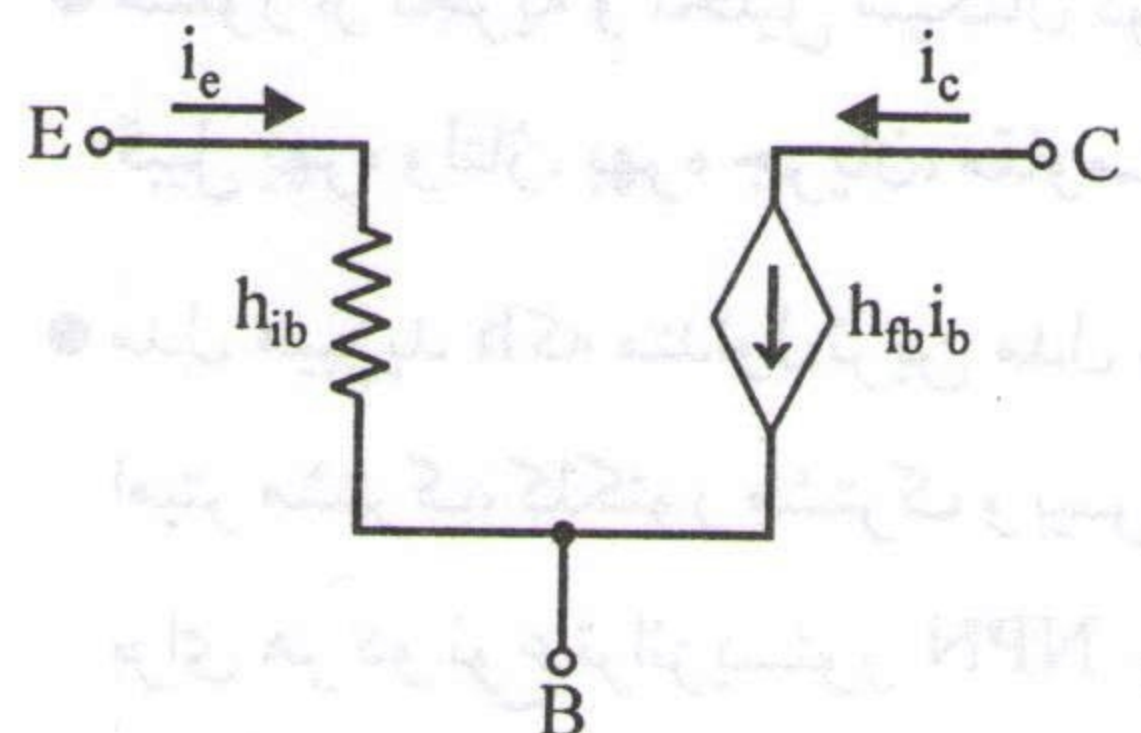
شکل ۵-۱



شکل ۵-۲

● معمولاً به دلیل بزرگ بودن مقاومت h_{oe}^{-1} و کوچک بودن h_{re} می‌توان مدل هیبرید h امیتر مشترک را به صورت شکل ۵-۲ ساده نمود که با خطای جزئی، تجزیه و تحلیل را بسیار راحت‌تر می‌کند. مقدار h_{ie} به صورت زیر به دست می‌آید که در آن معمولاً η برابر یک و V_T در دمای $300^\circ K$ معمولاً برابر ۲۶ میلی‌ولت در نظر گرفته می‌شود:

$$h_{ie} = h_{fe} \frac{\eta V_T}{I_{CQ}}$$



شکل ۵-۳

● مدل هیبرید h بیس مشترک را نیز می‌توان به صورت شکل ۵-۳ تقریب زد. همچنین مشخصه‌های این مدل تقریبی برحسب مشخصه‌های هیبرید امیتر مشترک برابر است با

$$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}, \quad h_{fb} = \frac{-h_{fe}}{1 + h_{fe}}$$

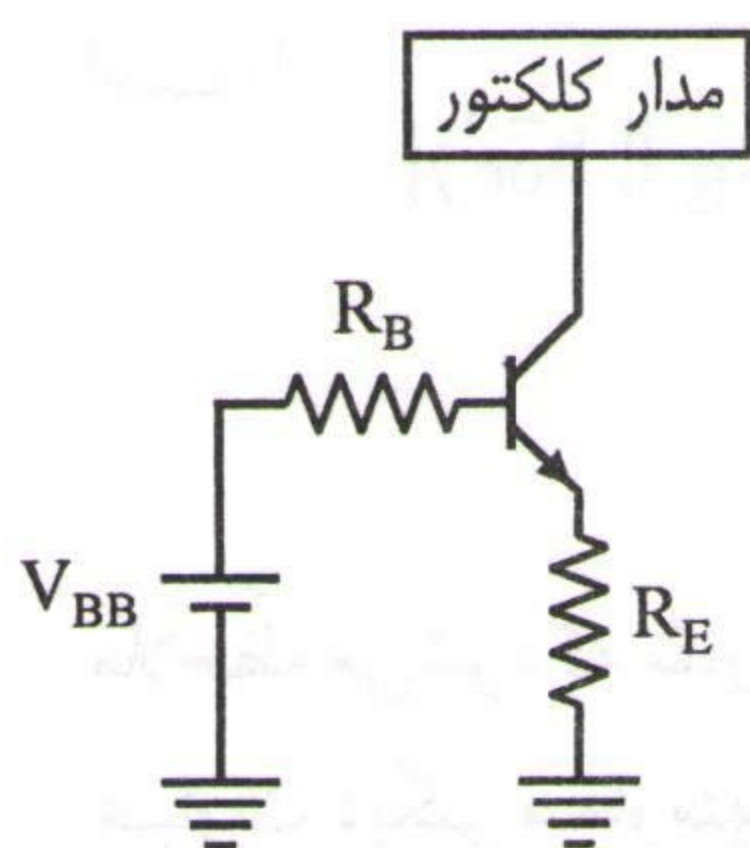
● مدار معادل سیگنال کوچک یک تقویت کننده با جایگذاری مدل هیبرید ترانزیستور در مدار معادل ac به دست می‌آید که با تحلیل مداری آن، مشخصه‌های تقویت کننده محاسبه می‌شوند.

- سه نوع تقویت کننده ترانزیستوری امیتر مشترک، کلکتور مشترک و بیس مشترک وجود دارد که با توجه به مشخصاتی که دارند، برای اهداف متفاوتی به کار می‌روند.
- تقویت کننده امیتر مشترک دارای مقادیر متوسطی برای بهره ولتاژ، بهره جریان، مقاومت ورودی و مقاومت خروجی است. بنابراین هم به عنوان تقویت کننده ولتاژ و هم به عنوان تقویت کننده جریان قابل استفاده است.
- تقویت کننده کلکتور مشترک یا امیتر فالوئر دارای مقاومت ورودی بزرگ، مقاومت خروجی کوچک، بهره جریان بزرگ و بهره ولتاژ کمتر از واحد است. بنابراین از این تقویت کننده می‌توان به عنوان تقویت کننده جریان یا بافر استفاده کرد. یک بافر ایده‌آل دارای مقاومت ورودی بی‌نهایت، مقاومت خروجی صفر و بهره ولتاژ برابر واحد است.

- مشخصات تقویت کننده بیس مشترک، عکس مشخصات تقویت کننده کلکتور مشترک است.

- پارامتر h_{fe} ترانزیستور را می‌توان تقریباً همان بهره جریان DC ترانزیستور یعنی β یا h_{FE} در نظر گرفت.

- با توجه به مدار شکل ۴-۵ و نوشتن معادله KVL در مدار بیس-امیتر، معادلات جریان I_B و I_E در ناحیه فعال به صورت زیر به دست می‌آیند:



$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + R_B / (1 + h_{fe})}, \quad I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + (1 + h_{fe}) R_E}$$

با توجه به دو معادله فوق دو نکته زیر را می‌توان به خاطر سپرد:

الف) کلیه مقاومت‌های امیتر از دید بیس در $(1 + h_{fe})$ ضرب می‌شوند.

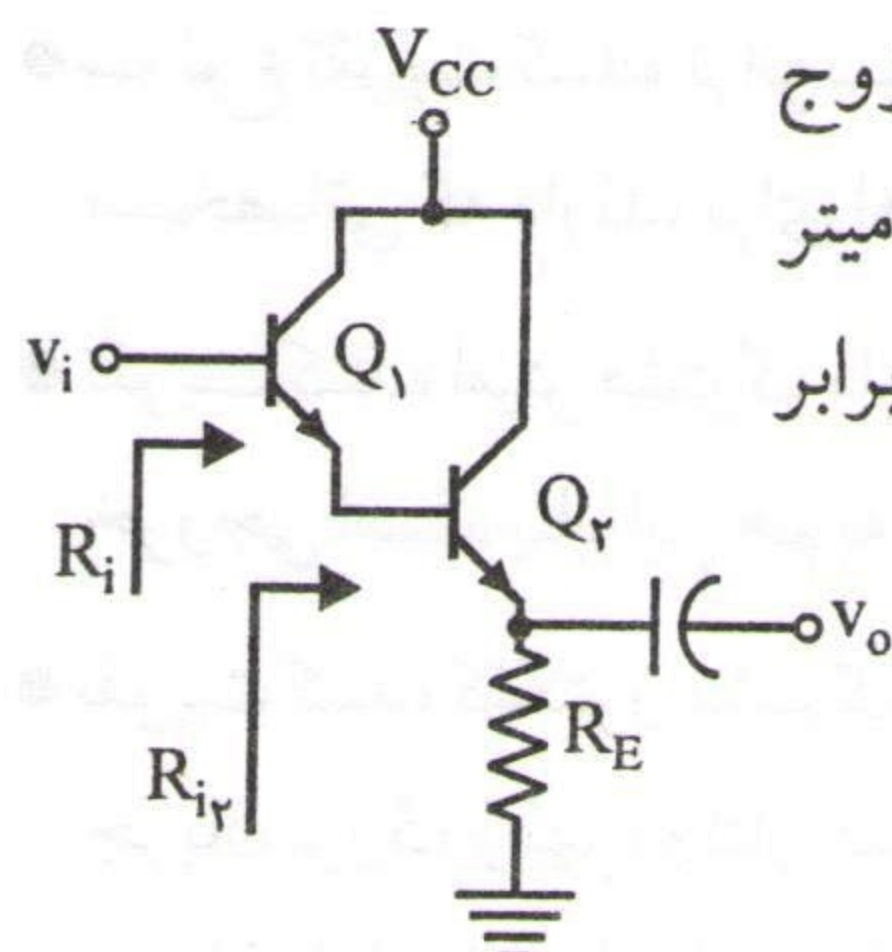
ب) کلیه مقاومت‌های بیس از دید امیتر بر $(1 + h_{fe})$ تقسیم می‌گردند.

این دو قاعده از نظر ac نیز صحیح می‌باشند.

- هر گاه بهره تقویت بزرگی نیاز باشد، یا علاوه بر تقویت، تطبیق امپدانس نیز لازم باشد از تقویت کننده‌های چند طبقه استفاده می‌شود.

- چنانچه طبقات مختلف توسط خازن کوپلاژ از هم مجزا شده باشند، نقاط کار طبقات مستقل از یکدیگر خواهند بود. خازن کوپلاژ از انتقال DC بین طبقات جلوگیری می‌نماید و در واقع فرکانس قطع پایینی تقویت کننده را تعیین می‌کند. در این حالت می‌توان کل تقویت کننده را یکجا تجزیه و تحلیل کرد. همچنین می‌توان بهره جریان یا ولتاژ تقویت کننده را از حاصل ضرب بهره‌های جریان یا ولتاژ تک تک طبقات به دست آورد. در این صورت باید دقت داشت که مقاومت ورودی هر طبقه به عنوان مقاومت بار برای طبقه قبلی در نظر گرفته شود.

- در تقویت کننده‌های چند طبقه، طبقات میانی حتماً از نوع امیتر مشترک می‌باشند. طبقه ورودی بسته به مقاومت ورودی مورد نیاز، بیس مشترک یا کلکتور مشترک انتخاب می‌شود. به عنوان مثال اگر بار یک مقاومت کوچک باشد، طبقه آخر کلکتور مشترک انتخاب می‌شود که دارای مقاومت خروجی کوچکی است.



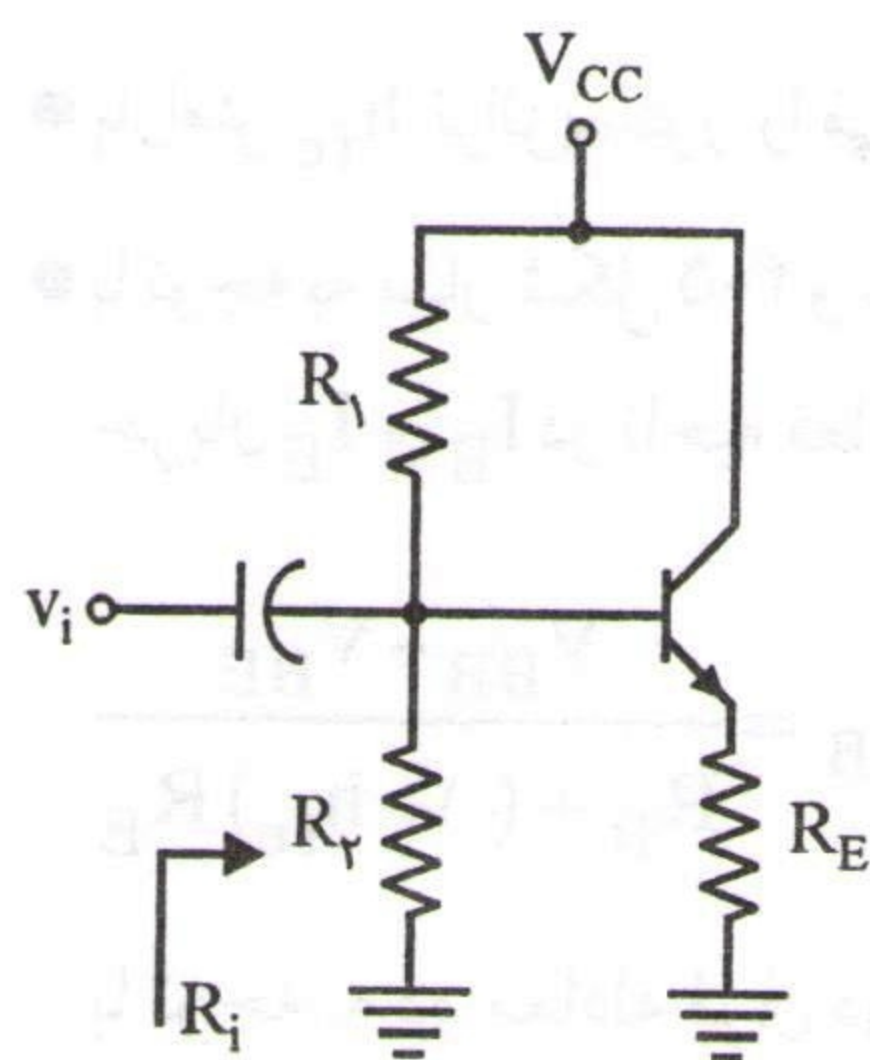
شکل ۵-۵

● برای افزایش مقاومت ورودی تقویت کننده امیتر فالوئر می‌توان از یک زوج دارلینگتون به صورت شکل ۵-۵ استفاده کرد. با توجه به اینکه مقاومت‌های امیتر از دید بیس در $(1 + h_{fe})$ ضرب می‌شوند، مقاومت ورودی مدار (R_i) برابر است با

$$R_i = h_{ie1} + (1 + h_{fe})(R_{i2} \parallel h_{oe1})$$

$$R_{i2} = h_{ie2} + (1 + h_{fe})(R_E \parallel h_{oe2})$$

با توجه به رابطه R_i چنانچه بتوان کاری کرد که R_{i2} با h_{oe1} موازی نگردد، مقدار R_i بسیار بزرگ‌تر خواهد شد. برای این منظور می‌توان از روش بوت استرپ استفاده کرد.



شکل ۵-۶

● بوت استرپ: برای مدار امیتر فالوئر شکل ۵-۶ مقاومت ورودی برابر است با

$$R_i = R_{Th} \parallel [h_{ie} + (1 + h_{fe})(R_E \parallel h_{oe})]$$

$$R_{Th} = R_1 \parallel R_2$$

ملاحظه می‌شود که مقاومت ورودی نمی‌تواند از R_{Th} بزرگ‌تر شود؛ به عبارت دیگر مقاومت‌های بایاس یعنی R_1 و R_2 باعث کاهش R_i می‌گردند. این اشکال در مدار دارلینگتون نیز موجود است. برای رفع این مشکل از مدار بوت استرپ شده به صورت شکل ۵-۷ استفاده می‌گردد.

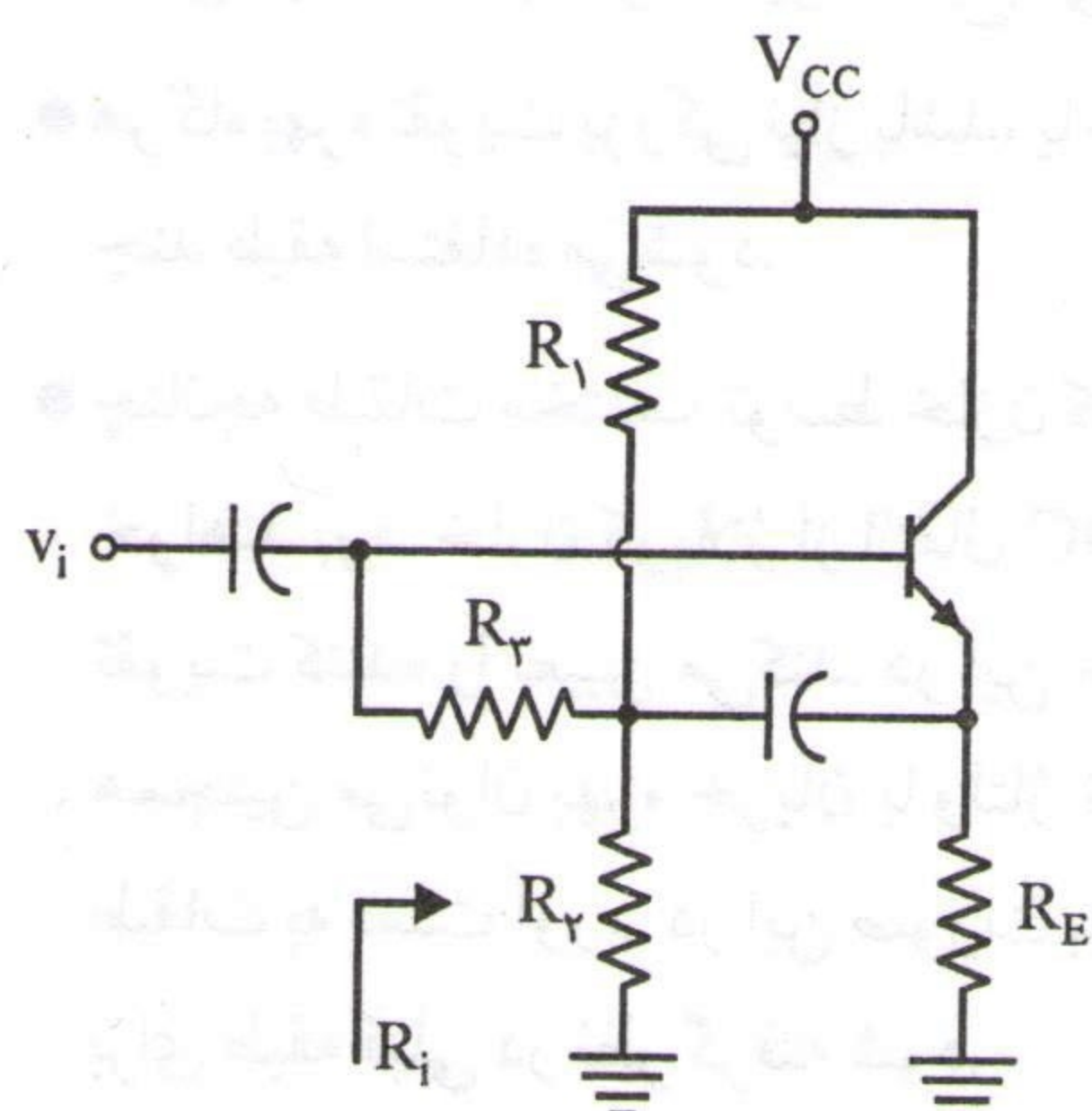
در این مدار از نظر سیگنال کوچک مقاومت امیتر برابر است با

$$R'_E = R_1 \parallel R_2 \parallel R_E \parallel h_{oe}$$

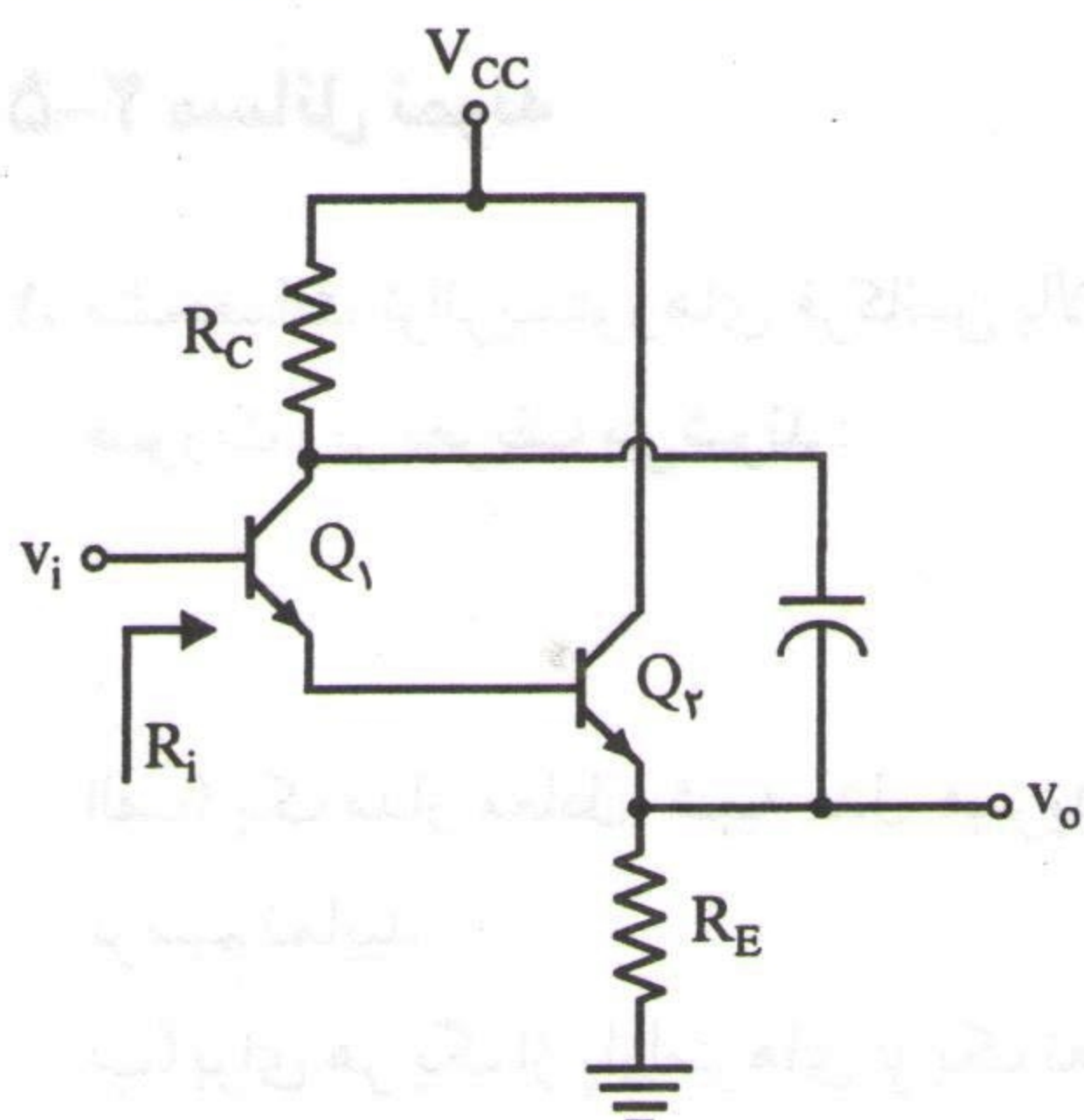
حال چنانچه R_3 به اندازه کافی بزرگ باشد به گونه‌ای که $R_3 \parallel h_{ie} \approx h_{ie}$ باشد، مقاومت ورودی برابر است با

$$R_i = h_{ie} + (1 + h_{fe})R'_E$$

که اگر با حالت بوت استرپ نشده مقایسه کنید، اثر مقاومت‌های بایاس در کاهش R_i بر طرف شده است.



شکل ۵-۷



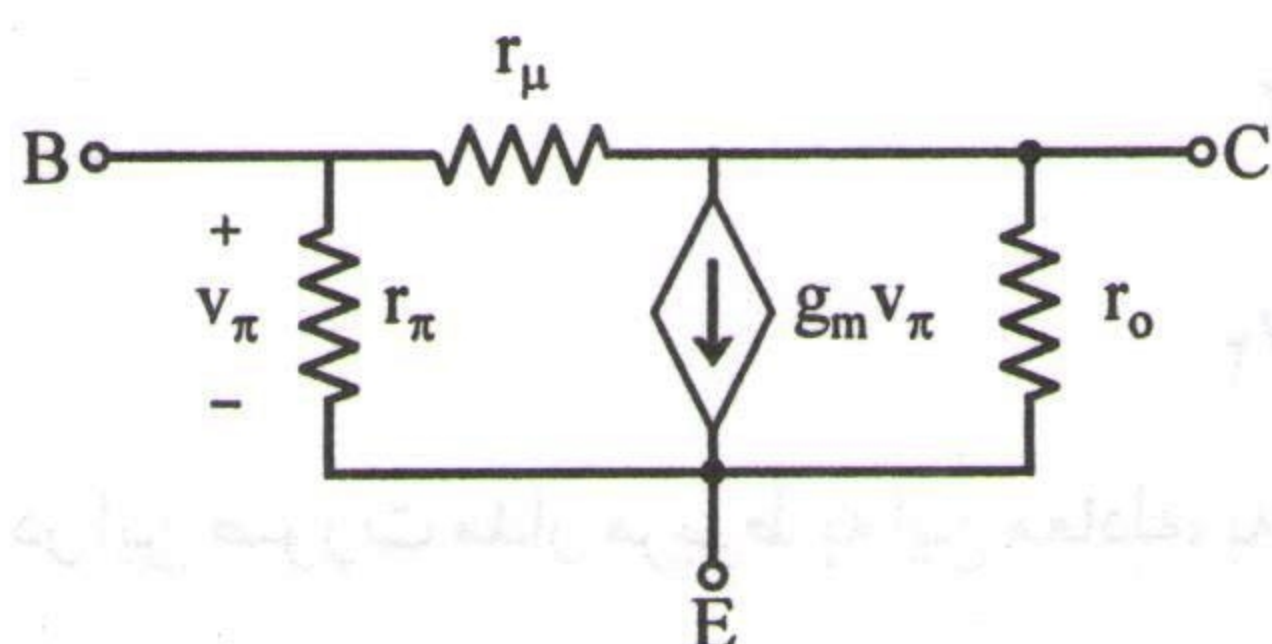
شکل ۸-۵

- برای افزایش مقاومت ورودی زوج دارلینگتون، روش بوت استرپ برای مقاومت h_{oe}^{-1} ترانزیستور اول به کار می‌رود. این مطلب در شکل ۸-۵ نمایش داده شده است. در این مدار از دید سیگنال کوچک، R_E با R_C موازی می‌شود؛ بنابراین

$$R'_E = R_E \parallel R_C \parallel h_{oe}^{-1}$$

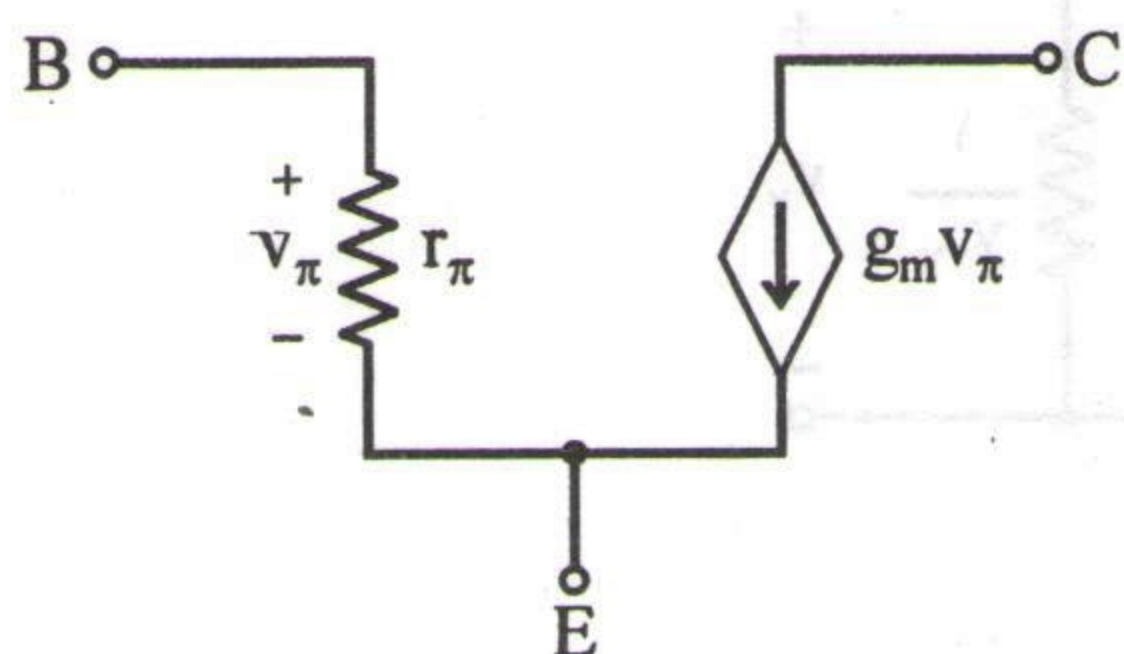
- h_{oe}^{-1} ترانزیستور اول با h_{ie_2} موازی می‌گردد که می‌توان نتیجه را برابر h_{ie_2} گرفت. بنابراین R_i برابر است با

$$R_i = h_{ie_1} + (1 + h_{fe}) [h_{ie_2} + (1 + h_{fe}) R'_E] \approx (1 + h_{fe})^2 R'_E$$



شکل ۹-۵

- مدل هیبرید π : یکی از مدل‌های سیگنال کوچک دیگر ترانزیستور که به نوبه خود حائز اهمیت است، مدل هیبرید π می‌باشد که مدل نسبتاً دقیق آن در شکل ۹-۵ نشان داده شده است. مقاومت بیس-کلکتور (r_μ)، معمولاً بسیار بزرگ بوده و عملاً از آن صرف نظر می‌شود. مقدار مقاومت r_o برای ترانزیستورهای مختلف بین چند ده تا چند صد کیلو اهم به دست می‌آید (در حقیقت r_o همان مقاومت h_{oe}^{-1} در مدل هیبرید h است) و بنابراین در اکثر موارد قابل صرف نظر است. مدل ساده شده هیبرید π ترانزیستور برای هر دو نوع ترانزیستور PNP و NPN در شکل ۱۰-۵ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰-۵

- در مدل هیبرید π ، پارامتر g_m یک هدایت انتقالی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$g_m = \frac{i_c}{v_{be}} \Rightarrow g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

که در آن، I_C جریان کلکتور و V_T در دمای 300°C درجه کلوین برابر 26 میلی ولت است.

- مقاومت ورودی r_π در مدل هیبرید π به صورت v_{be}/i_b تعریف می‌شود و بنابراین به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta v_{be}}{i_c} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\beta V_T}{I_C} = \frac{V_T}{I_B}$$

- در مدل هیبرید π ، مقاومت r_o چنین تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{r_o} = \left. \frac{\partial i_c}{\partial v_{CE}} \right|_{v_{be}=0} = \frac{I_C}{V_A} \Rightarrow r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

که در آن V_A ، ولتاژ ارلی ترانزیستور است.

۵-۲ مسائل نمونه

۱. مشخصات ترانزیستورهای فرکانس بالا غالباً برحسب پارامترهای y داده می‌شوند. این پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$i_1 = y_{11} v_1 + y_{12} v_2$$

$$i_2 = y_{21} v_1 + y_{22} v_2$$

الف) یک مدار معادل، شبیه مدل هیبرید h ترانزیستور در فرکانسهای پایین با استفاده از پارامترهای y ترسیم نمایید.

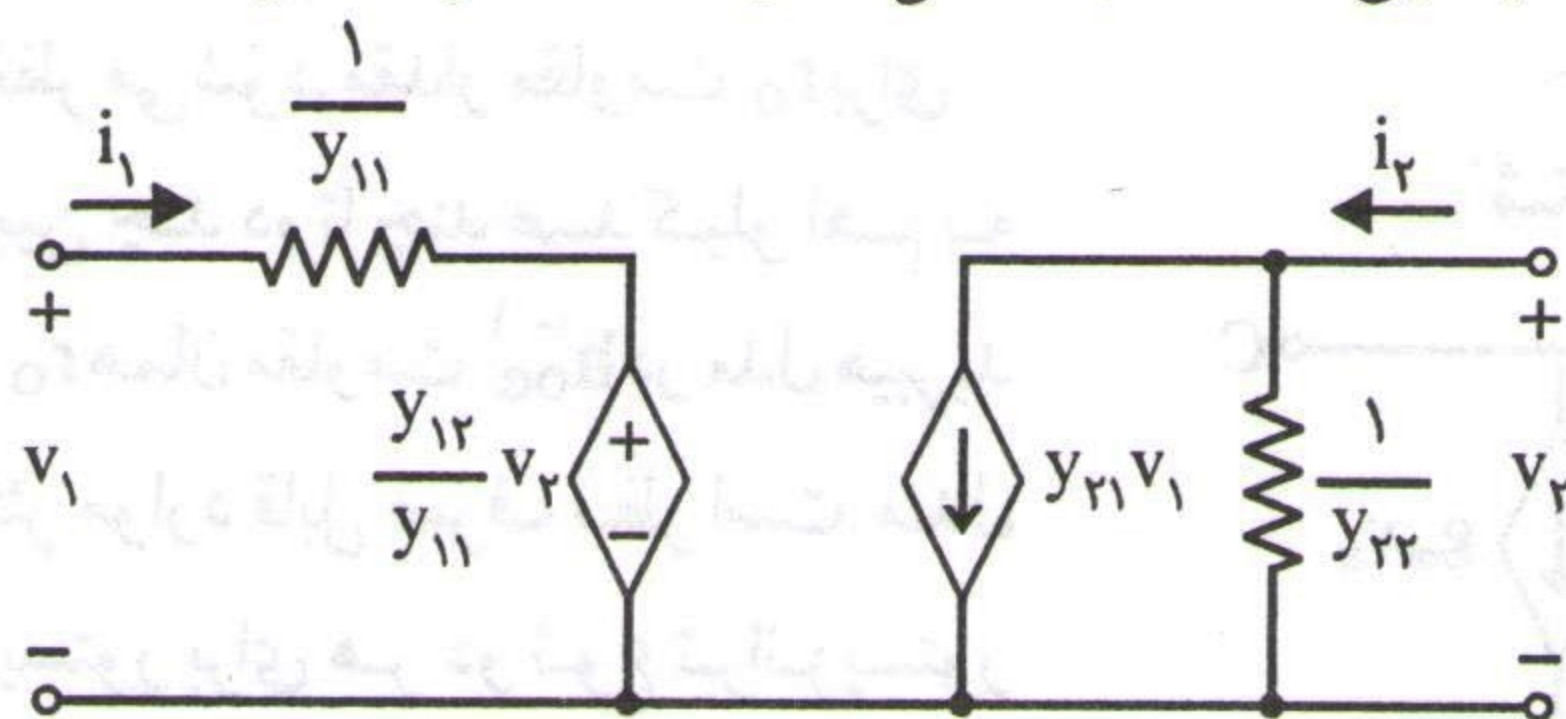
ب) برای هر یک از پارامترهای y یک تعریف مشخص ارائه نمایید.

حل: الف) معادلات داده شده را به شکل زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$v_1 = \frac{1}{y_{11}} i_1 - \frac{y_{12}}{y_{11}} v_2$$

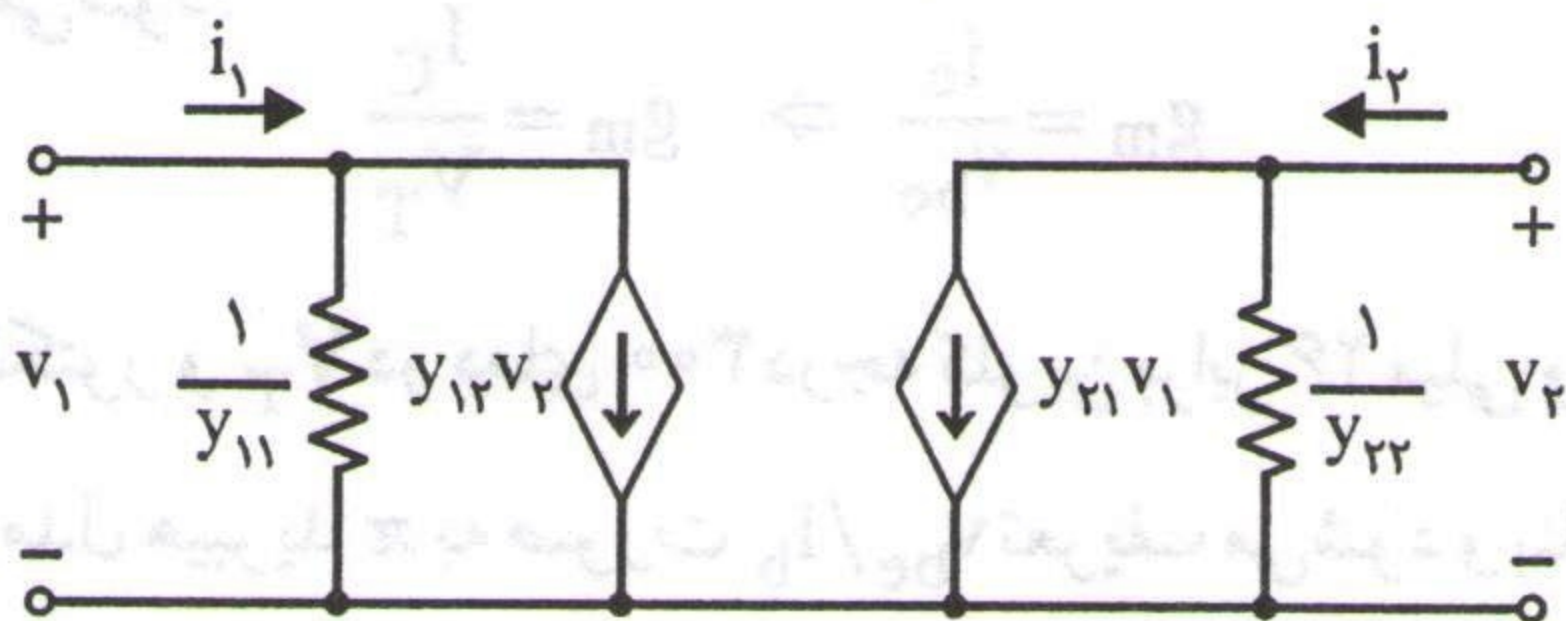
$$i_2 = y_{21} v_1 + y_{22} v_2$$

در این صورت مدار مربوط به این معادله، به شکل مدار ۵-۱۱ خواهد بود.



شکل ۵-۱۱

با تبدیل منبع در طرف اول، مدار به صورت شکل ۵-۱۲ در خواهد آمد.



شکل ۵-۱۲

ب) y_{11} : ادمیتانس ورودی وقتی خروجی اتصال کوتاه است.

$$y_{11} = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{v_2 = 0}$$

y_{21} : ادمیتانس انتقالی (جریان خروجی به ولتاژ ورودی) وقتی خروجی اتصال کوتاه است.

$$y_{21} = \frac{i_2}{v_1} \Big|_{v_2=0}$$

y_{12} : ادمیتانس انتقالی (جریان ورودی به ولتاژ خروجی) وقتی ورودی اتصال کوتاه است.

$$y_{12} = \frac{i_1}{v_2} \Big|_{v_1=0}$$

y_{22} : ادمیتانس خروجی وقتی ورودی اتصال کوتاه است.

$$y_{22} = \frac{i_2}{v_2} \Big|_{v_1=0}$$

۲. پارامترهای هیبرید h تقویت کننده بیس مشترک را بر حسب پارامترهای h_{fe} , h_{ie} , h_{re} و h_{oe} به دست آورید.

حل: روابط ولتاژ و جریان ترانزیستور با پارامترهای هیبرید h برای ترکیب امیتر مشترک عبارت است از

$$v_{be} = h_{fe} i_b + h_{re} v_{ce} \quad , \quad i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce}$$

رابطه جریان i_c را به صورت زیر می نویسیم:

$$i_c = h_{fe} (-i_e - i_c) + h_{oe} (v_{cb} - v_{eb}) \Rightarrow i_c = \frac{-h_{fe} i_e}{1 + h_{fe}} + h_{oe} \frac{v_{cb}}{1 + h_{fe}} + \frac{h_{oe}}{1 + h_{fe}} v_{be}$$

رابطه ولتاژ v_{be} را نیز به صورت زیر می نویسیم:

$$v_{be} = h_{ie} (-i_e - i_c) + h_{re} (v_{cb} - v_{eb}) = -h_{ie} i_e - h_{ie} i_c + h_{re} v_{cb} + h_{re} v_{be}$$

حال i_c را در رابطه فوق جایگزین می کنیم.

$$v_{be} = -h_{ie} i_e + \frac{h_{ie} h_{fe} i_e}{1 + h_{fe}} - \frac{h_{ie} h_{oe} v_{cb}}{1 + h_{fe}} - \frac{h_{ie} h_{oe}}{1 + h_{fe}} v_{be} + h_{re} v_{cb} + h_{re} v_{be}$$

$$\Rightarrow v_{be} = \frac{-h_{ie}}{(\frac{1}{1+h_{fe}}) + h_{re}} i_e + \frac{h_{re}(1+h_{fe}) - h_{ie} h_{oe}}{(\frac{1}{1+h_{fe}}) + h_{re}} v_{cb}$$

$$\Rightarrow v_{eb} = \frac{h_{ie}}{(\frac{1}{1+h_{fe}}) + h_{re}} i_e + \frac{h_{ie} h_{oe} - h_{re}(1+h_{fe})}{(\frac{1}{1+h_{fe}}) + h_{re}} v_{cb}$$

از طرفی v_{eb} در ترکیب بیس مشترک برابر است با

$$v_{eb} = h_{ib} i_e + h_{rb} v_{cb}$$

از مقایسه این دو رابطه داریم

$$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{(\beta - h_{re})(\beta + h_{fe}) + h_{ie} h_{oe}} \approx \frac{h_{ie}}{h_{fe} + h_{ie} h_{oe}}$$

$$h_{rb} = \frac{h_{ie} h_{oe} - h_{re}(\beta + h_{fe})}{(\beta - h_{re})(\beta + h_{fe}) + h_{ie} h_{oe}} \approx \frac{h_{ie} h_{oe} - h_{fe} h_{re}}{h_{fe} + h_{ie} h_{oe}}$$

اکنون از رابطه ولتاژ v_{be} ، مقدار آن را به دست آورده و در رابطه جریان i_c جایگزین می‌کنیم.

$$v_{be}(\beta - h_{re}) = -h_{ie} i_e - h_{ie} i_c + h_{re} v_{cb} \Rightarrow v_{be} = \frac{-h_{ie}}{\beta - h_{re}} i_e - \frac{h_{ie}}{\beta - h_{re}} i_c + \frac{h_{re}}{\beta - h_{re}} v_{cb}$$

$$\Rightarrow i_c = \frac{-h_{fe} i_e}{\beta + h_{fe}} + h_{oe} \frac{v_{cb}}{\beta + h_{fe}} - \frac{h_{oe} h_{ie}}{(\beta + h_{fe})(\beta - h_{re})} i_e - \frac{h_{oe} h_{ie}}{(\beta + h_{fe})(\beta - h_{re})} i_c$$

$$+ \frac{h_{oe} h_{re}}{(\beta - h_{re})(\beta + h_{fe})} v_{cb}$$

$$\Rightarrow i_c = -\frac{h_{fe}(\beta - h_{re}) + h_{oe} h_{ie}}{(\beta + h_{fe})(\beta - h_{re}) + h_{oe} h_{ie}} i_e + \frac{h_{oe}}{(\beta + h_{fe})(\beta - h_{re}) + h_{oe} h_{ie}} v_{cb}$$

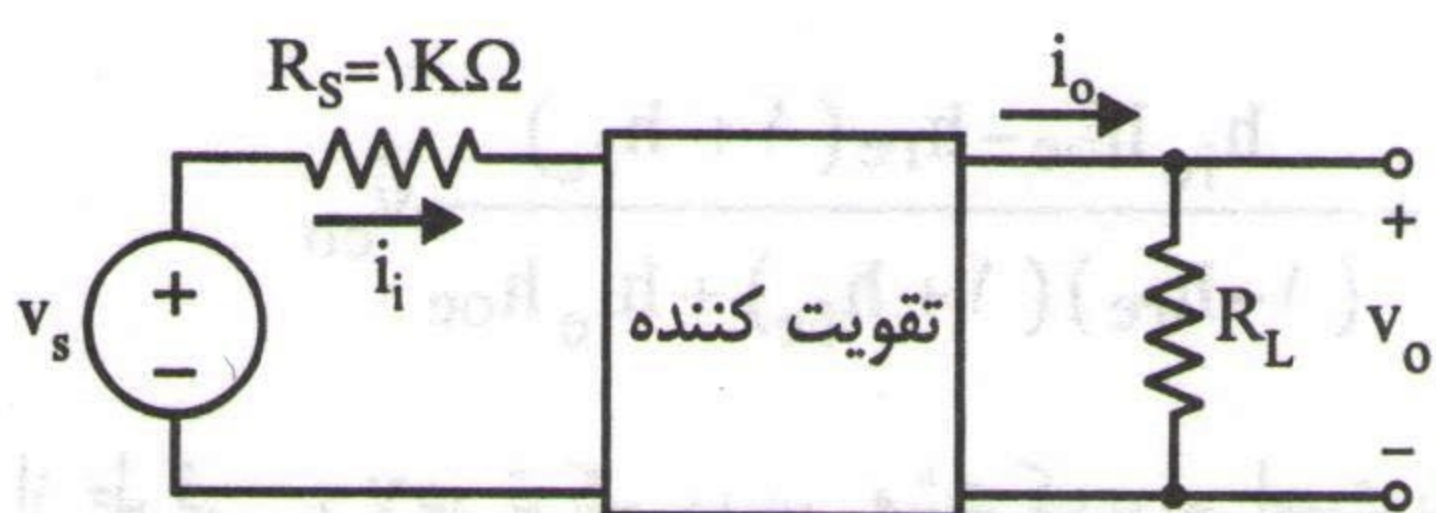
از طرفی i_c در ترکیب بیس مشترک برابر است با

$$i_c = h_{fb} i_e + h_{ob} v_{cb}$$

از مقایسه این دو رابطه داریم

$$h_{fb} = -\frac{h_{fe}(\beta - h_{re}) + h_{oe} h_{ie}}{(\beta + h_{fe})(\beta - h_{re}) + h_{oe} h_{ie}} \approx -\frac{h_{fe} + h_{oe} h_{ie}}{h_{fe} + h_{oe} h_{ie}} \approx -1$$

$$h_{ob} = \frac{h_{oe}}{(\beta + h_{fe})(\beta - h_{re}) + h_{oe} h_{ie}} \approx \frac{h_{oe}}{h_{fe} + h_{oe} h_{ie}}$$



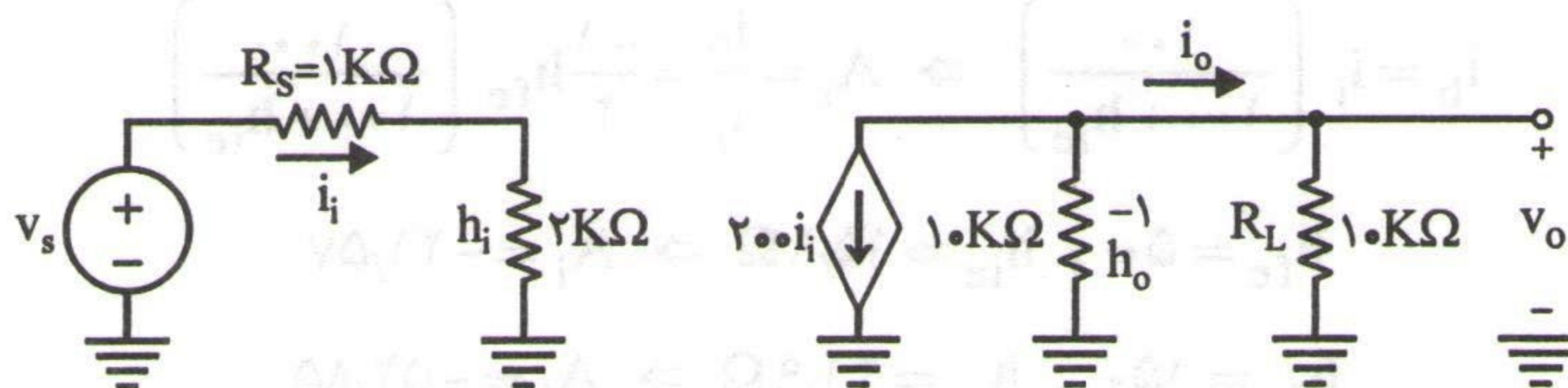
شکل ۵-۱۳

۳. در شکل ۵-۱۳ تقویت کننده دارای $h_i = 2K\Omega$

$h_o^{-1} = 10K\Omega$ ، $h_f = 200$ و $h_r = 0$ می‌باشد.

بهره ولتاژ و جریان را محاسبه نمایید.

حل: مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۱۴ است.

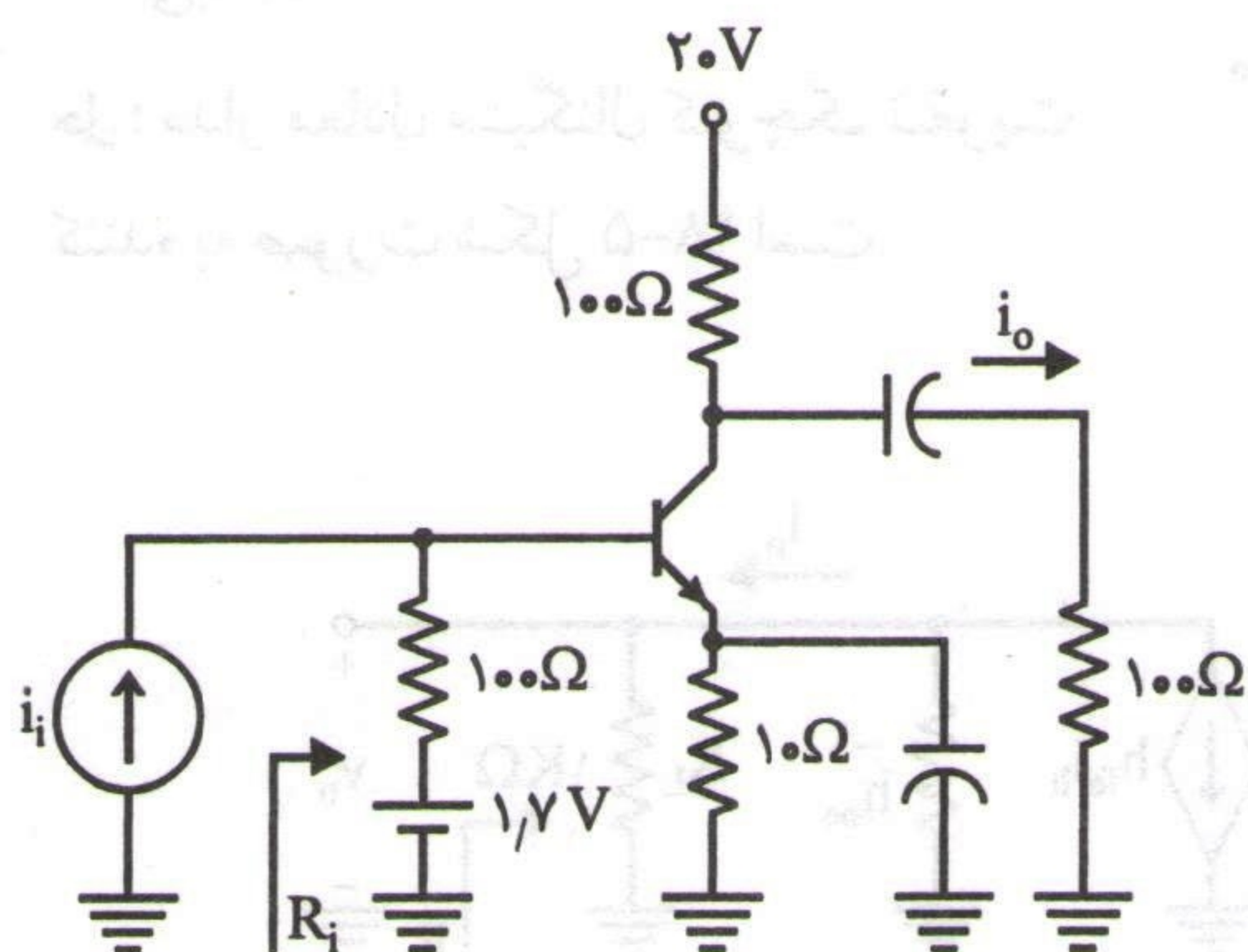


شکل ۵-۱۴

$$v_o = -200 \cdot i_i (h_o^{-1} \parallel R_L) = -1000 \cdot i_i, \quad i_i = \frac{v_s}{1+2} = \frac{v_s}{3}$$

$$\Rightarrow A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{1000}{3} = -333.3$$

$$i_o = (-200 \cdot i_i) \left(\frac{h_o^{-1}}{h_o^{-1} + R_L} \right) = -100 \cdot i_i \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = -100$$



شکل ۵-۱۵

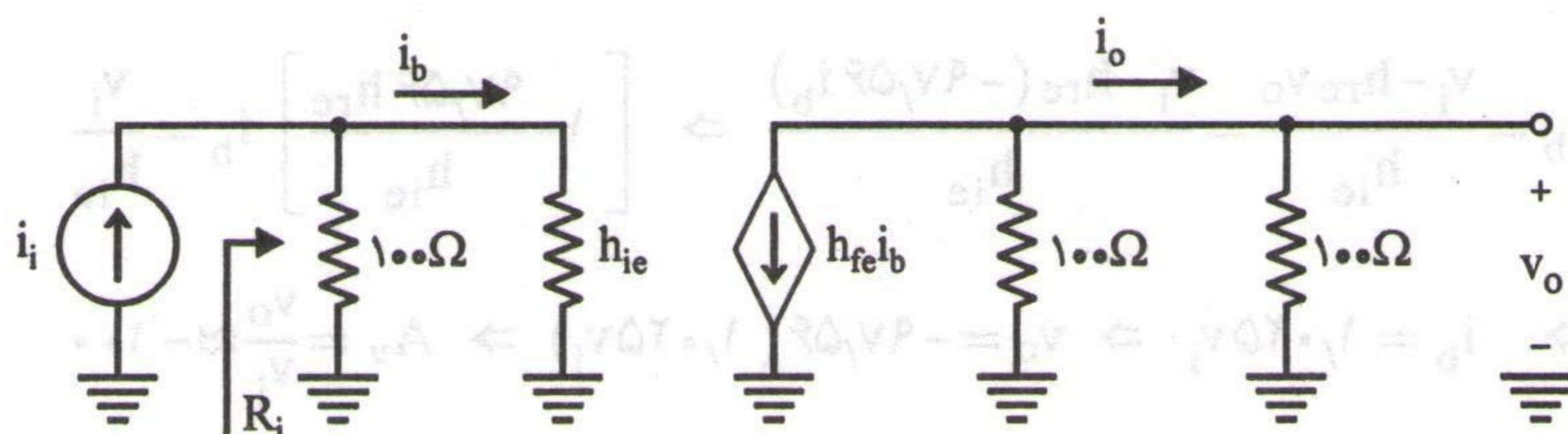
۴. در تقویت کننده امیتر مشترک شکل ۵-۱۵ ترانزیستور دارای مشخصات $V_{BE} = 0.7V$ ، $V_T = 26mV$ و $h_{fe} = 50$ و $h_{re} = h_{oe} \approx 0$ می باشد. محدوده تغییرات A_i و R_i را بیابید.

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + R_B / (1 + h_{fe})} \quad \text{حل:}$$

$$h_{fe} = 50 \Rightarrow I_E = 83.61mA, \quad h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} \approx 15.9\Omega$$

$$h_{fe} = 150 \Rightarrow I_E = 93.79mA, \quad h_{ie} \approx 41.9\Omega$$

حال مدل سیگنال کوچک تقویت کننده را به صورت شکل ۵-۱۶ در نظر می گیریم.



شکل ۵-۱۶

$$i_o = -h_{fe} i_b \left(\frac{100}{100 + 100} \right) = -\frac{1}{2} h_{fe} i_b$$

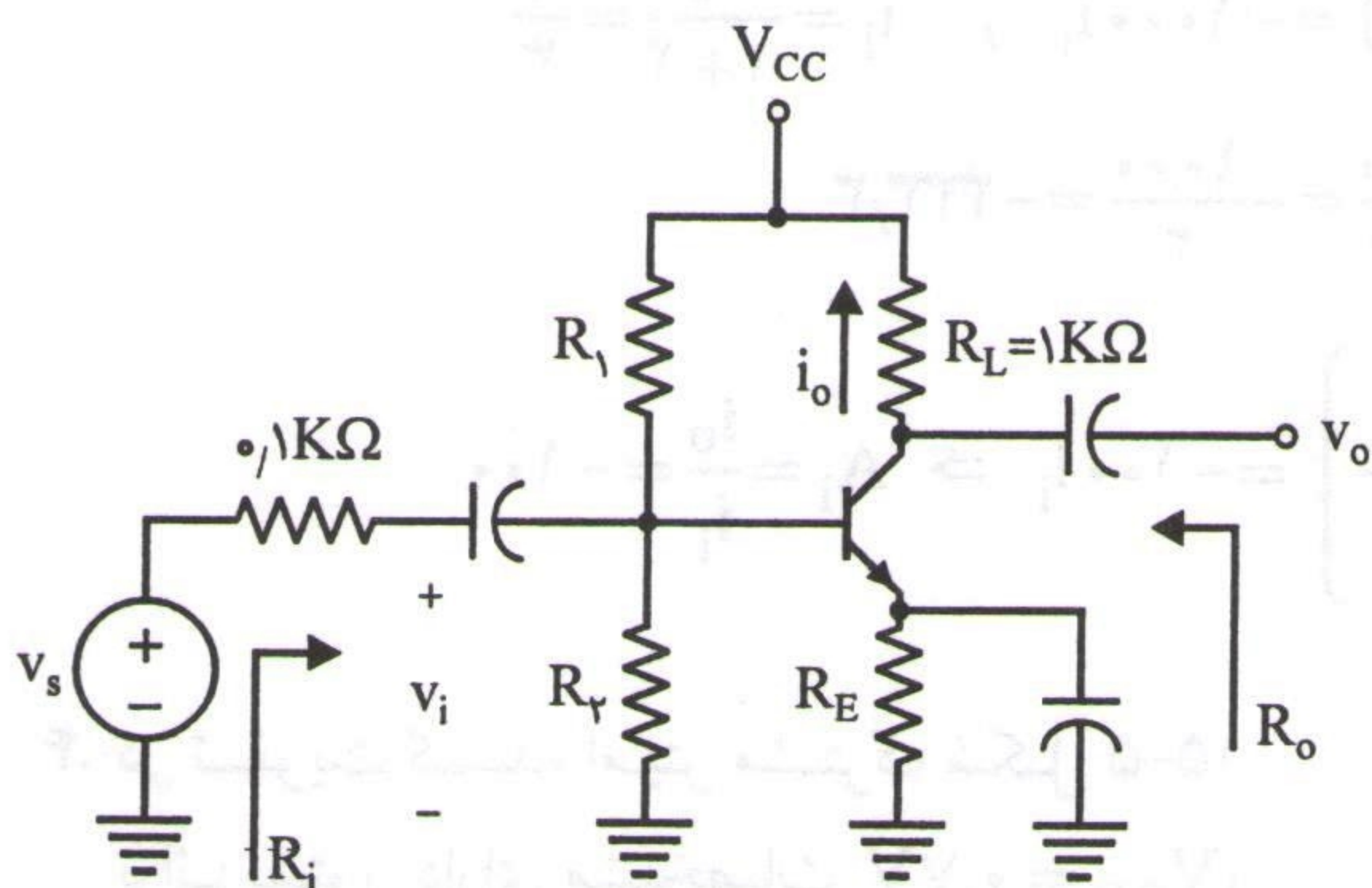
محاسبه A_i :

$$i_b = i_i \left(\frac{100}{100 + h_{ie}} \right) \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = -\frac{1}{2} h_{fe} \left(\frac{100}{100 + h_{ie}} \right)$$

$$h_{fe} = 50, h_{ie} = 15,9 \Omega \Rightarrow A_i = -21,57$$

$$h_{fe} = 150, h_{ie} = 41,9 \Omega \Rightarrow A_i = -52,85$$

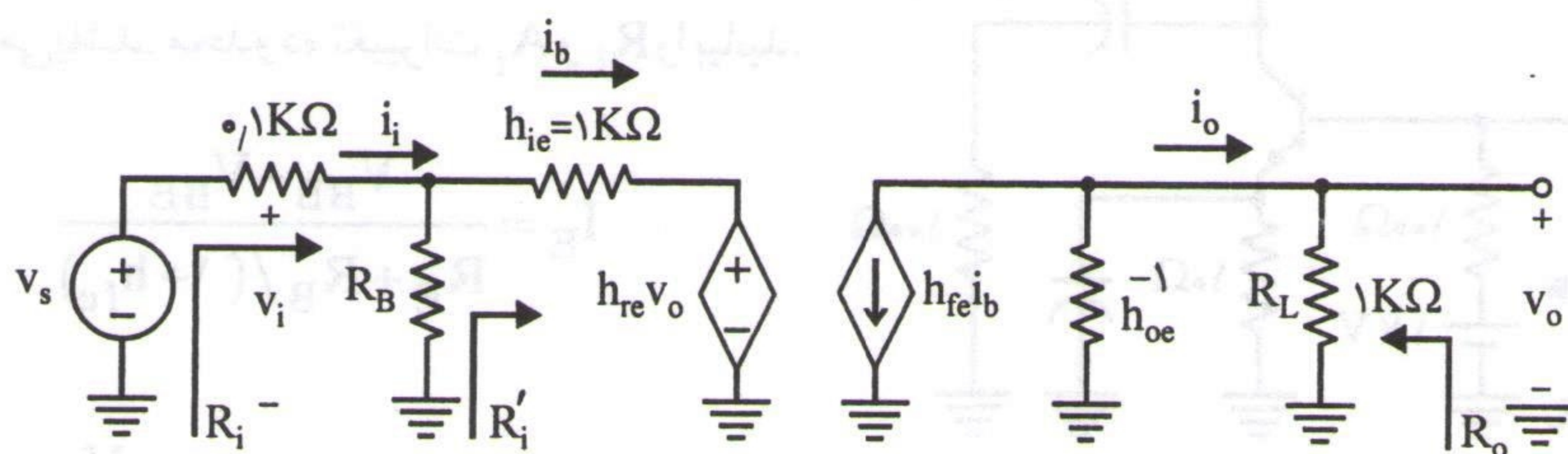
$$R_i = 100 \parallel h_{ie} \Rightarrow 13,72 \Omega \leq R_i \leq 29,52 \Omega$$



شکل ۵-۱۷

۵. در تقویت کننده شکل ۵-۱۷ با فرض $R_B \gg h_{ie}$ ، مشخصه‌های تقویت کننده را به دست آورید. ترانزیستور دارای $h_{ie} = 1 K\Omega$ ، $h_{fe} = 100$ و $h_{oe}^{-1} = 40 K\Omega$ و $h_{re} = 2,5 \times 10^{-4}$ می‌باشد.

حل: مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۱۸ است.



شکل ۵-۱۸

محاسبه A_v :

$$v_o = -h_{fe} i_b \frac{h_{oe}^{-1} R_L}{h_{oe}^{-1} + R_L} = -97,56 i_b$$

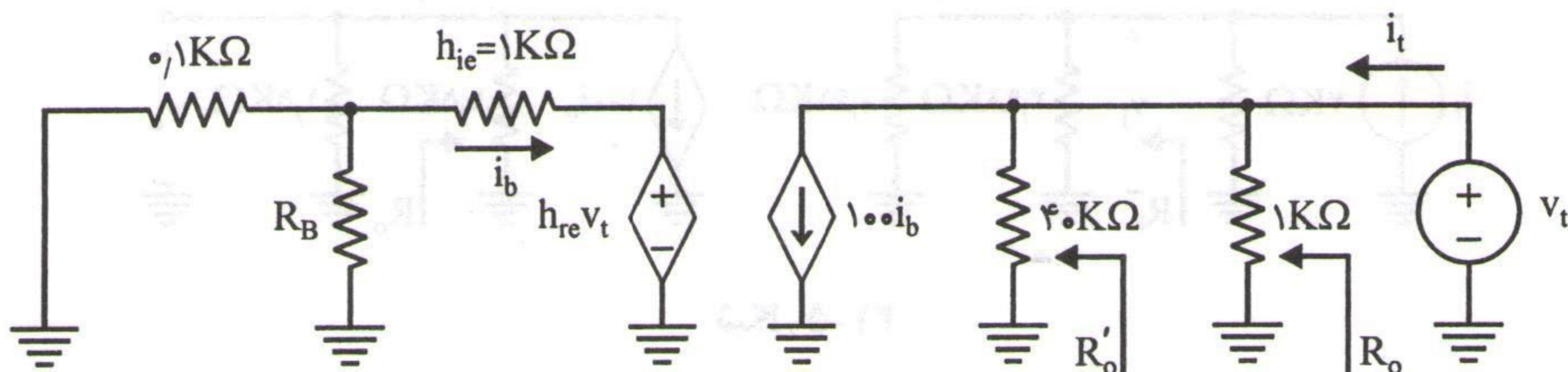
$$i_b = \frac{v_i - h_{re} v_o}{h_{ie}} = \frac{v_i - h_{re} (-97,56 i_b)}{h_{ie}} \Rightarrow \left[1 - \frac{97,56 h_{re}}{h_{ie}} \right] i_b = \frac{v_i}{h_{ie}}$$

$$\Rightarrow i_b = 1,025 v_i \Rightarrow v_o = -97,56 (1,025 v_i) \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx -100$$

$$R_i' = \frac{v_i}{i_b} = 0,98 K\Omega \Rightarrow R_i = R_i' \parallel R_B \approx R_i' = 0,98 K\Omega$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \times \frac{v_i}{v_s} = \frac{v_i}{v_s} A_v = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_v = -90,9$$

مدار محاسبه مقاومت خروجی R_o با حذف منبع سیگنال و قرار دادن منبع آزمایشی v_t در خروجی، به صورت شکل ۱۹-۵ می باشد.



شکل ۱۹-۵

با نوشتن KCL و KVL به ترتیب در کلکتور و مدار بیس داریم

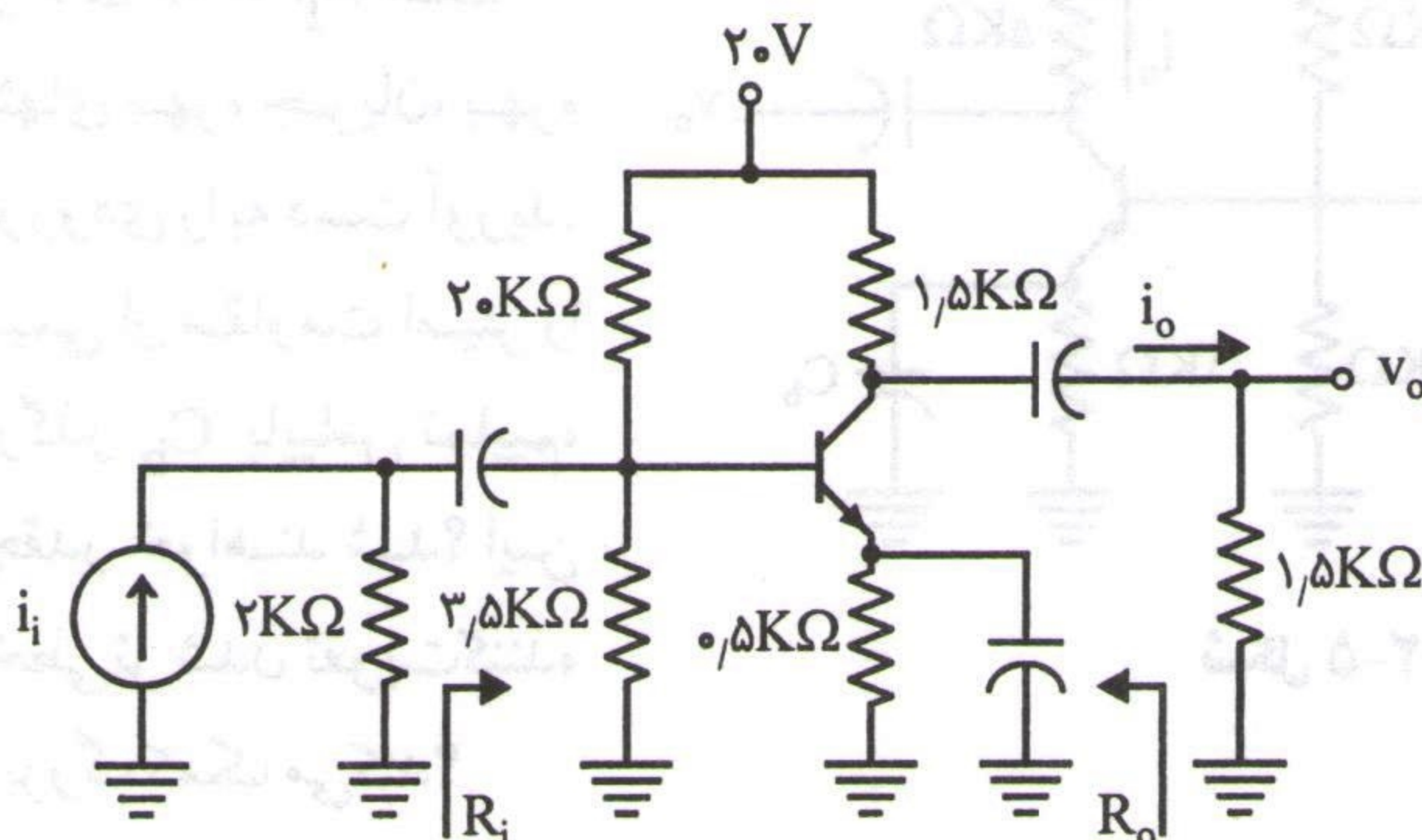
$$\frac{v_t}{1} + \frac{v_t}{4} + 100 i_b = i_t$$

$$[R_B \parallel 1] i_b + h_{ie} i_b + h_{re} v_t = 0 \Rightarrow i_b = -2.27 \times 10^{-4} v_t$$

که با قرار دادن در معادله KCL داریم

$$v_t \approx i_t \Rightarrow R_o = \frac{v_t}{i_t} = 1 K\Omega$$

۶. مشخصه های تقویت کننده امیتر مشترک نشان داده شده در شکل ۲۰-۵ را به دست آورید. ترانزیستور دارای $V_{BE} = 0.7V$ ، $V_T = 26mV$ و $h_{fe} = 100$ می باشد.



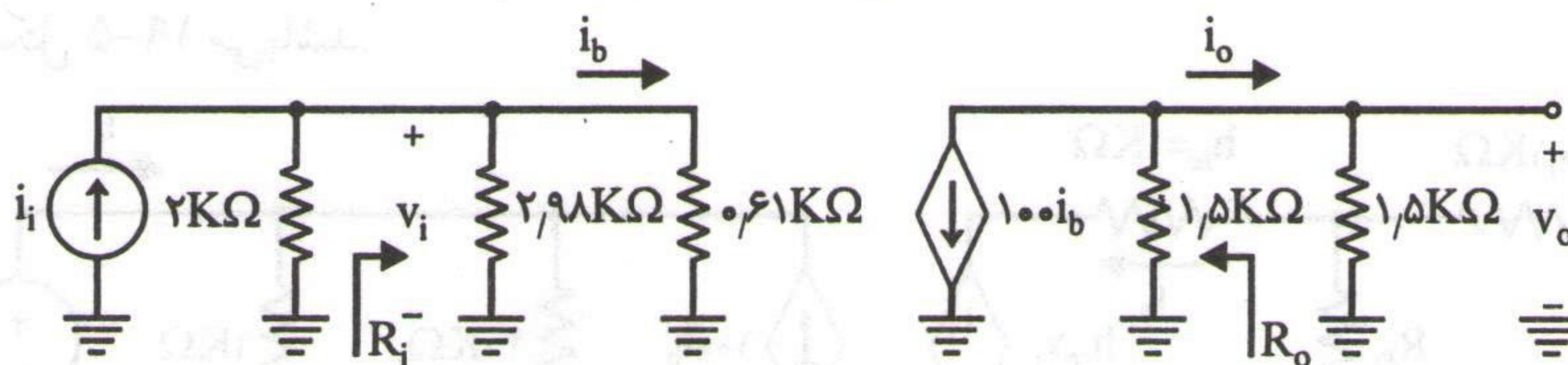
شکل ۲۰-۵

$$R_{Th} = 20 \parallel 3.5 = 2.98 K\Omega, \quad V_{Th} = \frac{20}{20 + 3.5} \times 3.5 = 2.98 V$$

حل:

$$I_E = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_E + R_{Th} / (1 + h_{fe})} = 4.31 mA, \quad h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} \approx 0.61 K\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۲۱ رسم شده است.



شکل ۵-۲۱

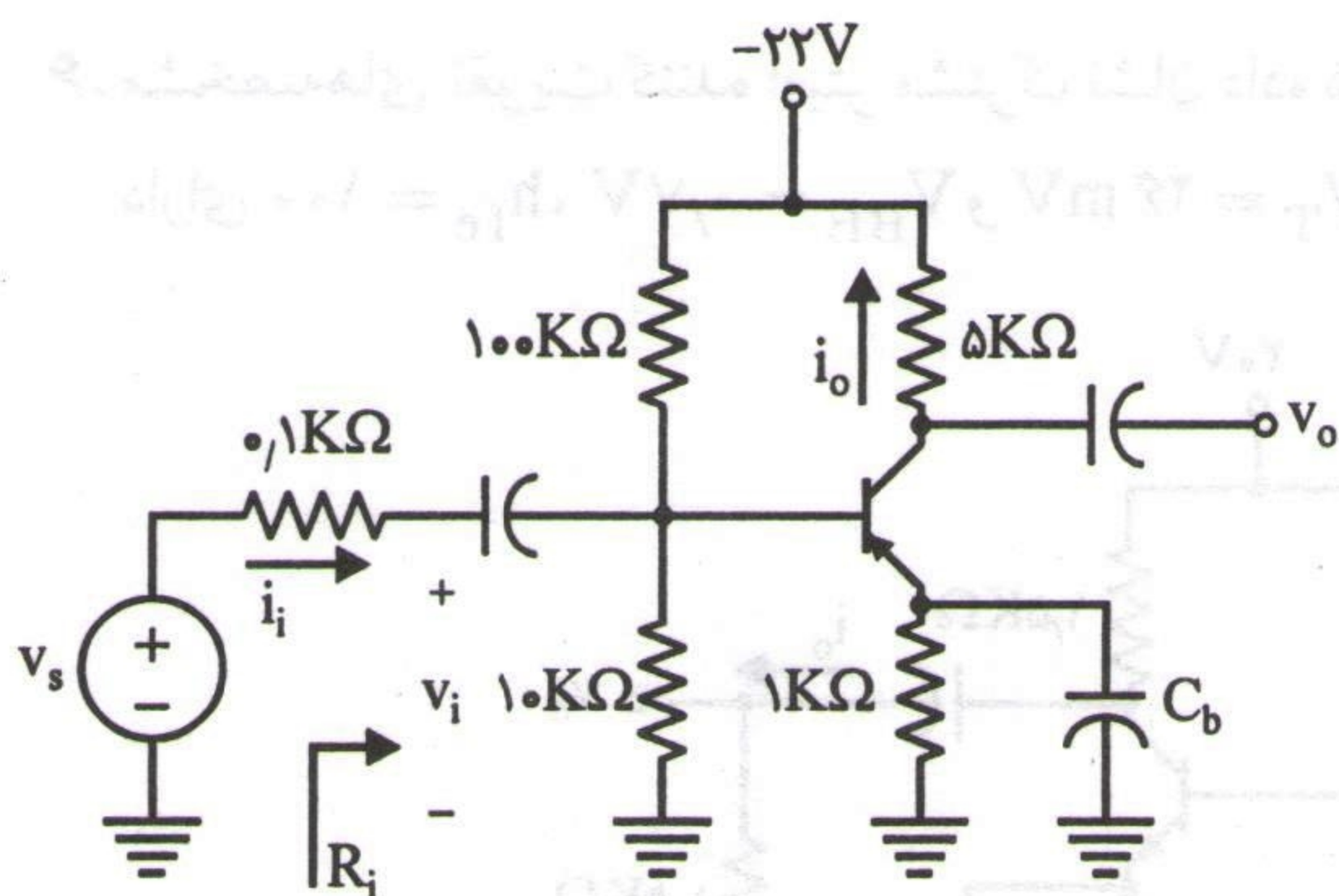
$$v_o = -100 \cdot i_b (1.5 \parallel 1.5) = -75 i_b, \quad i_b = \frac{v_i}{0.61} \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx -123$$

$$i_o = (-100 \cdot i_b) \left(\frac{1.5}{1.5 + 1.5} \right) = -50 \cdot i_b \quad \text{محاسبه } A_i:$$

$$i_b = i_i \left(\frac{2 \parallel 2.98}{2 \parallel 2.98 + 0.61} \right) = 0.66 i_i \Rightarrow i_i = 1.5 i_b \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{-50}{1.5} = -33.33$$

$$R_i = 2.98 \parallel 0.61 = 50.5 K\Omega$$

$$\text{اگر } i_i = 0 \Rightarrow i_b = 0 \Rightarrow R_o = 1.5 K\Omega$$



شکل ۵-۲۲

۷. در تقویت کننده امیتر مشترک شکل ۵-۲۲،

برای ترانزیستور $h_{fe} = 100$

$V_{BE} = 0.7V$ و $V_T = 26 mV$ است.

الف) مقادیر کمیت‌های بهره جریان، بهره ولتاژ و مقاومت ورودی را به دست آورید.

ب) اگر فقط نیمی از مقاومت امیتر را توسط خازن کنارگذر C_b بایпас نمایم،

A_v ، R_i و A_i چقدر خواهند شد؟ این عمل چگونه به خطی تر شدن تقویت کننده

برای سیگنالهای بزرگ کمک می کند؟

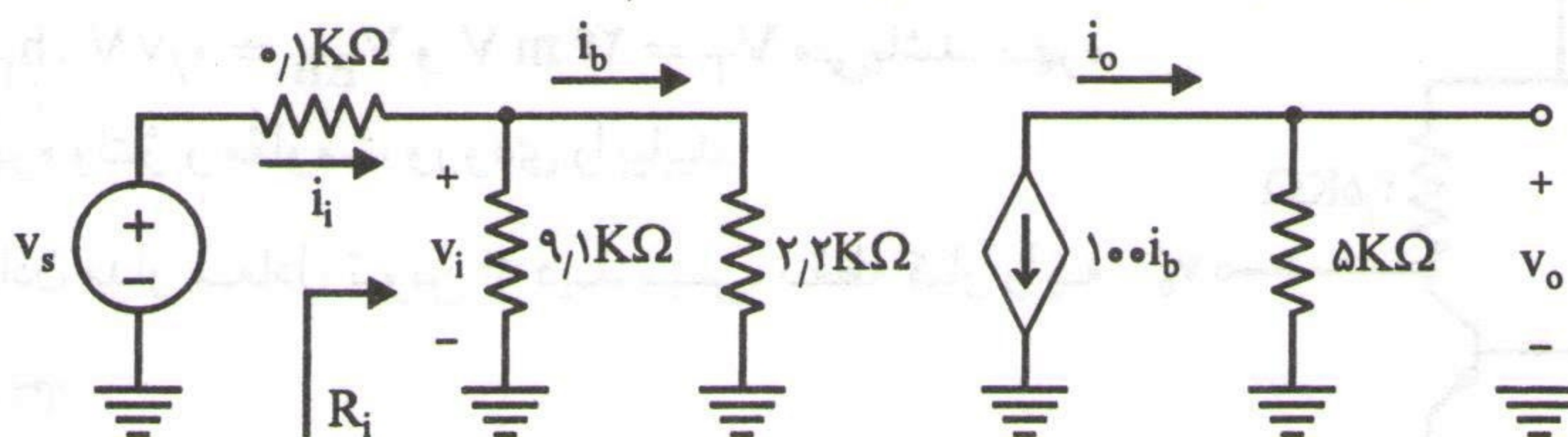
حل: با قرار دادن معادل تونن بیس، جریان نقطه کار را به دست می آوریم.

$$R_{Th} = 100 \parallel 10 = 9.1 K\Omega, \quad V_{Th} = \frac{-22}{100 + 10} \times 10 = -2V$$

$$I_E = \frac{-V_{Th} - V_{EB}}{R_E + R_{Th} / (1 + h_{fe})} = 1.19 mA, \quad I_C = \alpha I_E = 1.18 mA$$

$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 2.2 K\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۲۳-۵ رسم شده است.



شکل ۲۳-۵

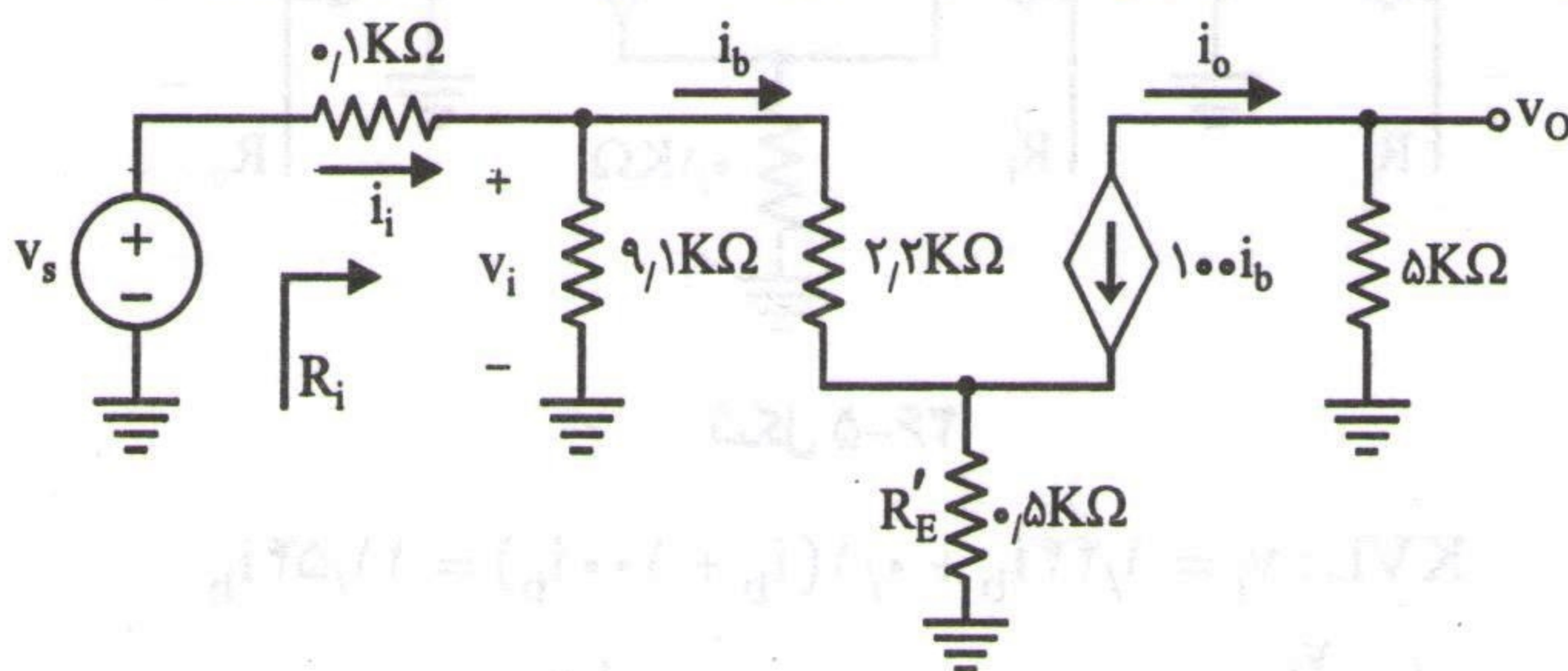
$$v_o = -100 \cdot i_b \times 5 = -500 \cdot i_b = -500 \cdot \left(\frac{v_i}{2.2} \right) = -227.27 v_i \Rightarrow A_v = -227.27$$

$$R_i = 9.1 \parallel 2.2 = 1.77 K\Omega$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v = -206.6$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o/5}{v_i/R_i} = \frac{1.77}{5} A_v = -80.45$$

ب) مدار معادل سیگنال کوچک در این حالت به صورت شکل ۲۴-۵ خواهد بود.



شکل ۲۴-۵

$$v_o = -100 \cdot i_b \times 5 = -500 \cdot i_b \quad \text{محاسبه } A_v:$$

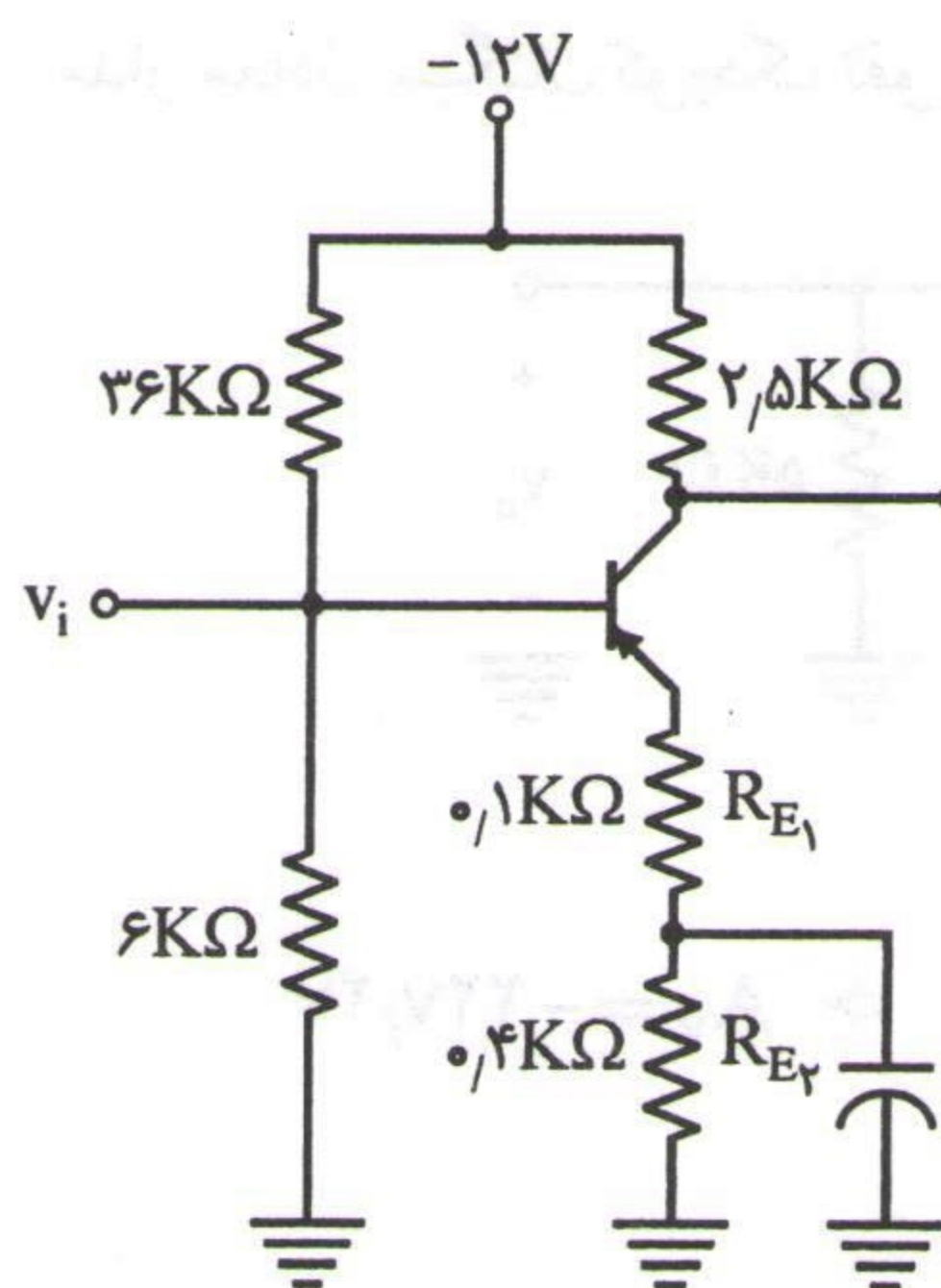
$$v_i = 2.2 i_b + (i_b + 100 \cdot i_b) \times 0.5 = 52.7 i_b \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = -9.49$$

$$R_i = 9.1 \parallel [h_{ie} + (1 + h_{fe})(R'_E)] = 7.76 K\Omega$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v = -9.37$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o/5}{v_i/R_i} = \left(\frac{R_i}{5} \right) A_v = -14.73$$

چون بهره تقویت کننده کم شده است، بنابراین سیگنالهای با دامنه بزرگتری می توانند بدون اعوجاج در خروجی ظاهر شوند.



شکل ۵-۲۵

۸. در مدار تقویت کننده شکل ۵-۲۵ ترانزیستور دارای $V_T = 26\text{ mV}$ و $V_{EB} = 0.7\text{ V}$ ، $h_{fe} = 100$ می‌باشد. بهره جریان، بهره ولتاژ و مقاومت ورودی را بیابید.

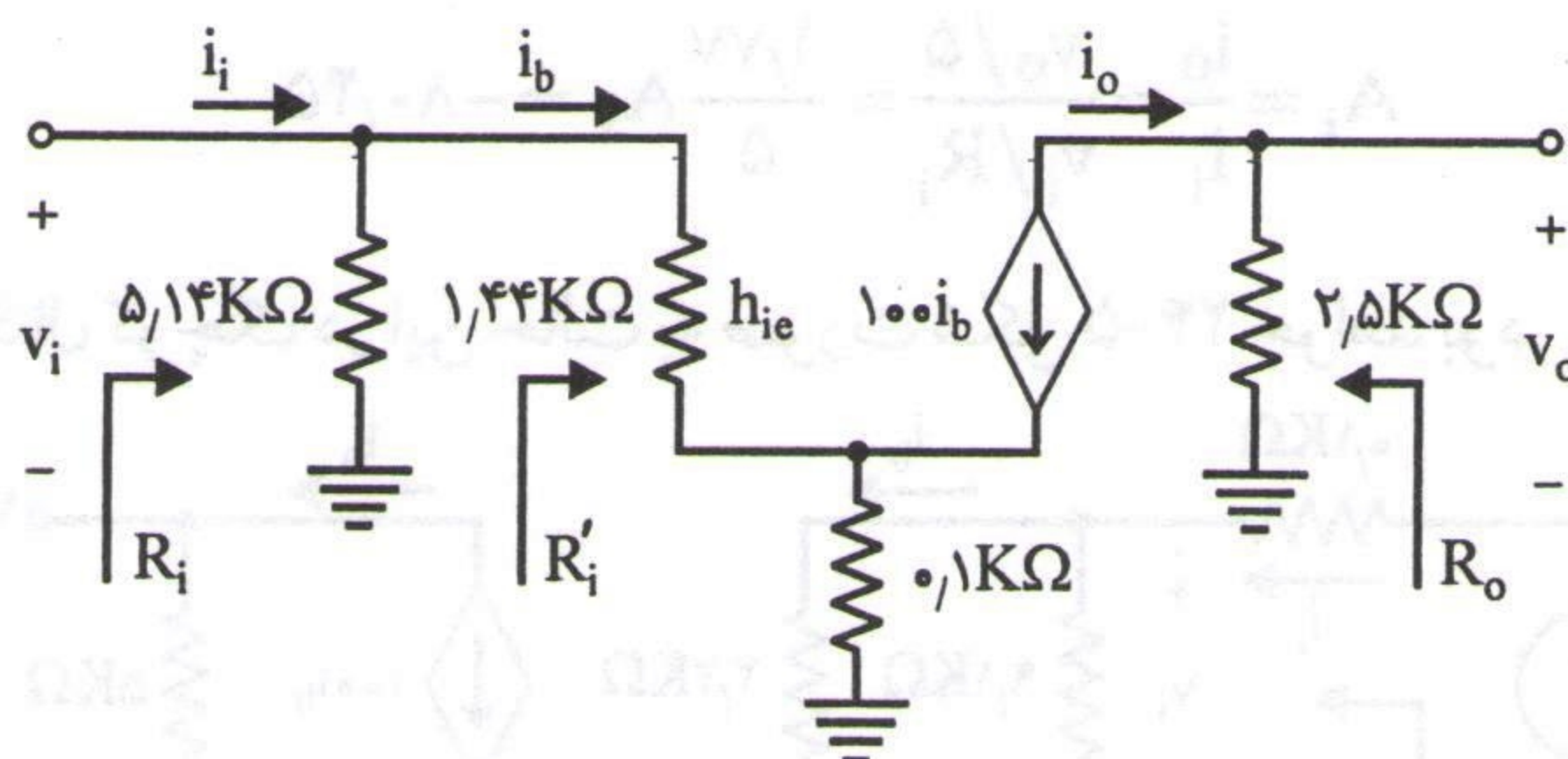
حل: با قرار دادن مدار معادل تونن از دید بیس، نقطه کار را به دست می‌آوریم.

$$R_{Th} = 36 \parallel 6 = 5.14\text{ K}\Omega, \quad V_{Th} = \frac{-12}{36+6} \times 6 = -1.71\text{ V}$$

$$I_E = \frac{-V_{Th} - V_{EB}}{R_{E1} + R_{E2} + R_{Th}/(1+h_{fe})} = 1.83\text{ mA}$$

$$I_C = \alpha I_E = 1.81\text{ mA}, \quad h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 1.44\text{ K}\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۲۶ است.



شکل ۵-۲۶

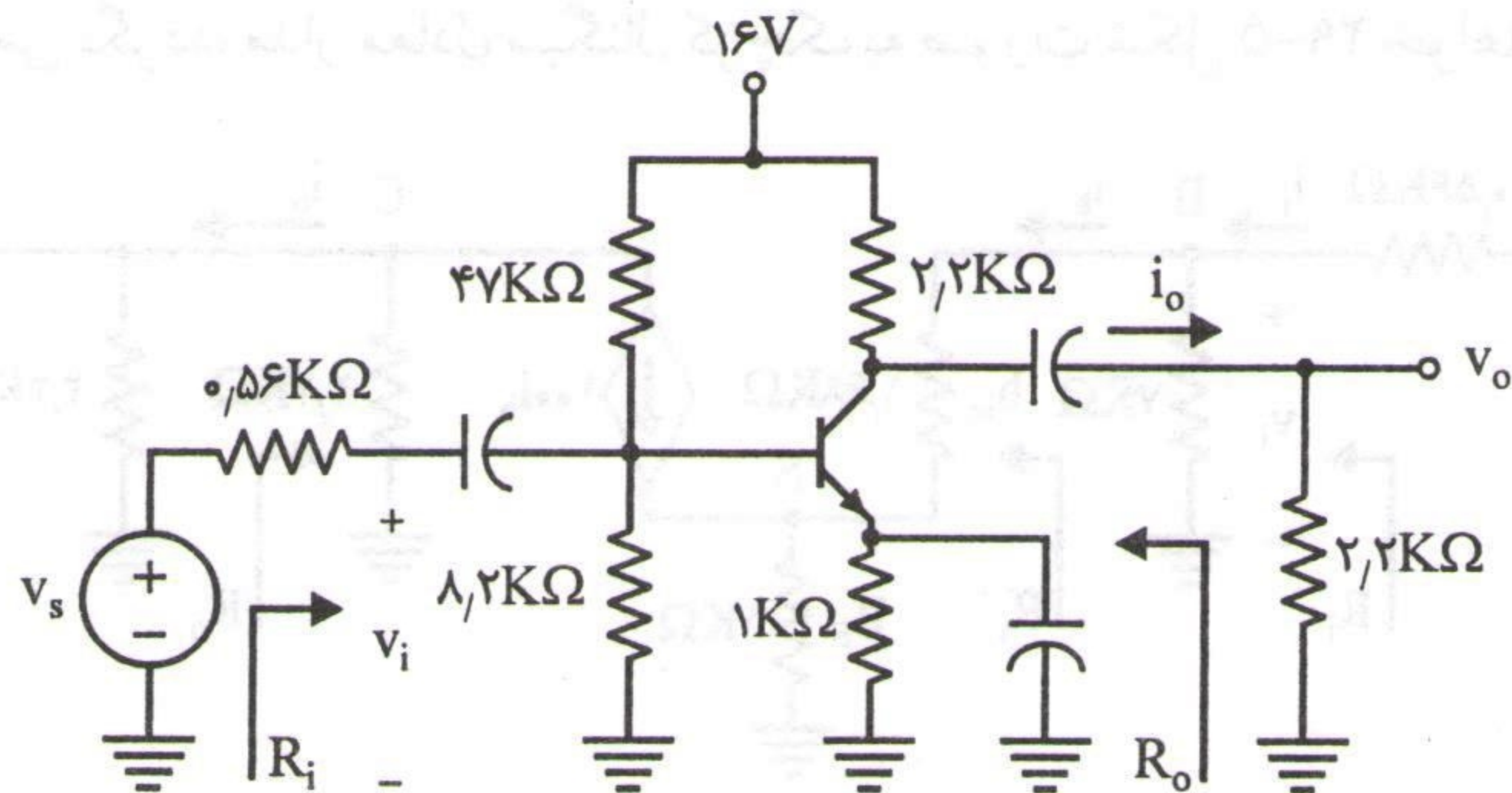
$$\text{KVL: } v_i = 1.44 i_b + 0.1 (i_b + 100 i_b) = 11.54 i_b \quad \text{محاسبه } R_i$$

$$\Rightarrow R'_i = \frac{v_i}{i_b} = 11.54\text{ K}\Omega \Rightarrow R_i = R'_i \parallel 5.14 = 3.56\text{ K}\Omega$$

$$v_o = -100 i_b \times 2.5 = -250 \left(\frac{v_i}{R'_i} \right) = -21.66 v_i \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = -21.66$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o/2.5}{v_i/R_i} = \frac{R_i}{2.5} A_v = -30.8$$

۹. مشخصات تقویت کننده امیتر مشترک شکل ۵-۲۷ را محاسبه کنید. برای ترانزیستور $h_{fe} = 100$ ، $V_T = 26\text{ mV}$ و $V_{BE} = 0.7\text{ V}$ است. اگر مقاومت R_E بایпас نشود مشخصات تقویت کننده چگونه خواهد شد؟



شکل ۲۷-۵

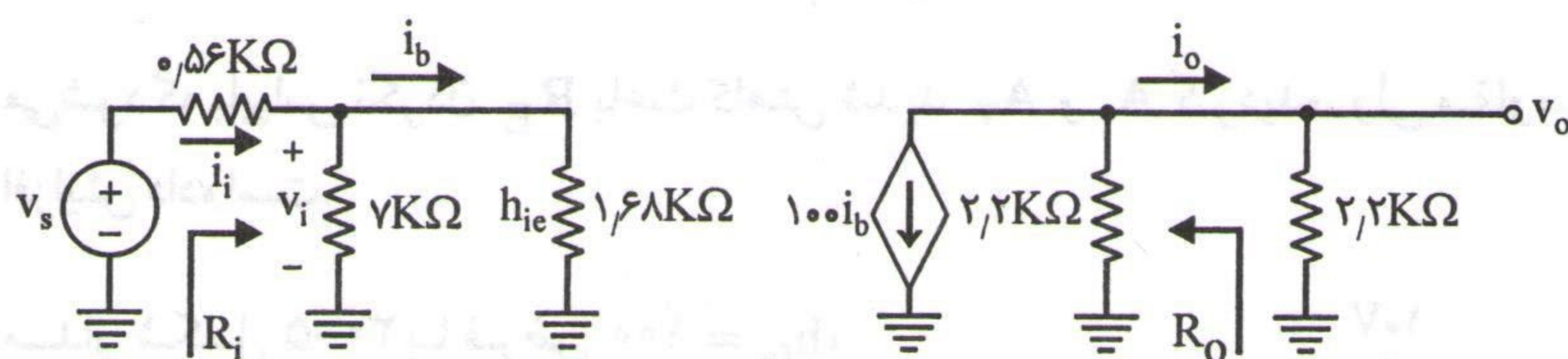
حل: با قرار دادن معادل تونن از دید بیس، جریان نقطه کار را به دست می آوریم.

$$R_{Th} = 47 \parallel 8.2 = 7 K\Omega, \quad V_{Th} = \frac{16}{47 + 8.2} \times 8.2 = 2.38 V$$

$$I_E = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_E + R_{Th} / (1 + h_{fe})} = 1.57 mA, \quad I_C = \alpha I_E = 1.55 mA$$

$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 1.68 K\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۲۸-۵ رسم شده است.



شکل ۲۸-۵

$$v_o = (-100 \cdot i_b)(2.2 \parallel 2.2) = -110 \cdot i_b, \quad i_b = v_i / h_{ie} \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx -65.48$$

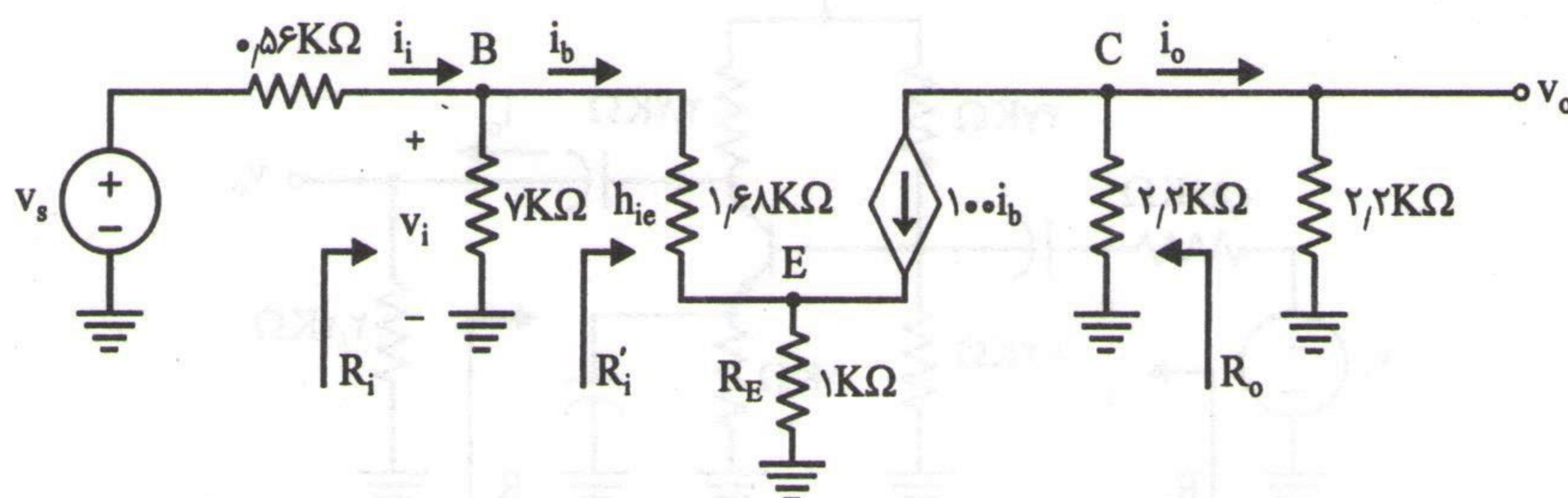
$$i_o = -100 \cdot i_b \left(\frac{2.2}{2.2 + 2.2} \right) = -50 \cdot i_b = -50 \cdot i_i \frac{v}{v + h_{ie}}$$

$$\Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} \approx -40.32$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = 7 \parallel h_{ie} = 1.35 K\Omega$$

$$\text{اگر } v_s = 0 \Rightarrow i_b = 0, \quad R_o = 2.2 K\Omega$$

چنانچه R_E بایپاس نگردد، مدار معادل سیگنال کوچک به صورت شکل ۵-۲۹ خواهد بود.



شکل ۵-۲۹

$$R_i' = h_{ie} + (1 + h_{fe})R_E = 102.68K\Omega \Rightarrow R_i = R_i' \parallel 7 = 6.55K\Omega$$

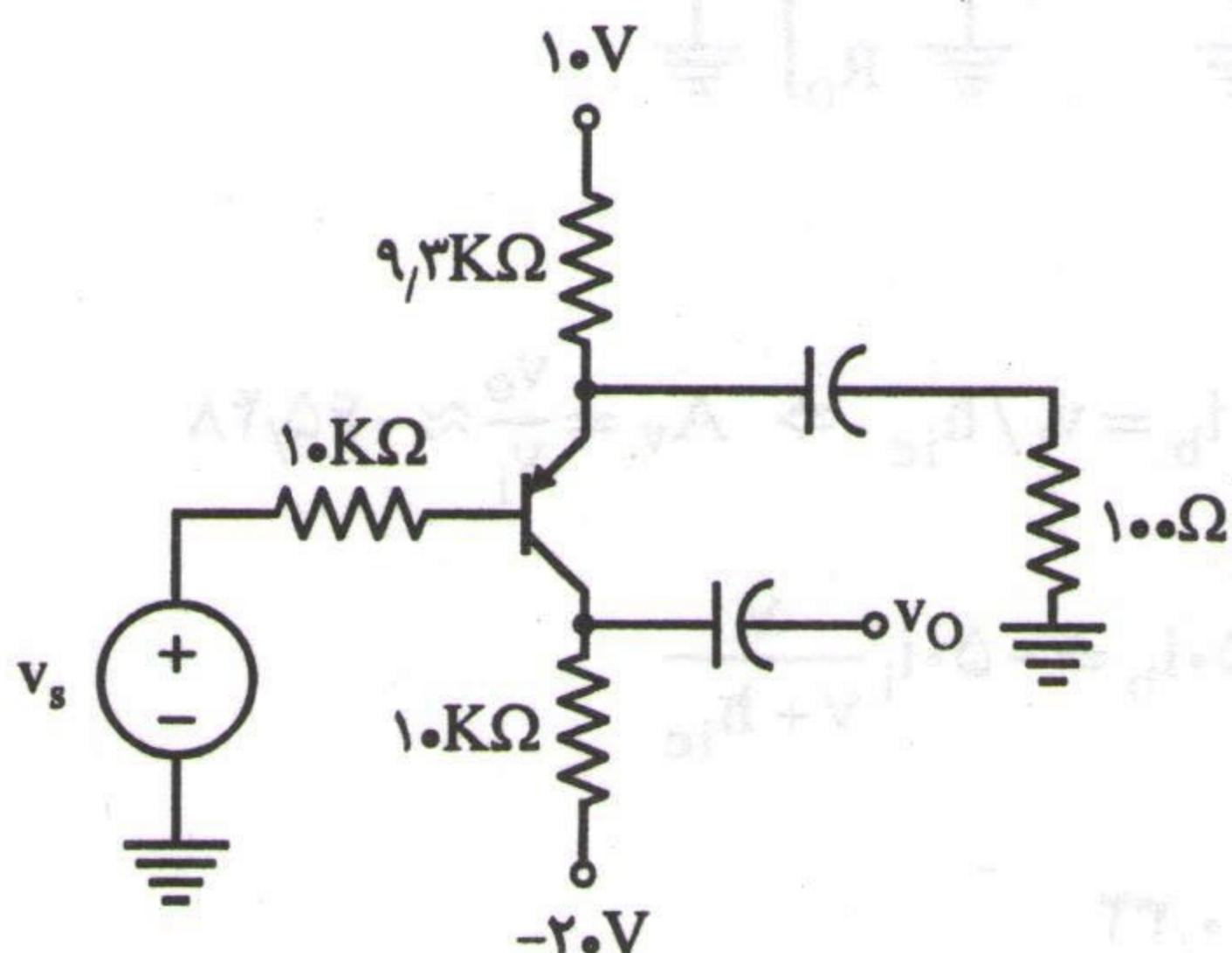
$$v_o = -100 i_b (2.2 \parallel 2.2) = -110 i_b = -110 \left(\frac{v_i}{R_i'} \right) \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = -110$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / 2.2}{v_i / R_i} = \frac{R_i}{2.2} A_v = -3.19$$

برای محاسبه R_o چنانچه منبع سیگنال حذف شود، می‌توان دید که $i_b = 0$ است. پس

$$R_o = 2.2K\Omega$$

مشاهده می‌شود که بایپاس نکردن R_E باعث کاهش شدید A_v و A_i گردیده، ولی مقاومت ورودی را مقداری افزایش داده است.



۱۰. در مدار شکل ۵-۳۰ با فرض $h_{fe} = 100$

$V_{EB} = 0.7V$ و $V_T = 26mV$ مقدار A_v را

محاسبه نمایید.

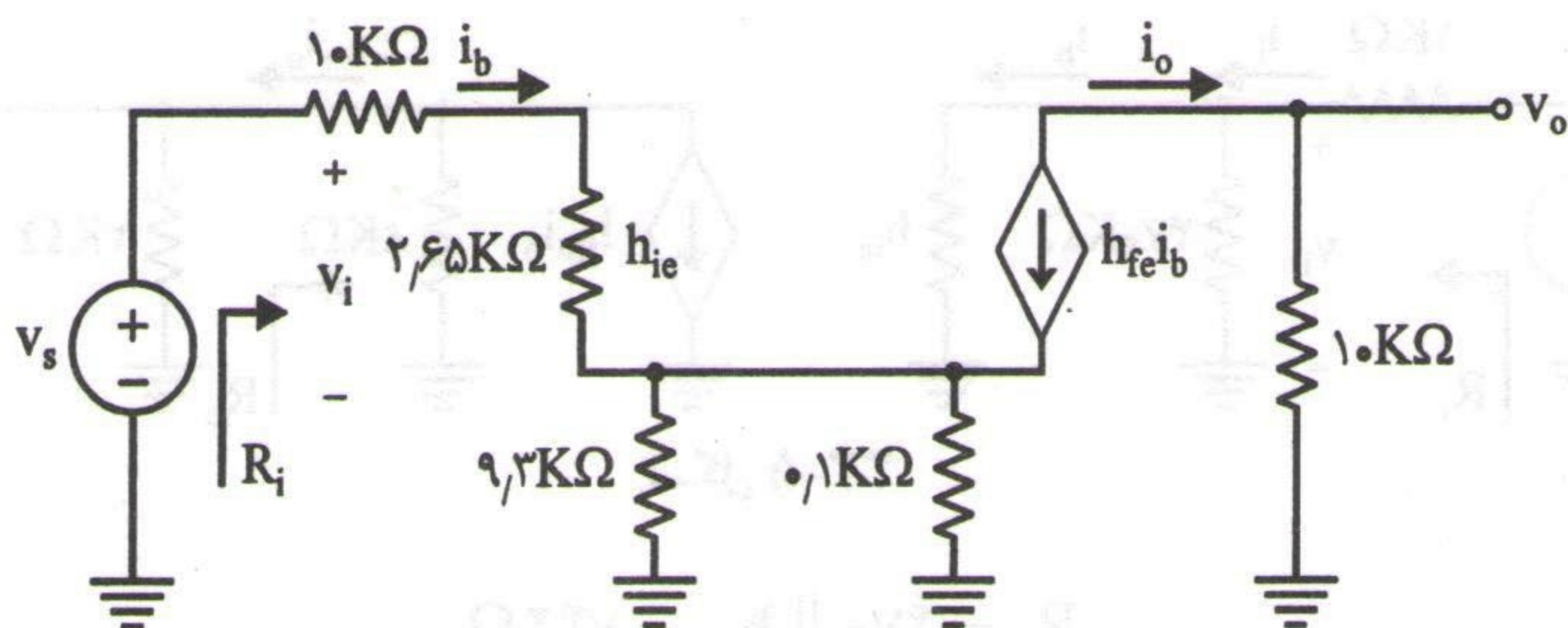
حل: جریان نقطه کار را از KVL در مدار DC و در

حلقه BE به صورت زیر به دست می‌آوریم:

$$10 = 9.3 I_E + V_{EB} + I_B, \quad I_E = (1 + h_{fe}) I_B$$

$$\text{شکل ۵-۳۰} \Rightarrow I_B = 9.8\mu A, \quad I_C = 0.98mA, \quad h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 2.65K\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک به صورت شکل ۵-۳۱ است.



شکل ۵-۳۱

$$R_i = h_{ie} + (1 + h_{fe})(9.3 \parallel 0.1) = 12.64 \text{ K}\Omega$$

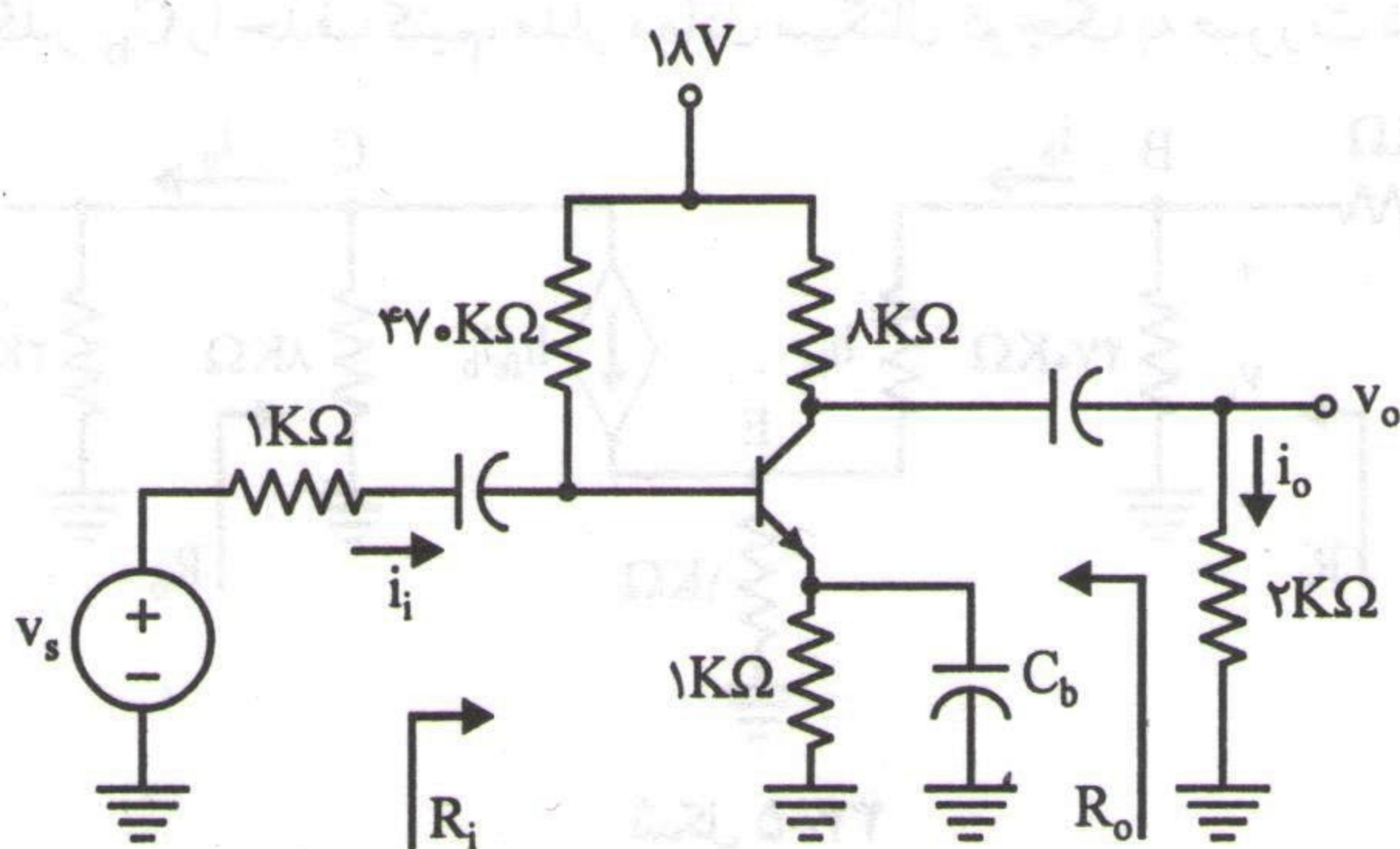
$$v_o = -h_{fe} i_b \times 10 = -1000 i_b, \quad i_b = \frac{v_i}{R_i} \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = -79.11$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_v = -44.17$$

۱۱. در تقویت کننده شکل ۵-۳۲ ترانزیستور دارای $h_{fe} = 20$ ، $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ و $V_T = 26 \text{ mV}$ است.

الف) کمیت های A_i ، R_i ، R_o و A_v را محاسبه کنید.

ب) اگر خازن کنار گذر C_b را بر داریم مقادیر جدید R_i و R_o چقدر خواهند بود؟



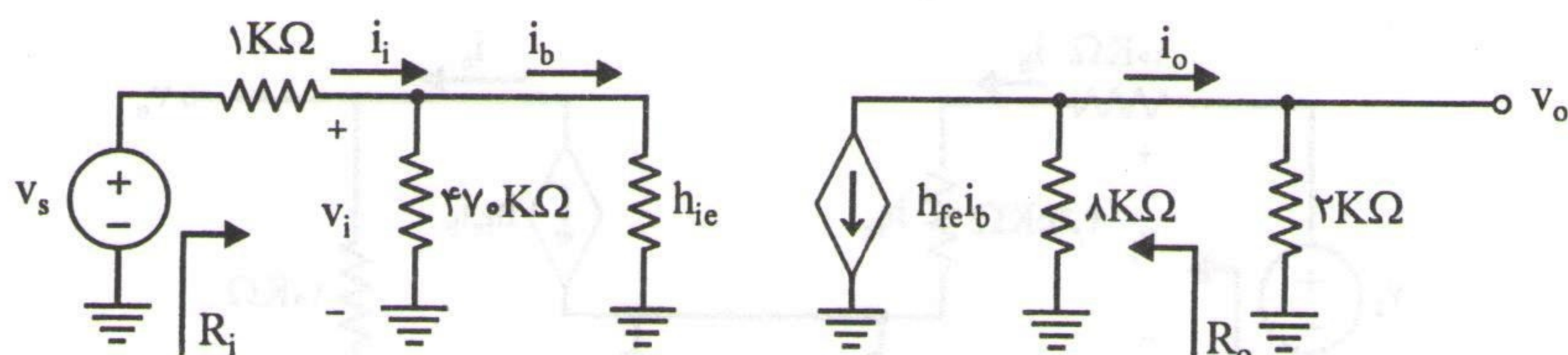
شکل ۵-۳۲

حل: ابتدا نقطه کار را با نوشتن KVL به دست می آوریم.

$$18 = 47 \cdot I_B + V_{BE} + 1 \times I_E, \quad I_E = (1 + h_{fe}) I_B \Rightarrow I_B = 35 \mu\text{A}$$

$$I_C = h_{fe} I_B = 0.7 \text{ mA}, \quad h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 743 \Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک به صورت شکل ۵-۳۳ خواهد بود.



شکل ۵-۳۳

$$R_i = 470 \parallel h_{ie} = 742 \Omega$$

$$v_o = 2i_o = -2h_{fe}i_b \frac{\Lambda}{2+\Lambda} = -32i_b, \quad i_b = \frac{v_i}{h_{ie}} \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = -43$$

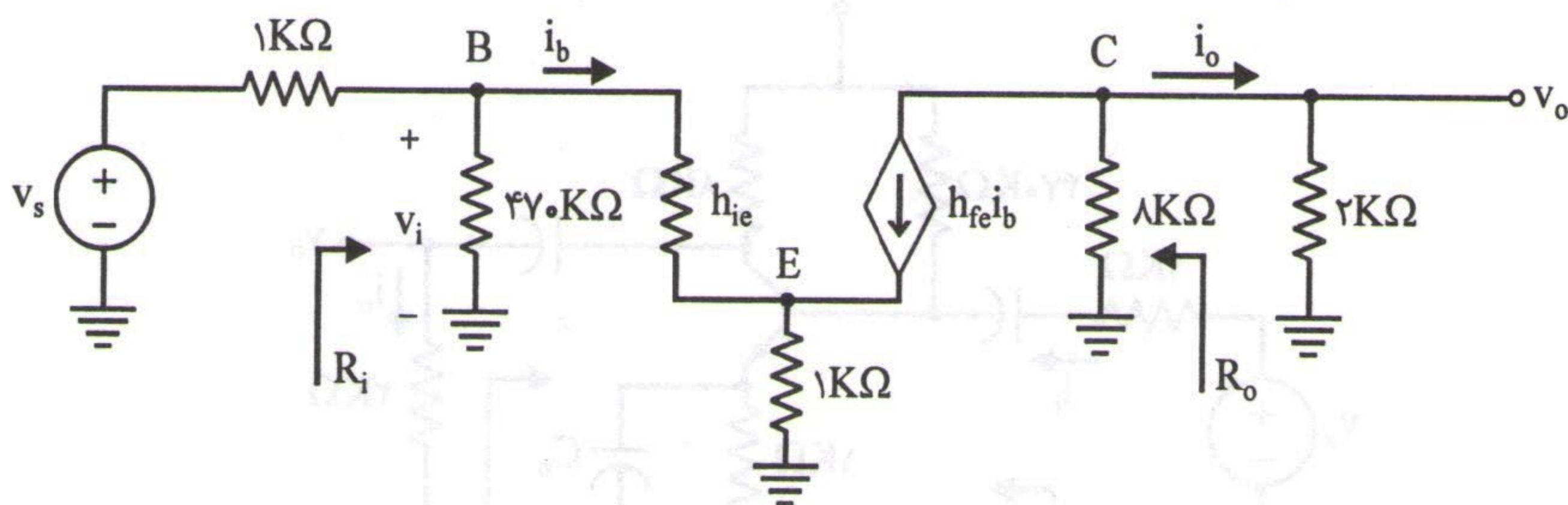
$$i_o = -h_{fe}i_b \frac{\Lambda}{\Lambda+2} = -16i_b, \quad i_b = \frac{470}{470+h_{ie}}i_i \quad \text{محاسبه } A_i:$$

$$\Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = -16 \left(\frac{470}{470+h_{ie}} \right) \approx -16$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_v = -18.3$$

برای محاسبه R_o ، اگر منبع سیگنال ورودی را حذف کنیم $i_b = 0$ خواهد بود و در نتیجه $R_o = 8K\Omega$ به دست می‌آید.

ب) اگر خازن کنار گذر C_b را حذف کنیم، مدار معادل سیگنال کوچک به صورت شکل ۵-۳۴ خواهد بود.



شکل ۵-۳۴

$$R_i = 470 \parallel [h_{ie} + (1+h_{fe})R_E] = 20.78K\Omega$$

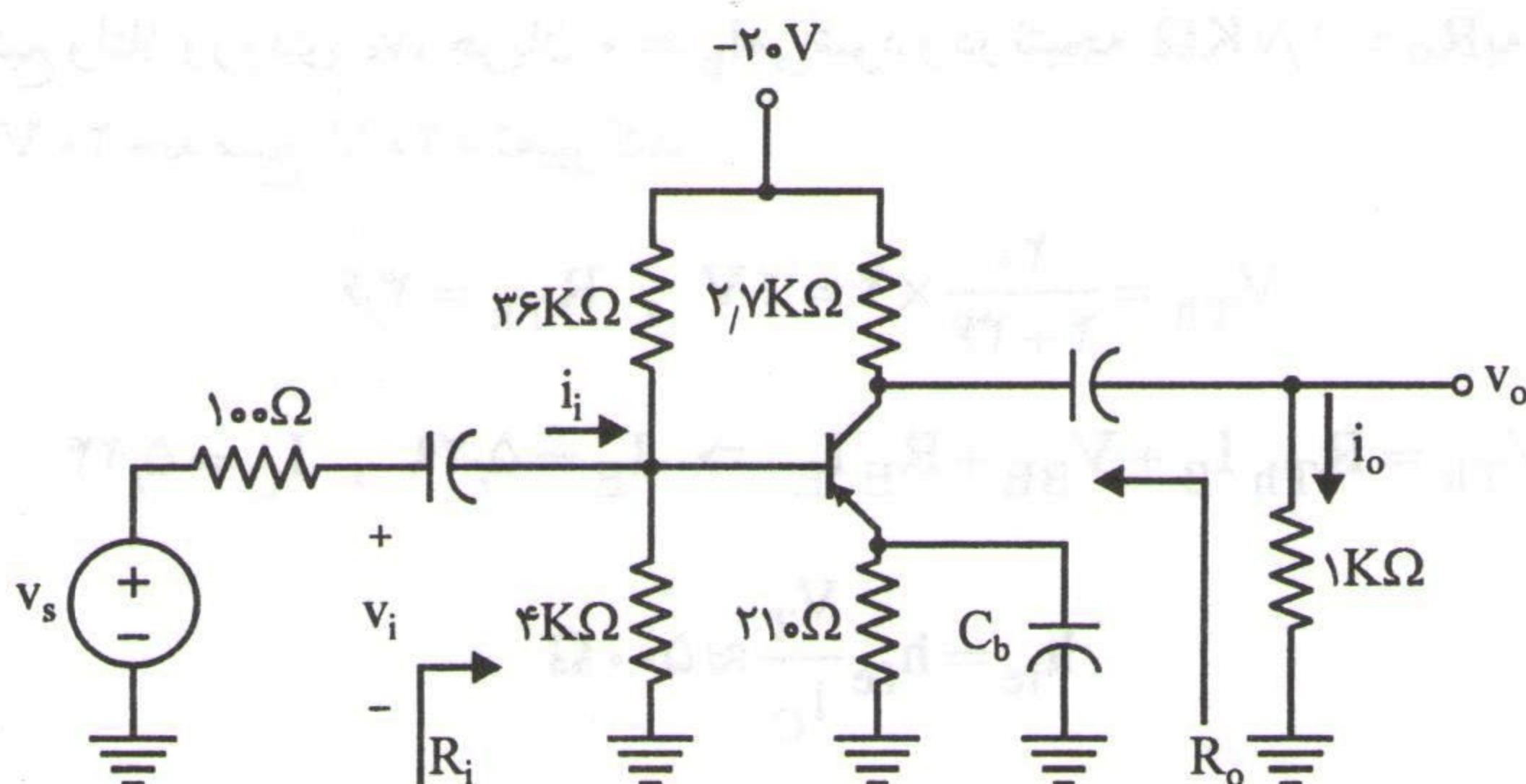
اگر منبع سیگنال ورودی v_s صفر شود، از KVL در حلقه BE می‌توان دید که $i_b = 0$ و در نتیجه $R_o = 8K\Omega$ به دست می‌آید.

۱۲. در تقویت کننده شکل ۵-۳۵، ترانزیستور دارای $h_{fe} = 40$ است.

الف) مقادیر A_v ، A_i ، R_i و R_o را محاسبه نمایید.

ب) اگر ترانزیستور را با یک ترانزیستور NPN با همان h_{fe} عوض کنیم، چه تغییری در مدار لازم است

تا مقادیر کمیت‌های بند (الف) تغییر نکند؟



شکل ۳۵-۵

ج) اگر در مدار جدید ترانزیستور NPN دارای $h_{fe} = 100$ باشد، مقادیر جدید کمیت‌های A_v , R_i , A_i و A_{v_s} چقدر خواهند شد؟

حل: الف) ابتدا مدار معادل تونن از دید بیس را به دست می‌آوریم.

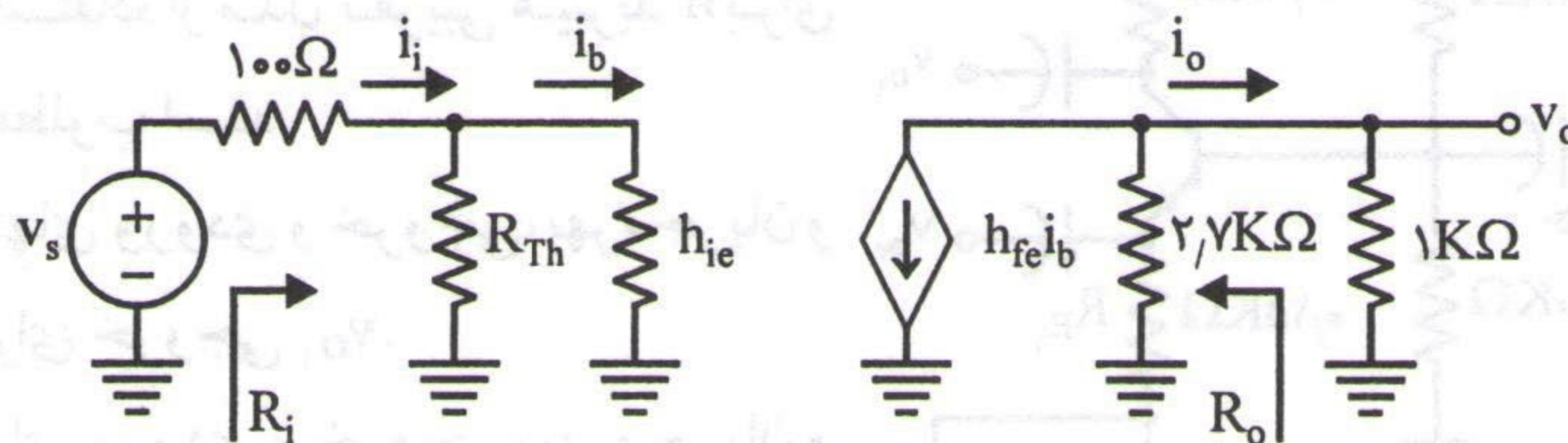
$$R_{Th} = 36 \parallel 4 = 3.6 \text{ K}\Omega, \quad V_{Th} = \frac{-20}{4 + 36} \times 4 = -2 \text{ V}$$

از KVL در حلقه BE داریم

$$-V_{Th} = R_E I_E + V_{EB} + R_{Th} I_B \Rightarrow I_E = 4.37 \text{ mA}, \quad I_C = 4.26 \text{ mA}$$

$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 244 \Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۳۶-۵ آمده است.



شکل ۳۶-۵

$$i_o = -h_{fe} i_b \frac{2.7}{2.7 + 1} = -29.19 i_b, \quad i_b = \frac{R_{Th}}{R_{Th} + h_{ie}} i_i = 0.937 i_i \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = -27.35$$

$$R_i = R_{Th} \parallel h_{ie} = 228 \Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times 1}{i_i \times R_i} = \frac{A_i}{R_i} = -120$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v = -83.4$$

با صفر کردن منبع ولتاژ ورودی v_s ، جریان $i_b = 0$ می‌شود و در نتیجه $R_o = 2.7 K\Omega$ به دست خواهد آمد.
(ب) فقط منبع $20 V$ - به منبع $20 V$ + تغییر کند.

$$V_{Th} = \frac{20}{4 + 36} \times 4 = 2 V, \quad R_{Th} = 3.6 \quad (ج)$$

$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E \Rightarrow I_E = 5.29, \quad I_C = 5.24$$

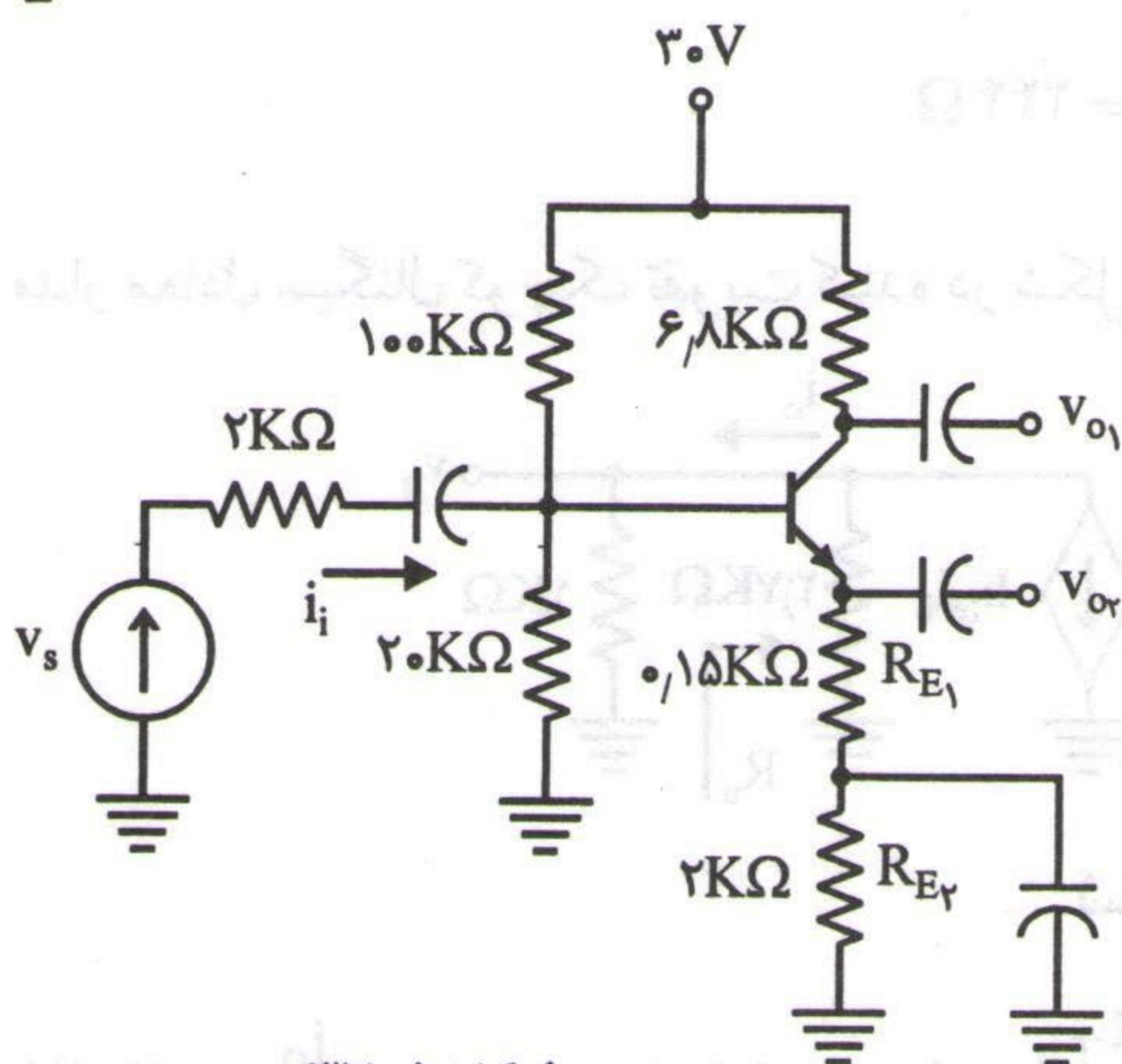
$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} \approx 500 \Omega$$

$$i_o = -h_{fe} i_b \frac{2.7}{2.7 + 1} = -72.97 i_b, \quad i_b = \frac{R_{Th}}{R_{Th} + h_{ie}} i_i = 0.878 i_i \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = -64$$

$$R_i = R_{Th} \parallel h_{ie} = 439 \Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times 1}{i_i \times R_i} = \frac{A_i}{R_i} = -145.8$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v = -118.75$$



شکل ۵-۳۷

۱۳. در مدار تقویت کننده شکل ۵-۳۷، ترانزیستور دارای

$V_T = 26 mV$ و $V_{BE} = 0.7 V$ ، $h_{fe} = 200$

می‌باشد، با استفاده از مدل تقریبی هیبرید h برای ترانزیستور، مطلوب است:

الف) مقاومت‌های ورودی و خروجی، بهره جریان و بهره ولتاژ برای خروجی v_{o1} .

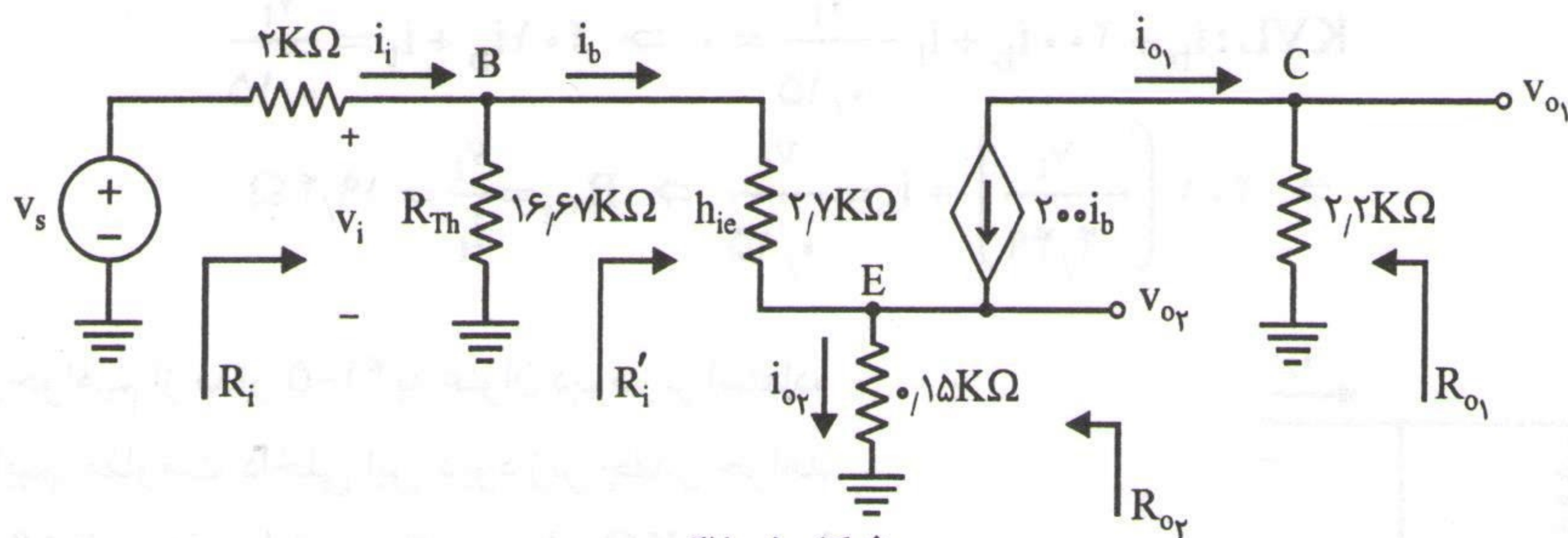
ب) مقاومت‌های ورودی و خروجی، بهره جریان و بهره ولتاژ برای خروجی v_{o2} .

حل: با قرار دادن مدار معادل تونن از دید بیس، جریان نقطه کار را به دست می‌آوریم.

$$R_{Th} = 100 \parallel 20 = 16.67 K\Omega, \quad V_{Th} = \frac{30}{100 + 20} \times 20 = 5 V$$

$$I_E = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{E1} + R_{E2} + R_{Th} / (h_{fe} + 1)} = 1.93 mA, \quad h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 2.7 K\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک به صورت شکل ۵-۳۸ است.



شکل ۵-۳۸

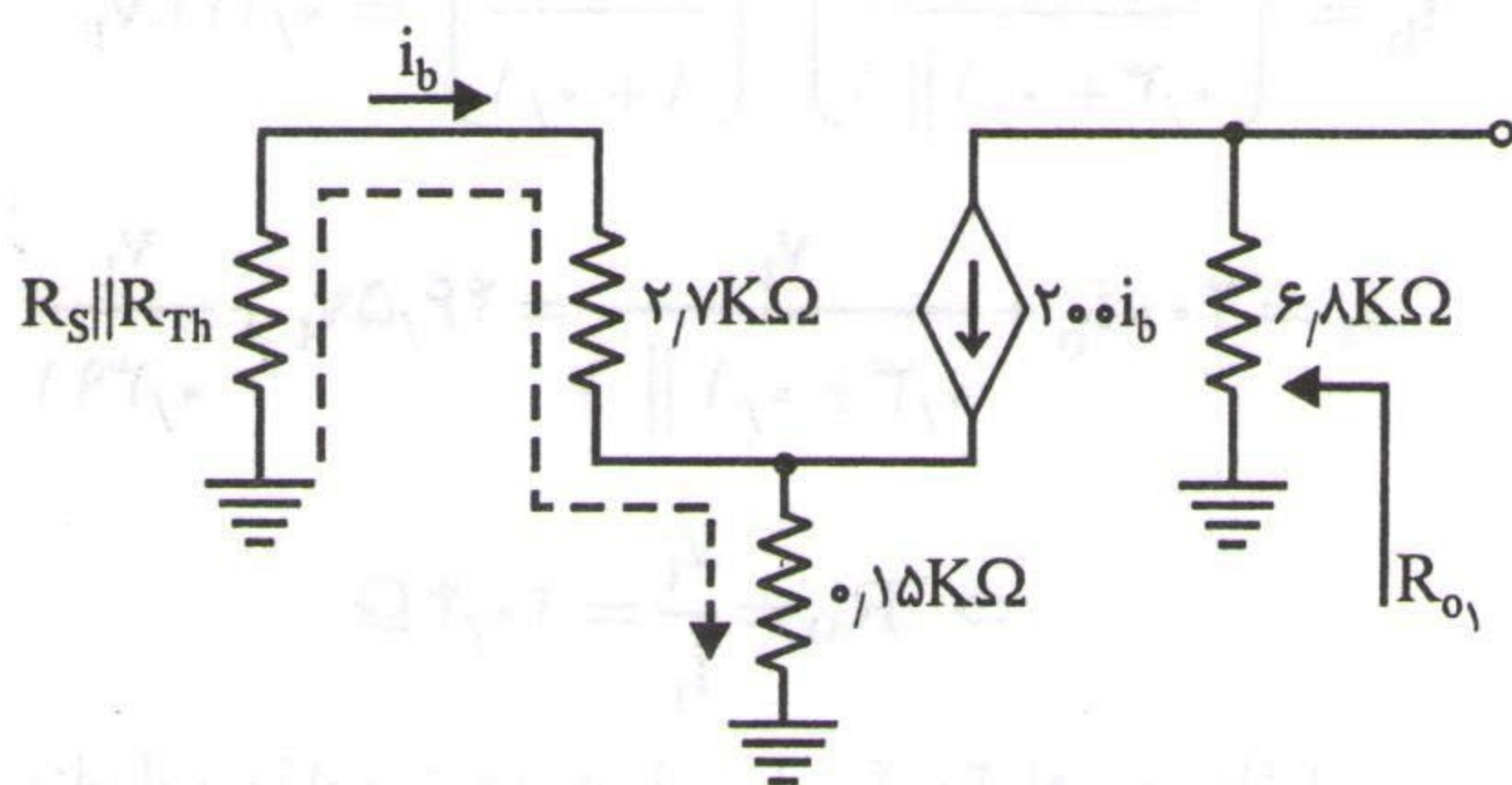
الف) محاسبه A_{i_1} :

$$i_{o_1} = -200 \cdot i_b, \quad i_b = \frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_i} i_i, \quad R_i' = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_{E_1} = 32.85 K\Omega$$

$$\Rightarrow i_{o_1} = -200 \times 0.34 i_i \Rightarrow A_{i_1} = \frac{i_{o_1}}{i_i} = -68$$

$$R_i = R_{Th} \parallel R_i' \approx 11 K\Omega$$

$$A_{v_{o_1}} = \frac{v_{o_1}}{v_i} = \frac{6.8 i_{o_1}}{R_i i_i} = \frac{6.8}{11} A_{i_1} = -42$$



شکل ۵-۳۹

با حذف منبع سیگنال ورودی، مدار محاسبه R_{o_1} به شکل ۵-۳۹ خواهد بود. با نوشتن KVL در حلقه نشان داده شده، جریان $i_b = 0$ به دست می‌آید. بنابراین $R_{o_1} = 6.8 K\Omega$ خواهد بود.

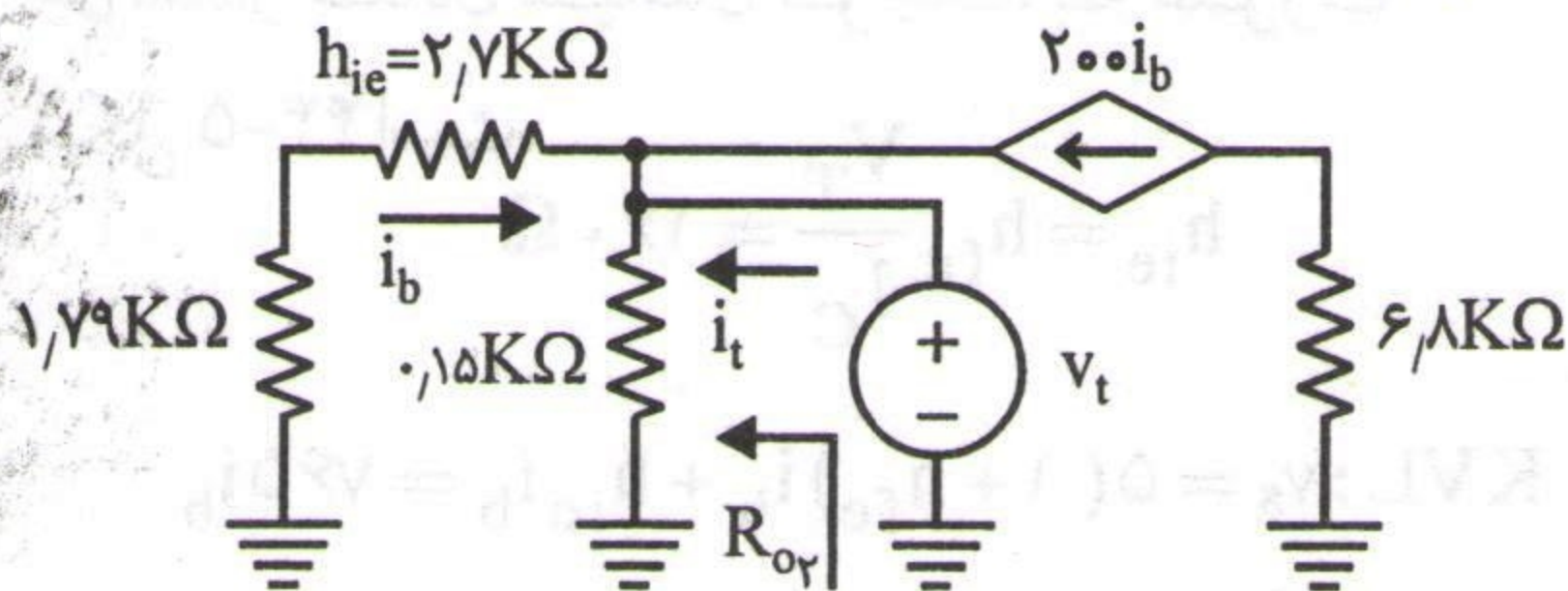
ب) محاسبه A_{i_2} :

$$i_{o_2} = i_b + 200 \cdot i_b = 201 i_b$$

$$i_b = 0.34 i_i \Rightarrow A_{i_2} = \frac{i_{o_2}}{i_i} = 68.3$$

امپدانس ورودی همان مقدار $R_i = 11 K\Omega$ خواهد بود.

$$A_{v_{o_2}} = \frac{v_{o_2}}{v_i} = \frac{0.15 i_{o_2}}{R_i i_i} = \frac{0.15}{R_i} A_{i_2} = 0.93$$



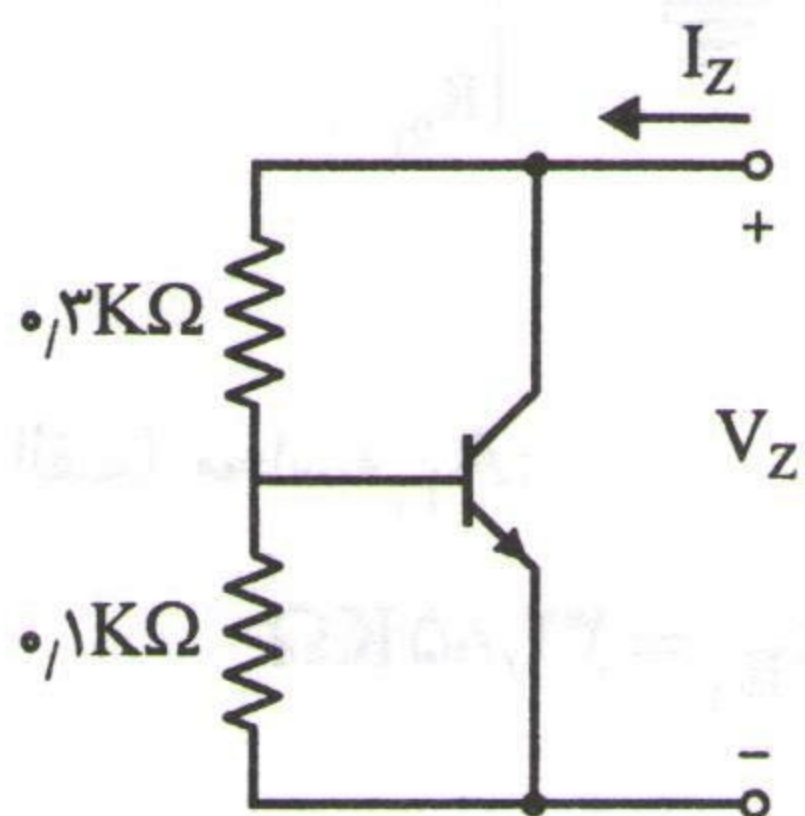
شکل ۵-۴۰

برای محاسبه R_{o_2} ، منبع سیگنال ورودی v_s را حذف کرده و با قرار دادن منبع آزمایشی v_t در خروجی (شکل ۵-۴۰)، مقاومت خروجی را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$KVL: (1.79 + 2.7) i_b + v_t = 0 \Rightarrow i_b = -\frac{v_t}{4.49}$$

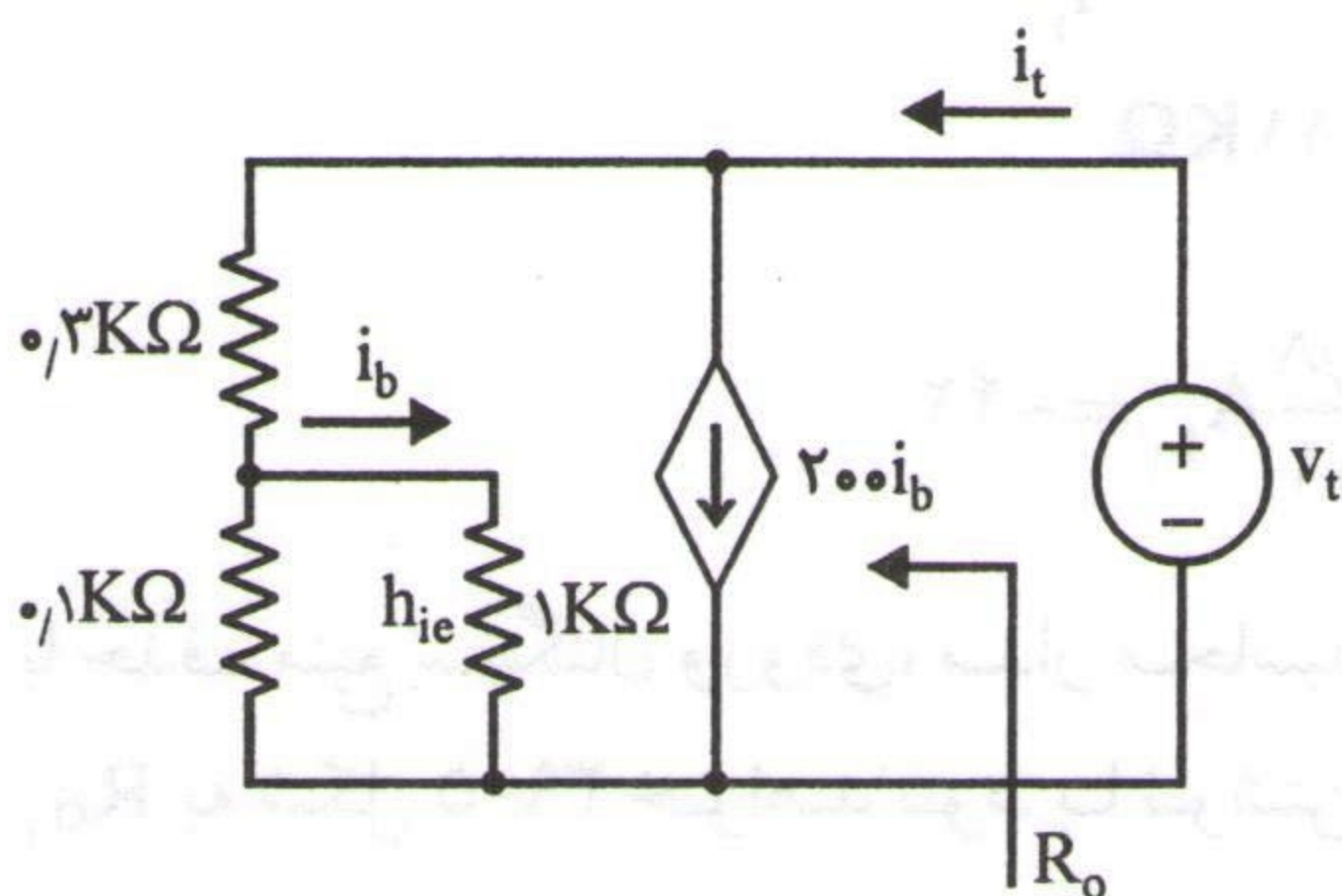
$$\text{KVL: } i_b + 200 i_b + i_t - \frac{v_t}{0.15} = 0 \Rightarrow 201 i_b + i_t = \frac{v_t}{0.15}$$

$$\Rightarrow 201 \left(-\frac{v_t}{4.49} \right) + i_t = \frac{v_t}{0.15} \Rightarrow R_{O_T} = \frac{v_t}{i_t} = 19.4 \Omega$$



شکل ۵-۴۱

۱۴. می‌خواهیم از مدار ۵-۴۱ به عنوان دیود زنر استفاده نماییم. مقاومت داخلی این دیود زنر چقدر خواهد بود؟ ترانزیستور دارای $h_{fe} = 200$ و $h_{ie} = 1 \text{ k}\Omega$ می‌باشد. از h_{oe} و h_{re} صرف نظر می‌گردد.



شکل ۵-۴۲

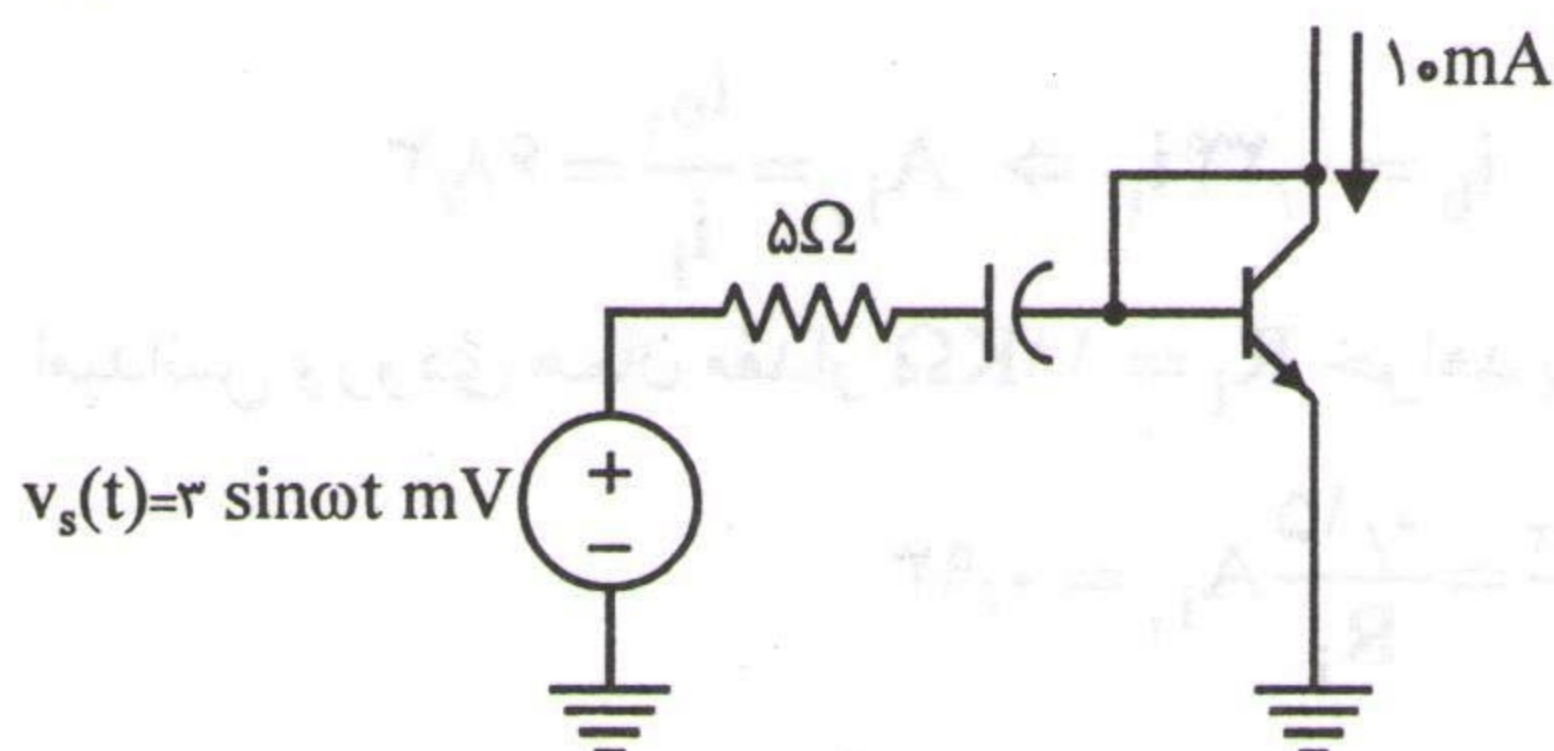
حل: مدار معادل سیگنال کوچک این مدار را در نظر می‌گیریم (شکل ۵-۴۲) و مقاومت خروجی آن را محاسبه می‌کنیم.

$$i_b = \left(\frac{v_t}{0.3 + 0.1 \parallel 1} \right) \left(\frac{0.1}{1 + 0.1} \right) = 0.233 v_t$$

$$i_t = 200 i_b + \frac{v_t}{0.3 + 0.1 \parallel 1} = 46.5 v_t + \frac{v_t}{0.391}$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{v_t}{i_t} = 20.4 \Omega$$

بنابراین مقاومت دیود زنر برابر ۲۰٫۴ اهم می‌باشد.



شکل ۵-۴۳

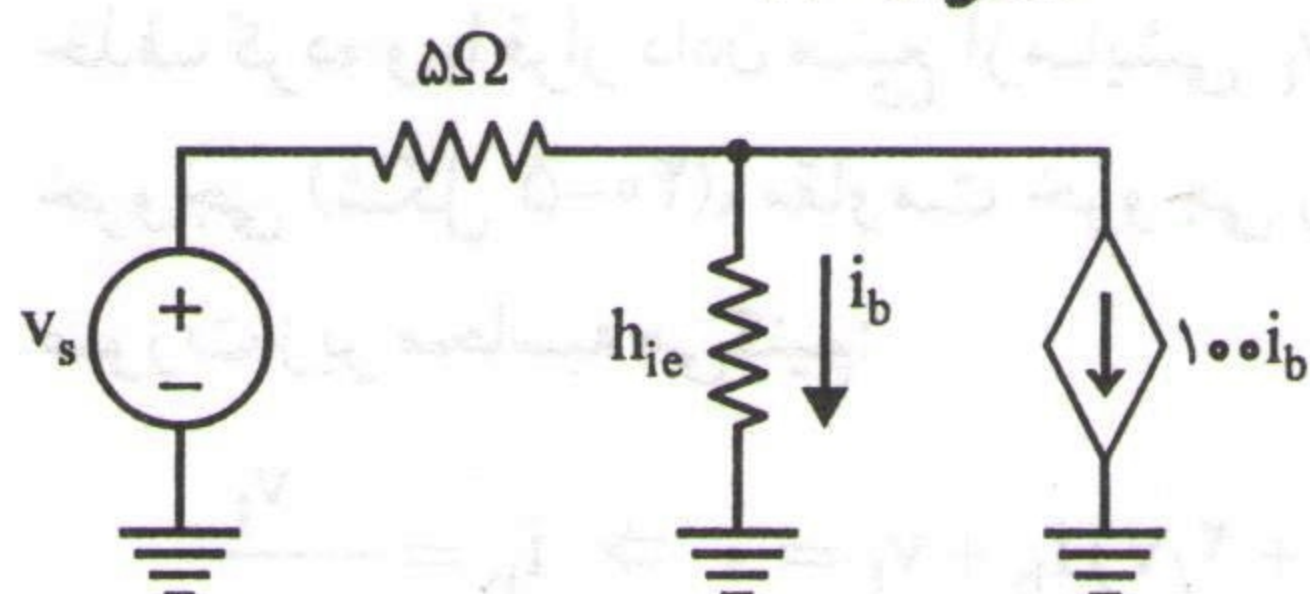
۱۵. در مدار شکل ۵-۴۳، $I_C = 10 \text{ mA}$ و ترانزیستور دارای مشخصات $h_{fe} = 100$ و $V_T = 26 \text{ mV}$ است. اندازه مؤلفه متناوب جریان امیتر چقدر است؟

حل: مدار معادل سیگنال کوچک، به صورت شکل ۵-۴۴ است.

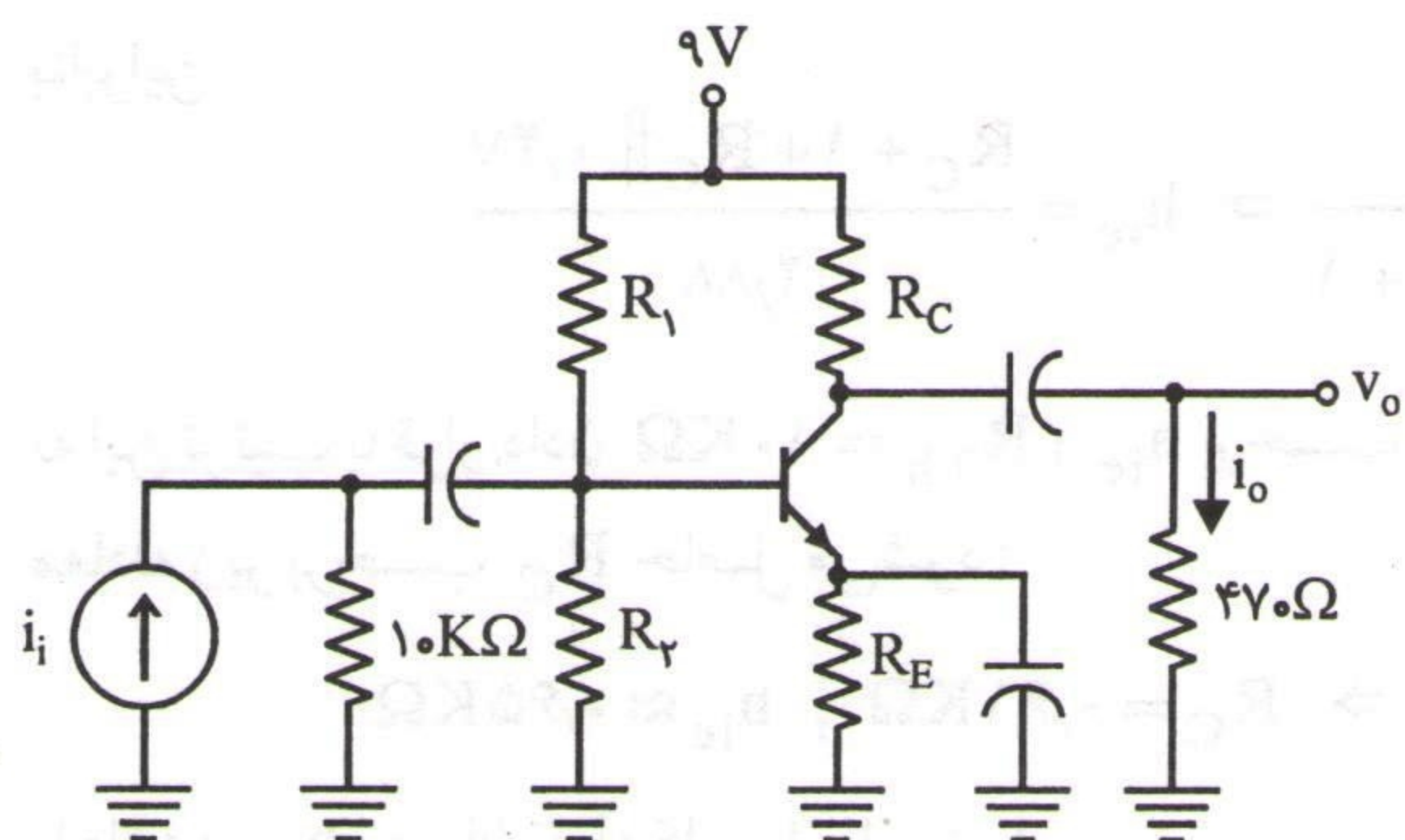
$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 260 \Omega$$

$$\text{KVL: } v_s = 5(1 + h_{fe}) i_b + h_{ie} i_b = 765 i_b$$

$$i_e = \frac{i_b}{1 + h_{fe}} \Rightarrow i_e = 0.132 v_s = 0.4 \sin \omega t \text{ mA}$$



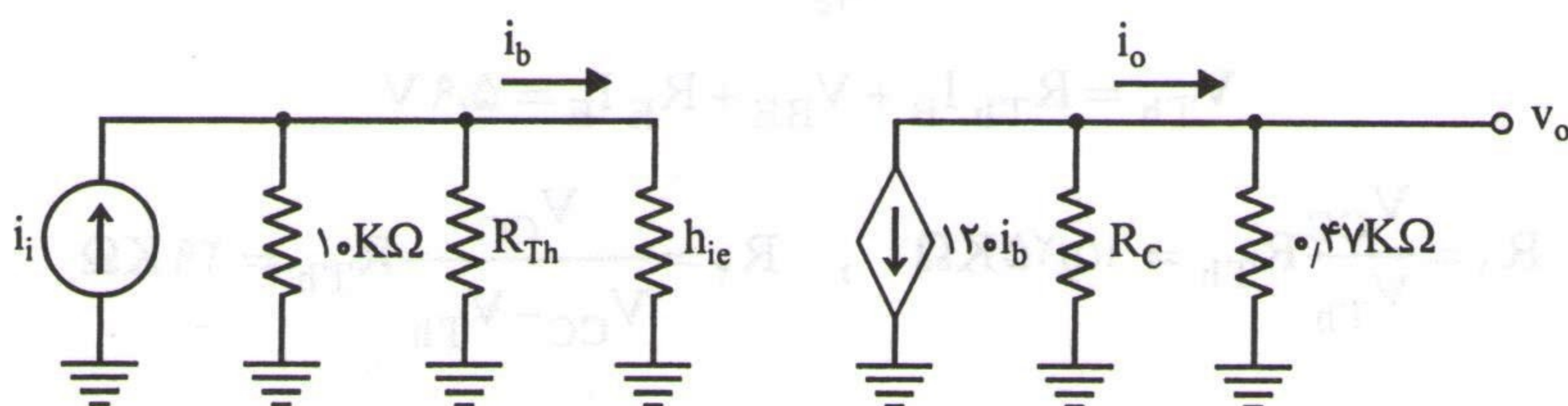
شکل ۵-۴۴



شکل ۴۵-۵

۱۶. در مدار تقویت کننده امیتر مشترک شکل ۴۵-۵ فرض کنید ترانزیستور دارای $V_T = 26 \text{ mV}$ ، $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ و $h_{fe} = 120$ می باشد. مدار را به صورتی طراحی کنید که اندازه بهره جریان آن برابر ۶۰ باشد.

حل: مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۴۶-۵ است.



شکل ۴۶-۵

$$i_o = -120 \cdot i_b \left(\frac{R_C}{R_C + 0.47} \right), \quad i_b = i_i \left(\frac{10 \parallel R_{Th}}{10 \parallel R_{Th} + h_{ie}} \right)$$

$$\Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = -120 \cdot \left(\frac{R_C}{R_C + 0.47} \right) \left(\frac{10 \parallel R_{Th}}{10 \parallel R_{Th} + h_{ie}} \right)$$

با در نظر گرفتن $A_i = -60$ داریم

$$\frac{1}{2} = \left(\frac{R_C}{R_C + 0.47} \right) \left(\frac{10 \parallel R_{Th}}{10 \parallel R_{Th} + h_{ie}} \right)$$

به این ترتیب می توان انتخابهای متعددی برای R_C ، R_{Th} و h_{ie} داشت. ولی باید دقت نمود که h_{ie} در تعیین نقطه کار و R_{Th} در پایداری آن مؤثر می باشند. وجود R_E به جهت پایداری حرارتی نقطه کار بوده و در تقویت کننده ها معمولاً کمتر از یک کیلو اهم می باشد. پس با انتخاب $R_E = 1 \text{ K}\Omega$ داریم

$$R_{Th} \ll h_{fe} R_E = 120 \text{ K}\Omega \Rightarrow R_{Th} = 10 \text{ K}\Omega$$

می توان طراحی را به گونه ای انجام داد که نقطه کار وسط خط بار ac قرار گرفته و دامنه نوسان متقارن خروجی حداکثر گردد. برای این منظور داریم

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = \frac{V_{CC}}{R_C \parallel R_L + R_C + R_E}, \quad I_{CQ} = \frac{h_{fe} V_T}{h_{ie}} = \frac{3.12}{h_{ie}}$$

بنابراین

$$\frac{3.12}{h_{ie}} = \frac{9}{R_C \parallel 0.47 + R_C + 1} \Rightarrow h_{ie} = \frac{R_C + 1 + R_C \parallel 0.47}{2.88}$$

به این ترتیب با قرار دادن $R_{Th} = 10 K\Omega$ و h_{ie} بر حسب R_C در رابطه‌ای که از بهره جریان به دست آمد، معادله زیر بر حسب R_C حاصل می‌شود:

$$R_C^2 - 12.46 R_C + 7.238 = 0 \Rightarrow R_C = 0.61 K\Omega, h_{ie} \approx 0.65 K\Omega$$

با داشتن h_{ie} جریان نقطه کار برابر است با

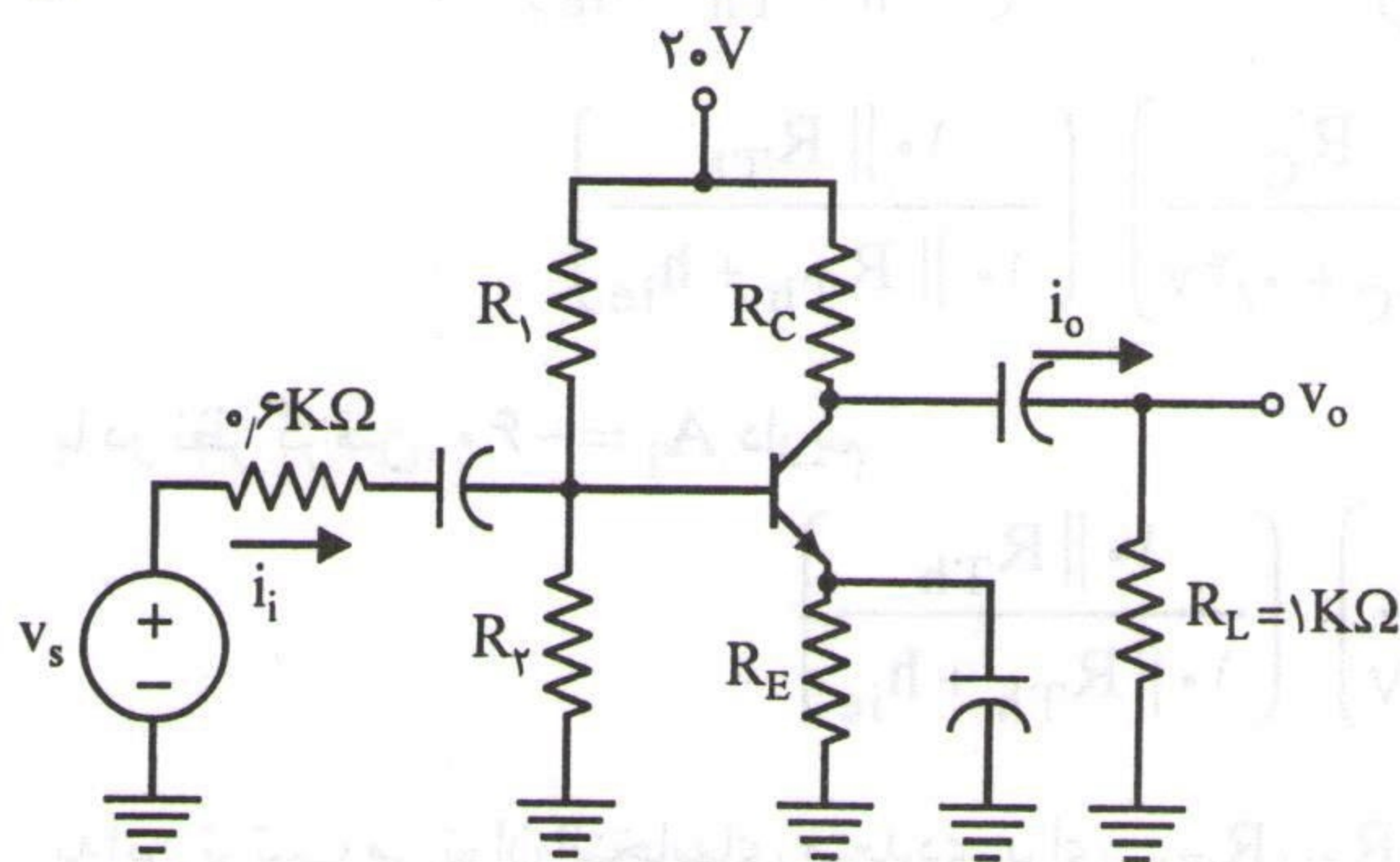
$$I_{CQ} = \frac{h_{fe} V_T}{h_{ie}} = 4.8 mA$$

$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E = 5.9 V$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 15.25 K\Omega, R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 29 K\Omega$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - (R_E + R_C) I_{CQ} = 1.32 V > V_{CE(sat)}$$

بنابراین نقطه کار انتخاب شده از نظر داشتن حداکثر دامنه نوسان و پایداری مناسب می‌باشد. همچنین با قرار دادن مقادیر انتخابی در رابطه A_i ، اندازه بهره جریان برابر ۶۰ به دست می‌آید.



شکل ۵-۴۷

۱۷. تقویت کننده امیتر مشترک شکل ۵-۴۷ را

با فرض $V_{BE} = 0.7 V$, $h_{fe} = 200$

$V_{CE(sat)} = 0.2 V$ و $V_T = 26 mV$

به نحوی طراحی نمایید که،

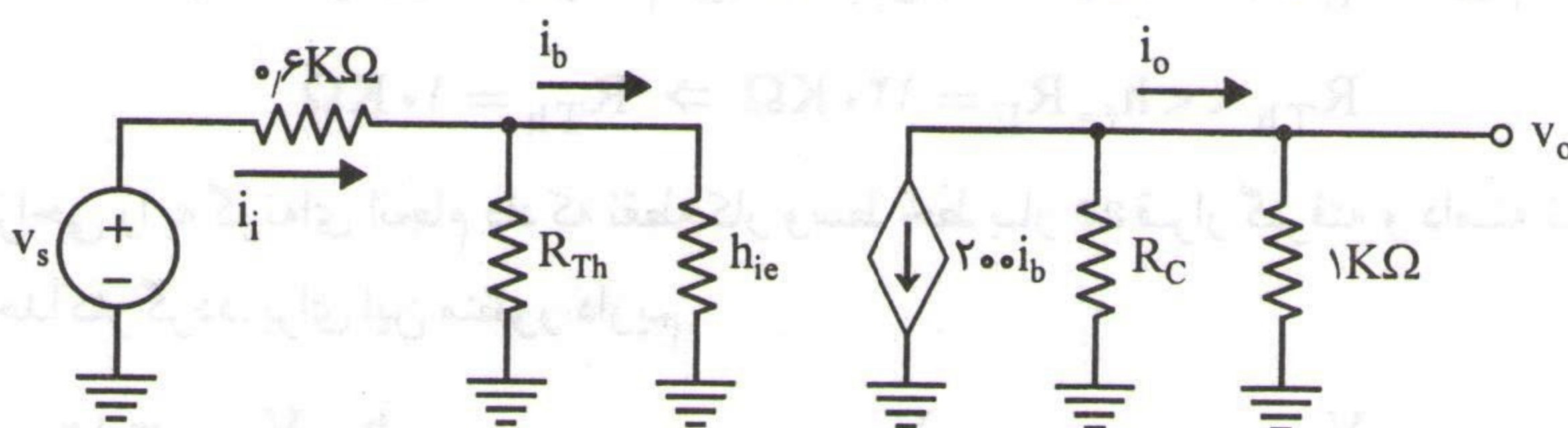
- بهره جریان بیشتر از ۱۵۰ باشد.

- مقاومت ورودی بزرگ‌تر از $1.5 K\Omega$ باشد.

- دامنه تغییرات ولتاژ خروجی بتواند تا

$1.5 V$ افزایش یابد.

حل: مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۴۸ رسم شده است.



شکل ۵-۴۸

بهره جریان در مدار فوق برابر است با

$$i_o = -\beta i_b \left(\frac{R_C}{R_C + 1} \right), \quad i_b = i_i \left(\frac{R_{Th}}{R_{Th} + h_{ie}} \right)$$

$$\Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = -\beta \left(\frac{R_C}{R_C + 1} \right) \left(\frac{R_{Th}}{R_{Th} + h_{ie}} \right)$$

برای داشتن بهره جریان نسبتاً بزرگ، معمولاً فرض $R_{Th} \gg h_{ie}$ فرض مناسبی است. بنابراین

$$A_i = -\beta \left(\frac{R_C}{R_C + 1} \right), \quad |A_i| \geq 150 \Rightarrow R_C \geq 3K\Omega$$

که مقدار استاندارد $R_C = 4.7K\Omega$ را انتخاب می‌کنیم.

$$R_i = R_{Th} \parallel h_{ie} \approx h_{ie} \geq 1.5K\Omega$$

$$\Rightarrow h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{CQ}} \geq 1.5 \Rightarrow I_{CQ} \leq 3.47mA$$

با در نظر گرفتن $I_{CQ} = 3mA$ ، مقدار V_{CEQ} عبارت است از

$$V_{CEQ} \approx 20 - (R_C + R_E) I_{CQ} = 20 - (4.7 + R_E) 3$$

برای داشتن دامنه نوسان $1.5V$ ولت در خروجی بدون اینکه ترانزیستور وارد ناحیه قطع یا اشباع گردد، اولین شرط چنین است:

$$V_{CEQ} \geq 1.5 + V_{CE(sat)} = 1.7V$$

شرط اخیر عدم ورود به ناحیه اشباع را تضمین می‌کند. پس از طراحی باید مطمئن شد که ترانزیستور وارد ناحیه قطع نیز نمی‌گردد.

$$V_{CEQ} = 20 - (4.7 + R_E) 3 \geq 1.7V \Rightarrow R_E \leq 1.4K\Omega$$

مقدار $R_E = 1K\Omega$ را انتخاب می‌کنیم.

$$R_{Th} = \frac{1}{\beta} h_{fe} R_E = 20K\Omega, \quad V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E = 4V$$

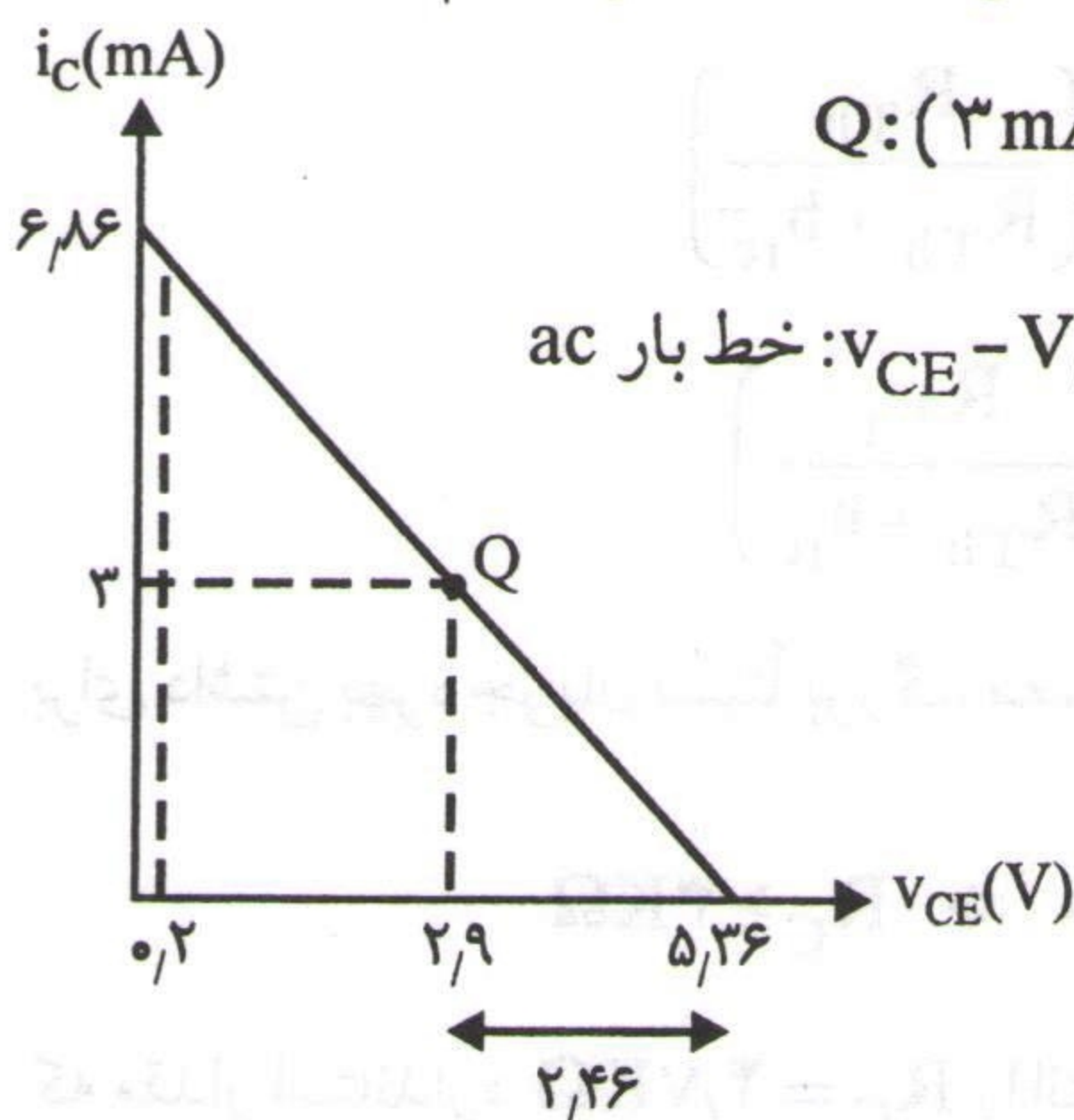
$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 100K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 25K\Omega$$

حال با مقادیر به دست آمده، مشخصات تقویت کننده را به دست می‌آوریم.

$$h_{ie} = 1.3K\Omega, \quad R_i = R_{Th} \parallel h_{ie} = 1.6K\Omega$$

$$A_i = -\beta \left(\frac{R_C}{R_C + R_E} \right) \left(\frac{R_{Th}}{R_{Th} + h_{ie}} \right) = -151.8$$

برای اطمینان از طرح مورد نظر، حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی را به دست می‌آوریم.



$$Q: (3\text{mA}, 2.9\text{V}), R_{ac} = R_C \parallel R_L = 0.82\text{K}\Omega$$

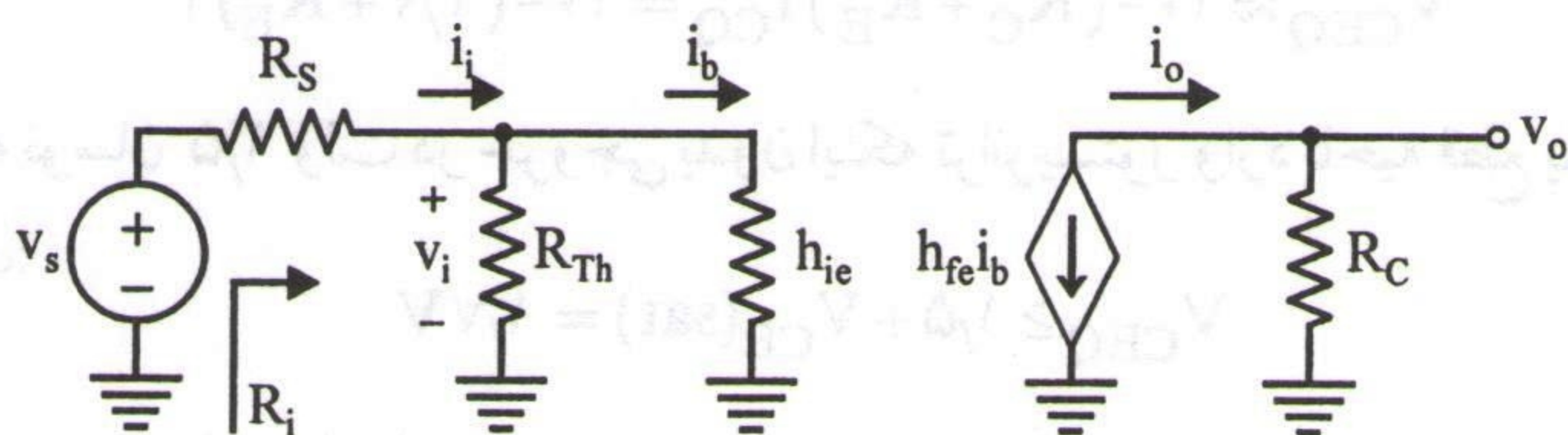
$$v_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac}(i_C - I_{CQ}) \Rightarrow v_{CE} = -0.82i_C + 5.36$$

با توجه به شکل ۵-۴۹ مشاهده می‌گردد حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی برابر ۲.۴۶ ولت است که بیشتر از مقدار خواسته شده می‌باشد.

شکل ۵-۴۹

۱۸. یک تقویت کننده امیتر مشترک با $A_v = 200$ و $R_i \approx 1\text{K}\Omega$ را طوری طراحی نمایید که نقطه کار آن از پایداری خوبی نسبت به تغییرات h_{fe} برخوردار بوده و خروجی دارای حداکثر نوسان متقارن باشد. $V_{CC} = 18\text{V}$ و $h_{fe} = 100$ است.

حل: مدار معادل سیگنال کوچک چنین تقویت کننده‌ای در شکل ۵-۵۰ رسم شده است.



شکل ۵-۵۰

$$v_o = -h_{fe} i_b R_C, i_b = \frac{v_i}{h_{ie}} \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

$$|A_v| = 200 = 100 \cdot \frac{R_C}{h_{ie}} \Rightarrow 2h_{ie} = R_C$$

برای داشتن پایداری نسبت به تغییرات h_{fe} داریم

$$R_{Th} = 0.1 h_{fe} R_E \Rightarrow R_{Th} = 10 R_E$$

از طرفی برای R_i داریم

$$R_i = R_{Th} \parallel h_{ie} = 10 R_E \parallel h_{ie} = 1 \Rightarrow \frac{10 R_E h_{ie}}{10 R_E + h_{ie}} = 1, h_{ie} = \frac{1}{2} R_C$$

$$\Rightarrow R_E = \frac{1}{10} \left(\frac{R_C}{2} \right)$$

برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن، نقطه کار را وسط خط بار ac انتخاب می‌کنیم. یعنی،

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}}, \quad R_{ac} = R_C, \quad R_{DC} = R_C + R_E \Rightarrow I_{CQ} = \frac{18}{2R_C + R_E}$$

از طرفی برای h_{ie} داریم

$$I_{CQ} = h_{fe} \frac{V_T}{h_{ie}} = \frac{2.6}{h_{ie}} = \frac{5.2}{R_C} \Rightarrow \frac{5.2}{R_C} = \frac{18}{2R_C + R_E} \Rightarrow R_E = 1.46 R_C$$

با استفاده از دو رابطه فوق برای R_E داریم

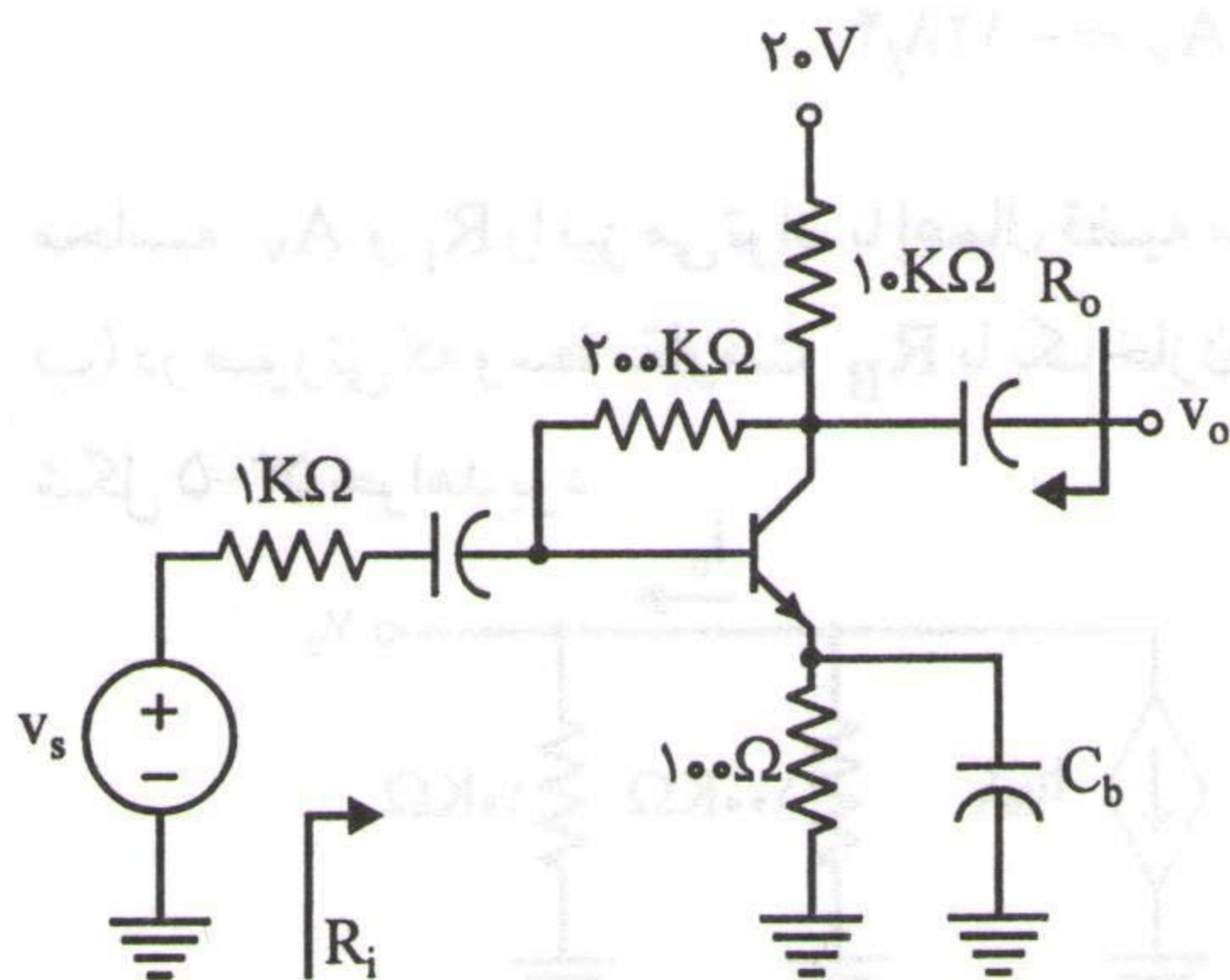
$$1.46 R_C = \frac{1}{10} \left(\frac{R_C}{R_C - 2} \right) \Rightarrow R_C \approx 2.068 K\Omega \Rightarrow R_E \approx 3 K\Omega$$

$$\Rightarrow h_{ie} = 1.34 K\Omega \Rightarrow I_{CQ} \approx 2.5 mA$$

$$R_{Th} = 10 R_E = 30 K\Omega, \quad V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E \approx 9 V$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 58.4 K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 58.4 K\Omega$$

■



شکل ۵-۵۱

۱۹. در تقویت‌کننده شکل ۵-۵۱، ترانزیستور دارای

$$V_T = 26 mV \text{ و } V_{BE} = 0.7 V, h_{fe} = 100$$

است.

الف) کمیت‌های A_{vs} و R_i را محاسبه نمایید.

ب) اگر وسط مقاومت R_B را توسط خازن به زمین متصل کنیم، کمیت‌های مذکور چقدر خواهند شد؟

حل: الف) ابتدا جریان نقطه کار را به دست می‌آوریم.

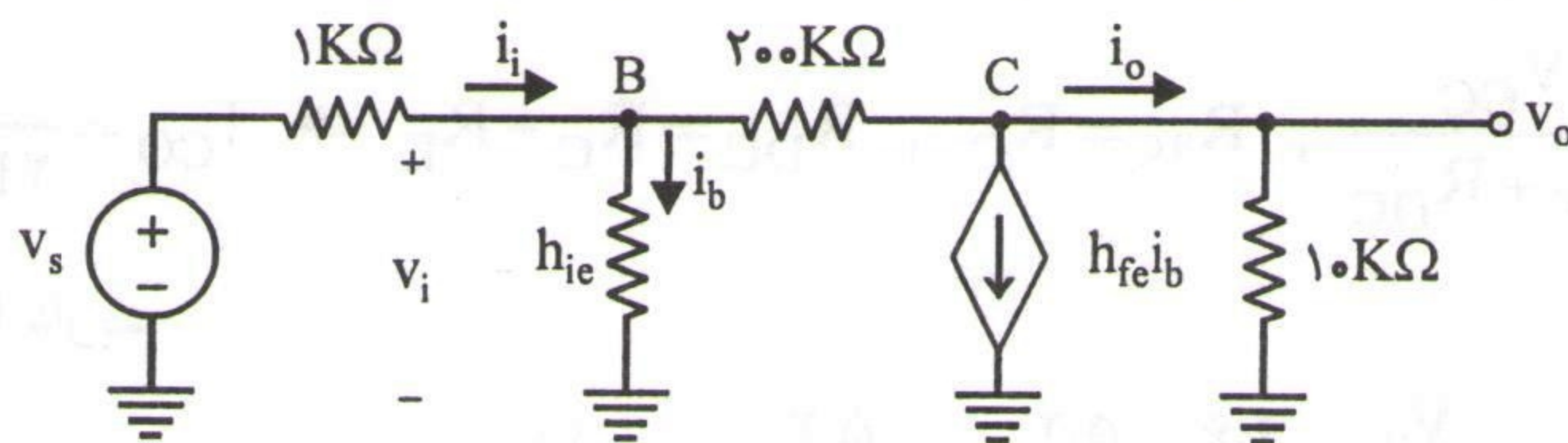
$$KVL: 20 = R_C(I_B + I_C) + R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E$$

$$I_E = (1 + h_{fe}) I_B$$

$$\Rightarrow I_E = 1.6 mA \Rightarrow I_C = 1.58 mA$$

$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 1.645 K\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک به صورت شکل ۵-۵۲ خواهد بود.



شکل ۵-۵۲

محاسبه A_v : $KVL: v_i = 200(i_o + h_{fe} i_b) + v_o$, $i_b = \frac{v_i}{h_{ie}}$, $i_o = \frac{v_o}{10}$

$$\Rightarrow v_i = 20v_o + \frac{200h_{fe}v_i}{h_{ie}} + v_o \Rightarrow 21v_o = \left(1 - \frac{200h_{fe}}{h_{ie}}\right) v_i \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx -579$$

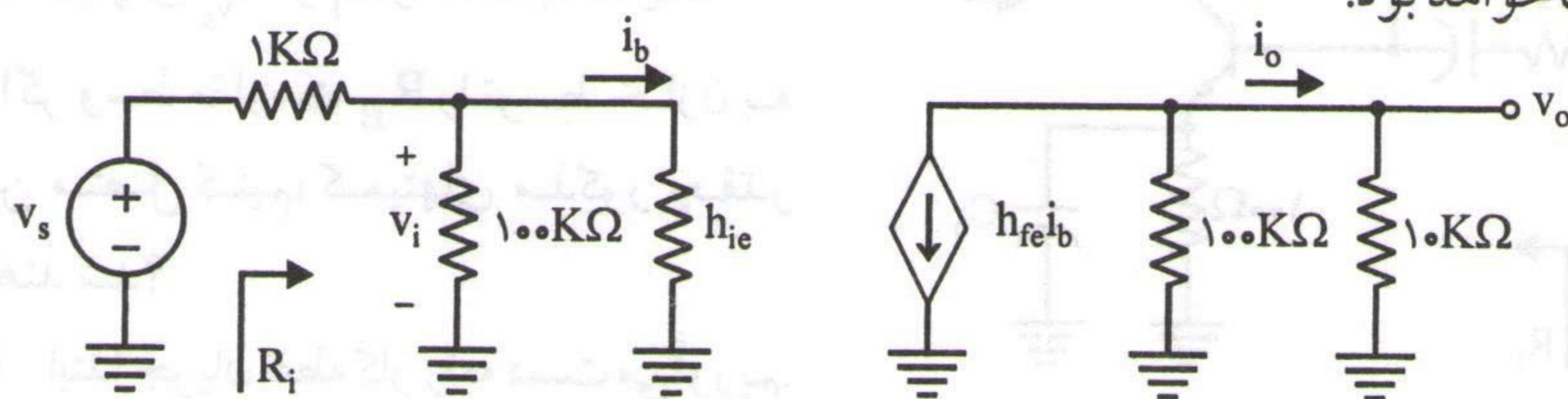
محاسبه R_i : $KVL: v_i = 200(i_i - i_b) + v_o$, $i_b = \frac{v_i}{h_{ie}}$, $v_o = A_v v_i$

$$\Rightarrow v_i = 200\left(i_i - \frac{v_i}{h_{ie}}\right) + A_v v_i \Rightarrow v_i \left(1 + \frac{200}{h_{ie}} - A_v\right) = 200i_i \Rightarrow R_i = \frac{v_i}{i_i} \approx 285\Omega$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v = -128.4$$

محاسبه A_v و R_i را نیز می‌توان با اعمال قضیه میلر به مقاومت $200K\Omega$ انجام داد.

ب) در صورتی که وسط مقاومت R_B با یک خازن به زمین متصل شود مدار معادل سیگنال کوچک به صورت شکل ۵-۵۳ خواهد بود.

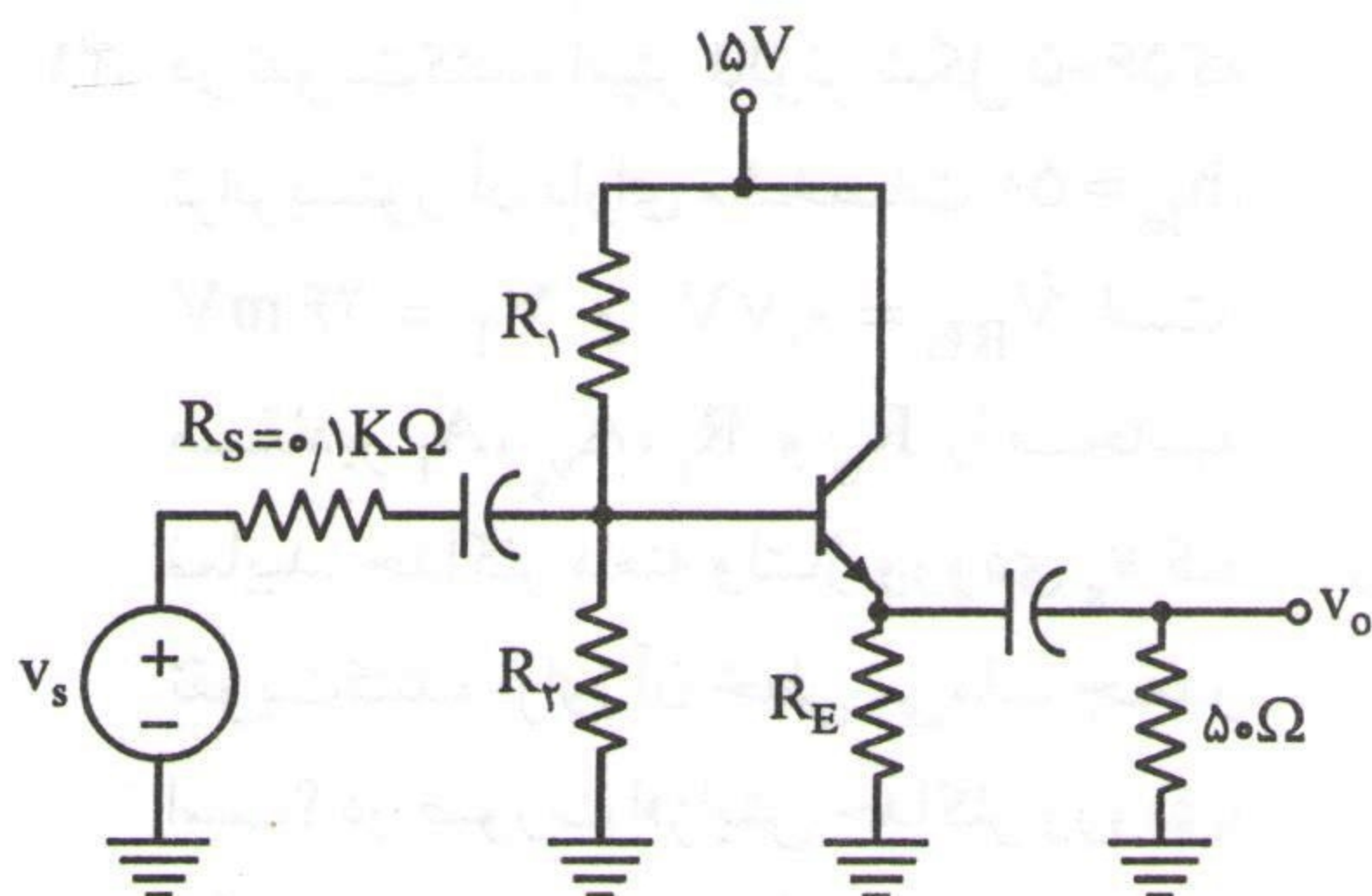


شکل ۵-۵۳

$$R_i = h_{ie} \parallel 100 = 162K\Omega$$

$$v_o = 10i_o = 10 \cdot \frac{-h_{fe} i_b}{100 + 10} = -9.9i_b$$
 , $i_b = \frac{v_i}{h_{ie}} \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = -552.6$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_v = -341.7$$



شکل ۵-۵۴

۲۰. تقویت کننده امیتر فالوئر شکل ۵-۵۴ را به گونه ای طراحی کنید که بهره ولتاژ بزرگ تر یا مساوی ۰/۹ بوده و حداکثر دامنه نوسان متقارن ورودی بدون اعوجاج در خروجی برابر ۴ ولت باشد. ترانزیستور دارای $V_{CE(sat)} = 0.2V$ ، $100 \leq h_{fe} \leq 200$ و $V_{BE} = 0.7V$ است.

حل: برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن در خروجی، نقطه کار را وسط خط بار ac در نظر می گیریم یعنی،

$$V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} R_{ac}, \quad R_{DC} = R_E, \quad R_{ac} = R_E \parallel 50$$

از آنجا که بهره ولتاژ نزدیک به یک می باشد، چنانچه دامنه نوسان ورودی ۴ ولت باشد، دامنه نوسان خروجی نیز تقریباً ۴ ولت است. بنابراین نقطه کار باید به گونه ای انتخاب شود که با در نظر گرفتن حداکثر دامنه نوسان، ترانزیستور وارد ناحیه اشباع نگردد.

$$V_{CEQ} \geq v_{ce,max} + V_{CE(sat)} = 4.2V$$

$$\Rightarrow \frac{15}{(R_E \parallel 50) + R_E} (R_E \parallel 50) \geq 4.2V \Rightarrow R_E \leq 78.5\Omega \Rightarrow R_E = 50\Omega$$

به همین ترتیب جریان نقطه کار را از رابطه زیر به دست می آوریم:

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = 200mA$$

$$R_{Th} = \frac{1}{\beta_{min}} R_E = 0.5K\Omega, \quad V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E = 11.3V$$

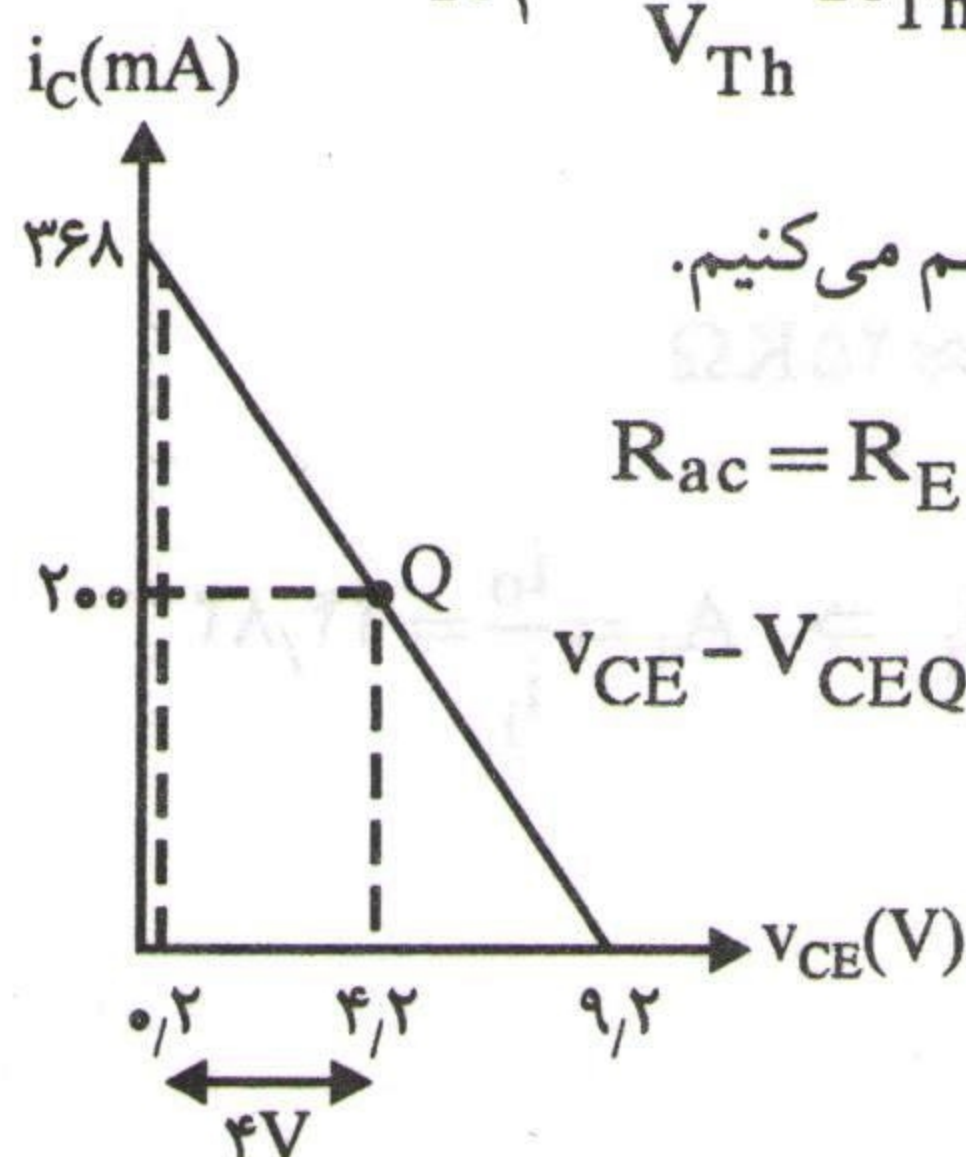
$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 0.66K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 2.1K\Omega$$

برای اطمینان از طراحی، خط بار ac را به دست آورده و در شکل ۵-۵۶ رسم می کنیم.

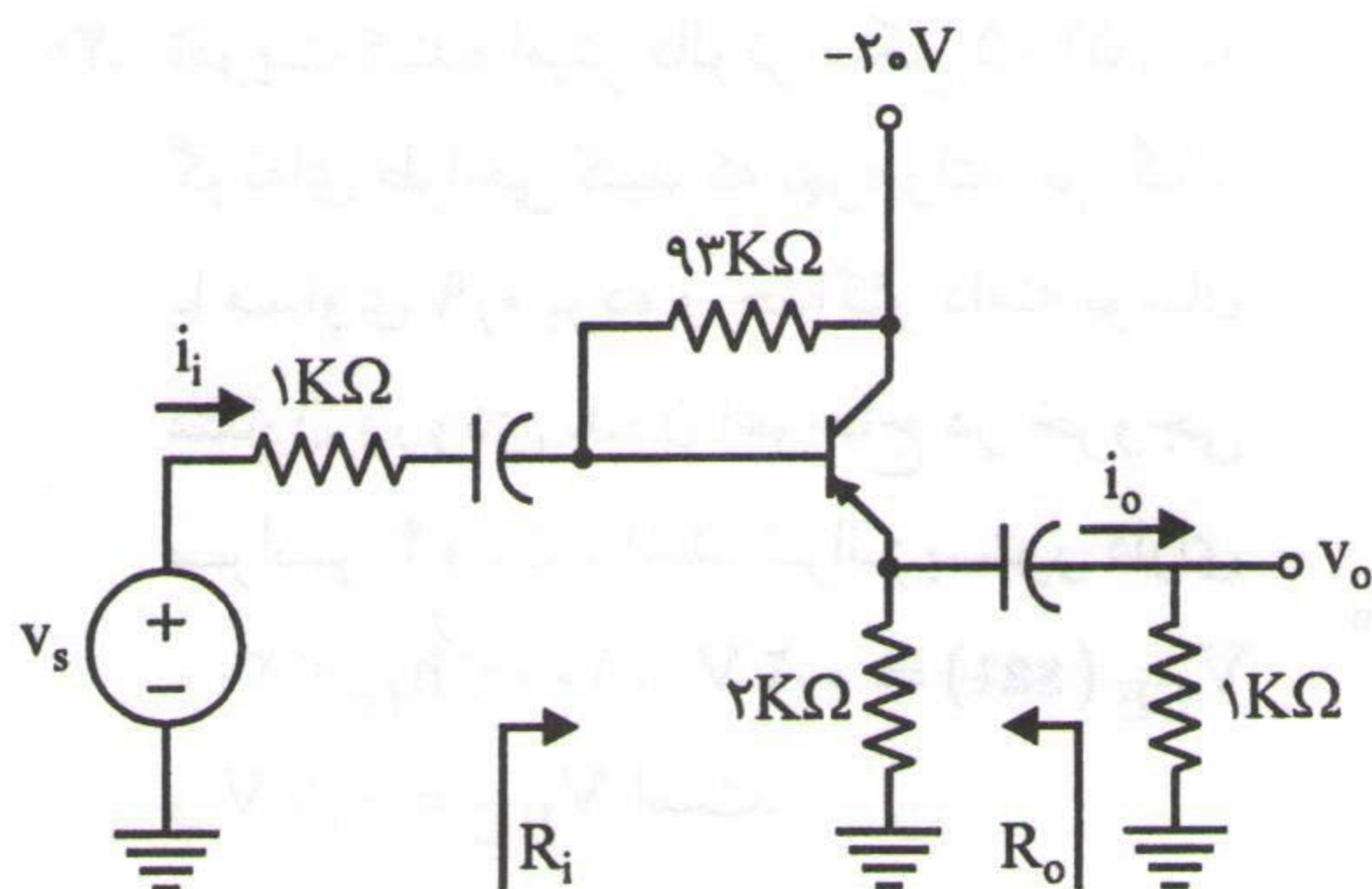
$$R_{ac} = R_E \parallel R_L = 25 \times 10^{-3}K\Omega, \quad Q(200mA, 4.2V)$$

$$v_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac}(i_C - I_{CQ}) \Rightarrow v_{CE} = -0.025i_C + 4.2$$

با توجه به شکل ۵-۵۵ دامنه نوسان متقارن خروجی می تواند تا ۴ ولت افزایش داشته باشد.



شکل ۵-۵۵



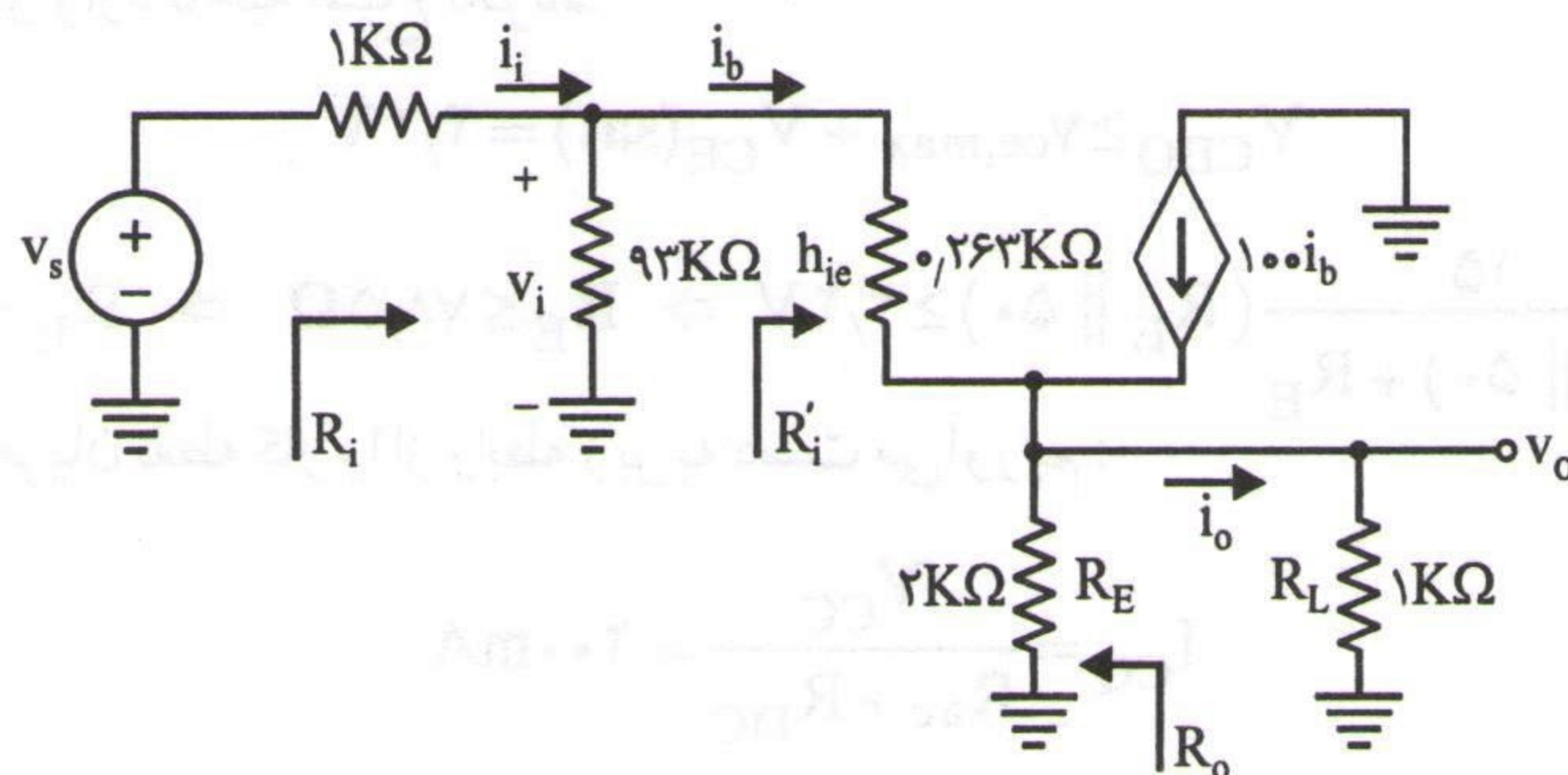
شکل ۵-۵۶

۲۱. در تقویت کننده امیتر فالوئر شکل ۵-۵۶ که ترانزیستور آن دارای مشخصات $h_{fe} = 50$ ، $V_{BE} = 0.7V$ و $V_T = 26mV$ است؛ مقادیر R_o ، R_i ، A_{v_s} ، A_i را محاسبه نمایید. حداکثر دامنه ولتاژ ورودی v_s که تقویت کننده برای آن خطی می ماند چقدر است؟ در صورت افزایش حداکثر ورودی، شکل موج خروجی از بالا زودتر برش داده می شود یا از پایین؟ توضیح دهید.

حل: با نوشتن KVL از منبع تا مقاومت امیتر، جریان نقطه کار را به دست می آوریم.

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + R_B / (1 + h_{fe})} \approx 5mA, \quad I_C = 4.95mA, \quad h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 0.263K\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۵۷ رسم شده است.



شکل ۵-۵۷

محاسبه R_i :

$$KVL: v_i = h_{ie} i_b + (R_L \parallel R_E)(1 + h_{fe}) i_b$$

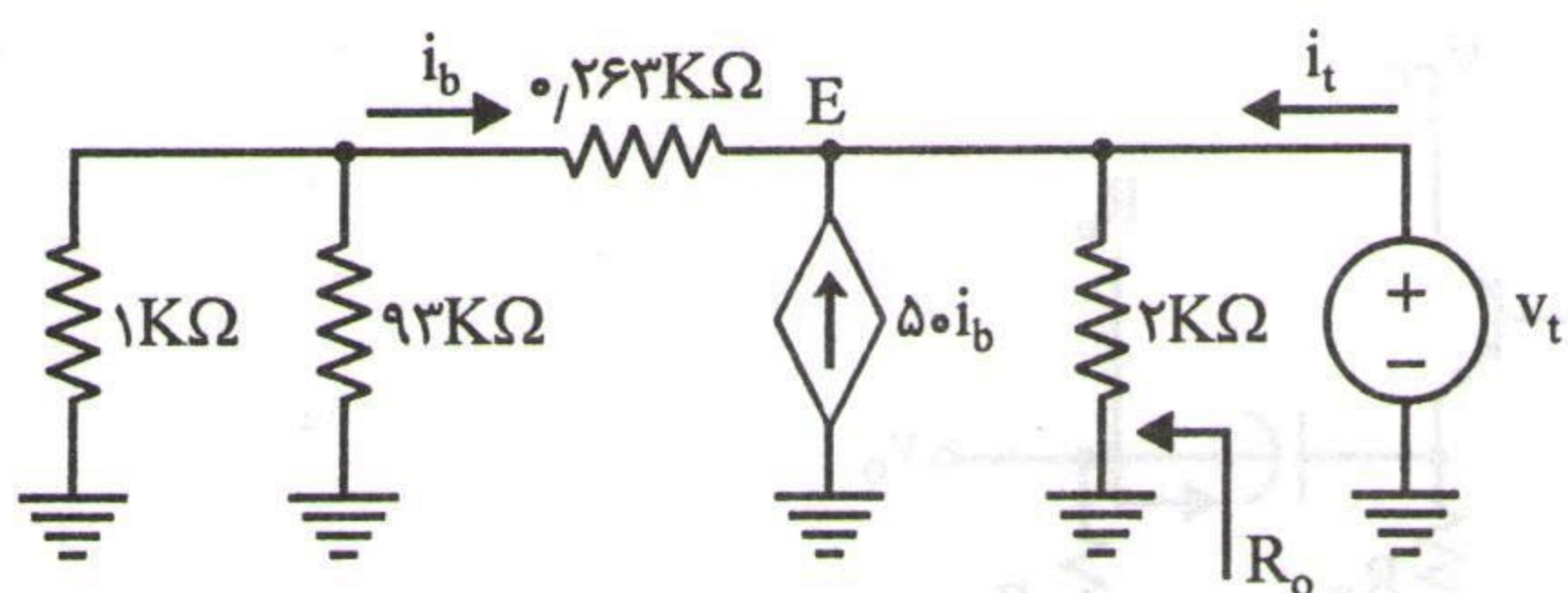
$$= [h_{ie} + (R_L \parallel R_E)(1 + h_{fe})] i_b$$

$$\Rightarrow R_i' = \frac{v_i}{i_b} = 34.263K\Omega, \quad R_i = R_i' \parallel 93 \approx 25K\Omega$$

$$i_o = (1 + h_{fe}) i_b \frac{R_E}{R_E + R_L} = 34 i_b = 34 i_i \frac{R_B}{R_B + R_i} = 0.73 i_i \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = 24.82$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_L i_o}{R_i i_i} = \frac{1}{25} A_i = 0.992$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v = 0.954$$



مدار محاسبه R_o با حذف منبع سیگنال و قرار دادن منبع آزمایش v_t در خروجی به صورت شکل ۵-۵۸ خواهد بود. در این مدار داریم

شکل ۵-۵۸

$$\text{KCLE: } 50i_b + i_b + i_t = \frac{v_t}{2} \Rightarrow 51i_b + i_t = \frac{v_t}{2}$$

$$\text{KVL: } [1 \parallel 93]i_b + 0.263i_b + v_t = 0 \Rightarrow i_b = -0.798v_t$$

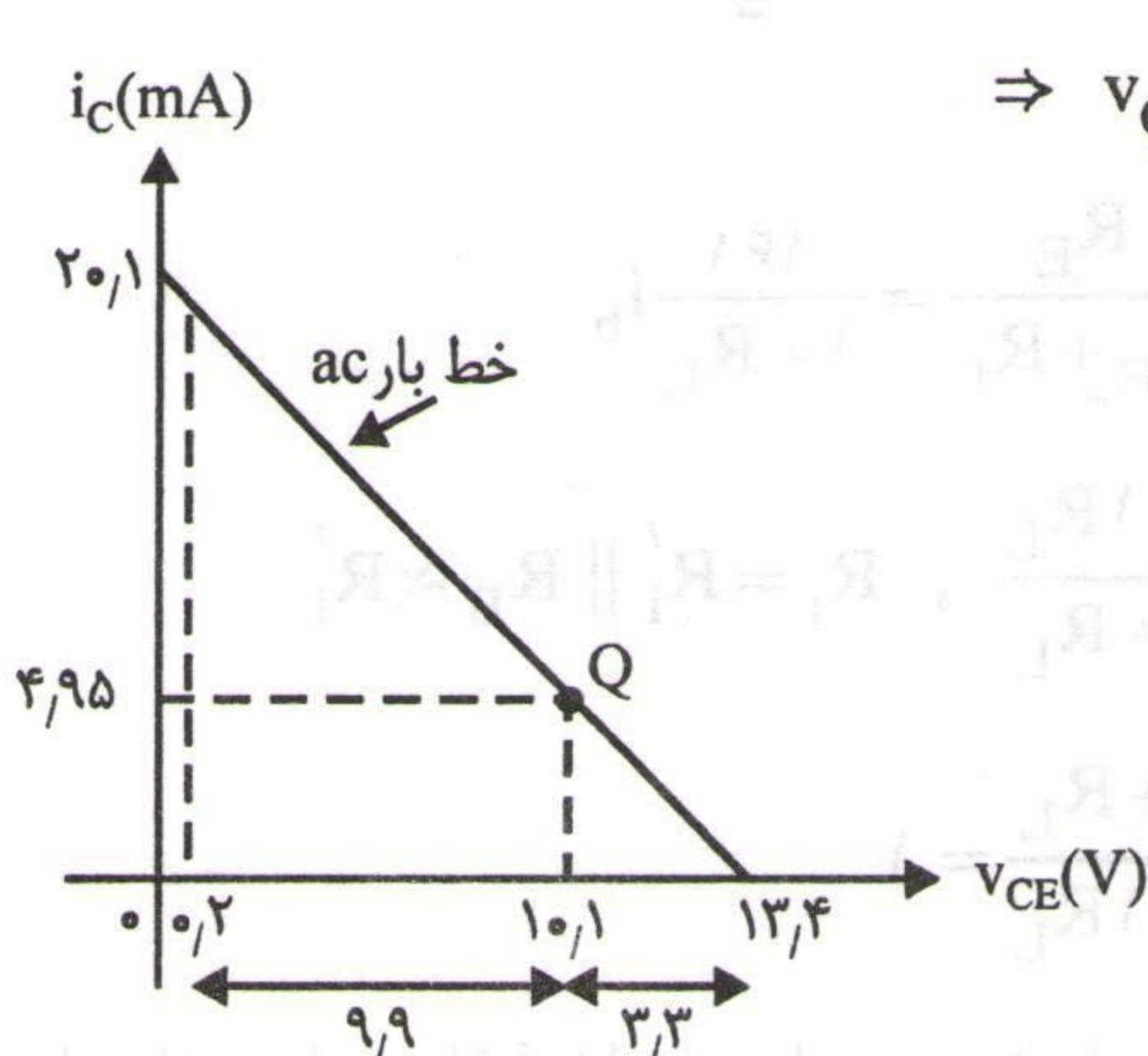
$$\Rightarrow 51(-0.798v_t) + i_t = \frac{v_t}{2} \Rightarrow R_o = \frac{v_t}{i_t} = 24.3\Omega$$

ولتاژ نقطه کار برابر است با

$$V_{CEQ} = V_{CC} - 2I_E = 10.1V$$

خط بار ac عبارت است از

$$v_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac}(i_C - I_{CQ}), \quad R_{ac} = 2 \parallel 1 = \frac{2}{3}K\Omega$$



شکل ۵-۵۹

$$\Rightarrow v_{CE} = -\frac{2}{3}i_C + 13.4$$

با توجه به معادله خط بار ac که در شکل ۵-۵۹ رسم شده است، داریم

$$v_{ce,max}^+ = 3.3V, \quad v_{ce,max}^- = 9.9V$$

از آنجا که $v_o = -v_{ce}$ است، حداکثر دامنه نوسان ولتاژ خروجی از سمت پایین برابر ۳/۳ ولت و از سمت بالا برابر ۹/۹ ولت خواهد بود. پس ولتاژ خروجی از سمت پایین زودتر برش می خورد. بنابراین حداکثر دامنه ولتاژ ورودی v_s برابر است با

$$v_{s,max} = \frac{v_{o,max}^-}{A_{v_s}} = \frac{3.3}{0.954} \approx 3.46V$$

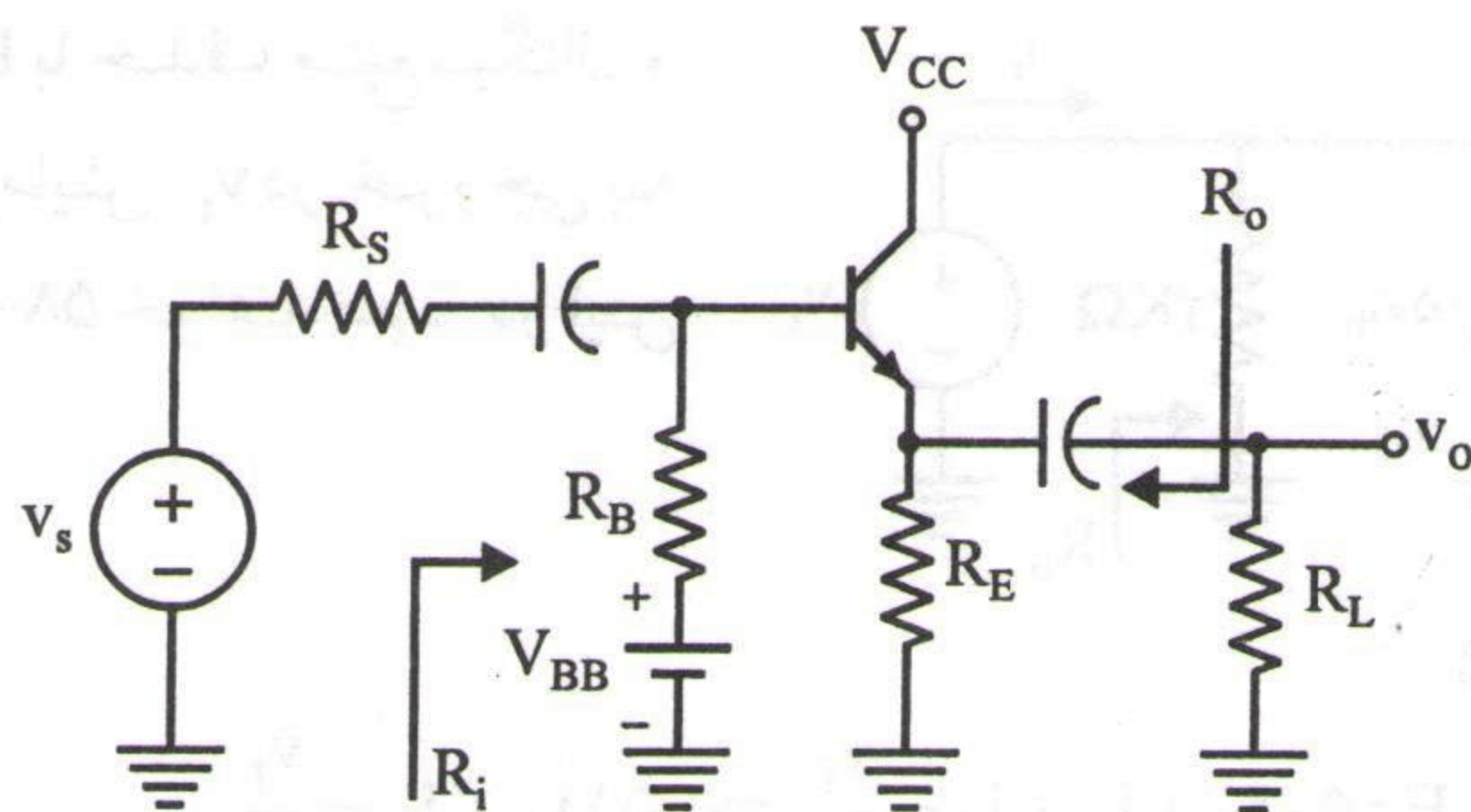
۲۲. برای مدار شکل ۵-۶۰، با فرض $R_E = 1K\Omega$, $h_{fe} = 160$, $h_{ie} \approx 0$ و $R_B \rightarrow \infty$ مطلوب است:

(الف) رسم تغییرات A_v بر حسب R_S ($0 < R_S < \infty$ و $R_L = 1K\Omega$).

(ب) رسم تغییرات A_v بر حسب R_L ($0 < R_L < \infty$ و $R_S = 1K\Omega$).

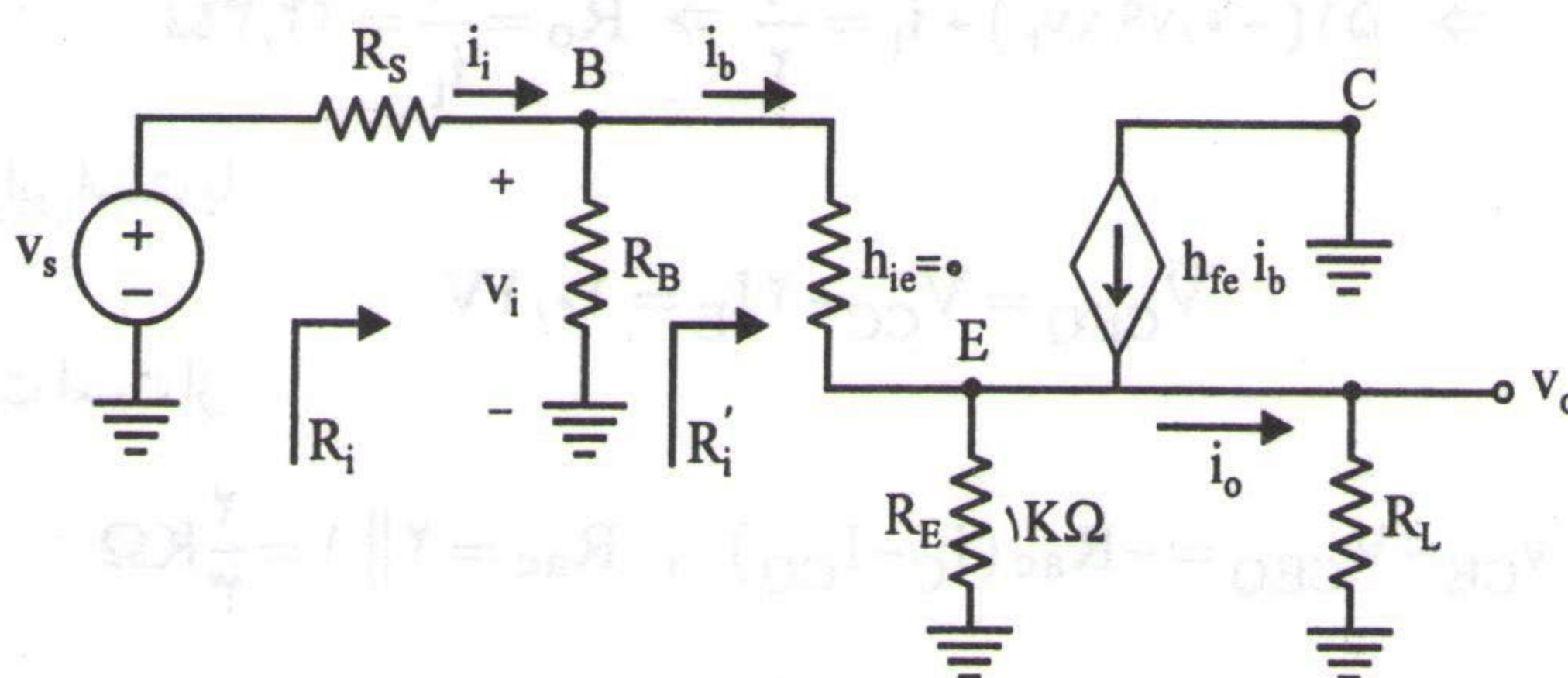
(ج) رسم تغییرات R_i بر حسب R_L ($0 < R_L < \infty$).

(د) رسم تغییرات R_o بر حسب R_S ($0 < R_S < \infty$).



شکل ۵-۶۰

حل: مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۶۱ آمده است.



شکل ۵-۶۱

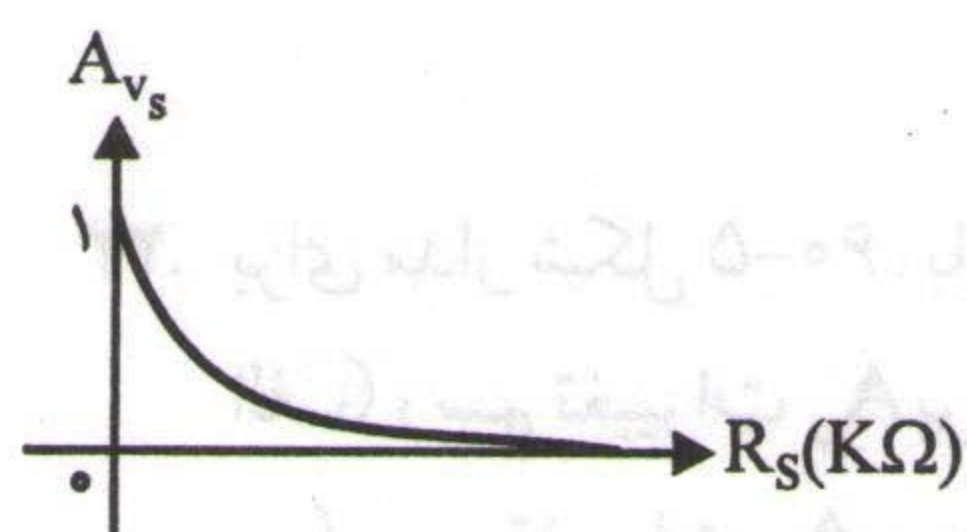
$$v_o = R_L i_o, \quad i_o = (1 + h_{fe}) i_b \frac{R_E}{R_E + R_L} = \frac{161}{1 + R_L} i_b$$

$$i_b = \frac{v_i}{R_i}, \quad R_i' = (1 + h_{fe})(R_E \parallel R_L) = \frac{161 R_L}{1 + R_L}, \quad R_i = R_i' \parallel R_B \approx R_i'$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{161 R_L}{1 + R_L} \times \frac{1 + R_L}{161 R_L} = 1$$

این نتیجه از همان ابتدا هم معلوم بود، زیرا هرگاه $h_{ie} = 0$ باشد خروجی v_o برابر ورودی v_i خواهد بود و $A_v = 1$ حاصل می‌شود.

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_v = \frac{161 R_L}{R_s + R_s R_L + 161 R_L}$$

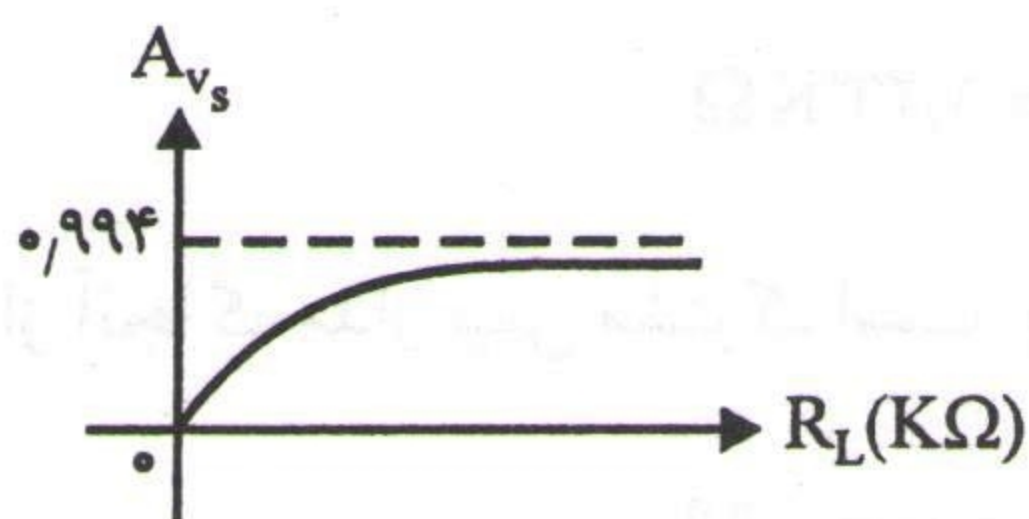


الف) با فرض $R_L = 1K\Omega$ مقدار A_{v_s} برابر است با

$$A_{v_s} = \frac{161}{2R_s + 161}$$

شکل ۵-۶۲

منحنی تغییرات A_{v_s} در شکل ۵-۶۲ رسم شده است.



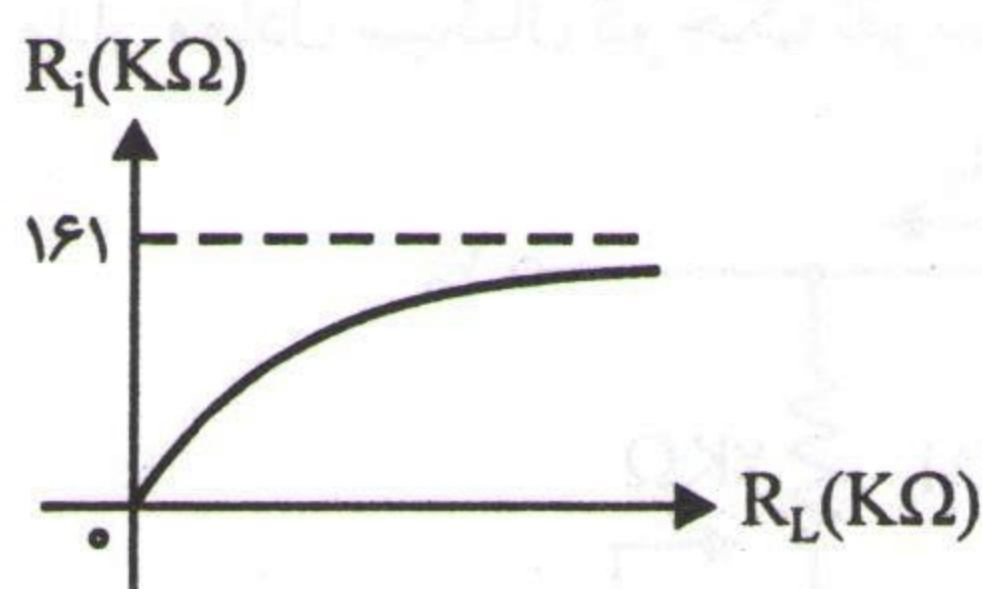
شکل ۶۳-۵

ب) با فرض $R_S = 1\text{K}\Omega$ مقدار A_{v_s} برابر است با

$$A_{v_s} = \frac{161 R_L}{162 R_L + 1}$$

منحنی تغییرات A_{v_s} در شکل ۶۳-۵ رسم شده است.

ج)



شکل ۶۴-۵

$$R_i = R_i' \parallel R_B \approx R_i' = \frac{161 R_L}{1 + R_L}$$

منحنی تغییرات R_i در شکل ۶۴-۵ رسم شده است.

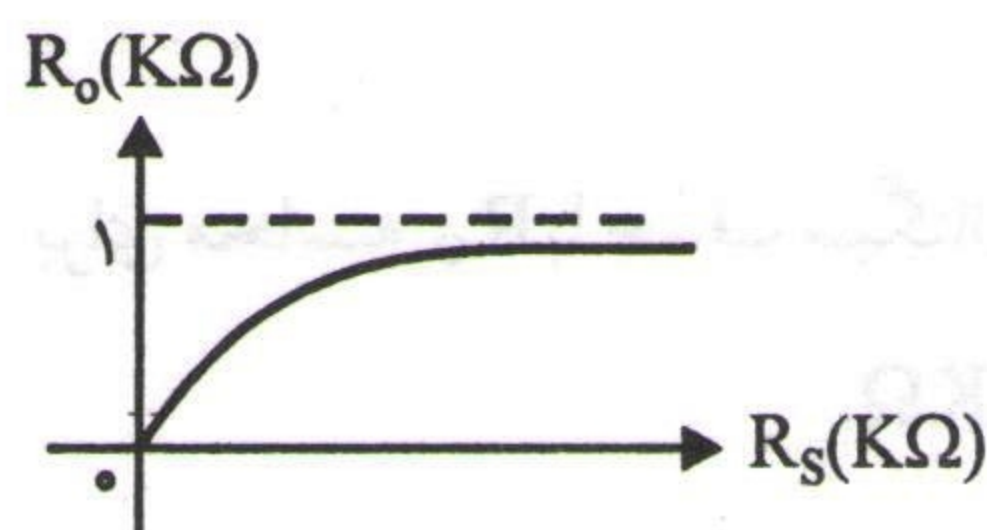
د) برای محاسبه R_o ، منبع آزمایشی v_t را در خروجی قرار داده و ورودی v_s را صفر می‌کنیم. در این شرایط با نوشتن KCL در امیتر داریم

$$i_t + h_{fe} i_b + i_b = \frac{v_t}{R_E}, \quad i_b = \frac{-v_t}{R_S \parallel R_B} \approx \frac{-v_t}{R_S}$$

$$\Rightarrow i_t = \frac{v_t}{R_E} + (1 + h_{fe}) \frac{v_t}{R_S} \Rightarrow R_o = \frac{v_t}{i_t} = \frac{R_S R_E}{R_S + (1 + h_{fe}) R_E}$$

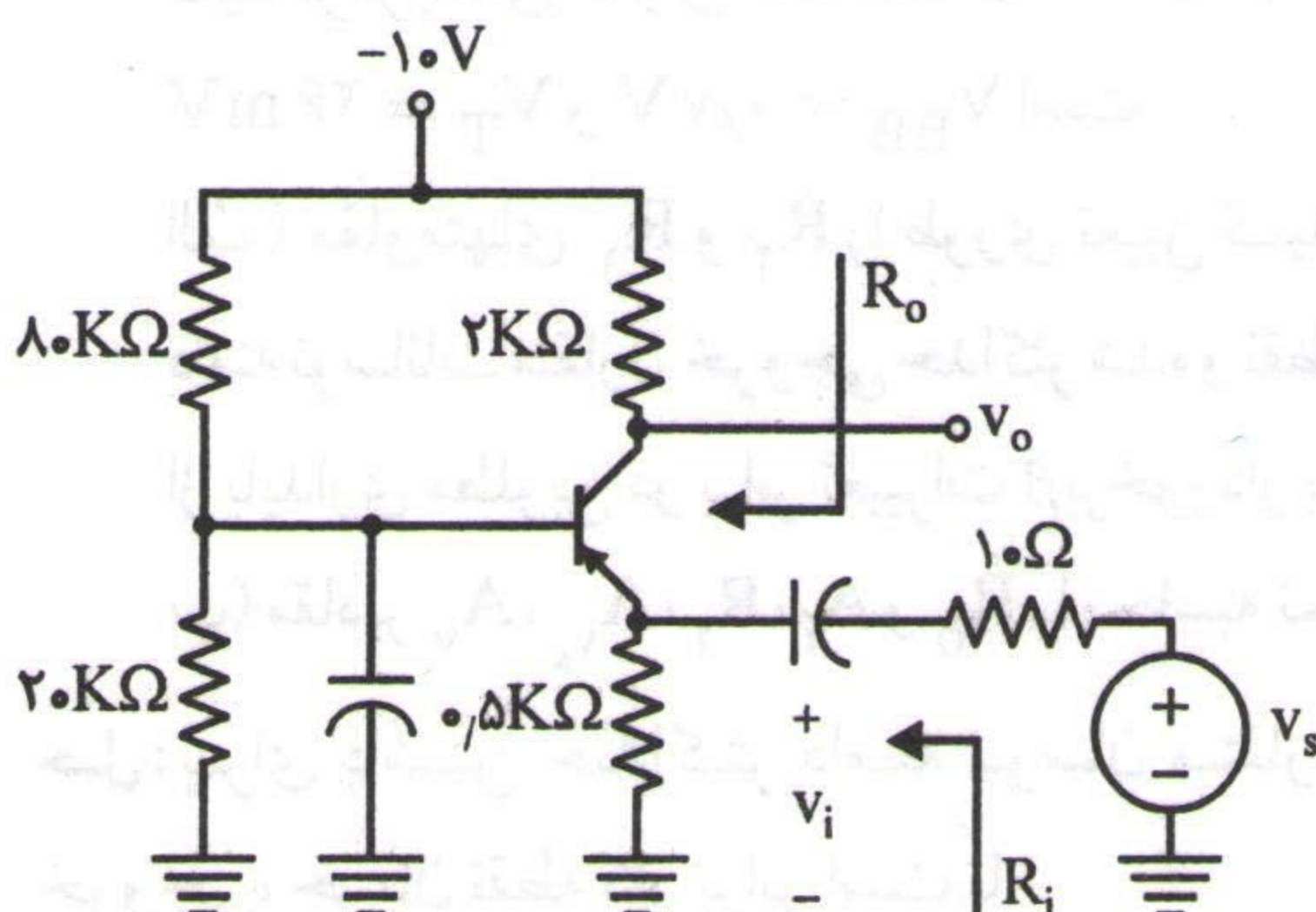
با جایگزینی مقادیر R_E و h_{fe} داریم

$$R_o = \frac{R_S}{R_S + 161}$$



شکل ۶۵-۵

منحنی تغییرات R_o در شکل ۶۵-۵ رسم شده است.



شکل ۶۶-۵

۲۳. در تقویت‌کننده بیس مشترک شکل ۶۶-۵ با

فرض $h_{fe} = 100$ مقادیر A_{v_s} ، A_v ، R_i ،

A_i و R_o را محاسبه کنید ($V_T = 26\text{mV}$ و

$V_{EB} = 0.7\text{V}$).

حل: با قرار دادن معادل تونن بیس، نقطه کار ترانزیستور را به دست می‌آوریم.

$$R_{Th} = 20 \parallel 80 = 16\text{K}\Omega$$

$$V_{Th} = \frac{-10}{20 + 80} \times 20 = -2\text{V}$$

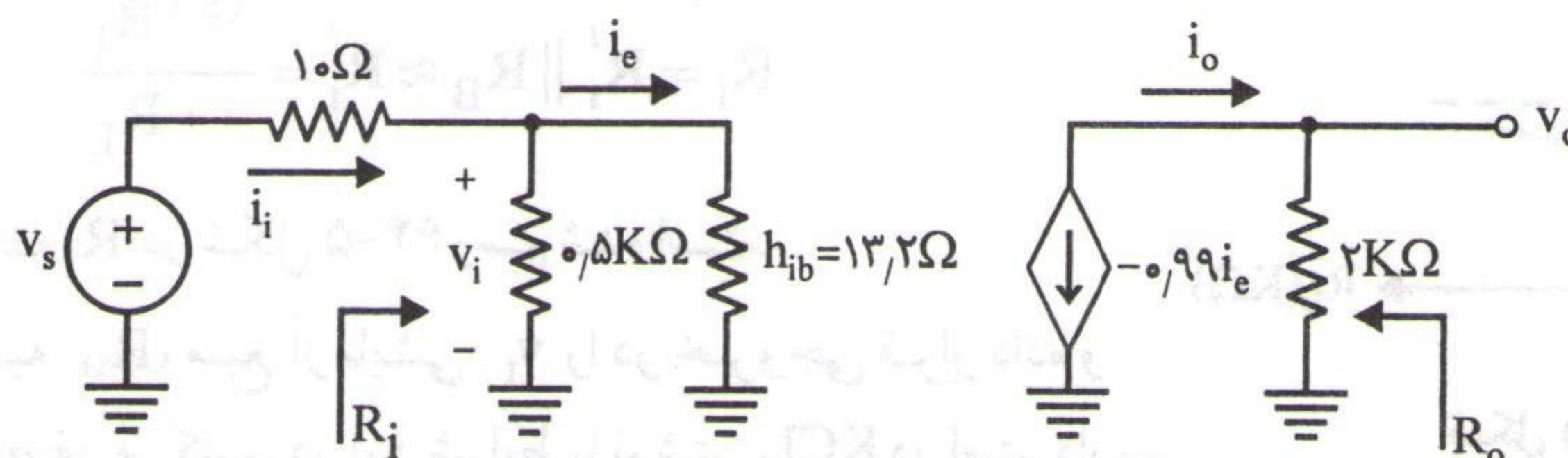
$$I_E = \frac{-V_{Th} - V_{EB}}{R_E + R_{Th} / (1 + h_{fe})} = 1.97\text{mA}$$

$$I_C = \alpha I_E = 1.95 \text{ mA}, \quad h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 1.33 \text{ K}\Omega$$

از آنجا که مدار بیس مشترک است، پارامترهای مدل هیبرید بیس مشترک ترانزیستور را به دست می‌آوریم.

$$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} = 13.2 \Omega, \quad h_{fb} = -\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} = -0.99$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۶۷ می‌باشد.



شکل ۵-۶۷

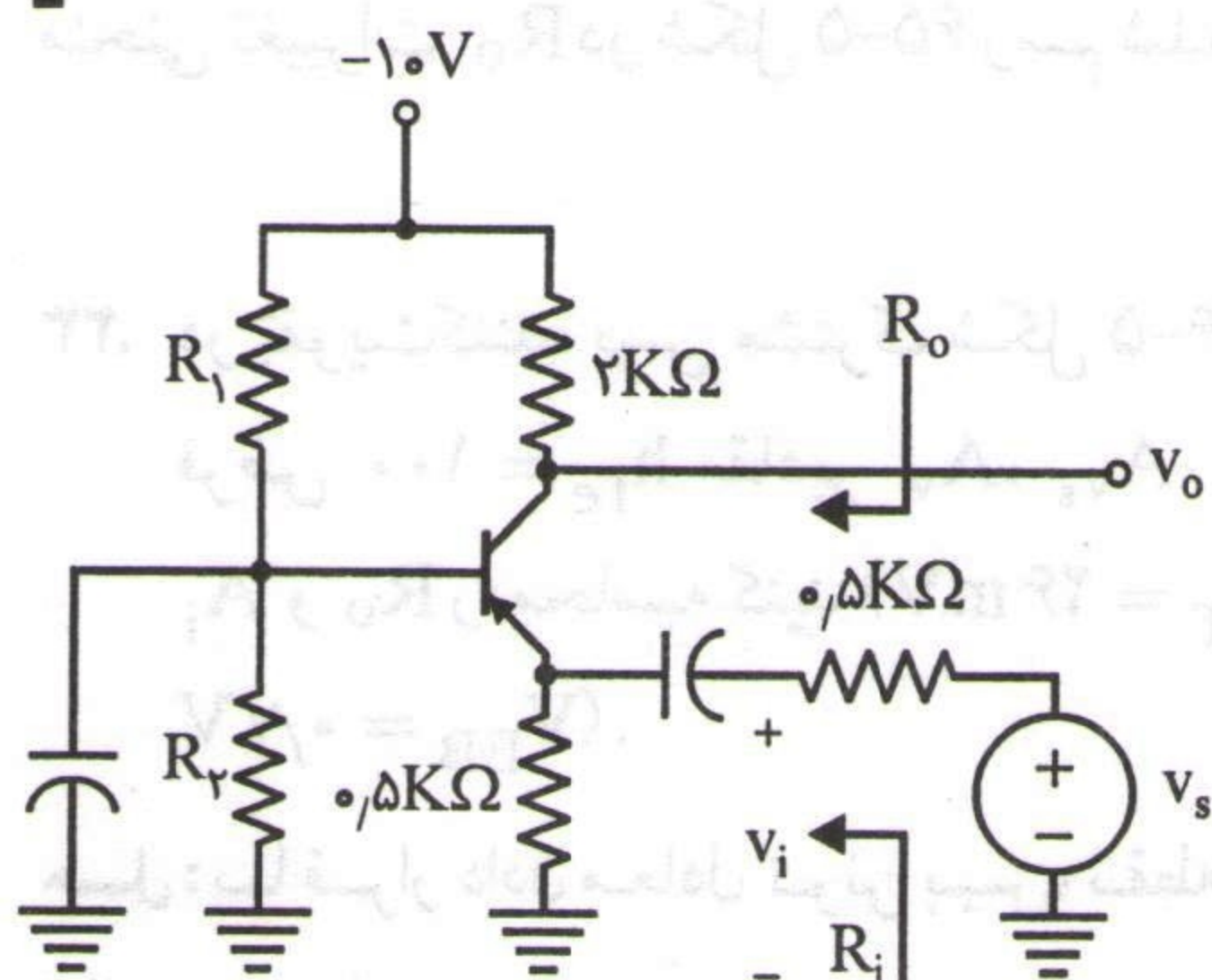
$$v_o = 0.99 i_e \times 2 = 1.98 i_e, \quad i_e = \frac{v_i}{h_{ib}} = 75.75 v_i \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = 150$$

$$R_i = 500 \parallel 13.2 = 12.86 \Omega, \quad A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v \approx 84.4$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o/2}{v_i/R_i} = \frac{R_i}{2} A_v \approx 0.965$$

برای محاسبه R_o با حذف سیگنال ورودی داریم

$$\text{اگر } v_s = 0 \Rightarrow i_e = 0, \quad R_o = 2 \text{ K}\Omega$$



شکل ۵-۶۸

۲۴. تقویت کننده شکل ۵-۶۸ را در نظر بگیرید. فرض

کنید ترانزیستور دارای مشخصات $50 < \beta < 100$,

$V_{EB} = 0.7 \text{ V}$ و $V_T = 26 \text{ mV}$ است.

الف) مقاومت‌های R_1 و R_2 را طوری تعیین کنید که

دامنه نوسانات متقارن خروجی حداکثر شده و نقطه کار

از پایداری مطلوبی در برابر تغییرات β برخوردار باشد.

ب) مقادیر A_v , A_{v_s} , R_i , A_i و R_o را محاسبه نمایید.

حل: برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن در

خروجی، جریان نقطه کار برابر است با

$$I_{CQ} = \frac{|V_{CC}| - |V_{EB}|}{R_{DC} + R_{ac}} = \frac{10 - 0.7}{(2 + 0.5) + 2} \approx 2.1 \text{ mA}$$

برای داشتن پایداری نقطه کار نسبت به تغییرات β ، مقاومت تونن بیس برابر است با

$$R_{Th} = 0.1 \beta_{min} R_E = 2.5 K\Omega$$

از KVL در مدار بیس - امیتر داریم

$$\beta_{av} = 75, \quad V_{Th} = -R_{Th} \left(\frac{I_C}{\beta_{av}} \right) - V_{EB} - 0.5 I_E \approx -1.82 V$$

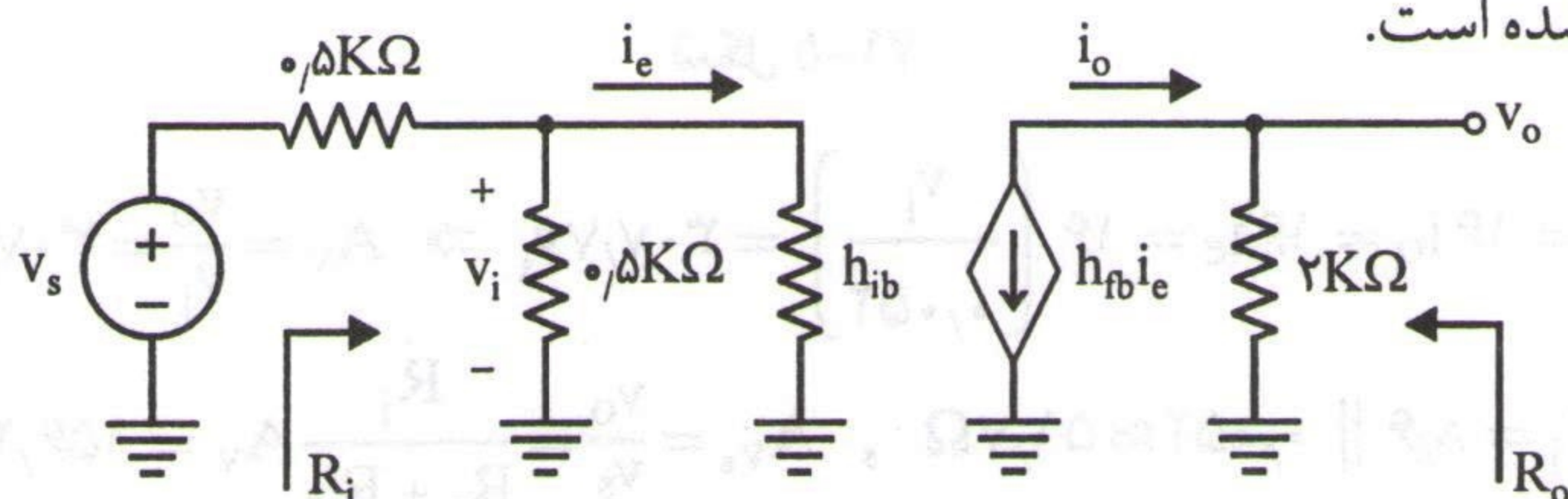
بنابراین مقاومتهای R_1 و R_2 برابرند با

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 13.7 K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 3.1 K\Omega$$

$$h_{ie} = \beta_{av} \frac{V_T}{I_C} = 0.93 K\Omega \Rightarrow h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1 + \beta_{av}} = 12.2 \Omega, \quad h_{fb} = \frac{-\beta_{av}}{1 + \beta_{av}} \approx -0.99$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده با استفاده از مدل تقریبی هیبرید بیس مشترک ترانزیستور، در شکل

۵-۶۹ نشان داده شده است.



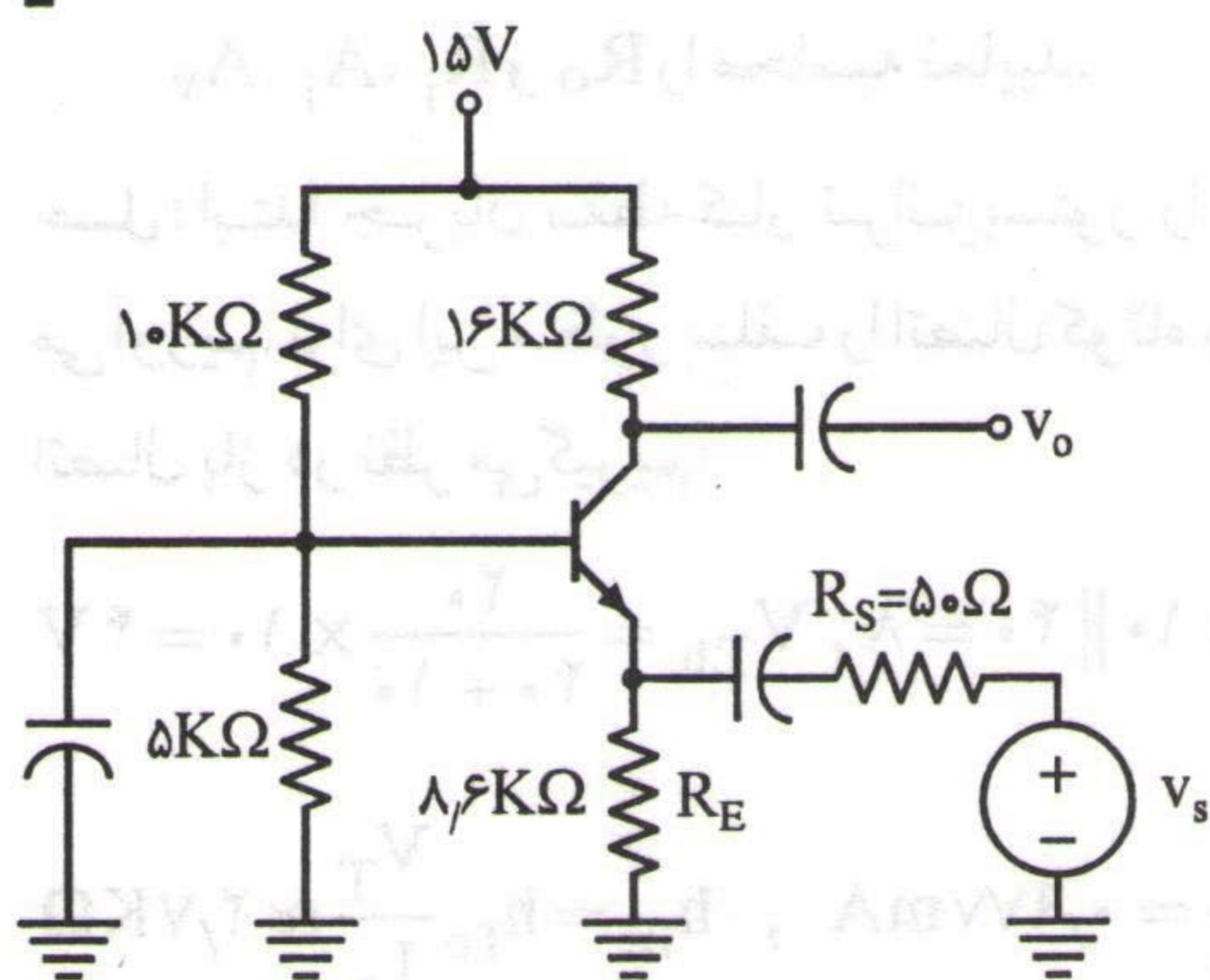
شکل ۵-۶۹

$$R_i = 0.5 \parallel h_{ib} = 11.9 \Omega$$

$$v_o = -h_{fb} i_e \times 2, \quad i_e = \frac{v_i}{h_{ib}} \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = 162.3$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v \approx 3.78, \quad A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / R_L}{v_i / R_i} = \frac{R_i}{R_L} A_v \approx 0.97$$

$$\text{اگر } v_s = 0 \Rightarrow i_e = 0, \quad R_o = 2 K\Omega$$



شکل ۵-۷۰

۲۵. در تقویت کننده بیس مشترک شکل ۵-۷۰ با فرض

h_{fe} بزرگ، مشخصه های تقویت کننده را به دست

آورد ($V_{BE} = 0.7 V$ و $V_T = 26 mV$).

حل: جهت تحلیل DC مدار، خازن ها را اتصال باز در

نظر گرفته و با فرض h_{fe} بزرگ از جریان بیس

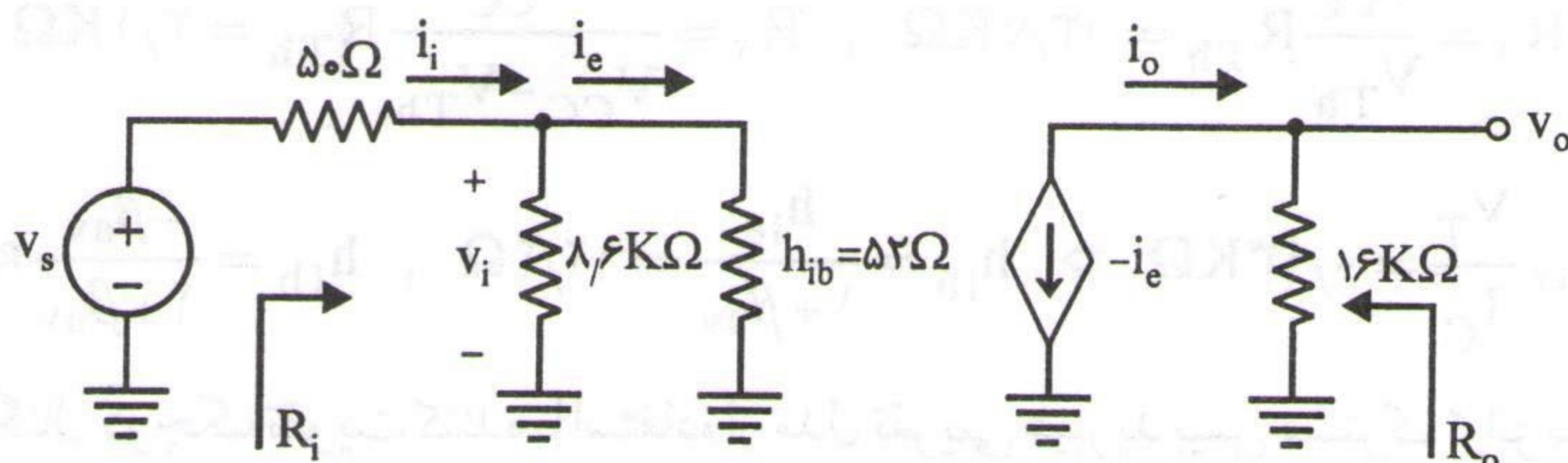
صرف نظر می کنیم؛ بنابراین

$$V_{Th} = \frac{15}{10 + 5} \times 5 = 5 V$$

$$I_E = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_E} = 0.5 \text{ mA}, \quad h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 0.52 h_{fe}$$

$$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} = \lim_{h_{fe} \rightarrow \infty} \frac{0.52 h_{fe}}{1 + h_{fe}} = 0.52 \text{ K}\Omega, \quad h_{fb} = \lim_{h_{fe} \rightarrow \infty} \frac{-h_{fe}}{1 + h_{fe}} = -1$$

مدل سیگنال کوچک با استفاده از مدار معادل تقریبی هیبرید بیس مشترک ترانزیستور به صورت شکل ۵-۷۱ خواهد بود.



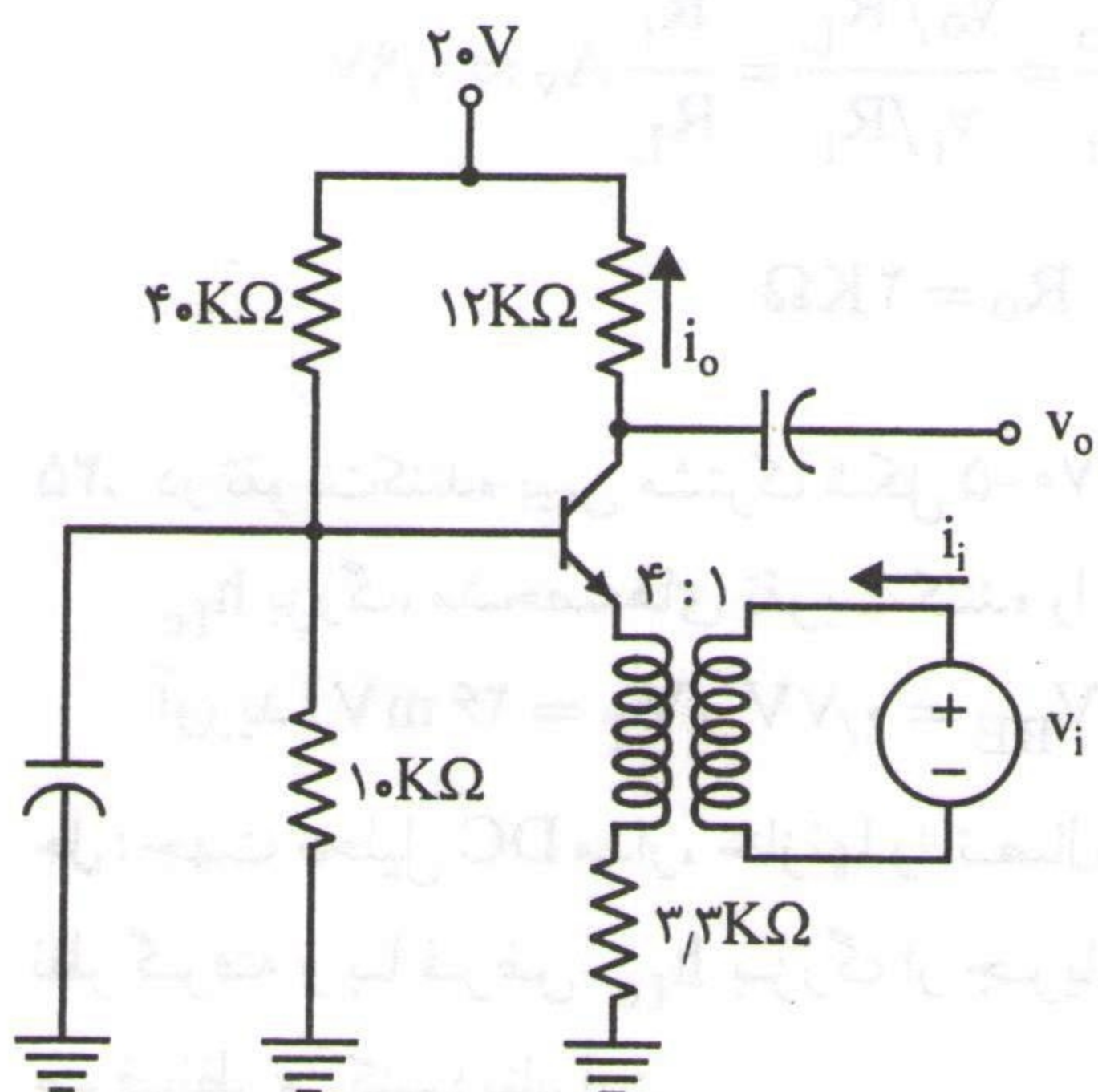
شکل ۵-۷۱

$$v_o = 16 i_o = 16 i_e = 16 \left(\frac{v_i}{0.52} \right) = 30.77 v_i \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = 30.77$$

$$R_i = 1.6 \parallel 0.52 \approx 0.417 \text{ K}\Omega, \quad A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v = 156.4$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / 16}{v_i / R_i} = \frac{R_i}{16} A_v = 0.994$$

با حذف منبع سیگنال ورودی مقدار R_o برابر ۱۶ کیلو اهم به دست می‌آید. مشاهده می‌شود همان‌طور که انتظار می‌رود بهره جریان نزدیک به واحد، بهره ولتاژ بزرگ و R_i کوچک و R_o بزرگ به دست می‌آیند.



شکل ۵-۷۲

۲۶. در مدار تقویت کننده با کوپلاژ ترانسفورمری

شکل ۵-۷۲، ترانزیستور دارای $h_{fe} = 100$

$V_T = 26 \text{ mV}$ و $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ می‌باشد. مقادیر

A_v ، A_i و R_o را محاسبه نمایید.

حل: ابتدا جریان نقطه کار ترانزیستور را به دست

می‌آوریم. برای این منظور سلف را اتصال کوتاه و خازن را

اتصال باز در نظر می‌گیریم.

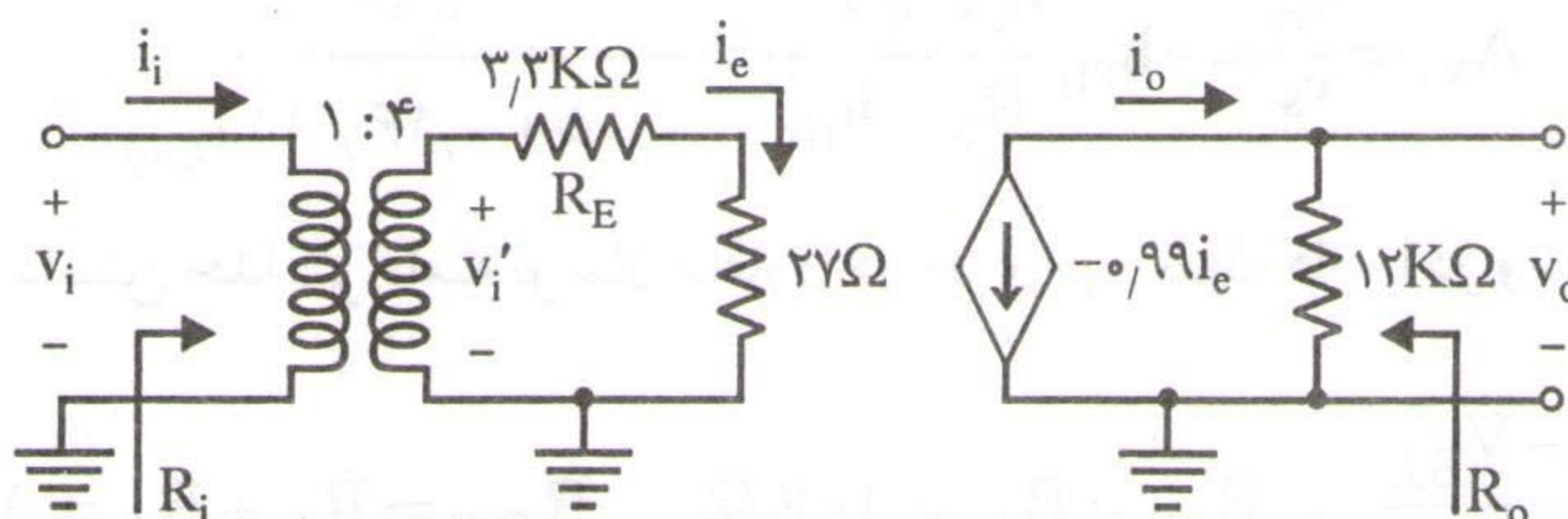
$$R_{Th} = 10 \parallel 40 = 8, \quad V_{Th} = \frac{20}{40 + 10} \times 10 = 4 \text{ V}$$

$$I_E = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_E + R_{Th} / (1 + h_{fe})} = 0.977 \text{ mA}, \quad h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} \approx 2.7 \text{ K}\Omega$$

از آنجا که تقویت کننده بیس مشترک می باشد، بهتر است که از پارامترهای بیس مشترک استفاده نمود.

$$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} \approx 27\Omega, \quad h_{fb} = -\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} = -0.99$$

با قرار دادن معادل تقریبی هیبرید ترانزیستور در مدار ac، مدار معادل سیگنال کوچک به صورت شکل ۷۳-۵ خواهد بود.



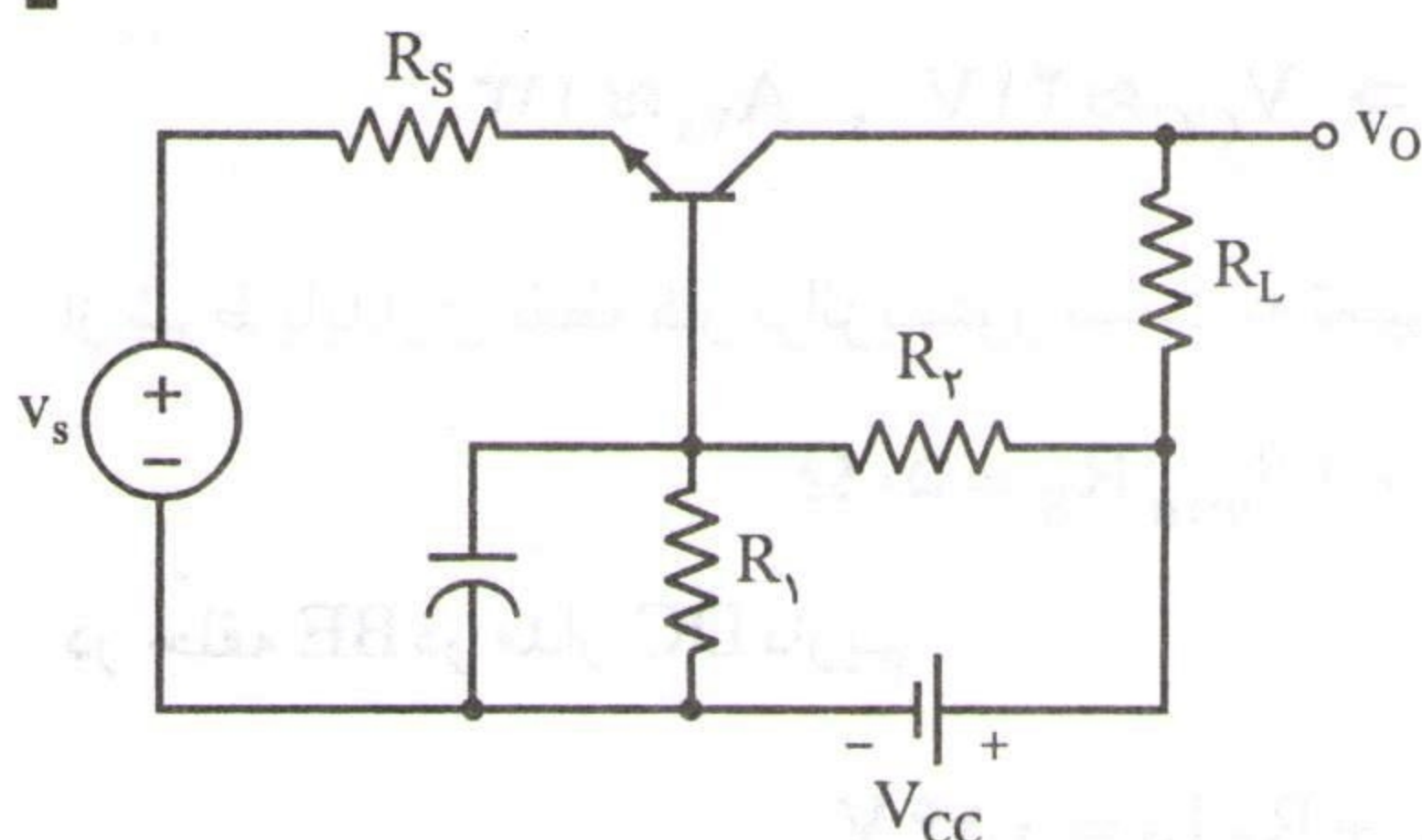
شکل ۷۳-۵

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_o}{i_e} \times \frac{i_e}{i_i} = 0.99 \times \frac{1}{4} = 0.247$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{v_i' / 4}{4 i_e} = \frac{1}{16} (3.3 + 0.27) = 208\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{12 i_o}{R_i i_i} = \frac{12}{0.208} A_i = 14.25$$

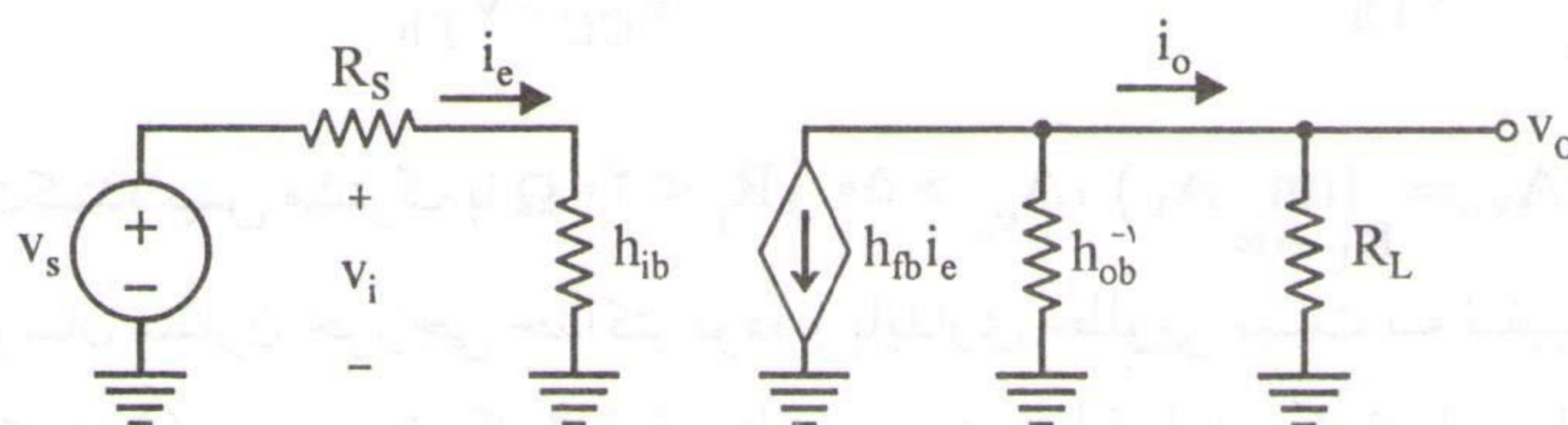
$$\text{اگر } v_i = 0 \Rightarrow i_e = 0 \Rightarrow R_o = 12K\Omega$$



شکل ۷۴-۵

۲۷. در مدار شکل ۷۴-۵، ترانزیستور دارای $h_{oe} = 10K\Omega$ ، $h_{re} = 0$ ، $h_{fe} = 100$ است. با فرض $R_S = 50\Omega$ و $R_L = 10K\Omega$ مقادیر R_1 ، R_2 و V_{CC} را چنان تعیین کنید که A_{v_s} حداکثر شود.

حل: مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده با استفاده از مدل هیبرید بیس مشترک ترانزیستور به صورت شکل ۷۵-۵ است.



شکل ۷۵-۵

$$h_{fb} = \frac{-h_{fe}}{1+h_{fe}} = -0.91, \quad h_{ob} = \frac{h_{oe}}{1+h_{fe}} = \frac{1}{110} \Rightarrow h_{ob}^{-1} = 110 \text{ K}\Omega$$

$$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} = \frac{h_{fe}}{1+h_{fe}} \frac{V_T}{I_{CQ}} = \frac{0.26}{11 I_{CQ}}$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = -h_{fb} \frac{h_{ob}^{-1} \parallel R_L}{R_s + h_{ib}} = \frac{8.34}{0.05 + 0.26/11 I_{CQ}}$$

از طرف دیگر برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن در خروجی، نقطه کار را در وسط خط بار ac انتخاب می‌کنیم. یعنی

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{ac} + R_{DC}}, \quad R_{ac} = R_L = 10 \text{ K}\Omega, \quad R_{DC} = R_L + R_s = 10.05 \text{ K}\Omega$$

$$\Rightarrow I_{CQ} = \frac{V_{CC} - 0.7}{20.05} \text{ mA}$$

در رابطه بهره ولتاژ ملاحظه می‌شود که A_{v_s} حداکثر می‌شود هرگاه h_{ib} حداقل شود. در بهترین شرایط اگر $h_{ib} = 0$ در نظر گرفته شود (یعنی $I_{CQ} = \infty$) برای A_{v_s} داریم

$$A_{v_s, \max} = 166.8$$

با توجه به اینکه A_{v_s} باید به حداکثر مقدار خود نزدیک باشد و همچنین برای منبع V_{CC} یک ولتاژ عملی حاصل شود، $I_{CQ} = 1 \text{ mA}$ در نظر گرفته می‌شود. در این صورت داریم

$$I_{CQ} = 1 \text{ mA} \Rightarrow \frac{V_{CC} - 0.7}{20.05} = 1 \Rightarrow V_{CC} \approx 21 \text{ V}, \quad A_{v_s} \approx 113$$

از شرط پایداری نقطه کار ترانزیستور نسبت به تغییرات β داریم

$$R_{Th} = 0.1 \beta_{\min} R_E = 0.1 \beta_{\min} R_s = 50 \Omega$$

در حلقه BE در مدار DC داریم

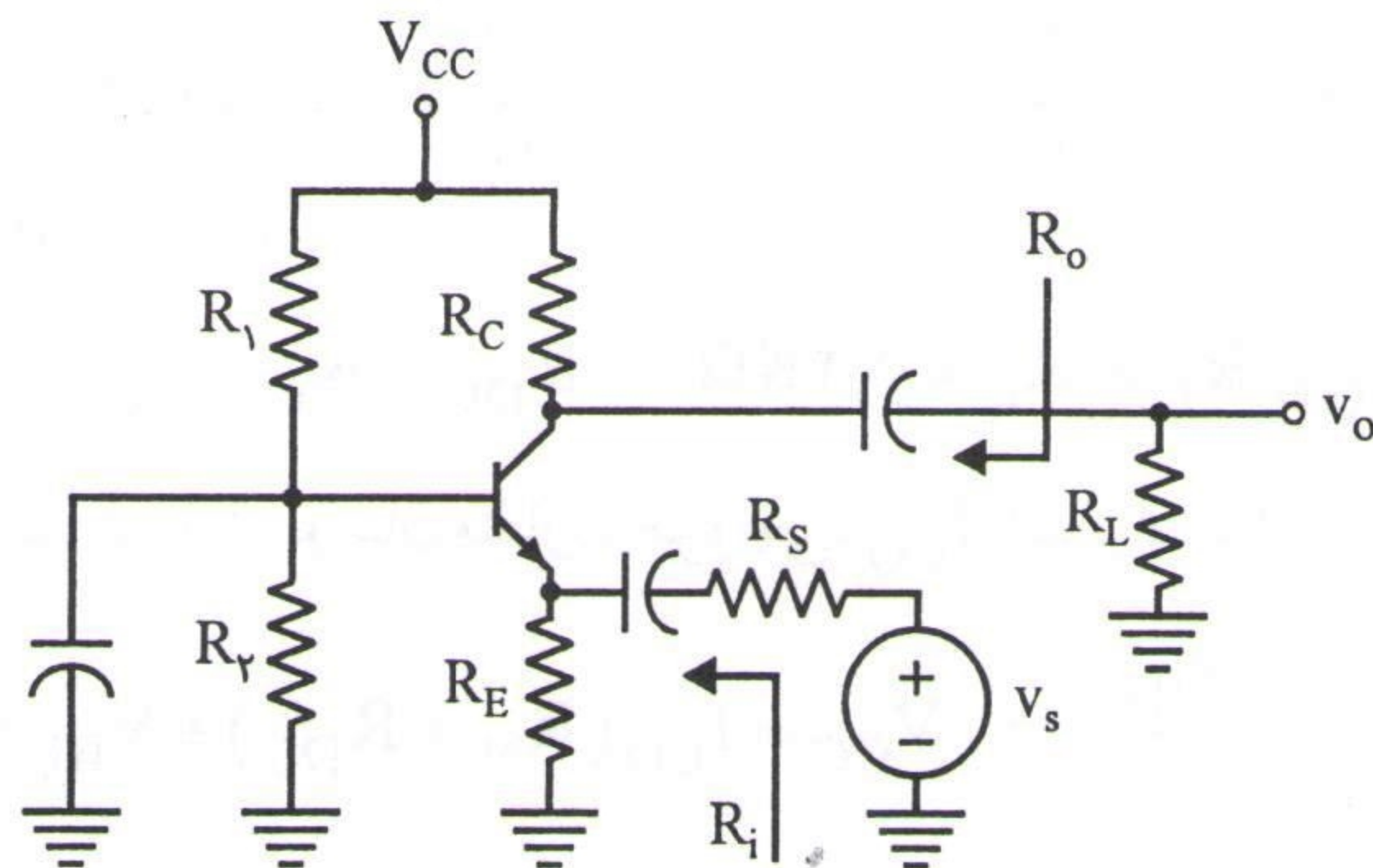
$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_s I_E = 0.76 \text{ V}$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} \approx 1.4 \text{ K}\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} \approx 52 \Omega$$

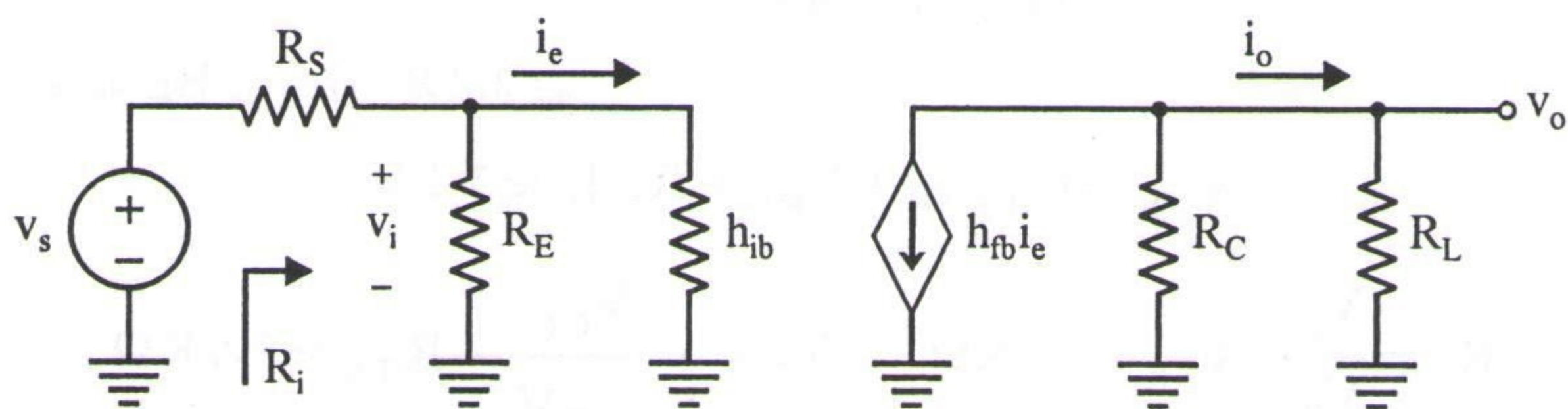
۲۸. یک تقویت کننده بیس مشترک با $R_i < 20 \Omega$ و $A_{v_o} > 50$ ($A_{v_o} = \lim_{R_L \rightarrow \infty} A_v$) طراحی کنید که در

آن دامنه نوسان متقارن خروجی حداکثر بوده و پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β داشته باشد ($100 < \beta < 150$). در صورتی که β فوق مناسب نبود به دلخواه از یک β با میزان تغییرات مناسب استفاده کنید.

حل: مدار تقویت کننده بیس مشترک در شکل ۷۶-۵ رسم شده است و مدار معادل سیگنال کوچک آن با استفاده از مدل هیبرید بیس مشترک ترانزیستور در شکل ۷۷-۵ آمده است.



شکل ۷۶-۵



شکل ۷۷-۵

با توجه به مدار معادل سیگنال کوچک، مقاومت ورودی R_i برابر است با

$$R_i = R_E \parallel h_{ie} \approx h_{ie} < 20 \Omega$$

بنابراین در بدترین حالت داریم

$$h_{ie, \max} = \frac{h_{ie}}{1 + \beta_{\min}} < 20 \Omega \Rightarrow h_{ie} < 20 \cdot 20 \Omega$$

پس با انتخاب $h_{ie} = 1 K\Omega$ ، مقدار h_{ie} برابر است با

$$h_{ie} = \frac{h_{ie}}{1 + \beta_{av}} \approx 8 \Omega$$

حال با انتخاب $R_E = 0.5 K\Omega$ ، ملاحظه می شود که تقریب $R_i \approx h_{ie}$ مناسب خواهد بود، با توجه به مدار معادل سیگنال کوچک، بهره ولتاژ برابر است با

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{h_{fe} (R_C \parallel R_L)}{h_{ie}} \Rightarrow A_{v_o} = \lim_{R_L \rightarrow \infty} A_v = \frac{-h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

$$h_{fb} = \frac{-\beta_{av}}{1 + \beta_{av}} \approx -0.99, \quad A_{v_o} > 50 \Rightarrow R_C > -\frac{50 \cdot h_{ie}}{h_{fb}}$$

$$\Rightarrow R_C > 40.4 \Omega \Rightarrow R_C = 1/2 K\Omega$$

جریان نقطه کار ترانزیستور برابر است با

$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{CQ}} \Rightarrow I_{CQ} = \frac{\beta_{av} V_T}{h_{ie}} = 3.25 \text{ mA}$$

مقاومت‌های R_{DC} و R_{ac} برابرند با

$$R_{ac} = R_C \parallel R_L = R_C = 1/2 K\Omega, \quad R_{DC} = R_C + R_E = 1/7 K\Omega$$

از طرفی برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی، I_{CQ} باید برابر باشد با

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{ac} + R_{DC}} \Rightarrow V_{CC} = I_{CQ} (R_{ac} + R_{DC}) + V_{BE} \approx 10 \text{ V}$$

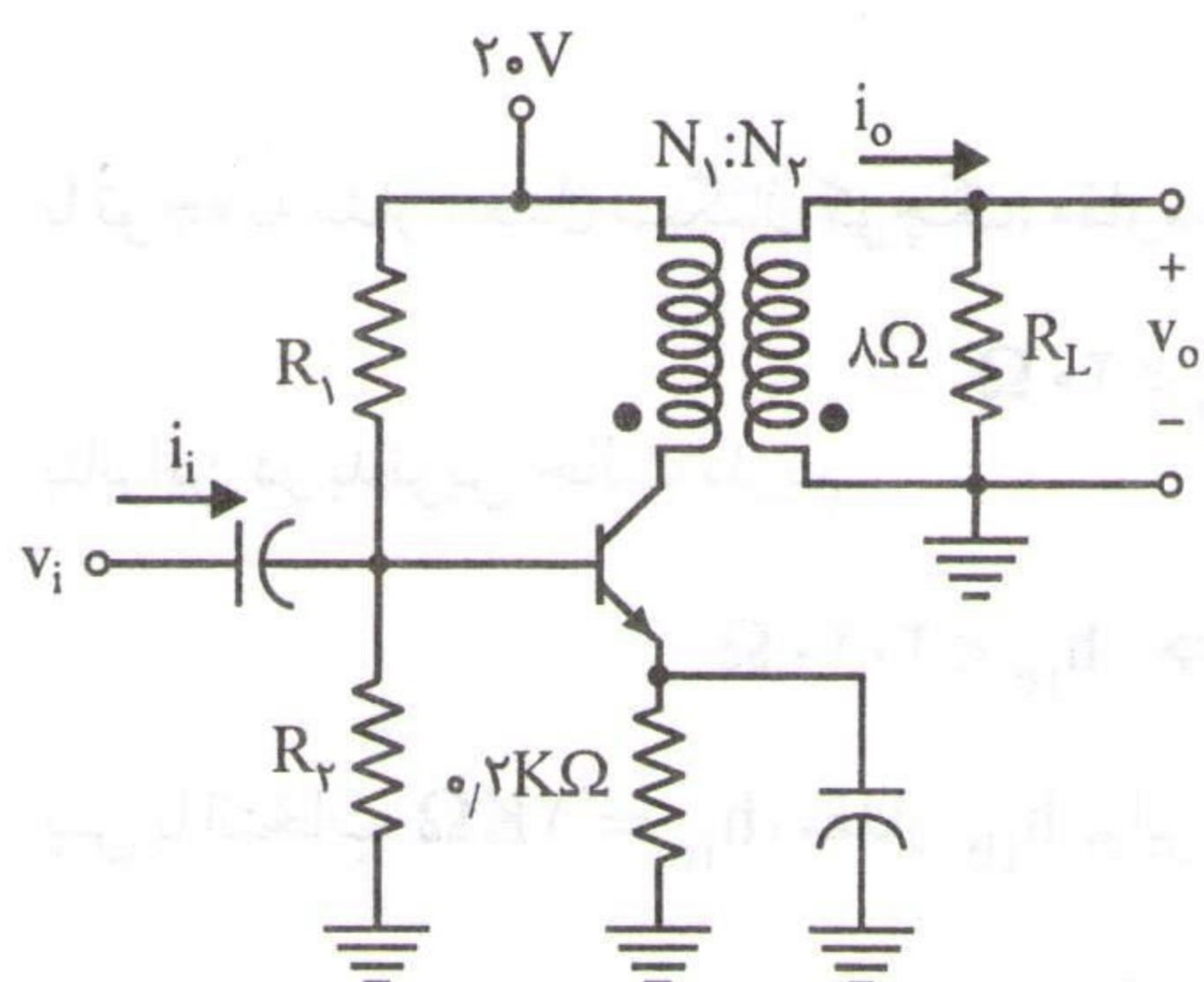
برای داشتن پایداری نقطه کار نسبت به تغییرات β داریم

$$R_{Th} = 0.1 \beta_{min} R_E = 5 K\Omega$$

از KVL در حلقه BE در مدار DC داریم

$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E \approx 2.5 \text{ V}$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 20 K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} \approx 6.7 K\Omega$$



شکل ۵-۷۸

۲۹. تقویت کننده نشان داده شده در شکل ۵-۷۸ به نام

تقویت کننده «کلاس A» با کوپلاژ ترانسفورمری معروف است.

الف) مقادیر مقاومت‌های R_1 و R_2 را به گونه‌ای تعیین کنید که نقطه کار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار بوده و در وسط خط بار ac قرار گیرد. ترانس را ایده‌آل با مقاومت اهمی صفر و نسبت N_1/N_2 را برابر ۵ بگیرید. ترانزیستور دارای $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ و $V_T = 26 \text{ mV}$ ، $\beta = 50$ است.

ب) بهره جریان و ولتاژ و همچنین بهره توان را به دست آورید.

حل: الف) مقاومت دیده شده از دید کلکتور در مدار DC صفر است، اما از نظر ac مقاومت مذکور برابر است با

$$R_{C,ac} = (N_1/N_2)^2 R_L = 200 \Omega$$

$$R_{ac} = R_{C,ac}, \quad R_{DC} = R_E = 200 \Omega$$

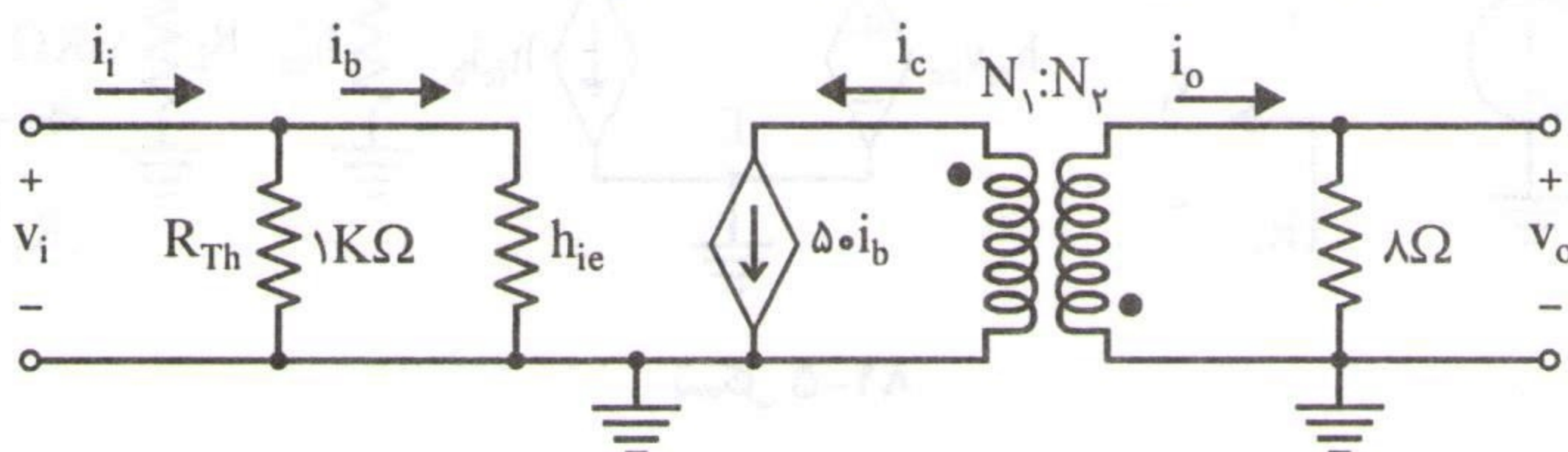
شرط پایداری نسبت به تغییرات β و شرط حداکثر دامنه نوسان متقارن را اعمال می‌کنیم.

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = 5.0 \text{ mA}, \quad R_{Th} = \frac{1}{10} \beta R_E = 1 \text{ K}\Omega$$

$$V_{Th} = R_{Th} (I_{CQ} / \beta) + V_{BE} + R_E I_E = 11.7 \text{ V}$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 1.7 \text{ K}\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 2.4 \text{ K}\Omega$$

ب) مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۷۹-۵ است.



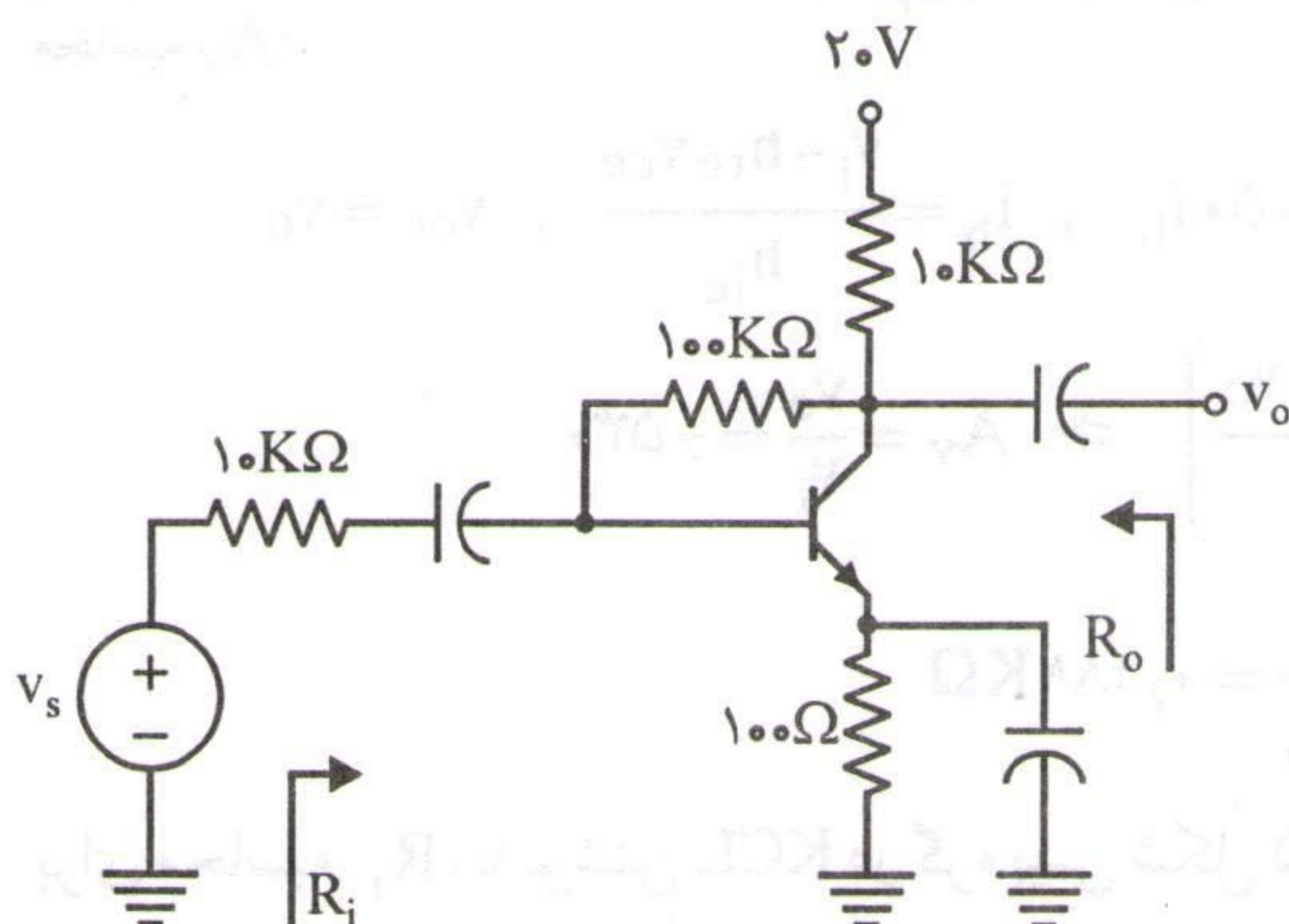
شکل ۷۹-۵

$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{CQ}} = 26 \Omega, \quad R_i = R_{Th} \parallel h_{ie} = 25.3 \Omega$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_b}{i_i} \times \frac{i_c}{i_b} \times \frac{i_o}{i_c} = \left[\frac{R_{Th}}{R_{Th} + h_{ie}} \right] h_{fe} \left[-\frac{N_1}{N_2} \right] = -243.7$$

$$A_v = \frac{R_L i_o}{R_i i_i} = \frac{R_L}{R_i} A_i = -77.1$$

$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{v_o i_o}{v_i i_i} = A_v A_i = 18789.3$$



شکل ۸۰-۵

۳۰. در تقویت کننده شکل ۸۰-۵، ترانزیستور

دارای $h_{re} = 2 \times 10^{-4}$, $h_{oe} = 30 \text{ K}\Omega$

و $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$, $V_T = 26 \text{ mV}$

است. با استفاده از مدل دقیق

هیبرید h مقادیر کمیت‌های A_v , R_i , A_i

A_{v_s} و R_o را محاسبه نمایید.

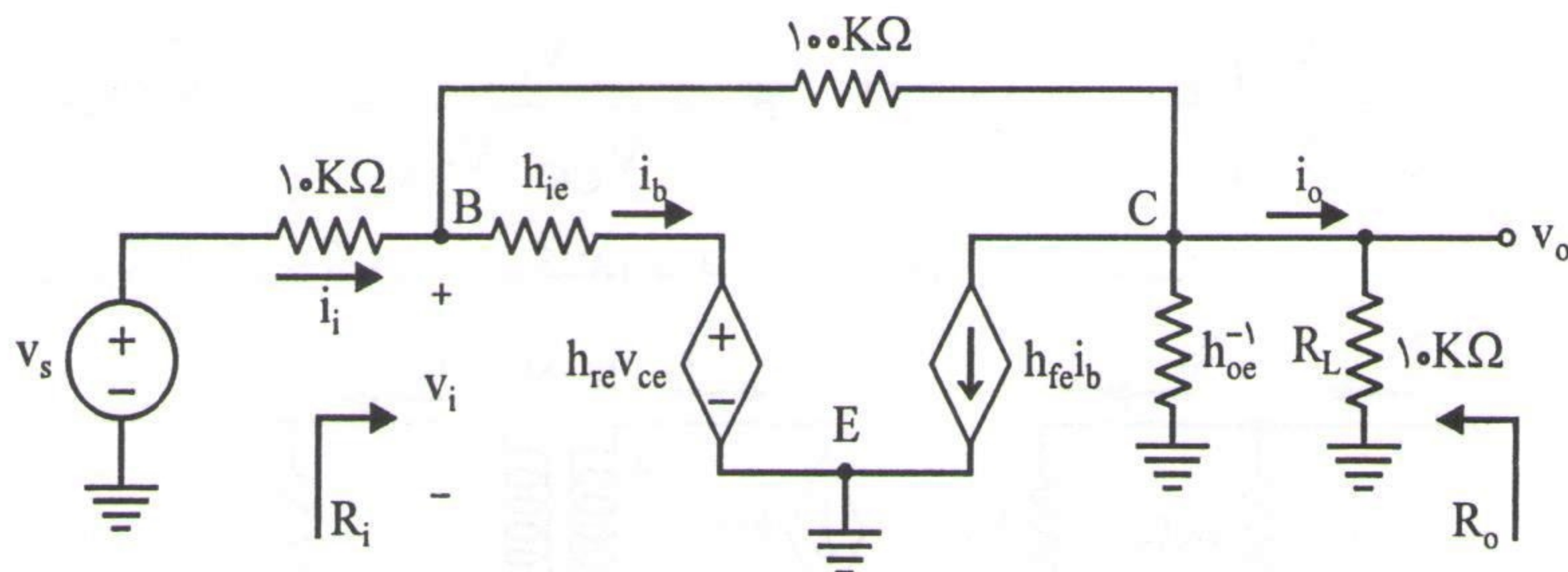
حل: با نوشتن KVL در مدار DC، جریان نقطه

کار را به دست می‌آوریم.

$$20 = 10(I_B + I_C) + 100I_B + V_{BE} + 0.1I_E \Rightarrow I_C = 1.78 \text{ mA}$$

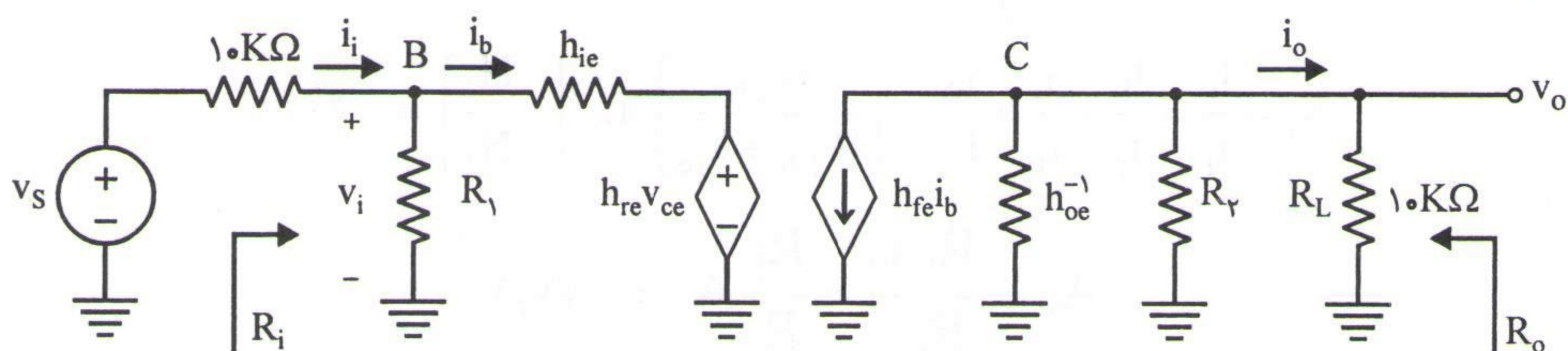
$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 2.19 \text{ K}\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک در شکل ۵-۸۱ رسم شده است.



شکل ۵-۸۱

با استفاده از قضیه میلر می‌توان مقاومت $100 \text{ K}\Omega$ را به دو مقاومت R_1 و R_2 تبدیل کرد، (با توجه به اینکه $k = |A_v| \gg 1$ است). به نحوی که مقاومت R_1 در ورودی و مقاومت R_2 در خروجی قرار گیرد (شکل ۵-۸۲).



شکل ۵-۸۲

$$R_1 = \frac{100}{1-k} = \frac{100}{1-A_v}, \quad R_2 = \frac{100 \cdot k}{k-1} = \frac{100 \cdot A_v}{A_v-1} \approx 100 \text{ K}\Omega$$

محاسبه A_v :

$$v_o = -h_{fe} i_b (h_{oe}^{-1} \parallel R_2 \parallel R_L) = -105 \cdot i_b, \quad i_b = \frac{v_i - h_{re} v_{ce}}{h_{ie}}, \quad v_{ce} = v_o$$

$$\Rightarrow v_o = -105 \cdot \left(\frac{v_i - h_{re} v_o}{h_{ie}} \right) \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = -53$$

$$R_1 = \frac{100}{1-A_v} = 0.188 \text{ K}\Omega$$

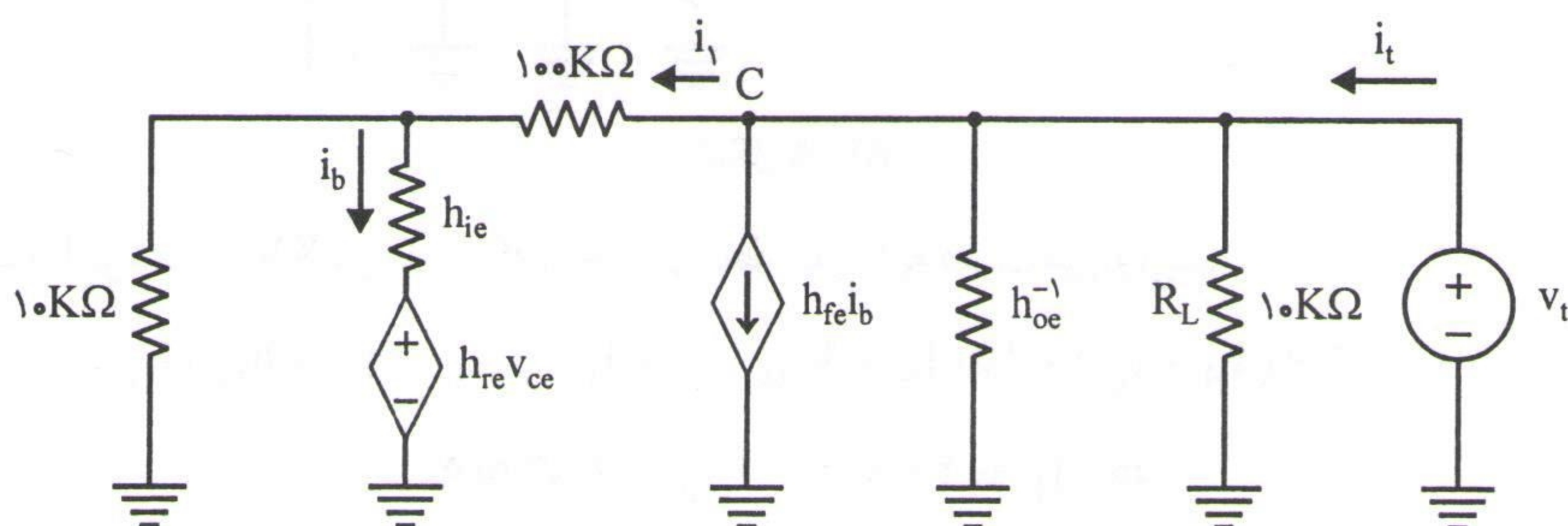
برای محاسبه R_i ، با نوشتن KCL در گره بیس شکل ۵-۸۲ داریم

$$i_i = \frac{v_i}{R_1} + \frac{v_i - h_{re} v_{ce}}{h_{ie}}, \quad v_{ce} = v_o = -53 \cdot v_i$$

$$\Rightarrow i_i = v_i \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1 + h_{re} \times 530}{h_{ie}} \right) \Rightarrow R_i = \frac{v_i}{i_i} \approx 172 \Omega$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / 10}{v_i / R_i} = \frac{R_i}{10} A_v \approx -9/1, \quad A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v = -8/96$$

برای محاسبه R_o از مدار معادل سیگنال کوچک شکل ۵-۸۱ استفاده کرده (دقت شود که نمی‌توان از مدار شکل ۵-۸۲ که قضیه میلر در مورد آن به کار رفته استفاده کرد؛ زیرا در محاسبه مقاومت خروجی با قرار دادن یک منبع آزمایشی در خروجی و صفر کردن ورودی ترکیب مدار تغییر کرده k ، R_1 و R_2 عوض می‌شوند). یک منبع آزمایشی در خروجی قرار داده و منبع ورودی را صفر می‌کنیم، در این صورت مدار به صورت شکل ۵-۸۳ در خواهد آمد.



شکل ۵-۸۳

با توجه به اینکه $v_{ce} = v_t$ است و مقدار h_{re} خیلی کوچک است، با دقت خوبی برای سادگی مدار می‌توان از منبع وابسته $h_{re}v_{ce}$ صرف نظر کرد. از این رو داریم

$$i_1 = \frac{v_t}{100 + h_{ie} \parallel 10} \approx \frac{v_t}{101/8}, \quad i_b = \frac{10}{10 + h_{ie}} i_1 = 0/82 i_1$$

$$\text{KCL C: } i_1 + h_{fe} i_b + \frac{v_t}{R_L \parallel h_{oe}^{-1}} = i_t \Rightarrow v_t \left(\frac{1}{101/8} + \frac{150 \times 0/82}{101/8} + \frac{1}{7/5} \right) = i_t$$

$$\Rightarrow R_o = \frac{v_t}{i_t} \approx 740 \Omega$$

■

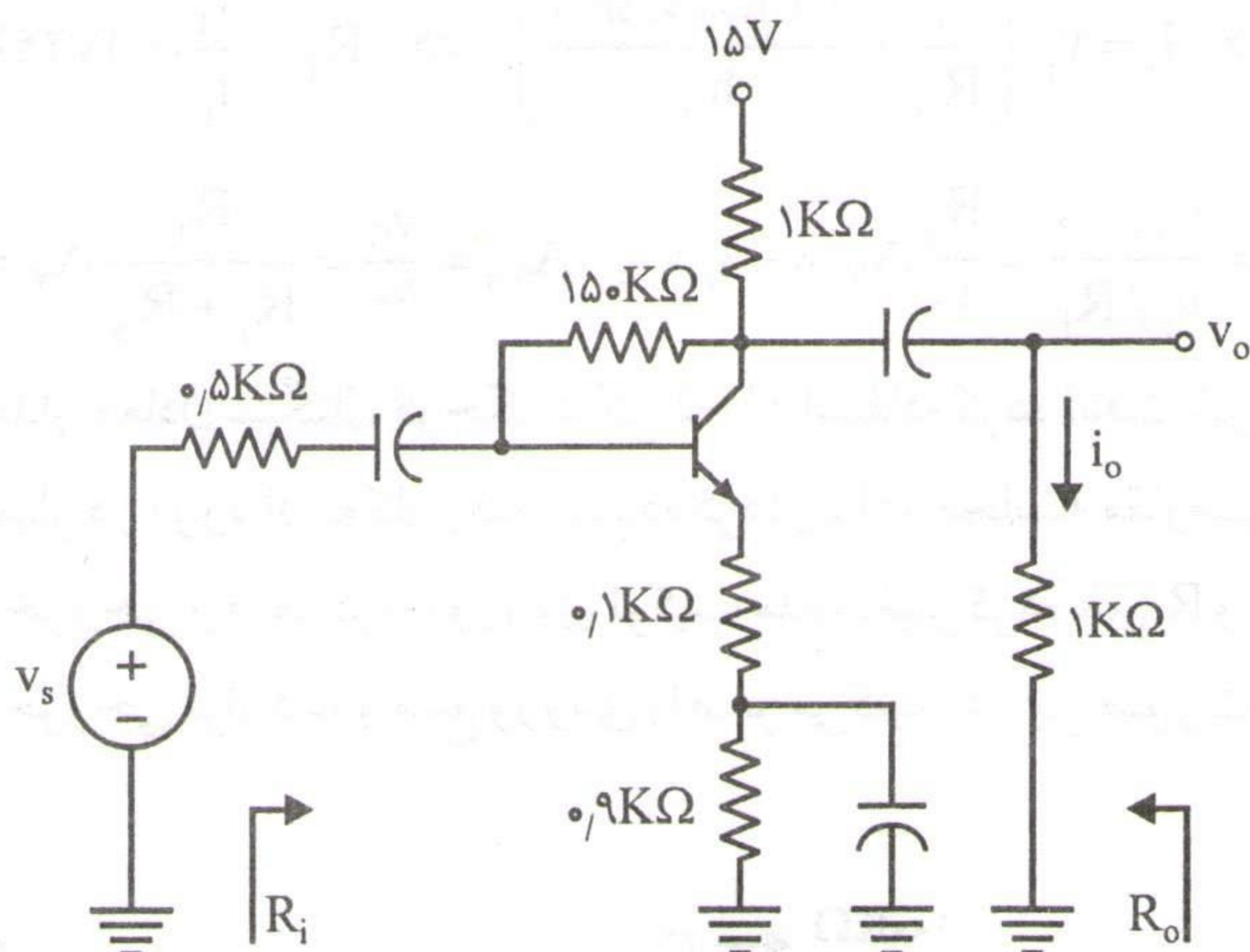
۳۱. در مدار شکل ۵-۸۴، ترانزیستور دارای مشخصات $h_{fe} = 150$ ، $V_T = 26 \text{ mV}$ و $V_{BE} = 0/7 \text{ V}$ و $V_{CE}(\text{sat}) = 0/2 \text{ V}$ است.

(الف) نقطه کار DC را تعیین کنید.

(ب) معادله خط بارهای DC و ac را بنویسید.

(ج) حداکثر دامنه نوسان بدون اعوجاج ولتاژ خروجی از بالا و پایین تقریباً چقدر است؟

(د) مقادیر کمیت‌های A_v ، A_{v_s} ، A_i ، R_i و R_o را محاسبه کنید.



شکل ۵-۸۴

حل: الف) با نوشتن KVL در مدار DC، جریان نقطه کار را به دست می آوریم.

$$15 = 1 \times (I_B + I_C) + 150 I_B + V_{BE} + 1 \times I_E, \quad I_E = (1 + h_{fe}) I_B$$

$$\Rightarrow I_E = 4.78 \Rightarrow I_{CQ} = 4.74 \text{ mA}$$

$$15 = 1 \times I_E + V_{CE} + (0.1 + 0.9) I_E \Rightarrow V_{CEQ} = 15 - 2 I_E = 5.44 \text{ V}$$

ب) با توجه به بند الف) خط بار DC عبارت است از

$$V_{CE} = 15 - 2 I_E, \quad I_C \approx I_E$$

$$\Rightarrow I_C = 7.5 - \frac{1}{2} V_{CE} \Rightarrow R_{DC} = 2 \text{ K}\Omega$$

خط بار ac خالص نیز با نوشتن KVL در حلقه CE مدار ac و با صرف نظر از جریان مقاومت $150 \text{ K}\Omega$ برابر است با

$$v_{ce} = -(1 \parallel 1 + 0.1) i_c = -0.6 i_c \Rightarrow R_{ac} = 0.6 \text{ K}\Omega$$

بنابراین خط بار ac عبارت است از

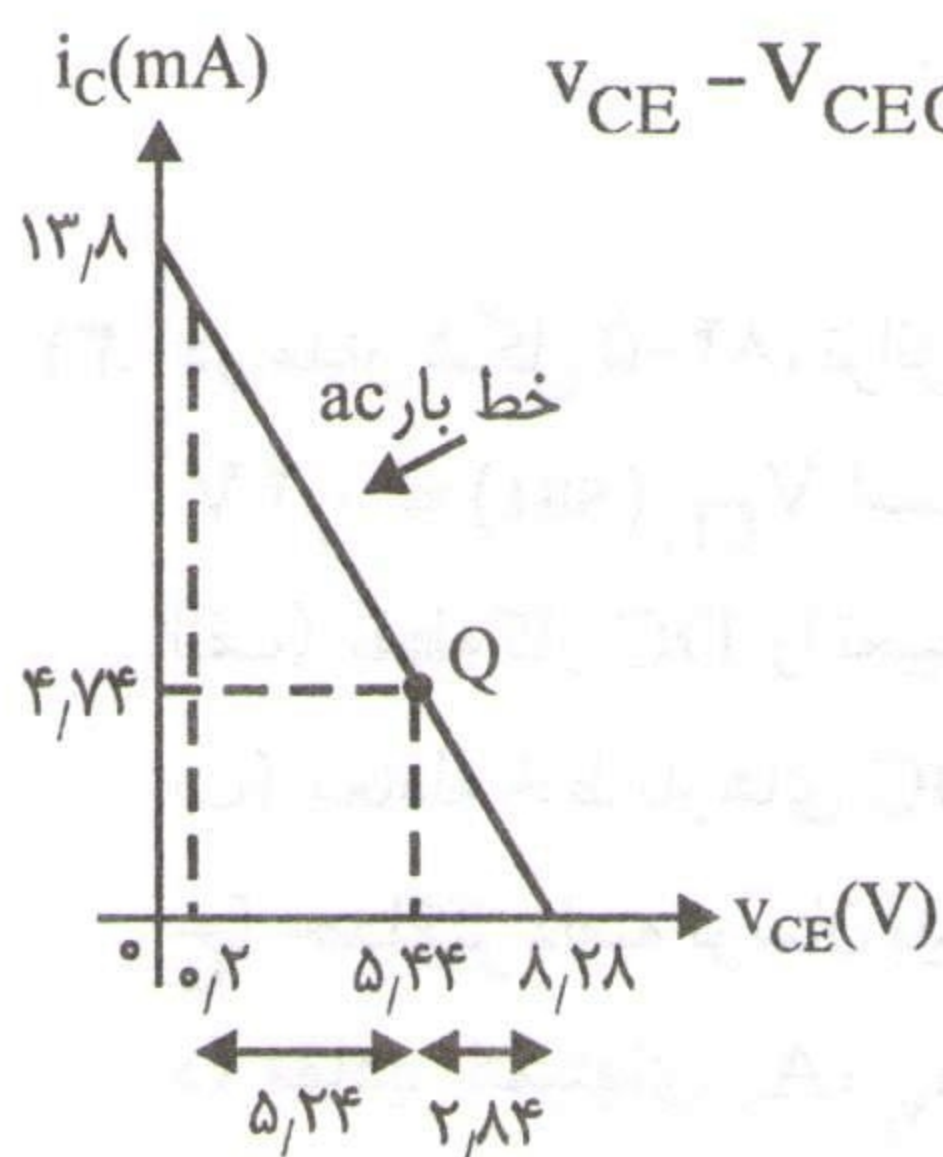
$$v_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac} (i_C - I_{CQ}) \Rightarrow v_{CE} = -0.6 i_C + 8.28$$

ج) خط بار ac در شکل ۵-۸۵ رسم شده است. با توجه به این شکل حداکثر دامنه نوسان مثبت و منفی v_{ce} برابر است با

$$v_{ce, \max}^+ = 2.84 \text{ V}, \quad v_{ce, \max}^- = 5.24 \text{ V}$$

$$i_{c, \max} = \frac{-1}{R_{ac}} v_{ce, \max}$$

$$i_{c, \max}^+ = 8.73 \text{ mA}, \quad i_{c, \max}^- = 4.73 \text{ mA}$$



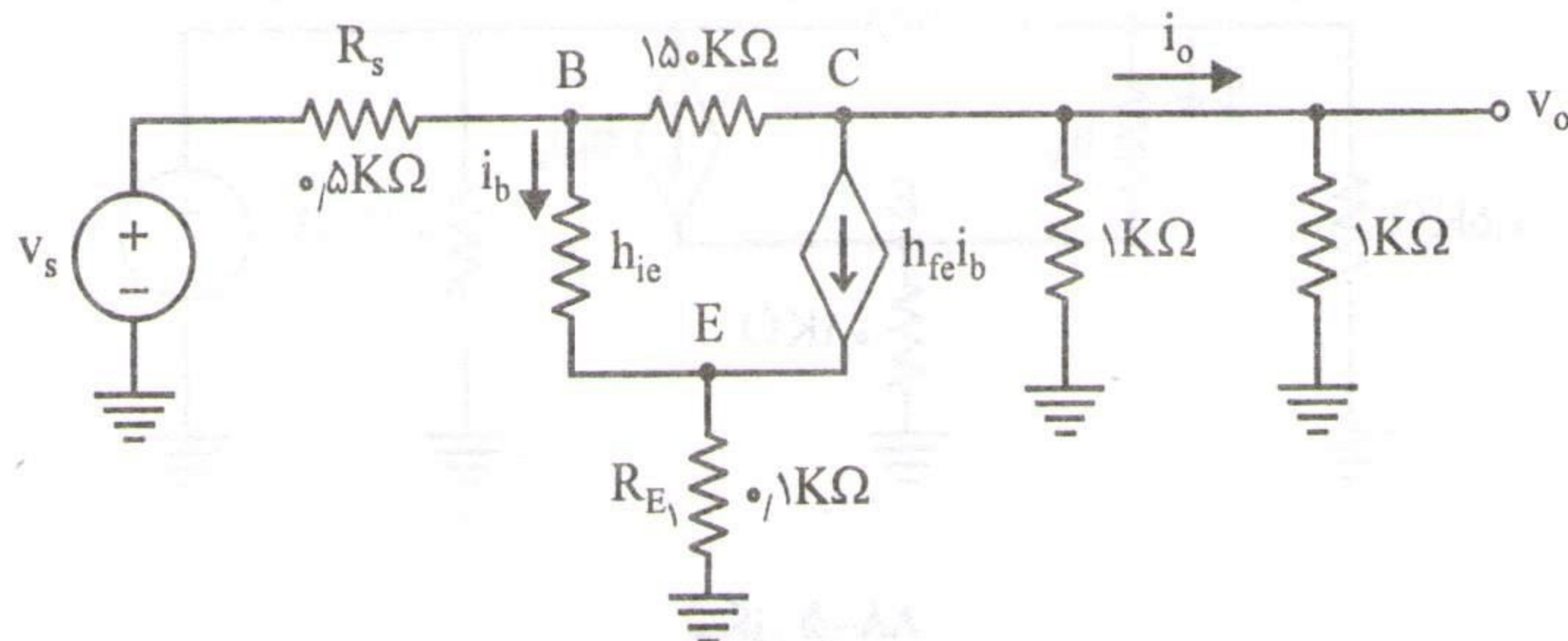
شکل ۵-۸۵

$$v_o = (1 \parallel 1) i_c = 0.5 i_c$$

$$\Rightarrow v_{o,max}^+ \approx 4.36 V, \quad v_{o,max}^- = 2.37 V$$

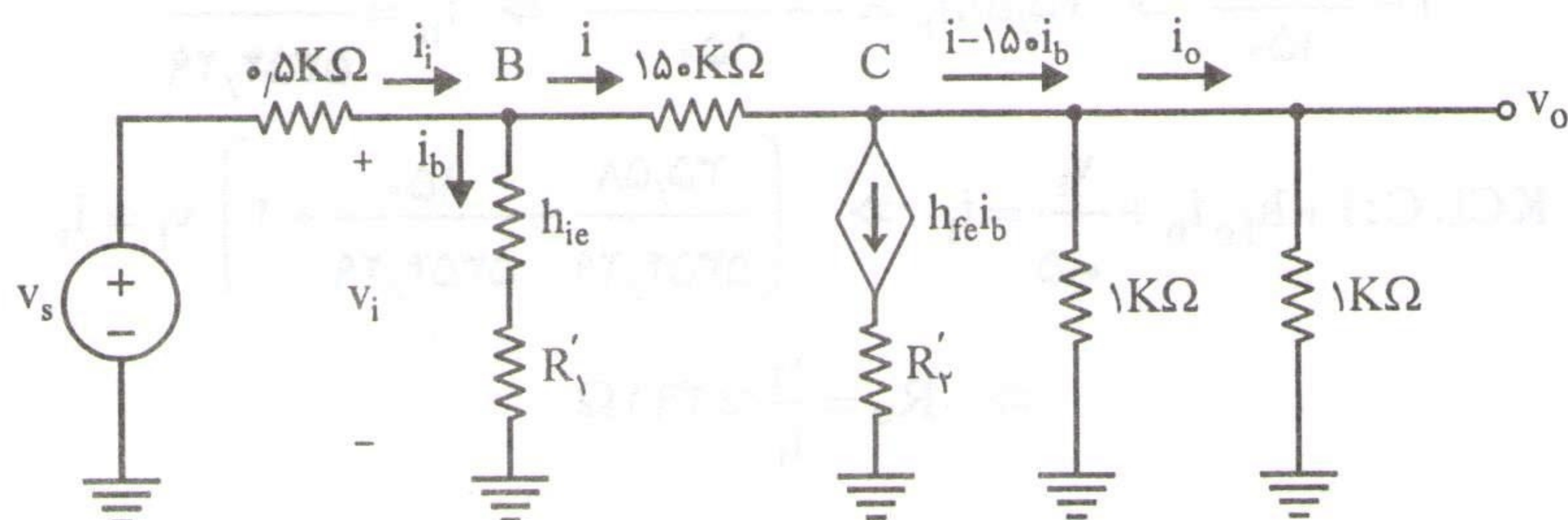
$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 0.823 K\Omega \quad (d)$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۸۶ است.



شکل ۵-۸۶

با استفاده از دوگان قضیه میلر مقاومت $R_{E_1} = 0.1 K\Omega$ را می توان به دو مقاومت R'_1 و R'_2 که به ترتیب به صورت سری با h_{ie} و منبع جریان $h_{fe} i_b$ قرار می گیرند تبدیل نمود (شکل ۵-۸۷). دقت شود k' نسبت جریان دو حلقه است که همان h_{fe} می باشد.



شکل ۵-۸۷

$$R'_1 = (1 + k') R_{E_1} = 15.1 K\Omega, \quad R'_2 = \frac{(1 + k') R_{E_1}}{k'} \approx 0.1 K\Omega$$

$$\text{محاسبه } A_i: \text{KVL: } 150 \cdot i + (i - 150 \cdot i_b)(1 \parallel 1) = (h_{ie} + R'_1) i_b \Rightarrow i = 0.6 i_b$$

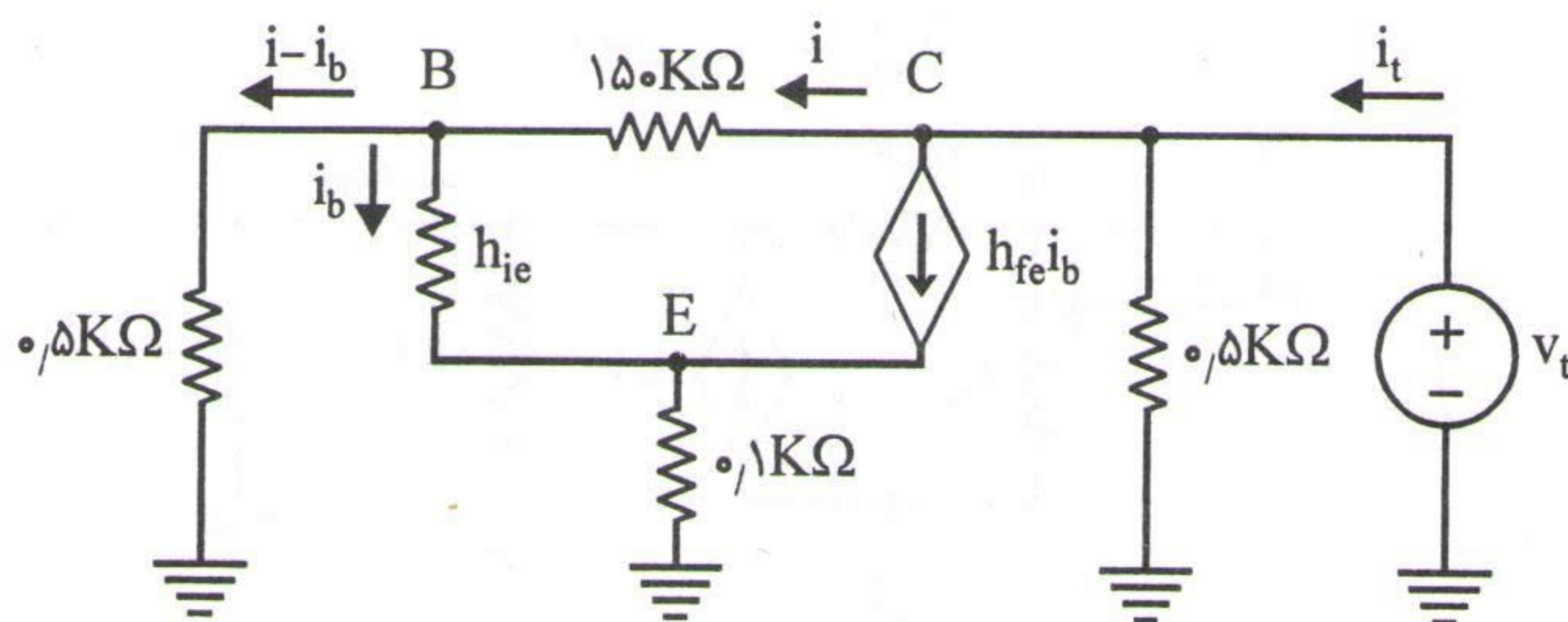
$$i_o = (i - 150 \cdot i_b) \frac{1}{1 + 1} = -74.7 i_b, \quad i_i = i_b + i = 1.6 i_b \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} \approx -46.7$$

$$v_i = (h_{ie} + R'_1) i_b = 15.923 i_b, \quad i_i = 1.6 i_b \Rightarrow R_i = \frac{v_i}{i_i} \approx 9.95 K\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times 1}{i_i \times R_i} = \frac{1}{R_i} A_i \approx -4.7$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v \approx -4.5$$

برای محاسبه R_o ، در خروجی مدار معادل سیگنال کوچک شکل ۵-۸۶، یک منبع ولتاژ آزمایشی v_t قرار داده و منبع ورودی v_s را صفر کرده، مدار شکل ۵-۸۸ حاصل می‌شود.



شکل ۵-۸۸

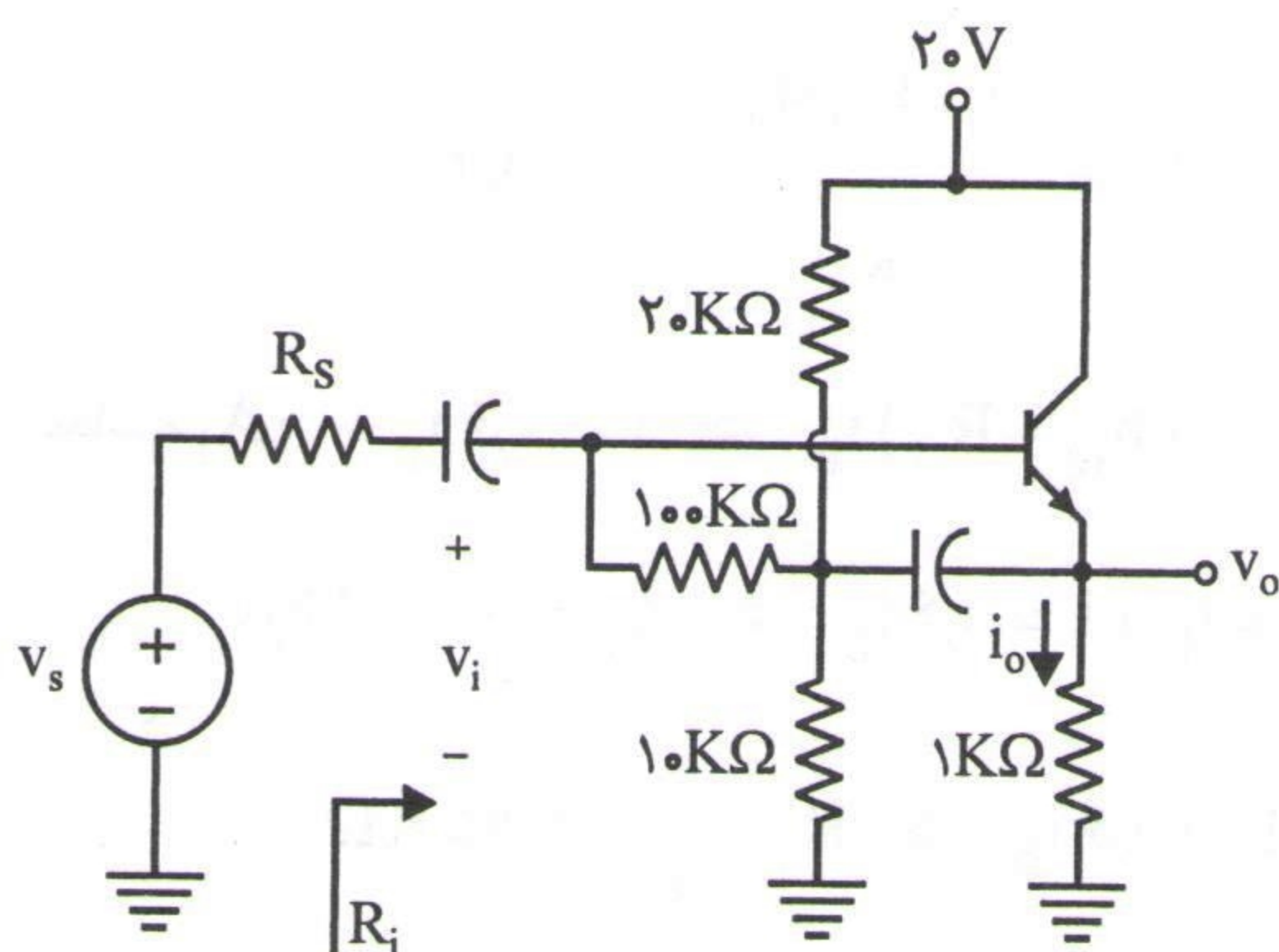
$$v_E = (1 + h_{fe}) i_b \times 0.1 = 15.1 i_b, \quad i_b = \frac{v_B - v_E}{h_{ie}} = \frac{v_B - 15.1 i_b}{h_{ie}} \Rightarrow v_B = 17.29 i_b$$

$$v_B = 0.5(i - i_b) \Rightarrow 17.29 i_b = 0.5(i - i_b) \Rightarrow i = 35.58 i_b$$

$$i = \frac{v_t - v_B}{150} \Rightarrow 35.58 i_b = \frac{v_t - 17.29 i_b}{150} \Rightarrow i_b = \frac{v_t}{5354.29}$$

$$\text{KCL C: } i + h_{fe} i_b + \frac{v_t}{0.5} = i_t \Rightarrow \left(\frac{35.58}{5354.29} + \frac{150}{5354.29} + 2 \right) v_t = i_t$$

$$\Rightarrow R_o = \frac{v_t}{i_t} \approx 491 \Omega$$



شکل ۵-۸۹

۳۲. در تقویت کننده امیتر فالوئر شکل

۵-۸۹ برای افزایش امپدانس ورودی از

روش بوت استرپ استفاده شده است.

ترانزیستور دارای $V_T = 26 \text{ mV}$ ،

$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ و $h_{fe} = 50$ می‌باشد.

بهره ولتاژ، بهره جریان و مقاومت

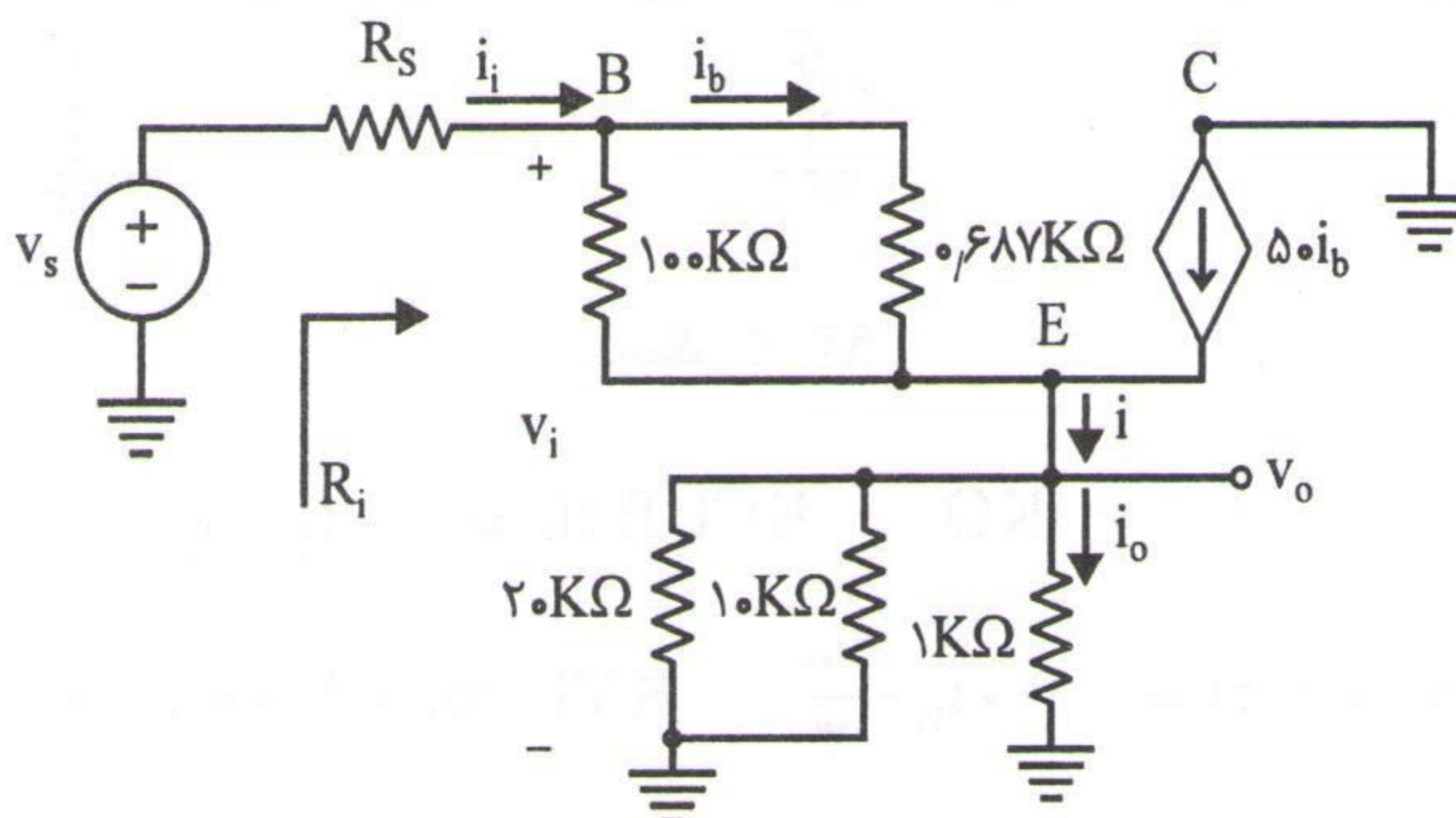
ورودی تقویت کننده را به دست آورید.

حل: $R_{Th} = 20 \parallel 10 + 100 = 106.67 K\Omega$, $V_{Th} = \frac{10}{20+10} \times 20 = 6.67 V$

$$I_E = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_E + R_{Th} / (1 + h_{fe})} = 1.93 mA$$

$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 0.687 K\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۹۰ خواهد بود



شکل ۵-۹۰

محاسبه A_i :

$$KCL E: i = 50 i_b + i_b + \frac{0.687 i_b}{100} \approx 51 i_b$$

$$i_o = i \left(\frac{20 \parallel 10}{20 \parallel 10 + 1} \right) = 0.87 i = 44.37 i_b$$

$$i_b = i_i \left(\frac{100}{100 + 0.687} \right) = 0.993 i_i \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} \approx 44$$

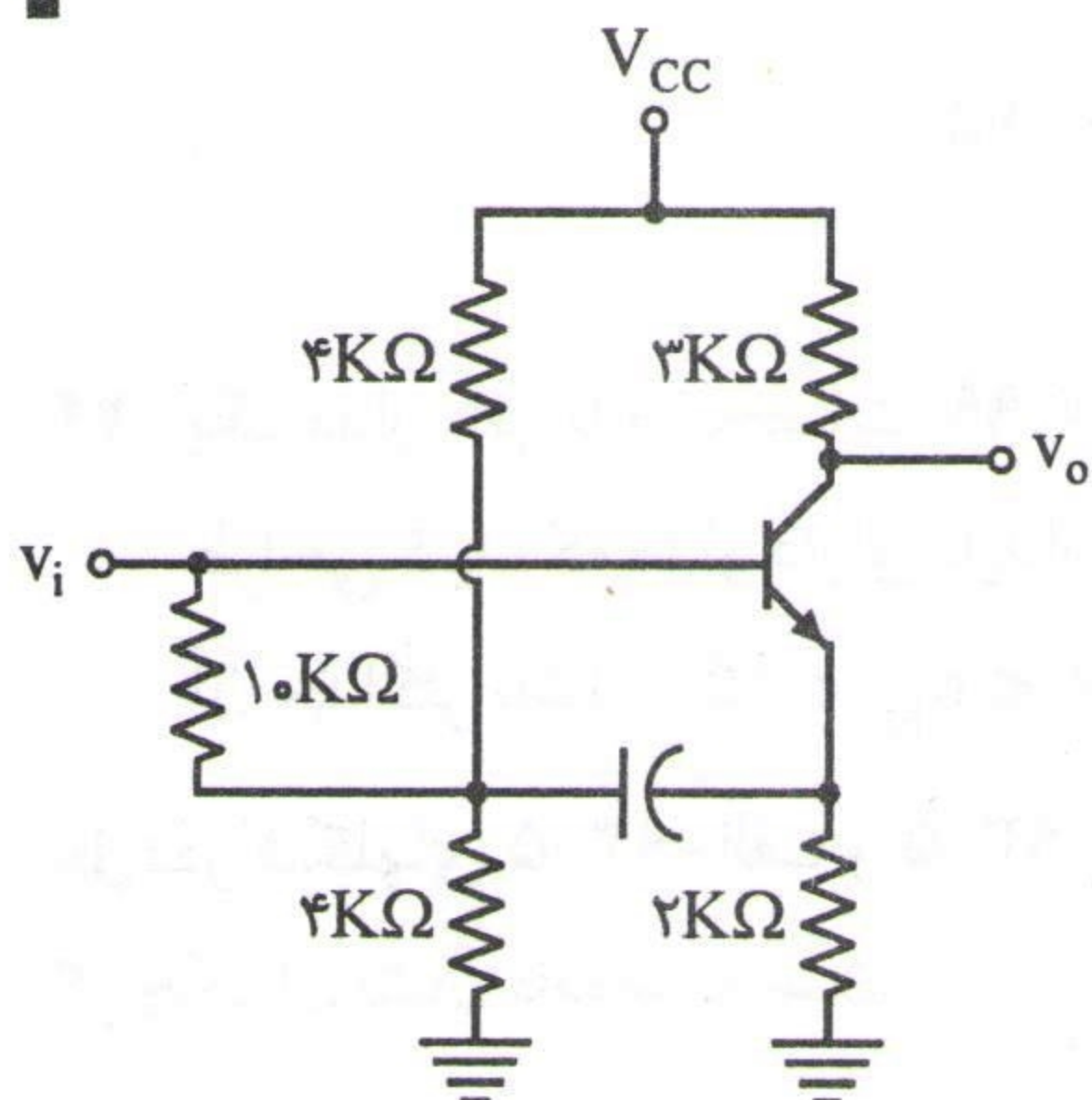
$$KVL: v_i = [100 \parallel 0.687] i_i + [20 \parallel 10 \parallel 1] i$$

محاسبه R_i :

$$i = 51 i_b = 51 \times 0.993 i_i = 50.6 i_i$$

$$\Rightarrow v_i = 0.682 i_i + 0.87 \times 50.6 i_i = 44.7 i_i \Rightarrow R_i = \frac{v_i}{i_i} = 44.7 K\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_L \times i_o}{R_i i_i} = \frac{R_L}{R_i} A_i = 0.984$$



شکل ۵-۹۱

۳۳. برای مدار بوت استرپ نشان داده شده در شکل ۵-۹۱ مقادیر

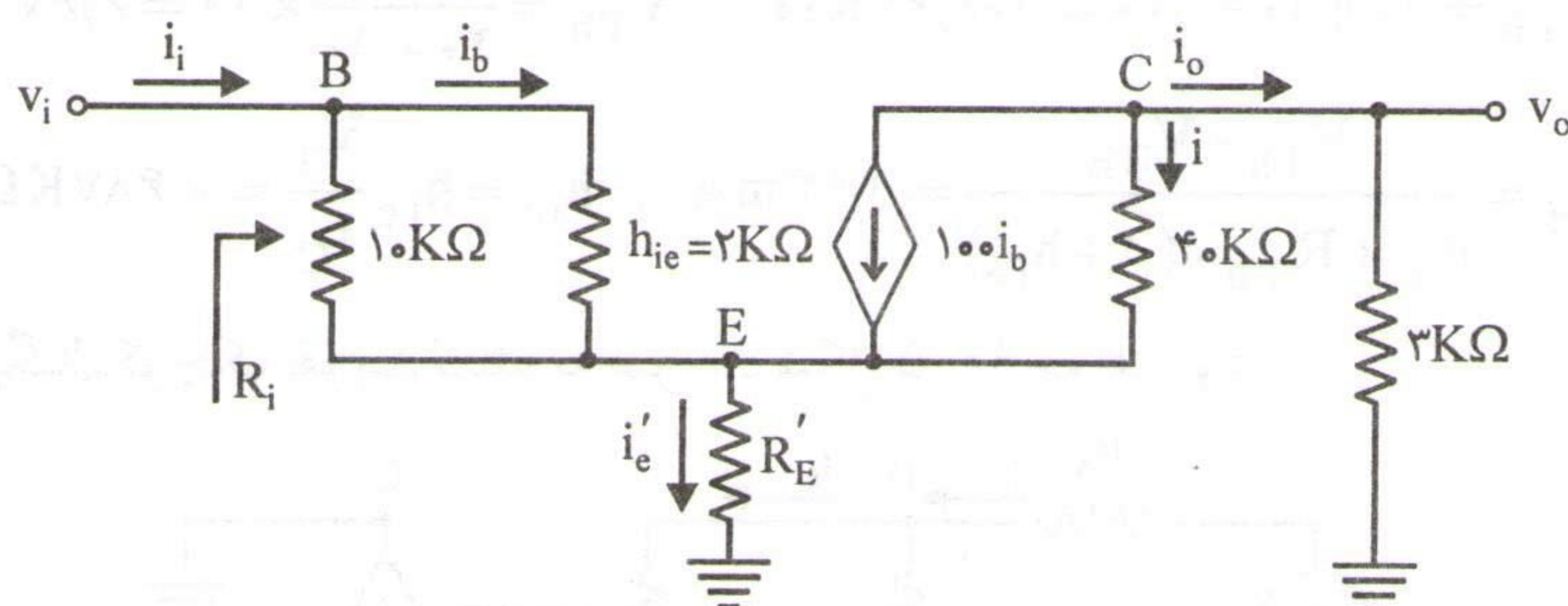
بهره ولتاژ، بهره جریان و مقاومت ورودی و خروجی را محاسبه

نمایید. ترانزیستور دارای مشخصات $h_{ie} = 2 K\Omega$

$h_{fe} = 100$ ، $h_{oe} = 40 K\Omega$ و $h_{re} \approx 0$ می باشد.

حل: مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۹۲

نشان داده شده است.



شکل ۵-۹۲

محاسبه A_v : $R'_E = 4 \parallel 4 \parallel 2 = 1K\Omega$, $KCL E: i'_e = 100i_b + i_b + i + \frac{2i_b}{10}$

$KCL C: i = -100i_b - \frac{v_o}{3}$, $KVL: v_o = 40i + R'_E i'_e$

$$\Rightarrow v_o = 40 \left[-100i_b - \frac{v_o}{3} \right] + 1 \times \left[100i_b + i_b + \left(-100i_b - \frac{v_o}{3} \right) + \frac{2i_b}{10} \right]$$

$$\Rightarrow v_o = -272.65i_b , i = -9.12i_b , i_e = 92.1i_b$$

از طرفی برای جریان i_b داریم

$$i_b = \frac{v_i - v_e}{h_{ie}} = \frac{v_i - 92.1i_b}{2} \Rightarrow i_b = \frac{v_i}{94.1}$$

$$\Rightarrow v_o = -272.65 \times \frac{v_i}{94.1} = -2.9v_i \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = -2.9$$

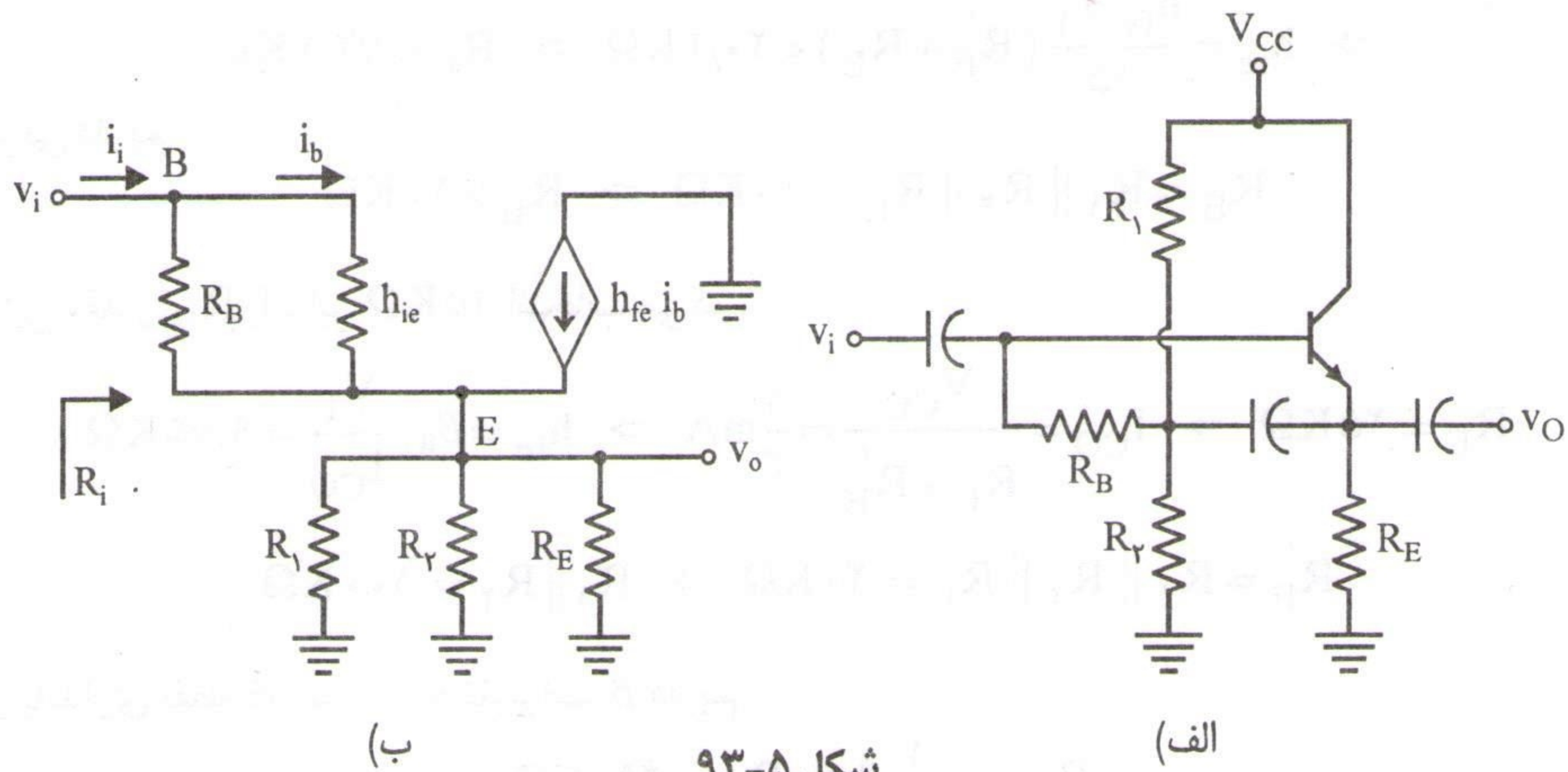
برای محاسبه R_i ، با توجه به رابطه v_i و i_b به دست آمده داریم

$$v_i = 94.1i_b = 94.1 \left(i_i \frac{10}{10+2} \right) = 78.42i_i \Rightarrow R_i = \frac{v_i}{i_i} = 78.42K\Omega$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o/3}{v_i/R_i} = \frac{78.42}{3} A_v = -75.8$$

۳۴. یک مدار بافر با مشخصات $A_v > 0.99$ و $R_i > 2M\Omega$ ، با استفاده از روش بوت استرپ به نحوی طراحی کنید، که مدار دارای پایداری مطلوب نسبت به تغییرات β بوده و دامنه نوسان متقارن خروجی آن حداکثر باشد. $150 < h_{fe} < 1000$ و $V_{CC} = 15V$ است.

حل: در شکل‌های ۵-۹۳ الف و ۵-۹۳ ب به ترتیب یک مدار بافر بوت استرپ شده و مدار معادل سیگنال کوچک آن نشان داده شده است.



شکل ۵-۹۳

با استفاده از مدار معادل سینگال کوچک، مقاومت ورودی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$R'_E = R_C \parallel R_L \parallel R_E$$

$$v_i = h_{ie} i_b + R'_E \left(1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_B} \right) i_b = \left[h_{ie} + \left(1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_B} \right) R'_E \right] \left(\frac{R_B}{R_B + h_{ie}} \right) i_i$$

$$\Rightarrow R_i = \frac{v_i}{i_i} = h_{ie} \parallel R_B + \left(1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_B} \right) R'_E \left(\frac{R_B}{R_B + h_{ie}} \right)$$

با فرض اینکه مقاومت R_B بسیار بزرگتر از h_{ie} باشد، مقاومت ورودی برابر است با

$$R_i = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R'_E \approx (1 + h_{fe}) R'_E$$

$$R_i > 2 M\Omega \Rightarrow (1 + h_{fe, \min}) R'_E > 2 M\Omega \Rightarrow R'_E > 19.8 K\Omega$$

بنابراین مقدار R'_E را برابر $20 K\Omega$ در نظر می گیریم. بهره ولتاژ به صورت زیر به دست می آید (با صرف نظر از جریان R_B):

$$v_o = R'_E (1 + h_{fe}) i_b, \quad v_i = R_i i_i = R_i \left(\frac{R_B + h_{ie}}{R_B} \right) i_b$$

$$\Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{(1 + h_{fe}) R'_E}{R_i} \frac{R_B}{R_B + h_{ie}} \approx \frac{(1 + h_{fe}) R'_E}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R'_E}$$

$$A_v > 0.99 \Rightarrow h_{ie} < 0.01 (1 + h_{fe, \min}) R'_E \Rightarrow h_{ie} < 20.2 K\Omega$$

برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن در خروجی، جریان نقطه کار را به صورت زیر انتخاب می کنیم:

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = \frac{15}{R'_E + R_E} = h_{fe} \frac{V_T}{h_{ie}}$$

$$\Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{15} (R'_E + R_E) < 20.2 K\Omega \Rightarrow R_E < 72.2 K\Omega$$

از طرفی داریم

$$R'_E = R_1 \parallel R_2 \parallel R_E = 20 K\Omega \Rightarrow R_E > 20 K\Omega$$

بنابراین مقدار R_E را برابر $25 K\Omega$ انتخاب می‌کنیم.

$$R_E = 25 K\Omega \Rightarrow I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_E + R'_E} = \frac{1}{3} mA \Rightarrow h_{ie} = \beta_{av} \frac{V_T}{I_{CQ}} = 9.75 K\Omega$$

$$R'_E = R_1 \parallel R_2 \parallel R_E = 20 K\Omega \Rightarrow R_1 \parallel R_2 = 100 K\Omega$$

برای پایداری نقطه کار نسبت به تغییرات β داریم

$$R_{Th} = \frac{1}{10} \beta_{min} R_E = 250 K\Omega$$

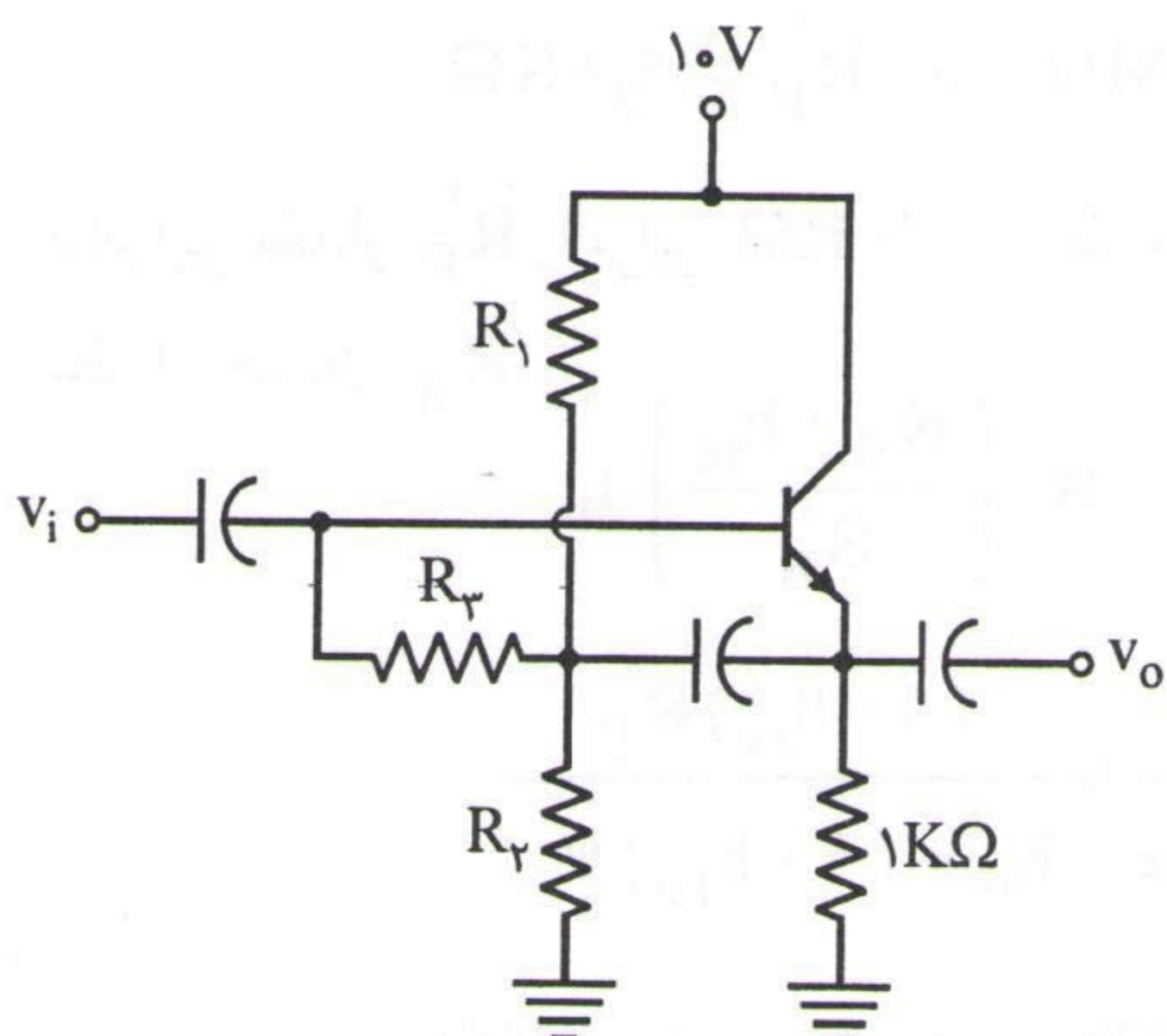
$$R_{Th} = R_1 \parallel R_2 + R_B = 250 K\Omega \Rightarrow R_B = 150 K\Omega$$

مشاهده می‌شود که فرض اولیه $R_B \gg h_{ie}$ برقرار است. برای محاسبه مقادیر R_1 و R_2 ، ولتاژ V_{Th} را با استفاده از KVL در مدار DC می‌یابیم.

$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E = 9.7 V$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 386.6 K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 70.75 K\Omega$$

با جایگذاری مقادیر و محاسبه روابط $A_v = 0.995$ و $R_{i,min} = 2.16 M\Omega$ به دست می‌آید؛ ملاحظه می‌شود شرایط طراحی به خوبی حاصل شده است.



شکل ۵-۹۴

۳۵. در مدار شکل ۵-۹۴ مقادیر R_1 ، R_2 و R_3 را طوری محاسبه نمایید که شرایط زیر به طور همزمان برقرار باشد.

- $V_{CEQ} = 5V$ باشد.

- به ازای $h_{fe} = 300$ مقاومت ورودی حداکثر شود.

- مدار از پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشد.

حل: شرط پایداری نقطه کار ترانزیستور نسبت به

تغییرات β به صورت زیر است:

$$R_{Th} = 0.1 \beta_{min} R_E = 30 K\Omega$$

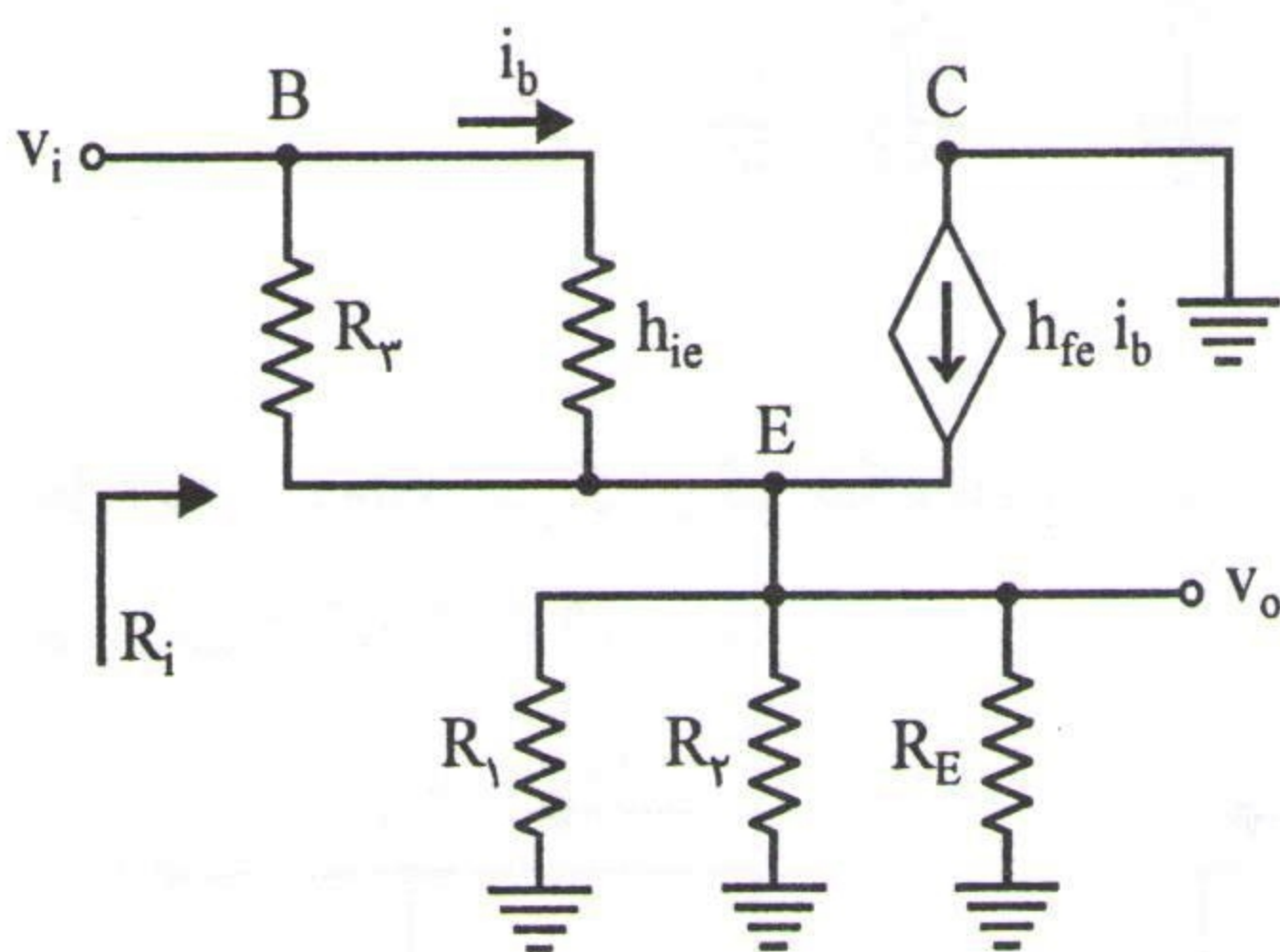
از KVL در حلقه CE مدار DC داریم

$$10 = V_{CE} + R_E I_E, \quad V_{CEQ} = 5V \Rightarrow I_E \approx I_C = 5mA$$

$$h_{ie} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 1.56 K\Omega$$

از KVL در حلقه BE مدار DC داریم

$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E = 6.2V$$



شکل ۵-۹۵

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۹۵ است. در این مدار مقاومت ورودی R_i ، با انعکاس مقاومت‌های امیتر در بیس برابر است با

$$R_i \approx (R_1 \parallel h_{ie}) + (1 + h_{fe})(R_E \parallel R_2 \parallel R_3)$$

با فرض اینکه $R_1 \parallel R_2$ خیلی بزرگ‌تر از R_E و نیز R_3 خیلی بزرگ‌تر از h_{ie} باشد، حداکثر مقدار R_i برابر است با

$$R_{i,max} \approx h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E$$

در این شرایط $R_1 \parallel R_2$ را به صورت زیر انتخاب می‌کنیم:

$$R_1 \parallel R_2 = 10 R_E = 10 K\Omega$$

$$R_{Th} = R_3 + R_1 \parallel R_2 = 30 K\Omega \Rightarrow R_3 = 20 K\Omega$$

ملاحظه می‌شود که شرط $R_3 \gg h_{ie}$ برقرار است. برای مقادیر R_1 و R_2 داریم

$$V_{Th} = 6.2V, \quad R'_{Th} = R_1 \parallel R_2 = 10 K\Omega$$

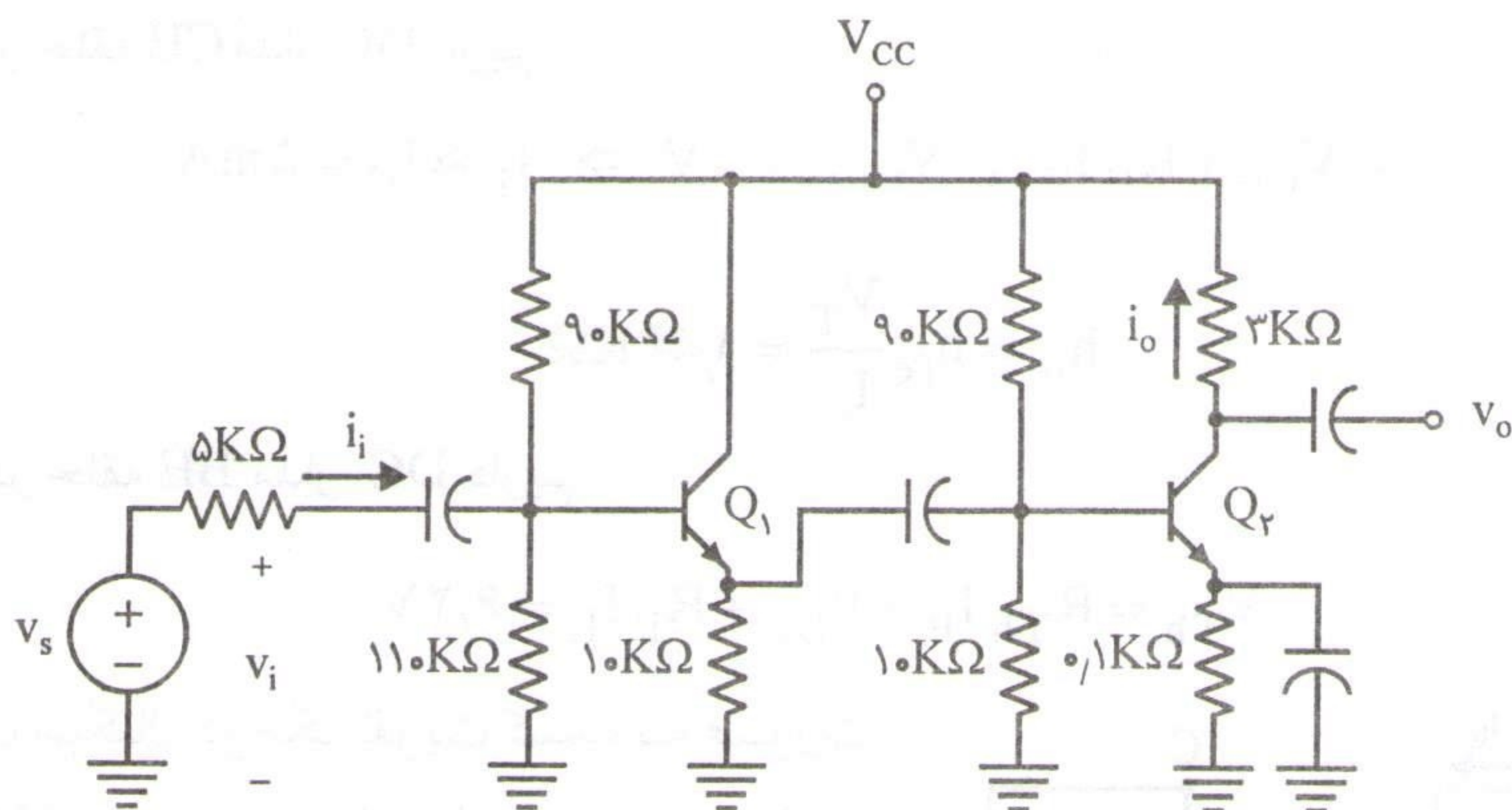
$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R'_{Th} \approx 16.1 K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R'_{Th} \approx 26.3 K\Omega$$

با مقادیر فوق R_i برابر است با

$$R_i \approx 275 K\Omega$$

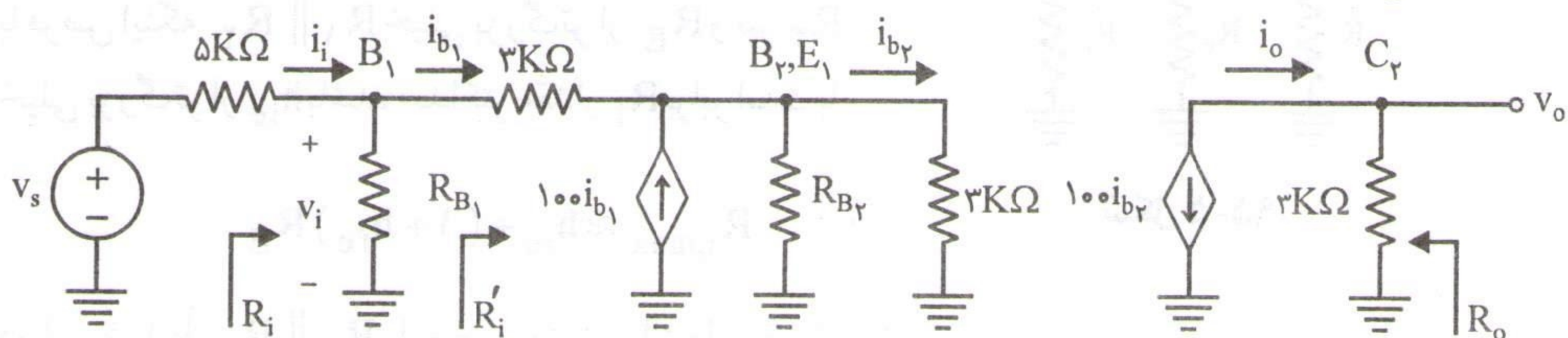
■

۳۶. در مدار تقویت کننده دو طبقه شکل ۵-۹۶ هر دو ترانزیستور دارای $h_{fe} = 100$ و $h_{ie} = 3 K\Omega$ می‌باشند. با استفاده از مدل تقریبی هیبرید برای ترانزیستورها، مشخصات تقویت کننده را محاسبه کنید.



شکل ۵-۹۶

حل: مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده با استفاده از مدل تقریبی هیبرید برای ترانزیستورها به صورت شکل ۵-۹۷ است.



شکل ۵-۹۷

$$R_{B1} = 110 \parallel 90 = 49.5 K\Omega, \quad R_{B2} = 90 \parallel 10 \parallel 10 = 4.74 K\Omega \quad \text{محاسبه } R_i$$

با انعکاس مقاومت‌های موجود در امیتر Q_1 مقدار R'_i برابر است با

$$R'_i = h_{ie1} + (1 + h_{fe})(R_{B2} \parallel h_{ie2}) = 188.6 K\Omega \Rightarrow R_i = R'_i \parallel R_{B1} = 39.2 K\Omega$$

$$i_o = -100 \cdot i_{b2} = -100 \cdot \left(10.1 i_{b1} \frac{R_{B2}}{R_{B2} + 3} \right) = -6185.27 i_{b1} \quad \text{محاسبه } A_i$$

$$= -6185.27 \left(\frac{R_{B1}}{R_{B1} + R'_i} i_i \right) \approx -1286 i_i \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = -1286$$

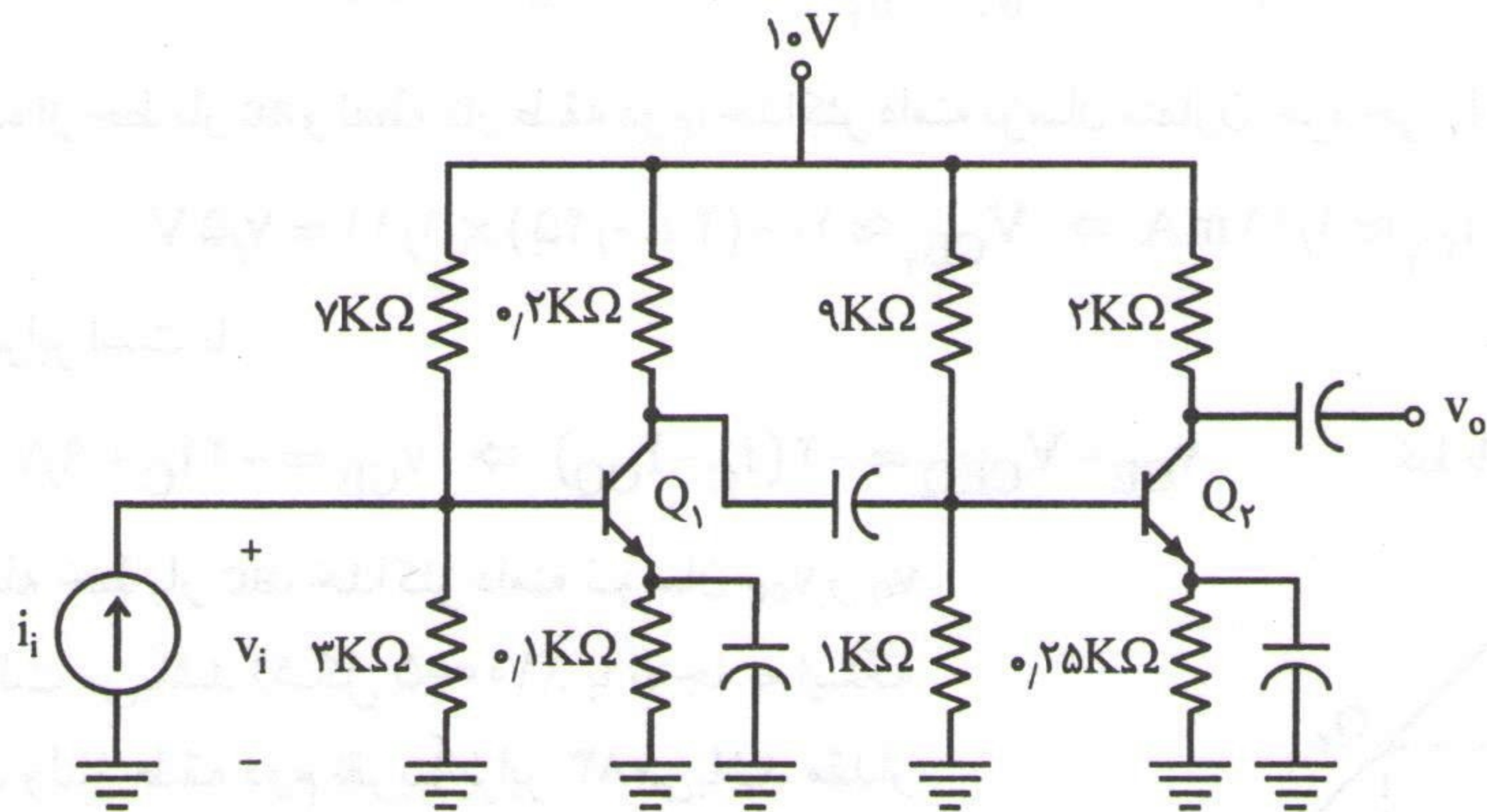
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{3 i_o}{R_i i_i} = \frac{3}{39.2} A_i = -98.4$$

با صفر کردن منبع سیگنال ورودی، تمام منابع وابسته نیز صفر می‌شوند، پس $R_o = 3 K\Omega$ می‌باشد.

۳۷. در تقویت کننده شکل ۵-۹۸ از دو طبقه امیتر مشترک متوالی استفاده شده است. ترانزیستورها دارای $V_{BE} = 0.7V$ و $V_T = 26mV$ ، $h_{fe} = 50$ می باشند.

الف) بهره ولتاژ و جریان و مقاومت ورودی و خروجی را بیابید.

ب) حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی را محاسبه کنید.



شکل ۵-۹۸

حل: ابتدا با تحلیل DC مدار، h_{ie} ترانزیستورها را به دست می آوریم.

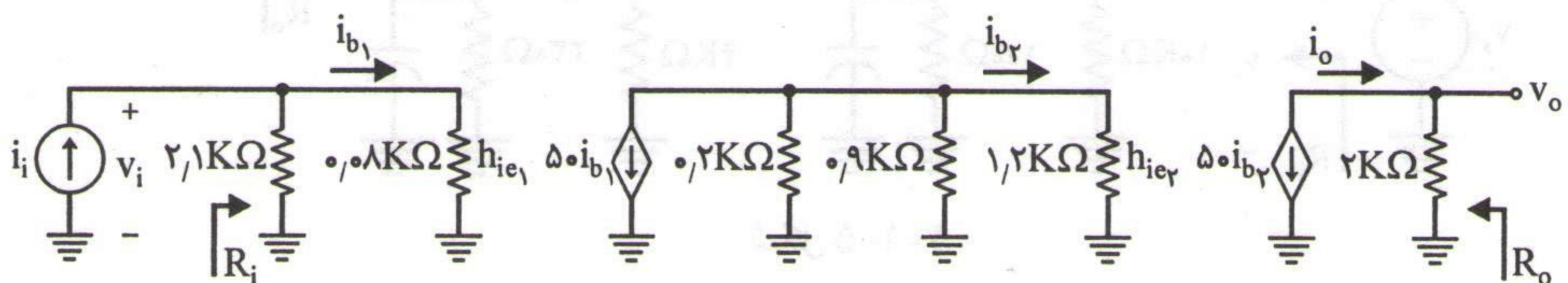
$$R_{Th1} = 7 \parallel 3 = 2.1K\Omega, \quad V_{Th1} = \frac{10}{7+3} \times 3 = 3V$$

$$I_{E1} = \frac{V_{Th1} - V_{BE1}}{R_{E1} + R_{Th1} / (1 + h_{fe})} = 1.63mA, \quad h_{ie1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C1}} \approx 80\Omega$$

$$R_{Th2} = 9 \parallel 1 = 0.9K\Omega, \quad V_{Th2} = \frac{10}{9+1} \times 1 = 1V$$

$$I_{E2} = \frac{V_{Th2} - V_{BE2}}{R_{E2} + R_{Th2} / (1 + h_{fe})} = 1.12mA, \quad h_{ie2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C2}} \approx 1.2K\Omega$$

الف) مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۹۹ رسم شده است.



شکل ۵-۹۹

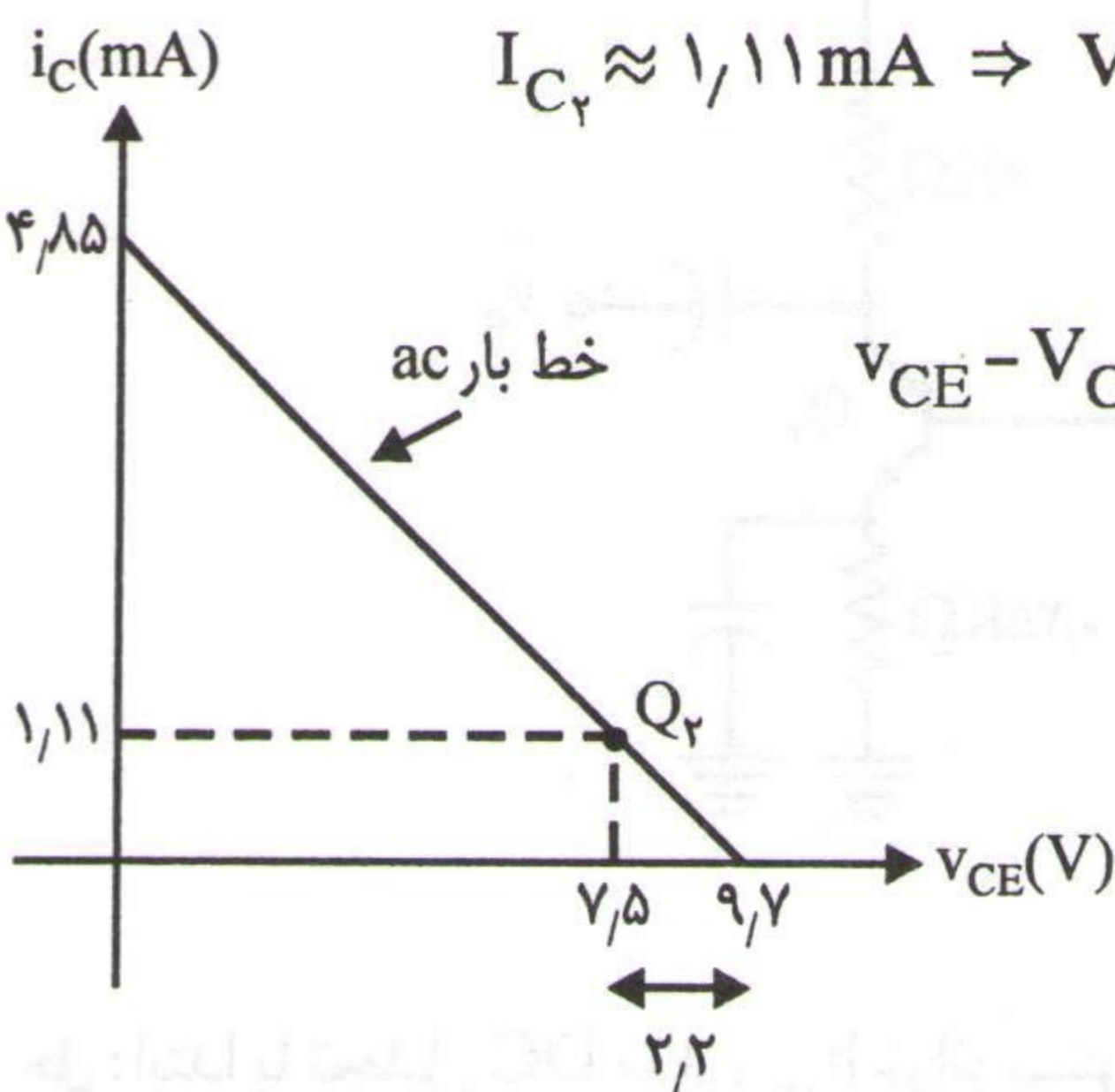
$$\begin{aligned} v_o &= 2(-50 \cdot i_{b2}) = -100 \left[(-50 \cdot i_{b1}) \left(\frac{0.2 \parallel 0.9}{0.2 \parallel 0.9 + 1.2} \right) \right] = 600 \cdot i_{b1} : A_v \text{ محاسبه} \\ &= 600 \cdot \frac{v_i}{0.08} = 7500 \cdot v_i \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = 7500 \end{aligned}$$

$$R_i = 2.1 \parallel 0.8 \approx 77 \Omega$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o/2}{v_i/R_i} = \frac{R_i}{2} A_v \approx 289$$

$$i_i = 0 \Rightarrow i_{b_1} = i_{b_2} = 0 \Rightarrow R_o = 2 K\Omega$$

ب) با استفاده از خط بار ac و نقطه کار طبقه دوم، حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی را به دست می‌آوریم.



$$I_{C_2} \approx 1.11 \text{ mA} \Rightarrow V_{CE_2} \approx 10 - (2 + 0.25) \times 1.11 = 7.5 \text{ V}$$

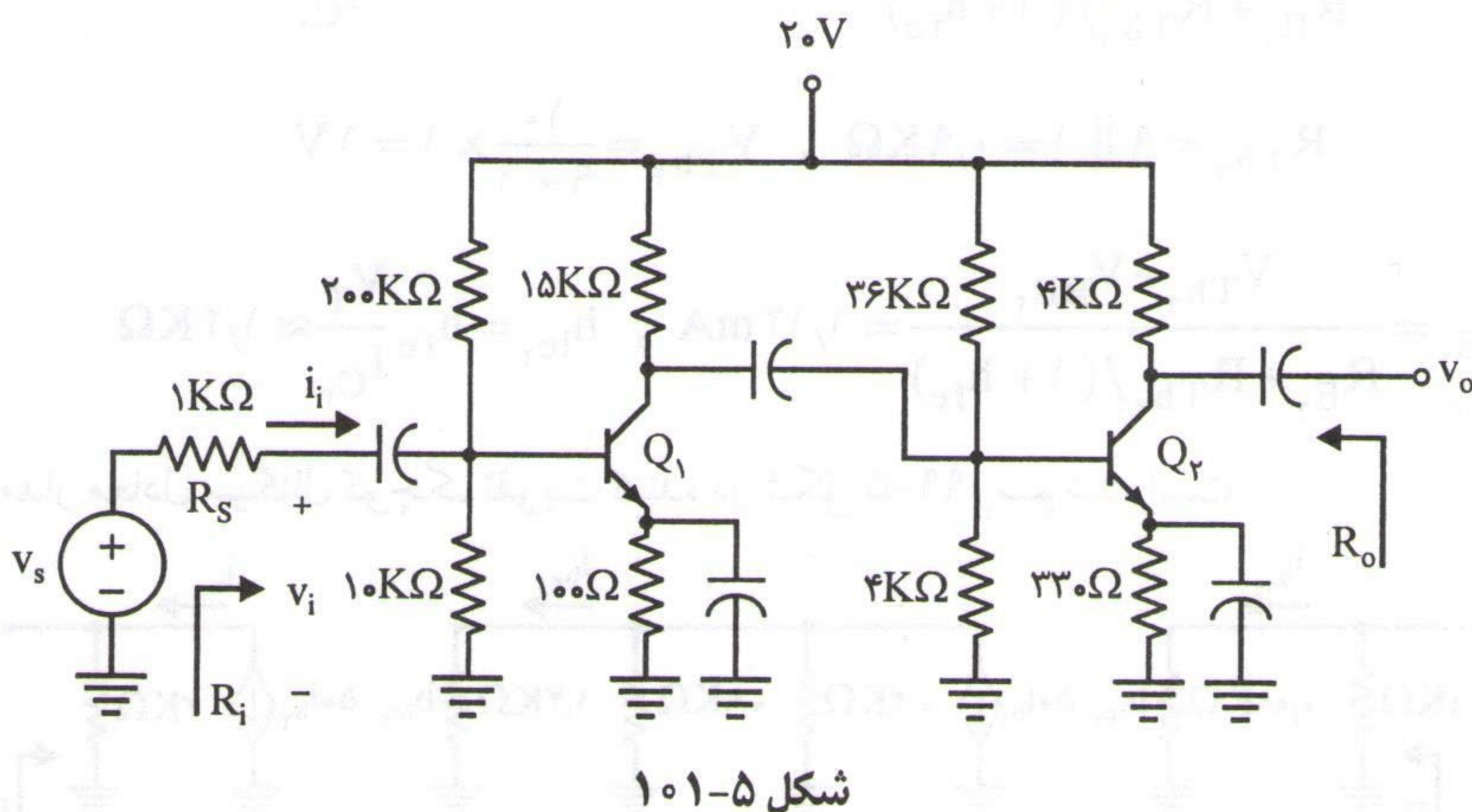
خط بار ac برابر است با

$$v_{CE} - V_{CEQ} = -2(i_C - I_{CQ}) \Rightarrow v_{CE} = -2i_C + 9.7$$

با رسم معادله خط بار ac، حداکثر دامنه نوسان v_{ce} و v_o برابر ۲/۲ ولت می‌باشد (شکل ۵-۱۰۰). با توجه به اینکه بهره تقویت ولتاژ طبقه دوم تقریباً برابر ۸۳ می‌باشد مقدار ۲/۲ ولت دامنه نوسان در خروجی، اشکالی برای طبقه اول ایجاد نخواهد کرد.

شکل ۵-۱۰۰

۳۸. در مدار تقویت‌کننده شکل ۵-۱۰۱ ترانزیستورها مشابه و دارای $h_{fe} = 50$ ، $h_{oe} = 40 K\Omega$ و $h_{re} \approx 0$ هستند. مقادیر A_v ، A_{v_s} ، R_i و R_o را محاسبه کنید.



شکل ۵-۱۰۱

حل: ابتدا با قرار دادن معادل تونن از دید بیس، جریان نقطه کار ترانزیستورها را از مدار DC به دست می‌آوریم.

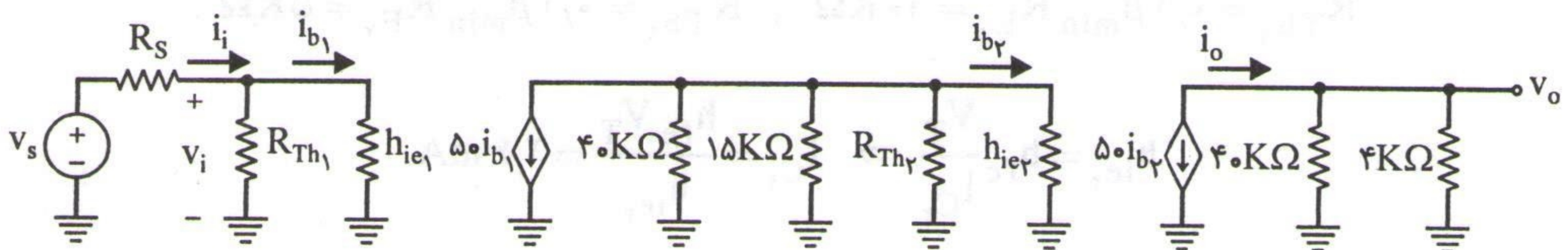
$$R_{Th_1} = 10 \parallel 200 \approx 9.5 K\Omega, \quad V_{Th_1} = \frac{20}{10 + 200} \times 10 = 0.95 \text{ V}$$

$$I_{E_1} = \frac{V_{Th_1} - V_{BE_1}}{R_{E_1} + R_{Th_1}/(1 + h_{fe})} \approx 0.87 \text{ mA} \Rightarrow h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} \approx 1.5 K\Omega$$

$$R_{Th_v} = 36 \parallel 4 = 3.6 K\Omega, \quad V_{Th_v} = \frac{20}{4 + 36} \times 4 = 2V$$

$$I_{E_v} = \frac{V_{Th_v} - V_{BE_v}}{R_{E_v} + R_{Th_v} / (1 + h_{fe})} \approx 3.25 mA \Rightarrow h_{ie_v} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_v}} = 0.4 K\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۱۰۲-۵ خواهد بود.



شکل ۱۰۲-۵

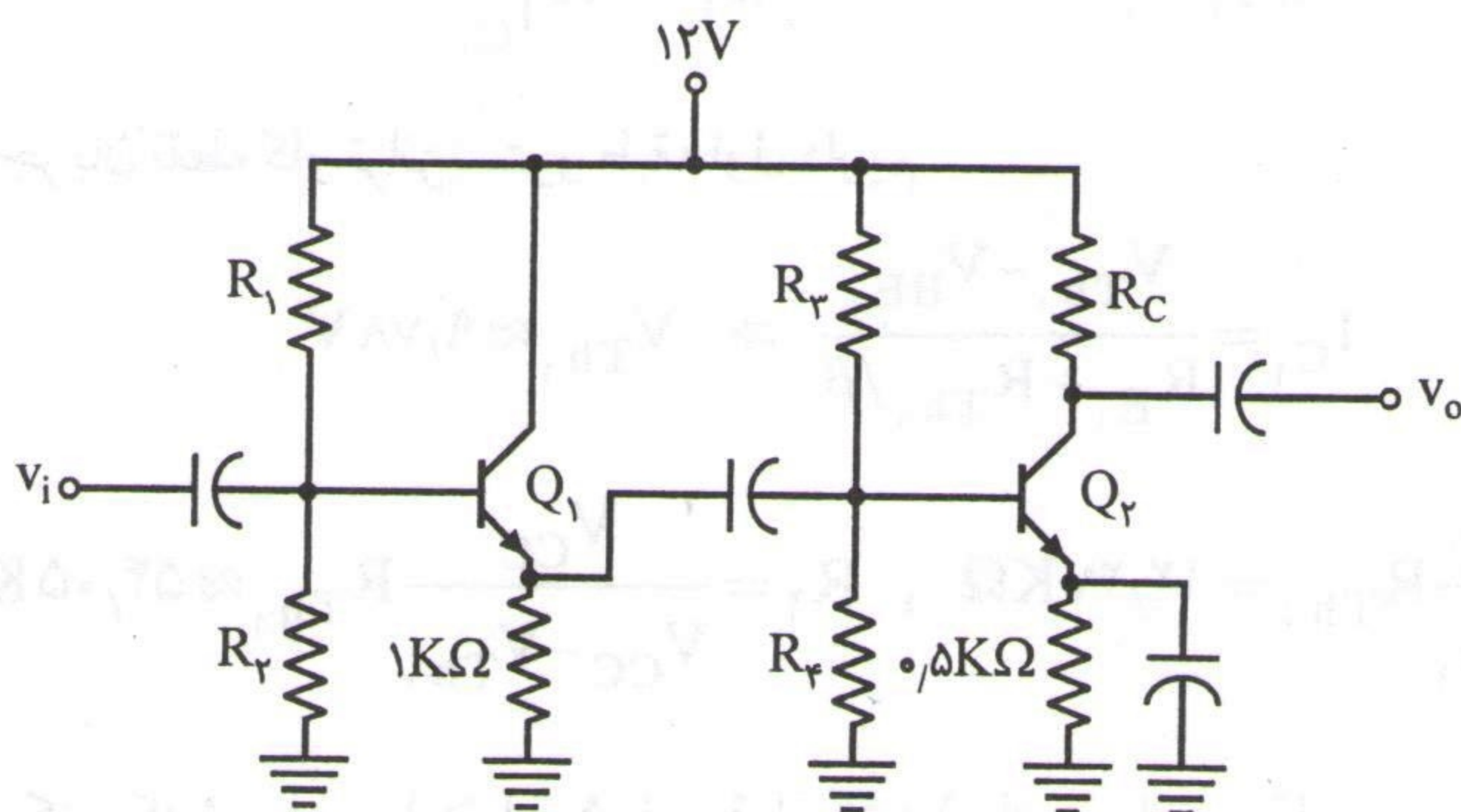
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -50 \cdot (40 \parallel 4) \times (-50) \frac{40 \parallel 15 \parallel R_{Th_v}}{40 \parallel 15 \parallel R_{Th_v} + h_{ie_v}} \times \frac{1}{h_{ie_v}} \approx 5280$$

$$R_i = R_{Th_1} \parallel h_{ie_1} \approx 1.3 K\Omega, \quad A_{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v \approx 2984$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / 4}{v_i / R_i} = \frac{R_i}{4} A_v \approx 1716$$

$$\text{اگر } v_s = 0 \Rightarrow i_{b_1} = i_{b_2} = 0 \Rightarrow R_o = 40 \parallel 4 \approx 3.6 K\Omega$$

۳۹. در تقویت کننده شکل ۱۰۳-۵ برای هر دو ترانزیستور، $h_{fe} = 100$ ، $V_T = 26 mV$ و $V_{BE} = 0.7V$ و برای Q_2 در نقطه کار، $h_{ie_2} = 1 K\Omega$ است. مقادیر R_1, R_2, R_3, R_4, R_C و R_E را طوری تعیین نمایید که هر دو ترانزیستور از پایداری خوب نقطه کار برخوردار بوده و دامنه نوسان متقارن خروجی هر یک حداکثر باشد. همچنین می خواهیم $|A_v| \geq 100$ باشد.



شکل ۱۰۳-۵

حل: ابتدا نقطه کار ترانزیستورها را از حل مدار DC به دست می‌آوریم.

$$R_{Th1} = R_1 \parallel R_2, \quad V_{Th1} = \frac{12R_2}{R_1 + R_2}, \quad R_{Th2} = R_3 \parallel R_4, \quad V_{Th2} = \frac{12R_4}{R_3 + R_4}$$

از شرط پایداری نقطه کار ترانزیستورها نسبت به تغییرات β داریم

$$R_{Th1} = 0.1 \beta_{min} R_{E1} = 10 K\Omega, \quad R_{Th2} = 0.1 \beta_{min} R_{E2} = 5 K\Omega$$

$$h_{ie2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C2}} \Rightarrow I_{C2} = \frac{h_{fe} V_T}{h_{ie2}} = 2.6 mA$$

$$I_{C2} = \frac{V_{Th2} - V_{BE2}}{R_{E2} + R_{Th2}/\beta} = \frac{V_{Th2} - 0.7}{0.55} \Rightarrow V_{Th2} = 2.13 V$$

$$R_3 = \frac{V_{CC}}{V_{Th2}} R_{Th2} \approx 28.17 K\Omega, \quad R_4 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th2}} R_{Th2} \approx 6.08 K\Omega$$

برای اینکه دامنه نوسان در خروجی حداکثر باشد، باید نقطه کار در وسط خط بار ac قرار گیرد. یعنی

$$I_{CQ2} = \frac{V_{CC}}{R_{ac2} + R_{DC2}}, \quad R_{ac2} = R_C, \quad R_{DC2} = R_C + R_{E2}$$

$$\Rightarrow 2.6 = \frac{12}{2R_C + 0.5} \Rightarrow R_C \approx 2.06 K\Omega$$

برای حداکثر دامنه نوسان در طبقه اول، باید داشته باشیم

$$I_{CQ1} = \frac{V_{CC}}{R_{ac1} + R_{DC1}}, \quad R_{ac1} = R_{E1} \parallel R_{Th2} \parallel h_{ie2} = 454 \Omega, \quad R_{DC1} = 1 K\Omega$$

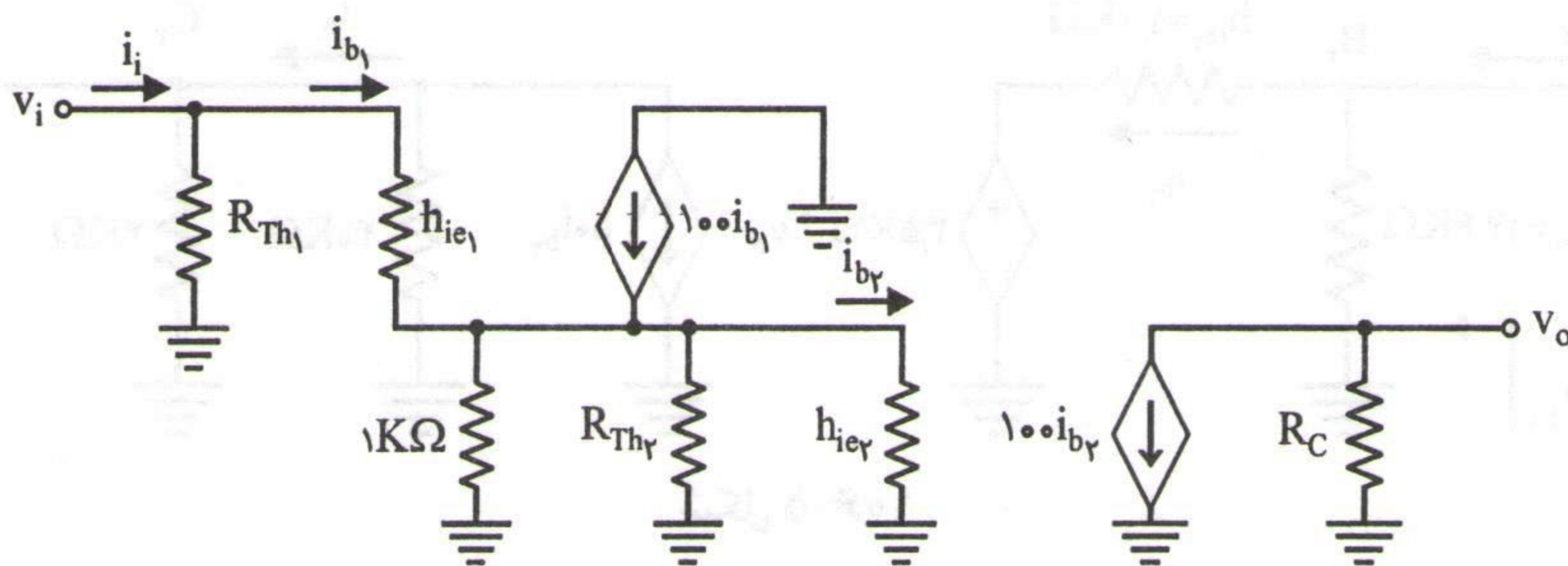
$$\Rightarrow I_{CQ1} = 8.25 mA \Rightarrow h_{ie1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C1}} = 315 \Omega$$

از طرفی برای جریان نقطه کار ترانزیستور طبقه اول داریم

$$I_{C1} = \frac{V_{Th1} - V_{BE1}}{R_{E1} + R_{Th1}/\beta} \Rightarrow V_{Th1} \approx 9.78 V$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th1}} R_{Th1} = 12.27 K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th1}} R_{Th1} \approx 54.05 K\Omega$$

حال بررسی می‌کنیم که شرط $|A_v| \geq 100$ برقرار باشد (برای محاسبه مقادیر مجهول نیازی به استفاده از این شرط نبود). مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۱۰۴ رسم شده است.



شکل ۵-۴

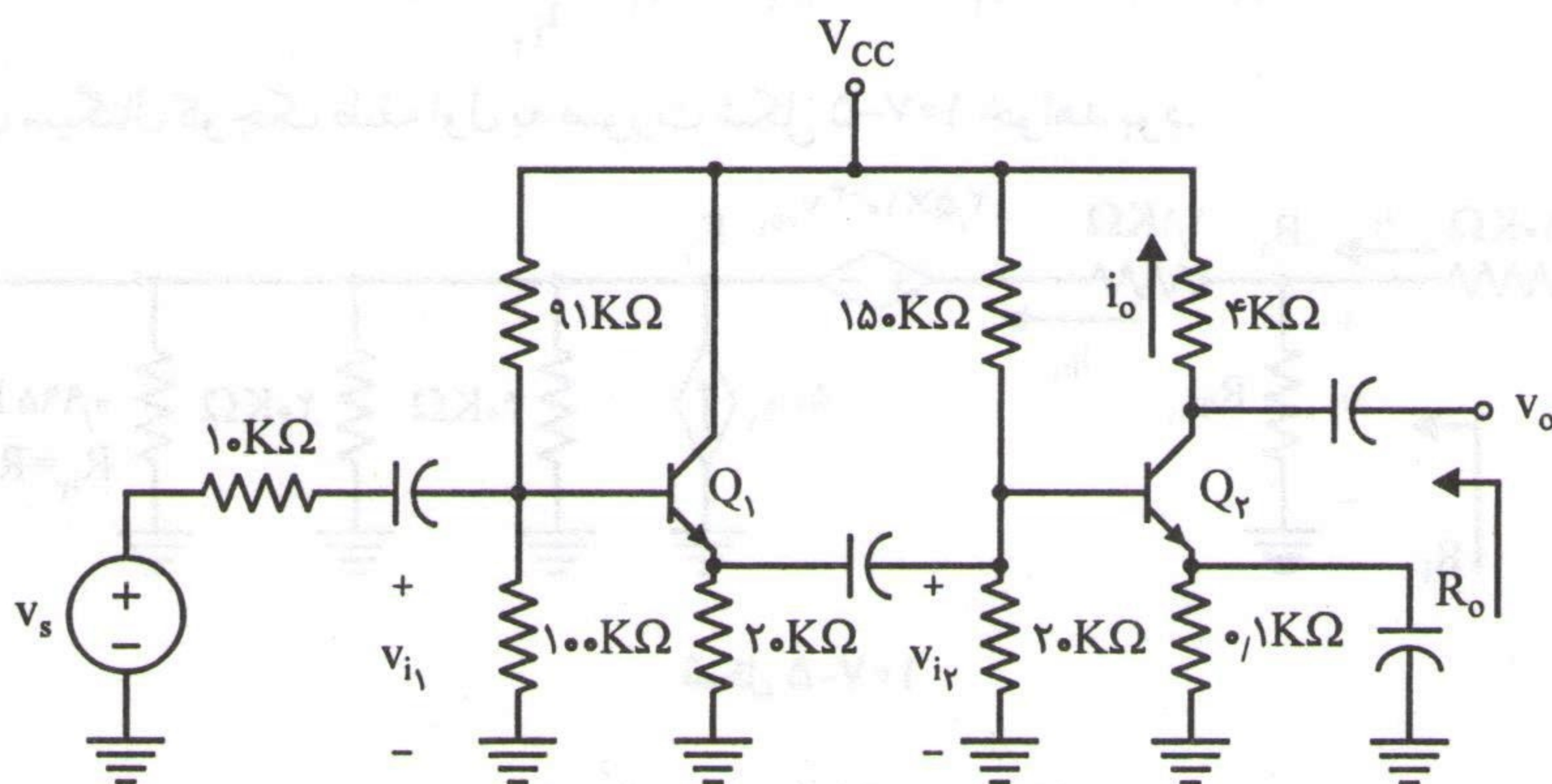
$$v_o = -100 \cdot i_{b2} \times R_C = -20.6 i_{b2}, \quad i_{b2} = (10 \cdot i_{b1}) \frac{1 \parallel R_{Th2}}{1 \parallel R_{Th2} + h_{ie2}} = 45.9 i_{b1}$$

$$i_{b1} = \frac{v_i}{h_{ie1} + (1 + h_{fe})(1 \parallel R_{Th2} \parallel h_{ie2})} = 0.216 v_i \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx -20.42$$

ملاحظه می شود که شرط $|A_v| \geq 100$ با مقادیر به دست آمده برقرار است.

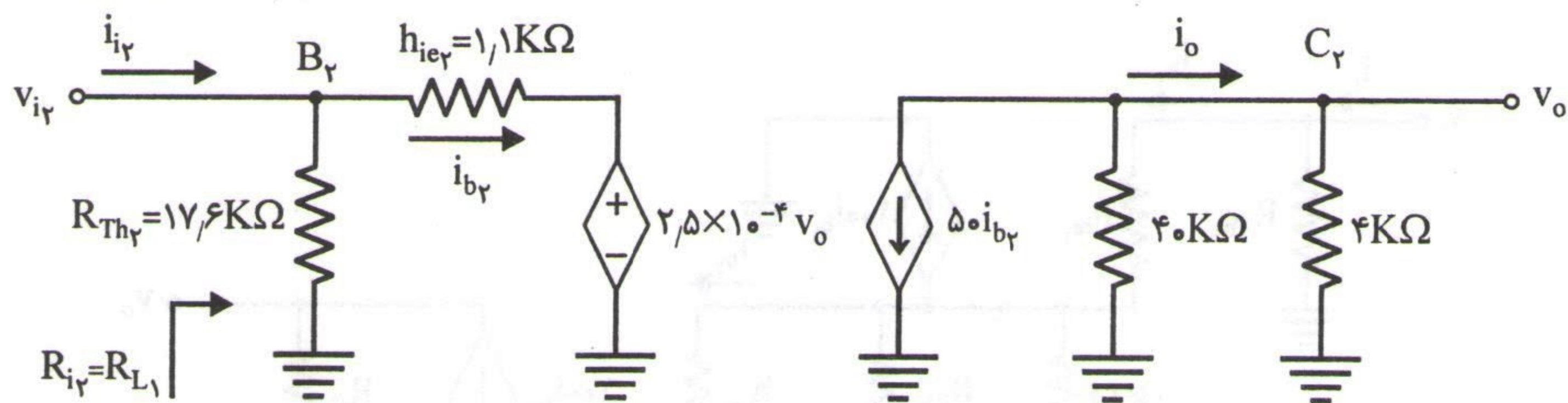
■

۴۰. در تقویت کننده شکل ۵-۱۰۵ مقاومت های ورودی و خروجی و بهره ولتاژ و جریان را محاسبه نمایید. ترانزیستورها دارای $h_{ie} = 1.1 K\Omega$, $h_{re} = 2.5 \times 10^{-4}$, $h_{oe} = 40 K\Omega$ و $h_{fe} = 50$ و $V_{BE} = 0.7V$ هستند.



شکل ۵-۱۰۵

حل: بهره ولتاژ هر طبقه را جداگانه به دست آورده و از حاصل ضرب آنها بهره ولتاژ کلی به دست می آید. در محاسبه بهره ولتاژ طبقه اول باید دقت داشت که مقاومت ورودی طبقه دوم به عنوان بار برای طبقه اول در نظر گرفته می شود. مدار معادل سیگنال کوچک طبقه دوم در شکل ۵-۱۰۶ رسم شده است.



شکل ۵-۱۰۶

$$R_{Th_r} = 20 \parallel 150 = 17.6 K\Omega$$

$$v_o = (-0.5 i_{b_r})(40 \parallel 4) = -181.82 i_{b_r} \quad \text{محاسبه } A_{v_r}$$

$$= -181.82 [v_{i_r} - 2.5 \times 10^{-4} v_o] / h_{ie_r} \Rightarrow A_{v_r} = \frac{v_o}{v_{i_r}} = -172.4$$

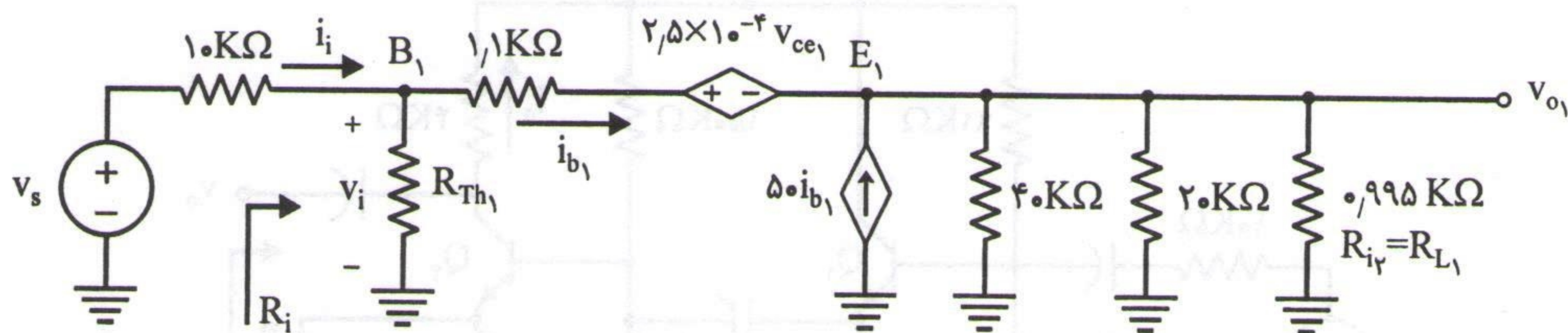
حال مقاومت بار طبقه اول (یعنی R_{i_r}) را محاسبه می‌کنیم.

$$i_{i_r} = \frac{v_{i_r}}{17.6} + i_{b_r} = \frac{v_{i_r}}{17.6} + (v_{i_r} - 2.5 \times 10^{-4} v_o) / 1.1$$

$$= \frac{v_{i_r}}{17.6} + (v_{i_r} - 2.5 \times 10^{-4} A_{v_r} v_{i_r}) / 1.1$$

$$\Rightarrow i_{i_r} = 1.005 v_{i_r} \Rightarrow R_{L_1} = R_{i_r} = \frac{v_{i_r}}{i_{i_r}} = 0.995 K\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک طبقه اول به صورت شکل ۵-۱۰۷ خواهد بود.



شکل ۵-۱۰۷

$$R_{Th_1} = 91 \parallel 100 = 47.6$$

محاسبه A_{v_1} :

$$v_{o_1} = (0.5 i_{b_1} + i_{b_1}) [20 \parallel 0.995 \parallel 40] = 47.22 i_{b_1}$$

$$= 47.22 [v_i - (2.5 \times 10^{-4} v_{ce_1} + v_{o_1})] / h_{ie_1}, \quad v_{ce_1} = -v_{o_1}$$

$$\Rightarrow A_{v_1} = \frac{v_{o_1}}{v_i} \approx 0.98$$

بنابراین بهره ولتاژ تقویت کننده برابر است با

$$A_v = A_{v_1} A_{v_2} = -168.95$$

مقاومت ورودی را نیز می توان از مدار فوق محاسبه کرد.

$$\text{KCL B: } i_i = \frac{v_i}{R_{Th_1}} + i_{b_1}, \quad i_{b_1} = \frac{v_{o_1}}{47.22}, \quad v_{o_1} = A_{v_1} v_i$$

$$\Rightarrow i_i = \left(\frac{1}{R_{Th_1}} + \frac{A_{v_1}}{47.22} \right) v_i \Rightarrow R_i = \frac{v_i}{i_i} \approx 23.95 \text{ K}\Omega$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_v \approx -119$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o/4}{v_i/R_i} = \frac{R_i}{4} A_v = -1011.6$$

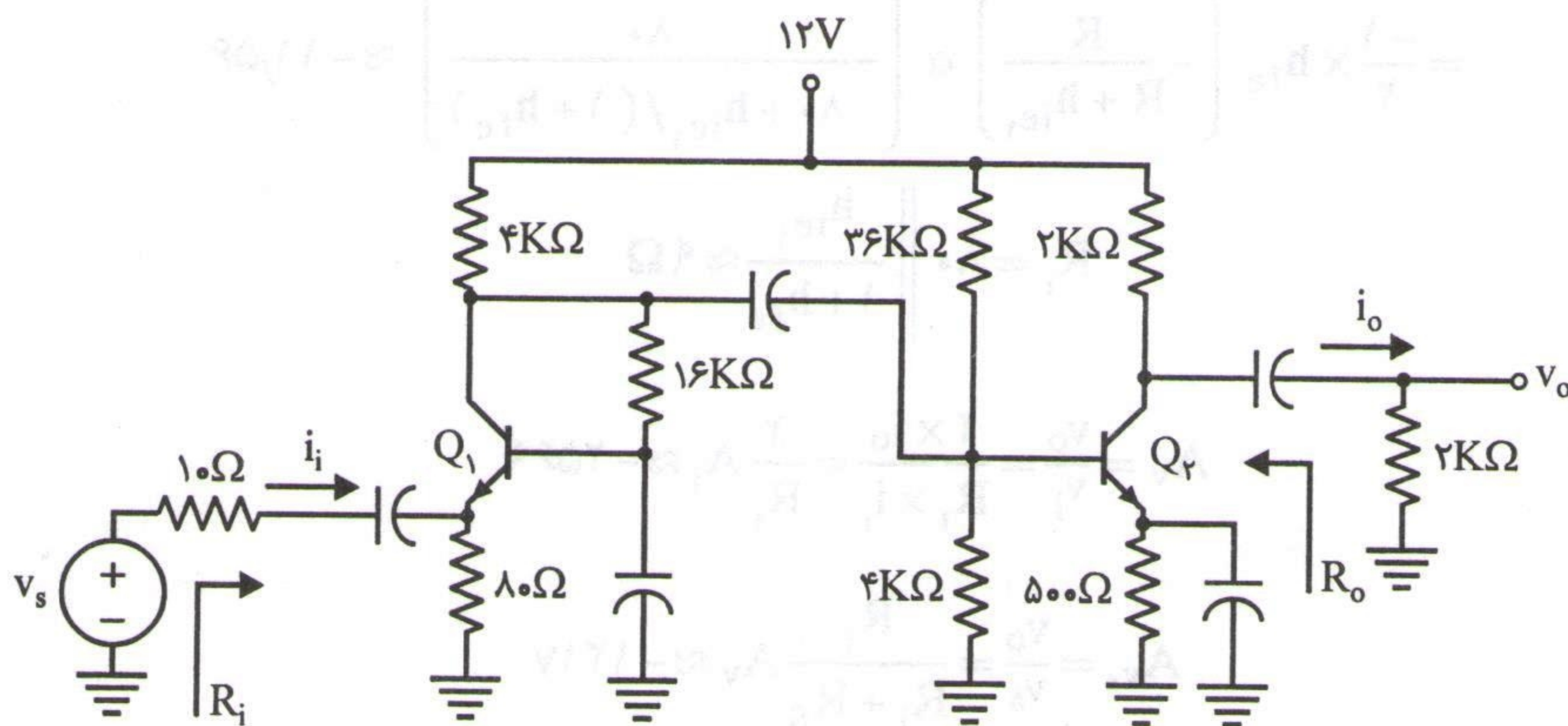
مقاومت خروجی R_o برابر است با مقاومت خروجی طبقه دوم یعنی،

$$R_o = R_{o_2} = 4 \parallel 40 = 3.64 \text{ K}\Omega$$

۴۱. در مدار تقویت کننده شکل ۵-۱۰۸ ترانزیستورها دارای $V_T = 26 \text{ mV}$ و $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ و $h_{fe} = 50$ هستند.

الف) نقطه کار هر یک از ترانزیستورها را تعیین کنید.

ب) مقادیر A_v ، A_{v_s} ، A_i و R_o را محاسبه نمایید.



شکل ۵-۱۰۸

حل: با نوشتن KVL در مدار DC ترانزیستور Q_1 ، جریان نقطه کار آن را به دست می آوریم.

$$12 = 4(I_{B_1} + I_{C_1}) + 16 I_{B_1} + V_{BE_1} + 0.08 I_{E_1} \Rightarrow I_{E_1} = 2.57 \text{ mA}$$

$$I_{C_1} = \alpha I_{E_1} = 2.52 \text{ mA}, \quad h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} \approx 516 \Omega$$

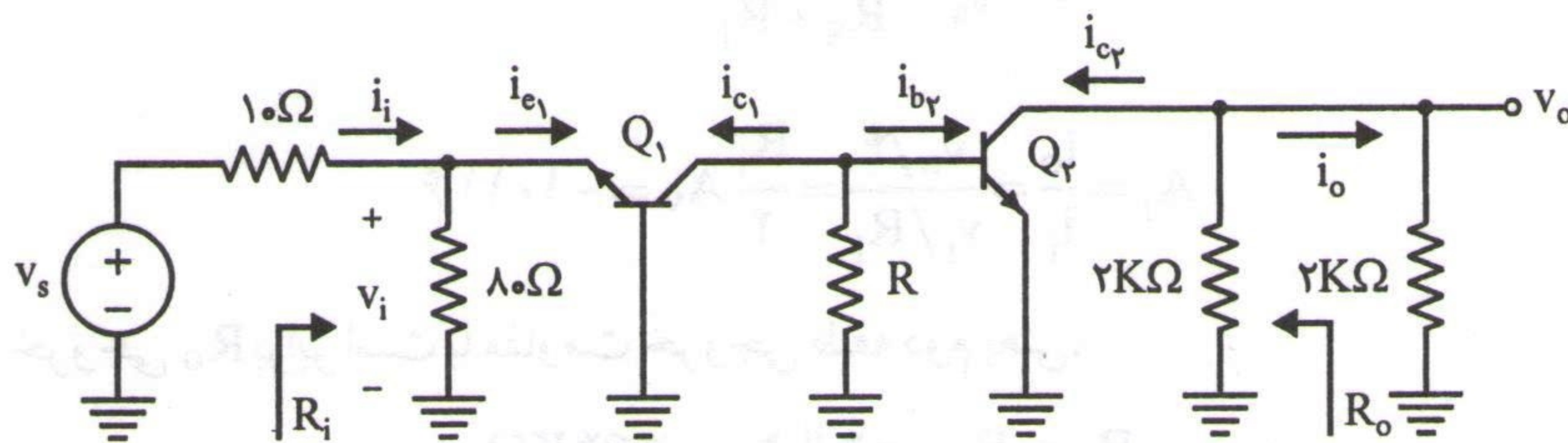
با به دست آوردن معادل تونن از دید بیس ترانزیستور Q_2 ، جریان نقطه کار آن را محاسبه می‌کنیم.

$$R_{Th_2} = 36 \parallel 4 = 3.6 \text{ K}\Omega, \quad V_{Th_2} = \frac{12}{36+4} \times 4 = 1.2 \text{ V}$$

$$V_{Th_2} = R_{Th_2} I_{B_2} + V_{BE_2} + 0.5 I_{E_2} \Rightarrow I_{E_2} \approx 0.88 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_{C_2} = \alpha I_{E_2} \approx 0.86 \text{ mA}, \quad h_{ie_2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_2}} \approx 1.5 \text{ K}\Omega$$

مدار معادل ac این تقویت کننده در شکل ۵-۱۰۹ رسم شده است.



شکل ۵-۱۰۹

$$R = 16 \parallel 4 \parallel R_{Th_2} \approx 1.7 \text{ K}\Omega$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_o}{i_{c_2}} \times \frac{i_{c_2}}{i_{b_2}} \times \frac{i_{b_2}}{i_{c_1}} \times \frac{i_{c_1}}{i_{e_1}} \times \frac{i_{e_1}}{i_i}$$

محاسبه A_i :

$$= -\frac{1}{2} \times h_{fe} \left(-\frac{R}{R + h_{ie_2}} \right) \alpha \left(-\frac{80}{80 + h_{ie_1} / (1 + h_{fe})} \right) \approx -11.56$$

$$R_i = 80 \parallel \frac{h_{ie_1}}{1 + h_{fe}} \approx 9 \Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{2 \times i_o}{R_i \times i_i} = \frac{2}{R_i} A_i \approx -2569$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v \approx -1217$$

برای محاسبه R_o ، اگر منبع سیگنال ورودی را صفر کنیم با توجه به اینکه طبقه دوم دارای مقاومت امیتر نمی‌باشد داریم

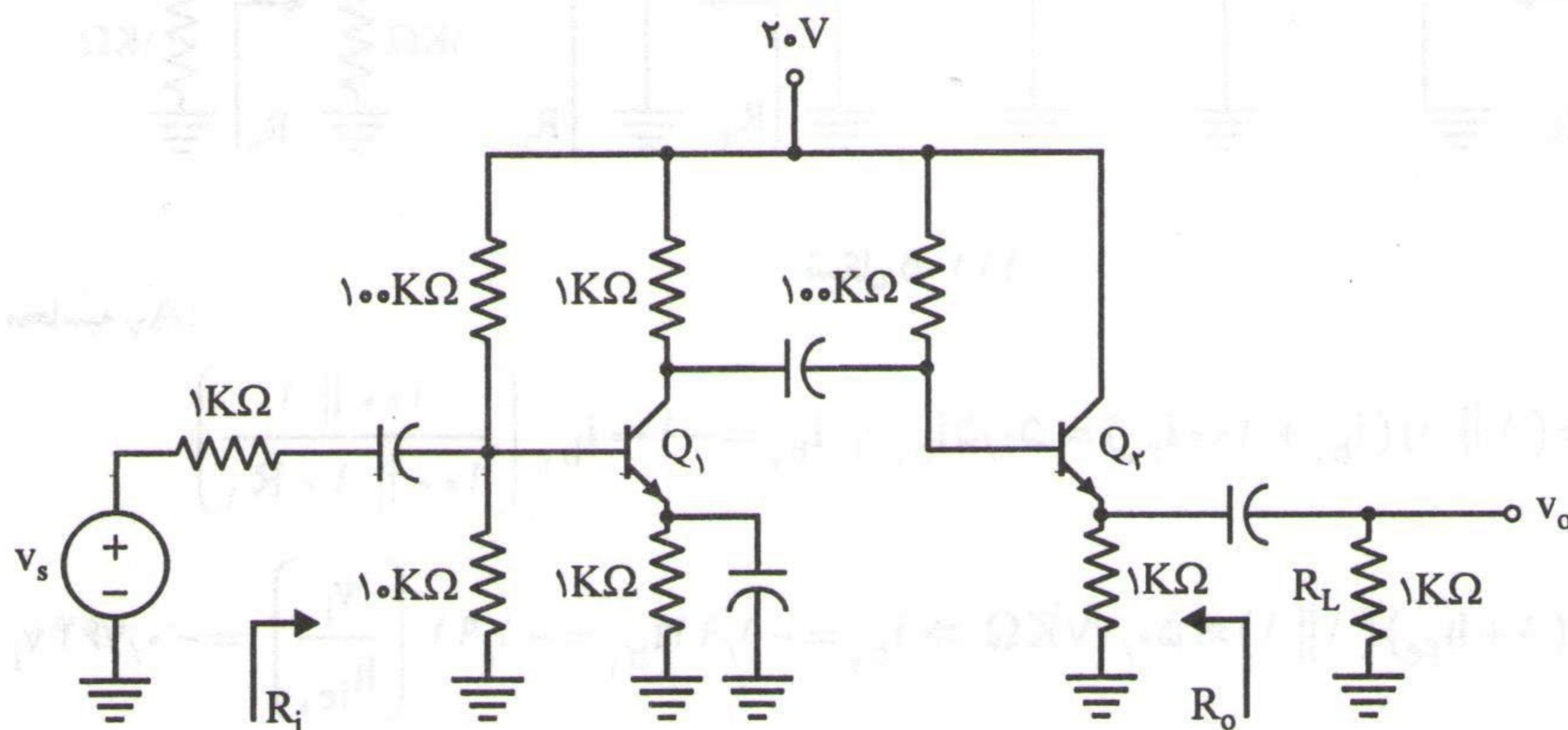
$$R_o = R_{o_2} = 2 \text{ K}\Omega$$

۴۲. در تقویت‌کننده دو طبقه شکل ۵-۱۱۰ ترانزیستورها را مشابه و با $h_{fe} = 100$ ، $V_T = 26 \text{ mV}$ و $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ فرض کنید.

الف) نقطه کار ترانزیستورها را به دست آورید.

ب) بهره ولتاژ و جریان و مقاومت ورودی و خروجی را به دست آورید.

ج) حداکثر دامنه نوسان متقارن برای V_{CE1} ، V_{CE2} و ولتاژ ورودی را محاسبه کنید.



شکل ۵-۱۱۰

حل: الف) با قرار دادن معادل تونن بیس Q_1 ، جریان نقطه کار ترانزیستورها را از مدار DC به دست می‌آوریم.

$$R_{Th1} = 100 \parallel 10 \approx 9.1 \text{ k}\Omega, \quad V_{Th1} = \frac{20}{100 + 10} \times 10 \approx 1.82 \text{ V}$$

$$I_{C1} \approx I_{E1} = \frac{V_{Th1} - V_{BE1}}{R_{E1} + R_{Th1} / (1 + h_{fe})} \approx 1.3 \text{ mA}$$

$$V_{CE1} \approx 20 - (1 + 1) I_{E1} = 17.94 \text{ V}$$

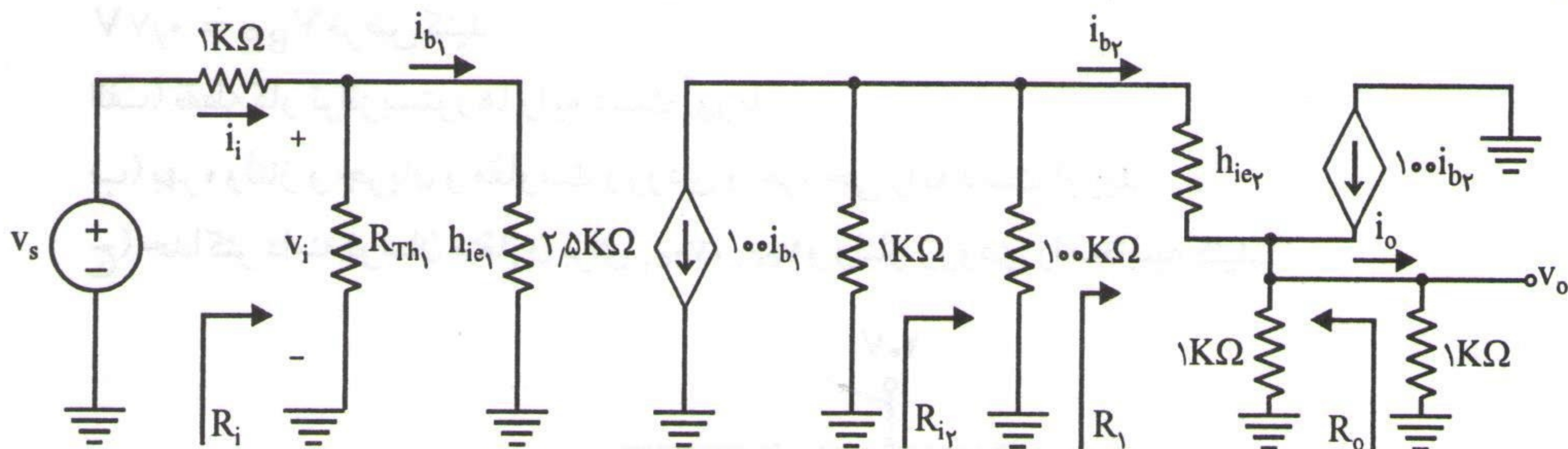
$$h_{ie1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C1}} \approx 2.5 \text{ k}\Omega$$

$$I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{Th2} - V_{BE2}}{R_{E2} + R_{Th2} / (1 + h_{fe})} \approx 0.7 \text{ mA}$$

$$V_{CE2} = 20 - 1 \times I_{E2} = 19.3 \text{ V}$$

$$h_{ie2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C2}} \approx 0.268 \text{ k}\Omega$$

ب) مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۱۱۱ خواهد بود.



شکل ۵-۱۱۱

محاسبه A_v :

$$v_o = (1 \parallel 1)(i_{b_2} + 100i_{b_1}) = 0.5i_{b_2}, \quad i_{b_2} = -100i_{b_1} \left(\frac{100 \parallel 1}{100 \parallel 1 + R_1} \right)$$

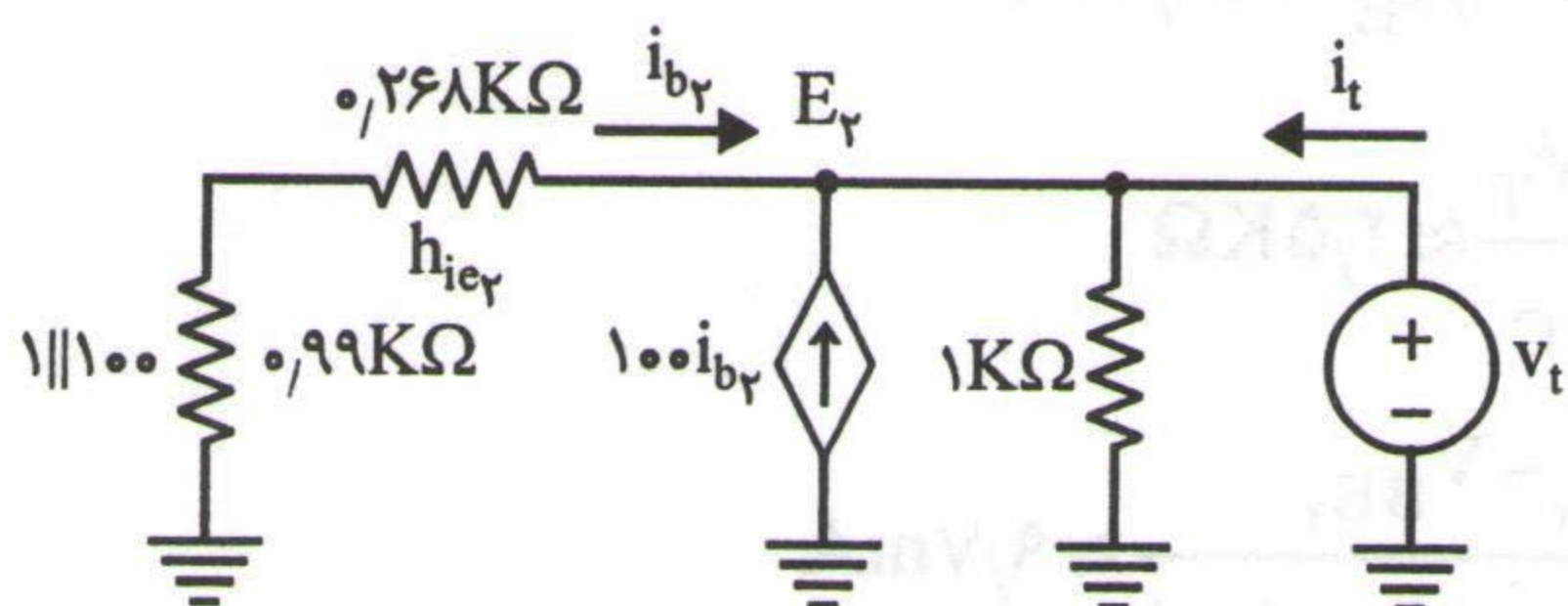
$$R_1 = h_{ie_2} + (1 + h_{fe})(1 \parallel 1) \approx 5.77K\Omega \Rightarrow i_{b_2} = -1/91 i_{b_1} = -1/91 \left(\frac{v_i}{h_{ie_1}} \right) = -0.764 v_i$$

$$\Rightarrow v_o \approx -38.6 v_i \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = -38.6$$

$$R_i = R_{Th_1} \parallel h_{ie_1} \approx 2K\Omega$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_v \approx -25.7$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / 1}{v_i / R_i} = 2 A_v = -77.2$$



شکل ۵-۱۱۲

برای محاسبه R_o ، منبع ورودی را حذف می‌کنیم و یک منبع آزمایشی v_t در خروجی قرار می‌دهیم؛ در نتیجه طبقه اول حذف شده و مدار شکل ۵-۱۱۲ حاصل می‌شود.

$$\text{KVL: } v_t = -(h_{ie_2} + 0.99) i_{b_2} \Rightarrow i_{b_2} = -0.795 v_t$$

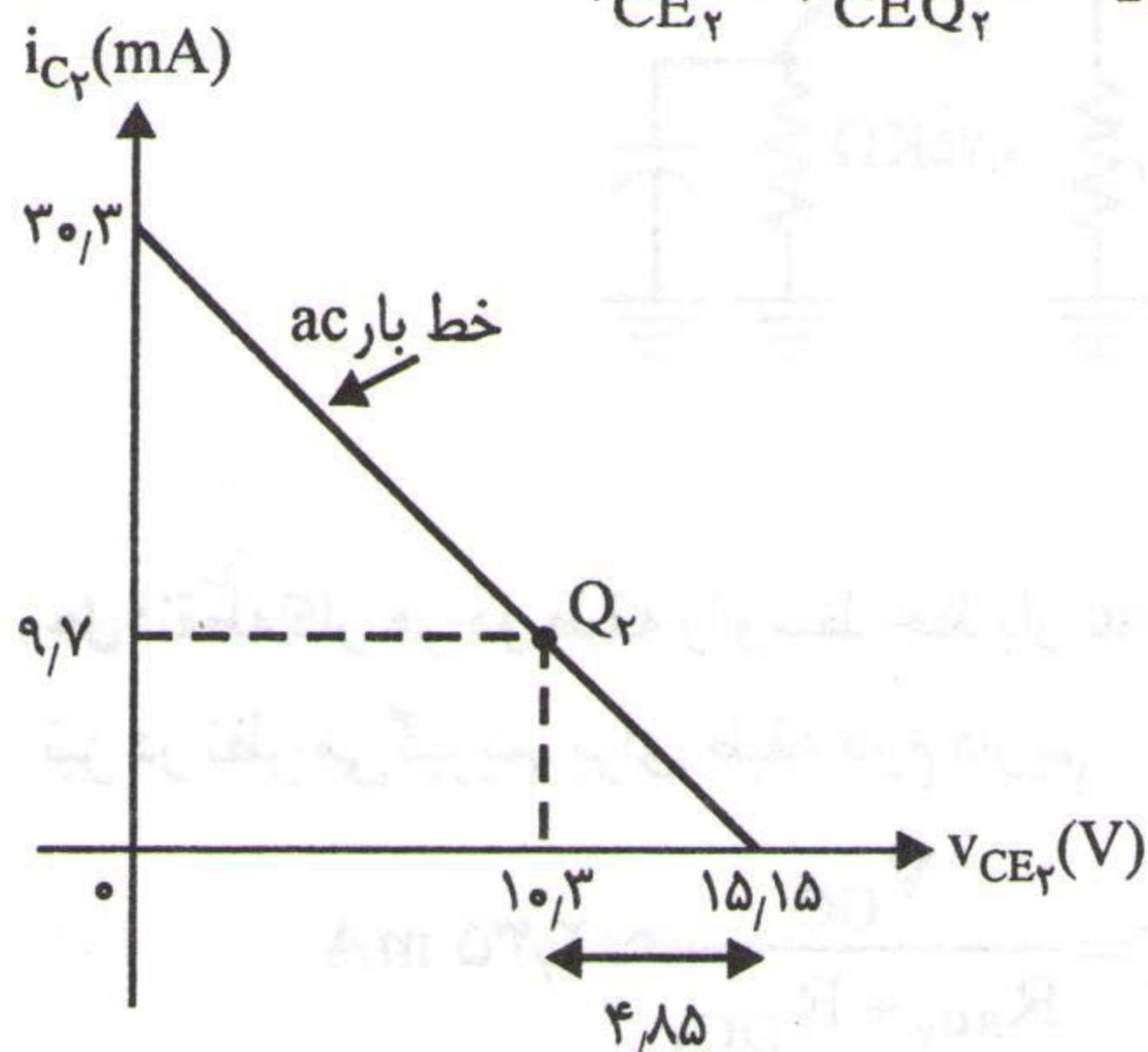
$$\text{KCL } E_2: i_{b_2} + 100i_{b_2} + i_t = \frac{v_t}{1} \Rightarrow R_o = \frac{v_t}{i_t} \approx 12.3\Omega$$

ج) با توجه به اینکه طبقه دوم آمیتر فالوئر می باشد، حداکثر دامنه نوسان متقارن توسط طبقه اول تعیین می گردد. برای روشن شدن مطلب، حداکثر دامنه نوسان متقارن را برای هر دو طبقه به دست می آوریم.

$$Q_2 (9.7 \text{ mA} , 10.3 \text{ V}) , R_{ac_2} = 1 \parallel 1 = 0.5 \text{ K}\Omega$$

با توجه به نقطه کار Q_2 ، معادله خط بار ac برابر است با

$$v_{CE_2} - V_{CE_{Q_2}} = -R_{ac_2} (i_{C_2} - I_{C_{Q_2}}) \Rightarrow v_{CE_2} = -0.5 i_{C_2} + 15.15$$



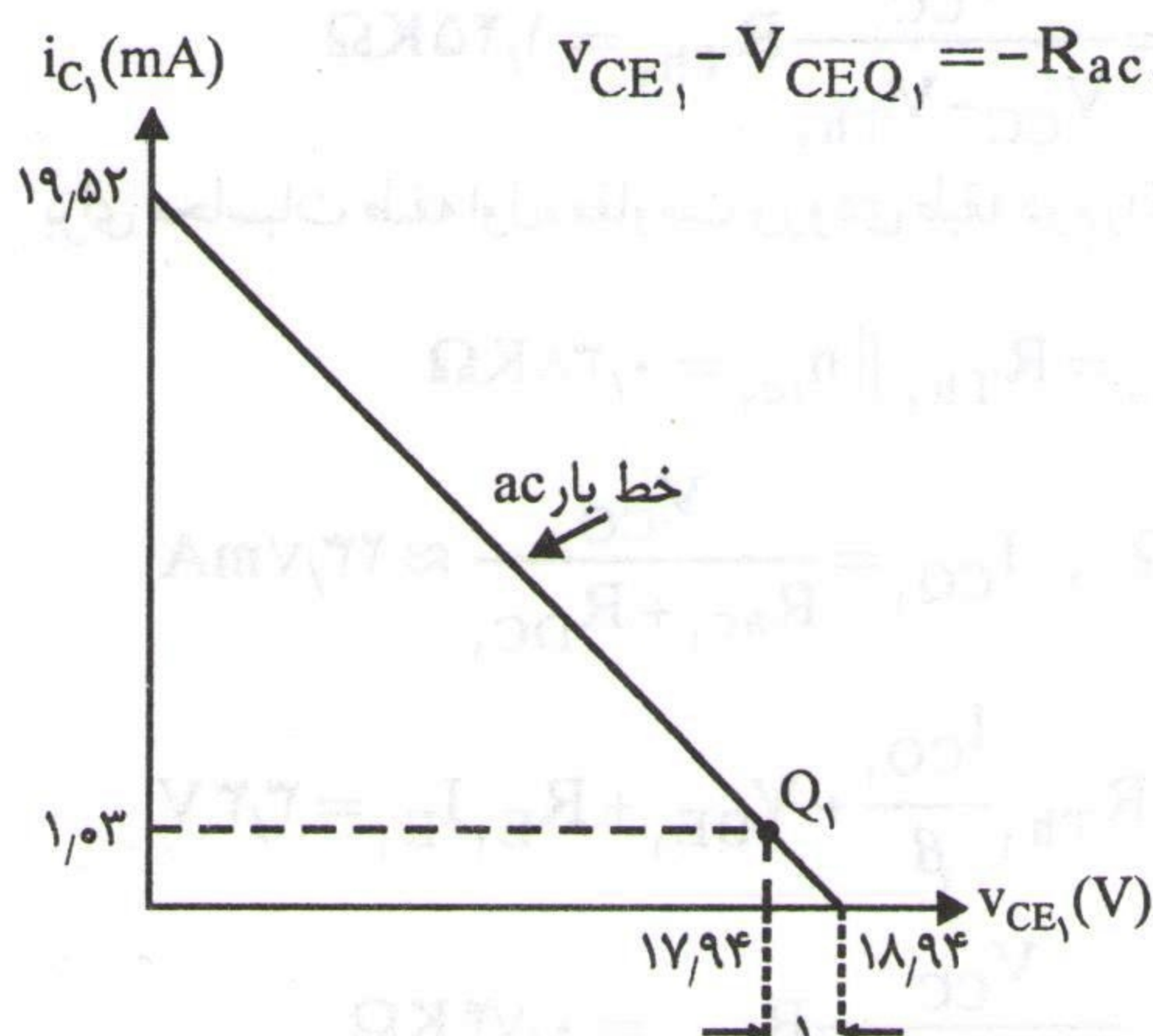
معادله خط بار ac در شکل ۱۱۳-۵ رسم شده است. با توجه به این شکل حداکثر دامنه نوسان متقارن v_{ce_2} برابر ۴/۸۵ ولت می باشد. حال معادله خط بار ac طبقه اول را به دست می آوریم.

$$R_{i_2} = 100 \parallel [h_{ie_2} + (1 + h_{fe})(1 \parallel 1)] = 33.67 \text{ K}\Omega$$

$$R_{ac_1} = R_{i_2} \parallel 1 \approx 0.97 \text{ K}\Omega$$

با توجه به نقطه کار $Q_1 (1.03 \text{ mA} , 17.94 \text{ V})$ ، معادله خط بار ac برای ترانزیستور Q_1 برابر است با

شکل ۱۱۳-۵

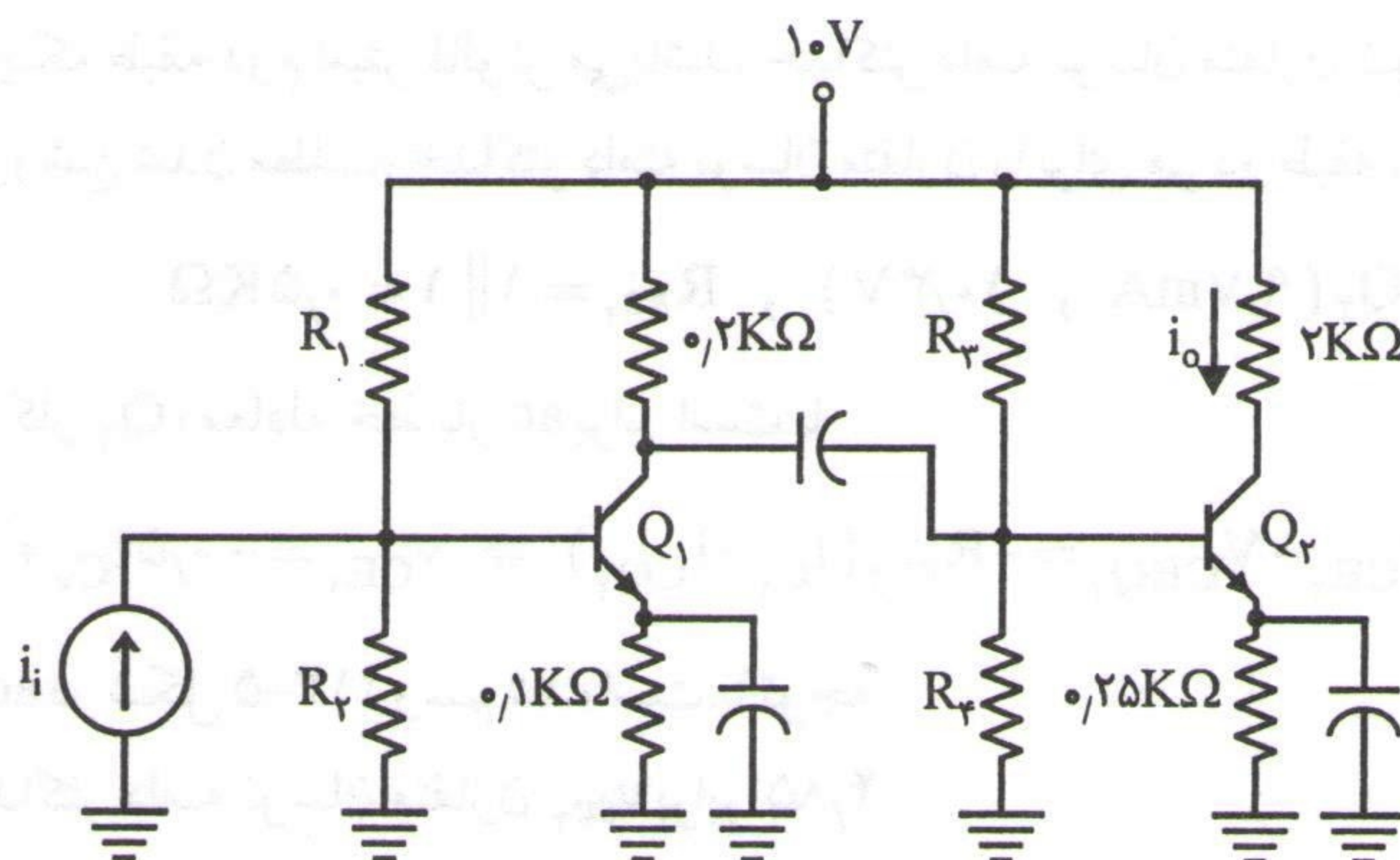


شکل ۱۱۴-۵

با توجه به شکل ۱۱۴-۵ حداکثر دامنه نوسان متقارن v_{ce_1} برابر ۱ ولت است. از آنجا که بهره طبقه دوم تقریباً برابر ۱ می باشد پس حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی تقریباً همان مقدار ۱ ولت خواهد بود. همچنین برای حداکثر دامنه نوسان ورودی داریم

$$v_{s,max} = \left| \frac{v_{o,max}}{A_{v_s}} \right| \approx 38.9 \text{ mV}$$

۴۳. در تقویت کننده دو طبقه شکل ۱۱۵-۵ مقادیر مقاومت های مجهول را چنان تعیین کنید که جریان i_o دارای حداکثر دامنه نوسان متقارن گردد. تحت این شرایط بهره جریان را محاسبه کنید. ترانزیستورها دارای $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ و $V_T = 26 \text{ mV}$ ، $h_{fe} = 50$ می باشند.



شکل ۵-۱۱۵

حل: نقطه کار هر دو طبقه را وسط خط بار ac انتخاب نموده و شرط پایداری نقطه کار نسبت به تغییرات β را نیز در نظر می‌گیریم. برای طبقه دوم داریم

$$R_{ac_2} = 2K\Omega, R_{DC_2} = 2.25K\Omega, I_{CQ_2} = \frac{V_{CC}}{R_{ac_2} + R_{DC_2}} \approx 2.35 \text{ mA}$$

$$R_{Th_2} = 0.1\beta R_{E_2} = 1.25K\Omega, V_{Th_2} = R_{Th_2} I_{CQ_2} / \beta + V_{BE_2} + R_{E_2} I_{E_2} = 1.35 \text{ V}$$

$$R_3 = \frac{V_{CC}}{V_{Th_2}} R_{Th_2} = 9.26K\Omega, R_4 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th_2}} R_{Th_2} = 1.45K\Omega$$

برای محاسبات طبقه اول، مقاومت ورودی طبقه دوم را که به عنوان مقاومت بار برای طبقه اول است، به دست می‌آوریم.

$$h_{ie_2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_2}} = 0.553K\Omega, R_{i_2} = R_{Th_2} \parallel h_{ie_2} = 0.38K\Omega$$

$$R_{ac_1} = 0.2 \parallel R_{i_2} \approx 0.13K\Omega, R_{DC_1} = 0.3K\Omega, I_{CQ_1} = \frac{V_{CC}}{R_{ac_1} + R_{DC_1}} \approx 23.7 \text{ mA}$$

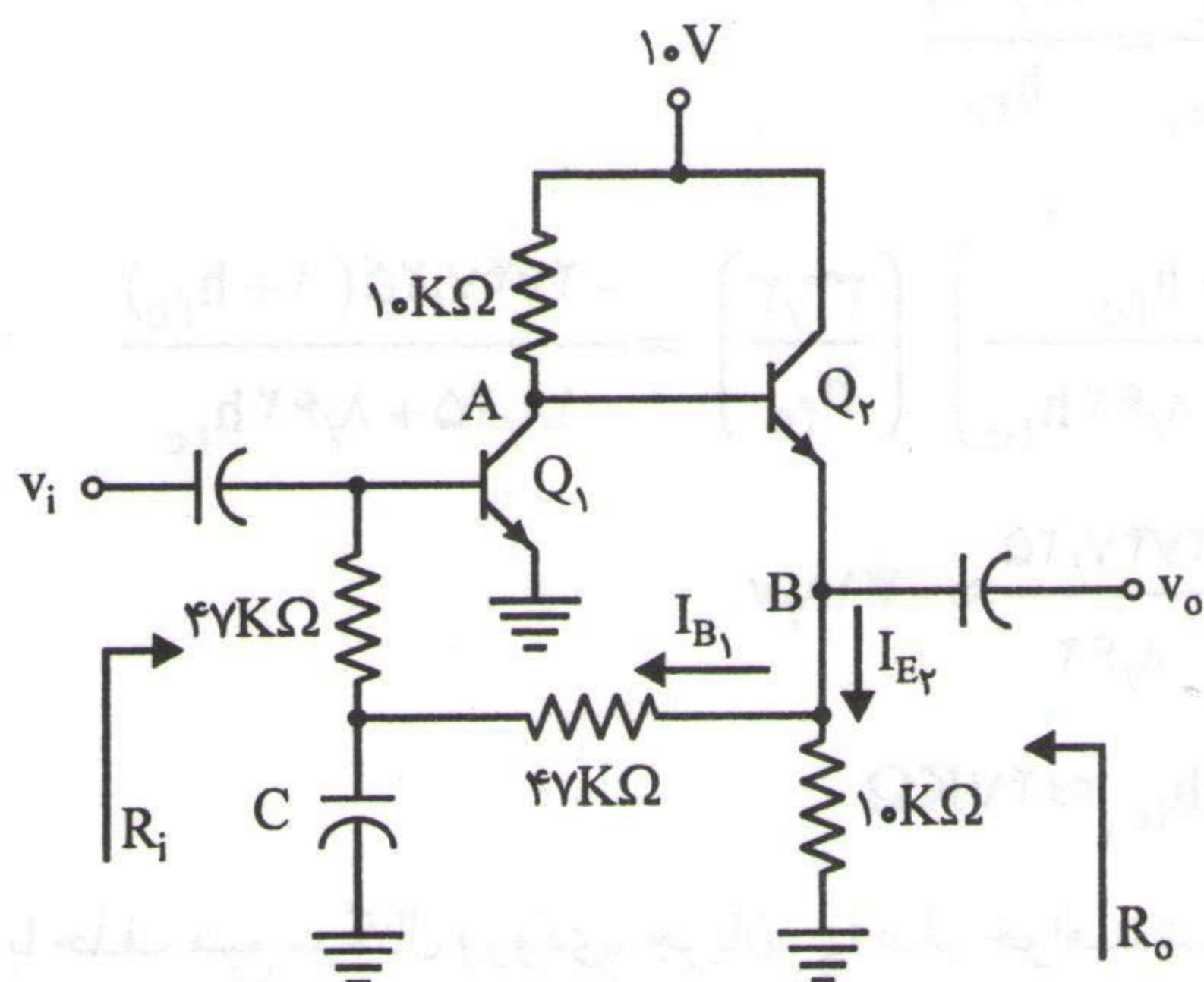
$$R_{Th_1} = 0.1\beta R_{E_1} = 0.5K\Omega, V_{Th_1} = R_{Th_1} \frac{I_{CQ_1}}{\beta} + V_{BE_1} + R_{E_1} I_{E_1} = 3.3 \text{ V}$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th_1}} R_{Th_1} \approx 1.5K\Omega, R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th_1}} R_{Th_1} = 0.74K\Omega$$

$$h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} = 0.55K\Omega$$

$$i_o = h_{fe} i_{b_2} = 50 i_{b_2}, i_{b_2} = -h_{fe} i_{b_1} \frac{0.2 \parallel R_{Th_2}}{0.2 \parallel R_{Th_2} + h_{ie_2}} = -11.88 i_{b_1} : A_i \text{ محاسبه}$$

$$i_{b_1} = i_i \left(\frac{R_{Th_1}}{R_{Th_1} + h_{ie_1}} \right) = 0.9 i_i \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = -534.6$$



شکل ۱۱۶-۵

۴۴. برای مقادیر بسیار بزرگ β و $V_{BE} = 0.7V$ ولتاژ DC نقاط A و B شکل ۱۱۶-۵ را به دست آورید. بهره ولتاژ و مقاومتهای ورودی و خروجی را برای حالتی زیر محاسبه کنید. (الف) مدار را مطابق شکل ۱۱۵-۵ در نظر بگیرید. (ب) خازن C را حذف نمایید. (ج) برای بند (الف) حداکثر دامنه نوسان بدون اعوجاج خروجی چقدر خواهد بود؟

حل: (الف) با فرض β بزرگ، از جریانهای بیس می توان صرف نظر کرد. بنابراین

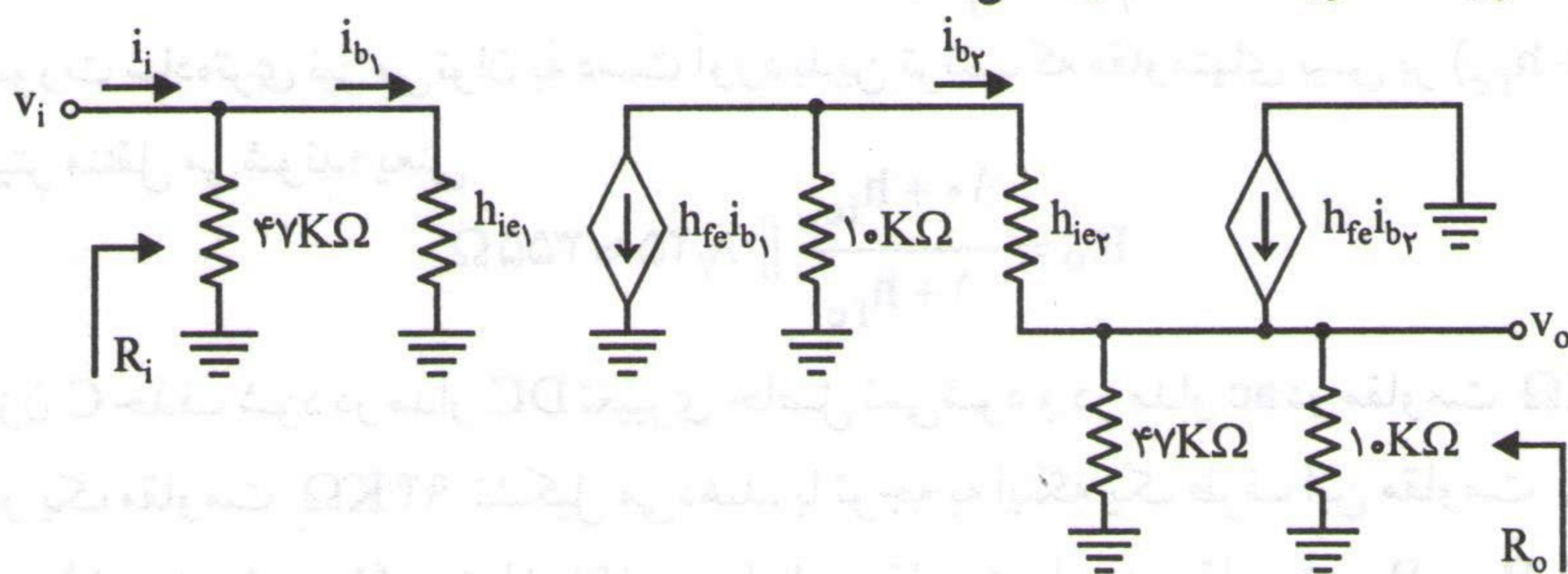
$$V_B = V_{E_2} = V_{B_1} = 0.7V \Rightarrow I_{E_2} \approx \frac{V_{E_2}}{10} = 0.07mA$$

$$V_A = V_{C_1} = V_{B_2} = V_{E_2} + 0.7 = 1.4V$$

$$I_{C_1} \approx \frac{10 - V_A}{10} = 0.86mA$$

$$h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} = 0.3h_{fe}, \quad h_{ie_2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_2}} = 0.37h_{fe}$$

مدل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۱۱۷-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۱۷-۵

$$v_o = (10 \parallel 47)(1 + h_{fe})i_{b_2} = 8.25(1 + h_{fe})i_{b_2} \quad \text{محاسبه } A_v:$$

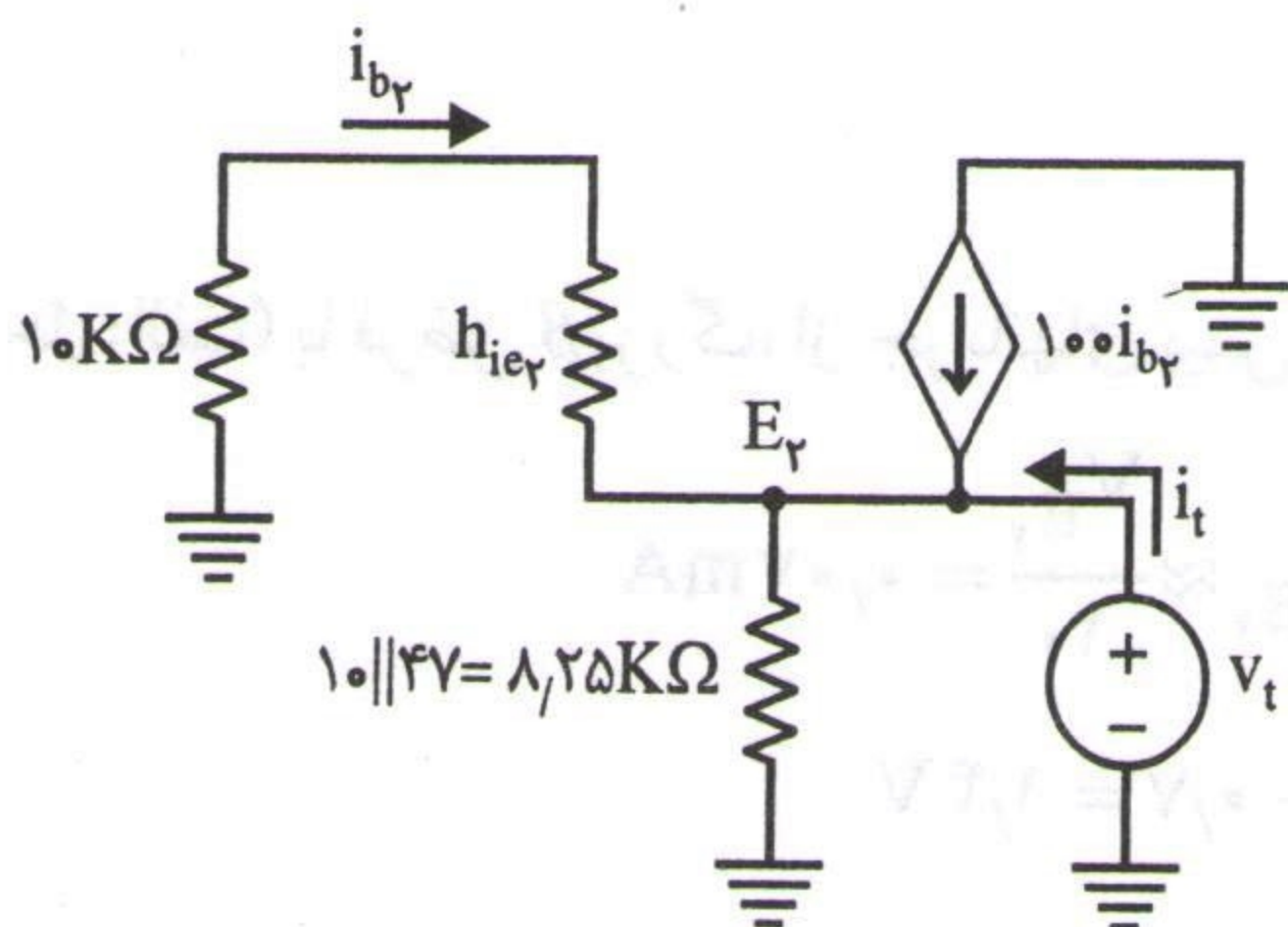
$$i_{b_2} = -h_{fe}i_{b_1} \left(\frac{10}{10 + h_{ie_2} + (1 + h_{fe})(10 \parallel 47)} \right) = \frac{-10h_{fe}i_{b_1}}{18.25 + 8.62h_{fe}}$$

$$i_{b_1} = \frac{v_i}{h_{ie_1}} = \frac{33/3 v_i}{h_{fe}}$$

$$\Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = 187.25 (1 + h_{fe}) \left(\frac{-10 h_{fe}}{187.25 + 187.62 h_{fe}} \right) \left(\frac{33/3}{h_{fe}} \right) = \frac{-2747.25 (1 + h_{fe})}{187.25 + 187.62 h_{fe}}$$

$$\lim_{h_{fe} \rightarrow \infty} A_v = -\frac{2747.25}{187.62} \approx -318.7$$

$$R_i = 47 \parallel h_{ie_1} \approx 47 K\Omega$$



با حذف منبع سیگنال ورودی، جریان i_{b_1} صفر خواهد شد؛ بنابراین مدار محاسبه R_o به صورت شکل ۵-۱۱۸ در می‌آید.

$$i_t = \frac{v_t}{187.25} - (1 + h_{fe}) i_{b_1}$$

$$i_{b_1} = \frac{-v_t}{10 + h_{ie_1}}$$

شکل ۵-۱۱۸

$$\Rightarrow i_t = \frac{v_t}{187.25} + \frac{(1 + h_{fe})}{10 + h_{ie_1}} v_t = \frac{v_t}{187.25} + \left(\frac{1 + h_{fe}}{10 + 0.37 h_{fe}} \right) v_t$$

که با فرض h_{fe} بزرگ داریم

$$i_t \approx \frac{v_t}{187.25} + \frac{v_t}{0.37} = 2.82 v_t \Rightarrow R_o \approx 355 \Omega$$

R_o را به صورت ساده‌تری نیز می‌توان به دست آورد بدین ترتیب که مقاومت‌های بیس بر $(1 + h_{fe})$ تقسیم شده و به امیتر منتقل می‌شوند؛ یعنی

$$R_o = \frac{10 + h_{ie_1}}{1 + h_{fe}} \parallel 187.25 \approx 355 \Omega$$

ب) اگر خازن C حذف شود در مدار DC تغییری حاصل نمی‌شود و در مدار ac دو مقاومت $47 K\Omega$ با هم سری شده و یک مقاومت $94 K\Omega$ تشکیل می‌دهند. با توجه به اینکه یک طرف این مقاومت v_o و طرف دیگر v_i است ($k = A_v \gg 1$) می‌توان با قضیه میلر این مقاومت را به دو مقاومت R_1 و R_2 با مقادیر زیر تبدیل کرد:

$$R_1 = \frac{94}{1 - A_v}, \quad R_2 = \frac{94 A_v}{A_v - 1} \approx 94 K\Omega$$

در این حالت محاسبات مثل بند (الف) خواهد بود؛ فقط در امیتر Q_2 به جای مقاومت $47 K\Omega$ ، مقاومت $R_2 = 94 K\Omega$ قرار می‌گیرد.

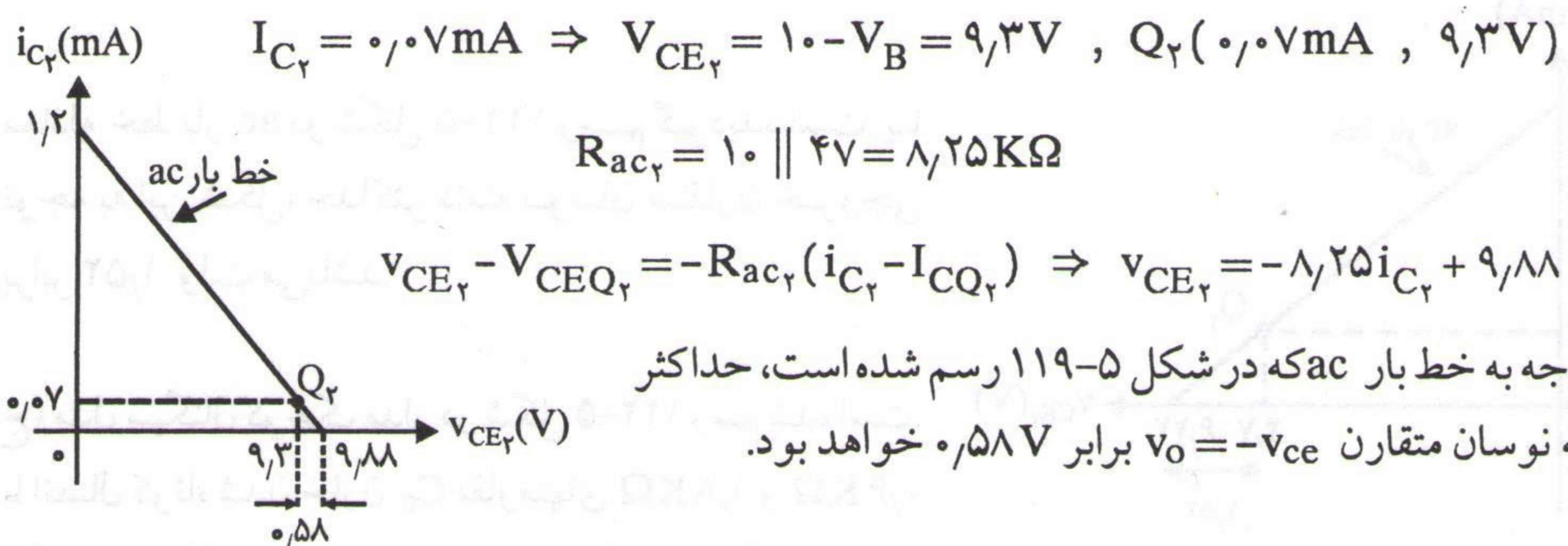
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = (10 \parallel 94)(1 + h_{fe}) \left[\frac{-10 h_{fe}}{10 + h_{ie_r} + (1 + h_{fe})(10 \parallel 94)} \right] \left(\frac{33.3}{h_{fe}} \right) \approx -320$$

$$\Rightarrow R_1 \approx 293 \Omega, R_i = R_1 \parallel h_{ie_1} \approx R_1 = 293 \Omega$$

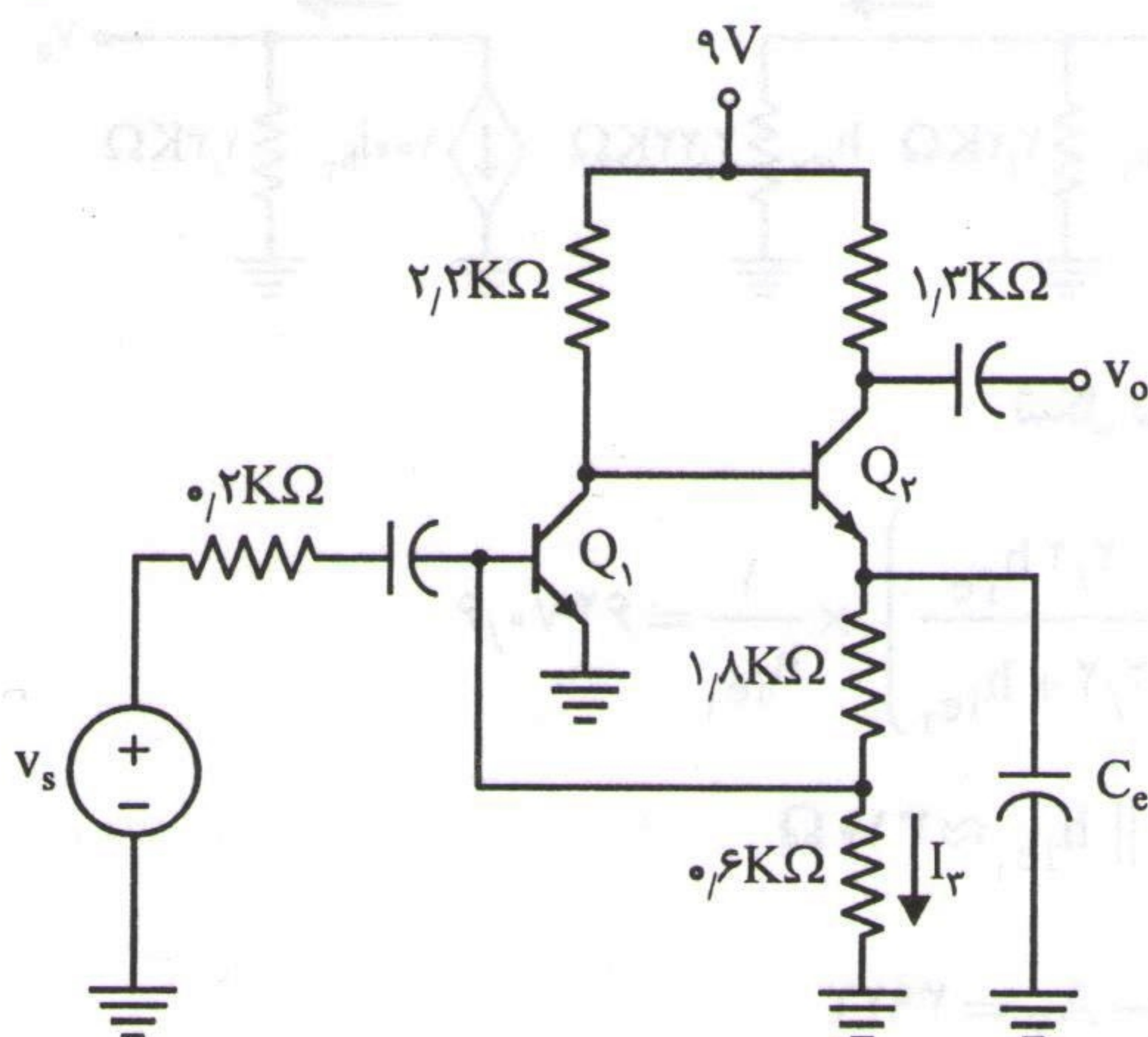
برای محاسبه R_o از همان شکل ۵-۱۱۸ می‌توان استفاده کرد؛ فقط باید به جای مقاومت $10 \parallel 47 = 8.25 K\Omega$ از مقاومت $10 \parallel 94 = 9 K\Omega$ استفاده کرد در این صورت داریم

$$i_t \approx \frac{v_t}{10 \parallel 94} + \frac{v_t}{0.37} = 2.81 \Rightarrow R_o = \frac{v_t}{i_t} = 356 \Omega$$

ج) برای تعیین حداکثر دامنه نوسان بدون اعوجاج، خط بار ac را برای طبقه خروجی به دست می‌آوریم.



شکل ۵-۱۱۹



شکل ۵-۱۲۰

۴۵. در تقویت‌کننده دو طبقه شکل ۵-۱۲۰ برای

داشتن پهنای باند وسیع و بهره ولتاژ بزرگ از

کوپلاژ مستقیم بین طبقات استفاده شده است

و ترانزیستورها دارای $V_T = 26 mV$ ،

$V_{BE} = 0.7 V$ و $h_{fe} = 100$ می‌باشند.

الف) نقطه کار و h_{ie} ترانزیستورها را بیابید.

ب) حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ

خروجی چقدر است؟

ج) بهره ولتاژ و جریان را محاسبه کنید.

حل: الف) با صرف نظر از جریان بیس دو ترانزیستور

داریم

$$V_{B_1} = 0.7 V \Rightarrow I_{E_r} \approx I_r = \frac{V_{B_1}}{0.6} = 1.17 mA, V_{E_r} \approx (1.8 + 0.6) I_{E_r} = 2.8 V$$

$$V_{B_1} = 0.7 + V_{E_1} = 3.5V, \quad V_{C_1} \approx 9 - 1.3I_{E_1} = 7.5V$$

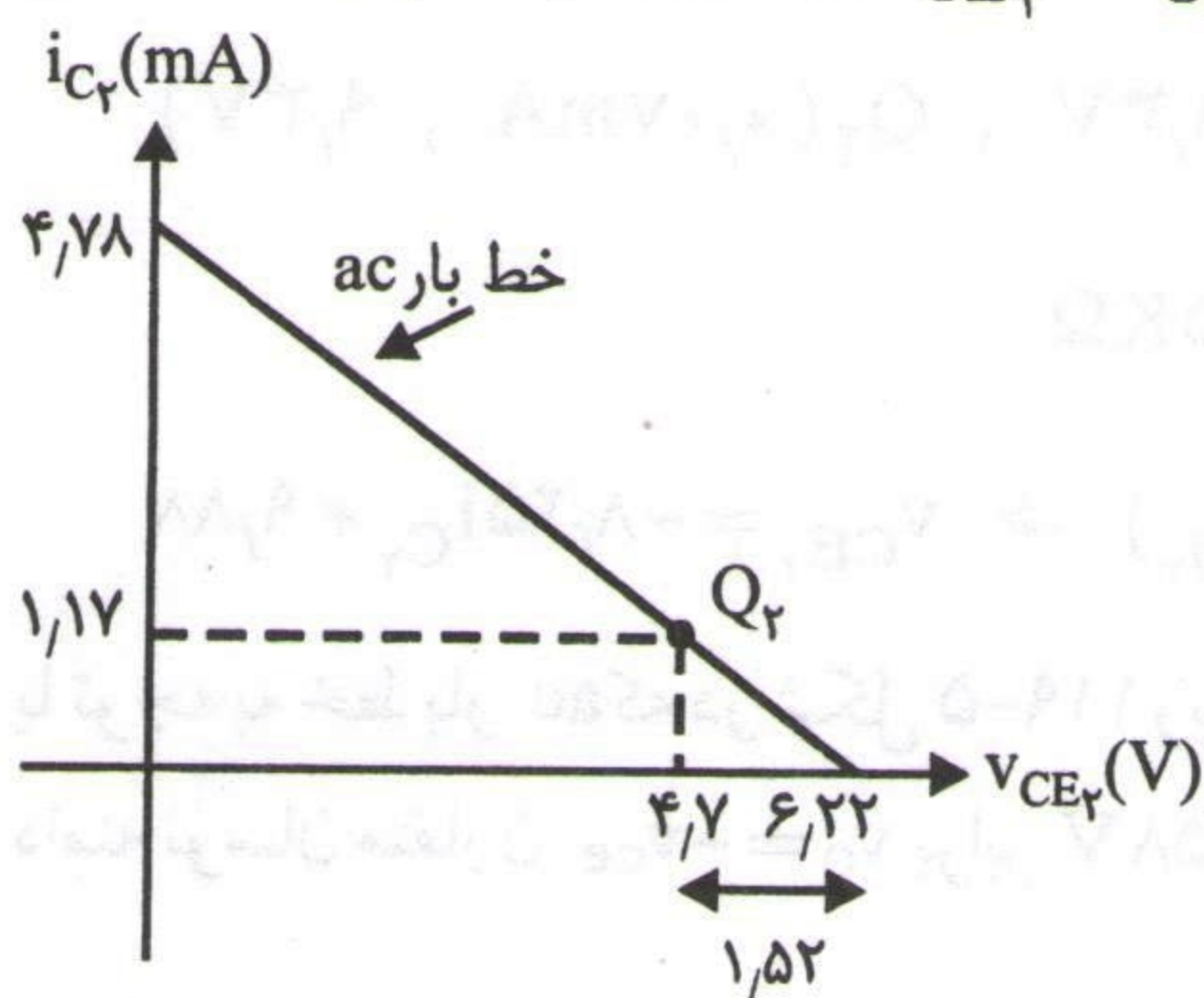
$$\Rightarrow V_{CE_1} = V_{C_1} - V_{E_1} = 4.7V, \quad V_{CE_2} = V_{B_2} = 3.5V$$

$$I_{C_1} = \frac{9 - 3.5}{2.2} = 2.5mA, \quad Q_2(1.17mA, 4.7V), \quad Q_1(2.5mA, 3.5V)$$

$$h_{ie_2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_2}} = 2.22K\Omega, \quad h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} \approx 1K\Omega$$

ب) حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی را می‌توان با استفاده از خط بار ac طبقه دوم محاسبه کرد.

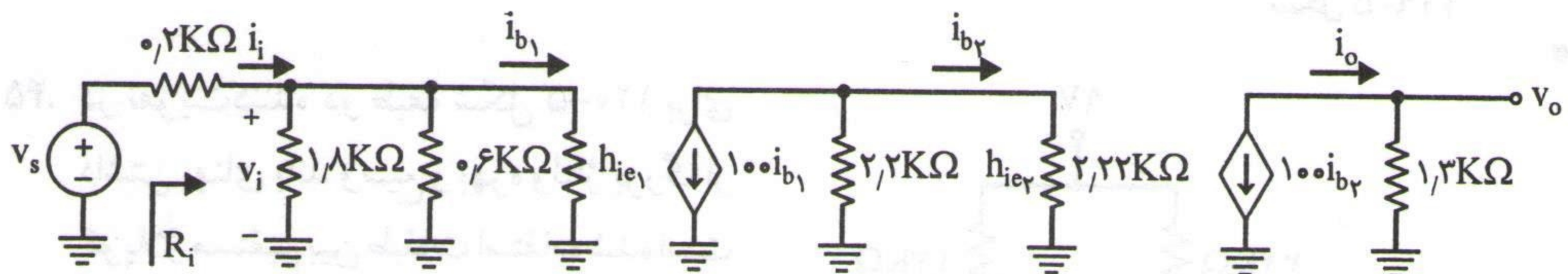
$$R_{ac_2} = 1.3K\Omega, \quad v_{CE_2} - V_{CE_2} = -R_{ac_2}(i_{C_2} - I_{C_2}) \Rightarrow v_{CE_2} = -1.3i_{C_2} + 6.22$$



شکل ۵-۱۲۱

معادله خط بار ac در شکل ۵-۱۲۱ رسم گردیده است. با توجه به این شکل، حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی برابر ۱.۵۲ ولت می‌باشد.

ج) مدل سیگنال کوچک مدار در شکل ۵-۱۲۲ رسم شده است. با اتصال کوتاه شدن خازن C_E مقاومتهای $1.8K\Omega$ و $0.6K\Omega$ به صورت موازی در بیس ترانزیستور Q_1 قرار می‌گیرند.



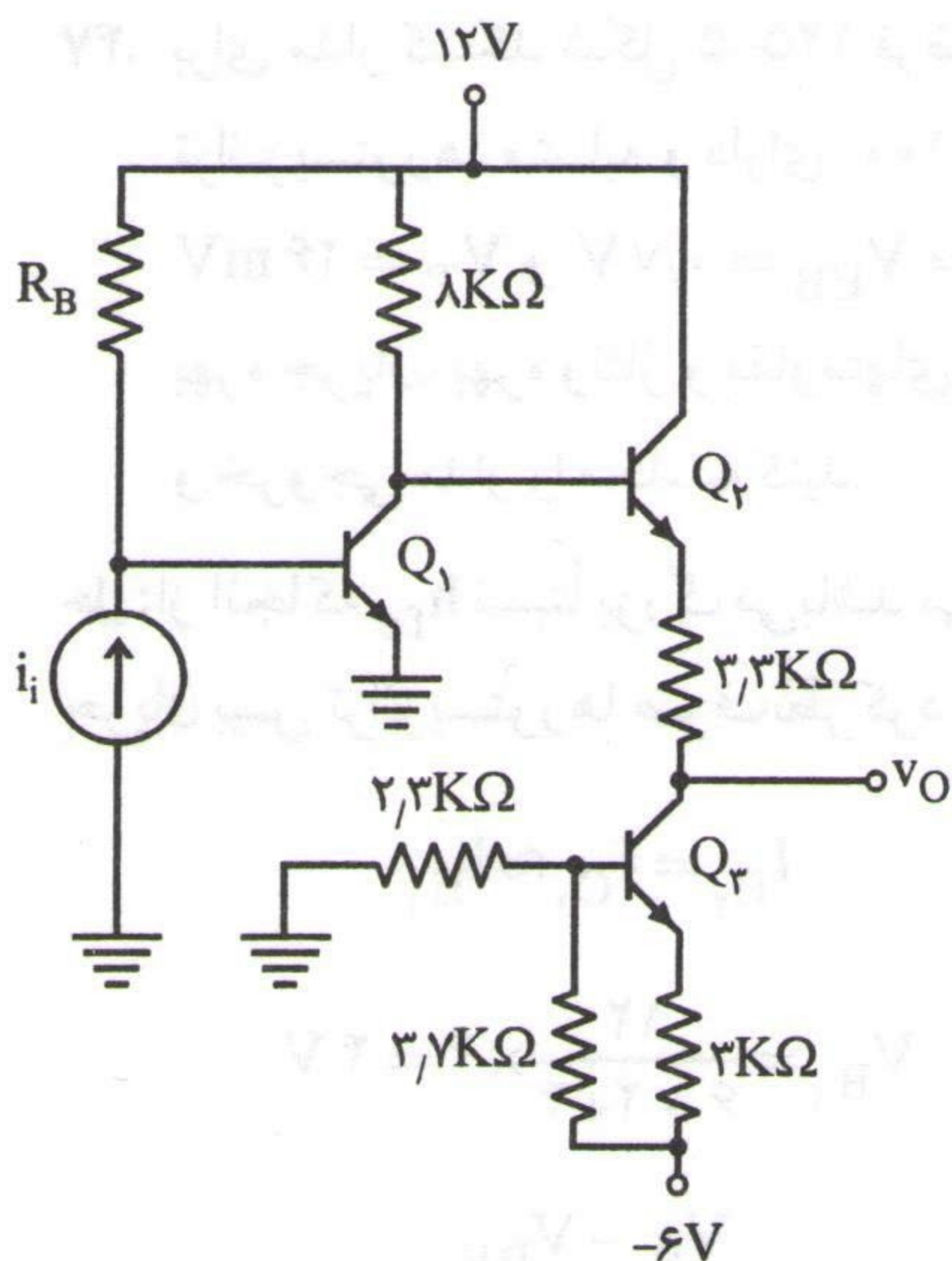
شکل ۵-۱۲۲

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -h_{fe} \times 1.3 \times \left(-\frac{2.2h_{fe}}{2.2 + h_{ie_2}} \right) \times \frac{1}{h_{ie_1}} = 6470.6$$

$$R_i = 1.8 \parallel 0.6 \parallel h_{ie_1} \approx 310\Omega$$

$$A_{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v = 3933$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / 1.3}{v_i / R_i} = \frac{R_i}{1.3} A_v = 1543$$



شکل ۵-۱۲۳

۴۶. شکل ۵-۱۲۳ نحوه استفاده از یک تقویت کننده کسکد به منظور انتقال سطح DC را نشان می دهد. Q_1 و Q_2 تقویت کننده کسکد و Q_1 تقویت کننده امیتر مشترک می باشند. ترانزیستورها دارای $V_T = 26 \text{ mV}$ ، $h_{fe} = 100$ و $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ هستند.

الف) مقدار R_B را به گونه ای تعیین کنید که سطح DC خروجی برابر صفر شود.

ب) بهره ولتاژ تقویت کننده کسکد را محاسبه کنید.

$$\text{حل: الف)} \quad V_{B_2} = \frac{-6}{3.7 + 2.3} \times 2.3 = -2.3 \text{ V}$$

$$V_{E_2} = V_{B_2} - V_{BE} = -3 \text{ V}$$

با صرف نظر از جریان I_{B_2} داریم

$$I_{C_2} \approx I_{E_2} = \frac{V_{E_2} - (-6)}{3} = 1 \text{ mA}$$

چنانچه سطح DC خروجی صفر باشد داریم

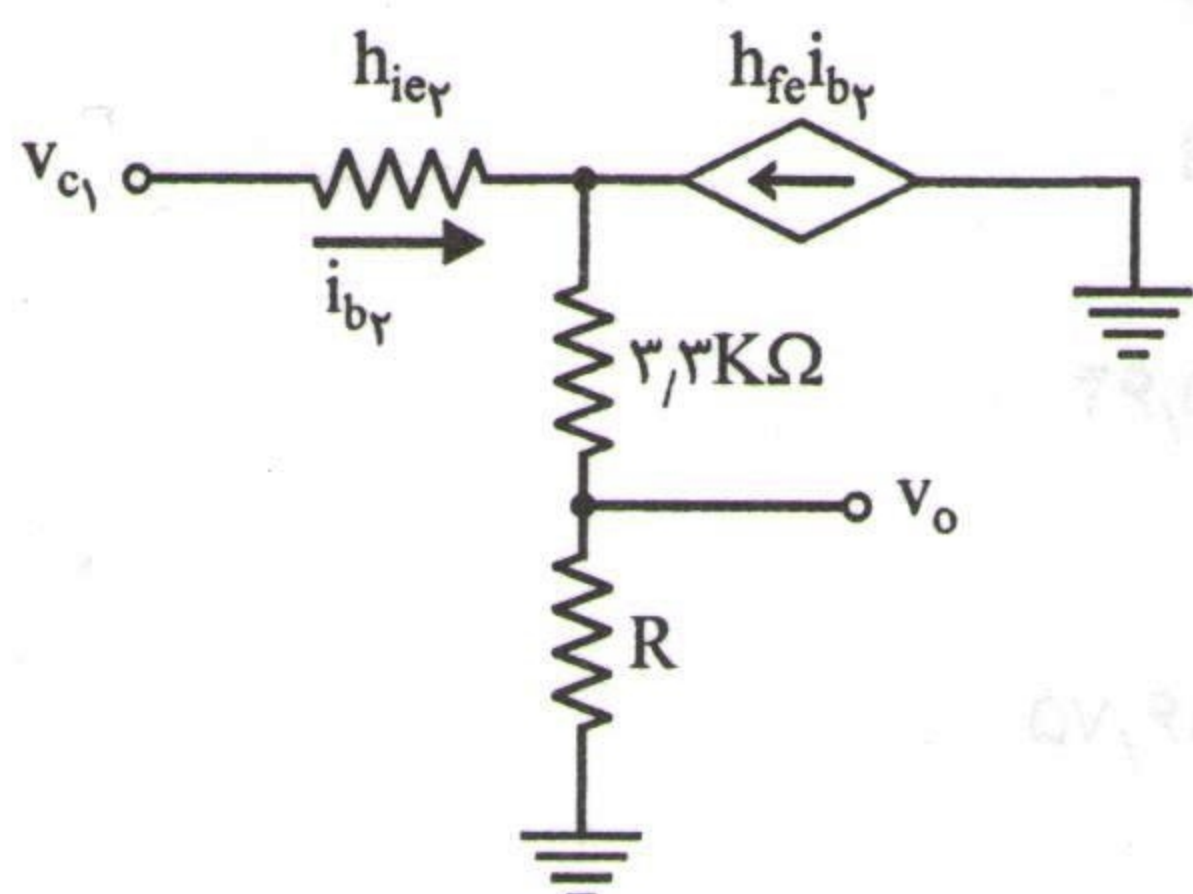
$$V_{E_2} = 3.3 I_{C_2} + 0 = 3.3 \text{ V}, \quad V_{B_2} = V_{E_2} + V_{BE} = 4 \text{ V}$$

با صرف نظر از جریان I_{B_2} داریم

$$I_{C_1} = \frac{V_{CC} - V_{B_2}}{8} = 1 \text{ mA}, \quad I_{B_1} = \frac{I_{C_1}}{h_{fe}} = 10 \mu\text{A}$$

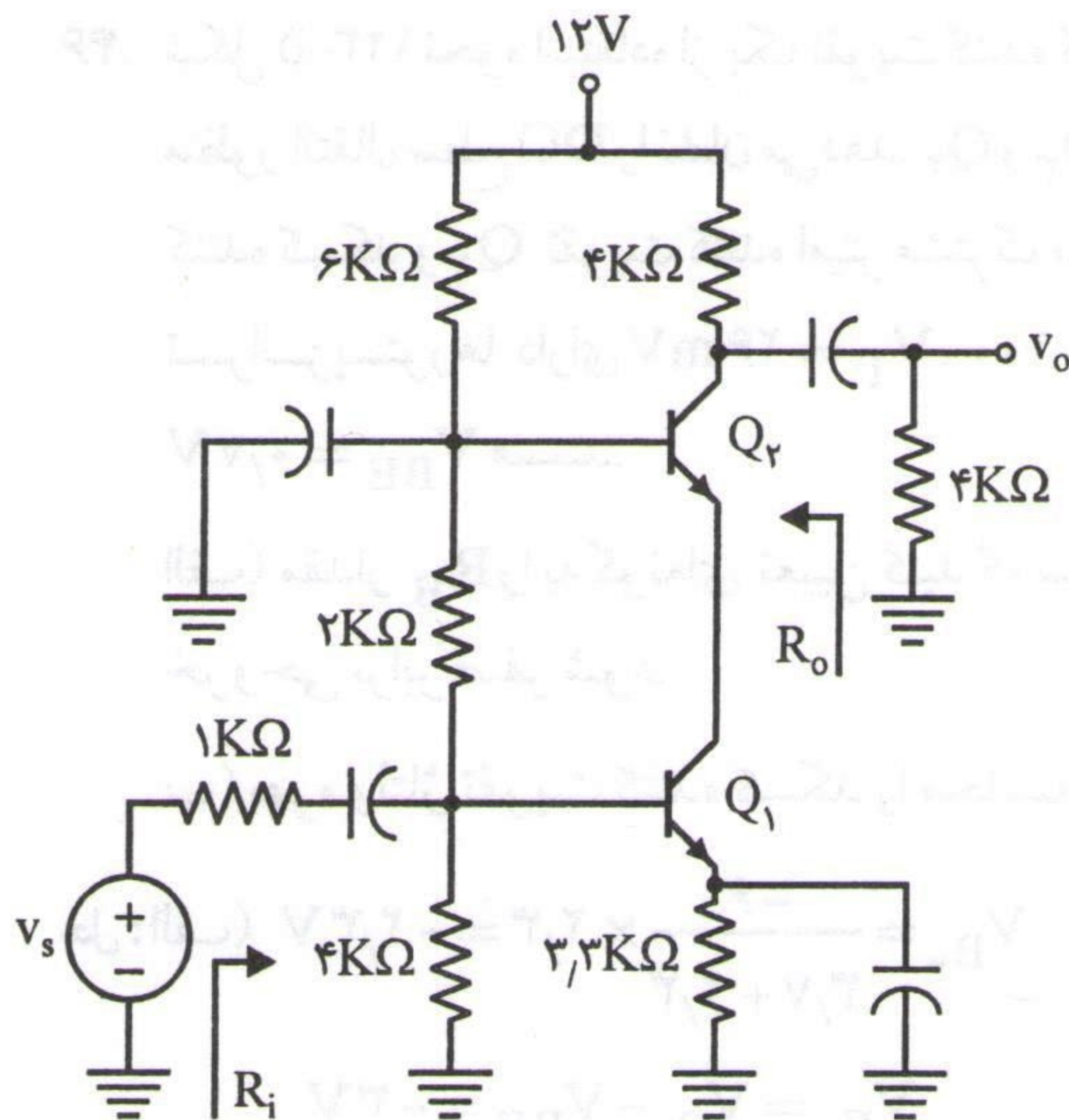
با نوشتن KVL در حلقه BE ترانزیستور Q_1 داریم

$$12 = R_B I_{B_1} + V_{BE} \Rightarrow R_B = 1.13 \text{ M}\Omega$$



شکل ۵-۱۲۴

ب) مدل سیگنال کوچک تقویت کننده کسکد ترانزیستورهای Q_1 و Q_2 در شکل ۵-۱۲۴ رسم شده است. R مقاومت دیده شده از کلکتور ترانزیستور Q_2 می باشد که از مرتبه h_{ob}^{-1} و بسیار بزرگ تر از h_{ie} است. بنابراین $v_O = v_{C_1}$ می باشد یعنی بهره ولتاژ برابر واحد است. به این ترتیب نقش ترانزیستورهای Q_1 و Q_2 تنها در انتقال سطح DC خروجی طبقه امیتر مشترک می باشد.



شکل ۵-۱۲۵

۴۷. برای مدار کسکد شکل ۵-۱۲۵ فرض کنید ترانزیستورها مشابه و دارای $h_{fe} = 100$ ، $V_T = 26 \text{ mV}$ و $V_{EB} = 0.7 \text{ V}$ می‌باشند. بهره جریان، بهره ولتاژ و مقاومتهای ورودی و خروجی مدار را محاسبه کنید.

حل: از آنجا که h_{fe} نسبتاً بزرگ می‌باشد می‌توان از جریان بیس ترانزیستورها صرف نظر کرد.

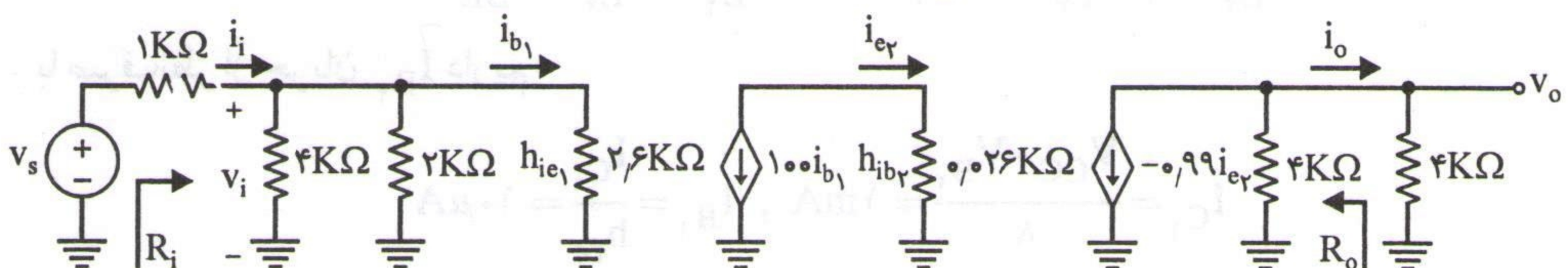
$$I_{E_2} = I_{C_1} \approx I_{E_1}$$

$$V_{B_1} = \frac{12}{6+2+4} \times 4 = 4 \text{ V}$$

$$I_{E_1} = \frac{V_{B_1} - V_{BE}}{R_E} = 1 \text{ mA}$$

$$h_{ie_2} \approx h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} = 2.6 \text{ K}\Omega, \quad h_{ib_2} = \frac{h_{ie_2}}{1+h_{fe}} = 0.026 \text{ K}\Omega, \quad h_{fb_2} = \frac{-h_{fe}}{1+h_{fe}} = -0.99$$

مدل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۱۲۶ را رسم شده است.



شکل ۵-۱۲۶

$$v_o = (4 \parallel 4)(-0.99)i_{e_2}, \quad i_{e_2} = -100 i_{b_2}, \quad i_{b_2} = \frac{v_i}{2.6} \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = -76.15$$

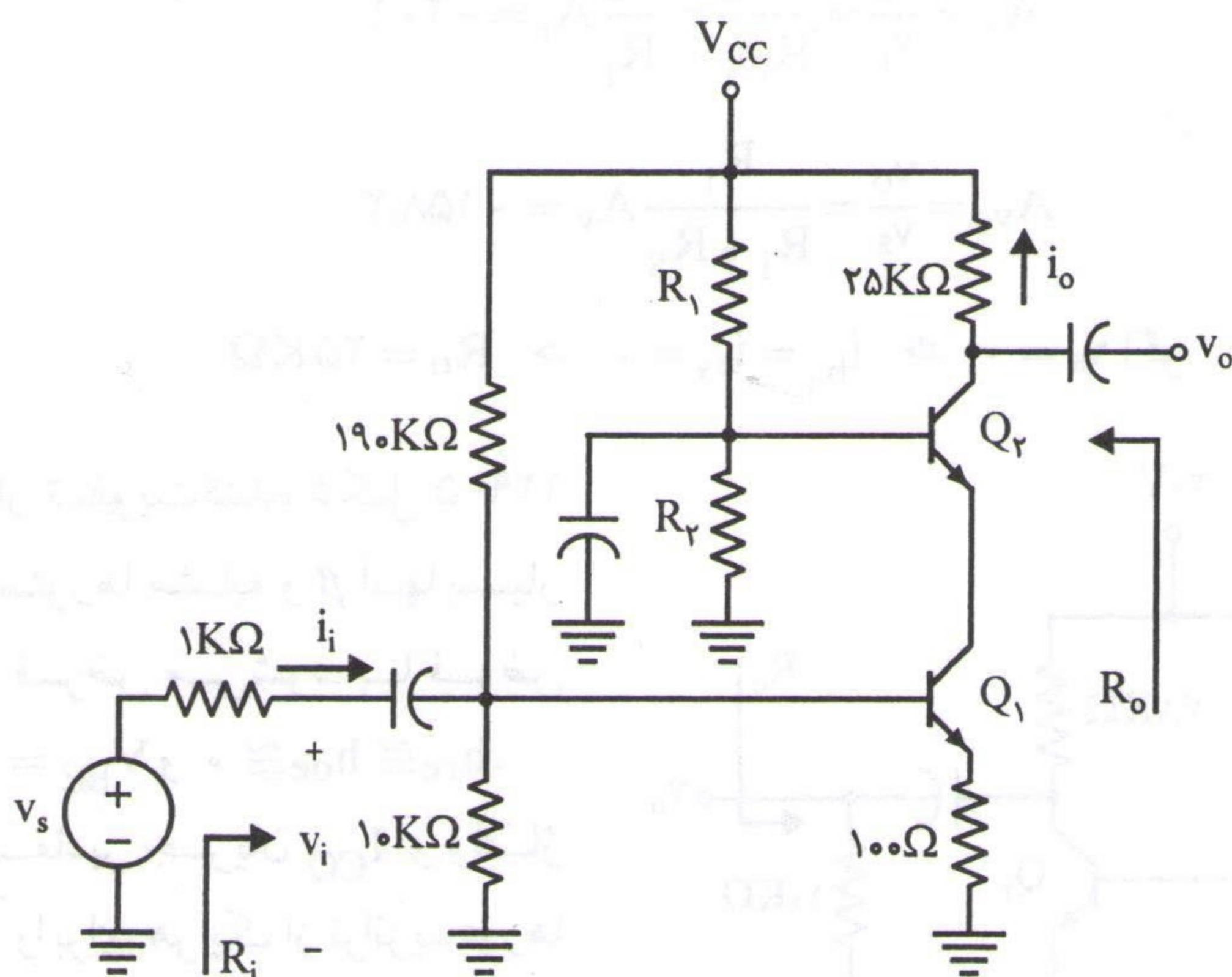
$$R_i = 4 \parallel 2 \parallel 2.6 = 0.88 \text{ K}\Omega$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v = -35.64$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o/4}{v_i/R_i} = \frac{R_i}{4} A_v = -16.75$$

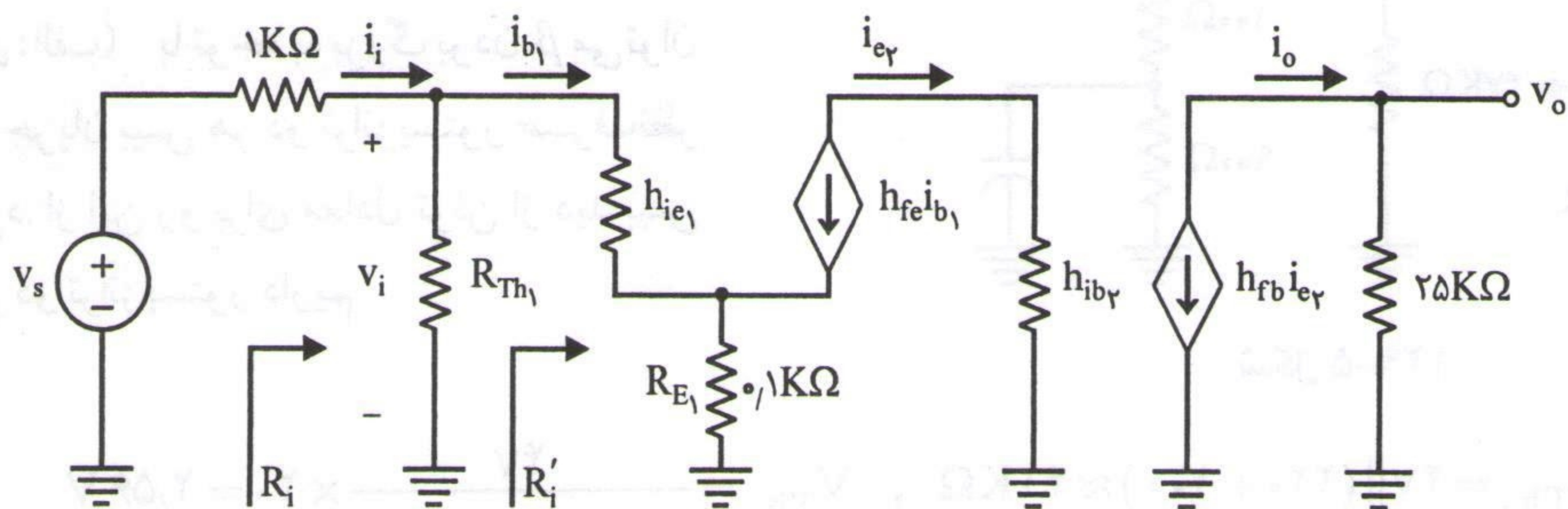
$$\text{اگر } v_s = 0 \Rightarrow i_{b_1} = i_{e_2} = 0 \Rightarrow R_o = 4 \text{ K}\Omega$$

۴۸. در تقویت کننده شکل ۱۲۷-۵ ترانزیستورها مشابه و برای آنها $h_{ie} = 1\text{ K}\Omega$ و $h_{fe} = 50$ است. مقادیر R_o و R_i ، A_{v_s} ، A_v ، A_i را محاسبه نمایید.



شکل ۱۲۷-۵

حل: مدار فوق یک تقویت کننده کسکد است که در مسأله ۴۷ نیز به آن اشاره شد. مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۱۲۸-۵ رسم شده است.



شکل ۱۲۸-۵

$$R_{Th1} = 190 \parallel 10 = 9.5 \text{ K}\Omega, \quad h_{ib2} = \frac{h_{ie2}}{1 + h_{fe}} = 19.6 \Omega, \quad h_{fb} = \frac{-h_{fe}}{1 + h_{fe}} = -0.98$$

$$R_i' = h_{ie1} + (1 + h_{fe})R_{E1} = 6.1 \text{ K}\Omega \quad \text{محاسبه } A_i:$$

$$i_o = -h_{fb} i_{e2} = 0.98 i_{e2}, \quad i_{e2} = -h_{fe} i_{b2} = -50 i_{b2}, \quad i_{b2} = \frac{R_{Th1}}{R_{Th1} + R_i'} i_i \approx 0.609 i_i$$

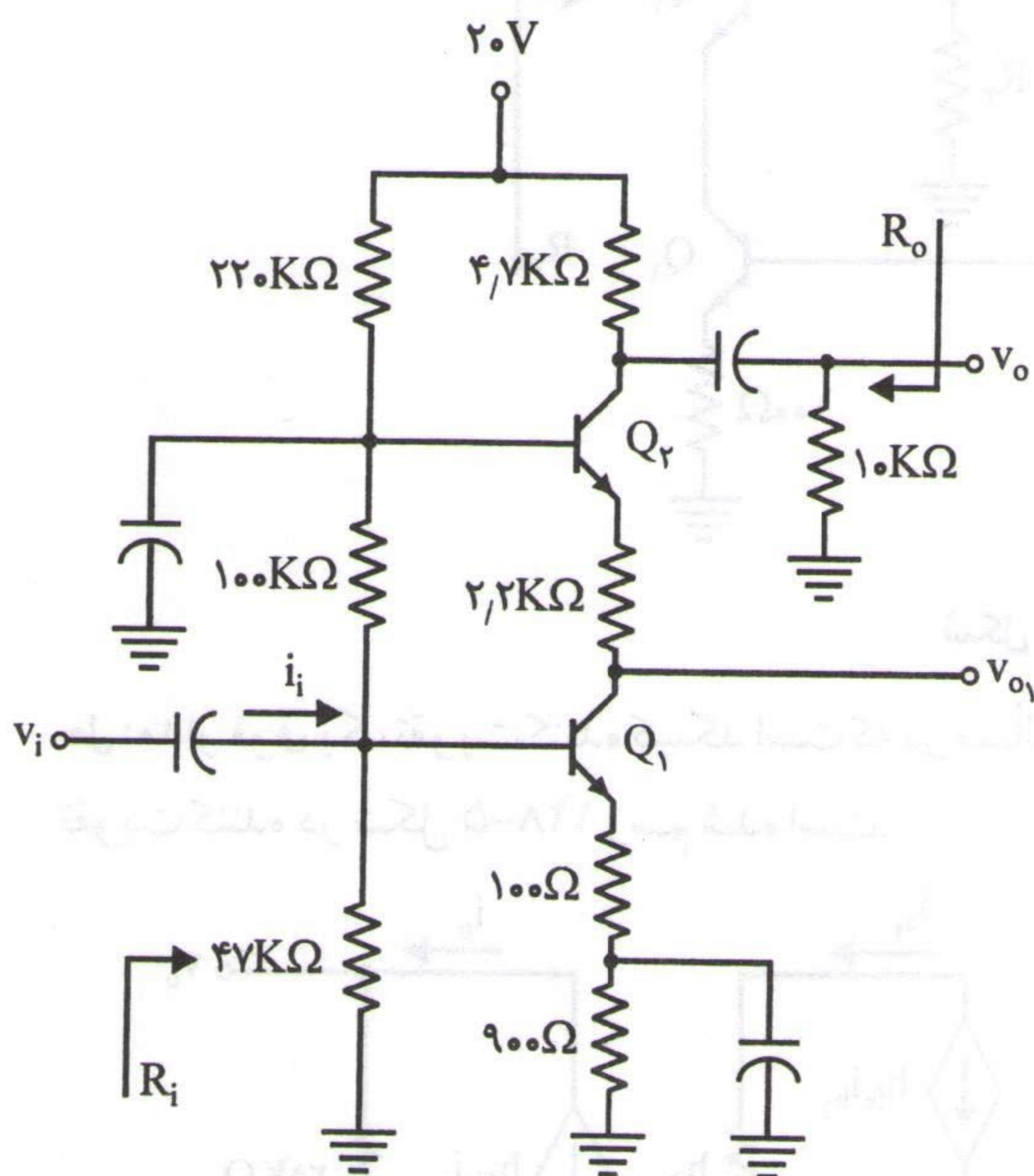
$$\Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = 0.98(-50)(0.609) = -29.84$$

$$R_i = R_{Th_1} \parallel R'_i \approx 3.71 K\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{25 i_o}{R_i i_i} = \frac{25}{R_i} A_i = -20.1$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v = -15.8/3$$

$$\text{اگر } v_s = 0 \Rightarrow i_{b_1} = i_{e_1} = 0 \Rightarrow R_o = 25 K\Omega$$



شکل ۵-۱۲۹

۴۹. در مدار تقویت کننده شکل ۵-۱۲۹

ترانزیستورها مشابه و β آنها بسیار بزرگ فرض می شود. با فرض $V_{BE} = 0.7V$ و $h_{re} \cong h_{oe} \cong 0$ (الف) مقادیر جریان I_{CQ} و ولتاژ V_{CEQ} را برای هر یک از ترانزیستورها به دست آورید.

(ب) مقادیر کمیت های A_v ، $A_{v_1} = \frac{v_{o_1}}{v_i}$ ، A_i و R_o را محاسبه کنید.

حل: (الف) با توجه به بزرگ بودن β می توان از جریان بیس هر دو ترانزیستور صرف نظر کرد. از این رو برای معادل تونن از دید بیس هر دو ترانزیستور داریم

$$R_{Th_1} = 47 \parallel (220 + 100) \approx 41 K\Omega, \quad V_{Th_1} = \frac{47}{47 + (100 + 220)} \times 20 = 2.56 V$$

$$R_{Th_2} = 220 \parallel (100 + 47) \approx 88.12 K\Omega, \quad V_{Th_2} = \frac{100 + 47}{(100 + 47) + 220} \times 20 \approx 8 V$$

$$V_{Th_1} = V_{B_1} = 2.56 V \Rightarrow V_{E_1} = V_{B_1} - V_{BE} = 1.86 V$$

$$I_{E_2} = I_{E_1} = I_E = \frac{V_{E_1}}{0.1 + 0.9} = 1.86 mA$$

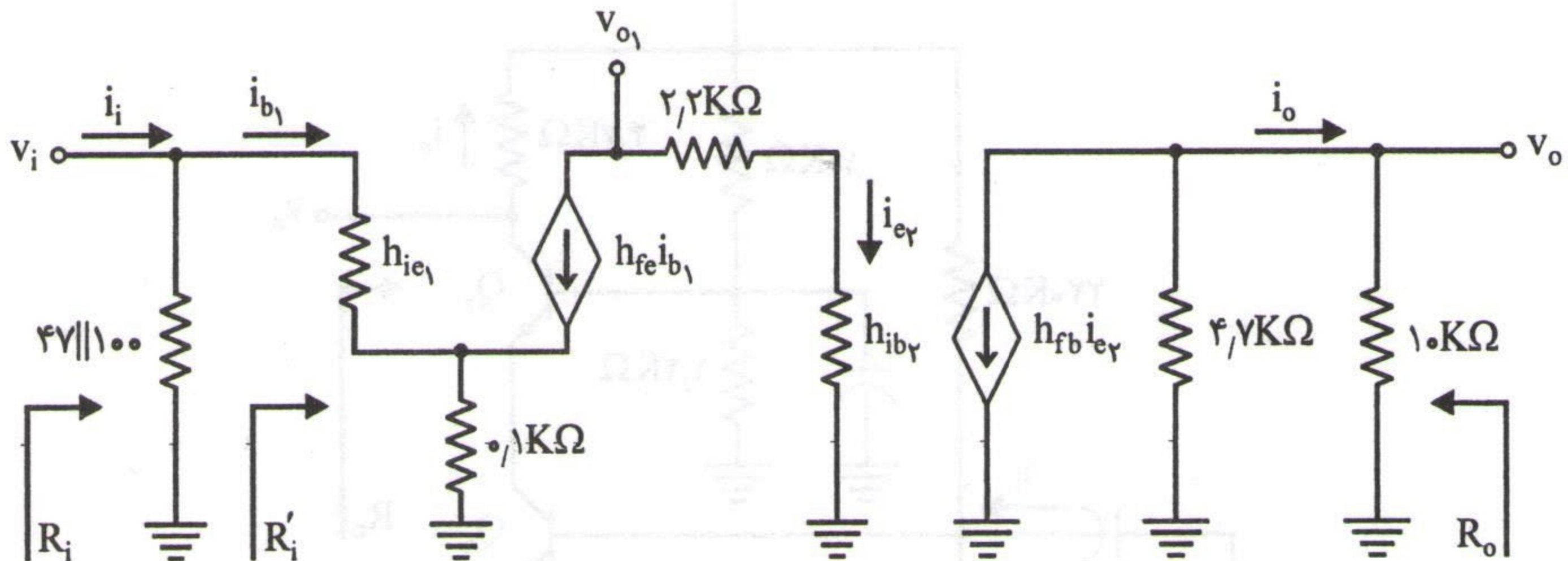
$$V_{B_2} = V_{Th_2} = 8 V \Rightarrow V_{E_2} = V_{B_2} - V_{BE} = 7.3 V$$

$$V_{CE_1} = V_{E_2} - (2.2 + 1) I_E \approx 1.35 V$$

$$V_{CE_T} = 20 - (4.7 I_E + V_{E_T}) \approx 3.96 \text{ V}$$

$$h_{ie_1} = h_{ie_T} = h_{fe} \frac{V_T}{I_C} \approx 0.14 h_{fe}$$

ب) مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۱۳۰ رسم شده است.



شکل ۵-۱۳۰

$$h_{ib_T} = \frac{h_{ie_T}}{1 + h_{fe}} = \frac{0.14 h_{fe}}{1 + h_{fe}} \approx 14 \Omega, \quad h_{fb} = -\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \approx -1$$

$$R_i' = h_{ie_1} + (1 + h_{fe}) \times 0.1 \approx 0.114 h_{fe} \quad \text{محاسبه } A_i:$$

$$i_o = -h_{fb} i_{e_T} \frac{4.7}{1.0 + 4.7} \approx 0.32 i_{e_T}, \quad i_{e_T} = -h_{fe} i_{b_1}, \quad i_{b_1} = \frac{4.7 \parallel 1.0}{4.7 \parallel 1.0 + R_i} i_i \approx \frac{28.05}{h_{fe}} i_i$$

$$\Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = (0.32)(-h_{fe}) \times \frac{28.05}{h_{fe}} \approx -89.75$$

$$R_i = 4.7 \parallel 1.0 \parallel R_i' \approx 4.7 \parallel 1.0 \approx 3.2 \text{ K}\Omega$$

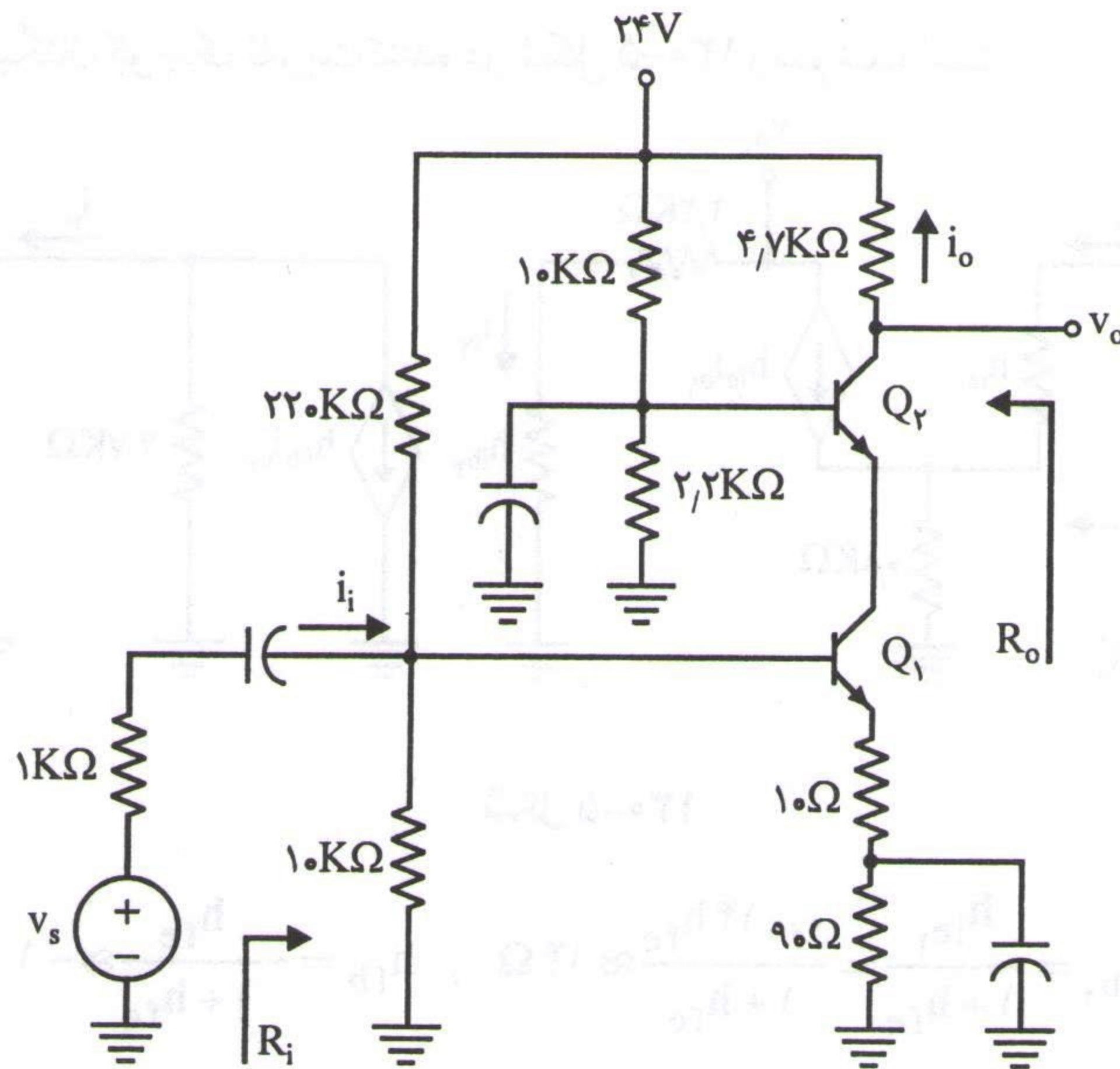
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times 1.0}{i_i \times R_i} = \frac{1.0}{R_i} A_i = -28$$

$$v_{o_1} = (2.2 + h_{ib_T}) i_{e_T} = 2.214 i_{e_T}, \quad i_{e_T} = -h_{fe} i_{b_1}, \quad i_{b_1} = \frac{v_i}{R_i'} \quad \text{محاسبه } A_{v_1}:$$

$$\Rightarrow A_{v_1} = \frac{v_{o_1}}{v_i} = (2.214)(-h_{fe}) \times \frac{1}{0.114 h_{fe}} = -19.42$$

$$\text{اگر } v_s = 0 \Rightarrow i_{b_1} = i_{e_T} = 0 \Rightarrow R_o = 1.0 \parallel 4.7 \approx 3.2 \text{ K}\Omega$$

۵۰. در مدار تقویت کننده شکل ۵-۱۳۱، β ترانزیستورها بسیار بزرگ است. (الف) مختصات نقطه کار DC هر یک از ترانزیستورها را به دست آورید. (ب) مقادیر A_v ، A_{v_s} ، A_i و R_o را محاسبه نمایید.



شکل ۵-۱۳۱

حل: (الف) معادل تونن از دید بیس هر یک از ترانزیستورها را به دست آورده، با توجه بزرگی β ، با صرف نظر از جریان بیس ترانزیستورها، نقاط کار را از مدار DC به دست می آوریم.

$$V_{Th_1} = \frac{24}{22 + 10} \times 10 \approx 1.043V, \quad V_{Th_1} \approx V_{B_1} = 1.043V$$

$$V_{E_1} = V_{B_1} - V_{BE} = 0.343V, \quad I_{E_1} \approx I_{C_1} = I_{E_1} = \frac{V_{E_1}}{0.1} = 3.43mA$$

$$V_{Th_2} = \frac{24}{10 + 2.2} \times 2.2 = 4.32V, \quad V_{Th_2} \approx V_{B_2} = 4.32V$$

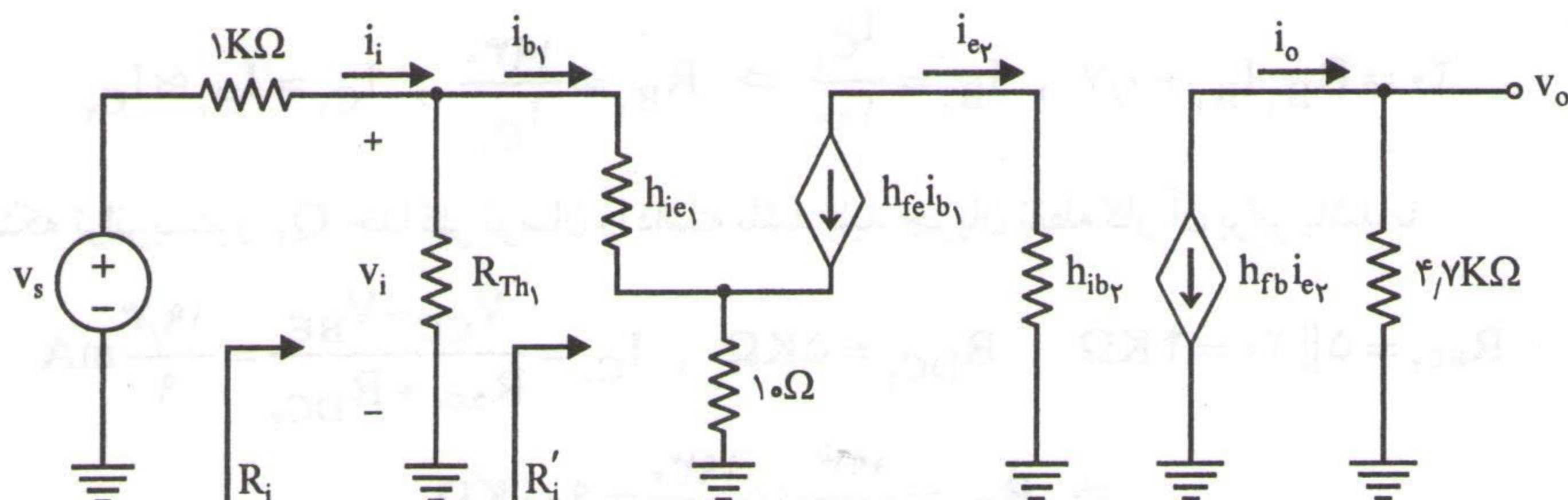
$$V_{C_1} = V_{E_2} = V_{B_2} - V_{BE} = 3.62V \Rightarrow V_{CE_1} = V_{C_1} - V_{E_1} = 3.28V$$

$$V_{CE_2} = 24 - (4.7 \times I_{C_2} + V_{E_2}) = 4.25V$$

$$\Rightarrow Q_1(3.43mA, 3.28V), \quad Q_2(3.43mA, 4.25V)$$

$$h_{ie_2} = h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} = 7.6 h_{fe} \Omega$$

ب) مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۱۳۲-۵ رسم شده است.



شکل ۱۳۲-۵

$$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} = 17.6 \Omega, \quad h_{fb} = \frac{-h_{fe}}{1 + h_{fe}} = -1, \quad R'_i = h_{ie1} + (1 + h_{fe}) \times 10 \approx 17.6 h_{fe}$$

$$v_o = -h_{fb} i_{e2} \times 4.7 = 4.7 i_{e2}, \quad i_{e2} = -h_{fe} i_{b2}, \quad i_{b2} = \frac{v_i}{R'_i} = \frac{56.82}{h_{fe}} v_i \quad \text{محاسبه } A_v:$$

$$\Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = (4.7)(-h_{fe}) \left(\frac{56.82}{h_{fe}} \right) \approx -267$$

$$R_i = R_{Th1} \parallel R'_i \approx R_{Th1} = 9.57 K\Omega$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / 4.7}{v_i / R_i} = \frac{R_i}{4.7} A_v \approx -543.7$$

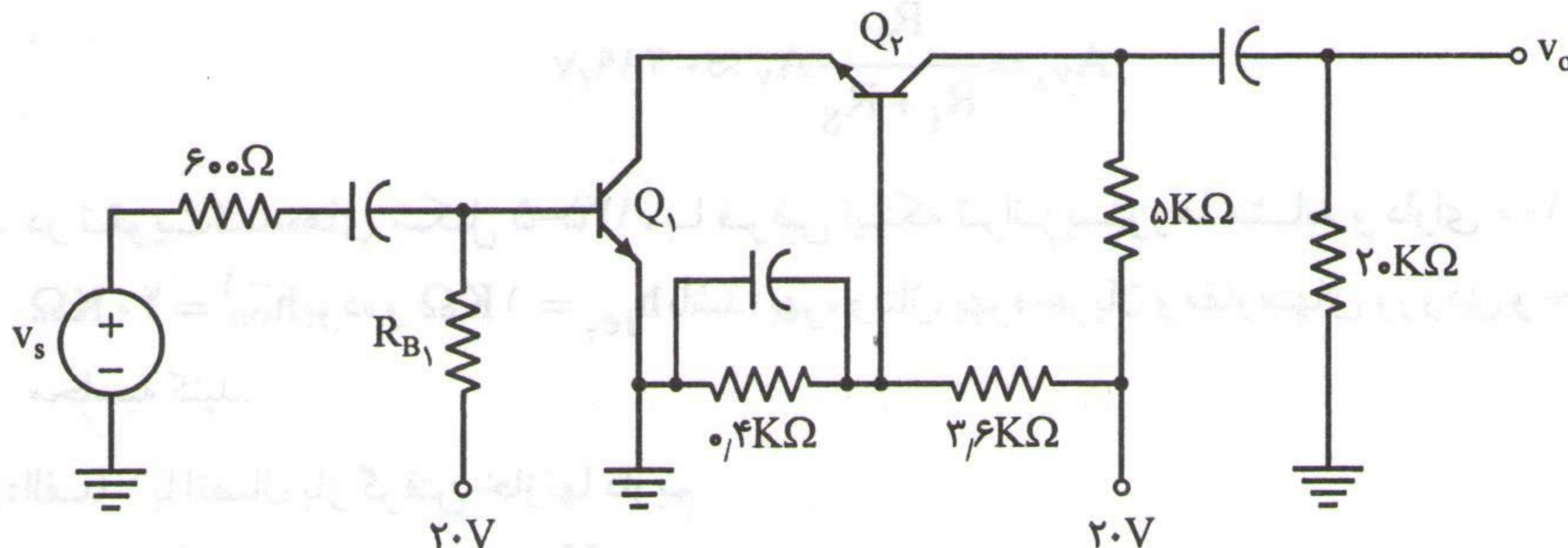
$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v \approx -241.7$$

$$\text{اگر } v_s = 0 \Rightarrow i_{b1} = i_{e2} = 0 \Rightarrow R_o = 4.7 K\Omega$$

۵۱. در تقویت کننده شکل ۱۳۳-۵ ترانزیستورها مشابه، $h_{fe} = 100$ ، $V_{BE} = 0.7V$ و $V_T = 26 mV$ است.

الف) R_{B1} را طوری تعیین کنید که دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی Q_2 حداکثر شود.

ب) با فرض $h_{oe} = 40 K\Omega$ و $h_{re} = 0$ ، A_{v_s} را محاسبه کنید.



شکل ۱۳۳-۵

حل: الف) با نوشتن KVL در حلقه BE ترانزیستور Q_1 داریم

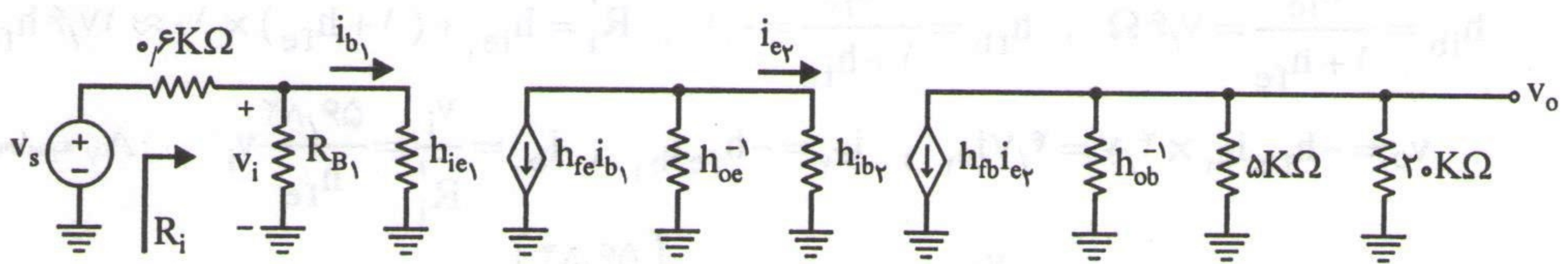
$$V_0 = R_{B_1} I_{B_1} + 0.7V, \quad I_{B_1} = \frac{I_{C_1}}{100} \Rightarrow R_{B_1} = \frac{1930}{I_{C_1}}, \quad I_{C_1} = I_{E_1} \approx I_{C_2}$$

برای اینکه ترانزیستور Q_2 حداکثر نوسان را داشته باشد باید جریان نقطه کار آن برابر باشد با

$$R_{ac_2} = 5 \parallel 20 = 4K\Omega, \quad R_{DC_2} = 5K\Omega, \quad I_{C_2} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{ac_2} + R_{DC_2}} = \frac{19.3}{9} mA$$

$$\Rightarrow R_{B_1} = \frac{1930}{I_{C_1}} \approx \frac{1930}{I_{C_2}} = 900K\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۱۳۴ است.



شکل ۵-۱۳۴

$$h_{ie_2} = h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} \approx 1.2K\Omega, \quad h_{ib_2} = \frac{h_{ie_2}}{1 + h_{fe}} \approx 12\Omega$$

$$h_{fb} = -\frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} = -0.99, \quad h_{ob}^{-1} = (1 + h_{fe}) h_{oe}^{-1} = 4.04M\Omega$$

$$v_o = -h_{fb} i_{e_2} (h_{ob}^{-1} \parallel 5 \parallel 120) \approx 3.956 i_{e_2} \quad \text{محاسبه } A_v:$$

$$i_{e_2} = -h_{fe} i_{b_1} \frac{h_{oe}^{-1}}{h_{oe}^{-1} + h_{ib_2}} \approx -100 i_{b_1}, \quad i_{b_1} = \frac{v_i}{h_{ie_1}} \approx 0.833 v_i$$

$$\Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = (3.956)(-100)(0.833) \approx -329.5$$

$$R_i = R_{B_1} \parallel h_{ie_1} = 900 \parallel 1.2 \approx 1.2$$

$$A_{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v \approx -219.7$$

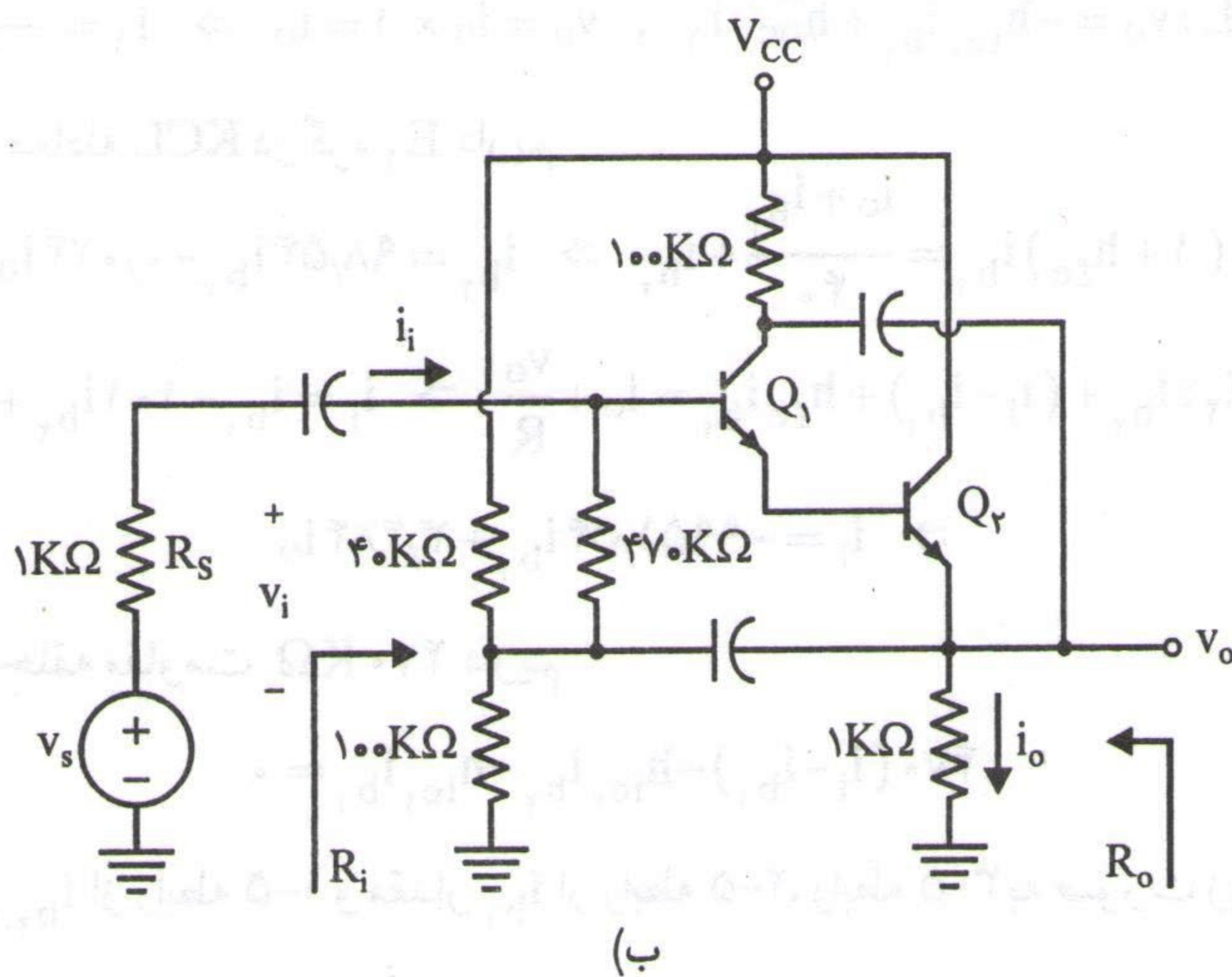
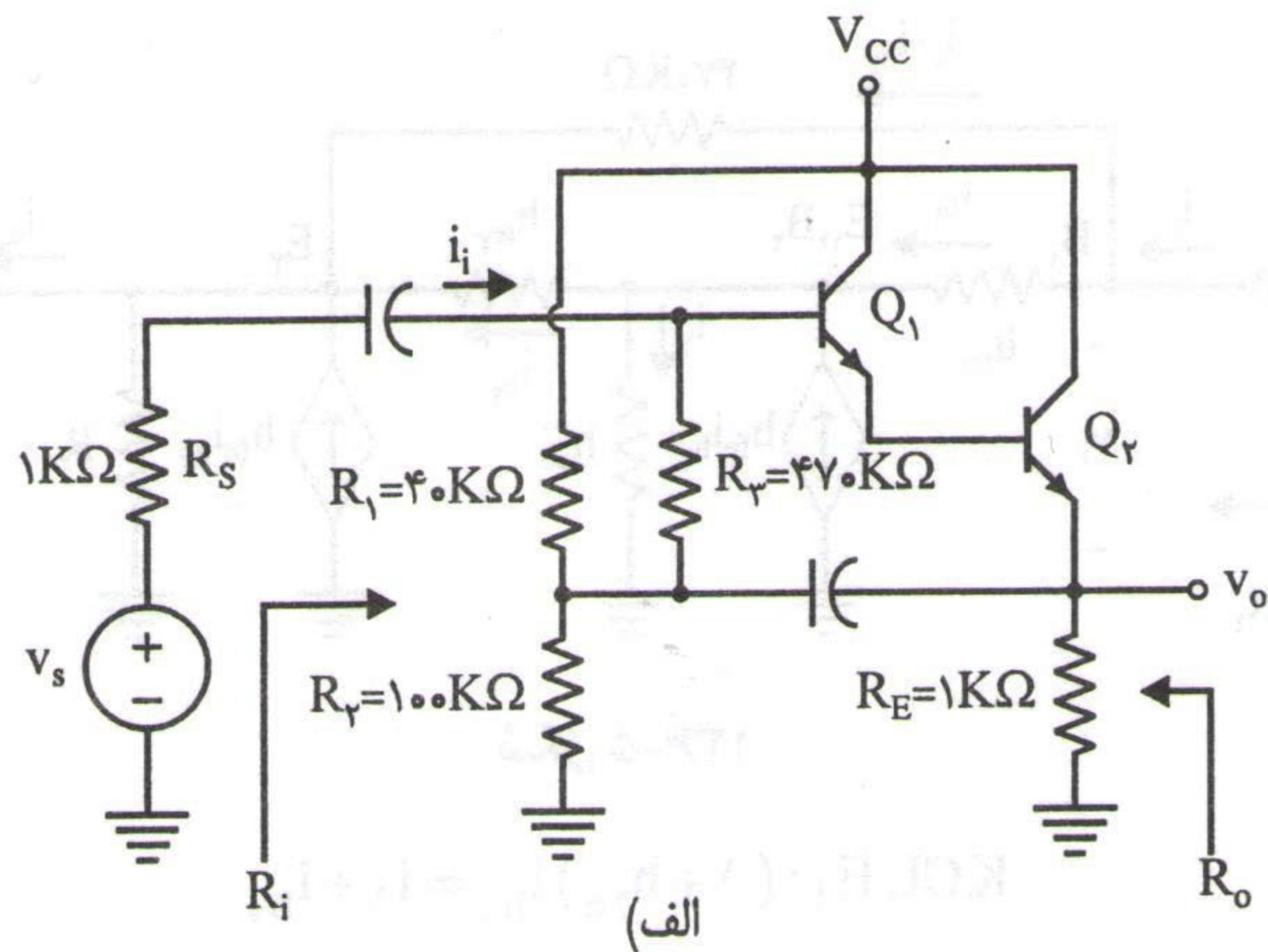
۵۲. در تقویت کننده‌های شکل ۵-۱۳۵، با فرض اینکه ترانزیستورها مشابه و دارای $h_{fe} = 100$ و

$h_{oe}^{-1} = 40K\Omega$ بوده و $h_{ie_2} = 1K\Omega$ باشد؛ بهره ولتاژ، بهره جریان و مقاومتهای ورودی و خروجی را

محاسبه کنید.

حل: الف) با اتصال باز گرفتن خازنها داریم

$$R_{Th} = R_3 + R_1 \parallel R_2, \quad V_{Th} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \times R_2$$



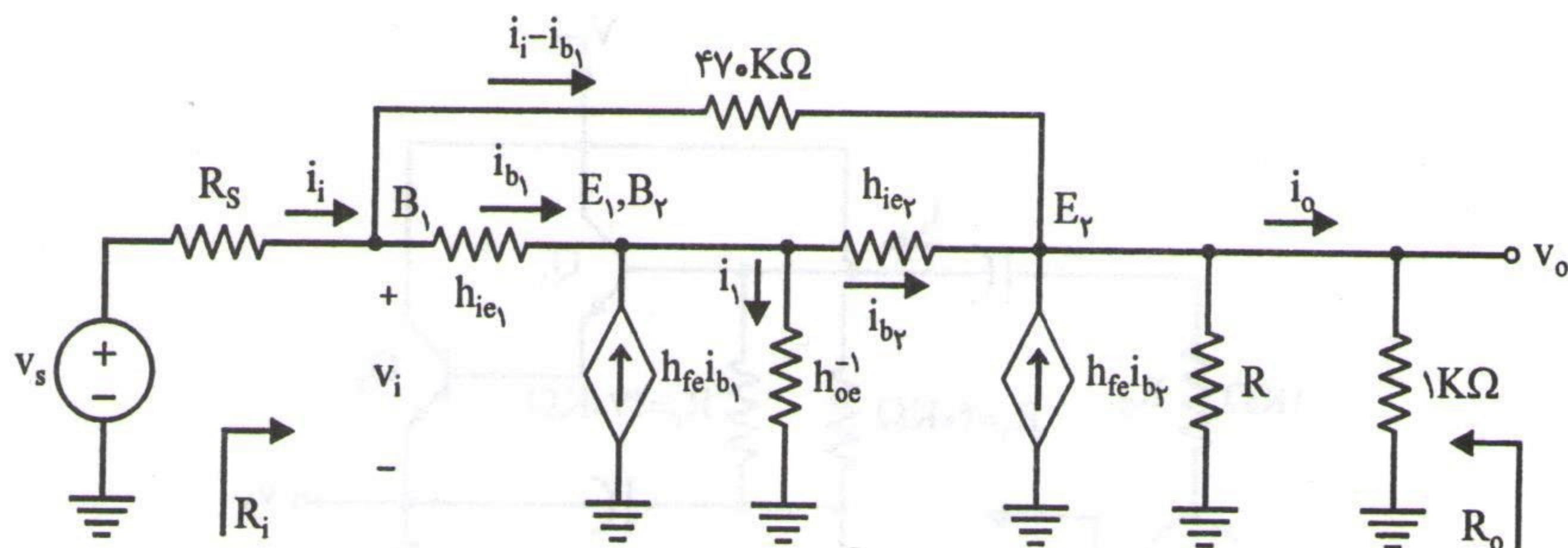
شکل ۵-۱۳۵

$$I_{E_2} = \frac{V_{Th} - 2V_{BE}}{R_E + R_{Th}/(1+h_{fe})}, \quad I_{C_1} \approx I_{E_1} = \frac{I_{E_2}}{1+h_{fe}}$$

$$h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} = (1+h_{fe}) h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_2}} = (1+h_{fe}) h_{ie_2} = 10.1 K\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده شکل ۵-۱۳۵-الف در شکل ۵-۱۳۶ رسم شده است.

$$R = h_{oe_2}^{-1} \parallel 100 \parallel 40 = 16.67 K\Omega$$



شکل ۵-۱۳۶

$$\text{KCL } E_1: (1 + h_{fe}) i_{b1} = i_1 + i_{b2}$$

محاسبه A_i :

$$\text{KVL: } v_o = -h_{ie2} i_{b2} + h_{oe1}^{-1} i_1, \quad v_o = i_o \times 1 = i_o \Rightarrow i_1 = \frac{i_o + i_{b2}}{40}$$

با جایگذاری i_1 در معادله KCL در گره E_1 داریم

$$(1 + h_{fe}) i_{b1} = \frac{i_o + i_{b2}}{40} + i_{b2} \Rightarrow i_{b2} = 98.54 i_{b1} - 0.024 i_o \quad (1-5)$$

$$\text{KCL } E_2: i_{b2} + (i_i - i_{b1}) + h_{fe} i_{b2} = i_o + \frac{v_o}{R} \Rightarrow i_i = i_{b1} - 1.1 i_{b2} + 1.06 i_o$$

$$\Rightarrow i_i = -9951.54 i_{b1} + 3.484 i_o \quad (2-5)$$

با نوشتن KVL در حلقه مقاومت $470 \text{ K}\Omega$ داریم

$$470 (i_i - i_{b1}) - h_{ie2} i_{b2} - h_{ie1} i_{b1} = 0 \quad (3-5)$$

با جایگذاری مقدار i_{b2} از رابطه ۱-۵ و مقدار i_{b1} از رابطه ۲-۵، رابطه ۳-۵ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$470 \cdot 0.06 i_i = 0.21 i_o \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} \approx 2238$$

$$\text{KVL: } v_i = 470 (i_i - i_{b1}) + i_o \times 1 = 470 i_i - 470 i_{b1} + i_o \quad \text{محاسبه } R_i$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{470 i_i - 470 i_{b1} + i_o}{i_i} = 470 + A_i - 470 \frac{i_{b1}}{i_i}$$

از رابطه ۲-۵ برای i_{b1} داریم

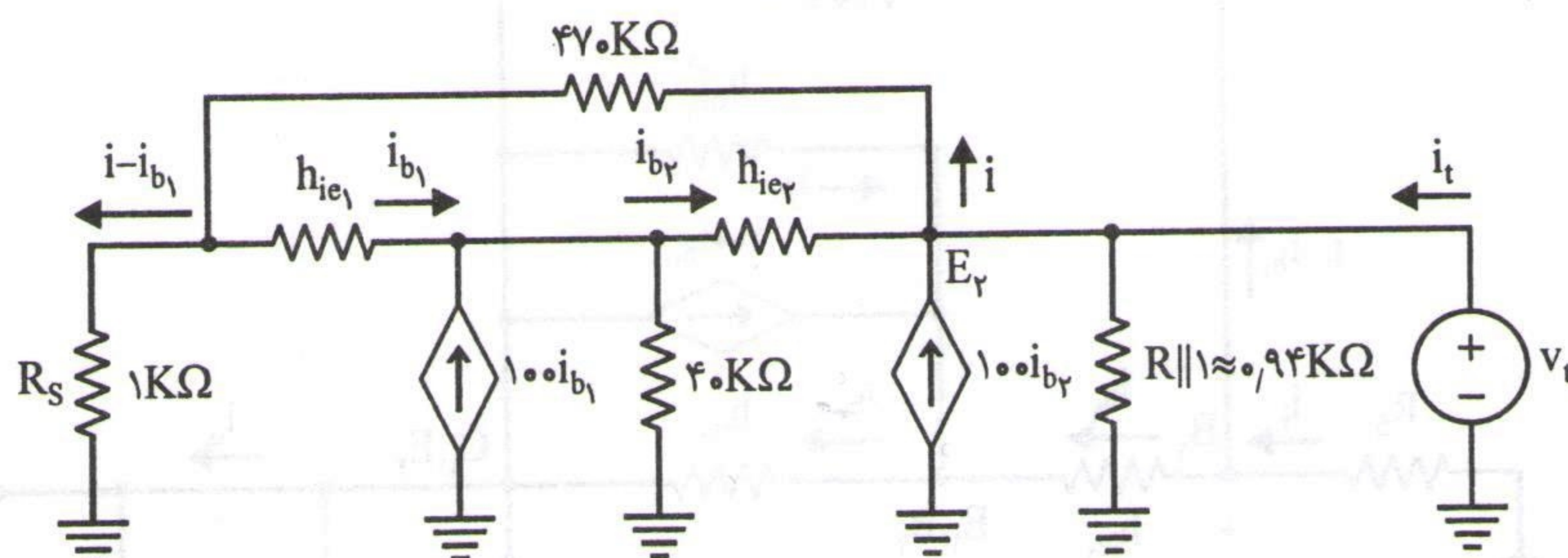
$$i_{b1} = -\frac{i_i - 3.484 i_o}{9951.54}$$

با جایگذاری i_{b1} در رابطه فوق داریم

$$R_i = 270.8 + 470 \frac{i_i - 3.484 i_o}{9951.54 i_i} = 270.8 + 0.047 - 0.164 A_i \approx 234.0 \text{ K}\Omega = 2.34 \text{ M}\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times 1}{i_i \times R_i} = \frac{1}{R_i} A_i \approx 0.956$$

برای به دست آوردن R_o ، مطابق شکل ۵-۱۳۷ در خروجی یک منبع آزمایشی v_t قرار داده و منبع ورودی v_s را حذف می‌کنیم.



شکل ۵-۱۳۷

$$\text{KCL } E_r: i_t + (1 + 100) i_{b_r} = i + \frac{v_t}{0.94} \quad (4-5)$$

$$\text{KVL: } 47 \cdot i + h_{ie_1} i_{b_1} + h_{ie_2} i_{b_r} = 0 \Rightarrow i \approx -0.215 i_{b_1} \quad (5-5)$$

با جایگذاری رابطه ۵-۵ در رابطه ۴-۵ داریم

$$i_t + 10.1 i_{b_r} + 0.215 i_{b_1} = 1.06 v_t \quad (6-5)$$

$$\begin{aligned} \text{KVL: } v_t &= -h_{ie_2} i_{b_r} - h_{ie_1} i_{b_1} + R_S (i - i_{b_1}) = -i_{b_r} - 10.215 i_{b_1} \\ \Rightarrow i_{b_r} &= -v_t - 10.215 i_{b_1} \end{aligned} \quad (7-5)$$

با جایگذاری از رابطه ۷-۵ در رابطه ۶-۵ داریم

$$i_t - 10.1 v_t - 10.3237 i_{b_1} + 0.215 i_{b_1} = 1.06 v_t \Rightarrow i_t - 10.206 v_t \approx 10.3237 i_{b_1} \quad (8-5)$$

$$\text{KVL: } v_t = -i_{b_r} h_{ie_2} + 40 (10.1 i_{b_1} - i_{b_r}) = -41 i_{b_r} + 40.4 i_{b_1} \quad (9-5)$$

با جایگذاری رابطه ۷-۵ در رابطه ۹-۵ داریم

$$v_t = -41 (-v_t - 10.215 i_{b_1}) + 40.4 i_{b_1} \Rightarrow i_{b_1} = \frac{-40}{823.815} v_t \quad (10-5)$$

با جایگذاری رابطه ۱۰-۵ در رابطه ۸-۵ داریم

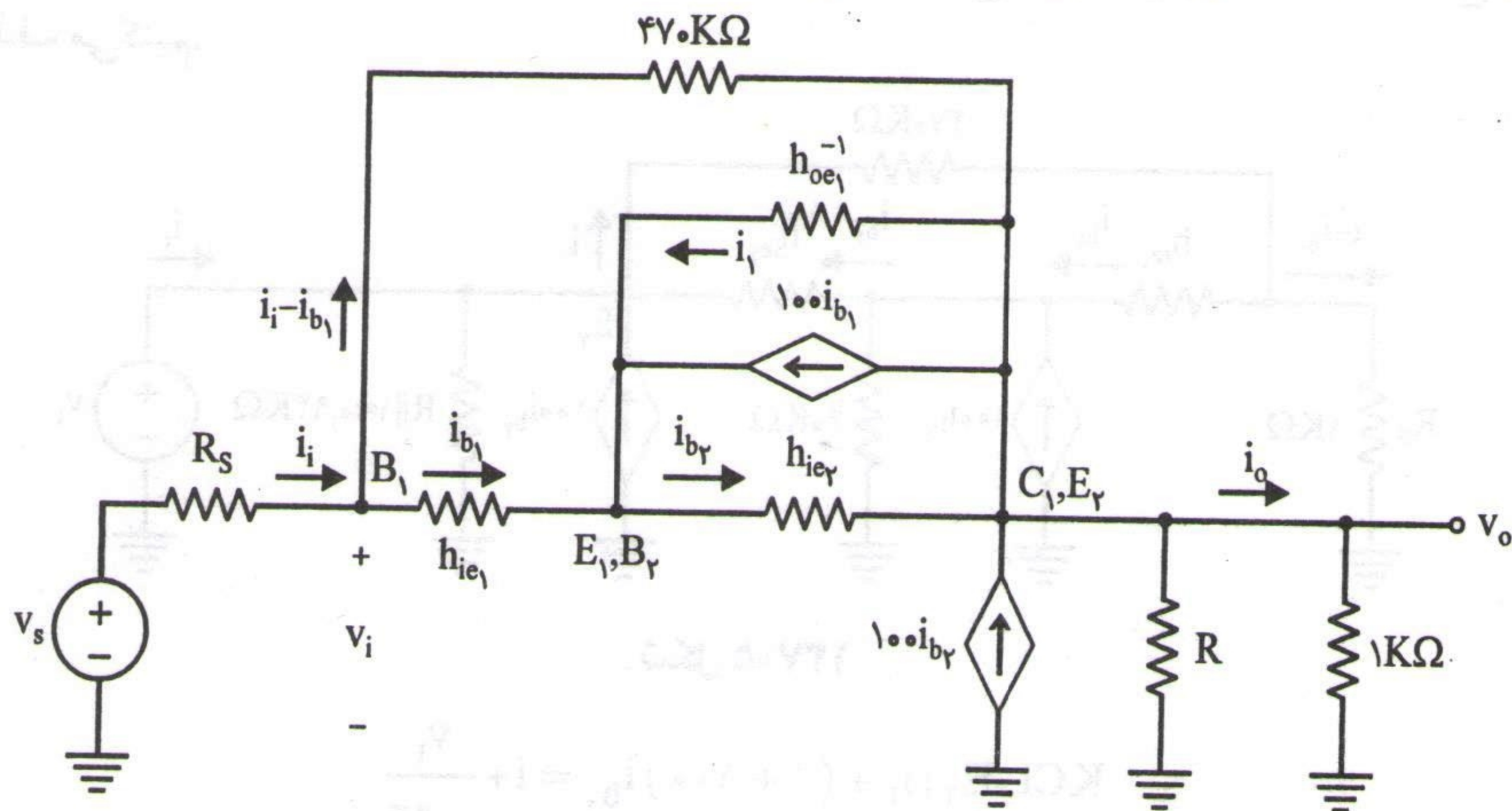
$$i_t - 10.206 v_t = -50.17 v_t \Rightarrow R_o = \frac{v_t}{i_t} \approx 19 \Omega$$

مقاومت خروجی را همچنین می‌توانستیم با روش انعکاس مقاومتها به راحتی به دست آوریم. با توجه به شکل ۵-۱۳۶ داریم

$$R_o = (1 \parallel R) \parallel \frac{R_{B_r}}{1 + h_{fe}}, \quad R_{B_r} = h_{ie_2} + h_{oe_1}^{-1} \parallel \frac{R_{B_1}}{1 + h_{fe}}$$

$$R_{B_1} = h_{ie_1} + R_S = 10.2 K\Omega, \quad R_{B_r} = 1.976 K\Omega \Rightarrow R_o = 943 \parallel 19.5 \approx 19 \Omega$$

ب) مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده شکل ۵-۱۳۵-ب در شکل ۵-۱۳۸ رسم شده است.



شکل ۵-۱۳۸

$$R = 100 \parallel 470 \parallel h_{oe1}^{-1} \parallel 100 = \frac{100}{V} K\Omega, \quad h_{ie2} = 1 K\Omega, \quad h_{ie1} = (1 + h_{fe}) h_{ie2} = 101 K\Omega$$

$$\text{محاسبه } A_i: \text{KCL } E_1: i_{b1} + 100 i_{b1} + i_1 = i_{b2}, \quad i_1 = -\frac{i_{b2} \times h_{ie2}}{h_{oe1}^{-1}} = -0.25 i_{b2}$$

$$\Rightarrow 101 i_{b1} = 0.25 i_{b2} \Rightarrow i_{b2} = 404 i_{b1} \quad (11-5)$$

$$\text{KVL: } 470(i_1 - i_{b1}) - h_{ie2} i_{b2} - h_{ie1} i_{b1} = 0 \Rightarrow i_{b1} = 0.702 i_1 \quad (12-5)$$

$$\text{KCL } E_2: i_{b2} + 100 i_{b2} + i_1 - i_{b1} = i_o + \frac{v_o}{R} + 100 i_{b1} + i_1, \quad v_o = i_o R$$

$$\Rightarrow 101 i_{b2} + i_1 = i_o \left(1 + \frac{1}{R}\right) + 101 i_{b1} - 0.25 i_{b2} \quad (13-5)$$

با جایگذاری از رابطه ۱۱-۵ و ۱۲-۵ در رابطه ۱۳-۵ داریم

$$6917.8 i_1 = 1.7 i_o \Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_1} = 6465.2$$

محاسبه R_i : با نوشتن KVL در ورودی و مقاومت $470 K\Omega$ و استفاده از رابطه ۱۲-۵ داریم

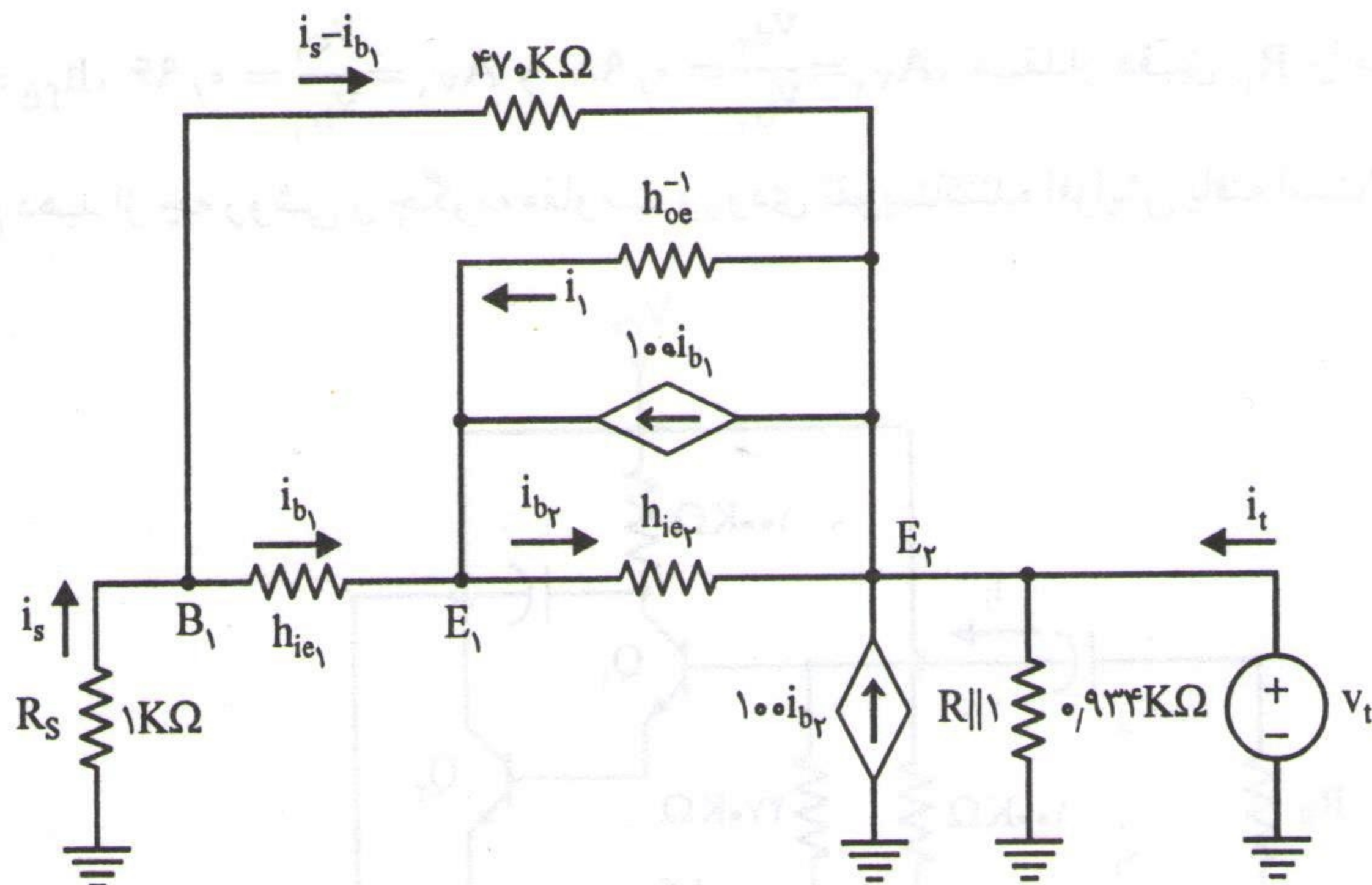
$$v_i = 470(i_1 - i_{b1}) + 1 \times i_o, \quad i_{b1} = \frac{i_1}{1.424}$$

$$\Rightarrow v_i = 470 i_1 - 330 i_1 + i_o = 140 i_1 + i_o$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_1} = \frac{140 i_1 + i_o}{i_1} = 140 + A_i = 6605.2 K\Omega \approx 6.6 M\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times 1}{i_1 \times R_i} = \frac{1}{R_i} A_i \approx 0.979$$

برای محاسبه R_0 ، مطابق شکل ۵-۱۳۹ در خروجی یک منبع آزمایشی قرار داده و ورودی v_s را حذف می‌کنیم.



شکل ۵-۱۳۹

$$KCL E_1 = i_{b_1} + 100 i_{b_1} + \frac{i_{b_r} \times h_{ie_r}}{h_{oe_1}} = i_{b_r} \Rightarrow i_{b_r} = 99.53 i_{b_1} \quad (14-5)$$

$$\text{KVL: } v_t = -r_V \cdot (i_s - i_{b_1}) + R_S i_s = r_V \cdot i_{b_1} - r_{eq} i_s \Rightarrow i_s = \frac{r_V \cdot i_{b_1} - v_t}{r_{eq}} \quad (15-5)$$

$$\text{KCLE}_r: i_{b_r} + 1 \cdot i_{b_r} + i_t + i_s - i_{b_1} = \frac{V_t}{0.934} + 1 \cdot i_{b_1} - 0.25 i_{b_r}$$

$$\Rightarrow 1.15 i_{b_r} + i_t + i_s = 1.1 i_{b_1} + \frac{V_t}{0.934} \quad (16-5)$$

با جایگذاری روابط ۵-۱۴ و ۵-۱۵ در رابطه ۵-۱۶ داریم

$$9954 i_{b_1} + i_t + i_{b_1} \cdot \frac{V_t}{469} = 1.1 i_{b_1} + \frac{V_t}{0.934} \Rightarrow 9954 i_{b_1} + i_t = 1.07 V_t \quad (17-5)$$

با نوشتن KVL و استفاده از روابط ۵-۱۴ و ۵-۱۵ داریم

$$\text{KVL: } v_t = -i_{b_r} h_{ie_r} - i_{b_1} h_{ie_1} - R_S i_s \approx -9\text{M}\Omega i_{b_1} - 1.1 i_{b_1} - i_{b_1} + \frac{v_t}{469}$$

$$\Rightarrow 20.05\text{M}\Omega i_{b_1} = -0.998 v_t \Rightarrow i_{b_1} = -4.976 \times 10^{-3} v_t \quad (18-5)$$

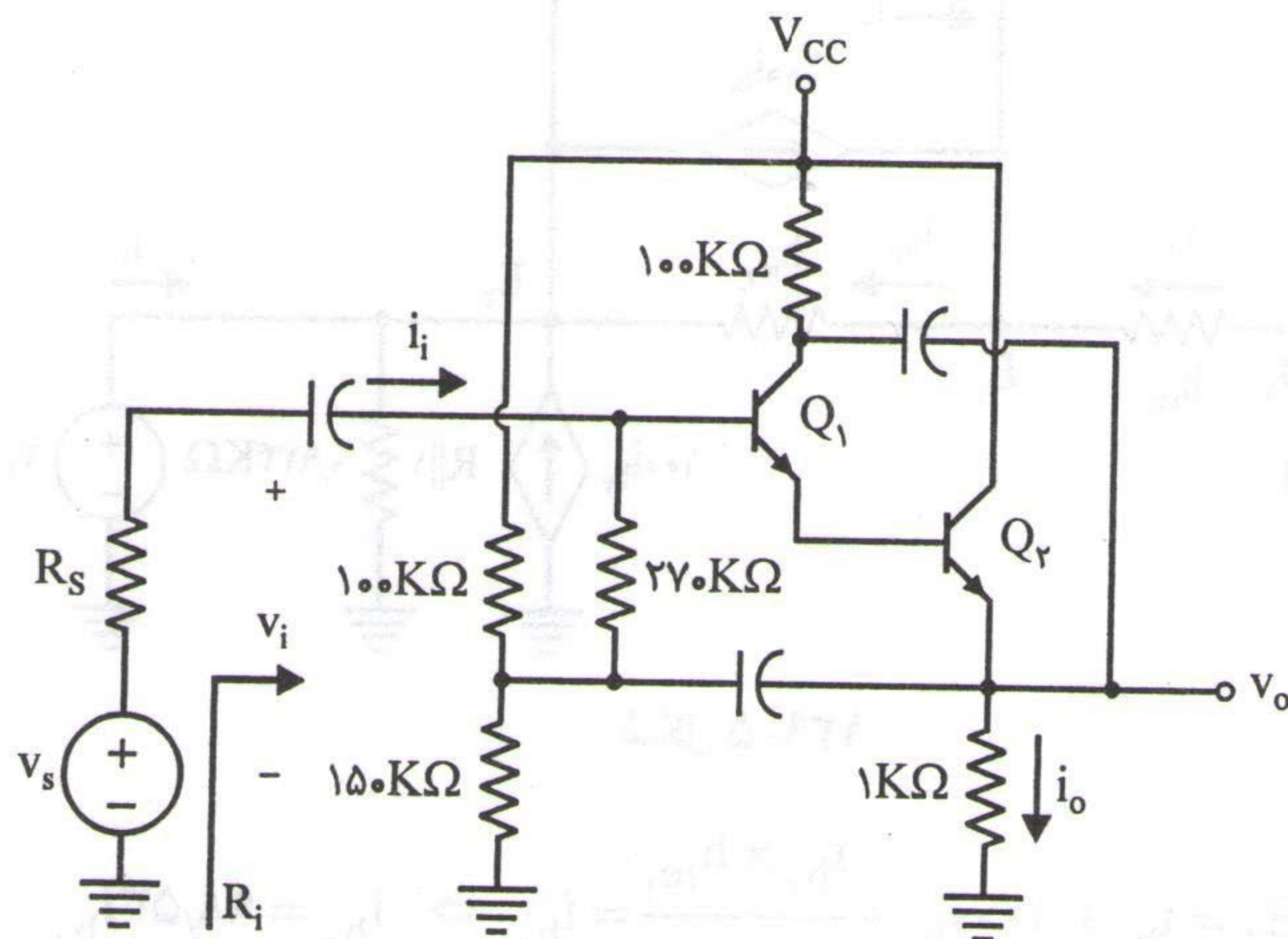
با جایگذاری رابطه ۵-۱۸ در رابطه ۵-۱۷ داریم

$$-49v_t + i_t = 1 \cdot 10^{-3} v_t \Rightarrow R_o = \frac{v_t}{i_t} \approx 2 \cdot \Omega$$

۵۳. در مدار تقویت کننده کلکتور مشترک شکل ۵-۱۴۰ با فرض $h_{ie_1} = 1\text{ K}\Omega$ ، $h_{oe_1} = 40\text{ K}\Omega$

و $h_{fe} = 100$ ، $A_{v_1} = \frac{v_{e_1}}{v_{b_1}} = 0.96$ و $A_{v_2} = \frac{v_{e_2}}{v_{b_2}} = 0.98$ مقدار دقیق R_i را محاسبه کنید و

توضیح دهید از چه روشی و چگونه مقاومت ورودی تقویت کننده افزایش یافته است؟

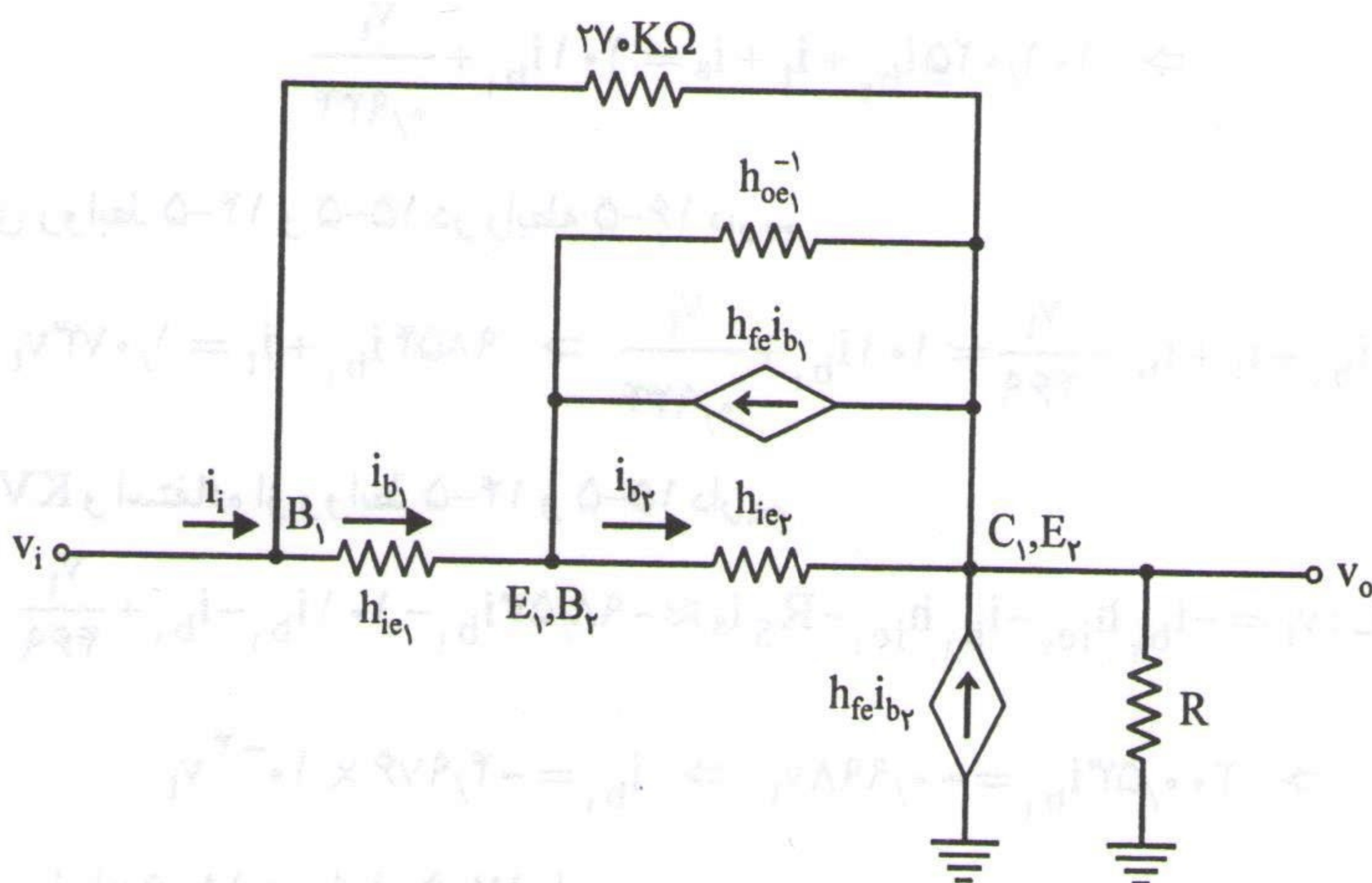


شکل ۵-۱۴۰

$$I_{E_2} = (1 + h_{fe}) I_{E_1} \Rightarrow h_{ie_2} = \frac{h_{ie_1}}{1 + h_{fe}} \approx 10\text{ }\Omega$$

حل:

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۱۴۱ نشان داده شده است.

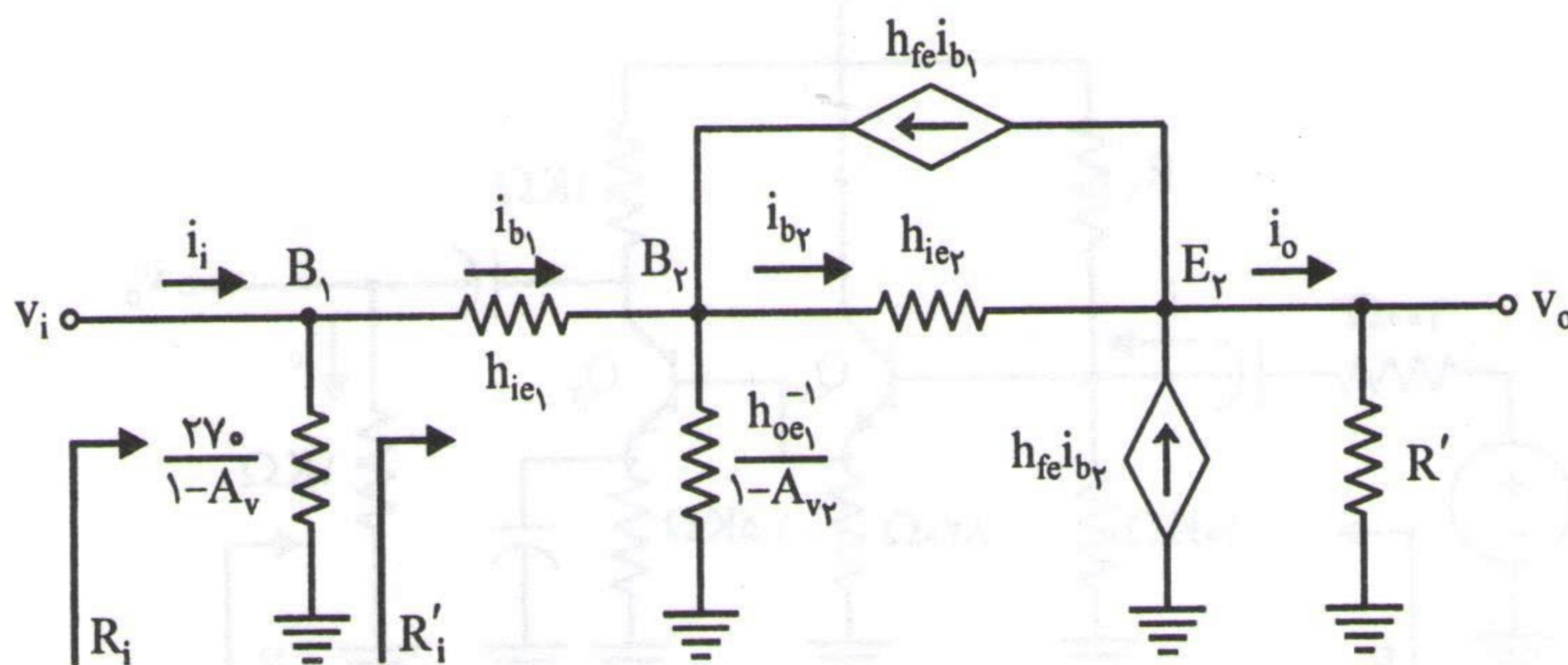


شکل ۵-۱۴۱

$$R = 100 \parallel 150 \parallel 1 \parallel h_{oe1}^{-1} \parallel 100 = 0.951 K\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = A_{v1} \times A_{v2} = 0.941$$

مقاومت‌های $270 K\Omega$ و h_{oe1}^{-1} را با استفاده از قضیه میلر به ترتیب با $k_1 = A_v = 0.941$ و $k_2 = A_{v2} = 0.98$ تبدیل می‌کنیم. به این ترتیب مدار معادل سیگنال کوچک به صورت شکل ۵-۱۴۲ در خواهد آمد.



شکل ۵-۱۴۲

$$R' = R \parallel \frac{270 \cdot A_v}{A_v - 1} \parallel \frac{h_{oe1}^{-1} A_{v2}}{A_{v2} - 1} \approx R$$

دقت شود که حاصل موازی دو مقاومت منفی که با R موازی شده‌اند با تقریب بسیار بالایی همان R خواهد

بود. با صرف نظر از جریان مقاومت $\frac{h_{oe1}^{-1}}{1 - A_{v2}}$ داریم

$$i_{b2} = (1 + h_{fe}) i_{b1} = 10.1 i_{b1}$$

$$i_o = (1 + h_{fe}) i_{b2} - h_{fe} i_{b1} = 10.10.1 i_{b1}$$

$$v_i = h_{ie1} i_{b1} + h_{ie2} i_{b2} + R' i_o \approx 96.08 i_{b1}$$

$$R'_i = \frac{v_i}{i_{b1}} = 96.08 K\Omega$$

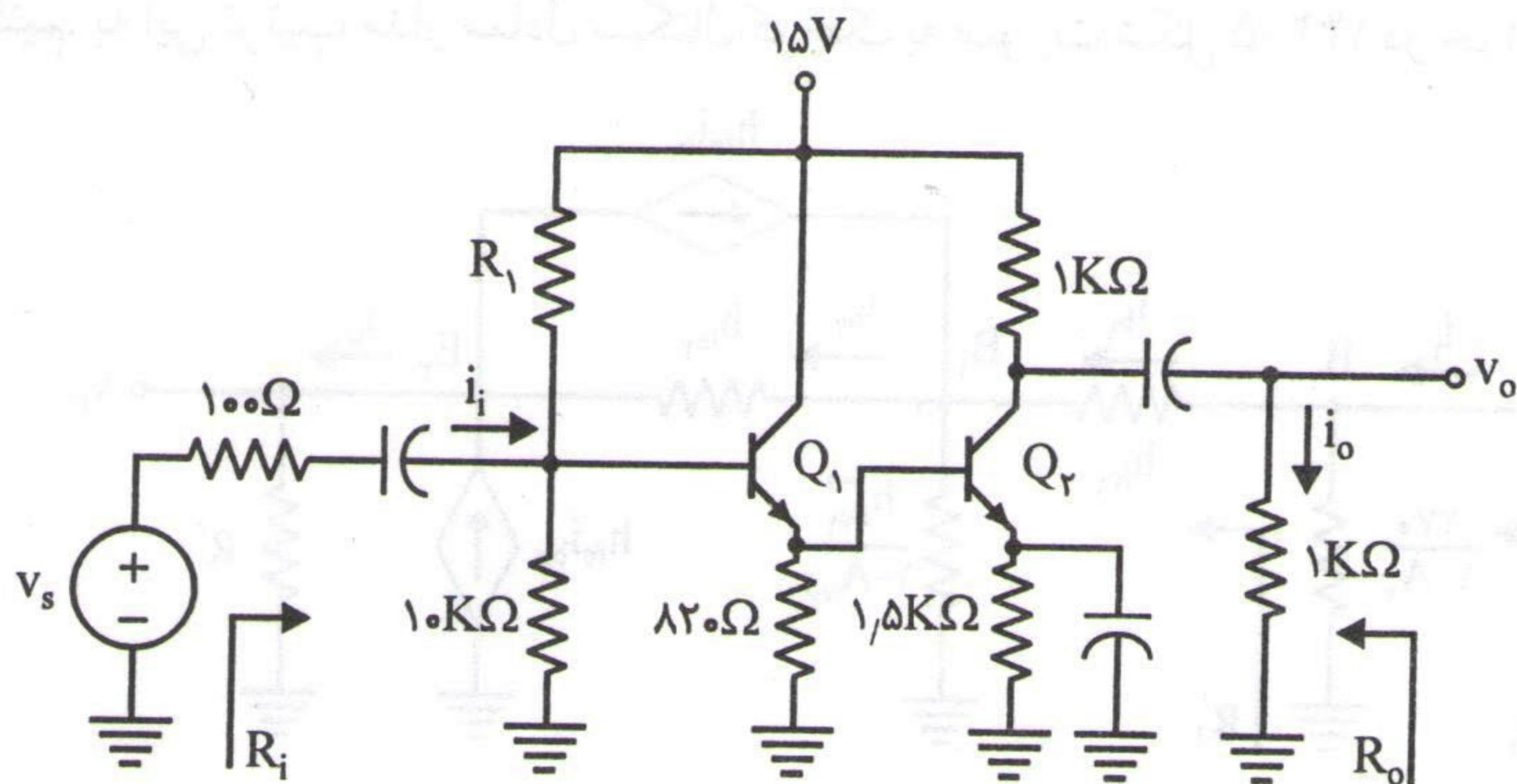
$$R_i = R'_i \parallel \frac{270}{1 - A_v} = 3.9985 K\Omega \approx 3.1 M\Omega$$

در این مدار اثر کاهش مقاومت ورودی R_i توسط h_{oe1}^{-1} و مقاومت‌های بایاس ترانزیستور اول به روش بوت استرپ برطرف شده است.

۵۴. در مدار شکل ۵-۱۴۳ با فرض $V_{CE(sat)} = 0.2V$, $h_{fe} = 50$, $h_{re} \cong 0$, $h_{oe} = 40 K\Omega$ و $V_{BE} = 0.7V$ و $V_T = 26mV$

الف) مقاومت R_1 را طوری تعیین کنید که دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی حداکثر شود.

ب) با فرض $R_1 = 5.6 K\Omega$ مقادیر کمیت‌های A_i , A_v , R_i و R_o را به دست آورید.



شکل ۵-۱۴۳

حل: الف) برای اینکه خروجی حداکثر دامنه نوسان را داشته باشد باید نقطه کار در وسط خط بار ac قرار گیرد؛ یعنی

$$I_{CQ_2} = \frac{V_{CC}}{R_{ac_2} + R_{DC_2}}, \quad R_{ac_2} = 1 \parallel 1 = 0.5 K\Omega, \quad R_{DC_2} = 1 + 1.5 = 2.5 K\Omega$$

$$\Rightarrow I_{CQ_2} = 5mA, \quad I_{E_2} = 5.1mA, \quad V_{E_2} = 7.65V, \quad V_{E_1} = V_{B_2} = 8.35V$$

$$\Rightarrow I_{E_1} = 10.283mA, \quad I_{B_1} \approx 0.2mA, \quad I_{C_1} \approx 10mA$$

$$R_{Th_1} = 10 \parallel R_1, \quad V_{Th_1} = \frac{V_{CC}}{R_1 + 10} \times 10$$

$$V_{Th_1} = R_{Th_1} I_{B_1} + V_{BE_1} + V_{E_1} \approx 0.2 R_{Th_1} + 9 = \frac{2R_1}{R_1 + 10} + 9$$

$$\Rightarrow \frac{150}{R_1 + 10} = \frac{2R_1}{R_1 + 10} + 9 \Rightarrow R_1 \approx 5.45 K\Omega$$

حداکثر دامنه نوسان در این شرایط $2.3V$ است. لازم به ذکر است که اگر بخواهیم مسأله را با دقت بیشتری حل کنیم و اثر $V_{CE(sat)} = 0.2V$ را در نظر بگیریم باید از رابطه زیر برای I_{CQ_2} استفاده کنیم:

$$I_{CQ_2} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_{ac_2} + R_{DC_2}} \approx 4.93mA \Rightarrow I_{E_2} = 5.032V, \quad V_{E_2} = 7.548V$$

$$V_{E_1} = V_{B_2} = 8.248V \Rightarrow I_{E_1} \approx 10.16mA, \quad I_{B_1} = 0.199mA$$

$$\Rightarrow V_{Th_1} = 0.199 R_{Th_1} + 8.948 \Rightarrow R_1 \approx 5.53 K\Omega$$

حداکثر دامنه نوسان در این شرایط $۲,۴۶\text{ V}$ است.

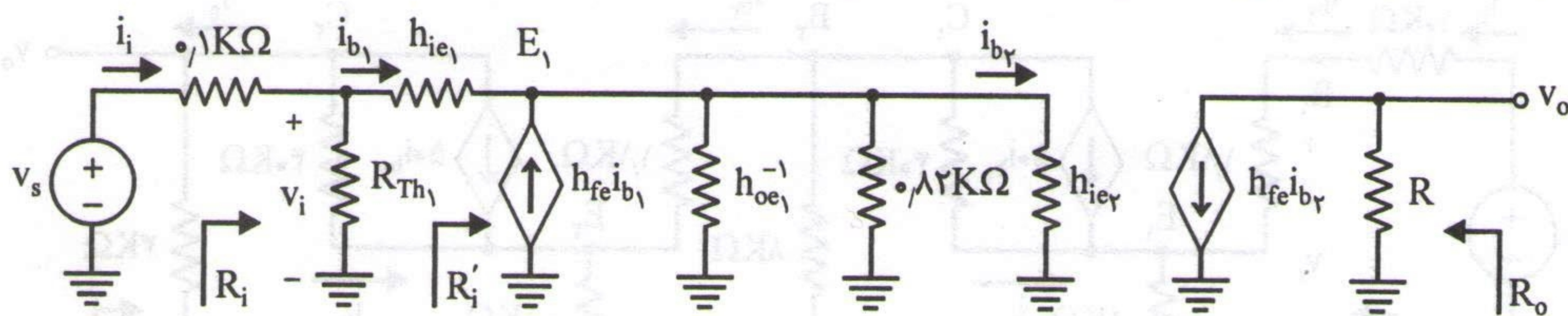
$$R_{Th_1} = ۱۰ \parallel ۵,۶ \approx ۳,۶\text{ K}\Omega, \quad V_{Th_1} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \times R_2 \approx ۹,۶\text{ V} \quad (\text{ب})$$

$$I_{E_1} = \frac{V_{Th_1} - V_{BE_1}}{R_{Th_1} / (1 + h_{fe})} \approx ۱۰\text{ mA}, \quad I_{C_1} = ۹,۸\text{ mA}, \quad h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} \approx ۱۳۲\Omega$$

$$V_{Th_1} = R_{Th_1} I_{B_1} + V_{BE_1} + V_{E_1} \Rightarrow V_{E_1} = V_{B_1} = ۸,۲\text{ V}, \quad V_{E_2} = ۷,۵\text{ V}$$

$$I_{E_2} = ۵\text{ mA}, \quad I_{C_2} = ۴,۹\text{ mA}, \quad h_{ie_2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_2}} = ۲۶۵\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۱۴۴-۵ رسم شده است.



شکل ۱۴۴-۵

$$R = h_{oe_2} \parallel ۱ \parallel ۱ \approx ۴۹۴\Omega$$

محاسبه A_v :

$$v_o = -h_{fe} i_{b_2} \times R = -۲۴,۷ i_{b_2}, \quad i_{b_2} = \frac{h_{oe_1} \parallel ۰,۸۲}{h_{oe_1} \parallel ۰,۸۲ + h_{ie_2}} (1 + h_{fe}) i_{b_1} \approx ۳۸,۳۵ i_{b_1}$$

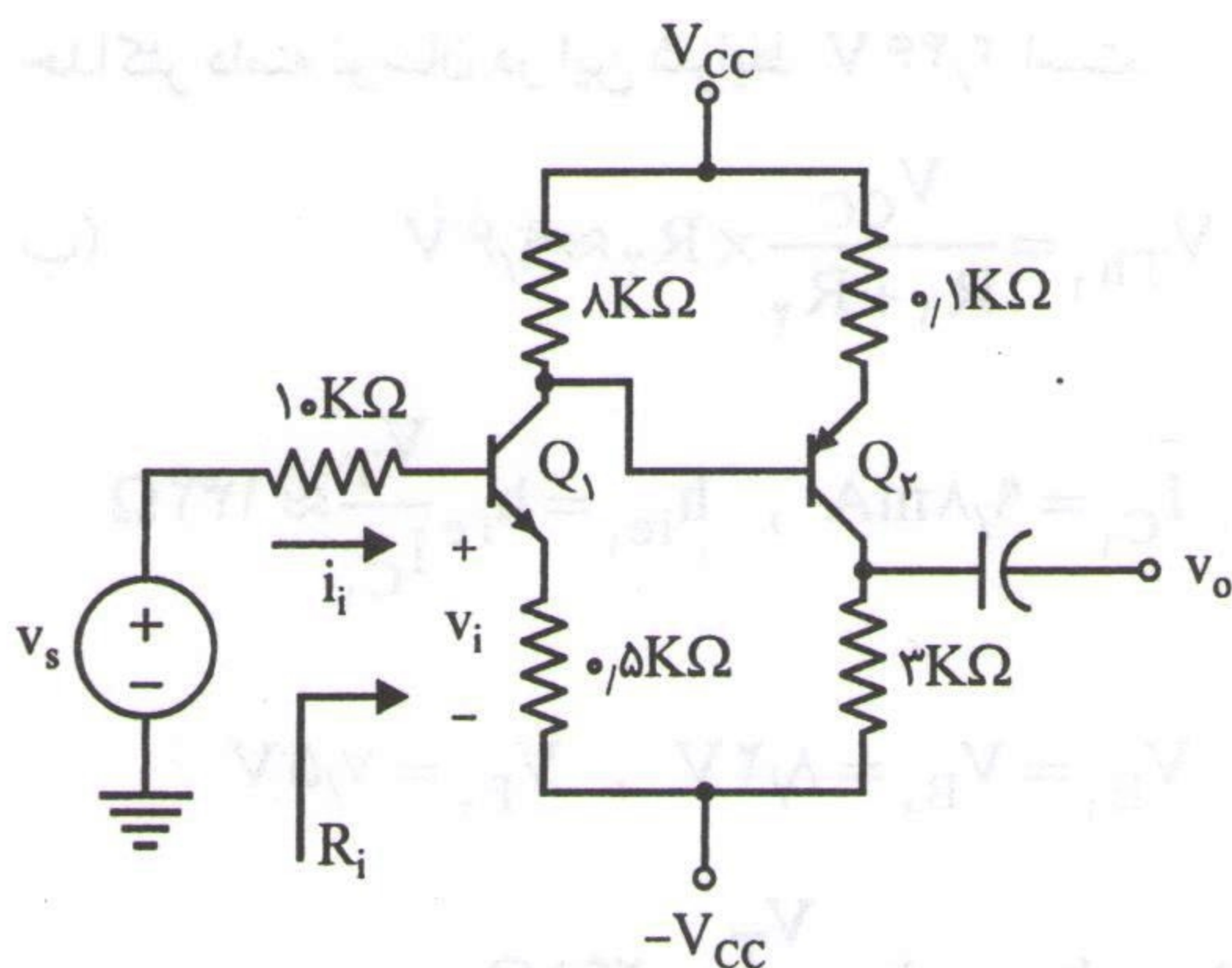
$$i_{b_1} = \frac{v_i}{h_{ie_1} + R_i'}, \quad R_i' = (1 + h_{fe})(h_{oe_1} \parallel ۰,۸۲ \parallel h_{ie_2}) = ۱۰,۱۶\text{ K}\Omega, \quad i_{b_1} = ۰,۰۹۷ v_i$$

$$\Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = (-۲۴,۷) \times (۳۸,۳۵) \times (۰,۰۹۷) = -۹۱,۹$$

$$R_i = R_{Th_1} \parallel (h_{ie_1} + R_i') \approx ۲,۶۷\text{ K}\Omega$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / 1}{v_i / R_i} = R_i A_v = -۲۴۵,۴$$

$$\text{اگر } v_s = 0 \Rightarrow i_{b_1} = i_{b_2} = 0 \Rightarrow R_o = R = ۴۹۴\Omega$$



شکل ۵-۱۴۵

۵۵. در مدار تقویت کننده شکل ۵-۱۴۵،

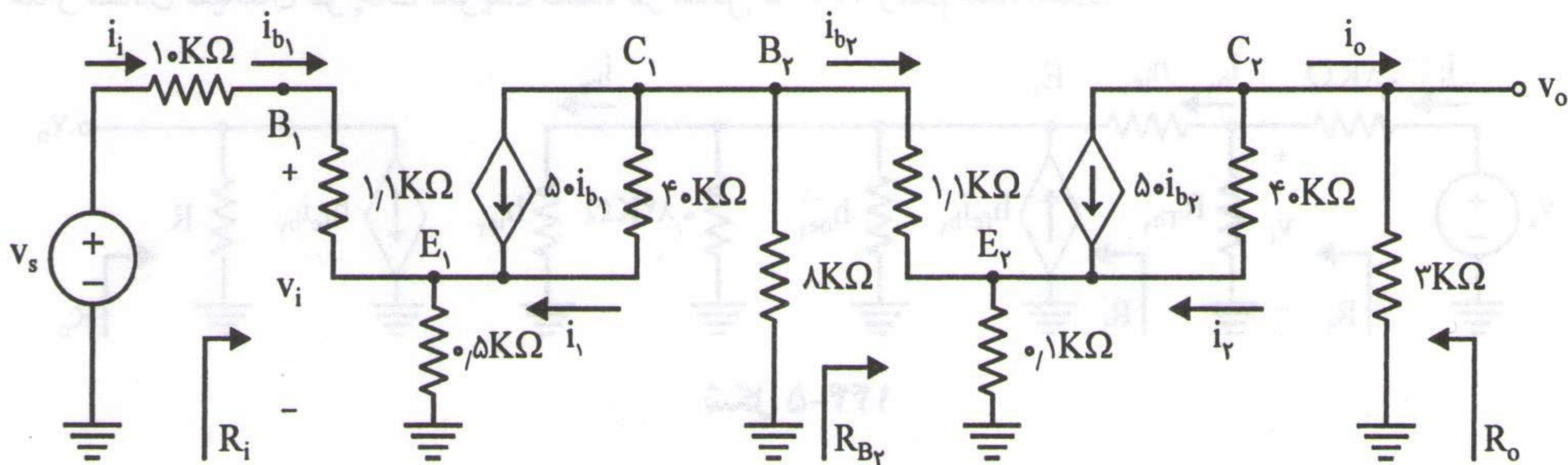
ترانزیستورها دارای $h_{ie} = 1.1 K\Omega$

$h_{oe}^{-1} = 40 K\Omega$ و $h_{re} \approx 0$ ، $h_{fe} = 50$

می باشند. مقادیر کمیت های A_{vs} ، A_v ، A_i و

R_i را محاسبه کنید.

حل: مدل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۱۴۶ رسم شده است.



شکل ۵-۱۴۶

$$\text{محاسبه } A_v: \text{KCL } C_2: -50 \cdot i_{b_2} = i_o + i_r = \frac{v_o}{3} + i_r \Rightarrow i_r = -50 \cdot i_{b_2} - \frac{v_o}{3}$$

$$\text{KVL: } v_o = 40 \cdot i_r + 0.1(i_{b_2} + 50 \cdot i_{b_2} + i_r) \Rightarrow v_o = 40.1 i_r + 5.1 i_{b_2}$$

با جایگذاری i_r داریم

$$v_o = -139.2 i_{b_2} \Rightarrow i_r = -3.6 i_{b_2}$$

حال جریان i_{b_2} را بر حسب جریان i_{b_1} به دست می آوریم.

$$v_{b_2} = 1.1 i_{b_2} + 0.1(i_{b_2} + 50 \cdot i_{b_2} + i_r) = 5.84 i_{b_2} \Rightarrow R_{B_2} = \frac{v_{b_2}}{i_{b_2}} = 5.84 K\Omega$$

$$\text{KCL } C_1: i_1 = -50 \cdot i_{b_1} - \frac{v_{b_2}}{(5.84 \parallel 8)} = -50 \cdot i_{b_1} - 0.296 v_{b_2} \Rightarrow i_1 = -50 \cdot i_{b_1} - 1.73 i_{b_2}$$

$$\text{KVL: } v_{b_2} = 40 \cdot i_1 + 0.5(i_{b_1} + 50 \cdot i_{b_1} + i_1) = 40.5 i_1 + 25.5 i_{b_1}$$

اگر در معادله فوق به جای i_1 و v_{b_2} مقادیرشان را بر حسب i_{b_1} و i_{b_2} قرار دهیم، داریم

$$i_{b_2} = -26.34 i_{b_1} \Rightarrow i_1 = -4.43 i_{b_1}$$

برای داشتن رابطه i_{b1} و v_i معادله KVL را در حلقه BE_1 می نویسیم.

$$v_i = 1/1 i_{b1} + 0.5(51 i_{b1} + i_{i1}) \approx 24.4 i_{b1} \Rightarrow i_{b1} = v_i / 24.4$$

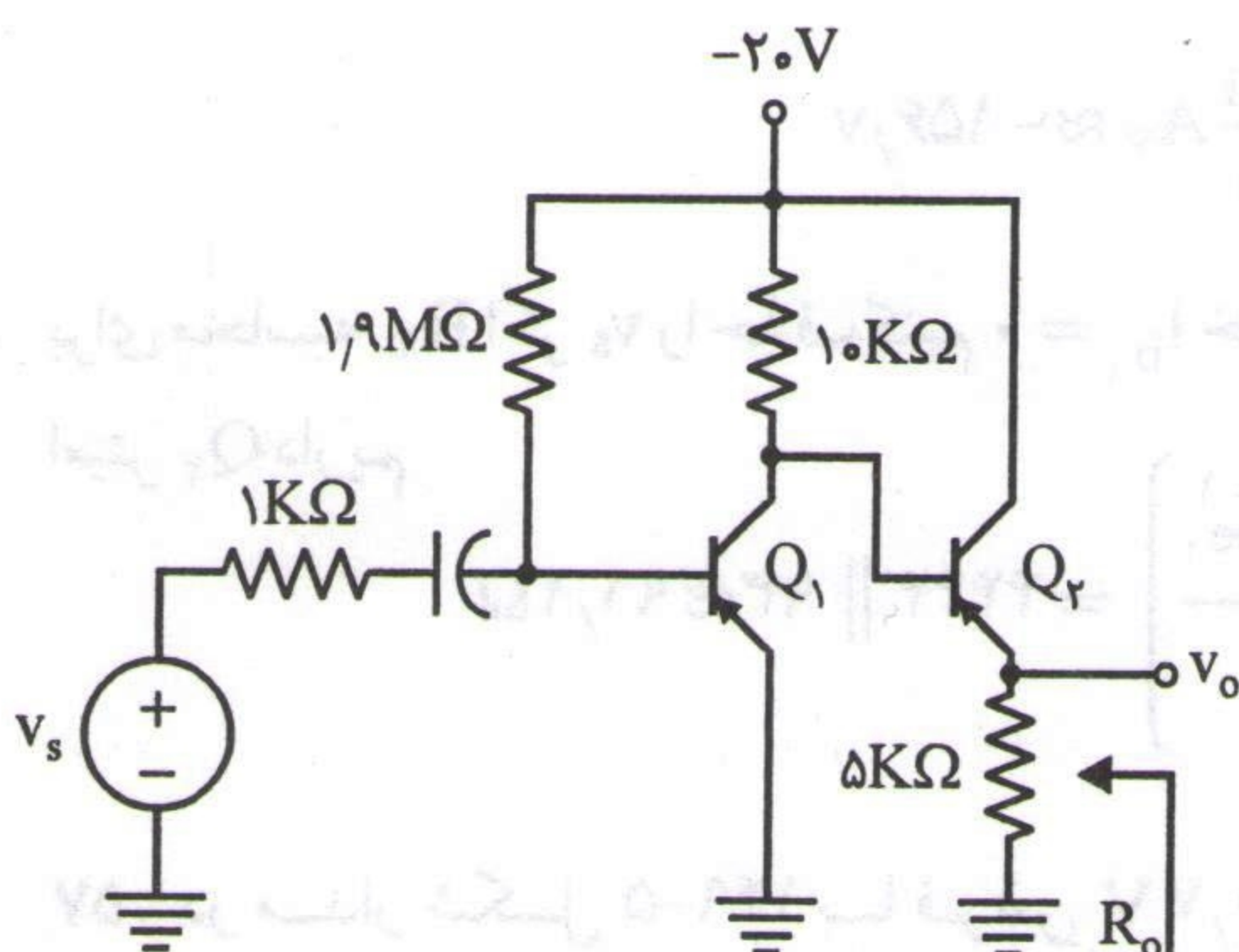
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = (-139.2)(-26.34)(1/24.4) \approx 150.3$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{v_i}{i_{b1}} = 24.4 \text{ K}\Omega$$

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v = 106.6$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o/3}{v_i/R_i} = \frac{24.4}{3} A_v = 1222.44$$

توصیه می شود مسأله را با استفاده از مدل تقریبی (بدون در نظر گرفتن h_{oe}^{-1}) حل نموده و پاسخها را مقایسه نمایید.



شکل ۵-۱۴۷

۵۶. در تقویت کننده دو طبقه شکل ۵-۱۴۷، ترانزیستورها

مشابه و دارای $h_{fe} = 100$ ، $h_{oe}^{-1} = 40 \text{ K}\Omega$

$V_T = 26 \text{ mV}$ و $V_{EB} = 0.7 \text{ V}$ هستند. جریان

نقطه کار ترانزیستورها، A_v و R_o را محاسبه نمایید.

حل: از مدار DC جریان نقطه کار ترانزیستورها را به دست می آوریم.

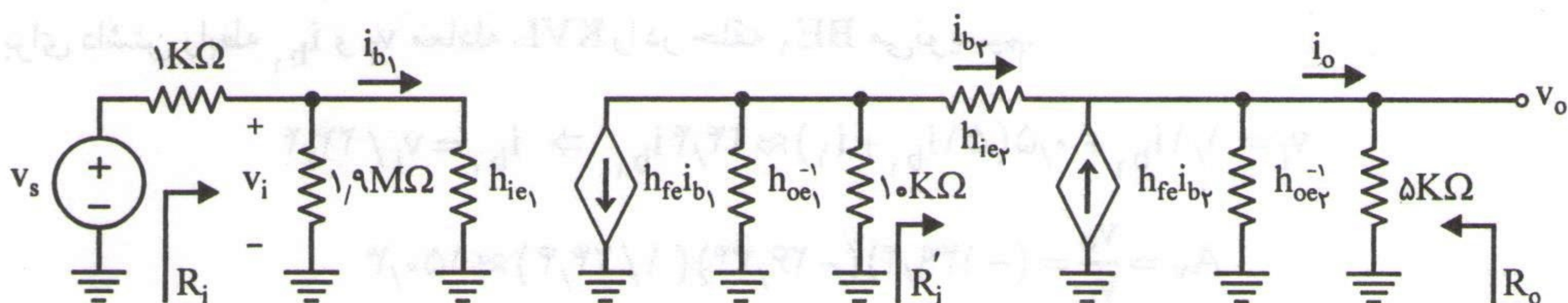
$$\text{KVL: } V_{EB1} + 1900 I_{B1} - 20 = 0 \Rightarrow I_{B1} \approx 10 \mu\text{A}, I_{C1} = 1 \text{ mA}$$

$$h_{ie1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C1}} = 2.6 \text{ K}\Omega$$

$$\text{KVL: } 5 I_{E2} + V_{EB2} + 10(I_{C1} + I_{B2}) - 20 = 0 \Rightarrow I_{B2} = 18 \mu\text{A} \Rightarrow I_{C2} = 1.8 \text{ mA}$$

$$h_{ie2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C2}} \approx 1.44 \text{ K}\Omega$$

مدار سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۱۴۸ خواهد بود.



شکل ۵-۱۴۸

محاسبه A_v :

$$v_o = (1 + h_{fe}) i_{b_2} \times (h_{oe_2}^{-1} \parallel 5) = 448.9 i_{b_2}, \quad R_i' = h_{ie_2} + (1 + h_{fe}) (5 \parallel h_{oe_2}^{-1}) = 450.33 K\Omega$$

$$i_{b_2} = -h_{fe} i_{b_1} \frac{10 \parallel h_{oe_1}^{-1}}{10 \parallel h_{oe_1}^{-1} + R_i'} = -1.745 i_{b_1}, \quad i_{b_1} = \frac{v_i}{h_{ie_1}}$$

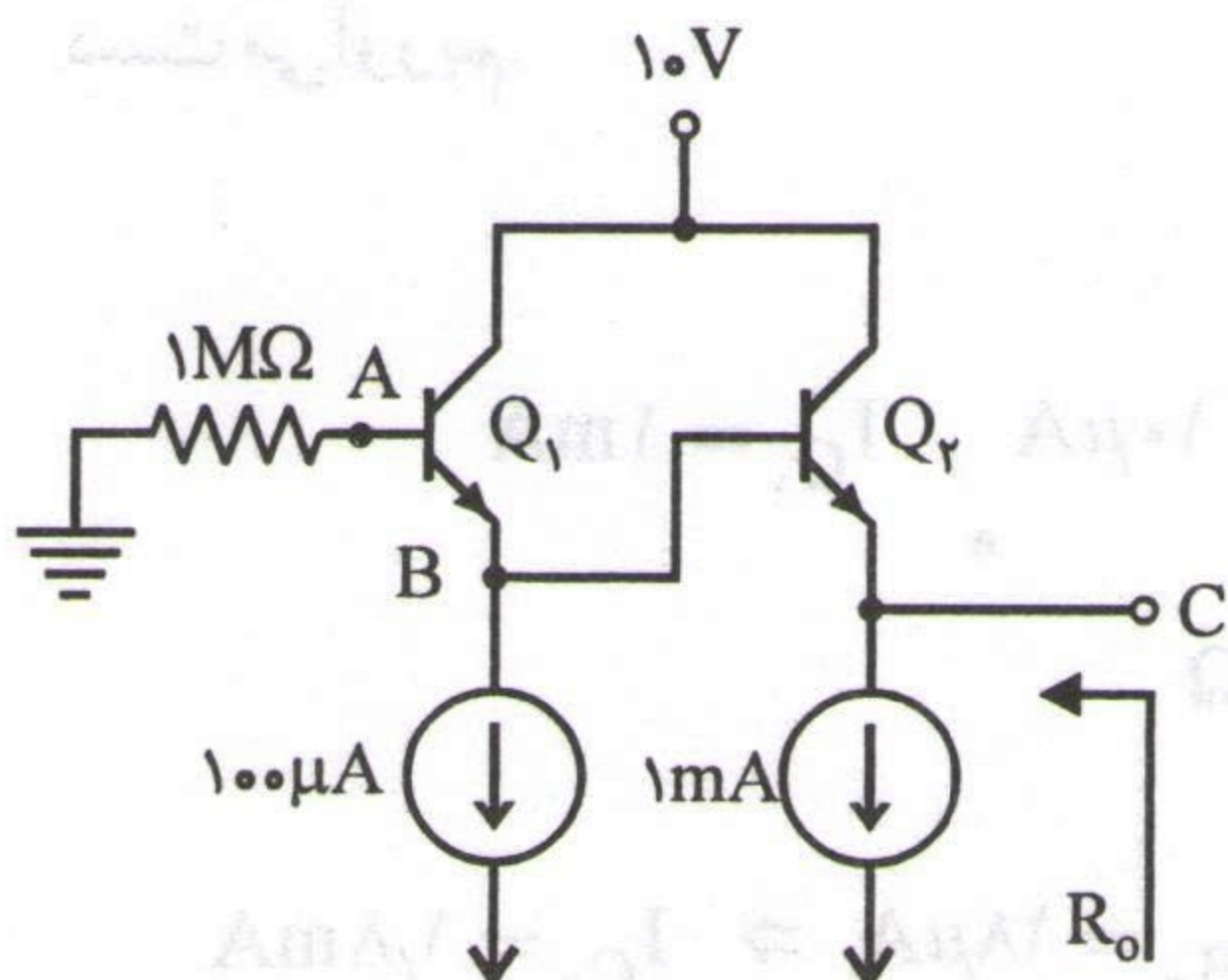
$$\Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = (448.9) (-1.745) \times (1/h_{ie_1}) \approx -30.13$$

$$R_i = 1900 \parallel h_{ie_1} \approx 2.6 K\Omega$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o/5}{v_i/R_i} = \frac{R_i}{5} A_v \approx -156.7$$

برای محاسبه R_o اگر v_s را حذف کنیم $i_{b_1} = 0$ خواهد شد. در این صورت با استفاده از انعکاس مقاومتها در امیتر Q_2 داریم

$$R_o = (5 \parallel h_{oe_2}^{-1}) \parallel \left[\frac{h_{ie_2} + 10 \parallel h_{oe_1}^{-1}}{1 + h_{fe}} \right] = 4444 \parallel 93 \approx 91.1 \Omega$$



شکل ۵-۱۴۹

۵۷. در مدار شکل ۵-۱۴۹ با فرض $V_{BE} = 0.7V$

$h_{fe} = 100$ و $V_T = 26mV$ ولتاژهای DC نقاط A،

B و C را به دست آورید. مقاومت خروجی R_o را نیز

محاسبه نمایید.

حل: ابتدا مقادیر DC را به دست می‌آوریم.

$$I_{E_2} = 1mA \Rightarrow I_{B_2} = 9.9\mu A, \quad I_{E_1} = 100 + I_{B_2} = 109.9\mu A$$

$$\Rightarrow I_{B_1} \approx 1.08\mu A \Rightarrow V_A = -1.08V, \quad V_B = V_A - V_{BE_1} = -1.78V$$

$$V_C = V_B - V_{BE_2} = -2.48V, \quad I_{C_2} = 0.99mA, \quad I_{C_1} = 0.108mA$$

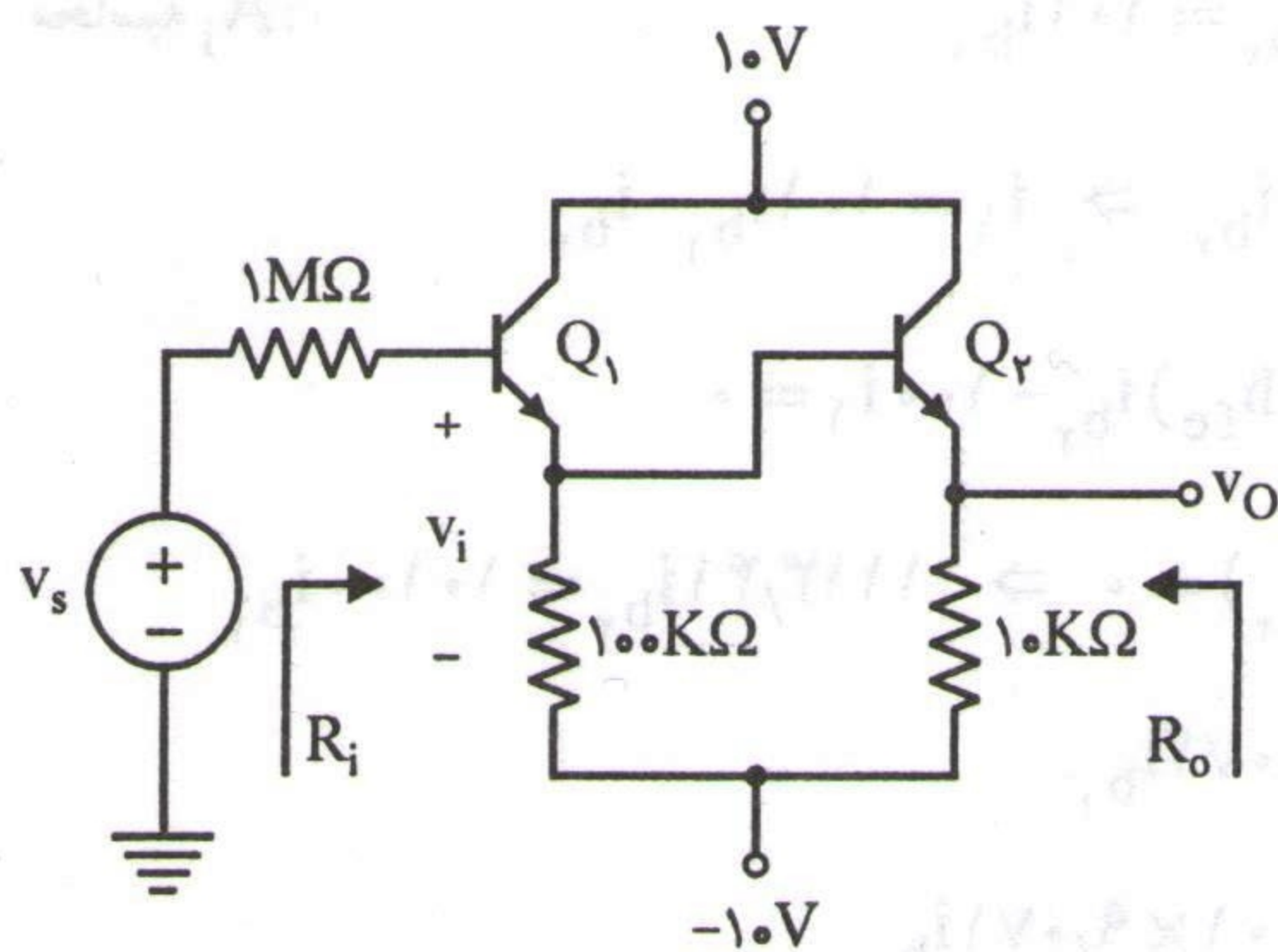
$$h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} \approx 23.9 K\Omega, \quad h_{ie_2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_2}} \approx 2.63 K\Omega$$

برای محاسبه R_o از روش انعکاس مقاومتها استفاده می‌کنیم.

$$R_o = \frac{R_{B_2}}{1+h_{fe}}, \quad R_{B_2} = h_{ie_2} + \frac{R_{B_1}}{1+h_{fe}}, \quad R_{B_1} = h_{ie_1} + 1000 = 10.239 K\Omega$$

$$\Rightarrow R_{B_2} = 12.767 K\Omega \Rightarrow R_o \approx 126 \Omega$$

■



شکل ۵-۱۵۰

۵۸. در مدار شکل ۵-۱۵۰ با فرض $V_{BE} = 0.7V$

$h_{fe} = 100$ و $V_T = 26mV$ ولتاژ DC

خروجی، حداکثر دامنه بدون اعوجاج خروجی

و مقادیر A_v ، R_o و R_i را محاسبه نمایید.

حل: ابتدا جریان نقطه کار ترانزیستورها را از روی

مدار DC به دست می‌آوریم.

$$\text{KVL: } 1000 \cdot I_{B_1} + V_{BE_1} + 100(I_{E_1} - I_{B_2}) - 10 = 0 \Rightarrow 111I_{C_1} - I_{C_2} = 9.3$$

$$\text{KVL: } 1000 \cdot I_{B_1} + V_{BE_1} + V_{BE_2} + 10I_{E_2} - 10 = 0 \Rightarrow 10I_{C_1} + 10.1I_{C_2} = 8.6$$

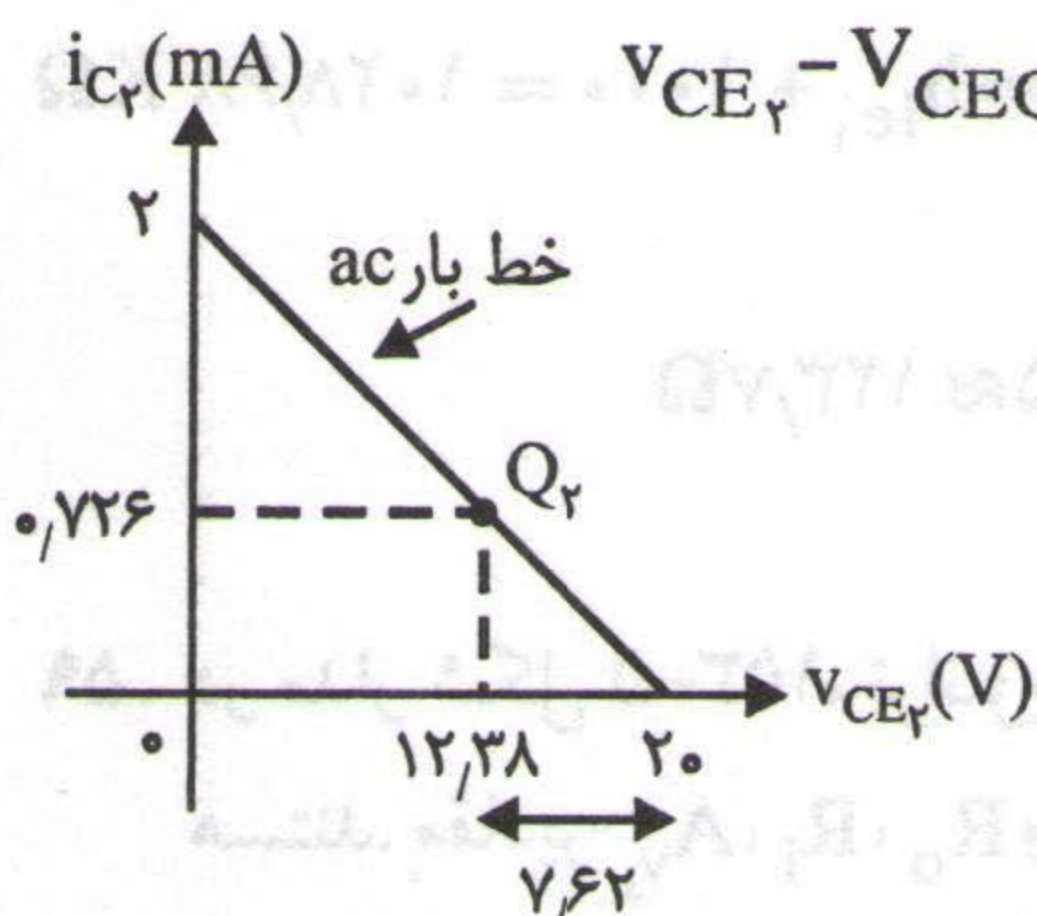
از حل دو معادله فوق جریان نقطه کار ترانزیستورها برابر است با

$$I_{C_1} \approx 90.652 \mu A, \quad I_{C_2} \approx 0.762 mA, \quad V_{CEQ_2} = 12.38 V$$

$$V_O = V_{E_2} = 10I_{C_2} - 10 = -2.38 V$$

برای محاسبه حداکثر دامنه نوسان، معادله خط بار ac را به دست می‌آوریم.

$$v_{CE_2} - V_{CEQ_2} = -R_{ac_2}(i_{C_2} - I_{CQ_2}), \quad R_{ac_2} = 10 K\Omega$$



$$\Rightarrow v_{CE_2} = -10i_{C_2} + 20$$

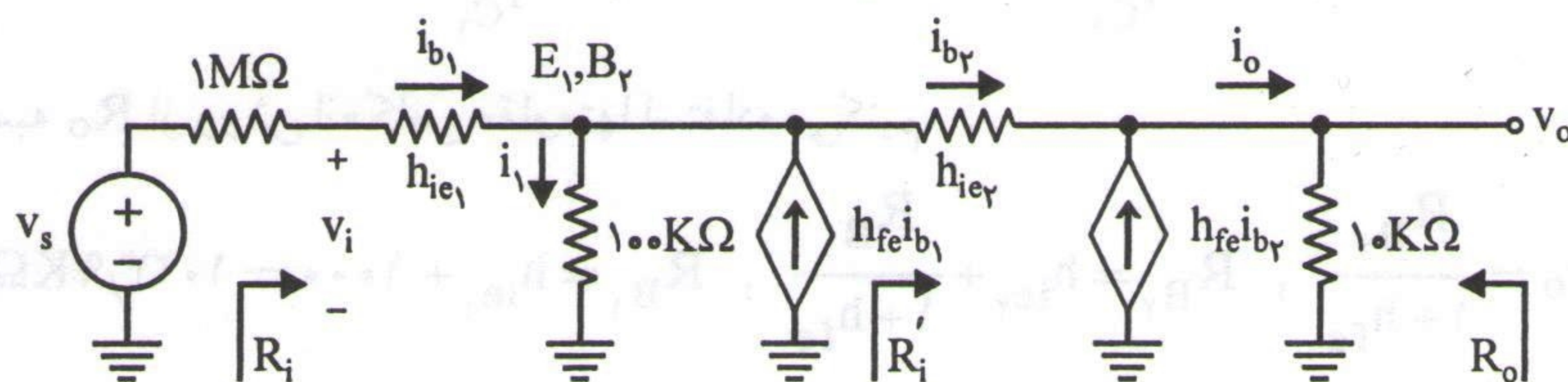
با توجه به معادله خط بار ac که در شکل ۵-۱۵۱ رسم شده است حداکثر

دامنه نوسان متقارن v_{ce} که برابر v_o بوده، برابر $7.62V$ است.

$$h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} \approx 28.68 K\Omega, \quad h_{ie_2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_2}} = 3.41 K\Omega$$

شکل ۵-۱۵۱

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۱۵۲ رسم شده است.



شکل ۵-۱۵۲

$$i_o = (1 + h_{fe}) i_{b_2} = 101 i_{b_2} \quad \text{محاسبه } A_i:$$

$$\text{KCL } E_1: (1 + h_{fe}) i_{b_1} = i_1 + i_{b_2} \Rightarrow i_1 = 101 i_{b_1} - i_{b_2}$$

$$\text{KVL: } i_{b_2} h_{ie_2} + 100(1 + h_{fe}) i_{b_2} - 100 i_1 = 0$$

$$\Rightarrow 3/4 i_{b_2} + 1010 i_{b_2} - 100(101 i_{b_1} - i_{b_2}) = 0 \Rightarrow 1113/4 i_{b_2} = 10100 i_{b_1}$$

$$\Rightarrow i_{b_2} = 9/071 i_{b_1}$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{(1 + h_{fe}) i_{b_2}}{i_{b_1}} = \frac{101 \times 9/071 i_{b_1}}{i_{b_1}} \approx 916/2$$

$$v_i = h_{ie_1} i_{b_1} + h_{ie_2} i_{b_2} + (1 + h_{fe}) i_{b_2} \times 100 = 9221/32 i_{b_1} \quad \text{محاسبه } R_i:$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{v_i}{i_{b_1}} = 9221/32 K\Omega \approx 9/2 M\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times 10}{i_i \times R_i} = \frac{10}{R_i} A_i \approx 0/994$$

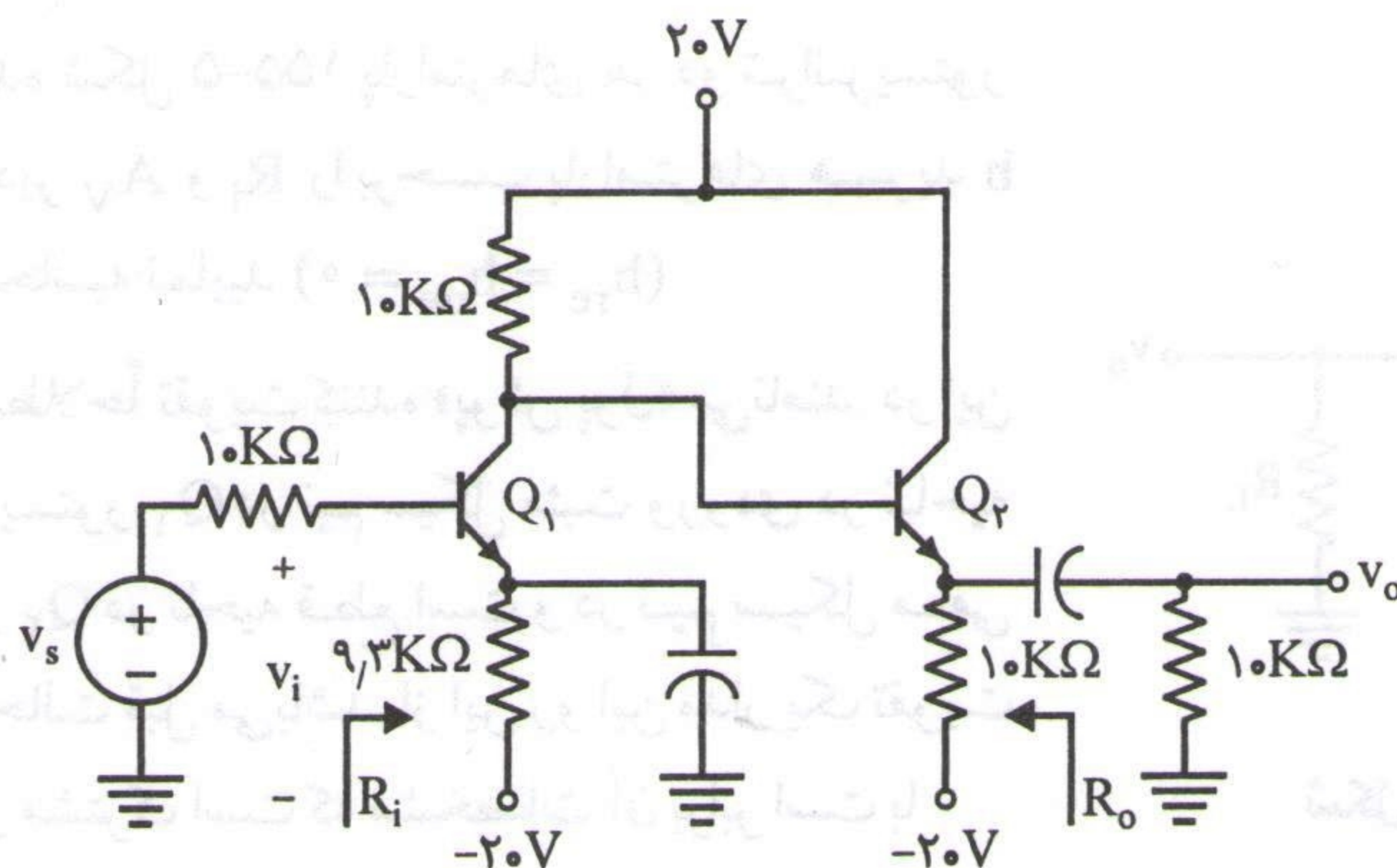
برای محاسبه R_o از روش انعکاس مقاومتها استفاده می‌کنیم.

$$R_o = 10 \parallel \frac{R_{B_2}}{1 + h_{fe}}, R_{B_2} = h_{ie_2} + \left(100 \parallel \frac{R_{B_1}}{1 + h_{fe}} \right), R_{B_1} = h_{ie_1} + 1000 = 1028/68 K\Omega$$

$$\Rightarrow R_{B_2} = 12/65 K\Omega \Rightarrow R_o = 10 \parallel 0/125 \approx 123/7 \Omega$$

۵۹. در مدار شکل ۵-۱۵۳، ترانزیستورها مشابه و دارای $V_T = 26 mV$ ، $V_{BE} = 0/7 V$ و $h_{fe} = 50$ هستند. مقادیر A_i ، R_o ، R_i و A_v را به دست آورید.

حل: ابتدا نقاط کار ترانزیستورها را از روی مدار DC به دست می‌آوریم.



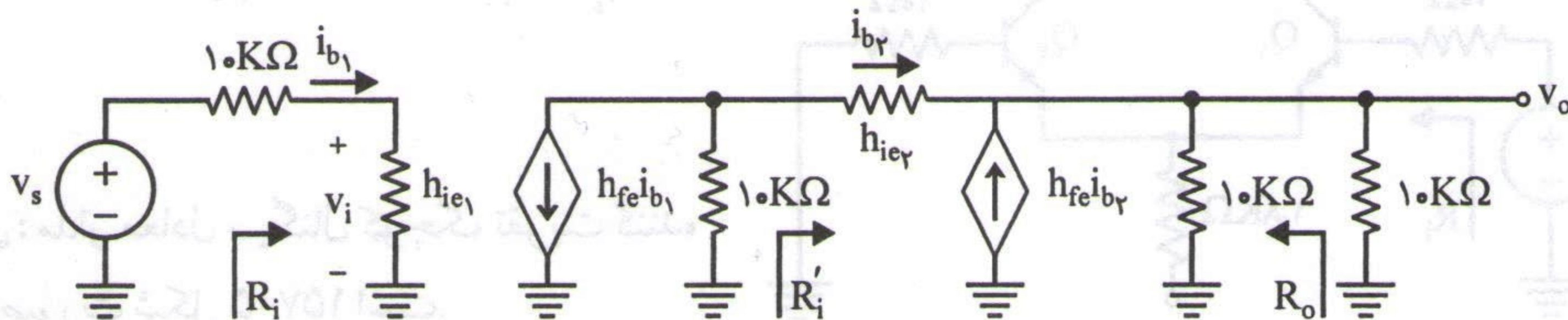
شکل ۵-۱۵۳

$$\text{KVL } BE_1: 10 I_{B_1} + V_{BE_1} + 9.3 I_{E_1} - 20 = 0 \Rightarrow I_{E_1} = 2.3 \text{ mA}, I_{C_1} \approx 1.99 \text{ mA}$$

$$\text{KVL: } 20 = 10(I_{C_1} + I_{B_1}) + V_{BE_1} + 10 I_{E_1} - 20 \Rightarrow I_{E_1} = 1.9 \text{ mA}, I_{C_1} \approx 1.86 \text{ mA}$$

$$h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} \approx 0.653 \text{ K}\Omega, h_{ie_2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_2}} \approx 0.7 \text{ K}\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۱۵۴ رسم شده است.



شکل ۵-۱۵۴

محاسبه A_v :

$$v_o = (1 + h_{fe}) i_{b_2} \times (10 \parallel 10) = 255 i_{b_2}, R'_i = h_{ie_2} + (1 + h_{fe})(10 \parallel 10) = 255.7 \text{ K}\Omega$$

$$i_{b_2} = -h_{fe} i_{b_1} \frac{10}{10 + R'_i} \approx -1.882 i_{b_1}, i_{b_1} = \frac{v_i}{h_{ie_1}} = 1.531 v_i$$

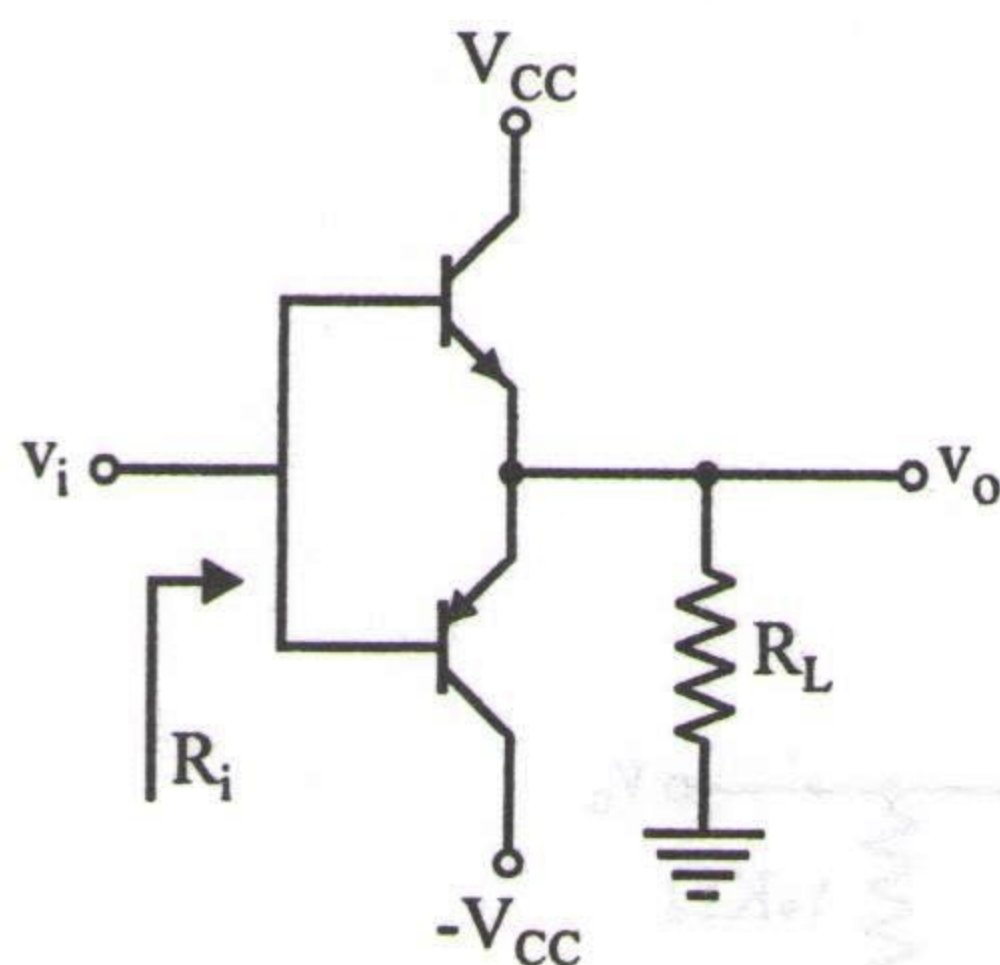
$$\Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = (255) \times (-1.882) \times (1.531) = -734.7$$

$$R_i = h_{ie_1} = 653 \Omega, A_{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v \approx -45, A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / 10}{v_i / R_i} = \frac{R_i}{10} A_v \approx -48$$

برای محاسبه R_o با صفر کردن v_s ، از روش انعکاس مقاومتها استفاده می‌کنیم.

$$R_o = 10 \parallel \frac{R_{B_2}}{1 + h_{fe}}, R_{B_2} = h_{ie_2} + 10 = 10.7 \text{ K}\Omega$$

$$\Rightarrow R_o = 10 \parallel 0.21 \approx 205.7 \Omega$$

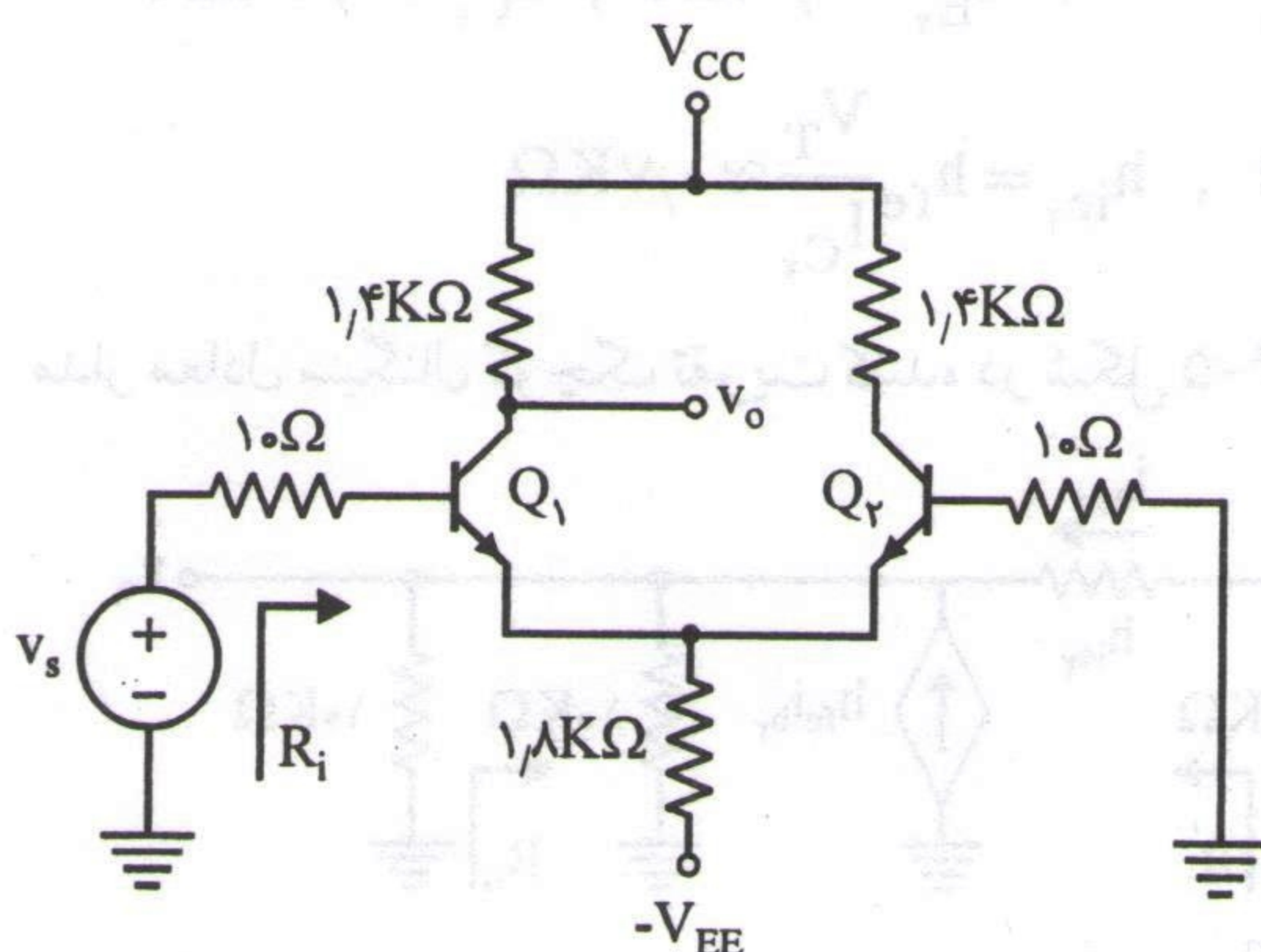


شکل ۵-۱۵۵

۶۰. در تقویت کننده شکل ۵-۱۵۵ پارامترهای هر دو ترانزیستور مشابه اند. مقادیر A_V و R_i را برحسب پارامترهای هیبرید h ترانزیستور محاسبه نمایید ($h_{re} = h_{oe} = 0$).

حل: این مدار را اصطلاحاً تقویت کننده «پوش پول» می نامند. در این تقویت کننده ترانزیستور Q_1 در نیم سیکل مثبت ورودی در ناحیه فعال و ترانزیستور Q_2 در ناحیه قطع است و در نیم سیکل منفی ورودی، برعکس حالت قبل می باشد. از این رو این مدار یک تقویت کننده ساده کلکتور مشترک است که مشخصات آن برابر است با

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = \frac{(1 + h_{fe}) R_L}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_L}, \quad R_i = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_L$$



شکل ۵-۱۵۶

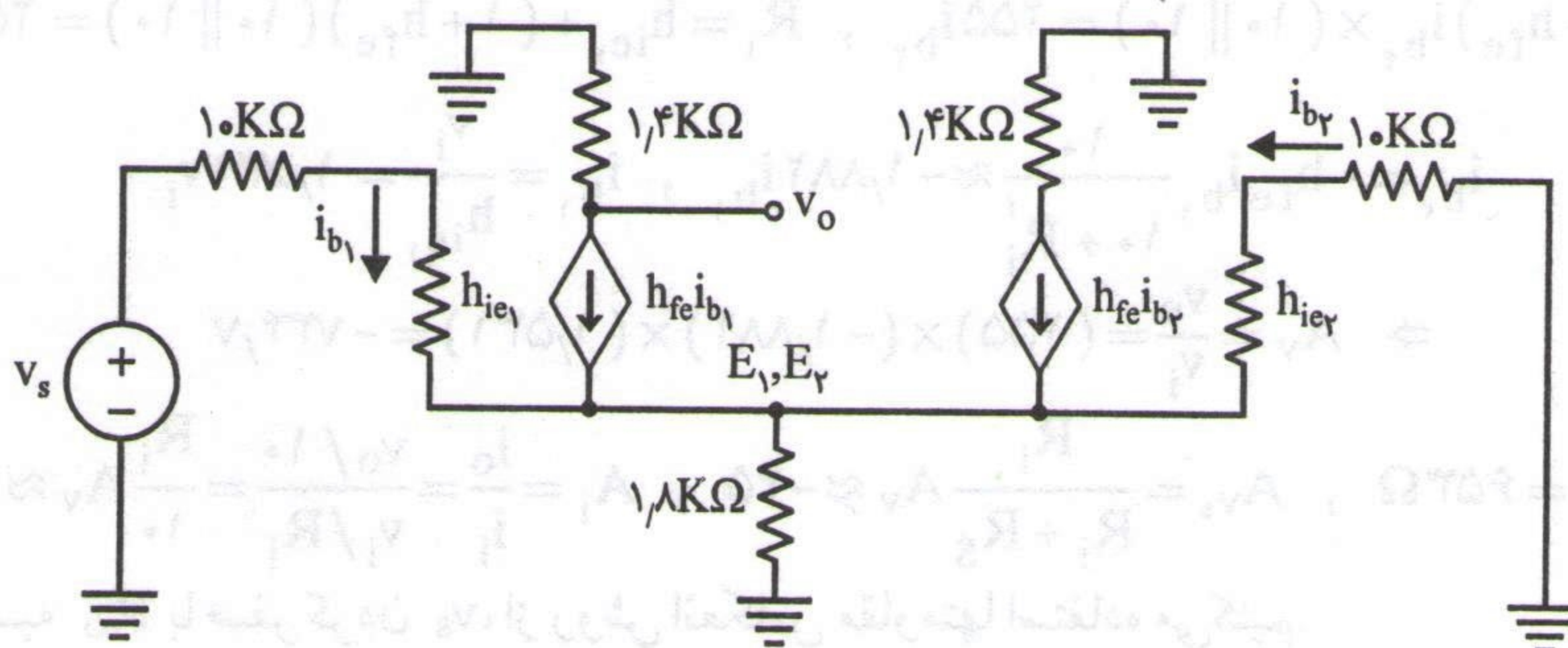
۶۱. شکل ۵-۱۵۶ یک «تقویت کننده تفاضلی»

است. در این تقویت کننده Q_1 و Q_2 کاملاً

مشابه اند و $h_{ie} = 700 \Omega$ و $h_{fe} = 200$

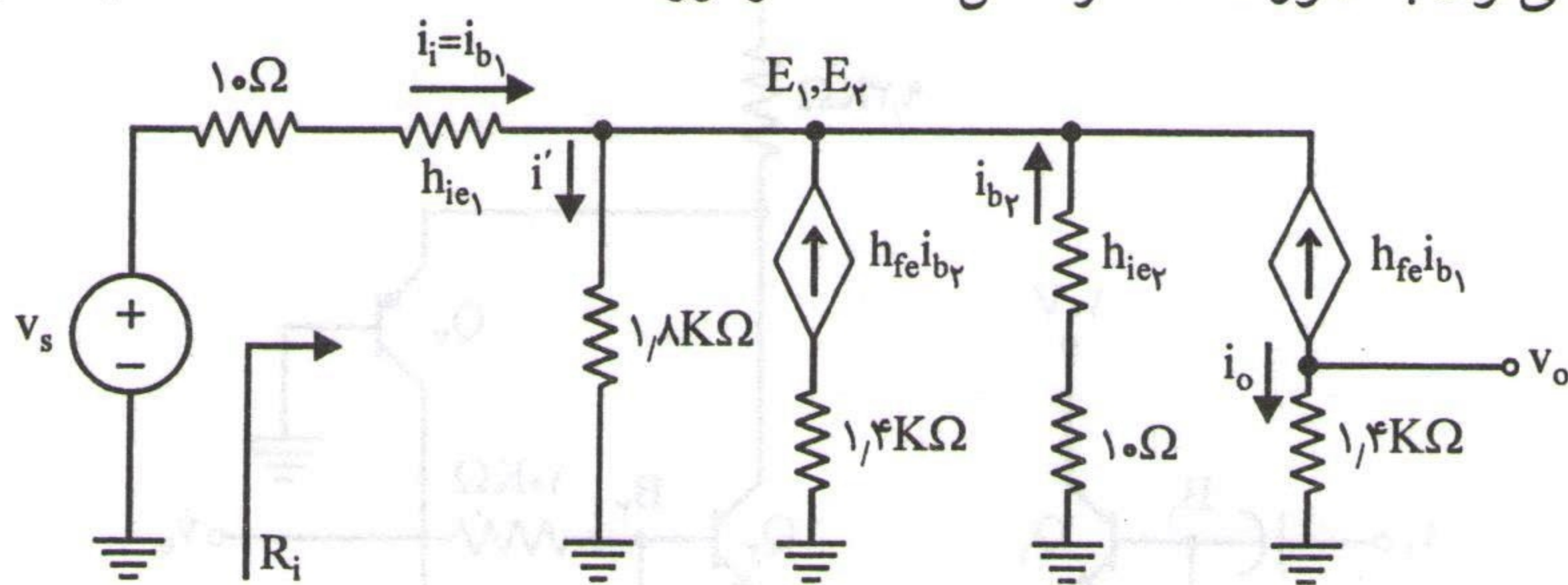
است. مطلوب است محاسبه R_i و A_{V_s} .

حل: مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۱۵۷ است.



شکل ۵-۱۵۷

مدار فوق را می توان به صورت ساده تر شکل ۵-۱۵۸ در آورد.



شکل ۵-۱۵۸

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{-h_{fe} i_{b1}}{i_{b1}} = -h_{fe} = -200$$

$$i' = (1 + h_{fe}) i_{b1} + (1 + h_{fe}) i_{b2} = 201 (i_{b1} + i_{b2}) \quad \text{محاسبه } R_i:$$

$$1.8 i' = -(h_{ie2} + 10) i_{b2} \Rightarrow 1.8 \times 201 (i_{b1} + i_{b2}) = -0.71 i_{b2}$$

$$\Rightarrow i_{b2} = -0.998 i_{b1}$$

$$\text{KVL: } v_i = h_{ie1} i_{b1} - 0.71 i_{b2} \approx 1.41 i_{b1}$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{1.41 i_{b1}}{i_{b1}} \approx 1.41 \text{ K}\Omega$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_o \times 1.4}{R_i i_i} = \frac{1.4}{R_i} A_i \approx -198.6$$

$$A_{vs} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v \approx -197.2$$

۶۲. با فرض $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$, $V_T = 26 \text{ mV}$ و $h_{fe} = 100$ برای همه ترانزیستورها، ولتاژهای DC نقاط B_1 و B_2 را در شکل ۵-۱۵۹ به دست آورید. همچنین ولتاژ DC خروجی و بهره ولتاژ A_v را محاسبه نمایید.

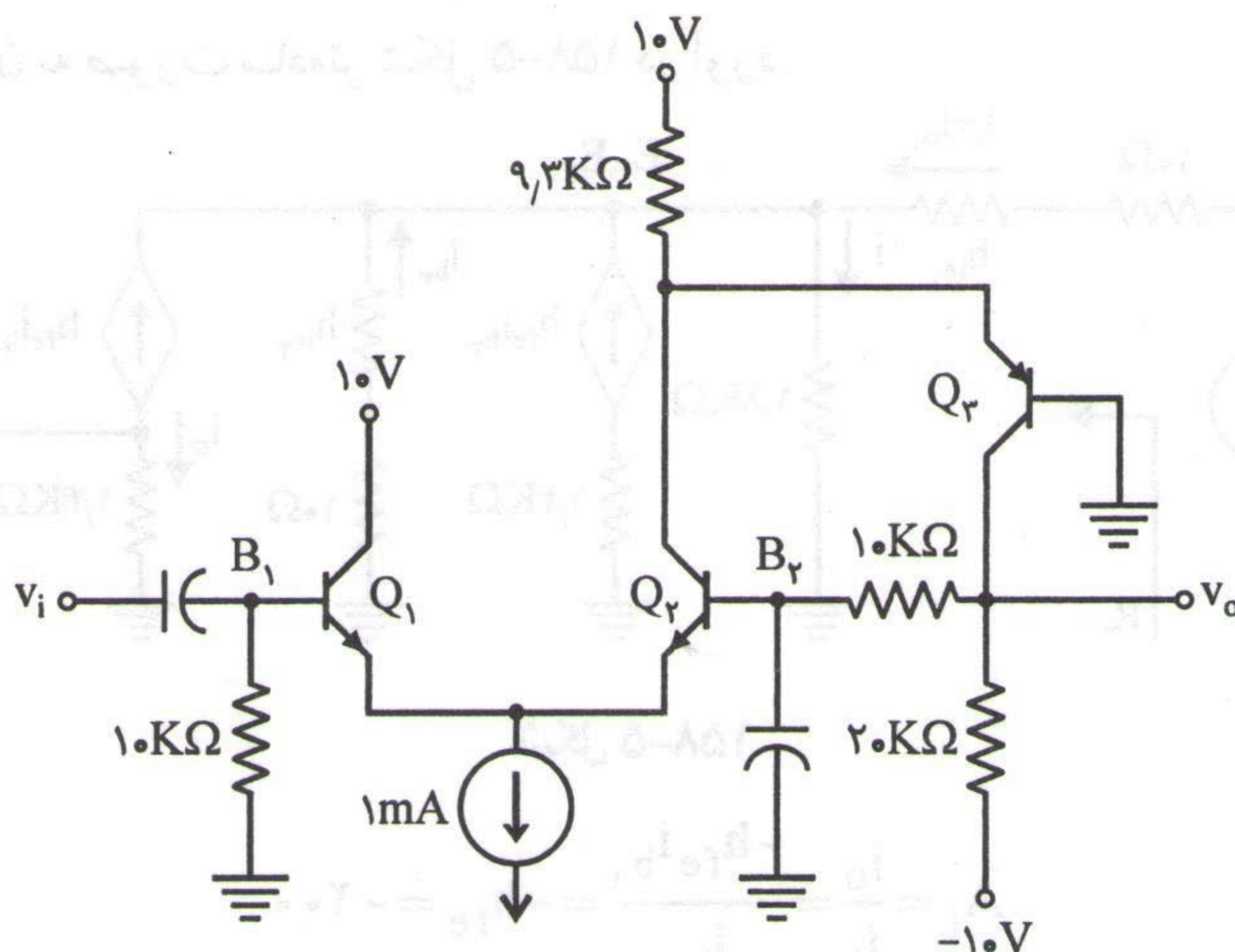
حل: ابتدا نقاط کار ترانزیستورها را از روی مدار DC به دست می آوریم.

$$\text{KVL } E_B: 10 = 9.3 (I_{C2} + I_{E2}) + V_{BE2} \Rightarrow I_{C2} + I_{E2} = 1 \text{ mA} \Rightarrow I_{C2} + 1.01 I_{C2} = 1$$

$$\text{KCL } E_1: I_{E1} + I_{E2} = 1 \text{ mA} \Rightarrow I_{C1} + I_{C2} = 0.99$$

$$\text{KVL: } 10 I_{B1} + V_{BE1} - V_{BE2} - 10 I_{B2} + 20 (I_{C2} - I_{B2}) = 10$$

$$\Rightarrow 0.1 I_{C1} - 0.3 I_{C2} + 20 I_{C2} = 10$$



شکل ۵-۱۵۹

$$\begin{cases} I_{C_1} + 10^{-1} I_{C_2} = 1 \\ I_{C_1} + I_{C_2} = 0.99 \\ I_{C_1} - 3I_{C_2} + 200 I_{C_2} = 100 \end{cases} \Rightarrow I_{C_1} = 0.5 \text{ mA}, I_{C_2} = 0.49 \text{ mA}, I_{C_3} = 0.505 \text{ mA}$$

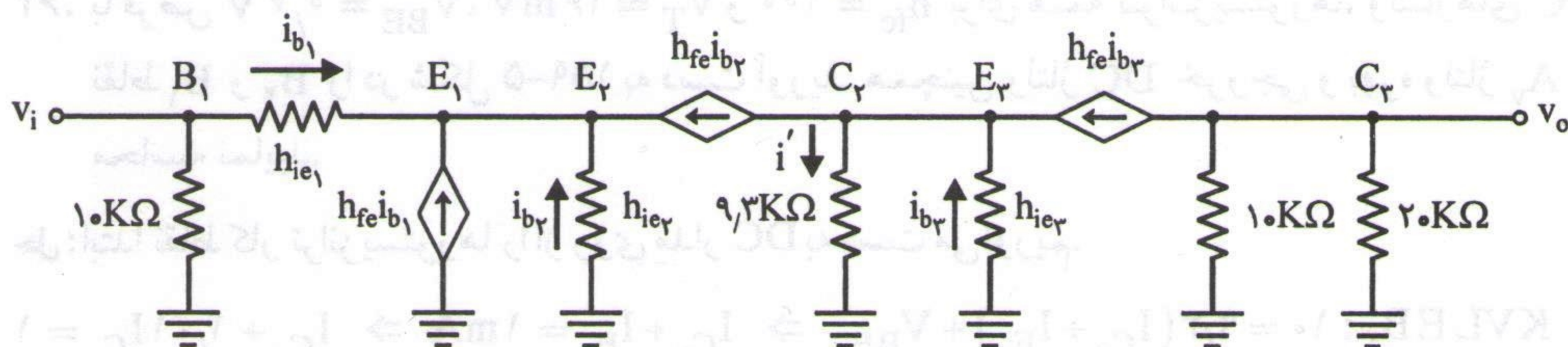
$$V_{B_1} = -10 I_{B_1} = -0.5 \text{ V} = -50 \text{ mV}$$

$$V_{B_2} = V_{BE_2} - V_{BE_1} + V_{B_1} \Rightarrow V_{B_2} = V_{B_1} = -50 \text{ mV}$$

$$V_O = 20(I_{C_2} - I_{B_2}) - 10 = 2 \text{ mV} \approx 0$$

$$h_{ie_1} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_1}} = 5.2 \text{ K}\Omega, h_{ie_2} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_2}} \approx 5.3 \text{ K}\Omega, h_{ie_3} = h_{fe} \frac{V_T}{I_{C_3}} = 5.15 \text{ K}\Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۱۶۰ رسم شده است.



شکل ۵-۱۶۰

$$v_o = -h_{fe} i_{b_2} (10 \parallel 20) = -\frac{2000}{3} i_{b_2} = -666.67 i_{b_2}$$

$$\text{KVL: } 9.3 i' + h_{ie_2} i_{b_2} = 0 \Rightarrow i' = -\frac{h_{ie_2}}{9.3} i_{b_2}$$

$$\text{KCL } C_r: i' + h_{fe} i_{b_r} - (1 + h_{fe}) i_{b_r} = 0 \Rightarrow h_{fe} i_{b_r} = \left(1 + \frac{h_{ie_r}}{9.3} \right) i_{b_r}$$

$$\Rightarrow i_{b_r} = 0.9847 i_{b_1}$$

$$\text{KCL } E_1: (1 + h_{fe}) i_{b_1} + (1 + h_{fe}) i_{b_r} = 0 \Rightarrow i_{b_1} = -i_{b_r}$$

$$\text{KVL: } v_i = h_{ie_1} i_{b_1} - h_{ie_r} i_{b_r} = (h_{ie_1} + h_{ie_r}) i_{b_1} = 10.5 i_{b_1}$$

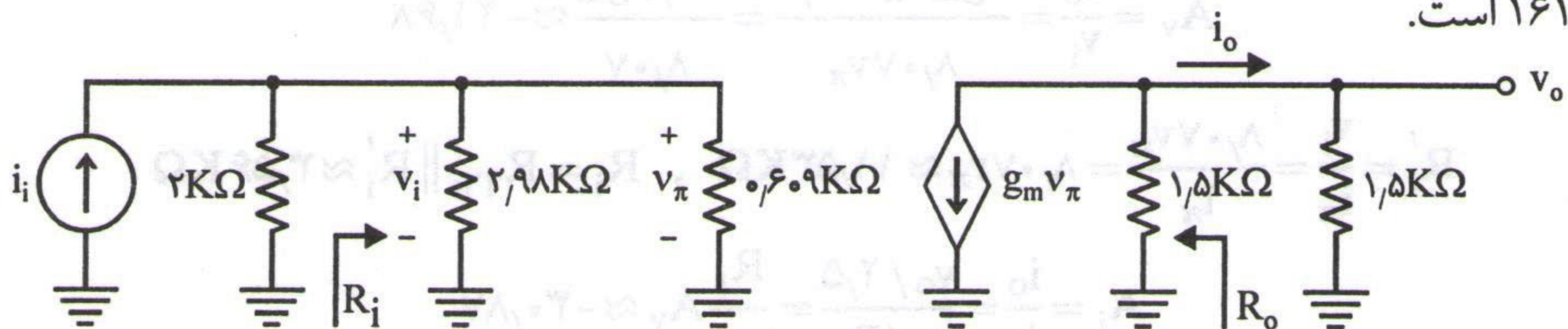
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-666.67 i_{b_r}}{10.5 i_{b_1}} = \frac{-666.67 \times (-0.9847 i_{b_1})}{10.5 i_{b_1}} \approx 62.52$$

۶۳. مسأله ۶ این فصل را با استفاده از مدل هیبرید π حل کنید.

حل: از حل مسأله ۶، مقدار جریان I_E برابر 4.31 mA است. بنابراین مشخصات مدل هیبرید π برابر است با

$$I_C = \alpha I_E = 4.267 \text{ mA} \Rightarrow g_m = \frac{I_C}{V_T} = 164.1 \text{ mA/V}, \quad r_\pi = \frac{h_{fe}}{g_m} \approx 60.9 \Omega$$

مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده با استفاده از مدل هیبرید π برای ترانزیستور به صورت شکل ۱۶۱-۵ است.



شکل ۱۶۱-۵

$$v_o = (-g_m v_\pi) (1.5 \parallel 1.5) = -123.1 v_\pi \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_\pi} = -123.1$$

$$i_i = \frac{v_i}{2 \parallel 2.98 \parallel 60.9} = 2.48 v_i, \quad i_o = \frac{v_o}{1.5}$$

$$\Rightarrow A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / 1.5}{2.48 v_i} = \frac{1}{2.48 \times 1.5} A_v \approx -33.1$$

$$R_i = 2.98 \parallel 60.9 = 50.5 \Omega$$

$$\text{اگر } i_i = 0 \Rightarrow v_\pi = 0 \Rightarrow R_o = 1.5 \text{ K}\Omega$$

ملاحظه می شود که نتایج با دقت بسیار خوبی با هم برابر است.

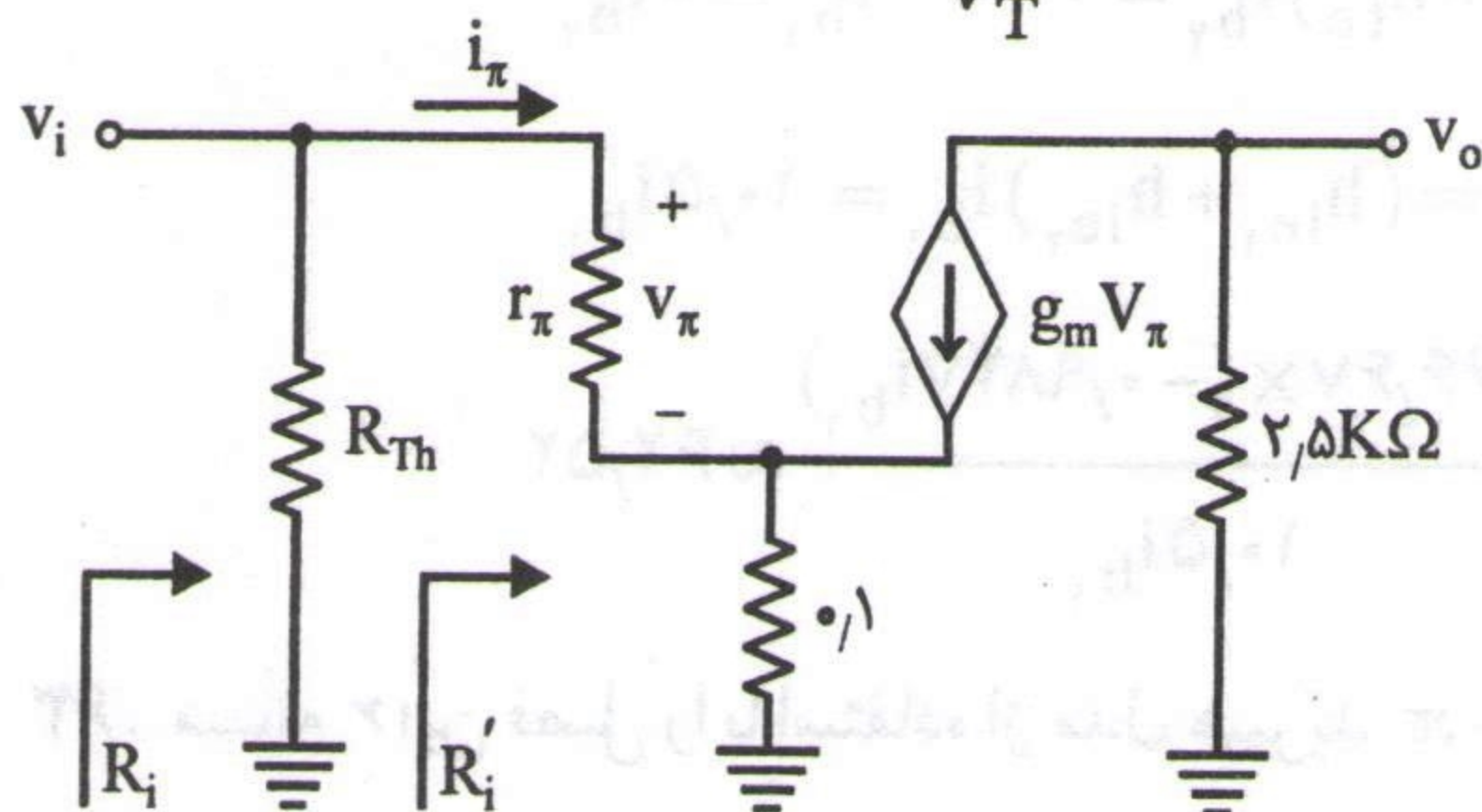
۶۴. مسأله ۸ این فصل را با استفاده از مدل هیبرید π حل کنید.

حل: از حل مسأله ۸ مقادیر زیر را به دست آمده است:

$$R_{Th} = 5.14 K\Omega, \quad V_{Th} = -1.71 V, \quad I_C = 1.82 mA$$

بنابراین پارامترهای هیبرید π ترانزیستور برابر است با

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = 70 mA/V, \quad r_\pi = \frac{h_{fe}}{g_m} = \frac{10}{7} K\Omega$$



مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۱۶۲ خواهد بود.

شکل ۵-۱۶۲

محاسبه A_v :

$$KVL: v_i = v_\pi + \left(\frac{v_\pi}{r_\pi} + g_m v_\pi \right) \times 0.1 = v_\pi \left[1 + \left(\frac{1}{r_\pi} + g_m \right) \times 0.1 \right] = 1.07 v_\pi$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-g_m v_\pi \times 2.5}{1.07 v_\pi} = \frac{-2.5 g_m}{1.07} \approx -21.68$$

$$R_i' = \frac{v_i}{i_\pi} = \frac{1.07 v_\pi}{i_\pi} = 1.07 r_\pi \approx 11.53 K\Omega, \quad R_i = R_{Th} \parallel R_i' \approx 3.56 K\Omega$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / 2.5}{v_i / R_i} = \frac{R_i}{2.5} A_v \approx -3.08$$

۶۵. مسأله ۲۳ این فصل را با استفاده از مدل هیبرید π حل کنید.

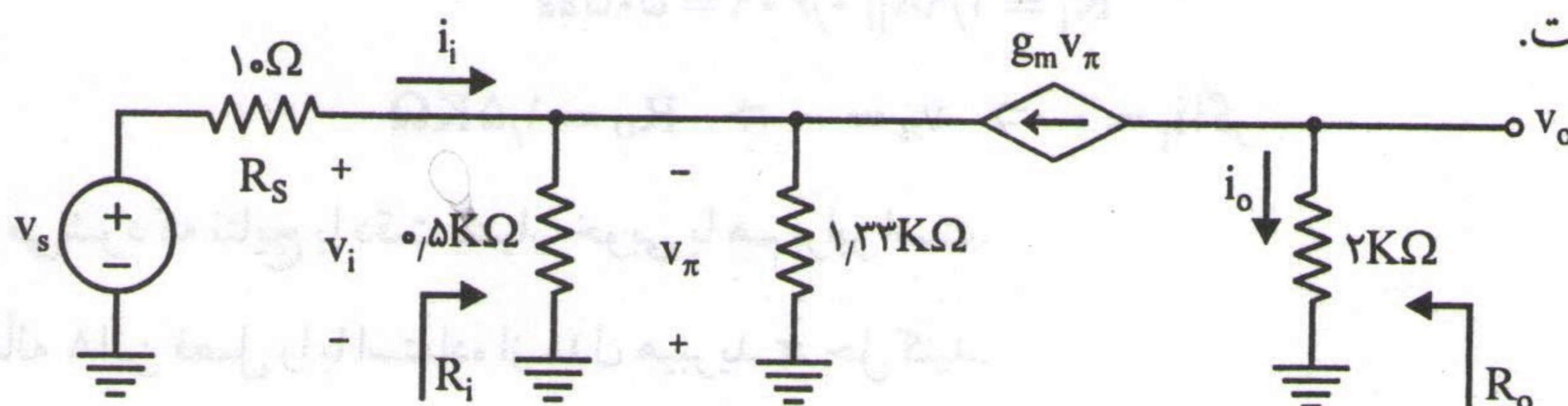
حل: از حل مسأله ۲۳ مقادیر زیر به دست آمده است:

$$I_E = 1.97 mA \Rightarrow I_C = 1.95 mA$$

بنابراین پارامترهای هیبرید π ترانزیستور برابر است با

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = 75 mA/V, \quad r_\pi = \frac{h_{fe}}{g_m} = 1.33 K\Omega$$

با جایگزین کردن مدل هیبرید π ترانزیستور، مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۱۶۳ است.



شکل ۵-۱۶۳

$$v_i = -v_\pi, \quad v_o = -\frac{1}{2} g_m v_\pi = -150 v_\pi = 150 v_i \Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = 150$$

$$v_i = (i_i + g_m v_\pi) \left(\frac{1}{0.5} \parallel \frac{1}{1.33} \right), \quad v_\pi = -v_i \Rightarrow R_i = \frac{v_i}{i_i} = 13 \Omega$$

$$A_{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v \approx 84.78$$

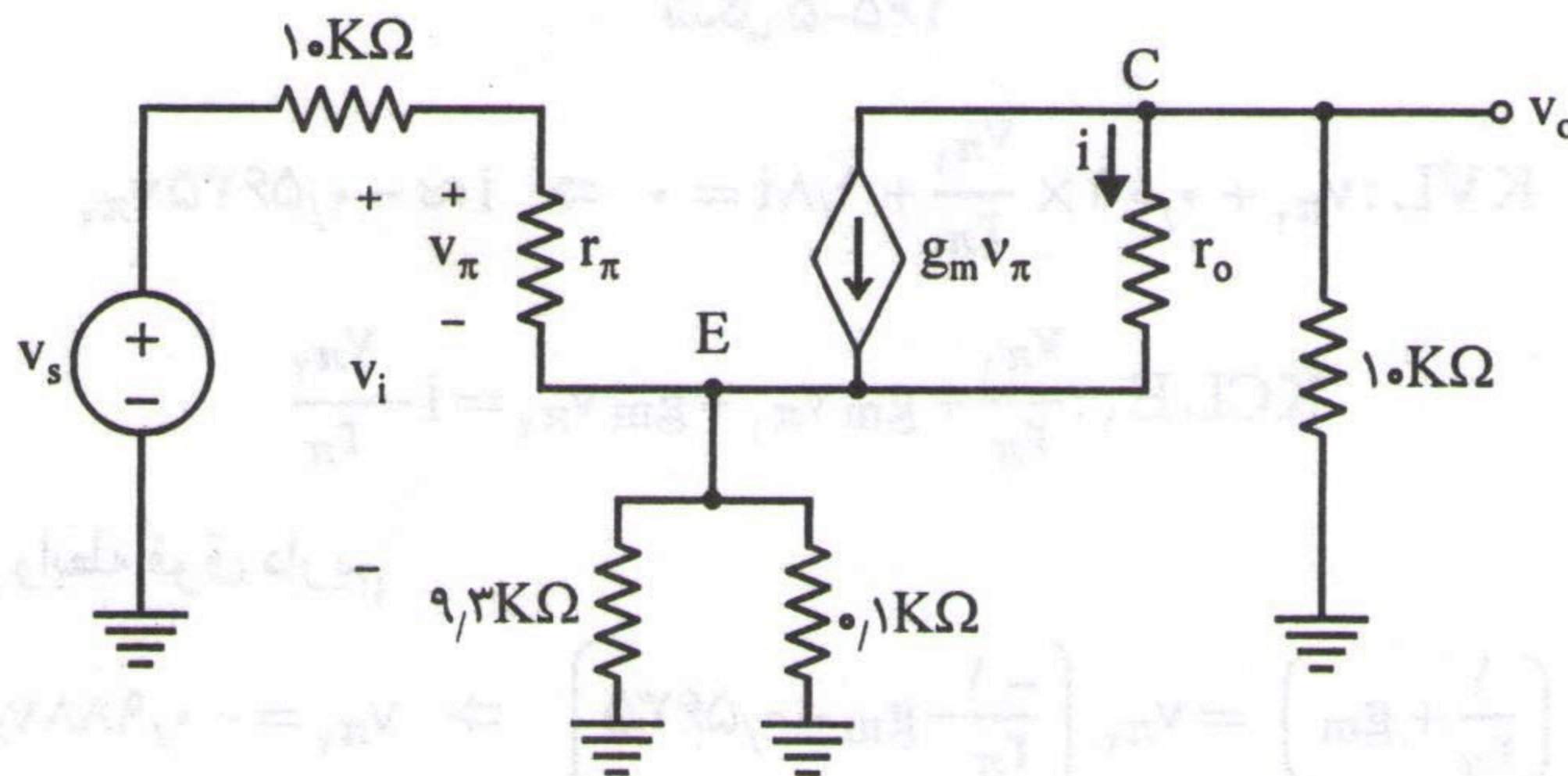
$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_o / 2}{v_i / R_i} = \frac{R_i}{2} A_v = 0.975$$

با صفر کردن منبع ولتاژ ورودی، ولتاژ v_π صفر شده و در نتیجه مقاومت خروجی R_o برابر $2K\Omega$ به دست می آید.

۶۶. مسأله ۱۰ این فصل را با فرض $V_A = 100V$ با استفاده از مدل هیبرید π حل کنید.
حل: از حل مسأله ۱۰، $I_C = 0.98mA$ به دست می آید. بنابراین مقادیر مشخصات مدل هیبرید π

$$\text{ترانزیستور برابر است با} \quad g_m = \frac{I_C}{V_T} = 37.7mA/V, \quad r_\pi = \frac{h_{fe}}{g_m} = 2.65K\Omega, \quad r_o = \frac{V_A}{I_C} = 102K\Omega$$

مدل سیگنال کوچک تقویت کننده در شکل ۵-۱۶۴ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۶۴

$$\text{KCL C: } g_m v_\pi + i + \frac{v_o}{10} = 0 \Rightarrow i = -g_m v_\pi - \frac{v_o}{10} \quad \text{محاسبه } A_v$$

$$\text{KVL: } v_o = r_o i + (9.3 \parallel 0.1) \left(\frac{v_\pi}{r_\pi} + g_m v_\pi + i \right)$$

با جایگذاری i بر حسب v_π و v_o در معادله فوق داریم

$$v_o = -343.03 v_\pi, \quad i = -g_m v_\pi - \frac{v_o}{10} = -3.397 v_\pi$$

$$\text{KVL: } v_i = v_\pi + (9.3 \parallel 0.1) \left(\frac{v_\pi}{r_\pi} + g_m v_\pi + i \right) = 4.43 v_\pi$$

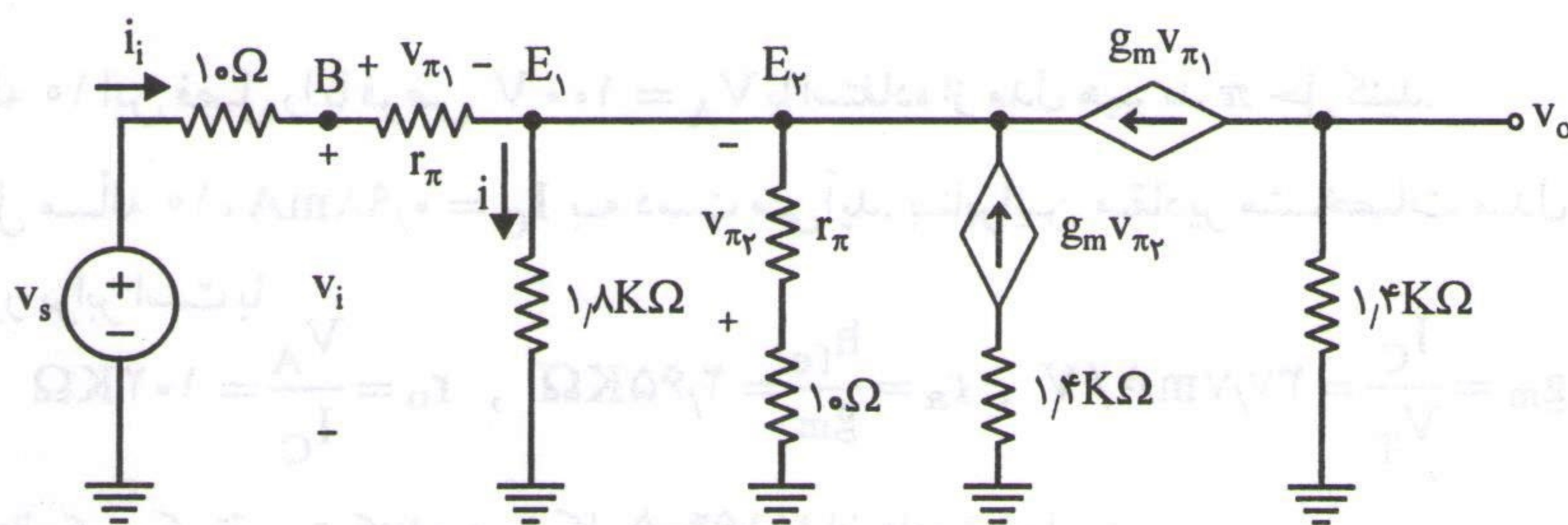
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-343.03 v_\pi}{4.43 v_\pi} = -77.43$$

$$\text{KVL: } v_s = 10 \times \frac{v_{\pi}}{r_{\pi}} + v_i = 17.2 v_{\pi}, \quad A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{-343.03 v_{\pi}}{17.2 v_{\pi}} \approx -41.83$$

ملاحظه می‌شود که مقادیر حاصل با پاسخهای مسأله ۱۰ تفاوت کمی دارد که به خاطر منظور نمودن مقاومت r_o در این مسأله می‌باشد.

۶۷. مسأله ۶۱ این فصل را با فرض $I_{C_1} = I_{C_2} = 7.5 \text{ mA}$ ، $h_{fe} = 200$ و با استفاده از مدل هیبرید π حل کنید.

حل: مدار معادل سیگنال کوچک تقویت کننده به صورت شکل ۵-۱۶۵ است.



شکل ۵-۱۶۵

$$\text{KVL: } v_{\pi_2} + 0.01 \times \frac{v_{\pi_2}}{r_{\pi}} + 1.8 i = 0 \Rightarrow i \approx -0.5635 v_{\pi_2} \quad \text{محاسبه } A_v$$

$$\text{KCL } E_1: \frac{v_{\pi_1}}{r_{\pi}} + g_m v_{\pi_1} + g_m v_{\pi_2} = i - \frac{v_{\pi_2}}{r_{\pi}}$$

با جایگذاری i در رابطه فوق داریم

$$v_{\pi_1} \left(\frac{1}{r_{\pi}} + g_m \right) = v_{\pi_2} \left(\frac{-1}{r_{\pi}} - g_m - 0.5635 \right) \Rightarrow v_{\pi_2} = -0.988 v_{\pi_1}$$

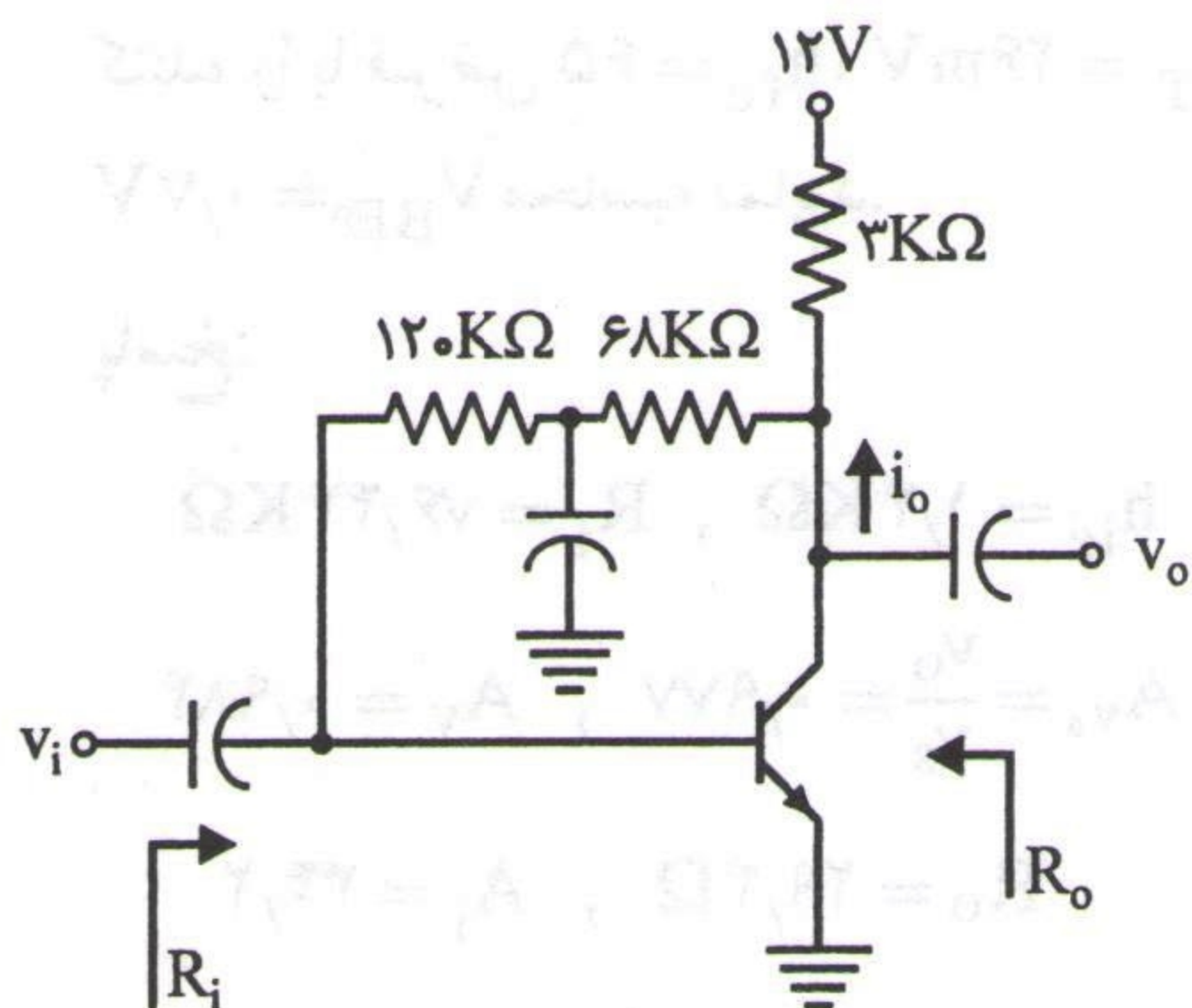
$$\text{KVL: } v_i = v_{\pi_1} + 1.8 i = 2700.2 v_{\pi_1}, \quad v_o = -g_m v_{\pi_1} \times 1.4 = -40.3784 v_{\pi_1}$$

$$\Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-40.3784 v_{\pi_1}}{2700.2 v_{\pi_1}} \approx -20.17$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{2700.2 v_{\pi_1}}{v_{\pi_1}/r_{\pi}} = 2700.2 r_{\pi} \approx 1.4 \text{ K}\Omega$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} A_v \approx -200.3$$

۳-۵ تمرین



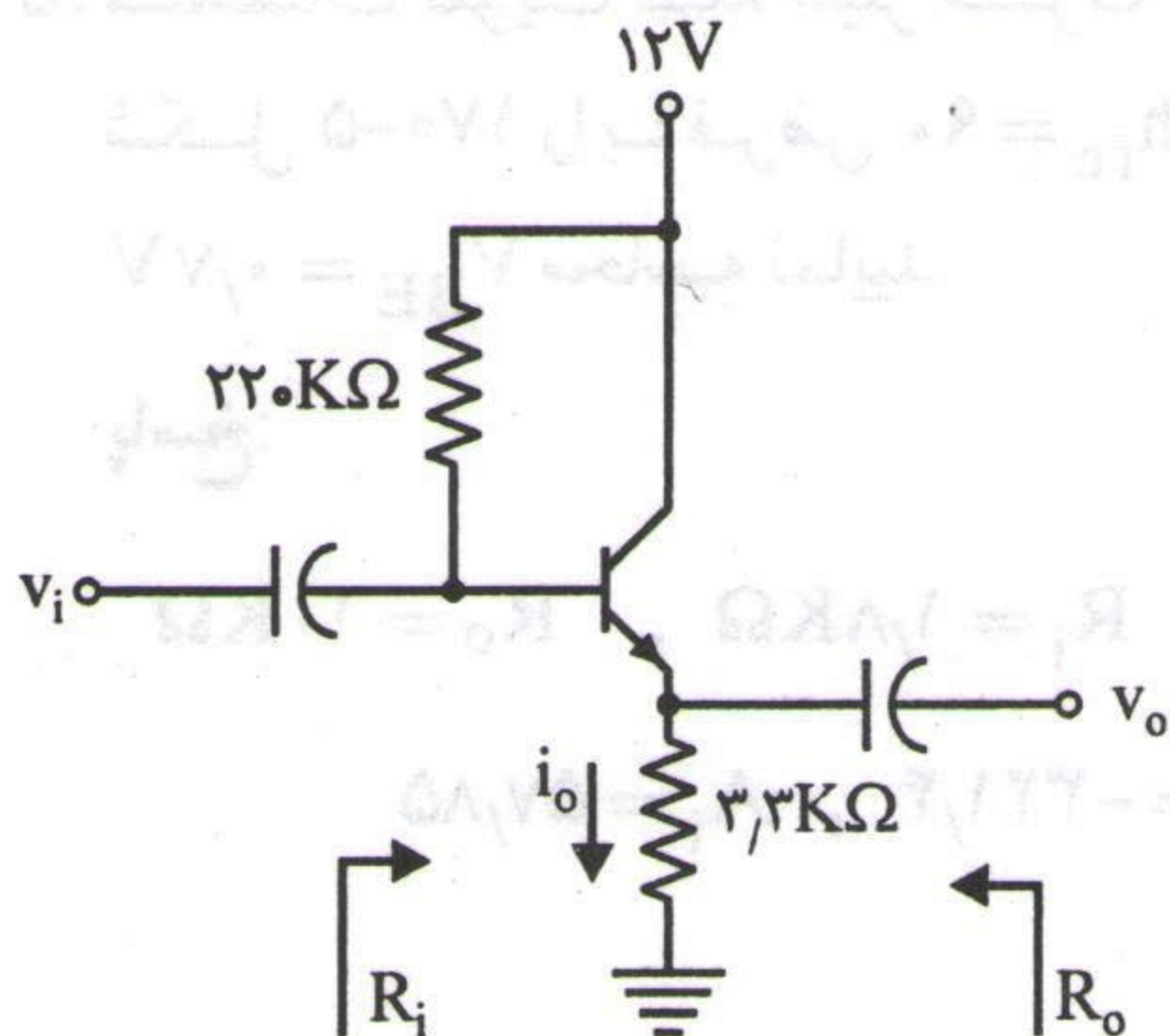
شکل ۵-۱۶۶

۱. در تقویت کننده شکل ۵-۱۶۶ با فرض $h_{fe} = 140$ ، $V_{BE} = 0.7V$ و $V_T = 26mV$ مشخصات تقویت کننده را محاسبه نمایید.

پاسخ:

$$h_{ie} = 1.4K\Omega, R_i = 1.38K\Omega$$

$$R_o = 2.87K\Omega, A_v \approx -287.3, A_i \approx -132.2$$



شکل ۵-۱۶۷

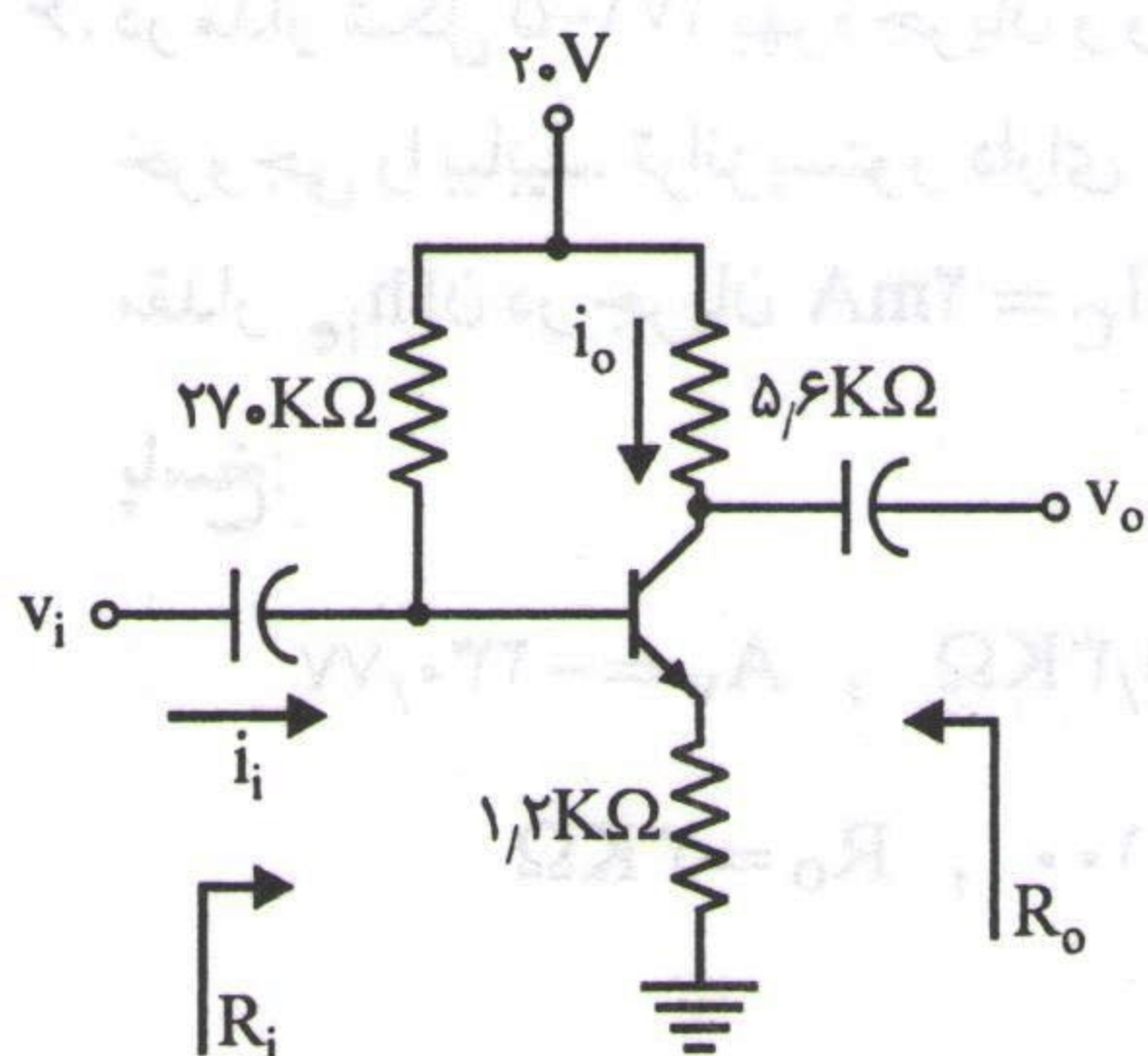
۲. مشخصات تقویت کننده امیتر فالوئر شکل ۵-۱۶۷ را با فرض $h_{fe} = 98$ ، $V_{BE} = 0.7V$ و $V_T = 26mV$ محاسبه نمایید.

پاسخ:

$$h_{ie} = 1.25K\Omega, R_i = 131.68K\Omega$$

$$R_o = 1.33K\Omega, A_v = 0.996$$

$$A_i = 39.75$$



شکل ۵-۱۶۸

۳. در تقویت کننده امیتر مشترک شکل ۵-۱۶۸ با فرض $h_{fe} = 120$ ، $V_{BE} = 0.7V$ و $V_T = 26mV$ مشخصات تقویت کننده را محاسبه نمایید.

پاسخ:

$$h_{ie} = 560\Omega, R_i = 94.66K\Omega, R_o = 5.6K\Omega$$

$$A_v = -4.61, A_i = 77.93$$

۴. در تقویت کننده شکل ۵-۱۶۹ مشخصات تقویت

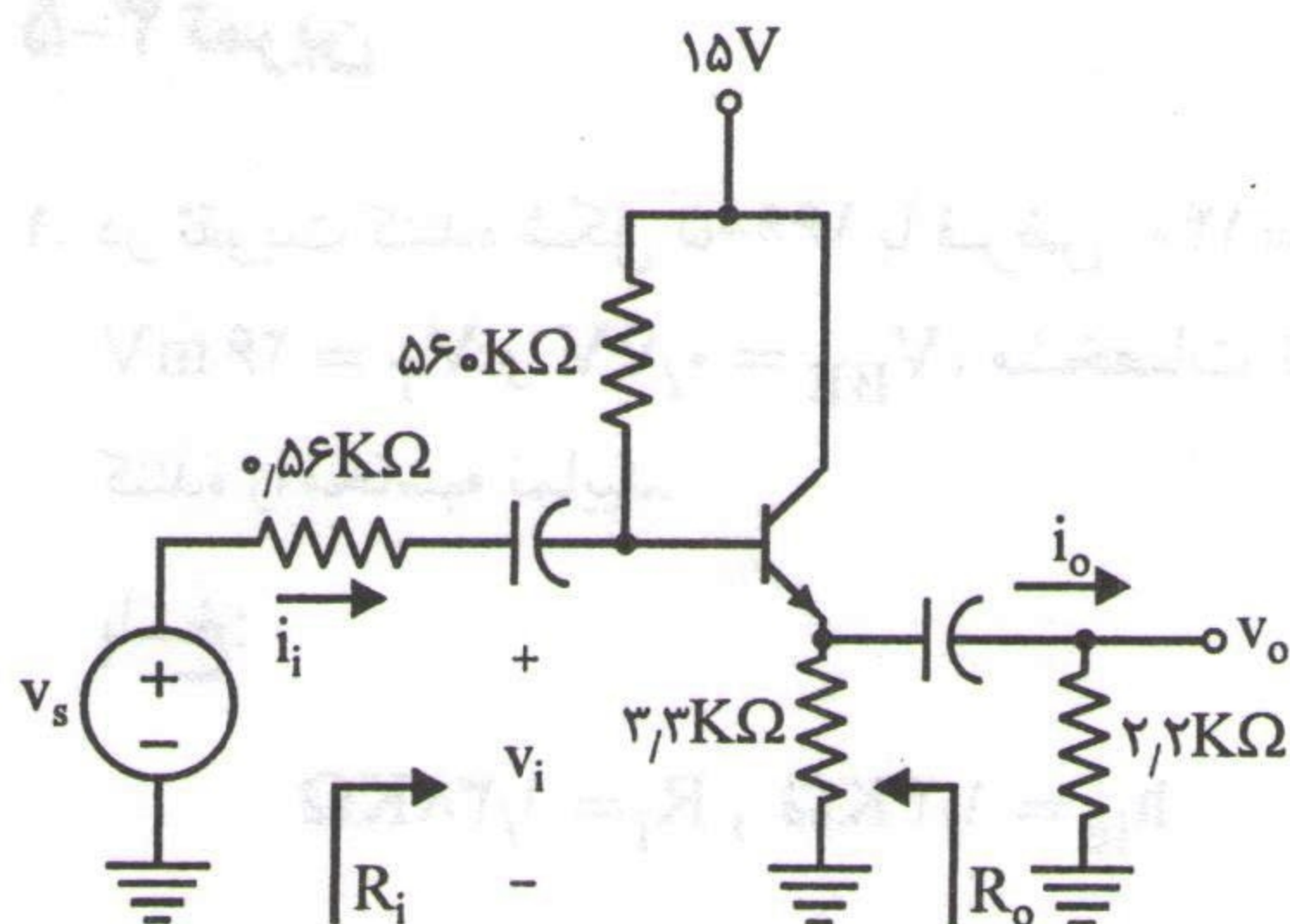
کننده را با فرض $V_T = 26mV$, $h_{fe} = 65$ و $V_{BE} = 0.7V$ محاسبه نمایید.

پاسخ:

$$h_{ie} = 1.4K\Omega, R_i = 76.44K\Omega$$

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = 0.977, A_v = 0.984$$

$$R_o = 29.4\Omega, A_i = 34.2$$



شکل ۵-۱۶۹

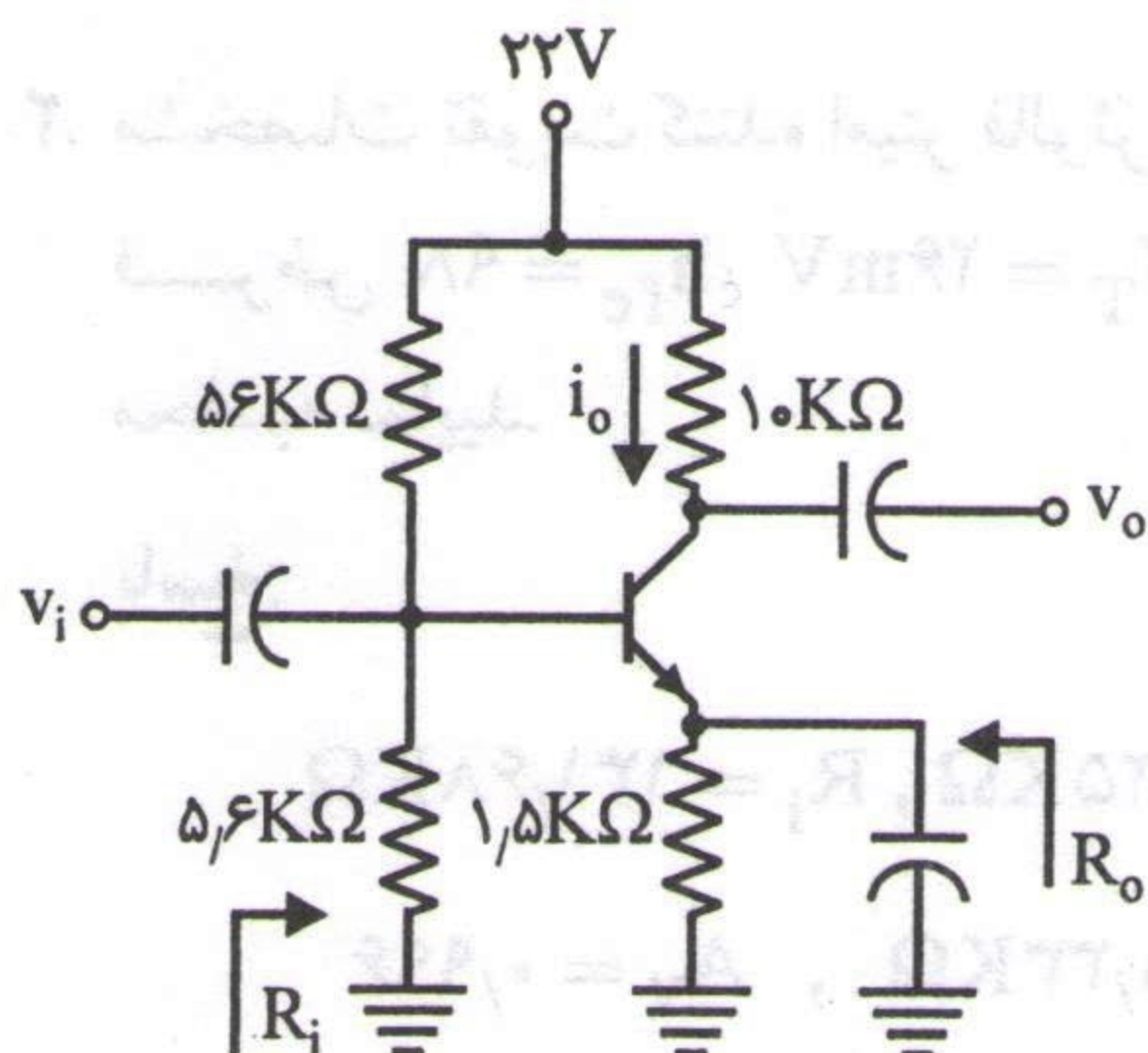
۵. مشخصات تقویت کننده امیتر مشترک نشان داده شده در

شکل ۵-۱۷۰ را با فرض $V_T = 26mV$, $h_{fe} = 90$ و $V_{BE} = 0.7V$ محاسبه نمایید.

پاسخ:

$$h_{ie} = 2.8K\Omega, R_i = 1.8K\Omega, R_o = 10K\Omega$$

$$A_v = -321.4, A_i = 57.85$$



شکل ۵-۱۷۰

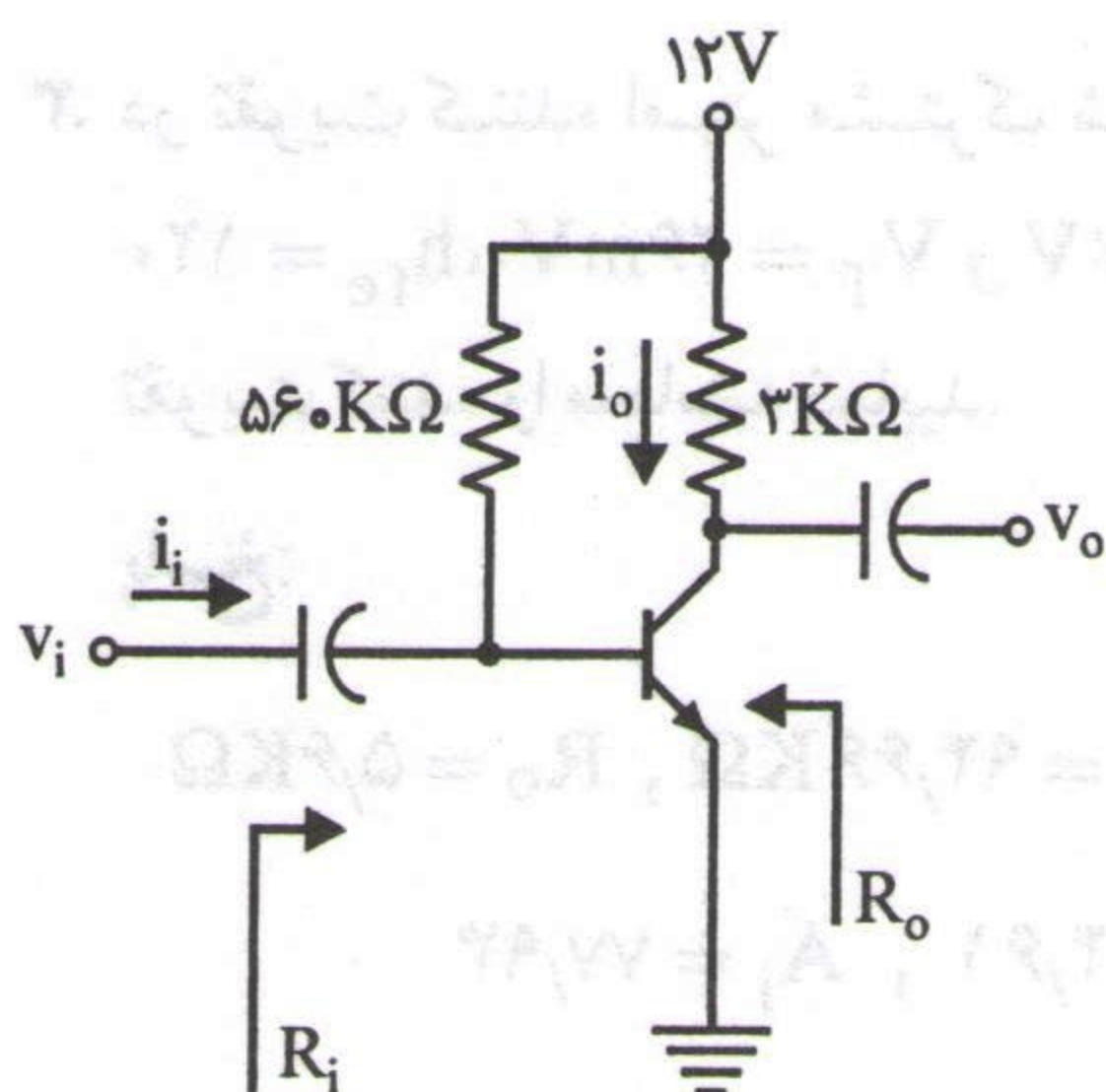
۶. در مدار شکل ۵-۱۷۱ بهره جریان و ولتاژ، مقاومت ورودی و

خروجی را بیابید. ترانزیستور دارای $h_{fe} = 100$ می باشد و مقدار h_{ie} آن در جریان $I_C = 2mA$ برابر $1.3K\Omega$ است.

پاسخ:

$$R_i \approx h_{ie} = 1.3K\Omega, A_v = -230.77$$

$$A_i = 100, R_o = 3K\Omega$$

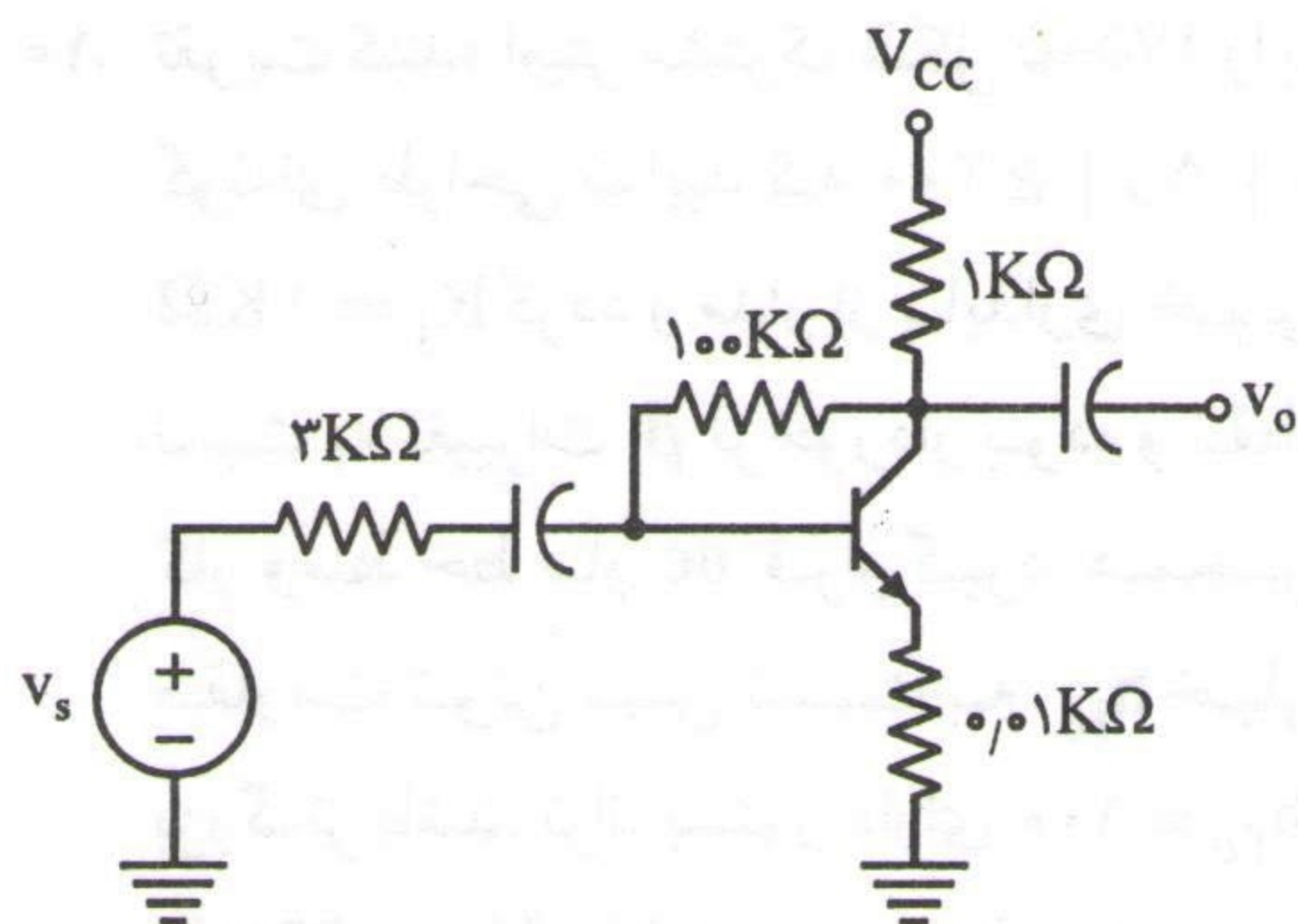


شکل ۵-۱۷۱

۷. بهره ولتاژ تقویت کننده شکل ۱۷۲-۵ را با فرض $h_{fe} = 100$ و $h_{ie} = 1K\Omega$ به دست آورید.

پاسخ:

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = -12.3$$

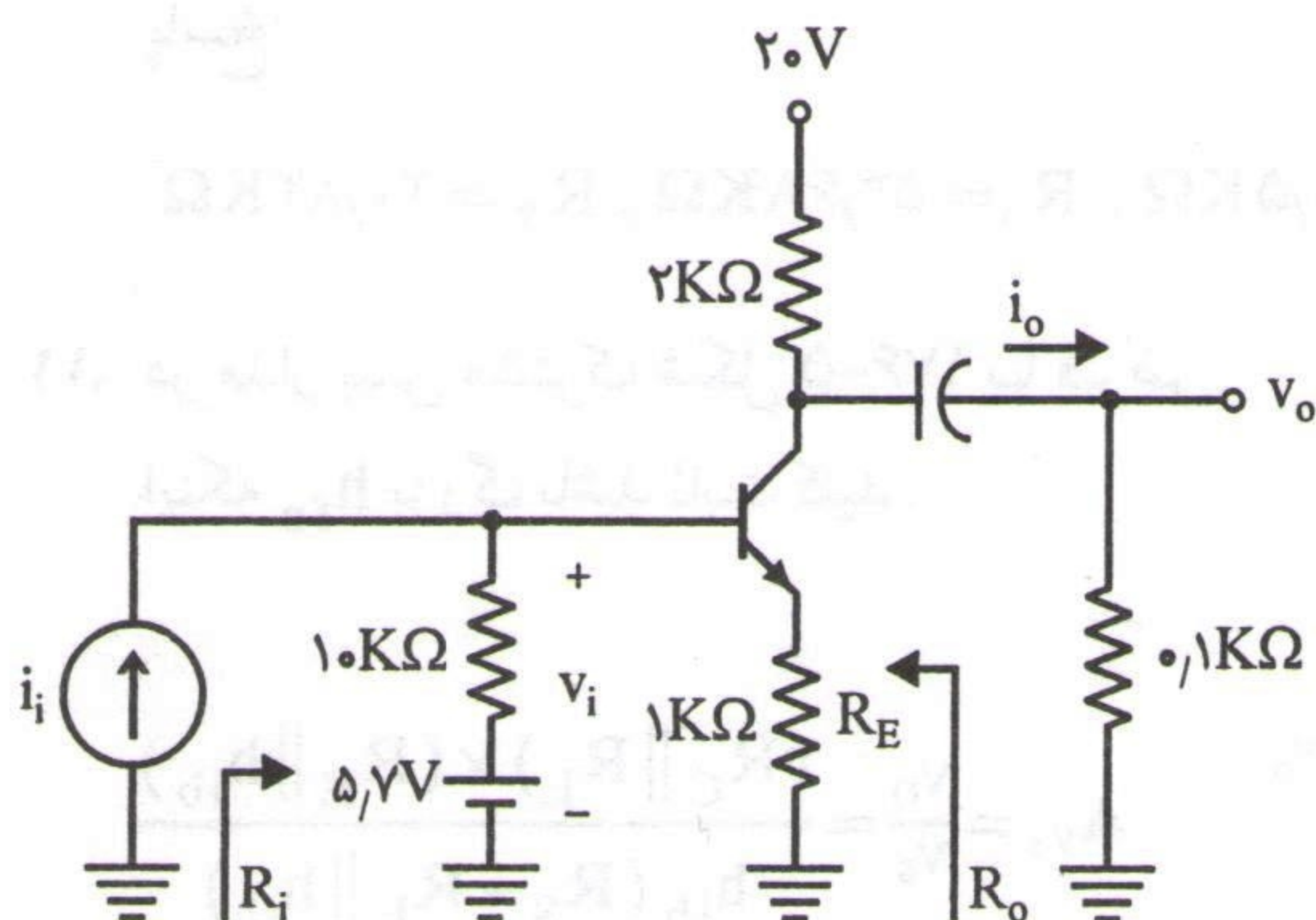


شکل ۱۷۲-۵

۸. در تقویت کننده شکل ۱۷۳-۵ ترانزیستور دارای $V_{BE} = 0.7V$ ، $V_T = 26mV$ و $h_{fe} = 100$ است.

الف) مشخصات تقویت کننده را به دست آورید.
ب) مقاومت R_E را بایпас کرده و مشخصات تقویت کننده را دوباره محاسبه کنید.

پاسخ:



شکل ۱۷۳-۵

الف) $h_{ie} = 0.567K\Omega$ ، $A_v = \frac{v_o}{v_i} = -0.94$ ، $A_i = -8.55$

$R_i = 9.1K\Omega$ ، $R_o = 2K\Omega$

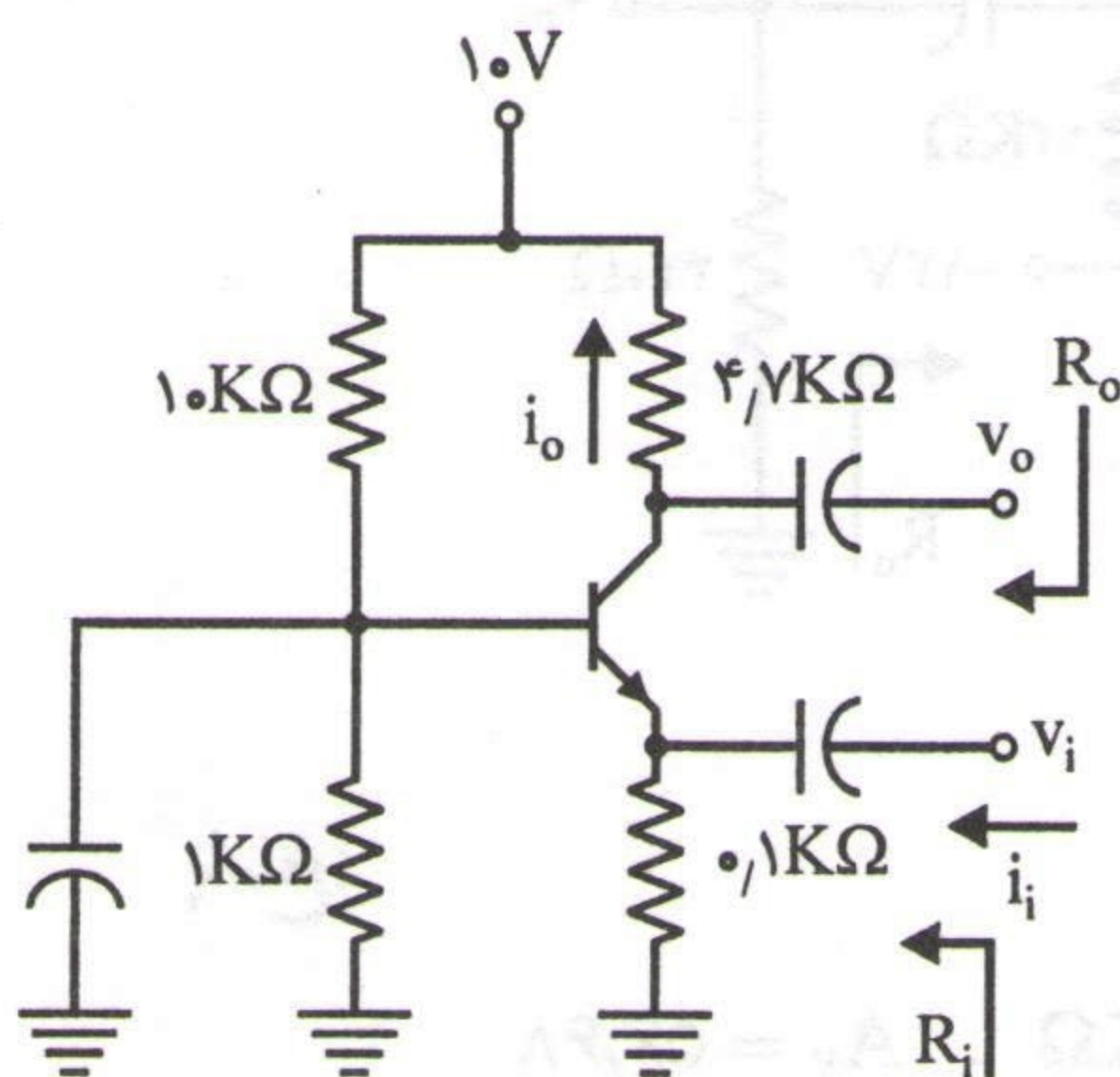
ب) $A_v = v_o/v_i = -16.8$ ، $R_i = 0.567K\Omega$ ، $R_o = 2K\Omega$ ، $A_i \approx -95$

۹. در تقویت کننده بیس مشترک شکل ۱۷۴-۵، مشخصات تقویت کننده را محاسبه نمایید. ترانزیستور دارای $V_{BE} = 0.7V$ و $V_T = 26mV$ ، $h_{fe} = 100$ می باشد.

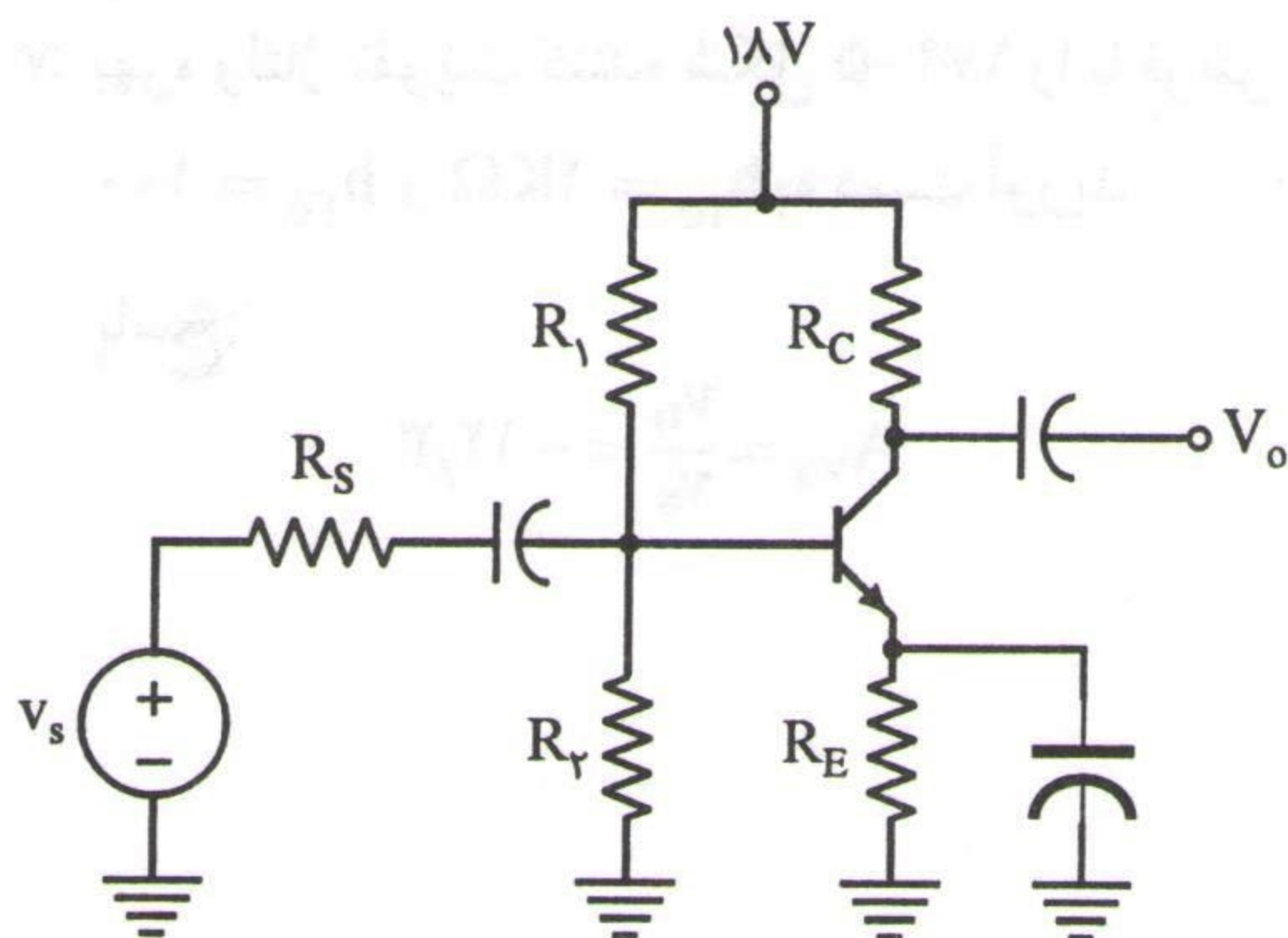
پاسخ:

$h_{ie} = 1.368K\Omega$ ، $R_i = 11.9\Omega$ ، $R_o = 4.7K\Omega$

$A_i = 0.87$ ، $A_v = 343.65$



شکل ۱۷۴-۵

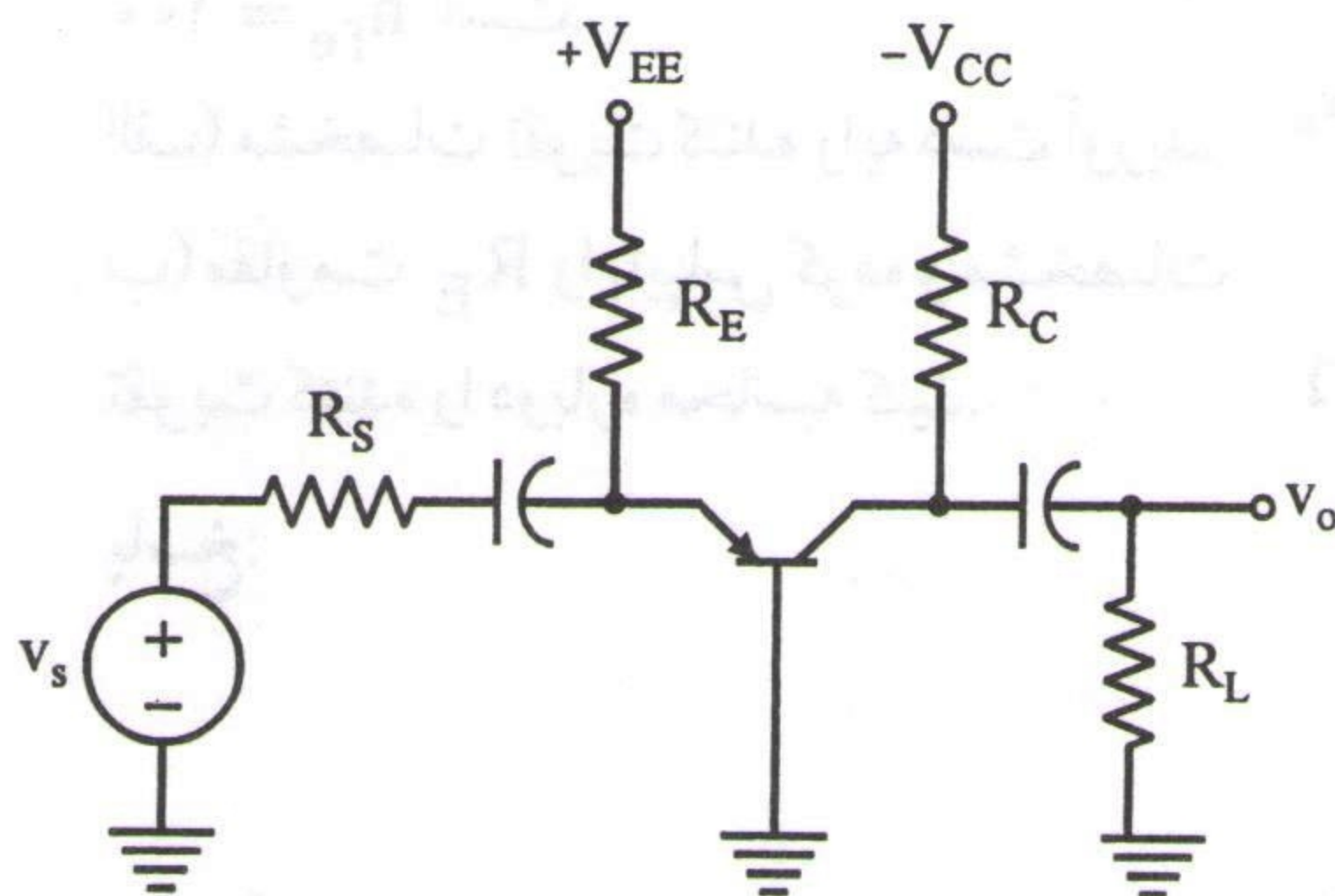


شکل ۵-۱۷۵

۱۰. تقویت کننده امیتر مشترک شکل ۵-۱۷۵ را به گونه‌ای طراحی نمایید که $|A_v| \geq 200$ و $R_i = 1\text{K}\Omega$ گردد و مدار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار بوده و نقطه کار وسط خط بار ac قرار گیرد. همچنین مقاومت تونن بیس نسبت به h_{ie} خیلی بزرگتر باشد. ترانزیستور دارای $h_{fe} = 100$ ، $V_{BE} = 0.7\text{V}$ و $V_T = 26\text{mV}$ است.

پاسخ:

$$R_C \geq 2\text{K}\Omega, R_C = 2.7\text{K}\Omega, R_E = 1.5\text{K}\Omega, R_1 = 53.68\text{K}\Omega, R_2 = 20.82\text{K}\Omega$$

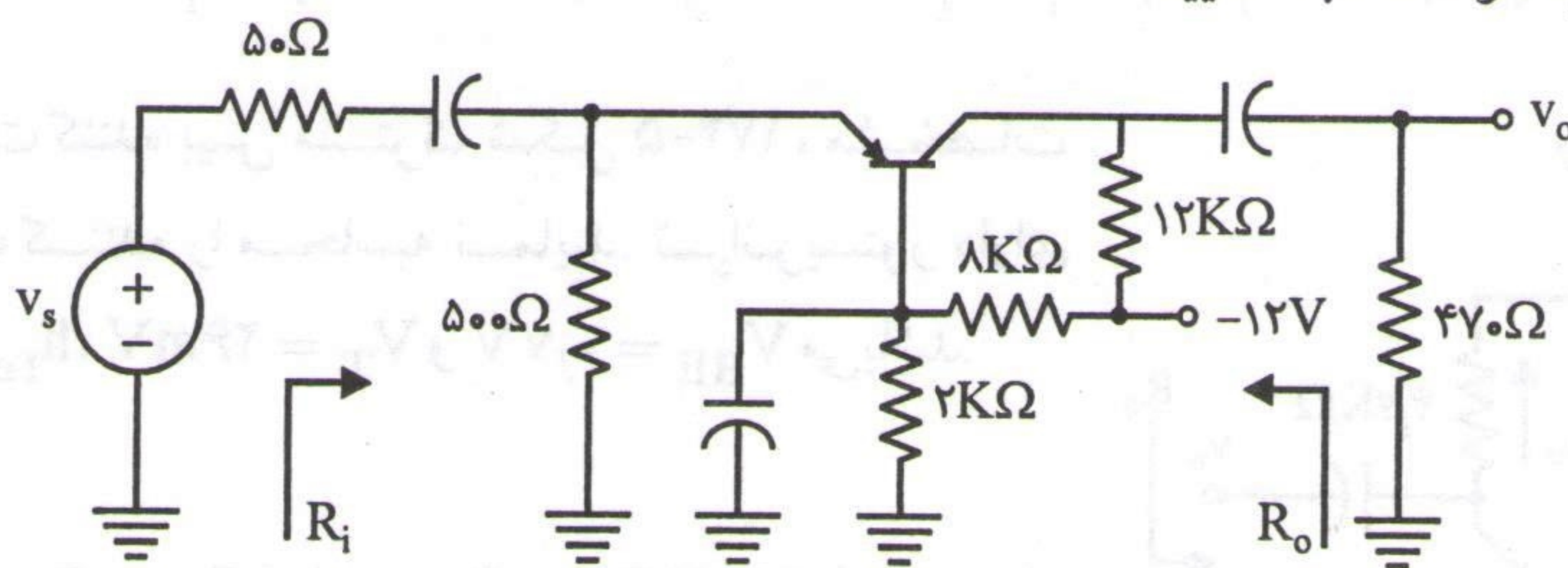


شکل ۵-۱۷۶

۱۱. در مدار بیس مشترک شکل ۵-۱۷۶ با فرض اینکه h_{fe} بزرگ باشد ثابت کنید:

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{(R_C \parallel R_L) \times (R_E \parallel h_{ib})}{h_{ib} (R_S + R_E \parallel h_{ib})}$$

۱۲. در مدار بیس مشترک شکل ۵-۱۷۷ با فرض $h_{fe} = 100$ ، $V_T = 26\text{mV}$ و $V_{BE} = 0.7\text{V}$ مقادیر R_i ، A_{v_s} و A_i را محاسبه نمایید.



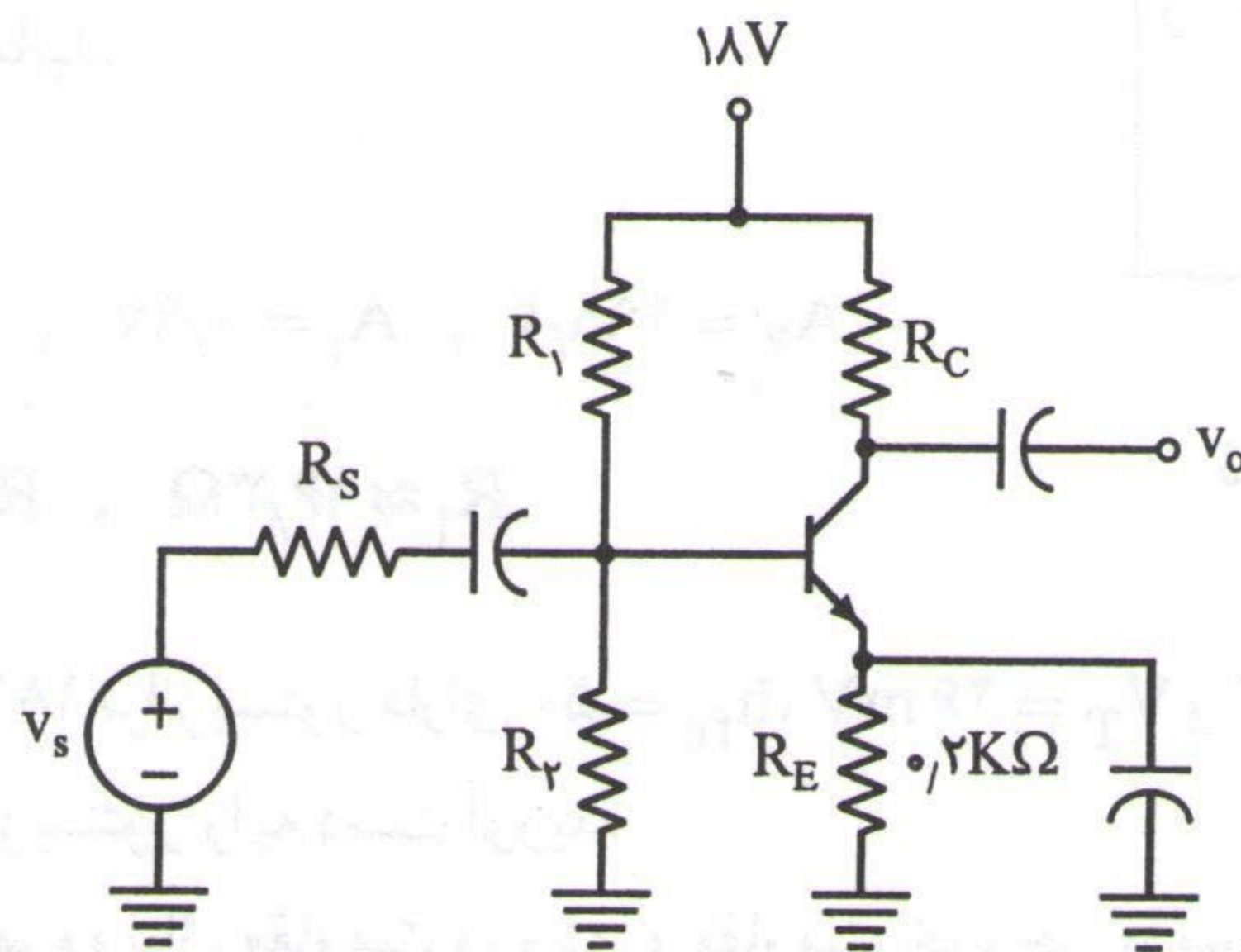
شکل ۵-۱۷۷

پاسخ:

$$h_{ie} = 797\Omega, R_i \approx 7.8\Omega, R_o = 12\text{K}\Omega, A_v = 56.68$$

$$A_{v_s} = 7.65, A_i = 0.94$$

۱۳. تقویت کننده امیتر مشترک شکل ۱۷۸-۵ را به گونه ای طراحی کنید که $A_v = 300$ بوده و مدار نسبت به تغییرات β از پایداری خوبی برخوردار بوده و دامنه نوسان متقارن خروجی حداکثر شود. ترانزیستور دارای $h_{fe} = 100$ ، $V_T = 26\text{mV}$ و $V_{BE} = 0.7\text{V}$ است.

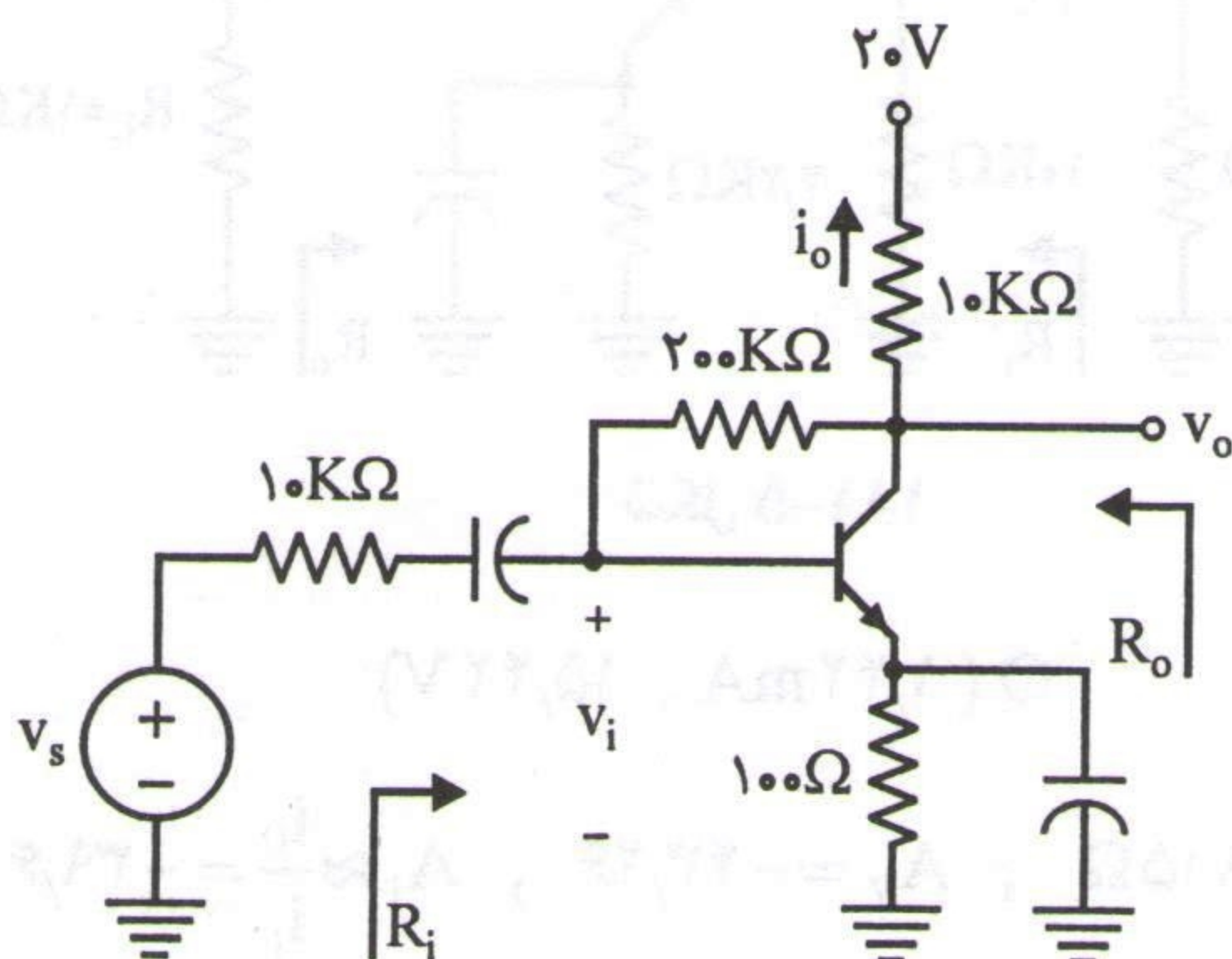


شکل ۵-۱۷۸

پاسخ:

$$h_{ie} = 216.7\Omega, R_C = 650\Omega, R_1 = 10.7\text{K}\Omega, R_2 = 2.46\text{K}\Omega$$

۱۴. برای تقویت کننده شکل ۱۷۹-۵، با فرض $h_{fe} = 100$ ، $V_T = 26\text{mV}$ و $V_{BE} = 0.7\text{V}$ ، مقادیر h_{ie} ، A_{v_s} ، A_v ، R_o ، R_i را محاسبه کنید.

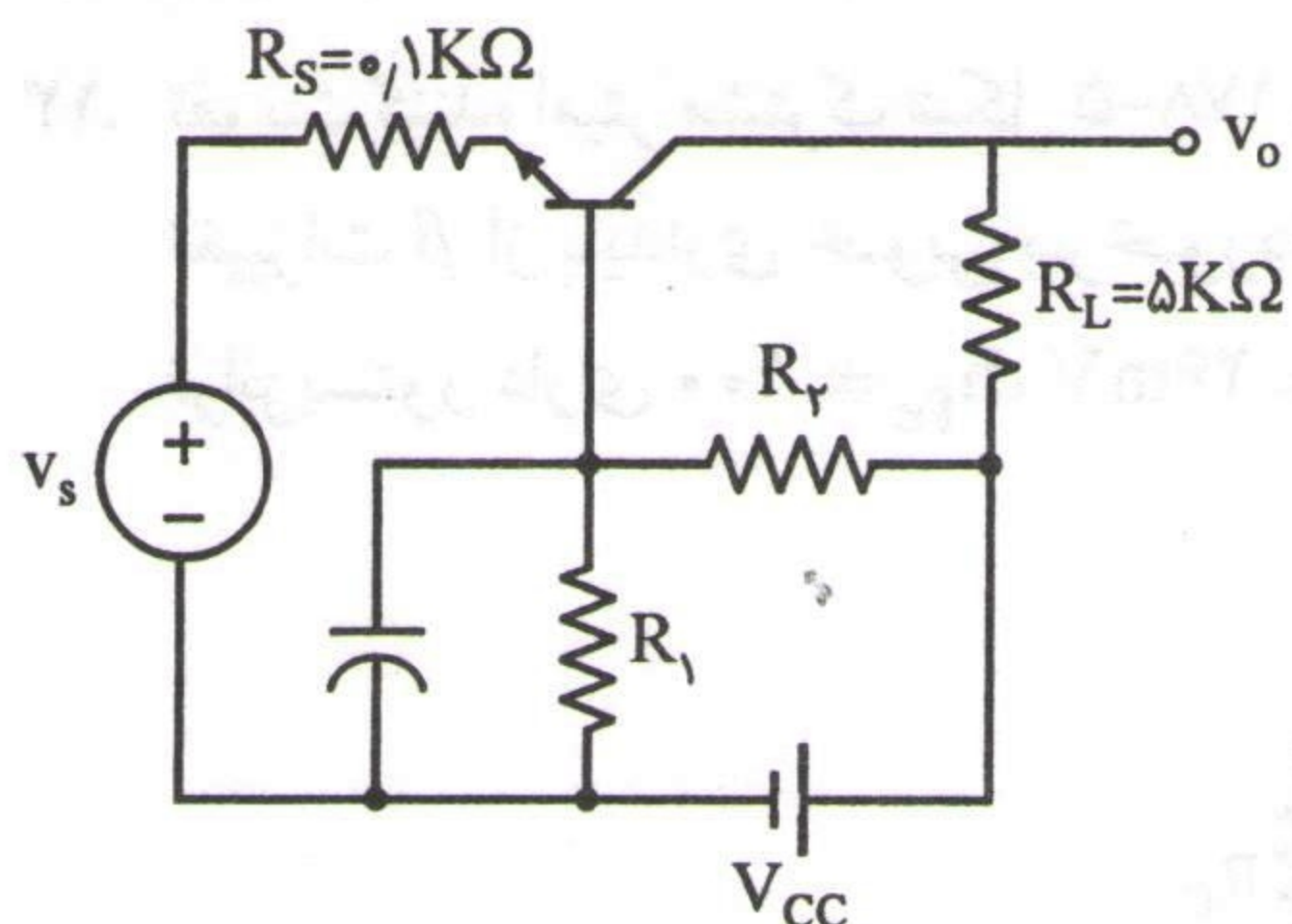


شکل ۵-۱۷۹

پاسخ:

$$h_{ie} = 1.64\text{K}\Omega, A_{v_s} = -16, R_i = 283\Omega$$

$$R_o = 1.9\text{K}\Omega, A_i = -16.4, A_v = -580.7$$



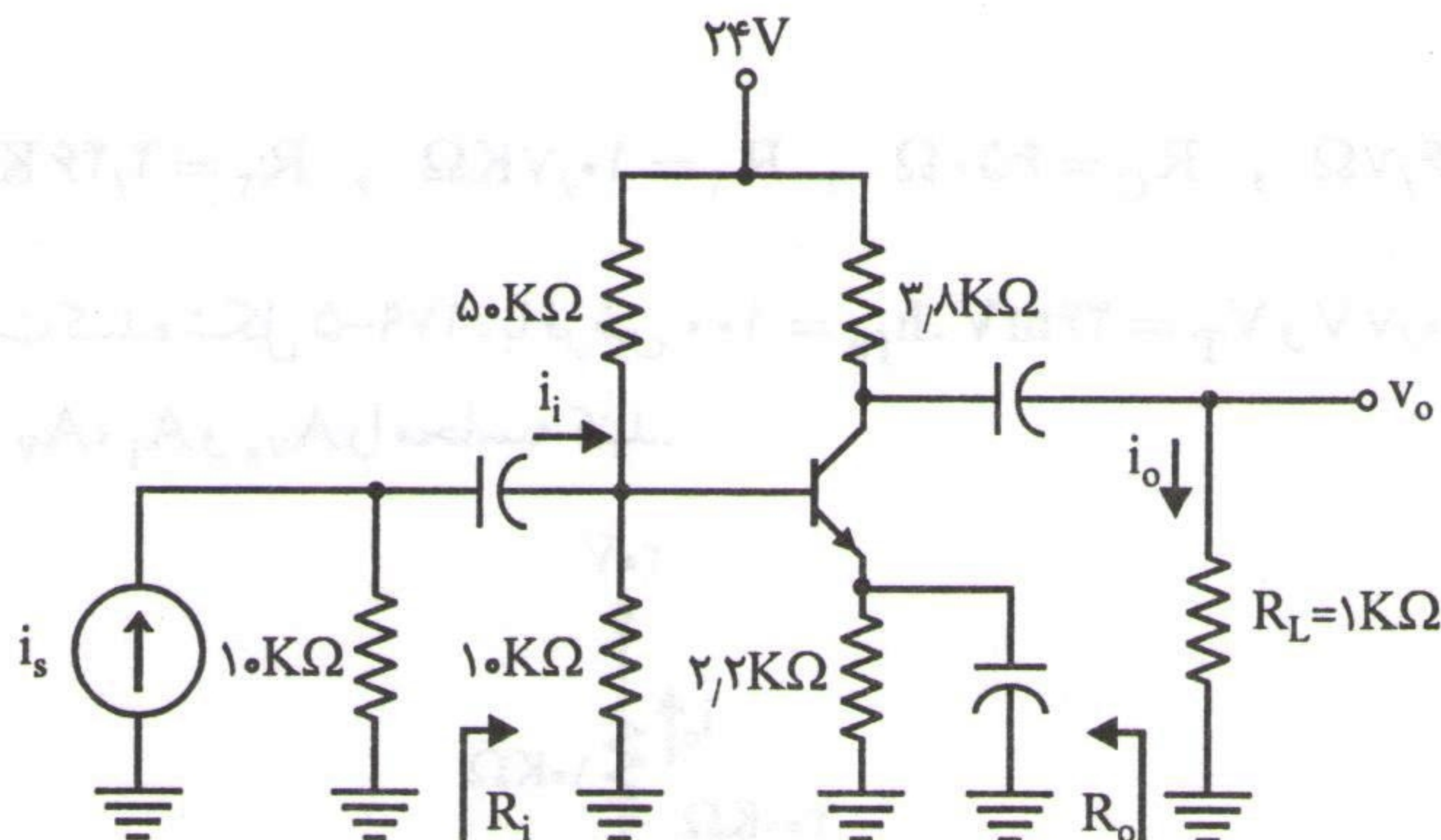
شکل ۵-۱۸۰

۱۵. در تقویت کننده بیس مشترک شکل ۵-۱۸۰ ترانزیستور دارای $h_{ie} = 830 \Omega$ ، $h_{fe} = 50$ و $h_{oe} \approx 10^{-4} \text{ mho}$ می‌باشد. مشخصات تقویت کننده را محاسبه نمایید.
پاسخ:

$$A_v = 298.2, A_i = 0.97, A_{v_s} = 41.79$$

$$R_i \approx 16.3 \Omega, R_o \approx 4.95 \text{ K}\Omega$$

۱۶. در مدار شکل ۵-۱۸۱ ترانزیستور دارای $h_{fe} = 50$ ، $V_T = 26 \text{ mV}$ و $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ است.
(الف) نقطه کار ترانزیستور را به دست آورید.
(ب) بهره جریان، بهره ولتاژ، مقاومت ورودی و مقاومت خروجی را محاسبه کنید.
(ج) بند (ب) را در صورتی که h_{re} برابر 10^{-4} و h_{oe} برابر 10^{-4} mho باشد، مجدداً حل کنید.



شکل ۵-۱۸۱

پاسخ:

$$Q(1.42 \text{ mA}, 15.42 \text{ V})$$

(الف)

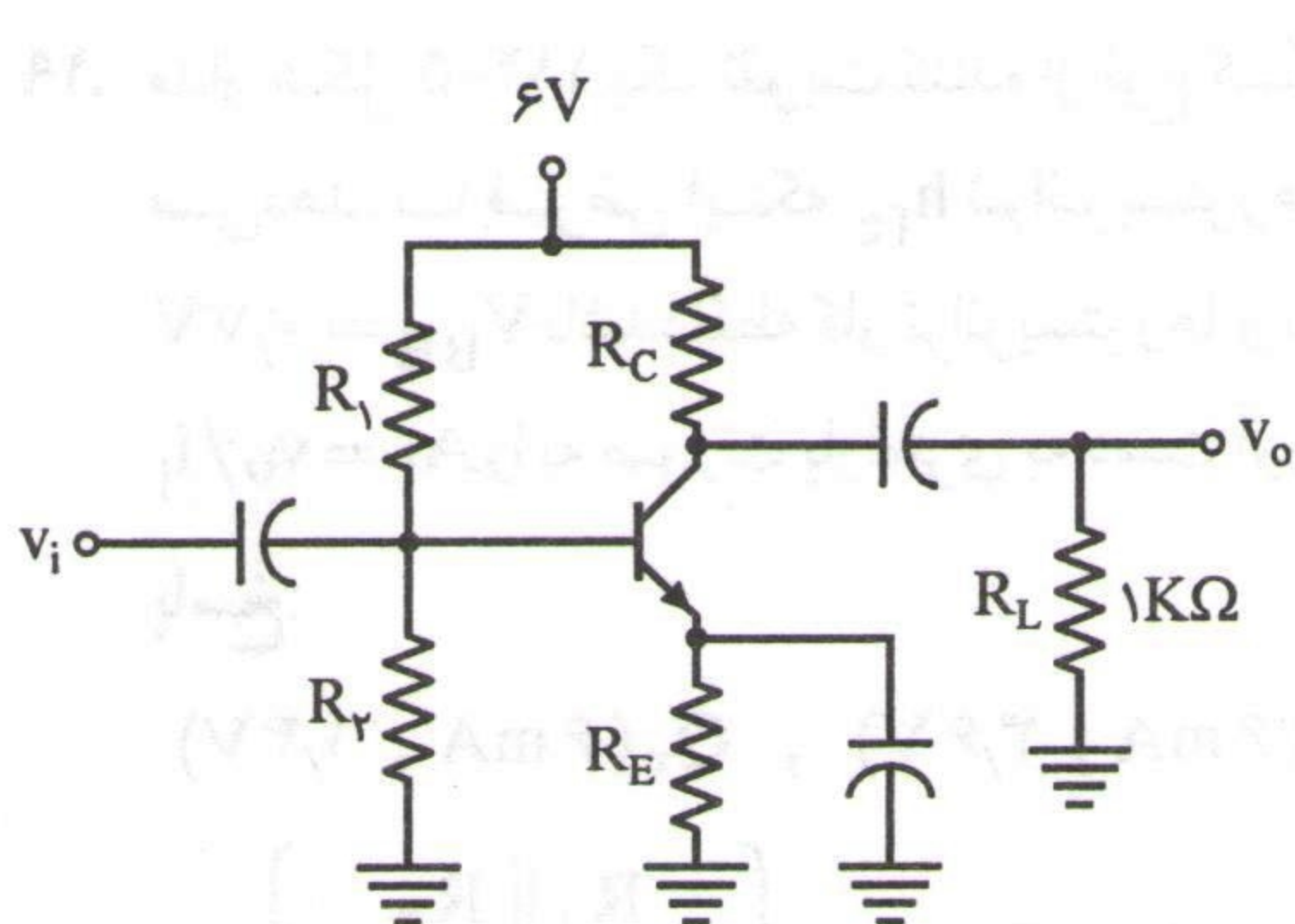
$$h_{ie} = 915 \Omega, A_v = -43.26, A_i \approx \frac{i_o}{i_i} = -39.6$$

(ب)

$$A_{i_s} = \frac{i_o}{i_s} \approx -36.3, R_o = 3.8 \text{ K}\Omega, R_i = 824 \Omega$$

$$h_{ie} = 915 \Omega, R_i = 820 \Omega, A_v = -45.48, A_i = \frac{i_o}{i_i} \approx -37.3 \quad (\text{ج})$$

$$A_{i_s} = \frac{i_o}{i_s} \approx -34.5, R_o = 2.75 \text{ K}\Omega$$



شکل ۵-۱۸۲

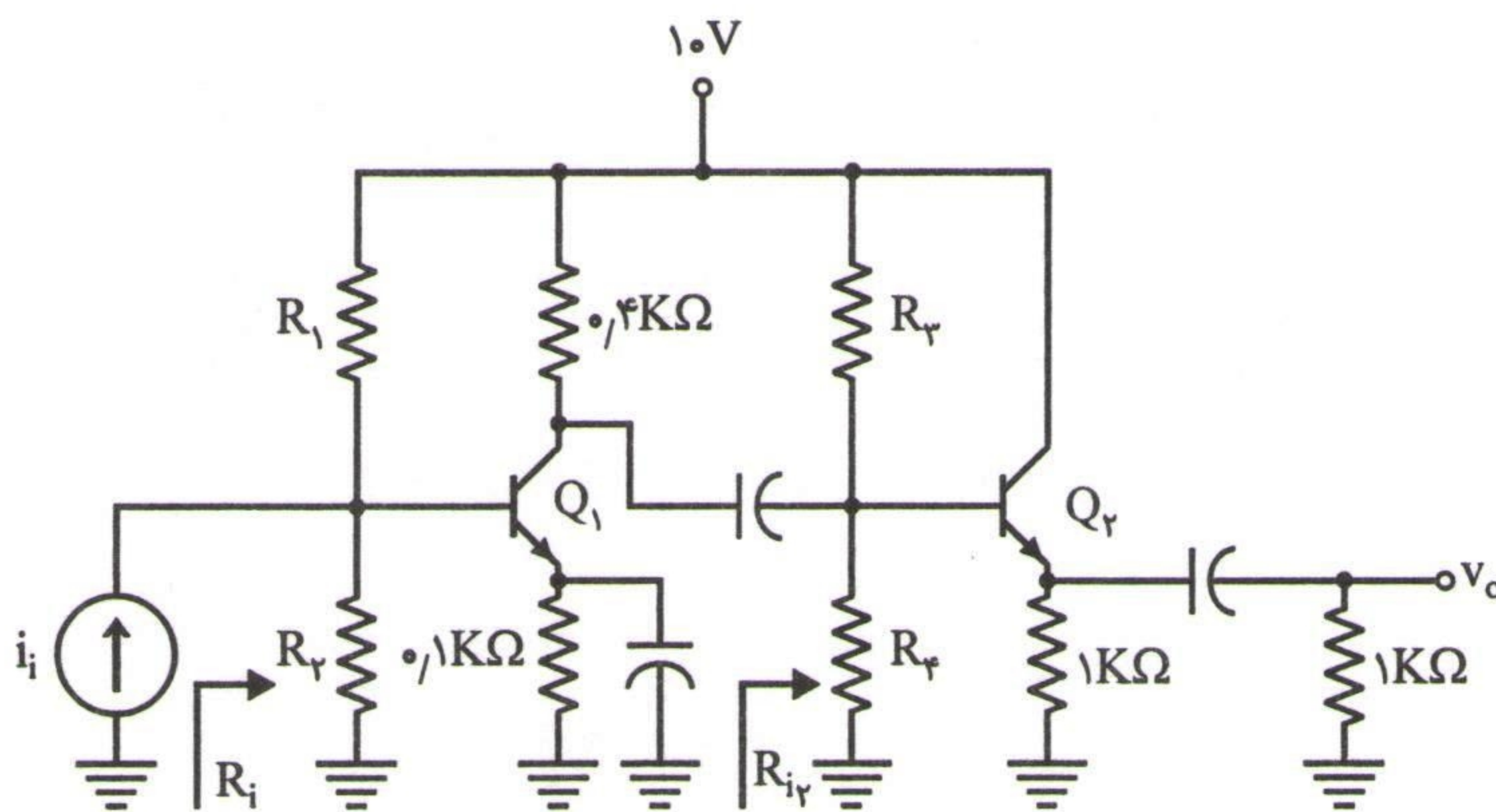
۱۷. در تقویت کننده شکل ۵-۱۸۲ ترانزیستور دارای $V_T = 26\text{ mV}$ ، $V_{BE} = 0.7\text{ V}$ و $h_{fe} = 50$ می باشد. مدار را به گونه ای طراحی کنید که نسبت به تغییرات β دارای پایداری بوده و دامنه نوسان متقارن خروجی در جریان $I_{CQ} = 2\text{ mA}$ حداکثر گردد و بهره ولتاژ برابر ۴۰- شود.

پاسخ:

$$h_{ie} = 0.65\text{ K}\Omega, R_C = 1.083\text{ K}\Omega, R_E = 1.4\text{ K}\Omega$$

$$R_1 \approx 11\text{ K}\Omega, R_2 \approx 19\text{ K}\Omega$$

۱۸. در تقویت کننده دو طبقه شکل ۵-۱۸۳، ترانزیستورها دارای $h_{fe} = 100$ ، $V_{BE} = 0.7\text{ V}$ و $V_T = 26\text{ mV}$ هستند. مقادیر مجهول را برای برخورداری از حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی محاسبه نمایید. همچنین مشخصات تقویت کننده را به دست آورید.

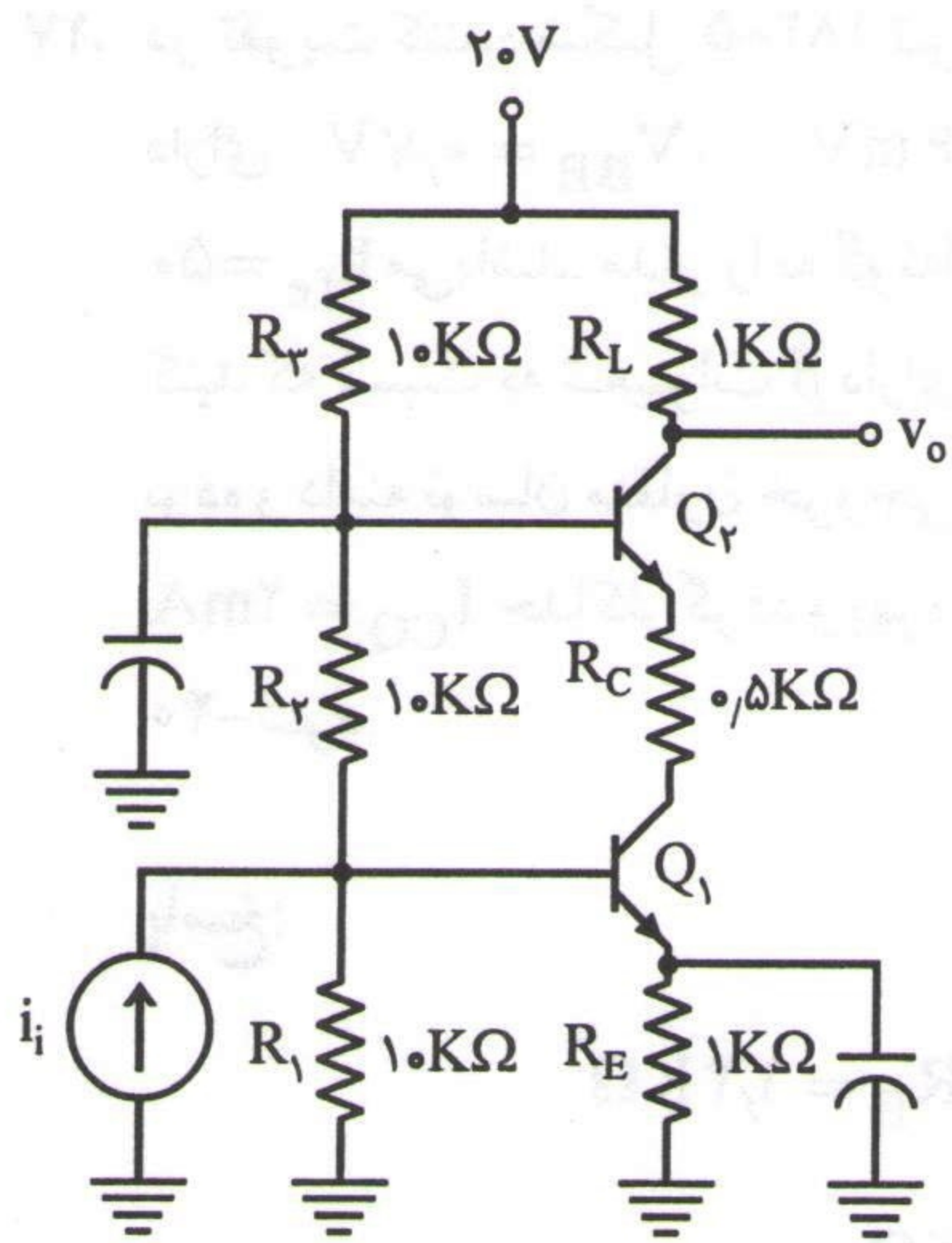


شکل ۵-۱۸۳

پاسخ:

$$R_1 = 5.18\text{ K}\Omega, R_2 = 1.24\text{ K}\Omega, R_3 = 12.35\text{ K}\Omega, R_4 = 52.63\text{ K}\Omega$$

$$h_{ie_1} = 234\text{ }\Omega, h_{ie_2} = 390\text{ }\Omega, R_i = 189.6\text{ }\Omega, A_v \approx -170.3, A_i = -32.3$$



شکل ۵-۱۸۴

۱۹. مدار شکل ۵-۱۸۴ یک تقویت کننده از نوع کسکد را نشان

می‌دهد. با فرض اینکه h_{fe} ترانزیستورها بزرگ و

$V_{BE} = 0.7V$ باشد؛ نقطه کار ترانزیستورها و بهره انتقالی

$A_t = v_o / i_i$ را به صورت پارامتری به دست آورید.

پاسخ:

$Q_1 (6mA, 3.6V)$, $Q_2 (6mA, 1.4V)$

$$A_t = h_{fb_2} R_L h_{fe_1} \left(\frac{R_1 \parallel R_2}{h_{ie_1} + R_1 \parallel R_2} \right)$$