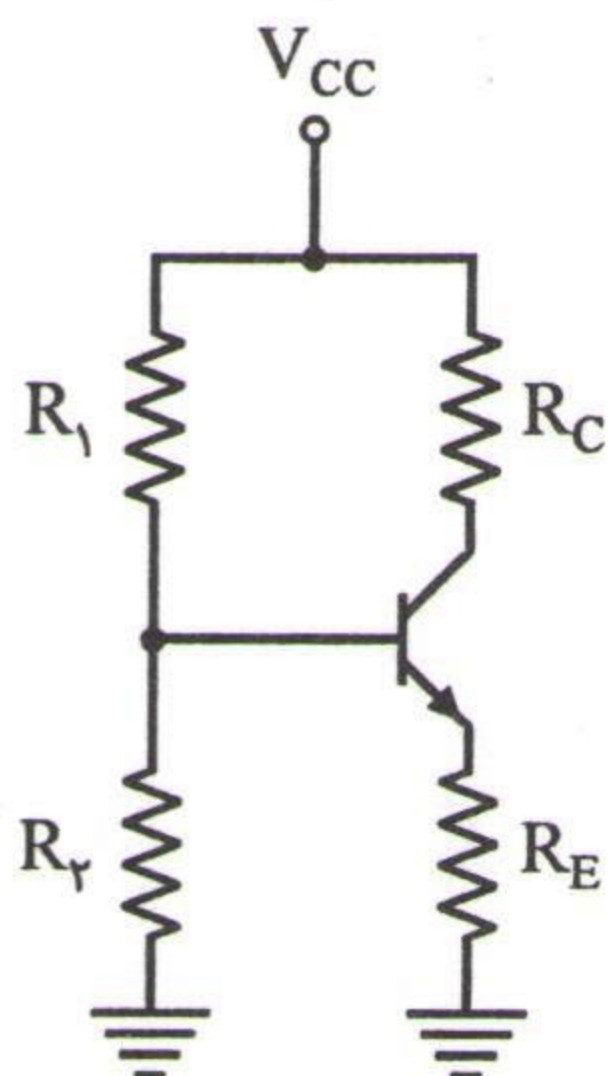


۴

طراحی مدارهای بایاس ترانزیستور پیوندی

۴-۱ چکیده

- نقطه کار ترانزیستور، نقطه‌ای از مشخصه ترانزیستور است که مختصات آن جریان و ولتاژ DC سرهای ترانزیستور را مشخص می‌کند. معمولاً از جریان کلکتور (I_C) و ولتاژ کلکتور-امیتر (V_{CE}) برای مشخص کردن نقطه کار به صورت $Q(I_{CQ}, V_{CEQ})$ استفاده می‌شود.
- مدار بایاس معمولاً به مداری شامل منابع ولتاژ DC و مقاومتها اطلاق می‌گردد که ولتاژ و جریان DC نقطه کار ترانزیستور را تأمین می‌کند.
- منظور از سیگنال کوچک یعنی سیگنال ولتاژی (جریانی) که دامنه آن در مقایسه با ولتاژ (جریان) نقطه کار ترانزیستور بسیار کوچک باشد و منظور از سیگنال بزرگ یعنی سیگنال ولتاژی (جریانی) که دامنه آن در مقایسه با ولتاژ (جریان) نقطه کار قابل ملاحظه باشد.
- در مواردی که از ترانزیستور به عنوان یک عنصر خطی استفاده می‌شود (مثل تقویت کننده‌ها) باید نقطه کار ترانزیستور در ناحیه فعال به گونه‌ای قرار گیرد که تحت هیچ شرایطی ترانزیستور از آن ناحیه خارج نگردد.
- بسته به اینکه منبع سیگنال ورودی به کدام سر ترانزیستور اعمال گردد و خروجی از کدام سر گرفته شود، سه نوع ترکیب مدار بایاس به صورت زیر تعریف می‌شود:
 - الف) امیتر مشترک: ورودی سیگنال کوچک به سر بیس و خروجی از سر کلکتور گرفته می‌شود.
 - ب) کلکتور مشترک: ورودی سیگنال کوچک به سر بیس و خروجی از سر امیتر گرفته می‌شود.
 - ج) بیس مشترک: ورودی سیگنال کوچک به سر امیتر و خروجی از سر کلکتور گرفته می‌شود.
- متداول‌ترین روش بایاس ترانزیستور در حالت امیتر مشترک که به مدار خود بایاس معروف می‌باشد به صورت شکل ۴-۱ است. در این مدار،



شکل ۴-۱

الف) وجود مقاومت R_E به خاطر پایداری حرارتی نقطه کار و جلوگیری از رانش حرارتی است. در صورتی که $R_E = 0$ باشد، افزایش دما باعث کاهش V_{BE} و افزایش I_{CBO} و در نتیجه افزایش جریان I_C می شود که خود باعث افزایش مجدد دما می گردد و این روند ادامه خواهد داشت.

ب) مقاومت های R_1 و R_2 را می توان به گونه ای انتخاب کرد که تغییرات وسیع β اثر چندانی روی نقطه کار نداشته باشد. می توان نشان داد برای این منظور، کافی است مقاومت $R_{Th} = R_1 \parallel R_2$ به صورت زیر انتخاب گردد:

$$R_{Th} \ll \beta_{min} R_E \Rightarrow R_{Th} = \frac{1}{10} \beta_{min} R_E$$

● برای به دست آوردن مدار معادل DC، کافی است خازن ها را اتصال باز و منابع سیگنال را حذف کرد و برای به دست آوردن مدار معادل AC، خازن ها اتصال کوتاه و منابع تغذیه DC حذف می گردند.

● چنانچه پس از بایاس ترانزیستور، منبع سیگنالی به مدار اعمال شود، کلیه جریانه ها و ولتاژهای مدار از جمله جریان و ولتاژ نقطه کار ترانزیستور دارای هر دو مؤلفه DC و AC می باشند. بنابراین نقطه کار حول مقدار DC خود دارای تغییراتی خواهد بود. معمولاً این تغییرات باید به گونه ای باشد که نقطه کار از ناحیه فعال خارج نگردد.

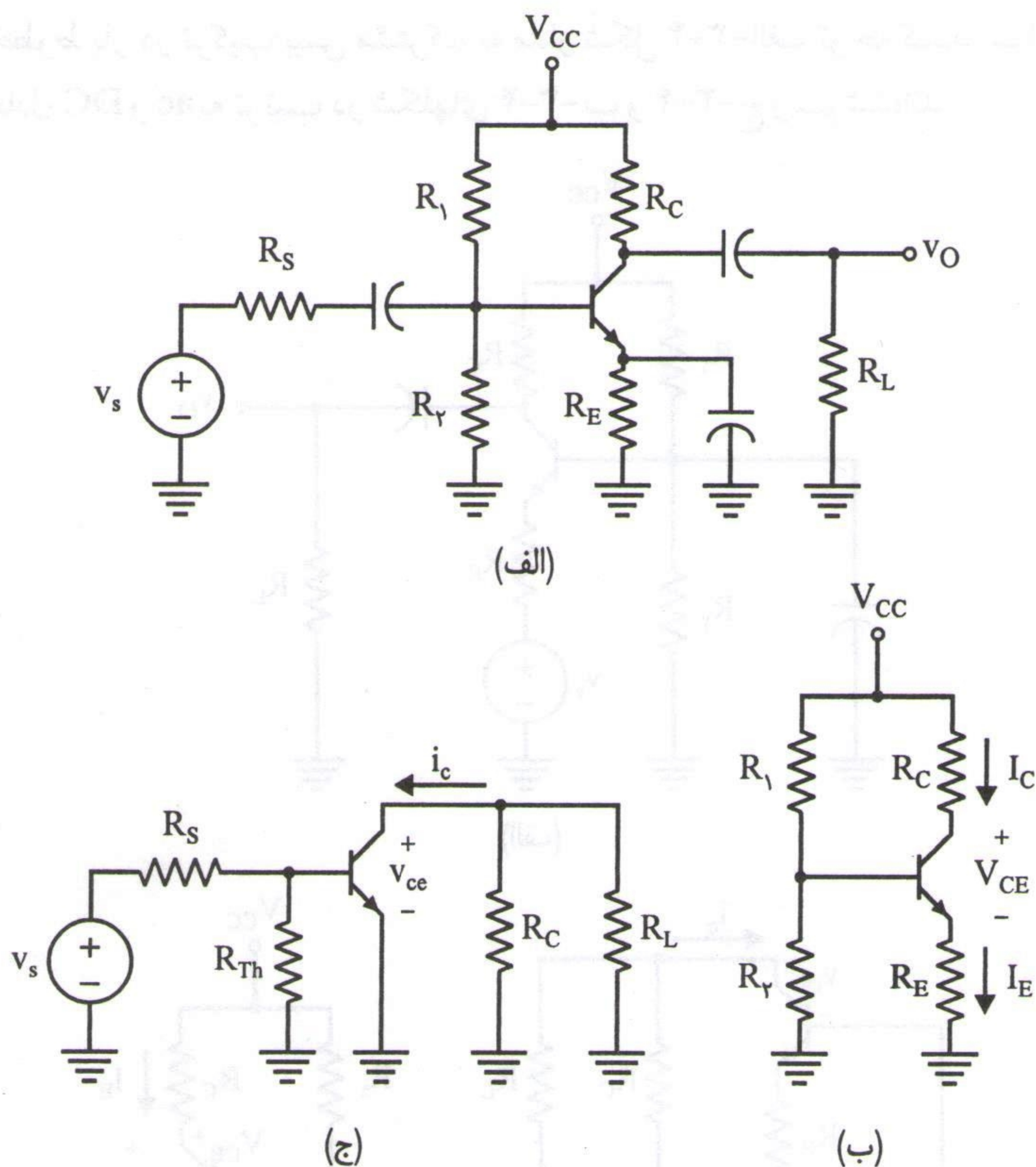
● مقادیر جریان و ولتاژ DC با حروف بزرگ و اندیسهای بزرگ نمایش داده می شوند مثل I_C و V_{CE} ، وقتی که منظور فقط اشاره به مؤلفه های سیگنال کوچک است از حروف و اندیسهای کوچک استفاده می شود مثل i_c و v_{ce} ؛ در نهایت برای نمایش کل مقدار ولتاژ و جریان (AC+DC) از حروف کوچک و اندیسهای بزرگ استفاده می شود مثل i_C و v_{CE} . به این ترتیب روابط زیر برقرار است:

$$v_{CE} = V_{CE} + v_{ce} \quad , \quad i_C = I_C + i_c$$

● خط بار DC عبارت است از معادله ای که رابطه بین جریان و ولتاژ DC نقطه کار ترانزیستور را تعیین می کند. در مورد ترکیب آمیتر مشترک و کلکتور مشترک این معادله بین I_C و V_{CE} و برای ترکیب بیس مشترک بین $V_{CB} = V_{CE} + V_{EB}$ و I_C است. برای یافتن خط بار DC کافی است در مدار معادل DC معادله KVL را در مدار کلکتور - آمیتر نوشت.

● خط بار AC خالص عبارت است از معادله ای که رابطه بین جریان و ولتاژ AC خالص نقطه کار ترانزیستور را تعیین می کند. در مورد مدارهای آمیتر مشترک و کلکتور مشترک این معادله بین i_c و v_{ce} و در مورد مدار بیس مشترک بین i_c و v_{cb} است. به خاطر داشته باشید که مبدأ خط بار AC خالص، نقطه کار ترانزیستور می باشد. با انتقال مبدأ خط بار AC خالص از نقطه کار ترانزیستور به مبدأ مختصات، معادله کلی بین جریان و ولتاژ نقطه کار ترانزیستور به دست می آید که خط بار AC نامیده می شود. برای مدارهای آمیتر مشترک و کلکتور مشترک این معادله بین i_C و v_{CE} و برای مدار بیس مشترک بین i_C و v_{CB} است.

● به عنوان مثال برای تقویت کننده آمیتر مشترک شکل ۴-۲-الف، مدارهای معادل DC و AC به ترتیب در شکل های ۴-۲-ب و ۴-۲-ج آورده شده است.



شکل ۲-۴

برای این مدار خط بارهای DC و ac خالص با استفاده از KVL در مدار معادل DC و ac عبارتند از

$$\text{خط بار DC: } V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C = V_{CC} - R_{DC}I_C$$

$$\text{خط بار ac: } v_{ce} = -(R_C \parallel R_L)i_c = -R_{ac}i_c$$

در نوشتن معادله خط بار DC فرض کرده‌ایم که I_C و I_E تقریباً برابرند. از آنجا که مبدأ خط بار ac خالص، نقطه کار $Q(I_{CQ}, V_{CEQ})$ است؛ معادله خط بار ac (معادله کلی جریان و ولتاژ نقطه کار) عبارت است از

$$i_C - I_{CQ} = -R_{ac}(v_{CE} - V_{CEQ})$$

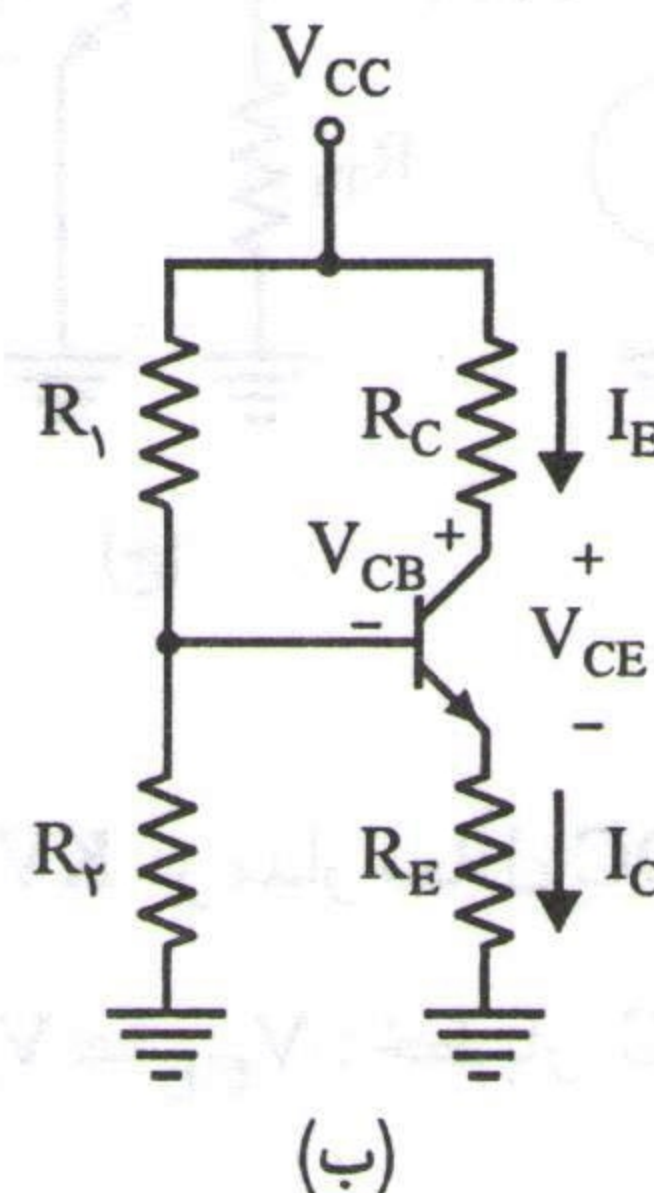
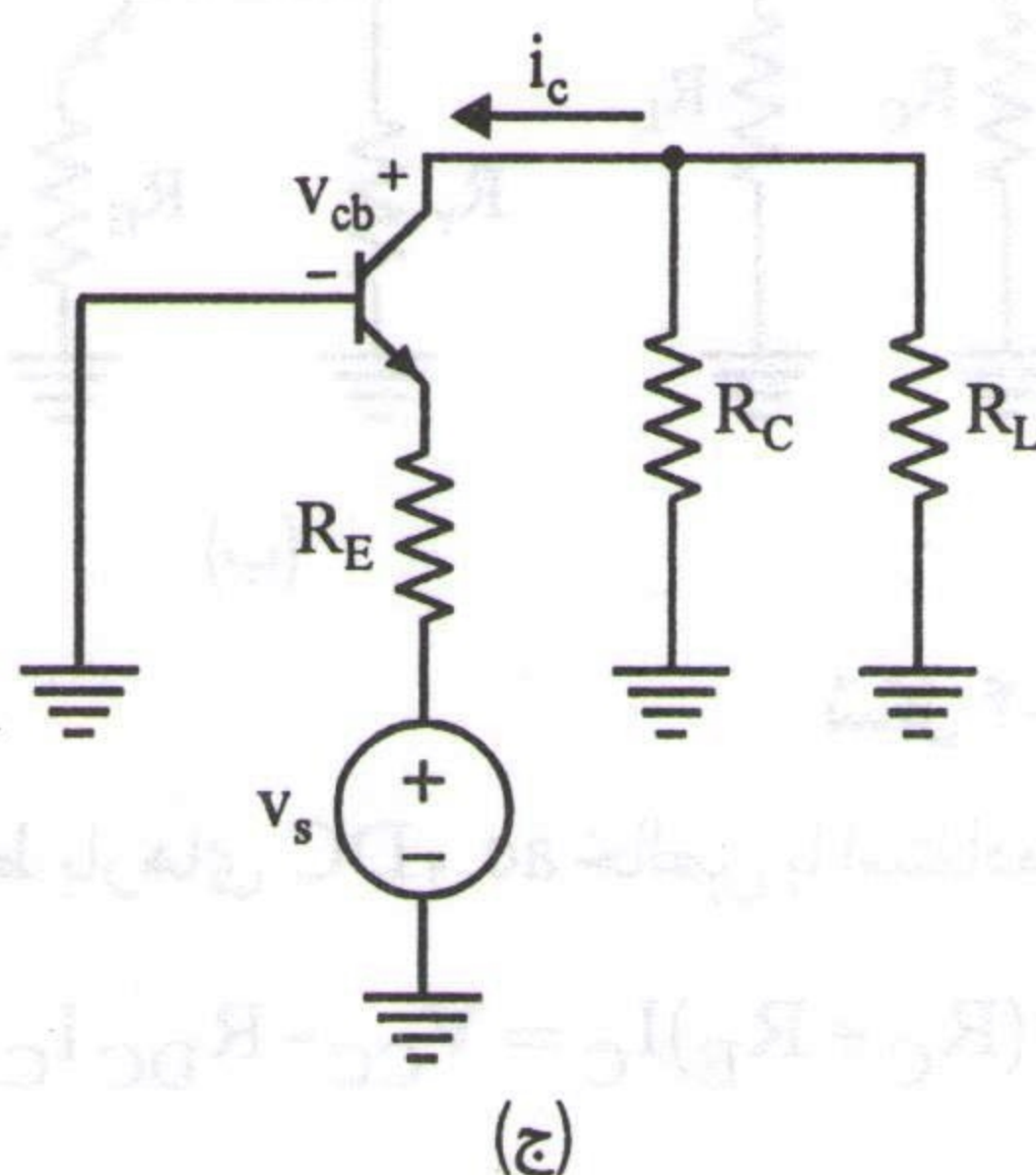
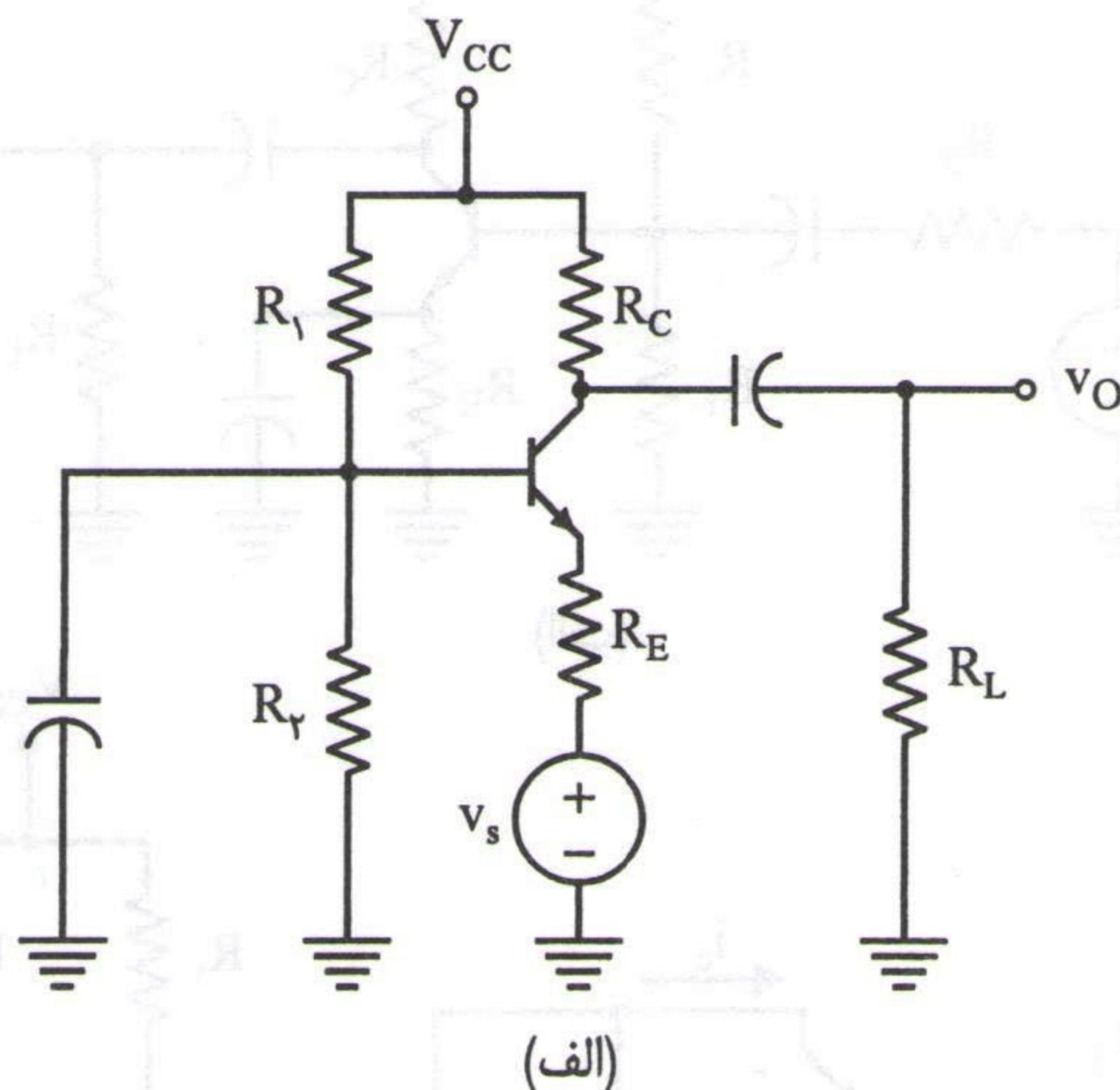
که از انتقال مبدأ خط بار ac خالص از نقطه کار ترانزیستور به مبدأ مختصات به دست می‌آید.

● با توجه به معادلات خط بار DC و ac خالص، مقاومت‌های R_{DC} و R_{ac} را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

R_{DC} = مجموع مقاومت‌های مدار کلکتور - امیتر در مدار DC، یا به طور کلی تر ضریب I_C در معادله خط بار DC که به صورت ولتاژ بر حسب جریان نوشته شده باشد.

R_{ac} = کل مقاومت‌های مدار کلکتور در مدار معادل ac، یا به طور کلی تر ضریب i_c در معادله خط بار ac خالص که به صورت ولتاژ بر حسب جریان نوشته شده باشد.

- برای درک خطوط بار در ترکیب بیس مشترک، به مدار شکل ۴-۳-الف توجه کنید. برای این ترکیب مدارهای معادل DC و ac به ترتیب در شکل‌های ۴-۳-ب و ۴-۳-ج رسم شده‌اند.



شکل ۴-۳

$$\text{خط بار DC: } V_{CB} = V_{CE} - V_{BE(\text{on})} = [V_{CC} - V_{BE(\text{on})}] - (R_C + R_E) I_C$$

$$= [V_{CC} - V_{BE(\text{on})}] - R_{DC} I_C$$

$$\text{خط بار ac خالص: } v_{cb} = -(R_C \parallel R_L) i_c = -R_{ac} i_c$$

بنابراین خط بار ac یا رابطه کلی بین جریان و ولتاژ نقطه کار به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\text{خط بار ac: } v_{CB} - V_{CBQ} = -R_{ac} (i_C - I_{CQ})$$

● برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن در خروجی یا ورودی بدون اینکه ترانزیستور از ناحیه خطی کار خود خارج گردد، باید نقطه کار ترانزیستور در وسط خط بار R_{ac} قرار گیرد. بنابراین می توان نشان داد که شرط داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن، انتخاب نقطه کار به صورت زیر است:

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}}, \quad V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} R_{ac}$$

توجه نمایید که روابط فوق برای ترکیبهای آمیتر مشترک و کلکتور مشترک به کار می رود. برای مدار بیس مشترک این روابط با اندکی تغییر به صورت زیر است:

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - |V_{BE(on)}|}{R_{ac} + R_{DC}}, \quad V_{CBQ} = \frac{V_{CC} - |V_{BE(on)}|}{R_{ac} + R_{DC}} R_{ac}$$

● معمولاً طراحی مدار بایاس به صورتی انجام می گیرد که حداکثر دامنه نوسان و پایداری نقطه کار نسبت به تغییرات β وجود داشته باشد. بنابراین ابتدا R_{Th} را از شرط پایداری و I_{CQ} را از شرط حداکثر دامنه نوسان به دست آورده و سپس V_{Th} را با نوشتن KVL در مدار بیس - آمیتر محاسبه می کنیم. با داشتن مقادیر R_{Th} و V_{Th} ، مقادیر R_1 و R_2 به دست می آیند. R_{Th} و V_{Th} مدار معادل تونن از دید بیس می باشند که برای مدار خود بایاس شکل ۱-۴ عبارتند از

$$R_{Th} = R_1 \parallel R_2, \quad V_{Th} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} R_2$$

مقادیر مقاومت های R_1 و R_2 با معلوم بودن R_{Th} و V_{Th} عبارتند از

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

● برای محاسبه حداکثر دامنه نوسان خروجی در یک مدار طراحی شده آمیتر مشترک یا کلکتور مشترک، به صورت زیر عمل می کنیم:

الف) مدار معادل DC را به دست آورده و معادله خط بار DC را با نوشتن KVL در مدار کلکتور - آمیتر به دست می آوریم، که در نتیجه مقاومت R_{DC} نیز مشخص می شود.

$$V_{CE} = V_{CC} - R_{DC} I_C$$

با استفاده از این معادله و تحلیل DC مدار، نقطه کار ترانزیستور یعنی $Q(I_{CQ}, V_{CEQ})$ به دست می آید.

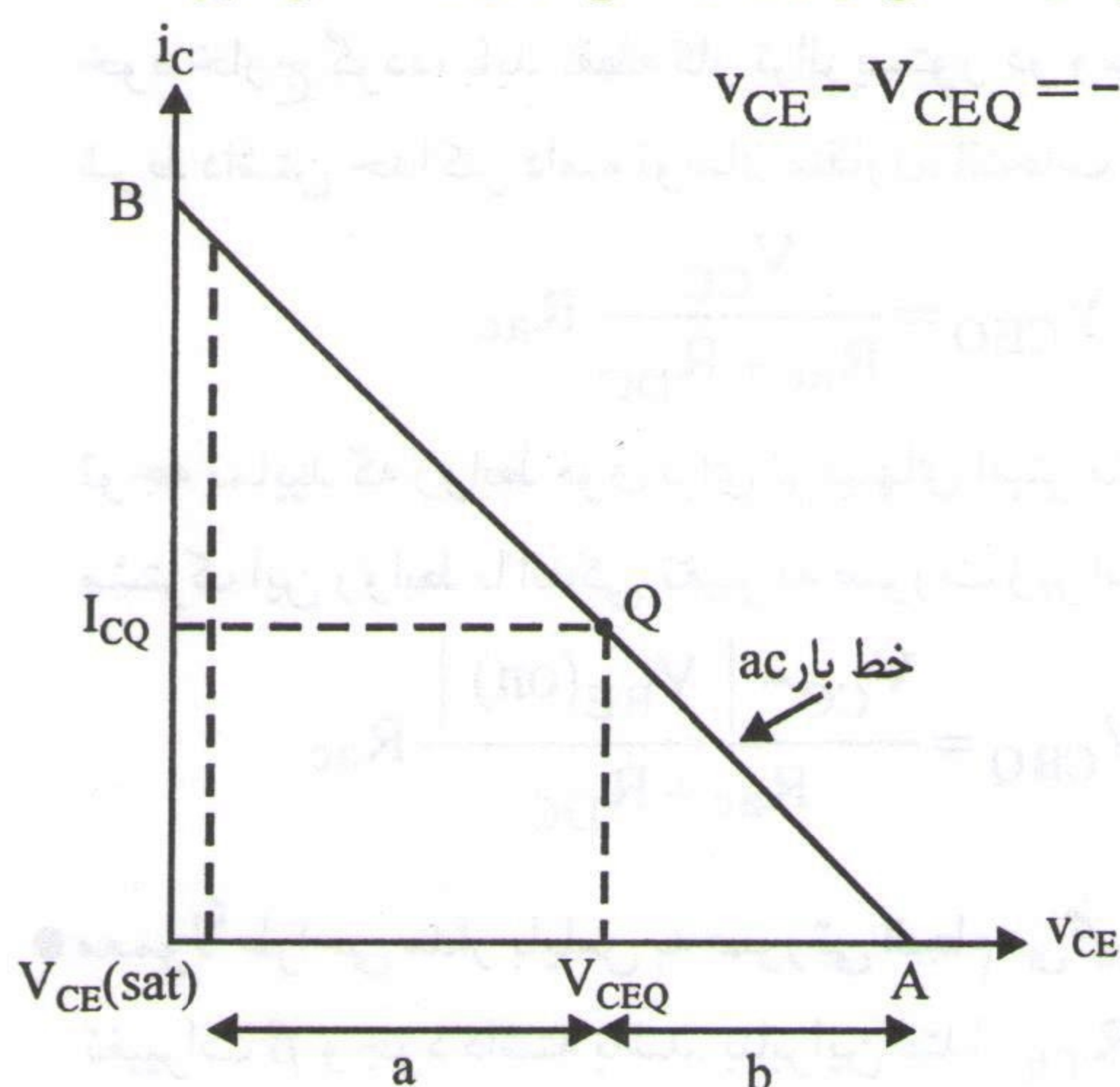
ب) مدار معادل ac را به دست آورده و معادله خط بار ac خالص را با نوشتن KVL در مدار کلکتور - آمیتر به صورت زیر می یابیم، که در نتیجه مقاومت R_{ac} نیز مشخص می شود.

$$v_{ce} = -R_{ac} i_c$$

ج) در معادله خط بار ac خالص به جای i_c و v_{ce} با توجه به معادلات زیر جایگذاری می نماییم:

$$V_{CE} = V_{CEQ} + v_{ce}, \quad i_C = I_{CQ} + i_c$$

بنابراین معادله خط بار ac به صورت زیر حاصل می شود که می توان به راحتی آن را به خاطر سپرد.



$$v_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac}(i_C - I_{CQ})$$

مشاهده می شود که این معادله رابطه بین کل ولتاژ و کل جریان نقطه کار می باشد. به عبارت دیگر هم شامل مقادیر DC و هم شامل مقادیر ac است. بنابراین می توان گفت مکان هندسی نقطه کار ترانزیستور می باشد. همان طور که قبلاً اشاره شد، رابطه اخیر را معادله کلی جریان کلکتور یا خط بار ac می نامیم. لازم است که به تفاوت آن با خط بار ac خالص که مبدأ آن نقطه کار Q است توجه شود.

شکل ۴-۴

دامنه نوسان به دست می آید. این مطلب در شکل ۴-۴ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ کلکتور - امیتر بدون اینکه ترانزیستور وارد ناحیه قطع یا اشباع گردد برابر است با

$$v_{ce,max} = \min(a, b)$$

در شکل ۴-۴ مقادیر A و B با توجه به معادله خط بار ac برابر است با

$$A = R_{ac} I_{CQ} + V_{CEQ}, \quad B = (R_{ac} I_{CQ} + V_{CEQ}) / R_{ac}$$

● **پایداری نقطه کار ترانزیستور:** برای هر مدار بایاس، جریان نقطه کار یا I_C را می توان به صورت تابعی از مشخصات ترانزیستور مثل β ، V_{BE} ، I_{CBO} و مشخصات مدار از جمله منبع تغذیه و مقاومتها نوشت. معمولاً منابع تغذیه DC کاملاً ثابت نبوده و دارای مقداری ریزش می باشند. همچنین مقاومتها نیز دارای تلورانس هستند. از طرفی I_{CBO} و V_{BE} به دما وابسته بوده و برای β نیز مقدار دقیقی نمی توان در نظر گرفت، بلکه همواره یک محدوده β_{min} تا β_{max} داده می شود. بنابراین جریان کلکتور می تواند تغییرات وسیعی داشته باشد که نامناسب خواهد بود. منظور از پایداری نقطه کار ترانزیستور، ایجاد شرایطی است که تغییرات پارامترهای مختلف اثر چندانی روی جریان کلکتور نداشته باشد. در این ارتباط، پایداری حرارتی اهمیت بیشتری دارد.

● **جریان اشباع معکوس کلکتور (I_{CBO}):** به ازای هر 10° درجه سانتیگراد افزایش دما، دو برابر می شود و V_{BE} به ازای هر 10° درجه سانتیگراد افزایش دما، $2/5$ میلی ولت کاهش می یابد. بنابراین می توان معادلات زیر را برای آنها داشت:

$$I_{CBO}(T_2) = I_{CBO}(T_1) 2^{(T_2 - T_1)/10}$$

$$V_{BE}(T_2) = V_{BE}(T_1) - 2/5(T_2 - T_1) \text{ mV}$$

● **در ایجاد انحراف در نقطه کار برای ترانزیستورهای سیلیکونی، تغییرات حرارتی V_{BE} و برای ترانزیستورهای ژرمانیمی، تغییرات حرارتی I_{CBO} نقش مؤثرتری ایفا می کنند.**

- با توجه به اینکه I_C تابعی از پارامترهای β ، I_{CBO} و V_{BE} می باشد، تغییرات I_C را می توان به صورت تابعی از تغییرات این پارامترها به صورت زیر نوشت:

$$\Delta I_C = S_I \Delta I_{CBO} + S_V \Delta V_{BE} + S_\beta \Delta \beta$$

در این معادله، ضرایب S_I ، S_V و S_β را ضرایب پایداری گویند که به صورت زیر تعریف می شوند:

$$S_I = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CBO}} \approx \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}}, \quad S_V = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}} \approx \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}}, \quad S_\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta \beta} \approx \frac{I_C(\beta_2) - I_C(\beta_1)}{\beta_2 - \beta_1}$$

توجه کنید که در مورد S_β به دلیل اینکه β معمولاً دارای تغییرات وسیعی می باشد نمی توان از مشتق جزئی استفاده نمود. در واقع استفاده از مشتق جزئی با این فرض که تغییرات متغیرها کوچک است، صحیح می باشد؛ در غیر این صورت برای S_I و یا S_V نیز باید همانند β مستقیماً عمل نمود.

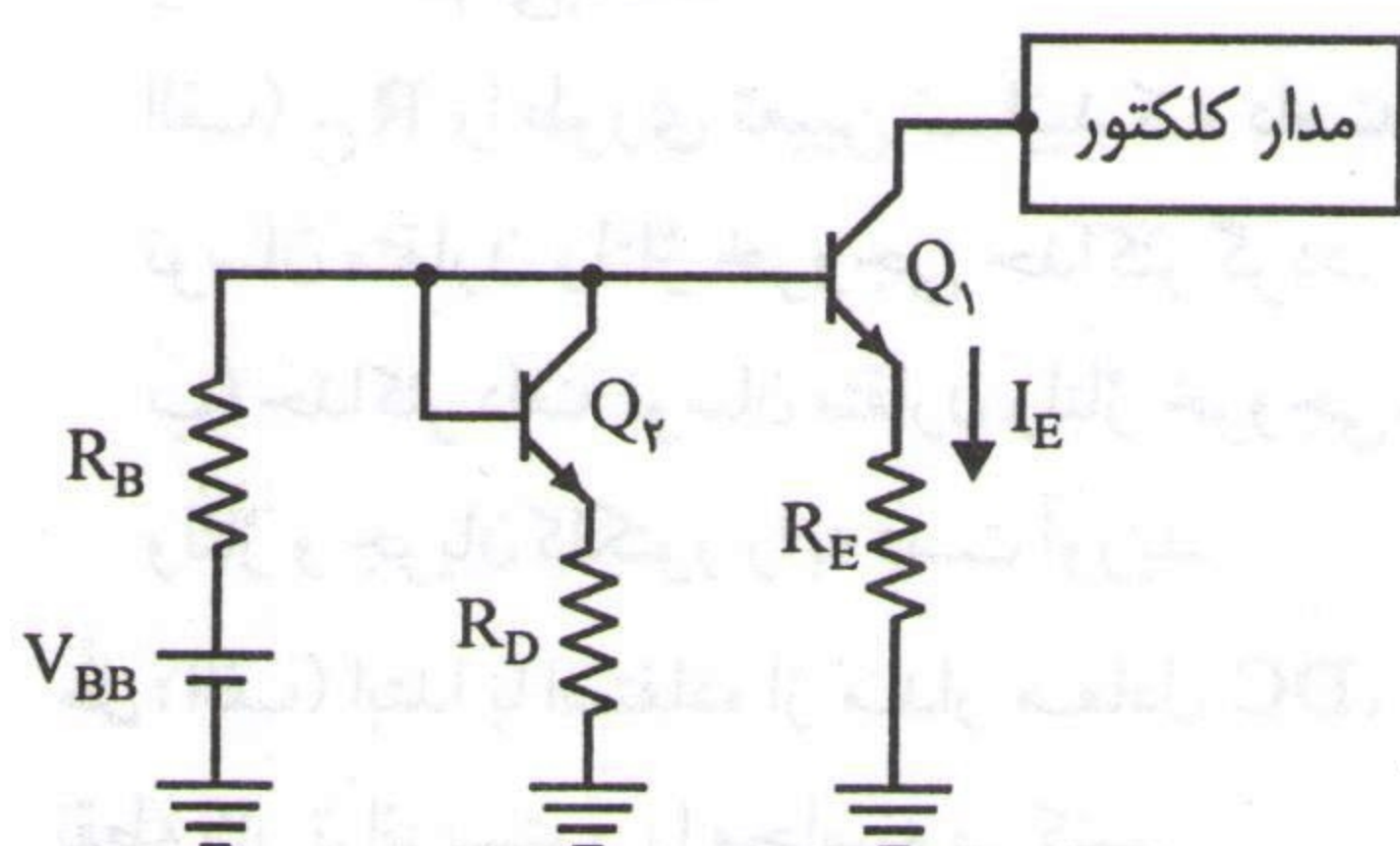
- به همین ترتیب می توان ضرایب پایداری دیگری مثل $S_{V_{CC}}$ و S_{R_E} را تعریف نمود.
- برای یک مدار خود بایاس و با شرط پایداری نقطه کار نسبت به β یعنی $R_{Th} \ll \beta_{min} R_E$ ، ضرایب پایداری عبارتند از

$$S_I \approx (1 + R_{Th}/R_E), \quad S_V \approx -1/R_E, \quad S_\beta = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \left(\frac{R_{Th} + R_E}{R_{Th} + (1 + \beta_2) R_E} \right)$$

در رابطه S_β منظور از I_{C1} مقدار I_C به ازای β_1 می باشد.

- در روشهای جبران تغییرات حرارتی، فنونی بررسی می شود که اثرات تغییرات حرارتی V_{BE} و I_{CBO} ترانزیستور را خنثی می نمایند.

- برای جبران تغییرات حرارتی V_{BE} ترانزیستور، از یک ترانزیستور مشابه به عنوان دیودی که دارای تغییرات حرارتی کاملاً مشابه با دیود بیس - امیتر است، استفاده می شود. این مطلب در مدار شکل ۴-۵



شکل ۴-۵

نمایش داده شده است. برای این مدار، با توجه به اینکه Q_2 همانند یک دیود با ولتاژ برابر V_{BE} عمل می کند، با قرار دادن مدار معادل تونن از دید بیس، جریان امیتر به صورت زیر به دست می آید:

$$I_E = \frac{1}{R_E} \left[\frac{R_D V_{BB} + R_B V_{BE}}{R_B + R_D} - V_{BE} \right]$$

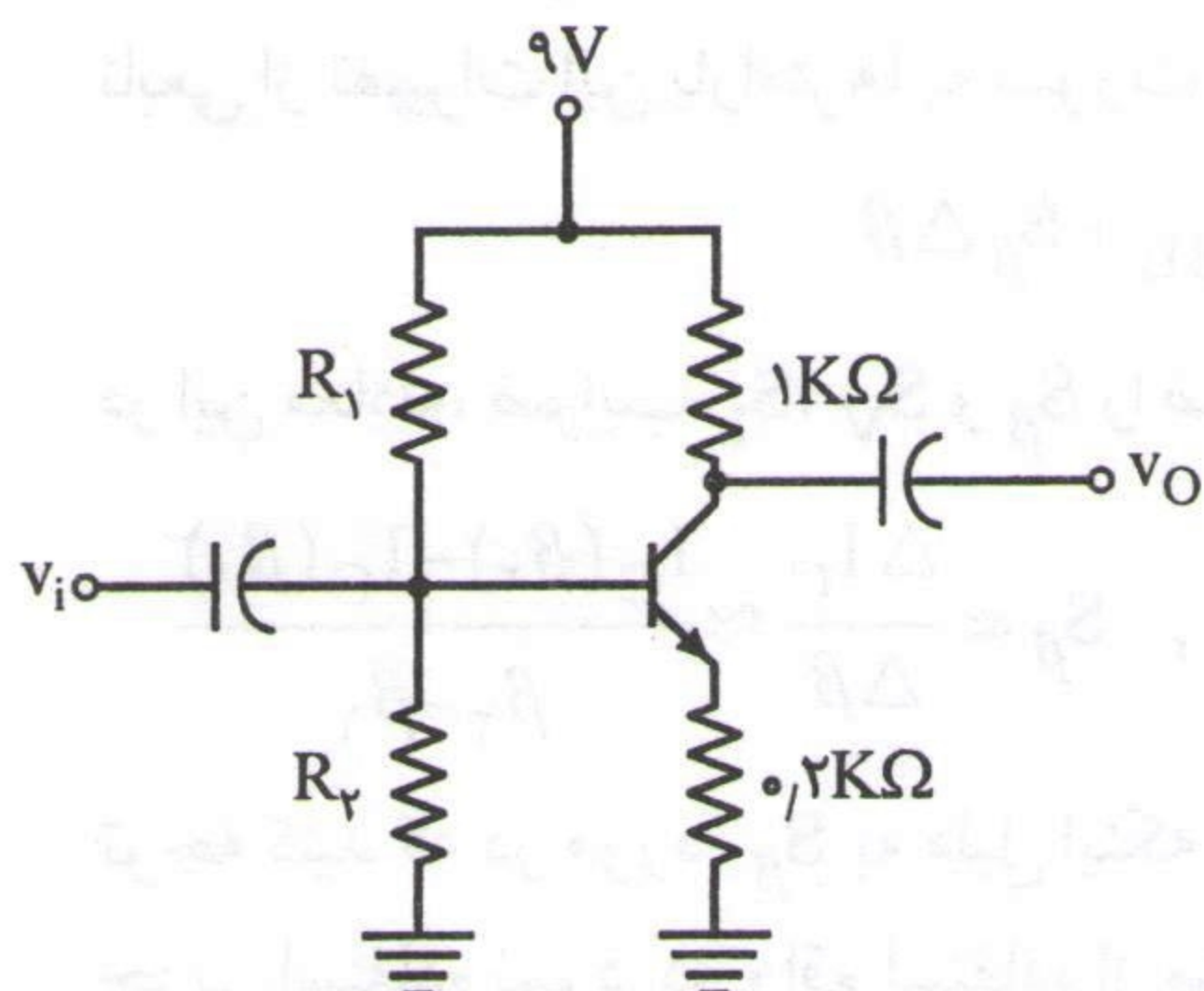
با مشتق گیری از طرفین رابطه فوق، نسبت به دما داریم

$$\frac{\partial I_E}{\partial T} = \left(\frac{-1}{R_E (1 + R_B/R_D)} \right) \frac{\partial V_{BE}}{\partial T}$$

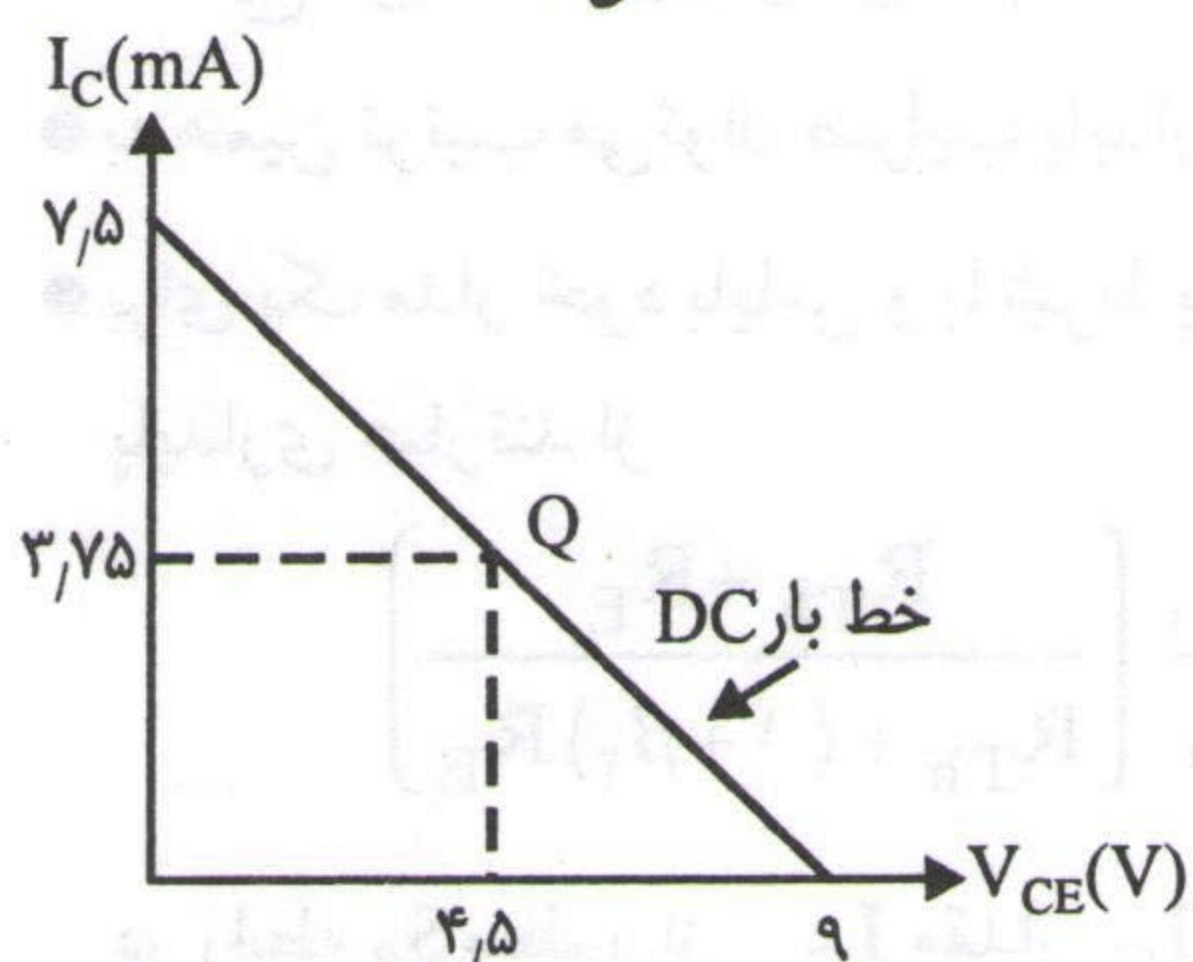
ملاحظه می شود وابستگی حرارتی I_C نسبت به حالت جبران نشده با ضریب $\frac{1}{1 + R_B/R_D}$ کاهش یافته است.

- از روشهای دیگر جبران تغییرات حرارتی V_{BE} ، استفاده از یک یا چند دیود سری به جای ترانزیستور Q_2 می باشد.

۴-۲ مسائل نمونه



شکل ۴-۶



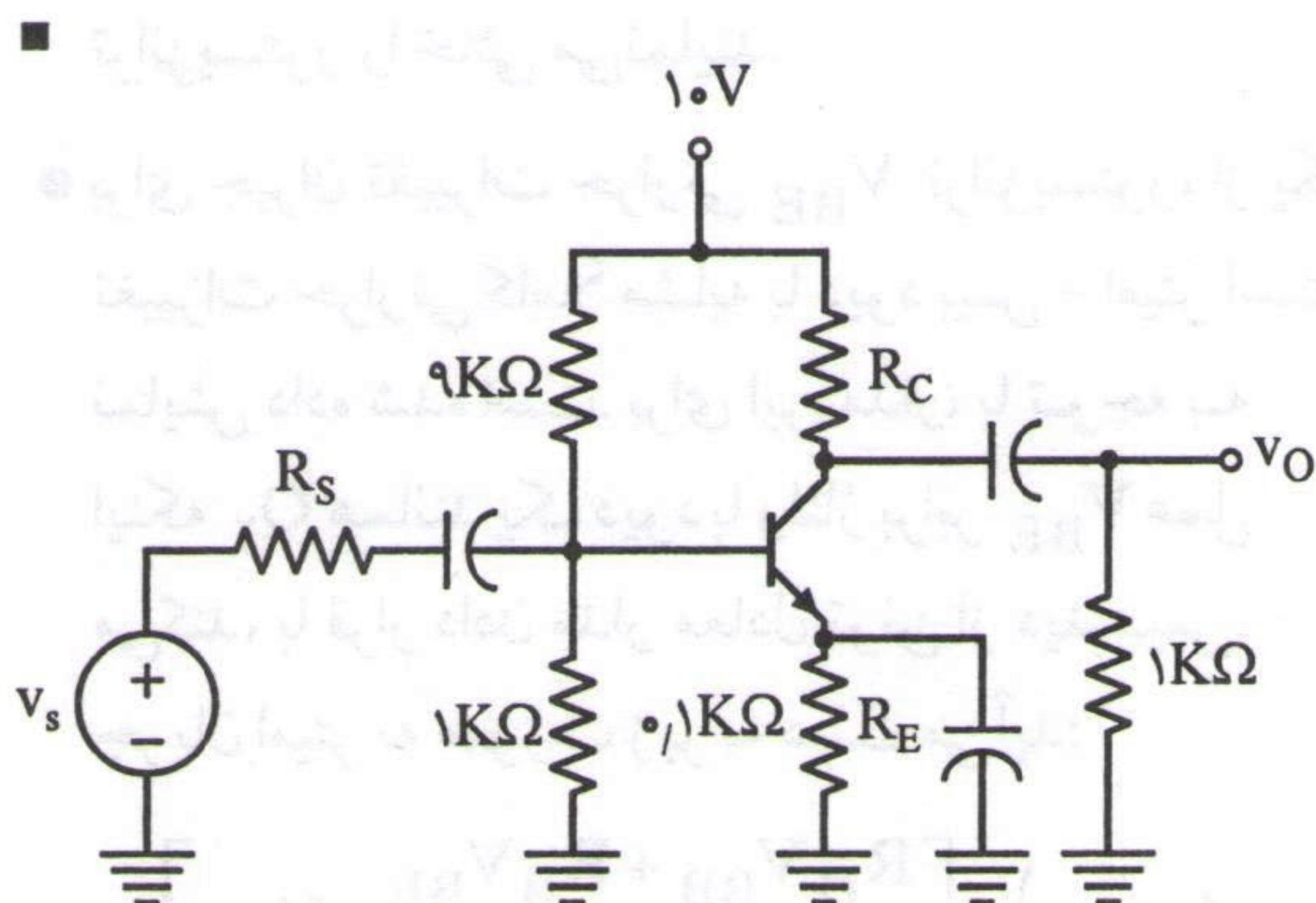
شکل ۴-۷

۱. در مدار شکل ۴-۶، نقطه کار ترانزیستور را برای حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور به دست آورید. β را بزرگ فرض کنید.

حل: از آنجا که β بزرگ است I_E و I_C تقریباً برابر خواهند بود. با نوشتن KVL در حلقه CE، معادله خط بار DC عبارت است از

$$9 = I_C + V_{CE} + 0.2 I_C \Rightarrow I_C = 7.5 - 0.83 V_{CE}$$

معادله مزبور در شکل ۴-۷ رسم شده است. برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن، باید نقطه کار در وسط خط بار ac (در این مدار خط بار DC و ac بر هم منطبق هستند) قرار گیرد. بنابراین نقطه کار $Q(3.75 \text{ mA}, 4.5 \text{ V})$ است که در نتیجه حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور برابر ۳.۷۵ میلی آمپر خواهد بود. توجه کنید که چنانچه جریان نقطه کار بیشتر یا کمتر از این مقدار در نظر گرفته شود، حداکثر دامنه نوسان متقارن کاهش خواهد یافت.



شکل ۴-۸

۲. در مدار شکل ۴-۸، ترانزیستور دارای $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{ V}$, $V_{BE}(\text{on}) = 0.7 \text{ V}$ و $\beta = 100$ می باشد.

الف) R_C را طوری تعیین نمایید که دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی حداکثر گردد.
ب) حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی، ولتاژ و جریان کلکتور را به دست آورید.

حل: الف) ابتدا با استفاده از مدار معادل DC، نقطه کار ترانزیستور را محاسبه می کنیم.

$$R_{Th} = 9 \parallel 9 = 4.5 \text{ K}\Omega, \quad V_{Th} = \frac{10}{9+9} \times 9 = 5 \text{ V}$$

$$\text{KVL BE: } V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E, \quad I_E = (1 + \beta) I_B$$

$$\Rightarrow I_B = 27.27 \mu\text{A}, \quad I_C = 2.73 \text{ mA}, \quad I_E = 2.75 \text{ mA}$$

$$R_{ac} = R_C \parallel 1, \quad R_{DC} = R_C + R_E = 0.1 + R_C$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} \Rightarrow 2.73 = \frac{10}{R_C / (R_C + 1) + 0.1 + R_C}$$

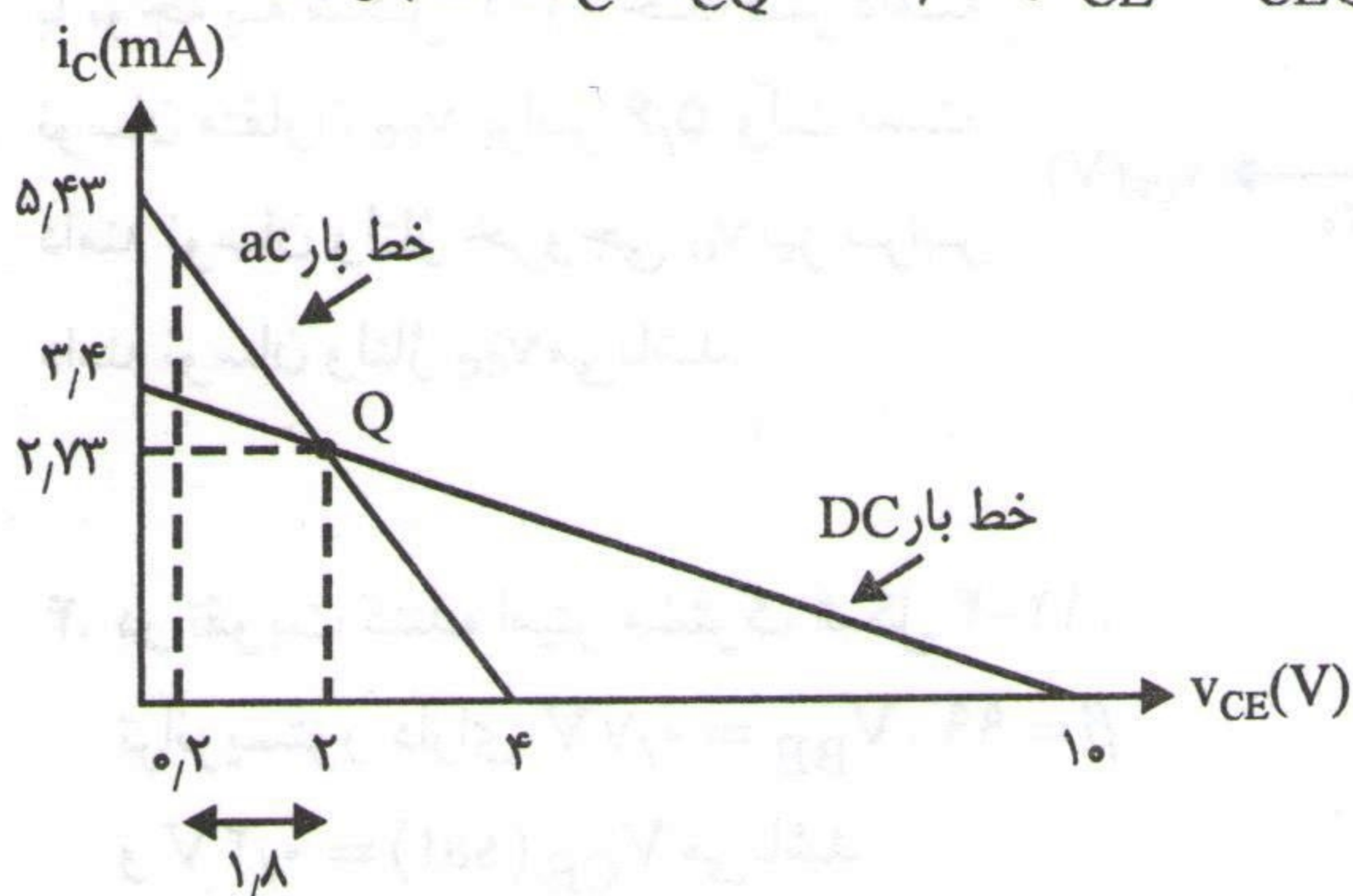
$$\Rightarrow R_C = 2.83 K\Omega, \quad R_{ac} = 0.74 K\Omega, \quad R_{DC} = 2.93 K\Omega$$

$$DC \text{ بار خط: } V_{CE} = V_{CC} - R_{DC} I_C = 10 - 2.93 I_C \Rightarrow Q(2.73 mA, 2V)$$

$$ac \text{ بار خط: } v_{ce} = -R_{ac} i_c \Rightarrow i_c = -1.35 v_{ce}$$

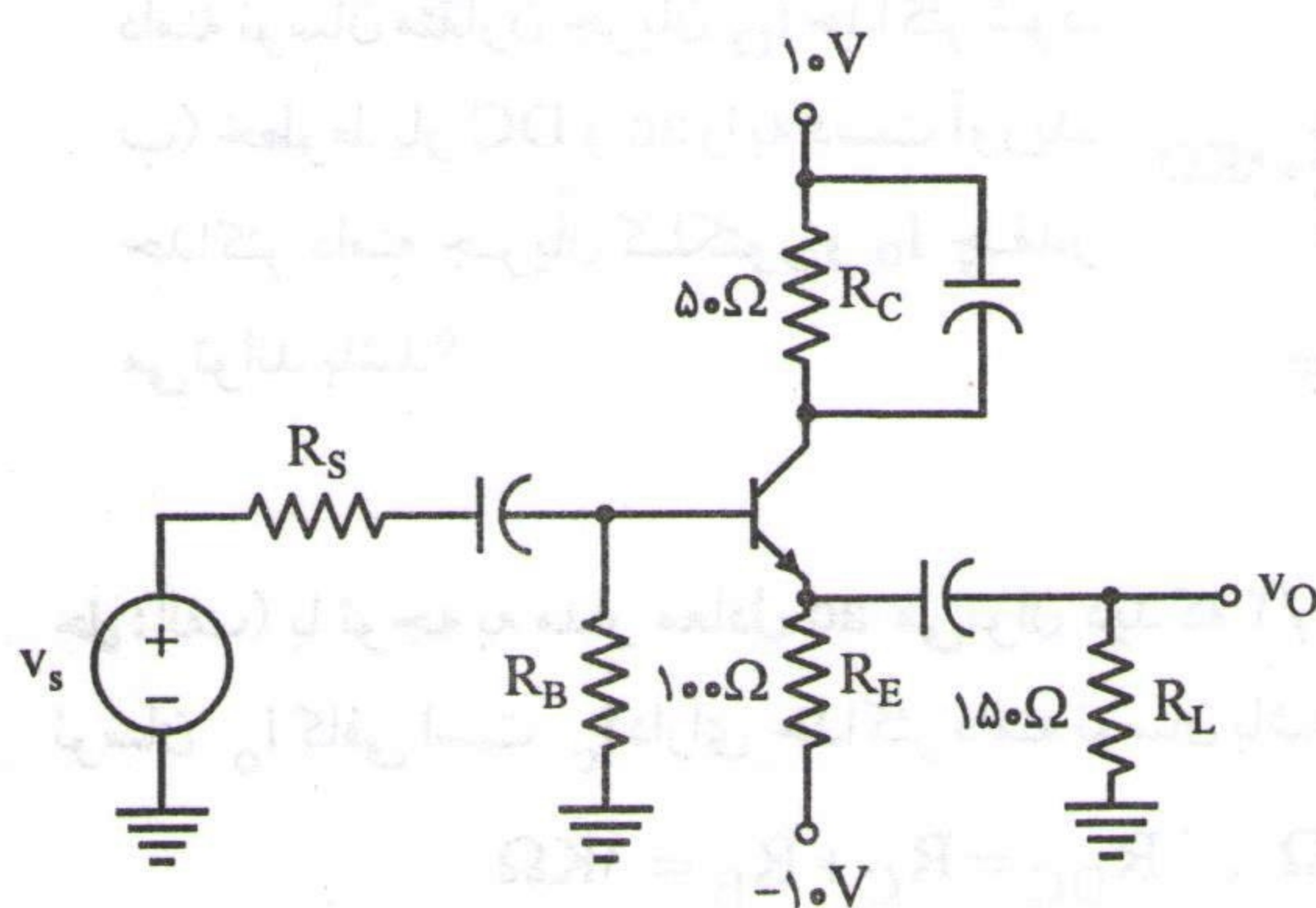
معادله کلی جریان کلکتور یا خط بار ac با انتقال مبدأ خط بار ac خالص از نقطه کار Q به مبدأ مختصات، برابر است با

$$ac \text{ بار خط: } i_C - I_{CQ} = -1.35 (v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_C = -1.35 v_{CE} + 5.43$$



شکل ۹-۴

این معادله در شکل ۹-۴ رسم شده که با توجه به آن حداکثر دامنه نوسان متقارن v_{ce} برابر 1.8 ولت است. با استفاده از خط بار ac خالص $(i_c = -1.35 v_{ce})$ ، حداکثر دامنه نوسان i_c برابر $2.43 mA$ خواهد بود. دامنه نوسان خروجی $(v_o = v_{ce})$ نیز برابر 1.8 ولت می باشد.



شکل ۱۰-۴

۳. در مدار شکل ۱۰-۴، با فرض β بزرگ، $V_{CE(sat)} = 0.2V$ ، $R_B \ll \beta R_E$ ، $V_{BE(on)} = 0.7$ نقطه کار را به دست آورید. خطوط بار DC و ac را رسم کرده، حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی را محاسبه کنید.

حل: با توجه به اینکه β بزرگ است از جریان بیس می توان صرف نظر کرد.

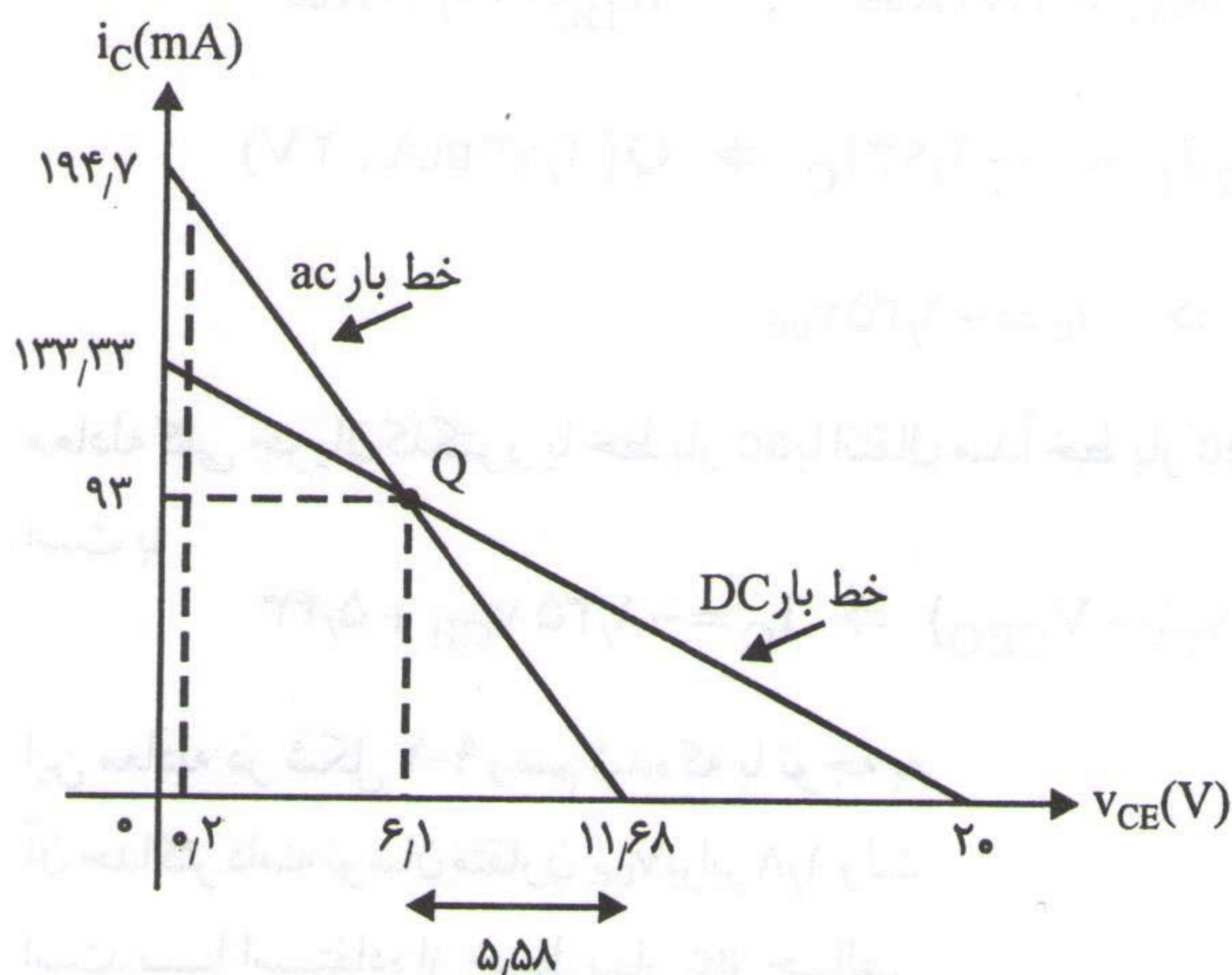
$$KVL_{BE}: R_B I_B + V_{BE(on)} + R_E I_E - 10 = 0 \Rightarrow I_{EQ} \approx I_{CQ} = 93 mA$$

$$KVL_{CE}: V_{CEQ} = 10 + 10 - (R_C + R_E) \times I_E = 6.1V \Rightarrow Q(93 mA, 6.1V)$$

$$R_{ac} = R_E \parallel R_L = 60 \Omega, \quad R_{DC} = R_C + R_E = 150 \Omega$$

$$\text{DC بار خط: } V_{CE} = V_{CC} - V_{BE} - R_{DC} I_C \Rightarrow I_C = 133.33 - 6.67 V_{CE}$$

$$\text{خط بار ac خالص: } v_{ce} = -R_{ac} i_c \Rightarrow i_c = -16.67 v_{ce}$$



شکل ۴-۱۱

برای به دست آوردن حداکثر دامنه نوسان متقارن، خط بار ac (معادله کلی جریان کلکتور) را به دست آورده و رسم می‌کنیم.

$$i_C - I_{CQ} = -16.67 (v_{CE} - V_{CEQ})$$

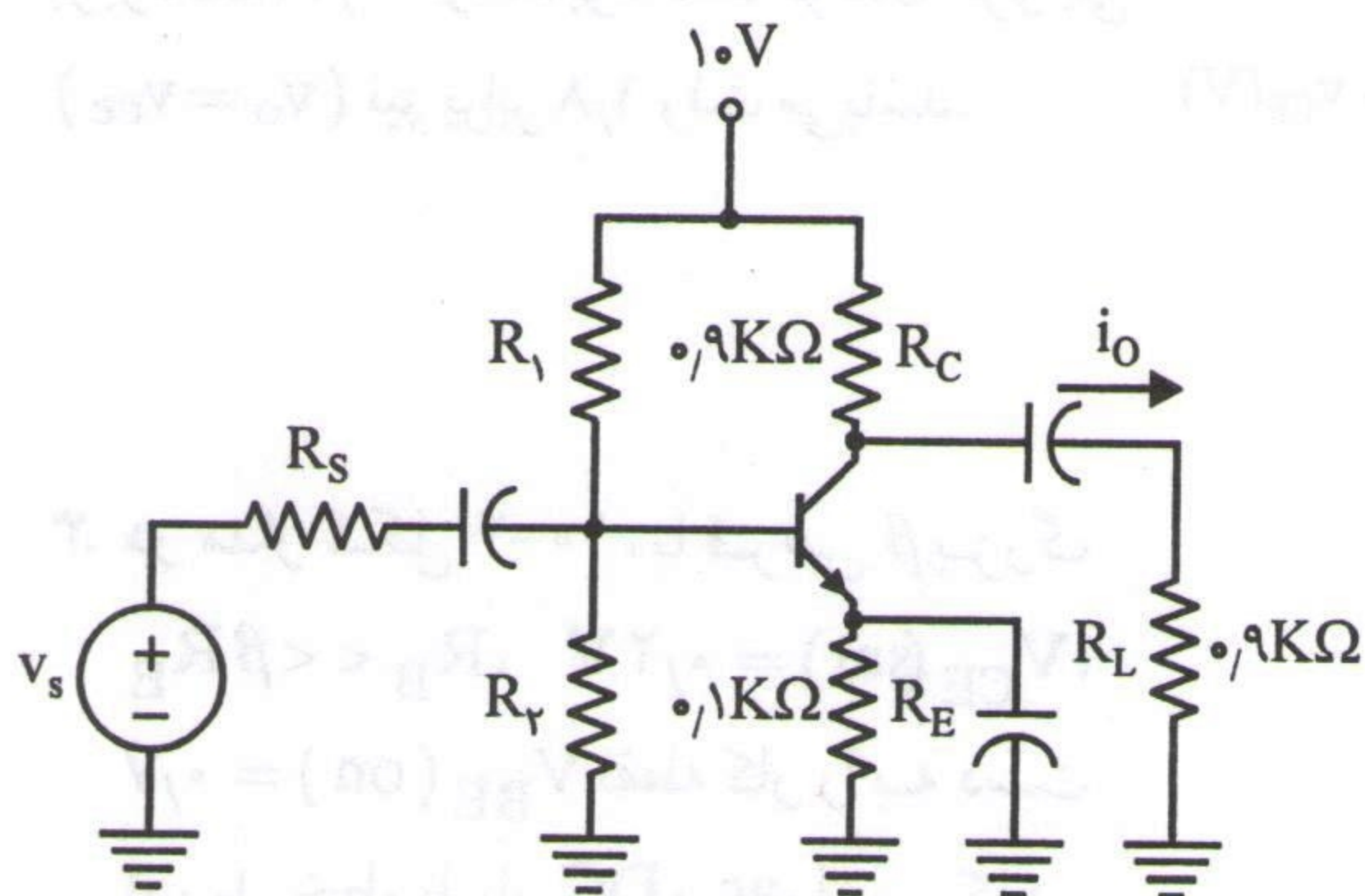
$$\Rightarrow i_C = -16.67 v_{CE} + 194.7$$

با توجه به شکل ۴-۱۱ حداکثر دامنه نوسان متقارن v_{ce} برابر ۵.۶ ولت است. دامنه نوسان ولتاژ خروجی v_o نیز برابر دامنه نوسان ولتاژ v_{ce} می‌باشد.

۴. در تقویت کننده امیتر مشترک شکل ۴-۱۲،

ترانزیستور دارای $\beta = 99$ ، $V_{BE} = 0.7V$ و $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2V$ می‌باشد.

الف) R_1 و R_2 را طوری محاسبه کنید که دامنه نوسان متقارن جریان i_o حداکثر شود. ب) خطوط بار DC و ac را به دست آورید. حداکثر دامنه جریان کلکتور و i_o چقدر می‌تواند باشد؟



شکل ۴-۱۲

حل: الف) با توجه به مدار معادل ac می‌توان دید که $i_o = i_c / 2$ است. بنابراین برای داشتن حداکثر دامنه نوسان i_o کافی است i_c دارای حداکثر دامنه نوسان باشد.

$$R_{ac} = R_C \parallel R_L = 0.45 K\Omega, \quad R_{DC} = R_C + R_E = 1 K\Omega$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = 6.9 \text{ mA}, \quad V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} R_{ac} = 3.1 V$$

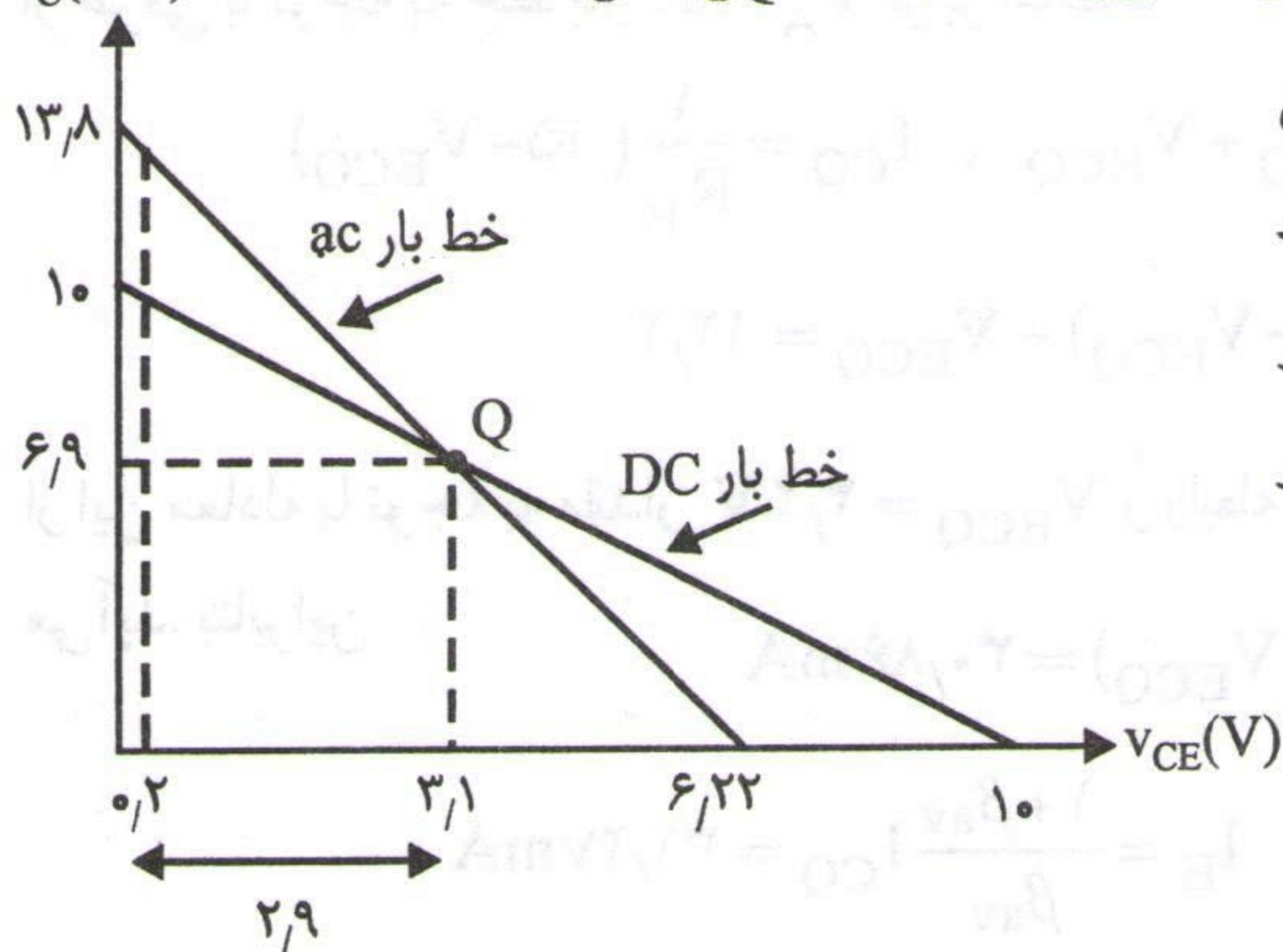
$$R_{Th} \approx \frac{1}{10} \beta R_E = 0.99 K\Omega, \quad V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E = 1.46 V$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 6,78 K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 1,16 K\Omega$$

ب) $V_{CE} = V_{CC} - R_{DC} I_C \Rightarrow I_C = 10 - V_{CE}$ خط بار DC

خط بار ac خالص: $v_{ce} = -R_{ac} i_c \Rightarrow i_c = -2,22 v_{ce}$

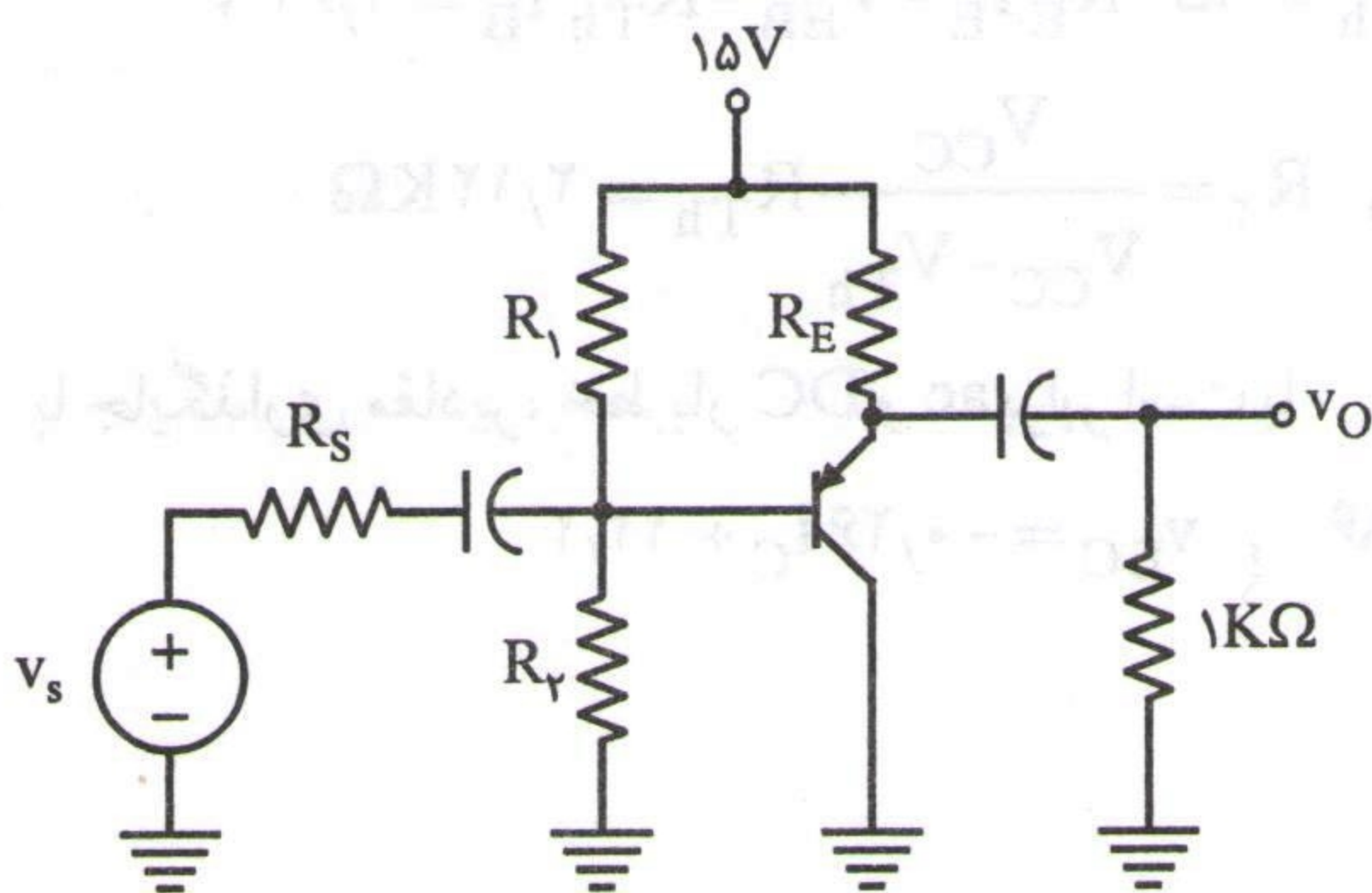
خط بار ac: $i_C - I_{CQ} = -2,22 (v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_C = -2,22 v_{CE} + 13,8$



با توجه به شکل ۴-۱۳ حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ v_{ce} برابر $2,9 V$ است و با توجه به معادله خط بار ac خالص، حداکثر دامنه نوسان جریان کلکتور برابر $6,4$ میلی آمپر می باشد. به این ترتیب حداکثر دامنه نوسان i_o برابر است با

$$i_{o,max} = \frac{1}{2} i_{c,max} = 3,2 mA$$

شکل ۴-۱۳



شکل ۴-۱۴

۵. در مدار شکل ۴-۱۴، با فرض

$$V_{EB(on)} = 0,7V, V_{EC(sat)} = 0,2V$$

$50 \leq \beta \leq 100$ ، مطلوب است:

الف) تعیین خطوط بار DC و ac.

ب) تعیین مقادیر R_1 ، R_2 و R_E به گونه ای که نقطه کار نسبت به تغییرات β پایدار بوده و ولتاژ خروجی بتواند تا ۸ ولت در سیکل مثبت و تا ۴ ولت در سیکل منفی، نوسان بدون اعوجاج داشته باشد.

حل: الف) با نوشتن KVL در مدار EC، خط بار DC برابر است با

$$I_C = \frac{1}{R_E} (15 - V_{EC}), \quad R_{DC} = R_E$$

خط بار ac خالص نیز از مدار معادل ac برابر است با

$$v_{ec} = -R_{ac} i_c, \quad R_{ac} = 1 \parallel R_E$$

پس خط بار ac عبارت است از

$$v_{EC} - V_{ECQ} = -R_{ac} (i_C - I_{CQ})$$

ب) خطوط بار DC و ac در شکل ۴-۱۵ نمایش داده شده‌اند. از آنجا که دامنه نوسان v_o و v_{ec} برابر است، با توجه به شکل، برای اینکه دامنه نوسان v_o در نیم سیکل منفی برابر ۴ ولت باشد، باید ولتاژ نقطه کار V_{ECQ} حداقل برابر $V_{EC(sat)} + 4$ باشد. بنابراین $V_{ECQ} = 4/2V$ خواهد بود. از طرفی برای اینکه در نیم سیکل مثبت خروجی دامنه نوسان برابر ۸ ولت باشد باید داشته باشیم

$$V_A - V_{ECQ} = 8V \Rightarrow V_A = 12/2V$$

از طرفی با توجه به خط بار ac، V_A برابر است با

$$i_C = 0 \Rightarrow V_A = v_{EC} = R_{ac} I_{CQ} + V_{ECQ}, \quad I_{CQ} = \frac{1}{R_E} (15 - V_{ECQ})$$

$$\Rightarrow V_A = \frac{R_{ac}}{R_E} (15 - V_{ECQ}) + V_{ECQ} = 12/2$$

از این معادله با توجه به مقدار $V_{ECQ} = 4/2V$ و رابطه R_{ac} با R_E ، مقدار R_E برابر $0/35K\Omega$ به دست می‌آید. بنابراین

$$I_{CQ} = \frac{1}{R_E} (15 - V_{ECQ}) = 30/86mA$$

$$I_B = \frac{1}{\beta_{av}} I_{CQ} = 0/41mA, \quad I_E = \frac{1 + \beta_{av}}{\beta_{av}} I_{CQ} = 31/27mA$$

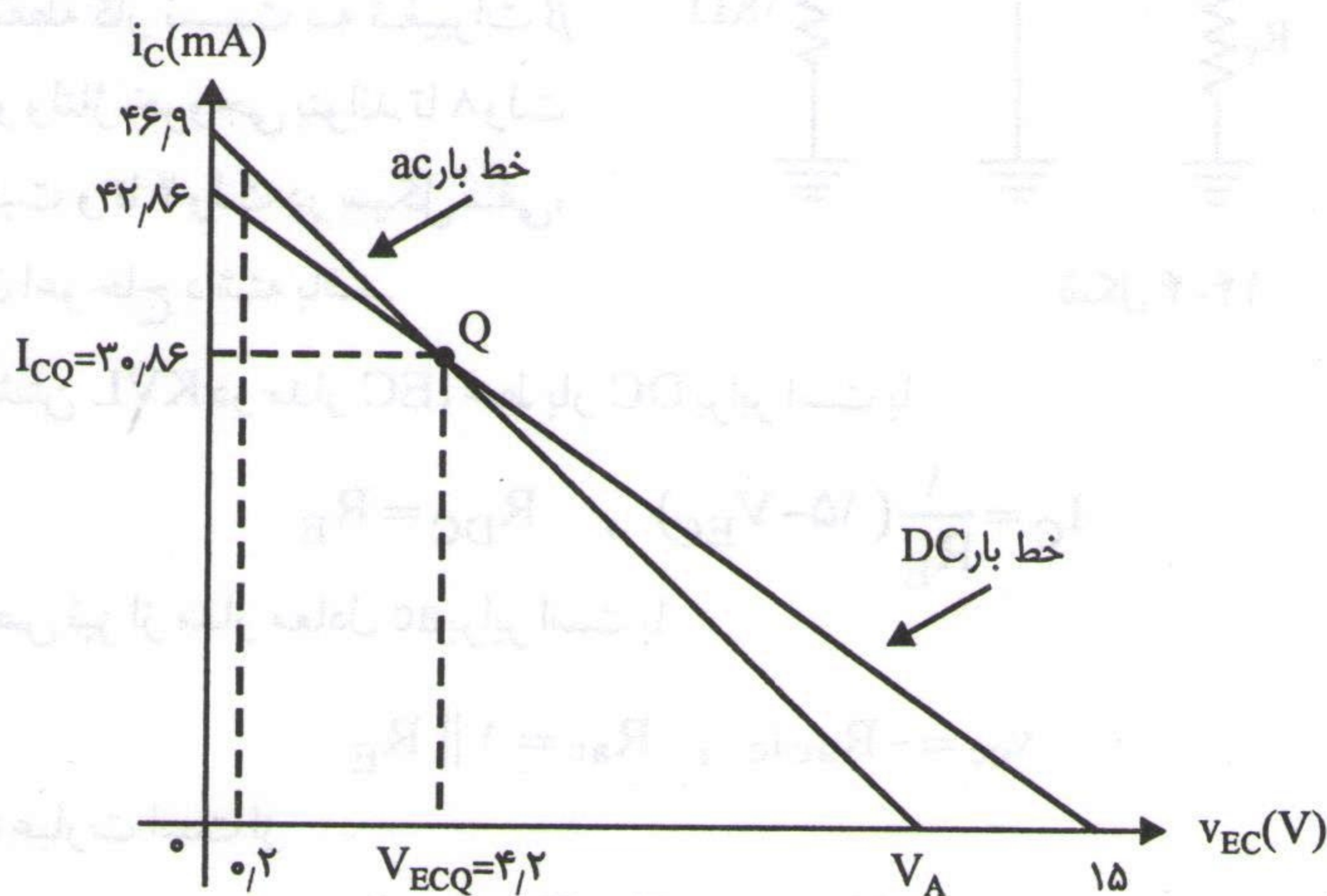
برای پایداری نقطه کار ترانزیستور نسبت به تغییرات β باید داشته باشیم

$$R_{Th} = \frac{1}{\beta_{min}} R_E = 1/75K\Omega, \quad V_{Th} = 15 - R_E I_E - V_{EB} - R_{Th} I_B = 2/64V$$

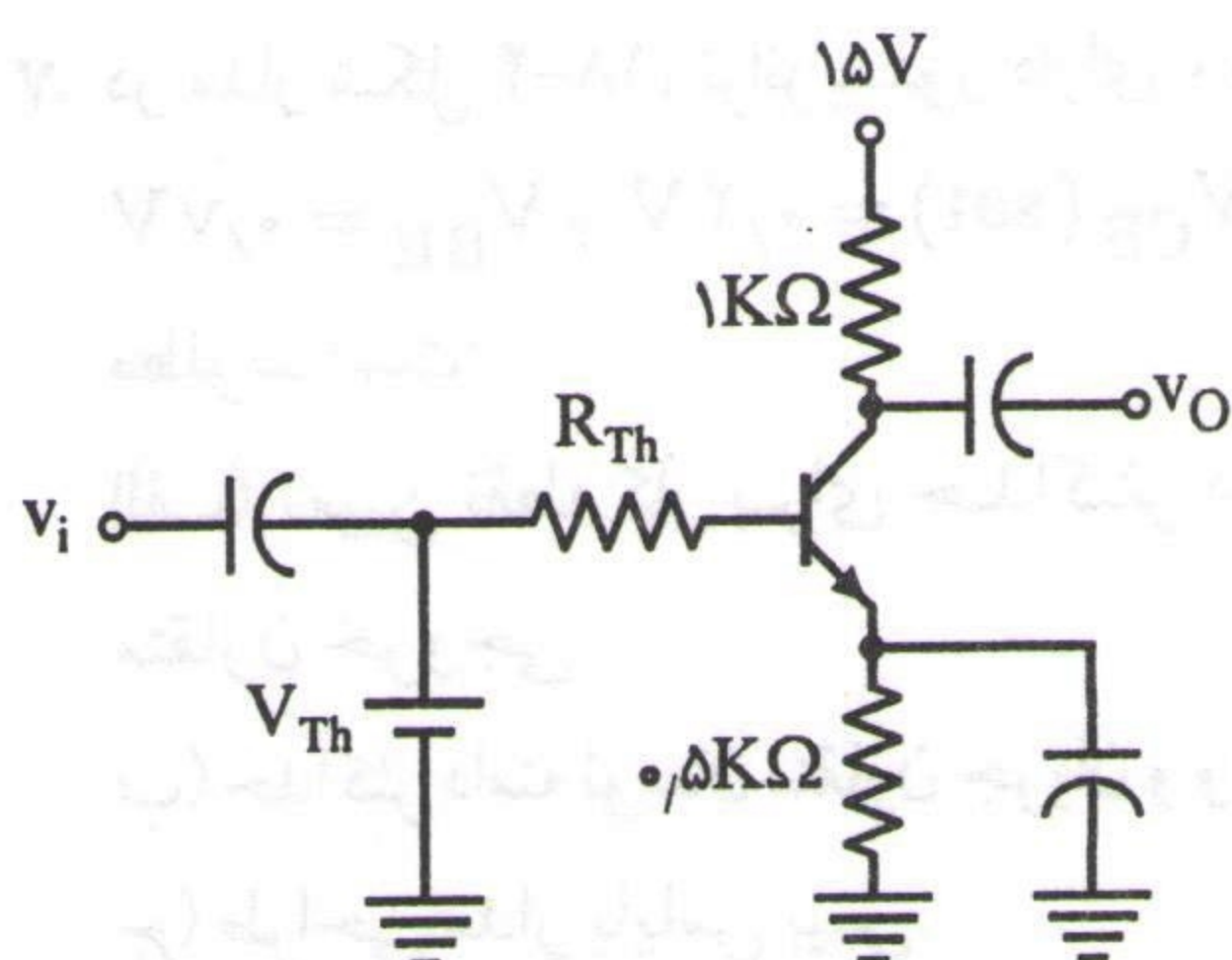
$$\Rightarrow R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 9/94K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 2/12K\Omega$$

با جایگذاری مقادیر، خط بار DC و ac برابر است با

$$I_{CQ} = -2/86V_{ECQ} + 42/86, \quad v_{EC} = -0/26i_C + 12/2$$



شکل ۴-۱۵



شکل ۴-۱۶

۶. الف) در مدار شکل ۴-۱۶، نقطه کار ترانزیستور و حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور را بیابید.

ب) مدار بایاس بیس را طراحی کنید. حداقل β را برابر ۱۰۰ فرض کنید.

حل: الف) داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن باید نقطه کار وسط خط بار ac قرار گیرد، که شرایط آن به صورت زیر است:

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}}, \quad V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} R_{ac}$$

$$R_{ac} = 1K\Omega, \quad R_{DC} = 1 + 0.5 = 1.5K\Omega$$

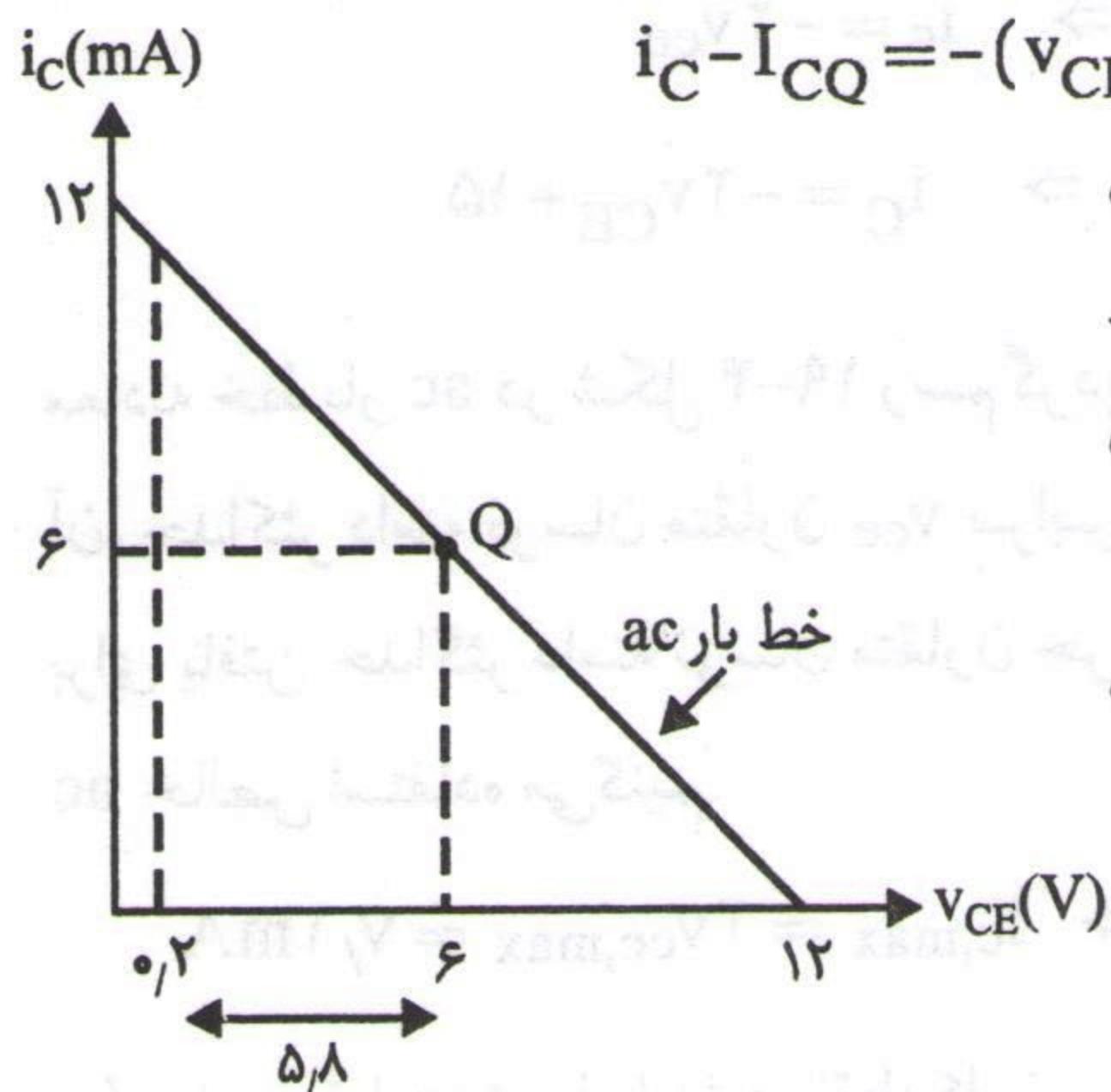
$$\Rightarrow Q(6mA, 6V)$$

خط بار ac خالص برابر است با

$$v_{ce} = -R_{ac} i_c \Rightarrow i_c = -v_{ce}$$

بنابراین معادله کلی جریان کلکتور (خط بار ac) برابر است با

$$i_c - I_{CQ} = -(v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_c = -v_{CE} + 12$$



شکل ۴-۱۷

این معادله در شکل ۴-۱۷ رسم شده است. حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ کلکتور برابر ۵.۸V است که با توجه به معادله خط بار ac خالص ($i_c = -v_{ce}$) حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور برابر ۵.۸mA می باشد.

ب) برای پایداری نسبتاً خوب نقطه کار نسبت به تغییرات β ، مقدار R_{Th} را به صورت زیر انتخاب می کنیم:

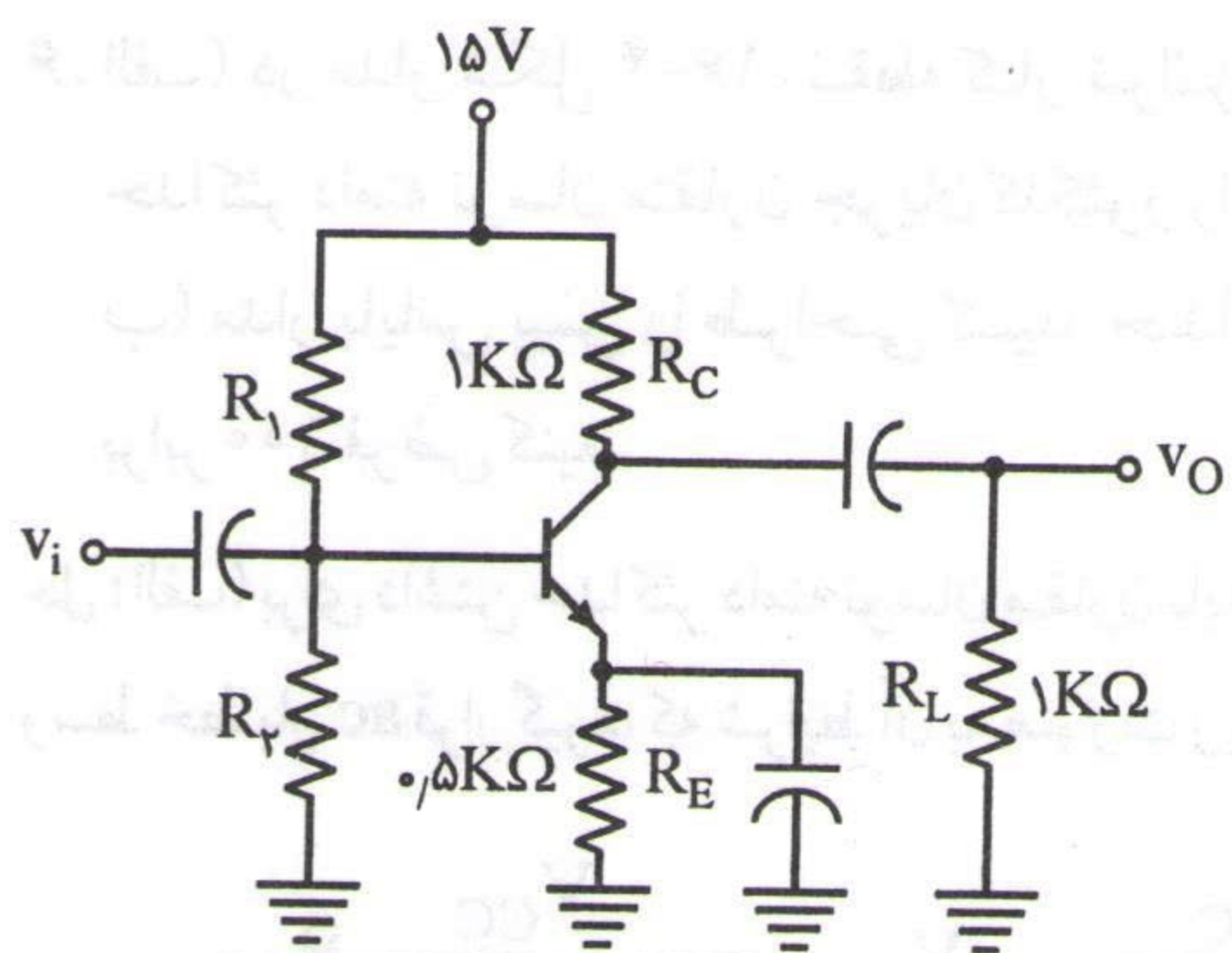
$$R_{Th} \ll \beta R_E \Rightarrow R_{Th} \approx \frac{1}{10} \beta_{min} R_E = 5K\Omega$$

$$V_{Th} = R_E I_{CQ} + V_{BE} + R_{Th} I_B = 4V$$

و برای مدار مقسم ولتاژ، R_1 و R_2 برابرند با

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 18.8K\Omega$$

$$R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 6.8K\Omega$$



شکل ۴-۱۸

۷. در مدار شکل ۴-۱۸، ترانزیستور دارای $\beta_{min} = 100$ ، $V_{BE} = 0.7V$ و $V_{CE(sat)} = 0.2V$ می‌باشد.

مطلوب است:

الف) تعیین نقطه کار برای حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی.

ب) حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان و ولتاژ کلکتور.

ج) طراحی مدار بایاس بیس.

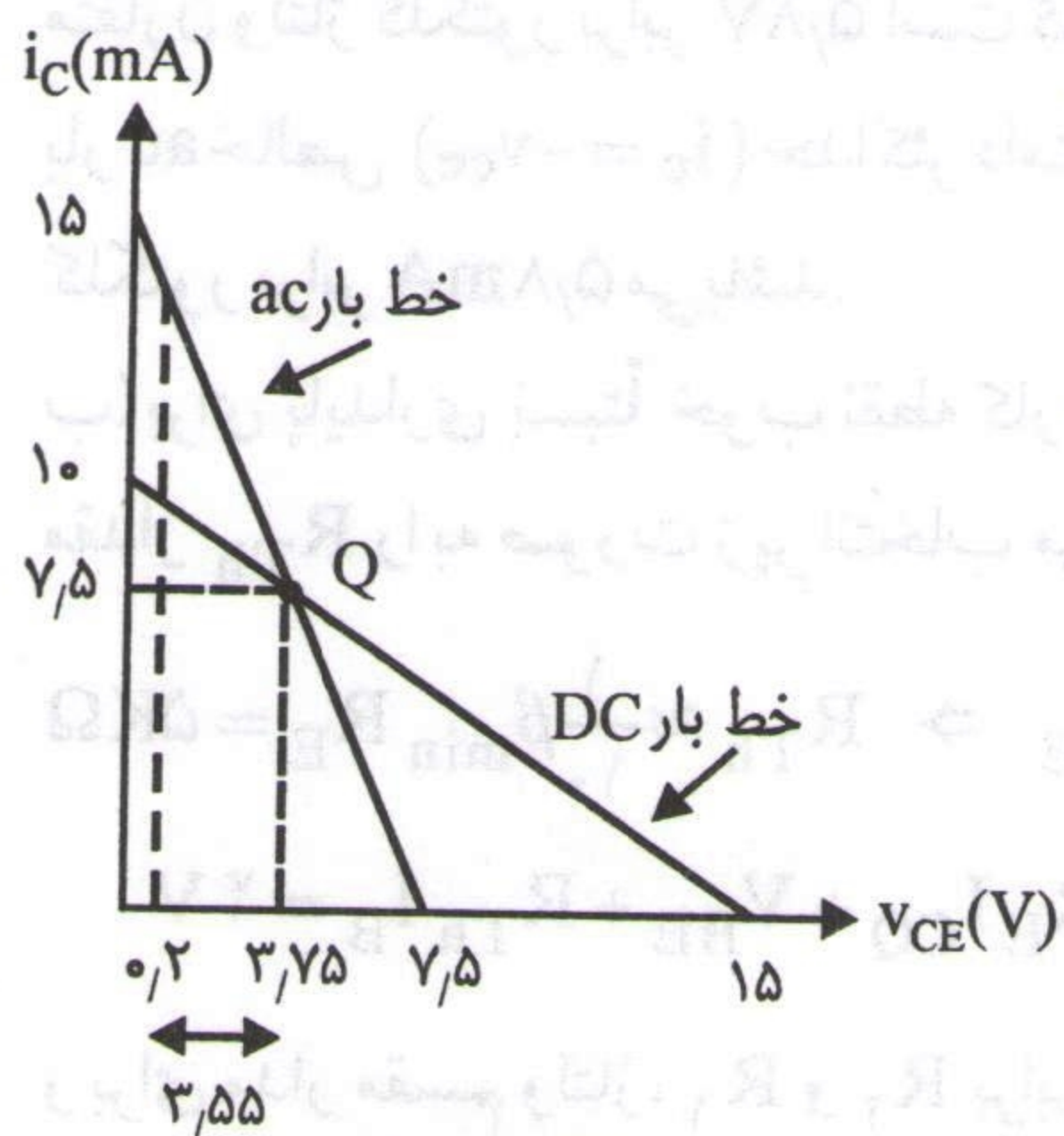
حل: الف) $R_{ac} = R_C \parallel R_L = 0.5K\Omega$, $R_{DC} = R_C + R_E = 1.5K\Omega$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = 7.5mA , V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} R_{ac} = 3.75V$$

ب) DC بار خط: $V_{CE} = V_{CC} - R_{DC} I_C \Rightarrow I_C = 10 - \frac{2}{3} V_{CE}$

ac بار خط: $v_{ce} = -R_{ac} i_c \Rightarrow i_c = -2v_{ce}$

ac بار خط: $i_C - I_{CQ} = -2(v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_C = -2v_{CE} + 15$



شکل ۴-۱۹

معادله خط بار ac در شکل ۴-۱۹ رسم گردیده است که با توجه به آن، حداکثر دامنه نوسان متقارن v_{ce} برابر ۳.۷۵ ولت می‌باشد. برای یافتن حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور از خط بار ac خالص استفاده می‌کنیم.

$$i_c = -2v_{ce} \Rightarrow i_{c,max} = 2v_{ce,max} = 7.5mA$$

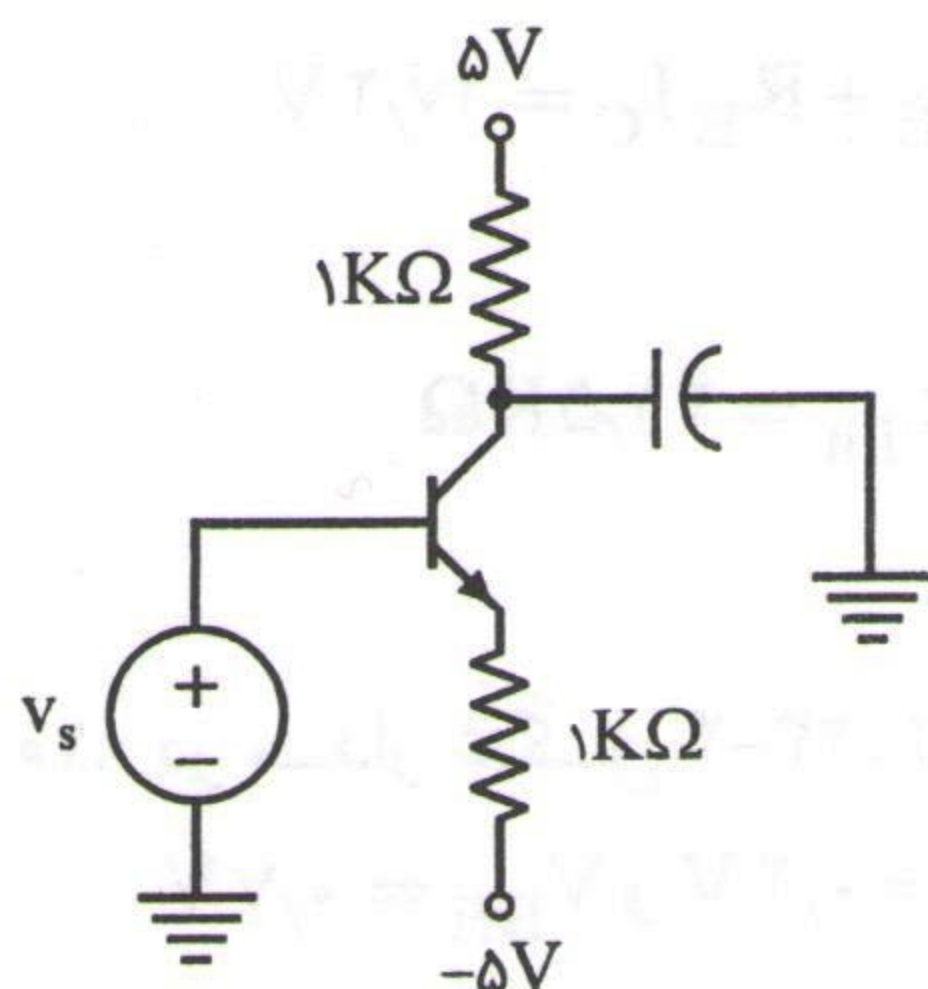
ج) برای برقراری شرط پایداری نقطه کار نسبت به تغییرات β داریم

$$R_{Th} = \frac{1}{10} \beta_{min} R_E = 5K\Omega$$

$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_C = 4.8V$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 15.6K\Omega$$

$$R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 7.4K\Omega$$



شکل ۲۰-۴

۸. در مدار شکل ۲۰-۴، ترانزیستور دارای $V_{BE} = 0.7V$ ، $\beta = 100$ و $V_{CE(sat)} = 0.2V$ می باشد و سطح DC منبع سیگنال صفر است. حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور را محاسبه کنید.

حل: با نوشتن KVL در مدار CE، خط بار DC برابر است با

$$I_C = 5 - \frac{1}{2} V_{CE} \quad , \quad R_{DC} = 2K\Omega$$

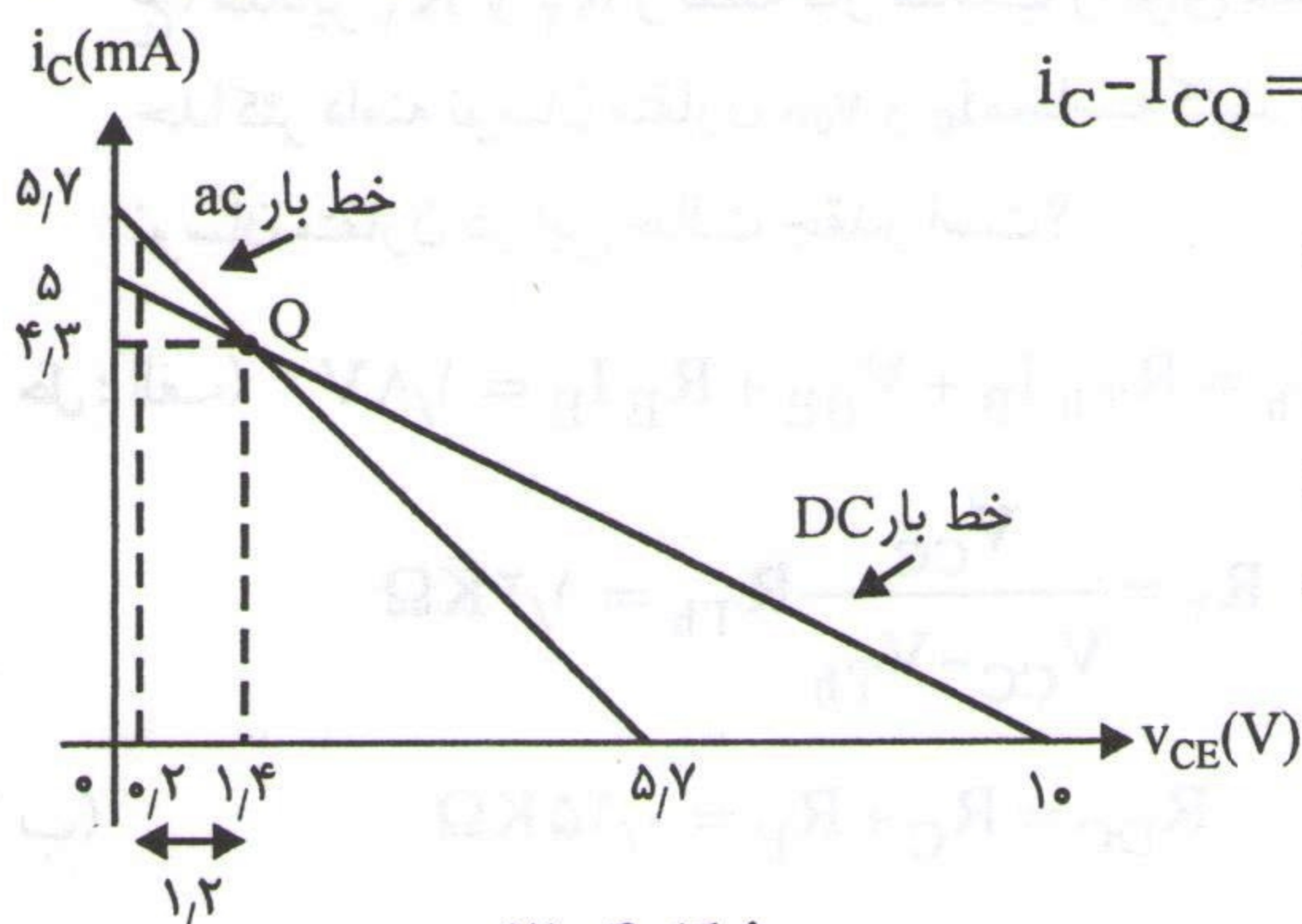
با توجه به مدار معادل ac، خط بار ac خالص برابر است با

$$i_c = -v_{ce} \quad , \quad R_{ac} = 1K\Omega$$

با استفاده از مدار DC و نوشتن KVL در مدار بیس امیتر داریم

$$I_{CQ} \approx I_E = \frac{5 - 0.7 - (-5)}{1} = 4.3mA \quad , \quad V_{CEQ} = 5 - 2 \times 4.3 = 1.4V$$

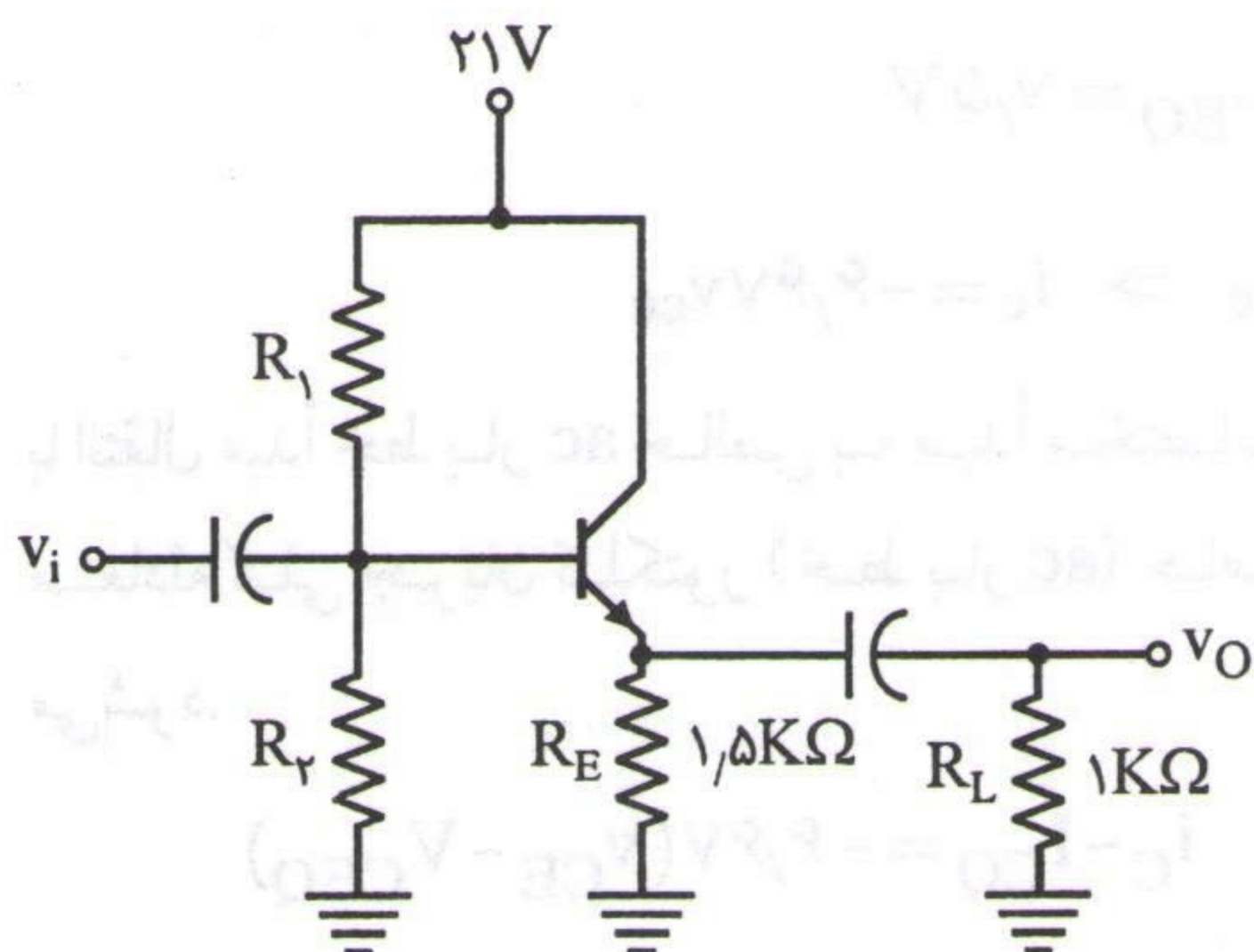
با انتقال مبدا خط بار ac خالص از نقطه Q به مبدا مختصات، معادله کلی جریان کلکتور (خط بار ac) برابر است با



شکل ۲۱-۴

$$i_C - I_{CQ} = -(v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_C = -v_{CE} + 5.7$$

با توجه به خط بار ac که در شکل ۲۱-۴ رسم شده است، حداکثر دامنه نوسان متقارن v_{ce} برابر 1.2 ولت می باشد که در نتیجه از خط بار ac خالص، حداکثر دامنه نوسان جریان کلکتور $1.2mA$ به دست می آید.



شکل ۲۲-۴

۹. در مدار شکل ۲۲-۴، نقطه کار و مقادیر مقاومت های R_1 و R_2 را برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور به دست آورید. $\beta_{min} = 50$ و $V_{BE} = 0.7V$ است.

حل: با انتخاب نقطه کار ترانزیستور در وسط خط بار ac، حداکثر دامنه نوسان متقارن حاصل می شود. از این رو داریم

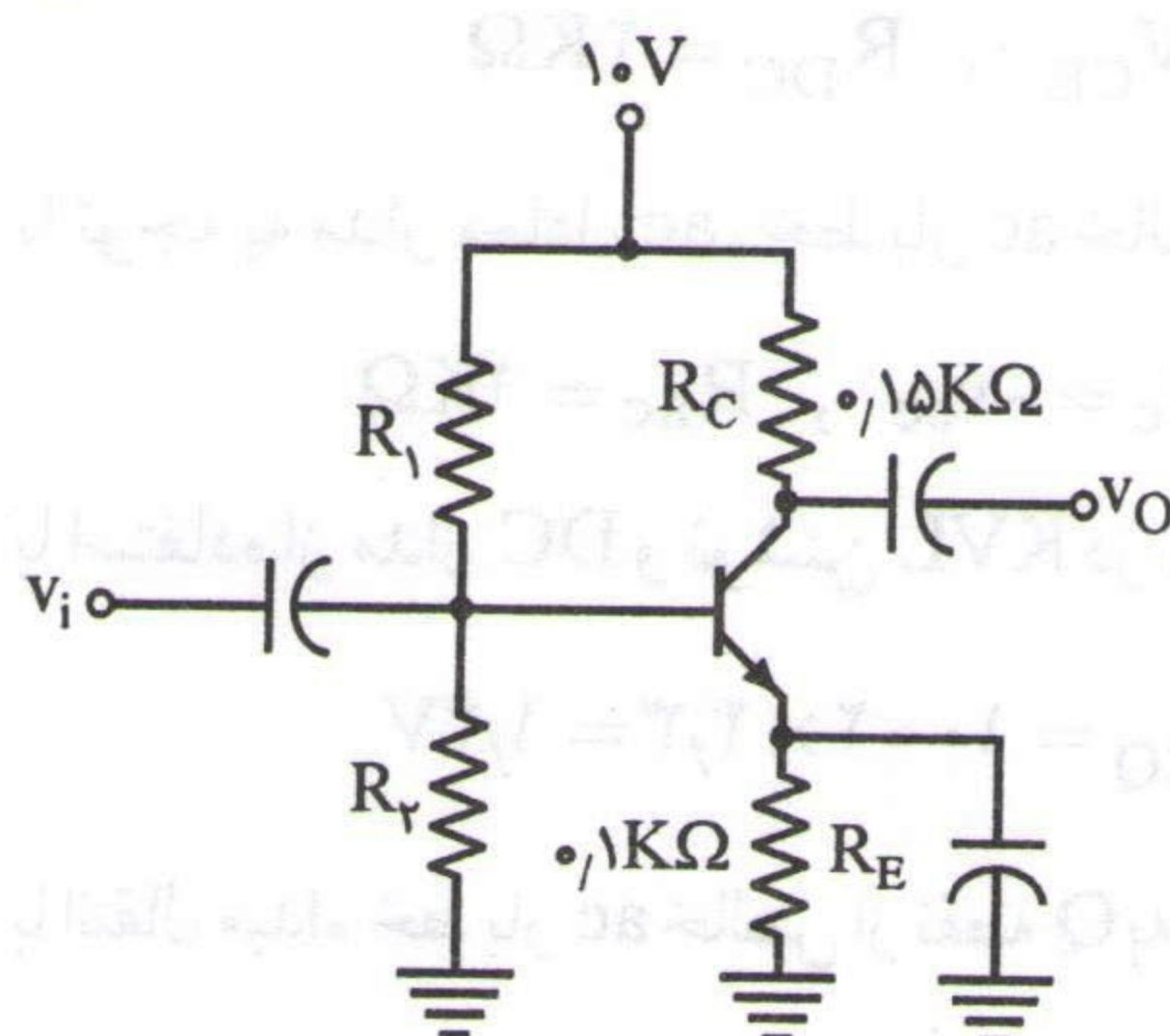
$$R_{ac} = R_E \parallel R_L = 0.6K\Omega$$

$$R_{DC} = R_E = 1.5K\Omega$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = 1.0mA \quad , \quad V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} R_{ac} = 6V$$

$$R_{Th} = \frac{1}{\beta_{min}} R_E = 7.5 K\Omega, \quad V_{Th} = R_{Th} \frac{I_C}{\beta} + V_{BE} + R_E I_C = 17.2 V$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 9.16 K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 41.5 K\Omega$$



شکل ۴-۲۳

۱۰. در مدار شکل ۴-۲۳، ترانزیستور دارای $\beta = 100$ ، $V_{BE} = 0.7V$ و $V_{CE(sat)} = 0.2V$ می باشد.

(الف) مقادیر R_1 و R_2 را با فرض $R_{Th} \ll \beta R_E$ برای جریان $I_C = 10mA$ به دست آورید.

(ب) برای بند (الف) حداکثر دامنه نوسان متقارن v_{ce} و i_c را به دست آورید.

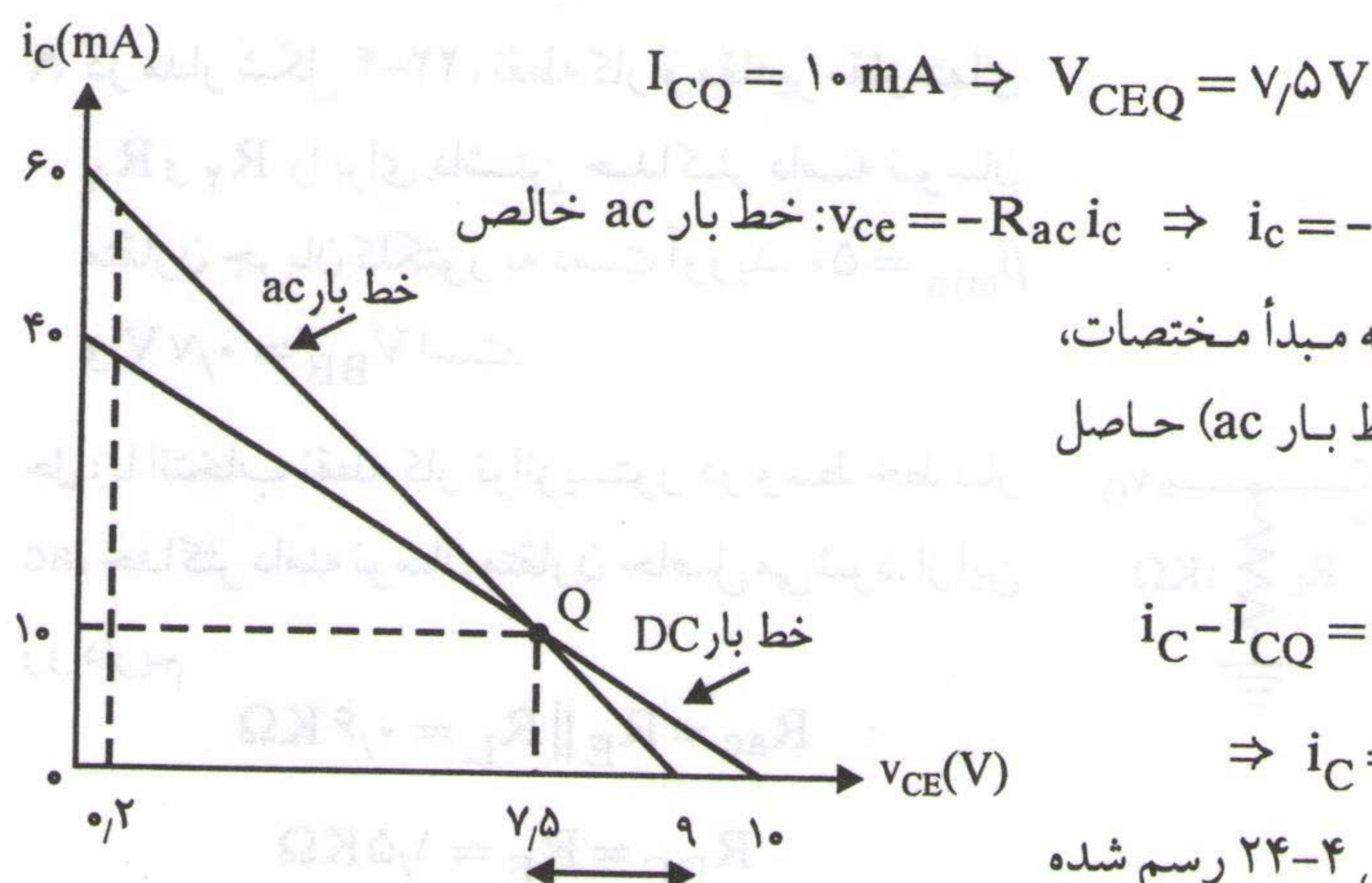
(ج) مقادیر R_1 و R_2 و نقطه کار مناسب را برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن v_{ce} و i_c محاسبه کنید. دامنه نوسان متقارن در این حالت چقدر است؟

حل: (الف) $R_{Th} = \frac{1}{\beta} R_E = 1 K\Omega, \quad V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E = 1.8 V$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 5.6 K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 1.2 K\Omega$$

(ب) $R_{ac} = R_C = 0.15 K\Omega, \quad R_{DC} = R_C + R_E = 0.25 K\Omega$

خط بار DC: $V_{CE} = V_{CC} - R_{DC} I_C \Rightarrow I_C = 40 - 4 V_{CE}$



شکل ۴-۲۴

$$I_{CQ} = 10 mA \Rightarrow V_{CEQ} = 7.5 V$$

خط بار ac خالص: $v_{ce} = -R_{ac} i_c \Rightarrow i_c = -6.67 v_{ce}$

با انتقال مبدأ خط بار ac خالص به مبدأ مختصات، معادله کلی جریان کلکتور (خط بار ac) حاصل می شود.

$$i_c - I_{CQ} = -6.67 (v_{CE} - V_{CEQ})$$

$$\Rightarrow i_c = -6.67 v_{CE} + 60$$

با توجه به خط بار ac که در شکل ۴-۲۴ رسم شده است، حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ v_{ce} برابر

۱/۵ ولت خواهد بود و با توجه به معادله خط بار ac خالص، حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور (i_c) برابر ۱۰mA خواهد بود.

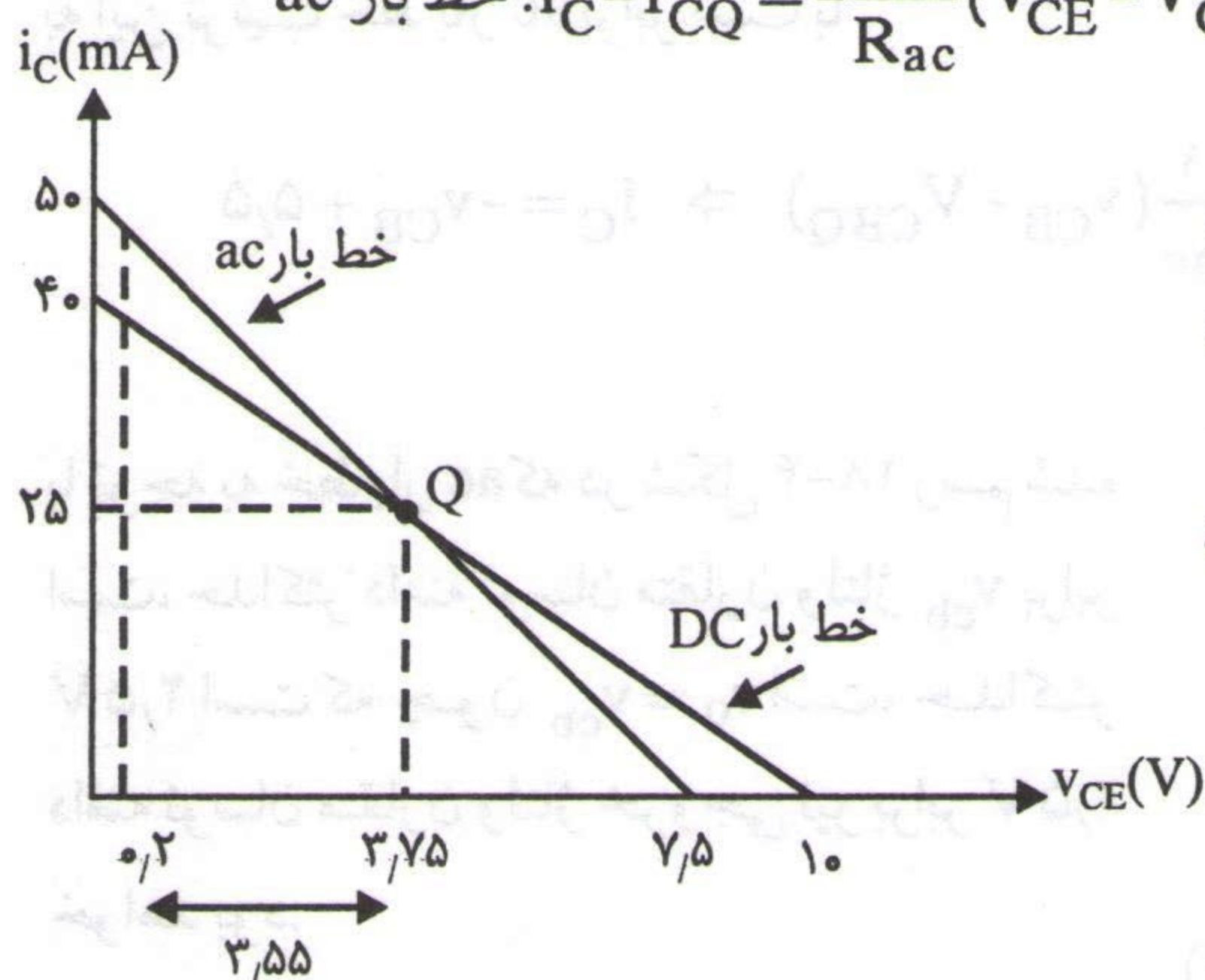
$$R_{ac} = R_C = ۰/۱۵ K\Omega, \quad R_{DC} = R_C + R_E = ۰/۲۵ K\Omega \quad (ج)$$

نقطه کار بهینه عبارت است از

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = ۲۵ mA, \quad V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} R_{ac} = ۳/۷۵ V$$

برای محاسبه حداکثر دامنه نوسان متقارن در این حالت، معادله خط بار ac را به دست می آوریم.

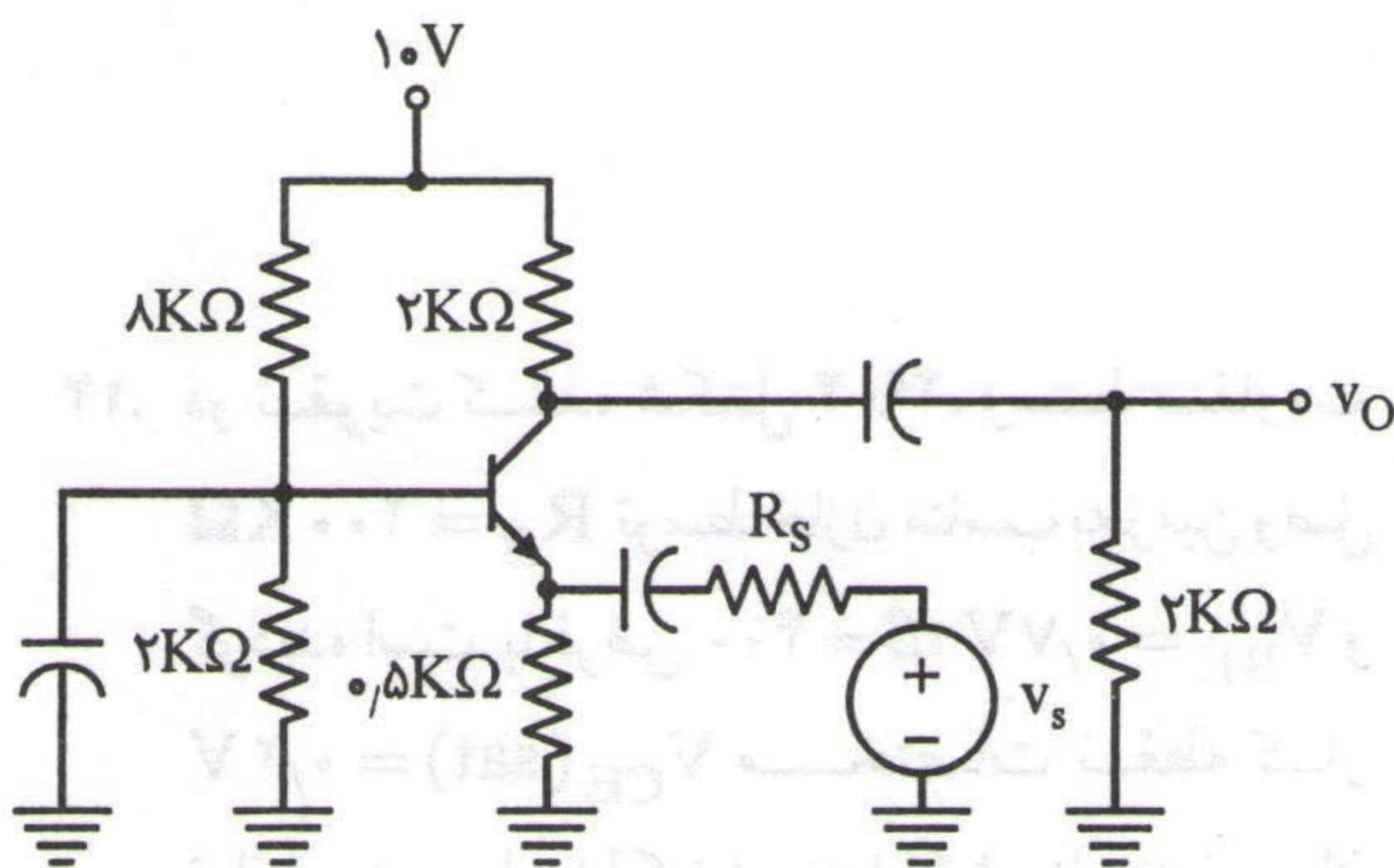
$$i_C - I_{CQ} = -\frac{1}{R_{ac}} (v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_C = -۶/۶۷ v_{CE} + ۵۰$$



شکل ۲۵-۴

با توجه به خط بار ac که در شکل ۲۵-۴ رسم گردیده است، حداکثر دامنه نوسان متقارن برای ولتاژ v_{ce} برابر ۳/۷۵ ولت می باشد. حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور (i_c) از خط بار ac خالص برابر است با

$$i_{c,max} = ۶/۶۷ \times v_{ce,max} = ۲۳/۶۷ mA$$



شکل ۲۶-۴

۱۱. حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ

خروجی در مدار تقویت کننده بیس

مشترک شکل ۲۶-۴ را به دست آورید.

$\beta = ۱۰۰$ و $V_{BE(on)} = ۰/۷ V$ است.

$$R_{Th} = ۸ \parallel ۲ = ۱/۶ K\Omega \quad \text{حل:}$$

$$V_{Th} = \frac{۱۰}{۸+۲} \times ۲ = ۲ V$$

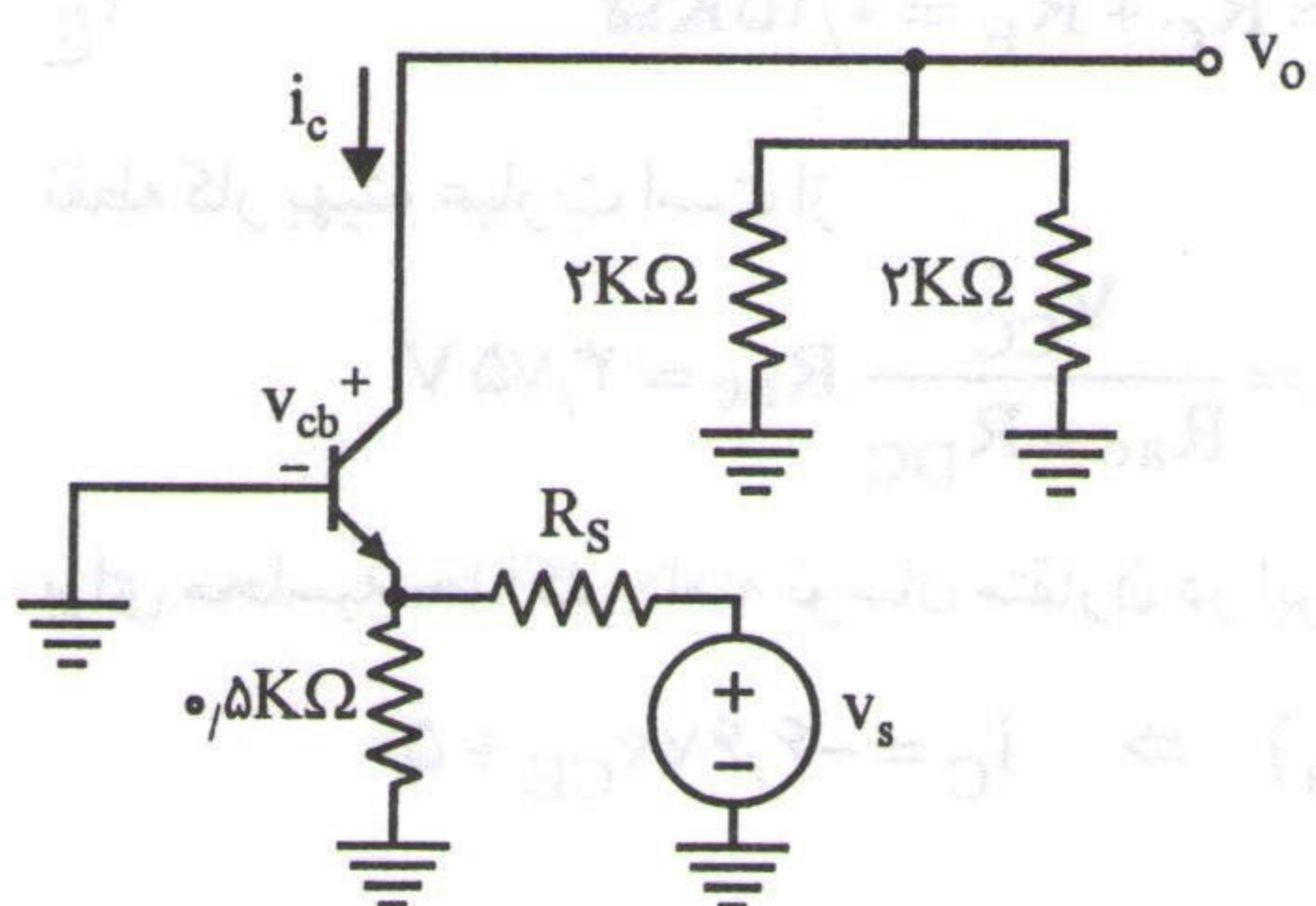
$$KVL BE: V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E, \quad I_E = (1 + \beta) I_B$$

$$\Rightarrow I_B = ۲۴/۹۵ \mu A \Rightarrow I_{CQ} = \beta I_B = ۲/۵ mA$$

با نوشتن KVL در حلقه CB مدار DC داریم

$$10 = 2I_{CQ} + V_{CBQ} - R_{Th} I_B + V_{Th} \Rightarrow V_{CBQ} \approx 3V$$

$$\text{خط بار DC: } I_C = 4 - 0.5V_{CB}$$



خط بار ac خالص با توجه به مدار معادل ac شکل ۲۷-۴ عبارت است از

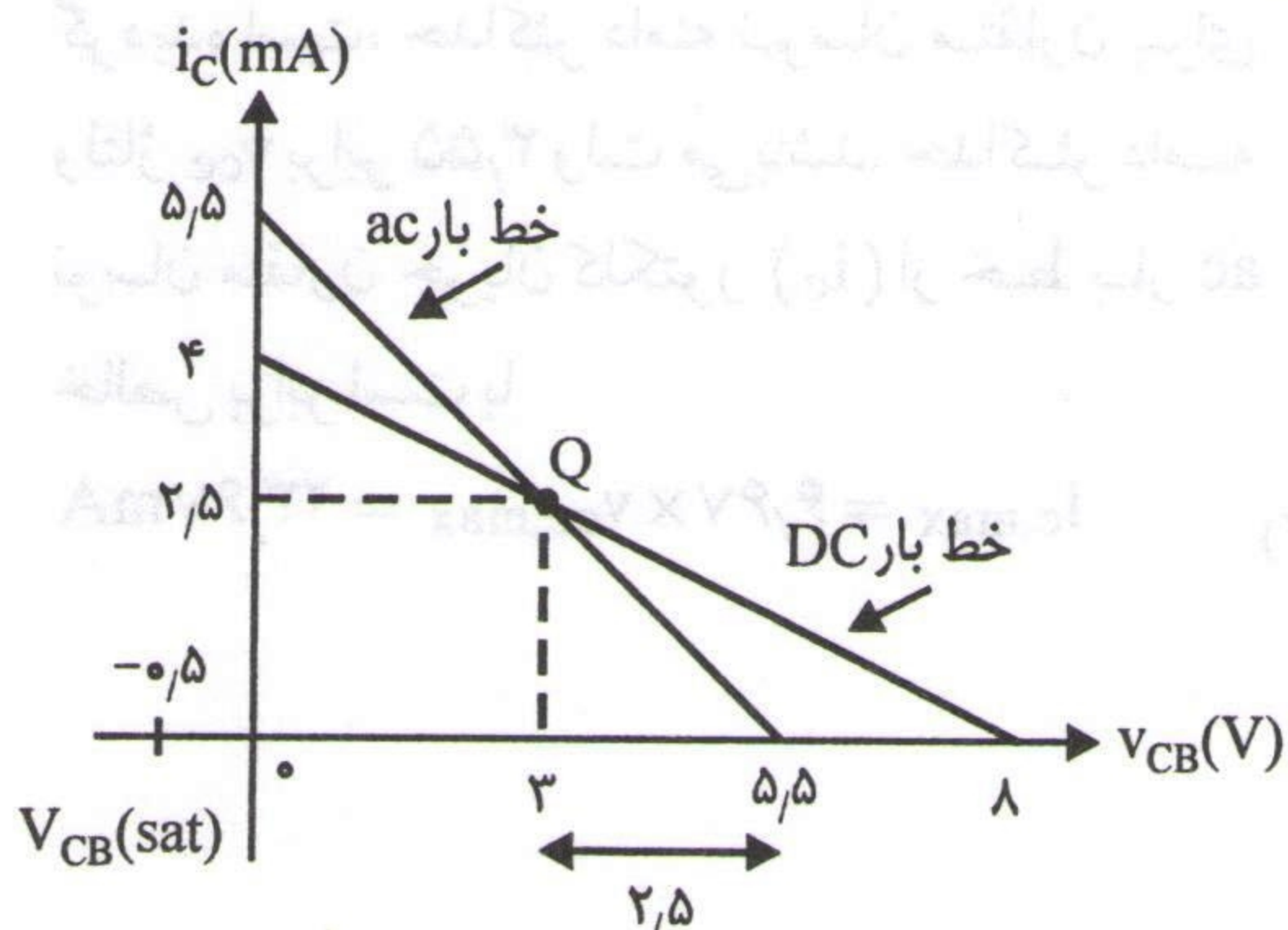
$$R_{ac} = 2 \parallel 2 = 1K\Omega$$

$$v_{cb} = -R_{ac} i_c \Rightarrow i_c = -v_{cb}$$

به این ترتیب خط بار ac برابر است با

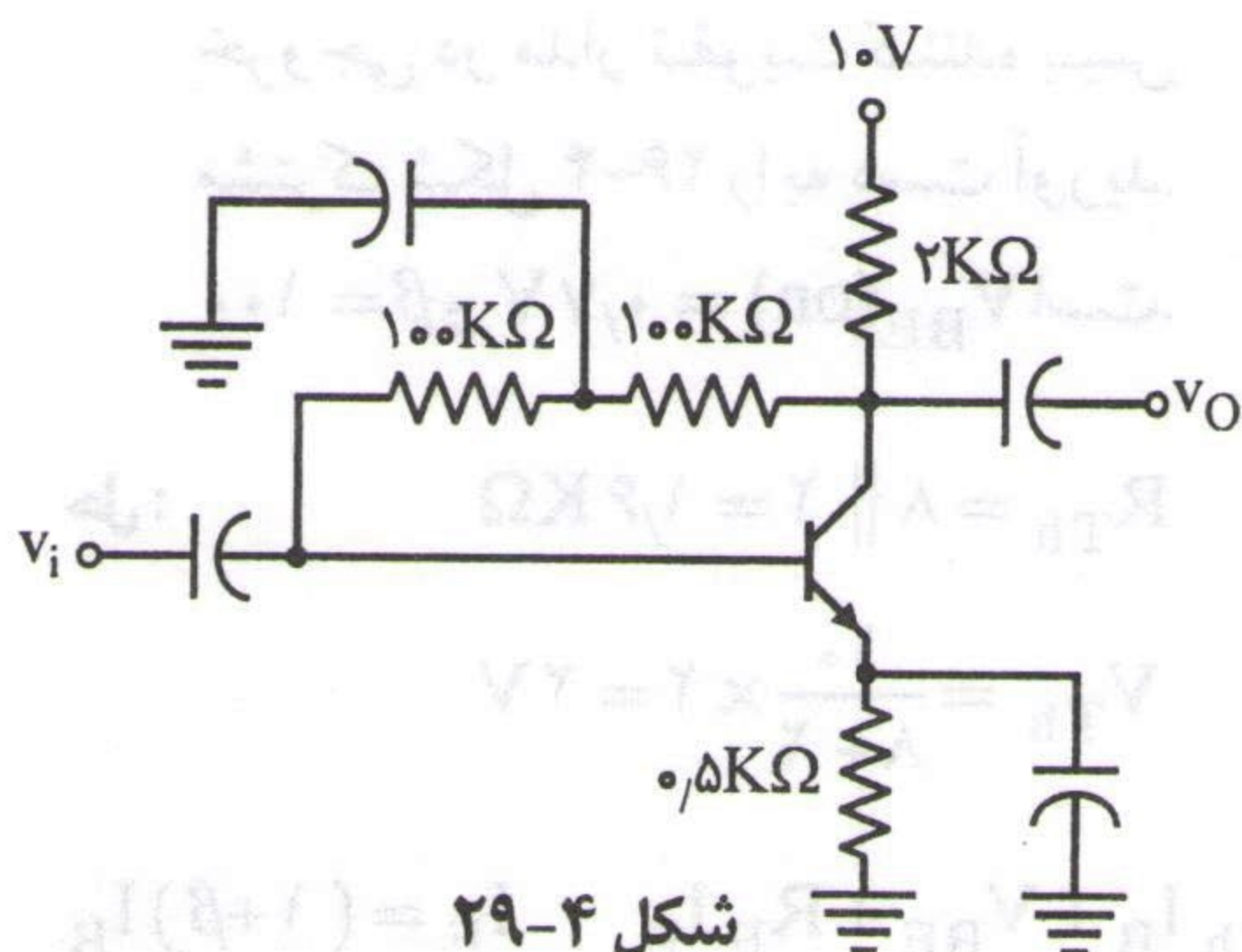
$$i_C - I_{CQ} = \frac{-1}{R_{ac}} (v_{CB} - V_{CBQ}) \Rightarrow i_C = -v_{CB} + 5.5$$

شکل ۲۷-۴



شکل ۲۸-۴

با توجه به خط بار ac که در شکل ۲۸-۴ رسم شده است، حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ v_{cb} برابر $2.5V$ است که چون $v_o = v_{cb}$ است، حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی نیز برابر $2.5V$ خواهد بود.



شکل ۲۹-۴

۱۲. در تقویت کننده شکل ۲۹-۴، وسط مقاومت $R_B = 200K\Omega$ توسط خازن مناسب به زمین وصل گردیده است. با فرض $V_{BE} = 0.7V$ ، $\beta = 400$ و $V_{CE}(sat) = 0.2V$ مشخصات نقطه کار ترانزیستور را پیدا کنید. حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور چقدر است؟

$$\text{KVL CBE: } 10 = 2(I_C + I_B) + 200I_B + V_{BE} + 0.5I_E$$

حل:

$$= 2I_E + 200 \frac{I_E}{401} + 0.7 + 0.5I_E \Rightarrow I_C \approx I_E = 3.1mA$$

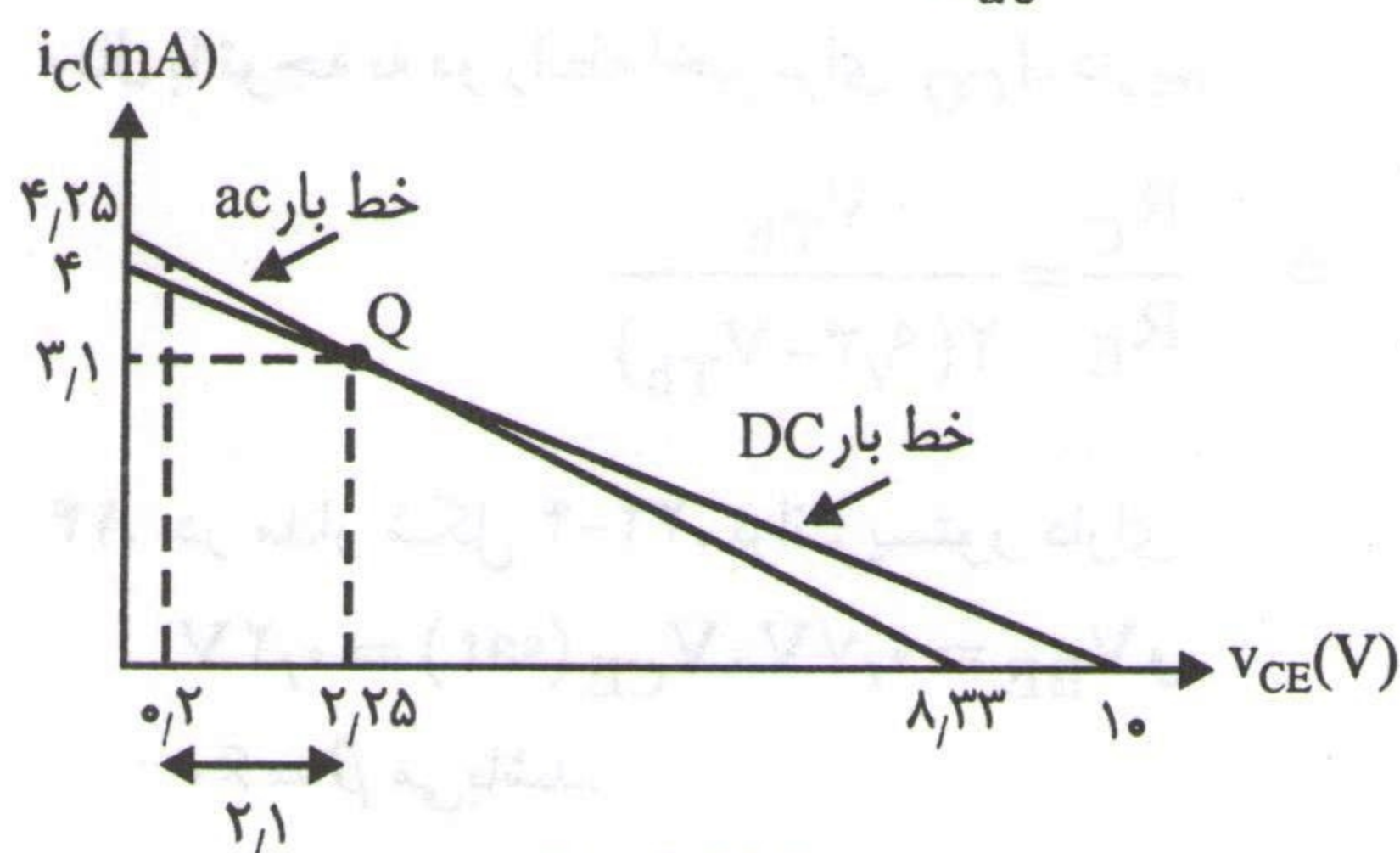
$$\text{DC بار خط: } V_{CE} \approx 10 - 2.5 I_C \Rightarrow I_C = 4 - 0.4 V_{CE}$$

$$\Rightarrow Q(3.1 \text{ mA}, 2.25 \text{ V})$$

$$\text{خط بار ac خالص: } i_c = \frac{-1}{R_{ac}} v_{ce}, \quad R_{ac} = 2 \parallel 100 = 1.96 \text{ K}\Omega \Rightarrow i_c = -0.51 v_{ce}$$

با تغییر مبدا خط بار ac خالص از نقطه کار ترانزیستور به مبدا مختصات، معادله خط بار ac حاصل می شود.

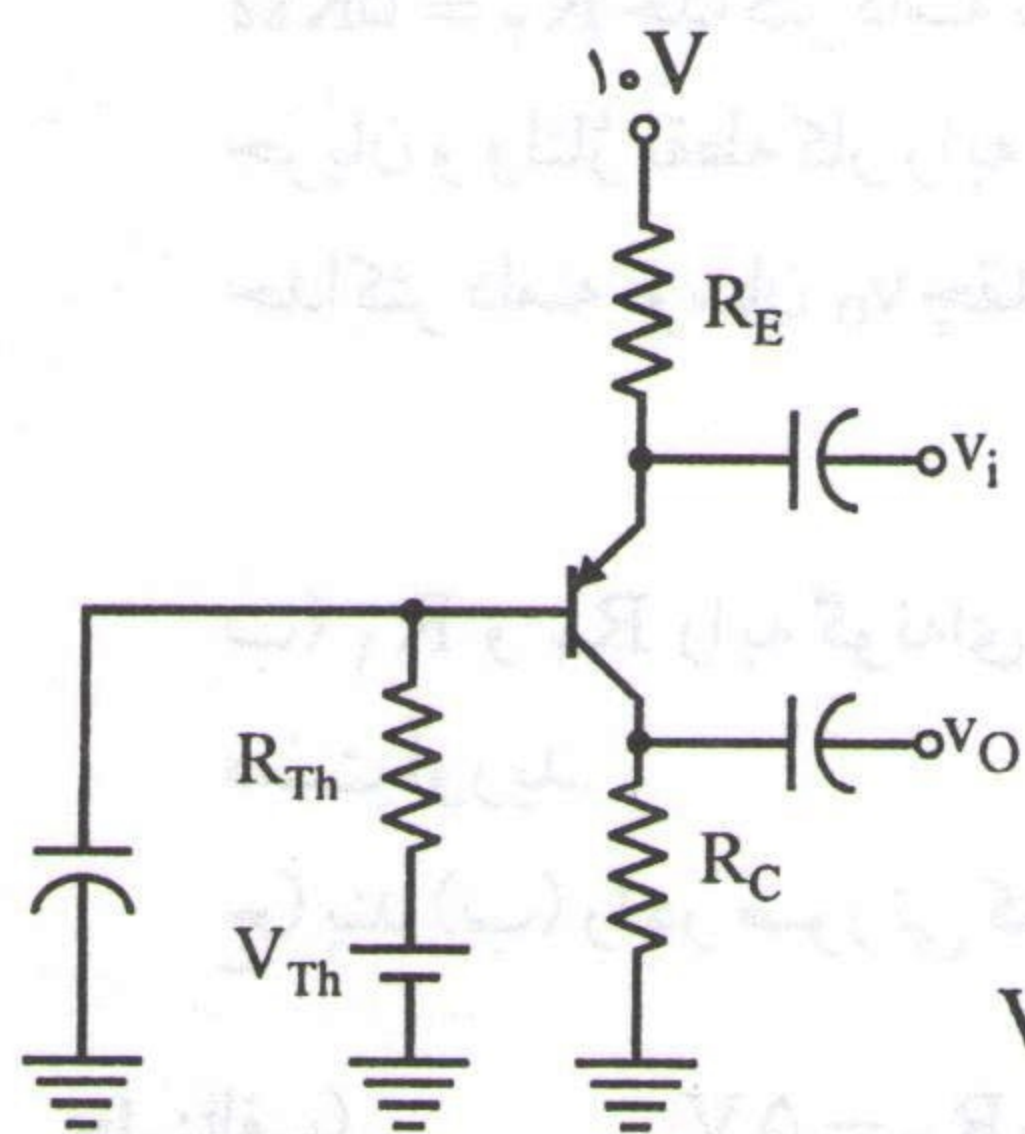
$$\text{خط بار ac: } i_C - I_{CQ} = \frac{-1}{R_{ac}} (v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_C = -0.51 v_{CE} + 4.25$$



با توجه به خط بار ac که در شکل ۳۰-۴ رسم شده است، حداکثر دامنه نوسان متقارن v_{ce} برابر ۲.۱ ولت می باشد و با استفاده از خط بار ac خالص داریم

$$i_{c,max} = \left| \frac{-1}{R_{ac}} \right| v_{ce,max} = 1.07 \text{ mA}$$

شکل ۳۰-۴



شکل ۳۱-۴

۱۳. در مدار بیس مشترک شکل ۳۱-۴، با شرایط پایداری نقطه کار نسبت به تغییرات β ، $V_{EB} = 0.7 \text{ V}$ و اینکه نقطه کار وسط خط بار ac قرار داشته باشد، ثابت کنید:

$$\frac{R_C}{R_E} = \frac{V_{Th}}{2(9.3 - V_{Th})}$$

حل: خط بار DC از KVL در مدار EC حاصل می شود.

$$V_{EC} \approx 10 - (R_C + R_E) I_C, \quad V_{BC} = -V_{EB} + V_{EC}$$

$$\Rightarrow V_{BC} = 9.3 - R_{DC} I_C, \quad R_{DC} = R_E + R_C$$

خط بار ac خالص با توجه به مدار معادل ac برابر است با

$$v_{bc} + R_C i_c = 0 \Rightarrow i_c = \frac{-1}{R_C} v_{bc} = \frac{-1}{R_{ac}} v_{bc}$$

با انتقال مبدأ خط بار ac خالص به مبدأ مختصات، خط بار ac عبارت است از

$$v_{BC} - V_{BCQ} = -R_{ac} (i_C - I_{CQ})$$

به راحتی می توان نشان داد، برای اینکه نقطه کار وسط خط بار ac باشد، I_{CQ} برابر است با

$$I_{CQ} = \frac{10 - V_{EB}}{R_{ac} + R_{DC}} = \frac{9.3}{2R_C + R_E}$$

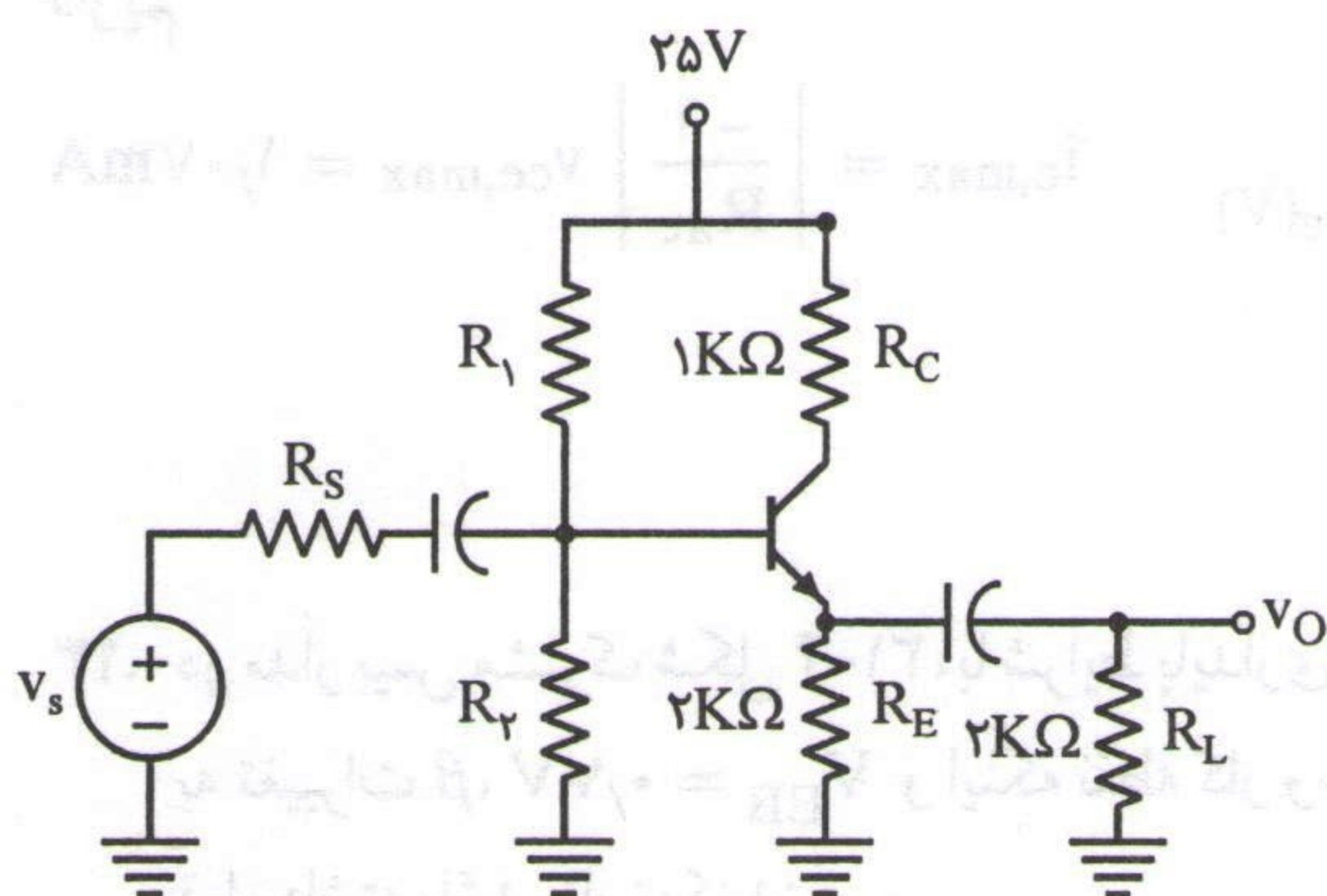
از طرف دیگر با توجه به معادله KVL در مدار EB داریم

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{10 - V_{Th} - V_{EB}}{R_E + R_{Th}/\beta} \approx \frac{9.3 - V_{Th}}{R_E}$$

حال با توجه به دو رابطه اخیر برای I_{CQ} ، داریم

$$\frac{9.3 - V_{Th}}{R_E} = \frac{9.3}{2R_C + R_E} \Rightarrow \frac{R_C}{R_E} = \frac{V_{Th}}{2(9.3 - V_{Th})}$$

■



شکل ۴-۳۲

۱۴. در مدار شکل ۴-۳۲، ترانزیستور دارای $V_{BE} = 0.7V$ ، $V_{CE(sat)} = 0.2V$ و $\beta = 60$ می باشد.

الف) به ازای مقادیر $R_1 = 20K\Omega$ و $R_2 = 5K\Omega$ حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان و ولتاژ نقطه کار را به دست آورید. حداکثر دامنه نوسان V_O چقدر است؟

ب) R_1 و R_2 را به گونه ای طرح کنید که خروجی دارای حداکثر دامنه نوسان متقارن باشد و آن را به دست آورید.

ج) بند (ب) را در صورتی که مقاومت R_C بایпас شود، تکرار کنید.

حل: الف) $R_{Th} = R_1 \parallel R_2 = 4K\Omega$ ، $V_{Th} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} R_2 = 5V$

نقطه کار را از مدار DC به دست می آوریم.

$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E , I_E = (\beta + 1) I_B$$

$$\Rightarrow I_B = 34.1 \mu A , I_{CQ} = \beta I_B = 2mA , I_E = 2.1mA$$

$$R_{ac} = R_C + R_E \parallel R_L = 2K\Omega , R_{DC} = R_C + R_E = 3K\Omega$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - R_{DC} I_{CQ} = 19V \Rightarrow Q(2mA , 19V)$$

$$DC \text{ بار} : 25 = R_{DC} I_C + V_{CE} \Rightarrow I_C = -\frac{1}{3}(V_{CE} - 25)$$

$$R_1 = \left(\frac{V_{CC}}{V_{Th}} \right) R_{Th} = 25.64 K\Omega, \quad R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} R_{Th} = 22.6 K\Omega$$

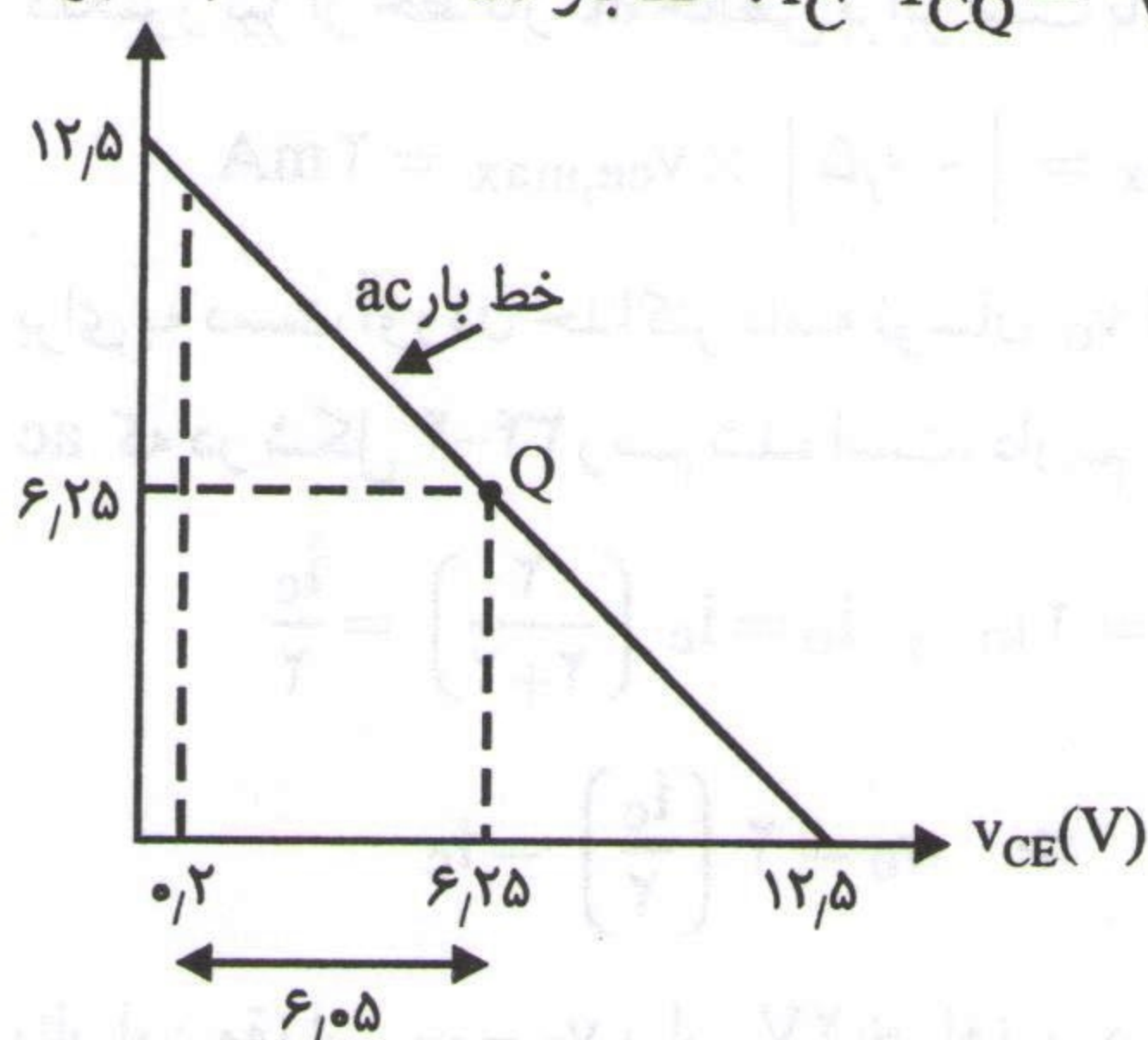
ج) در صورتی که مقاومت R_C توسط یک خازن بایپاس شود، مقدار R_{ac} به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$R_{ac} = R_E \parallel R_L = 1 K\Omega, \quad R_{DC} = R_C + R_E = 3 K\Omega$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = 6.25 mA, \quad V_{CEQ} = V_{CC} - R_{DC} I_{CQ} = 6.25 V$$

$$v_{ce} = -R_{ac} i_c \Rightarrow i_c = -v_{ce}$$

$$i_c(mA) \quad \text{خط بار ac: } i_c - I_{CQ} = -(v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_c = -v_{CE} + 12.5$$



شکل ۴-۳۶

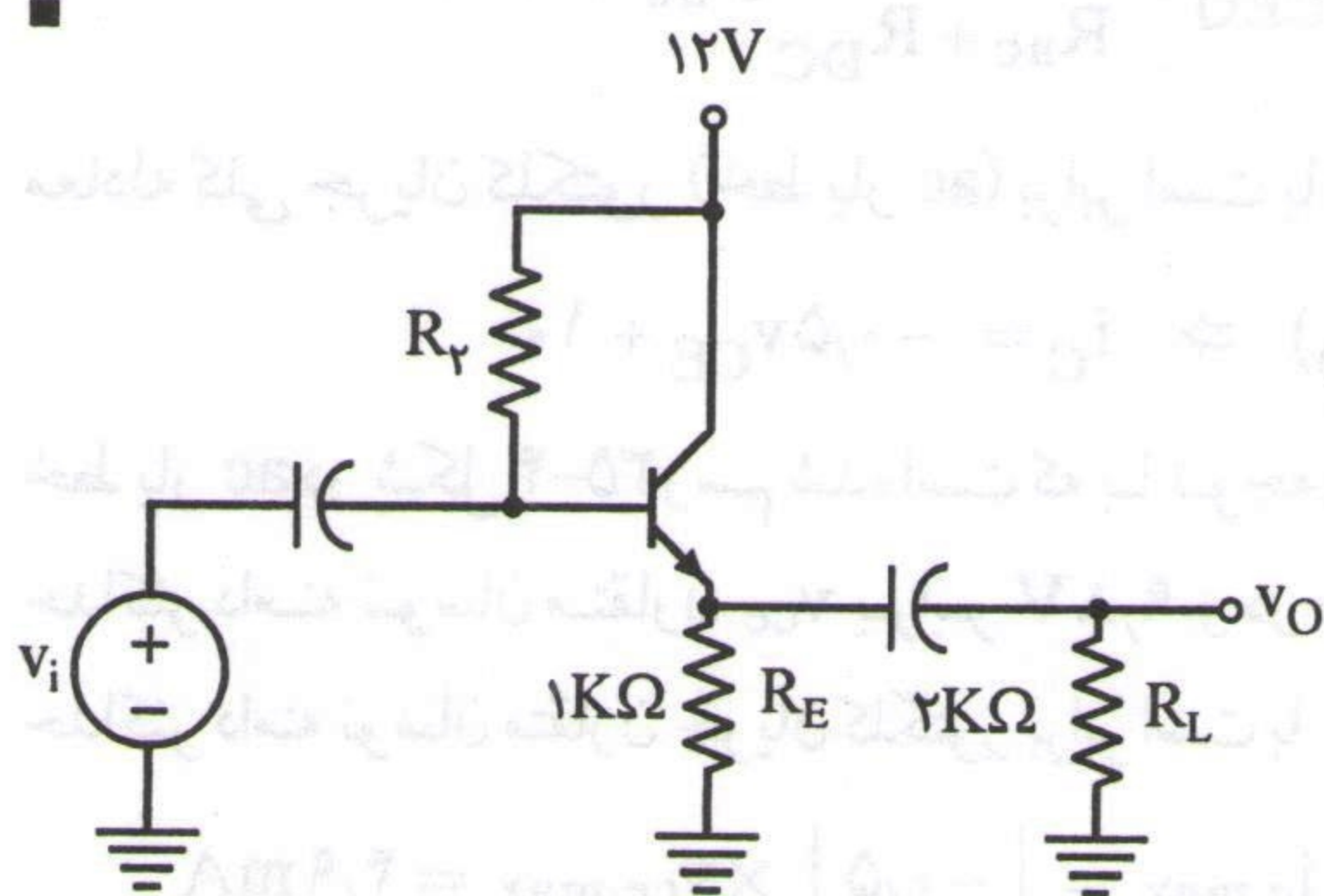
با توجه به خط بار ac که در شکل ۴-۳۶ رسم شده است حداکثر دامنه نوسان متقارن $v_o = v_{ce}$ برابر ۶.۰۵ ولت و برای i_c برابر ۶.۰۵ میلی آمپر است. در این شرایط R_1 و R_2 برابرند با

$$R_{Th} = \frac{1}{\beta} R_E = 12 K\Omega$$

$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E = 14.45 V$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{Th}} R_{Th} = 20.8 K\Omega$$

$$R_2 = \left(\frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} \right) R_{Th} = 28.44 K\Omega$$



شکل ۴-۳۷

۱۵. در مدار شکل ۴-۳۷، ترانزیستور دارای

$\beta = 50$ و $V_{BE} = 0.7 V$ می‌باشد.

الف) R_2 را چنان تعیین کنید که جریان کلکتور ۵ mA شود.

ب) با مقدار قبلی برای R_2 ، حداکثر دامنه نوسان متقارن بدون اعوجاج خروجی را بیابید.

$$I_C = 5 mA \Rightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta} = 100 \mu A$$

(حل: الف)

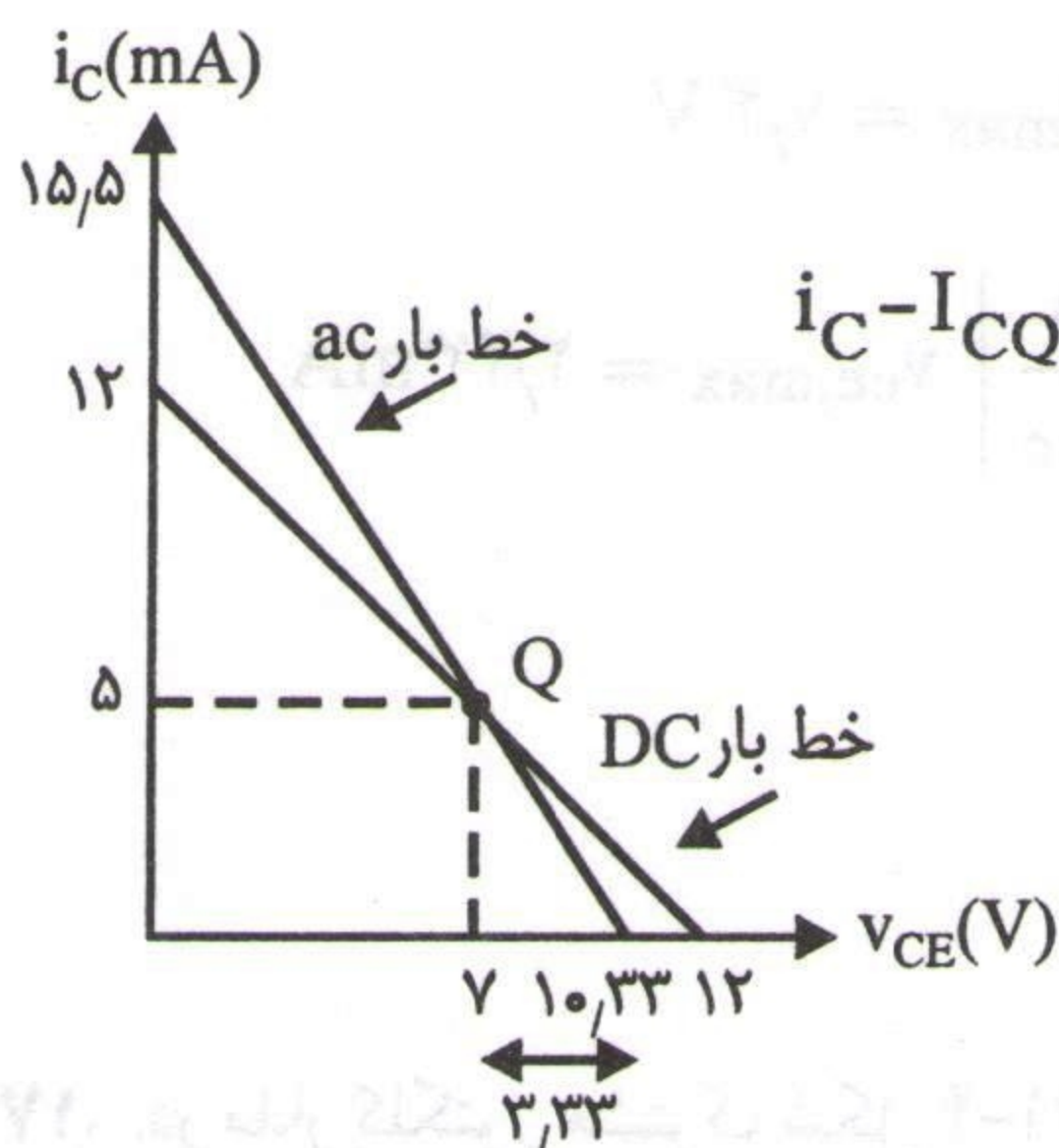
$$KVL CBE: 12 = R_2 I_B + V_{BE} + R_E I_E \Rightarrow R_2 = 63 K\Omega$$

$$R_{ac} = R_E \parallel R_L = \frac{2}{3} K\Omega, \quad R_{DC} = R_E = 1 K\Omega$$

(ب)

$$\text{DC بار خط: } V_{CE} = V_{CC} - R_{DC} I_C \Rightarrow I_C = 12 - V_{CE} \Rightarrow Q(5\text{mA}, 7\text{V})$$

$$\text{خط بار ac خالص: } v_{ce} = -R_{ac} i_c \Rightarrow i_c = -1/5 v_{ce}$$

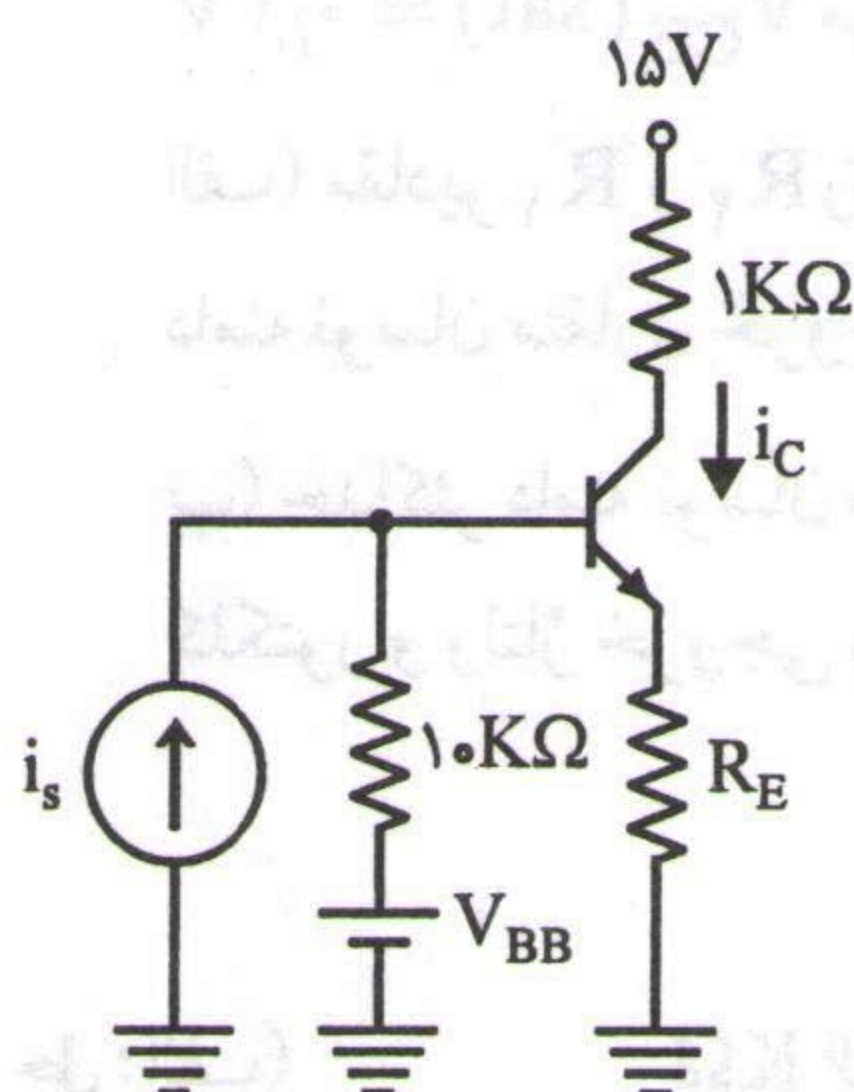


بنابراین معادله کلی تغییرات جریان کلکتور (خط بار ac) برابر است با

$$i_C - I_{CQ} = -1/5 (v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_C = -1/5 v_{CE} + 15/5$$

با توجه به خط بار ac که در شکل ۳۸-۴ رسم شده است، حداکثر دامنه نوسان متقارن برای $v_o = v_{ce}$ برابر $3/33$ ولت و برای i_c برابر 5 میلی آمپر می باشد.

شکل ۳۸-۴



شکل ۳۹-۴

۱۶. در تقویت کننده شکل ۳۹-۴ می خواهیم تقویت کننده را طوری طراحی نماییم که دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور حداکثر باشد. اگر برای ترانزیستور به کار رفته β بین 50 تا 150 تغییر کند و $V_{BE} = 0.7\text{V}$ باشد، V_{BB} و R_E را محاسبه نمایید. حداکثر دامنه نوسان i_c را به دست آورید.

حل: برای اینکه دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور حداکثر شود، باید نقطه کار وسط خط بار ac انتخاب گردد.

$$R_{ac} = R_{DC} = R_C + R_E = 1 + R_E$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = \frac{15}{2 + 2R_E}$$

برای پایداری نقطه کار نسبت به تغییرات β ، مقاومت R_E را به صورت زیر انتخاب می کنیم:

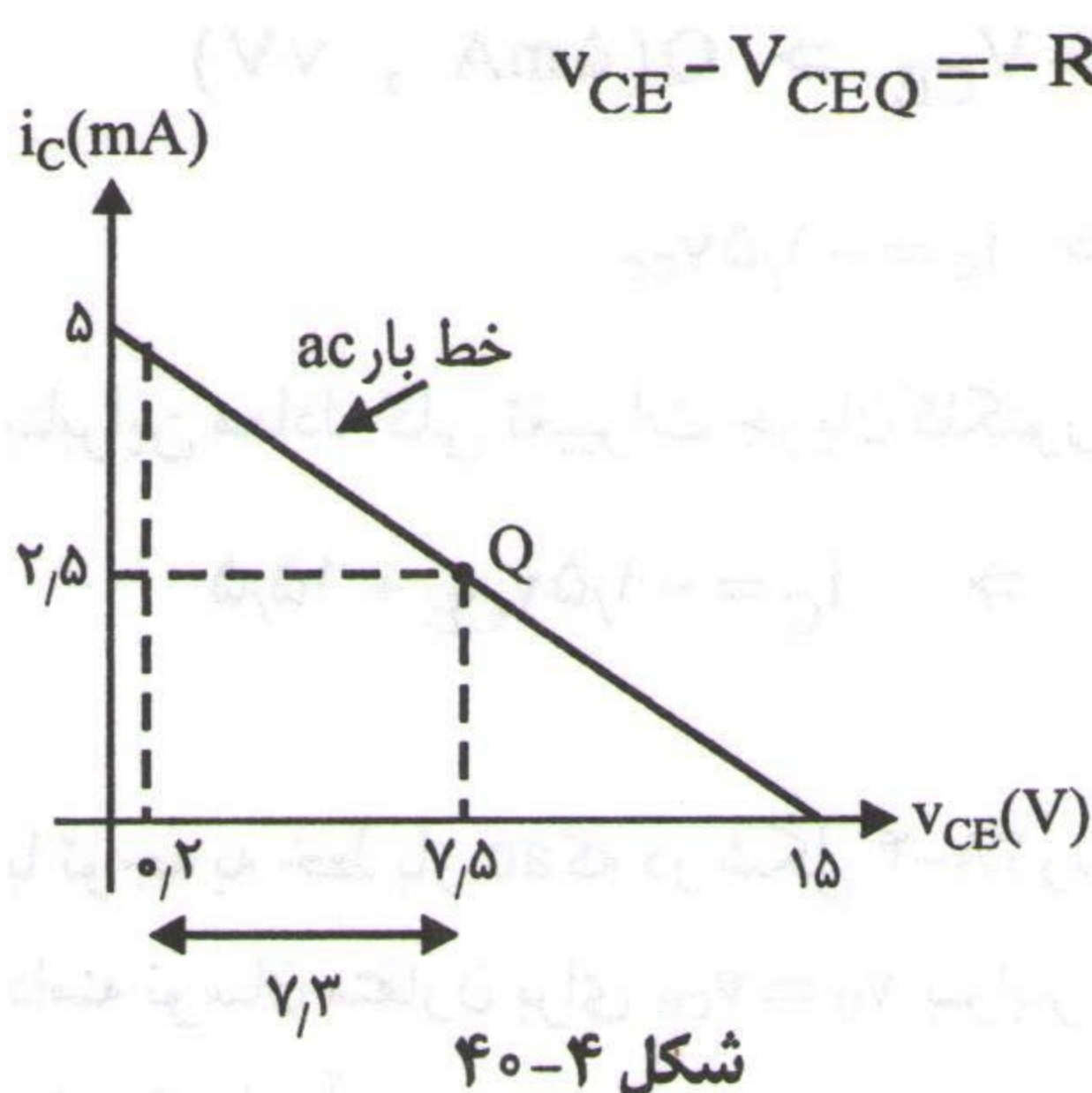
$$R_B = 0.1 \beta_{\min} R_E \Rightarrow R_E = \frac{R_B}{0.1 \beta_{\min}} = 2\text{k}\Omega \Rightarrow I_{CQ} = 2.5\text{mA}$$

$$V_{CEQ} = 15 - R_{DC} I_{CQ}, R_{DC} = 3\text{k}\Omega \Rightarrow V_{CEQ} = 7.5\text{V}$$

از KVL در حلقه BE داریم

$$V_{BB} = 10 I_B + V_{BE} + R_E I_E \approx 10 \left(\frac{I_{CQ}}{\beta_{av}} \right) + V_{BE} + R_E I_{CQ} = 5.95\text{V}$$

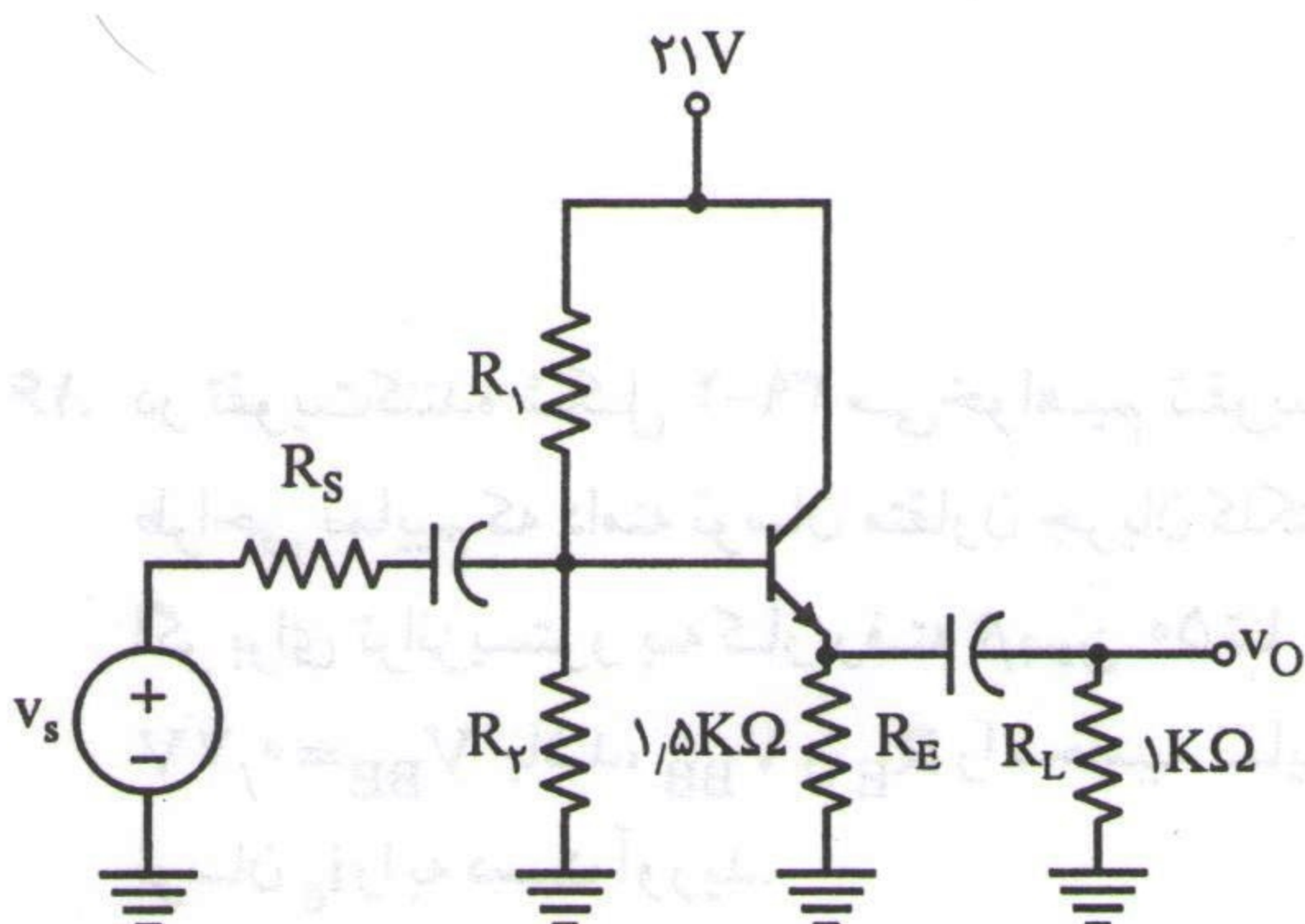
خط بار ac (که در این مسأله بر خط بار DC منطبق است) عبارت است از



با توجه به خط بار ac که در شکل ۴-۴۰ رسم شده است، داریم

$$v_{ce,max} = 7.3V$$

$$i_{c,max} = \left| \frac{-1}{R_{ac}} \right| v_{ce,max} = 2.43mA$$



شکل ۴-۴۱

۱۷. در مدار کلکتور مشترک شکل ۴-۴۱ ترانزیستور

دارای $100 \leq \beta \leq 150$ ، $V_{BE} = 0.7V$ و

$V_{CE}(sat) = 0.2V$ می‌باشد.

(الف) مقادیر R_1 و R_2 را برای داشتن حداکثر

دامنه نوسان متقارن خروجی محاسبه کنید.

(ب) حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ و جریان

کلکتور و ولتاژ خروجی را محاسبه نمایید.

حل: (الف) $R_{DC} = R_E = 1.5K\Omega$ ، $R_{ac} = R_E \parallel R_L = 0.6K\Omega$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = 10mA$$

$$V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} R_{ac} = 6V$$

برای مدار بایاس داریم

$$R_{Th} = \frac{1}{\beta_{min}} R_E = 15K\Omega$$

$$V_{Th} = R_{Th} \frac{I_C}{\beta_{av}} + V_{BE} + R_E I_E = 16.9V$$

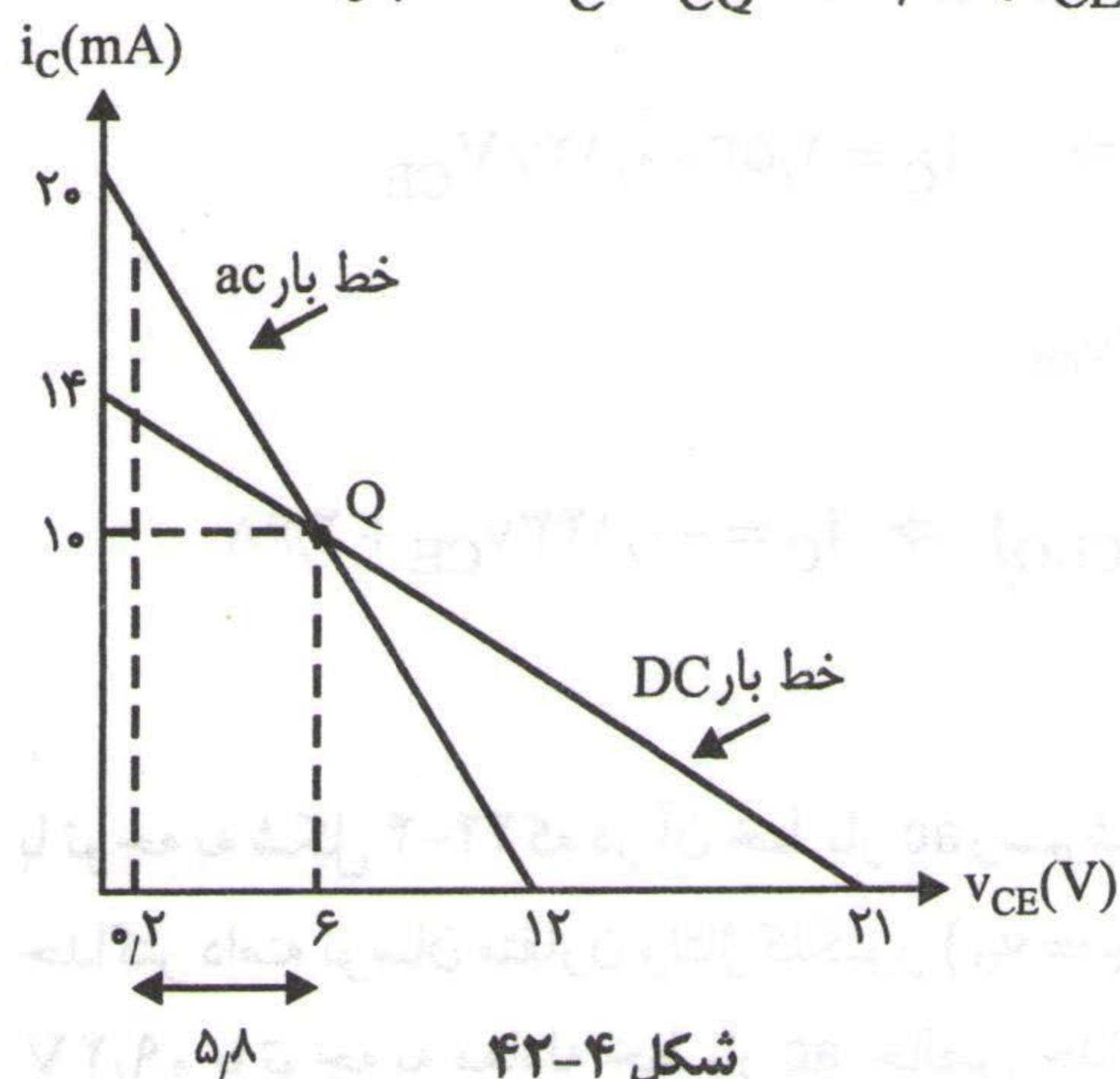
$$R_1 = \left(\frac{V_{CC}}{V_{Th}} \right) R_{Th} = 18.6K\Omega$$

$$R_2 = \left(\frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_{Th}} \right) R_{Th} = 76.8K\Omega$$

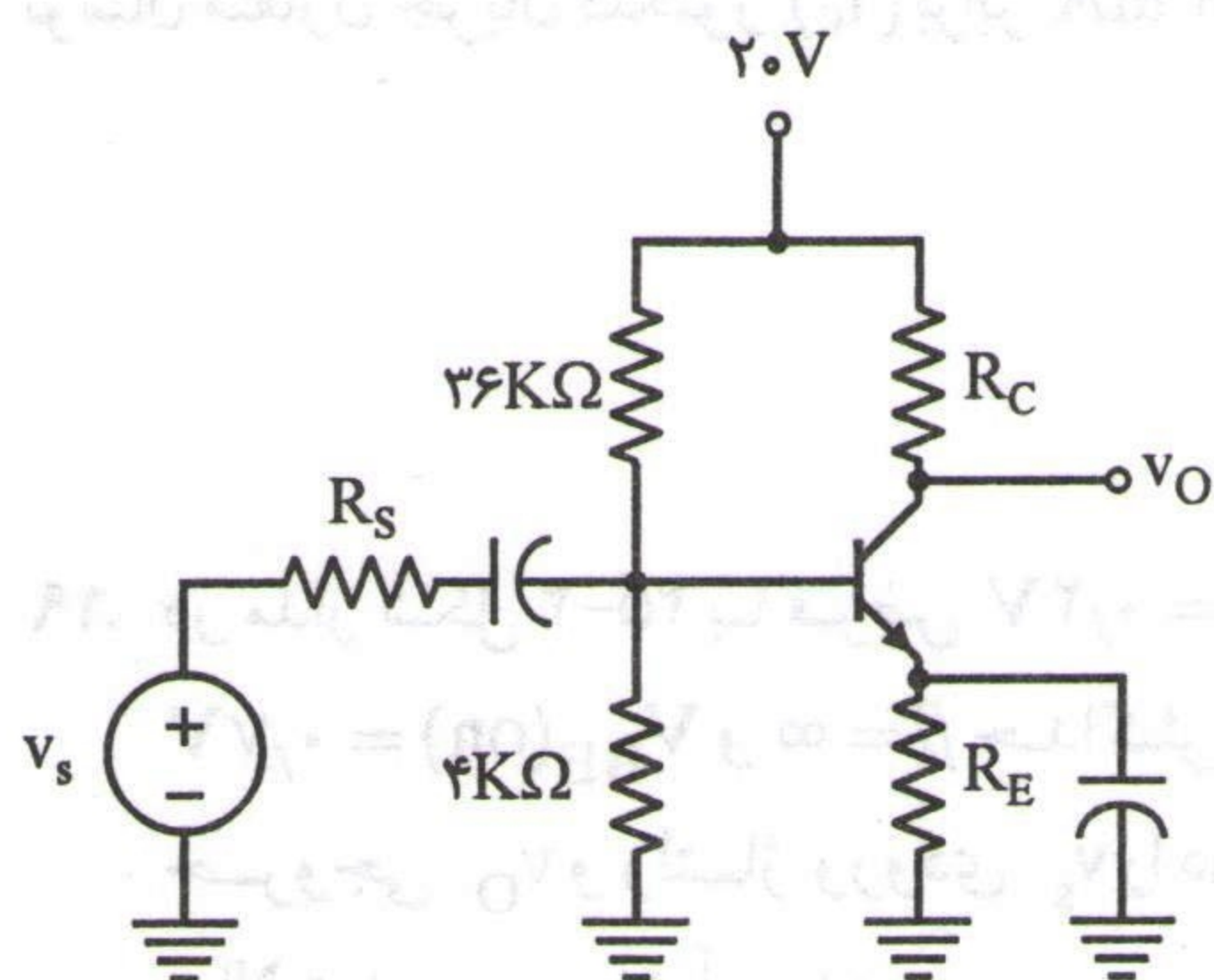
(ب) خط بار DC: $V_{CE} = V_{CC} - R_{DC} I_C \Rightarrow I_C = 14 - \frac{2}{3} V_{CE}$

خط بار ac خالص: $v_{ce} = -R_{ac} i_c \Rightarrow i_c = -1.67 v_{ce}$

$$i_C - I_{CQ} = -1/67 (v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_C = -1/67 v_{CE} + 20$$



با توجه به خط بار ac که در شکل ۴۲-۴ رسم شده است حداکثر دامنه نوسان متقارن $v_O = -v_{CE}$ برابر $5.8V$ است. با توجه به معادله خط بار ac خالص، حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور برابر $9.69mA$ خواهد بود.



شکل ۴۳-۴

۱۸. در مدار شکل ۴۳-۴، ترانزیستور دارای $V_{BE(on)} = 0.7V$ ، $V_{CE(sat)} = 0.2V$ و $40 \leq \beta \leq 60$ می باشد. R_E و R_C را طوری تعیین کنید که نقطه کار از پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β برخوردار بوده و ضمناً دامنه نوسان متقارن خروجی حداکثر گردد. حداکثر دامنه نوسان خروجی چقدر است؟

حل: $R_{Th} = 36 \parallel 4 = 3.6K\Omega$

$$R_{Th} \approx \frac{1}{\beta_{min}} R_E \Rightarrow R_E = 0.9K\Omega$$

برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن خروجی، نقطه کار را در وسط خط بار ac انتخاب می کنیم.

$$R_{DC} = R_C + R_E, \quad R_{ac} = R_C$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = \frac{20}{R_C + (R_C + R_E)} = \frac{20}{2R_C + 0.9}$$

از طرفی جریان نقطه کار را می توان با نوشتن KVL در حلقه BE به دست آورد.

$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} + R_E I_E, \quad V_{Th} = \frac{20}{36+4} \times 4 = 2V, \quad \beta_{av} = 50$$

بنابراین

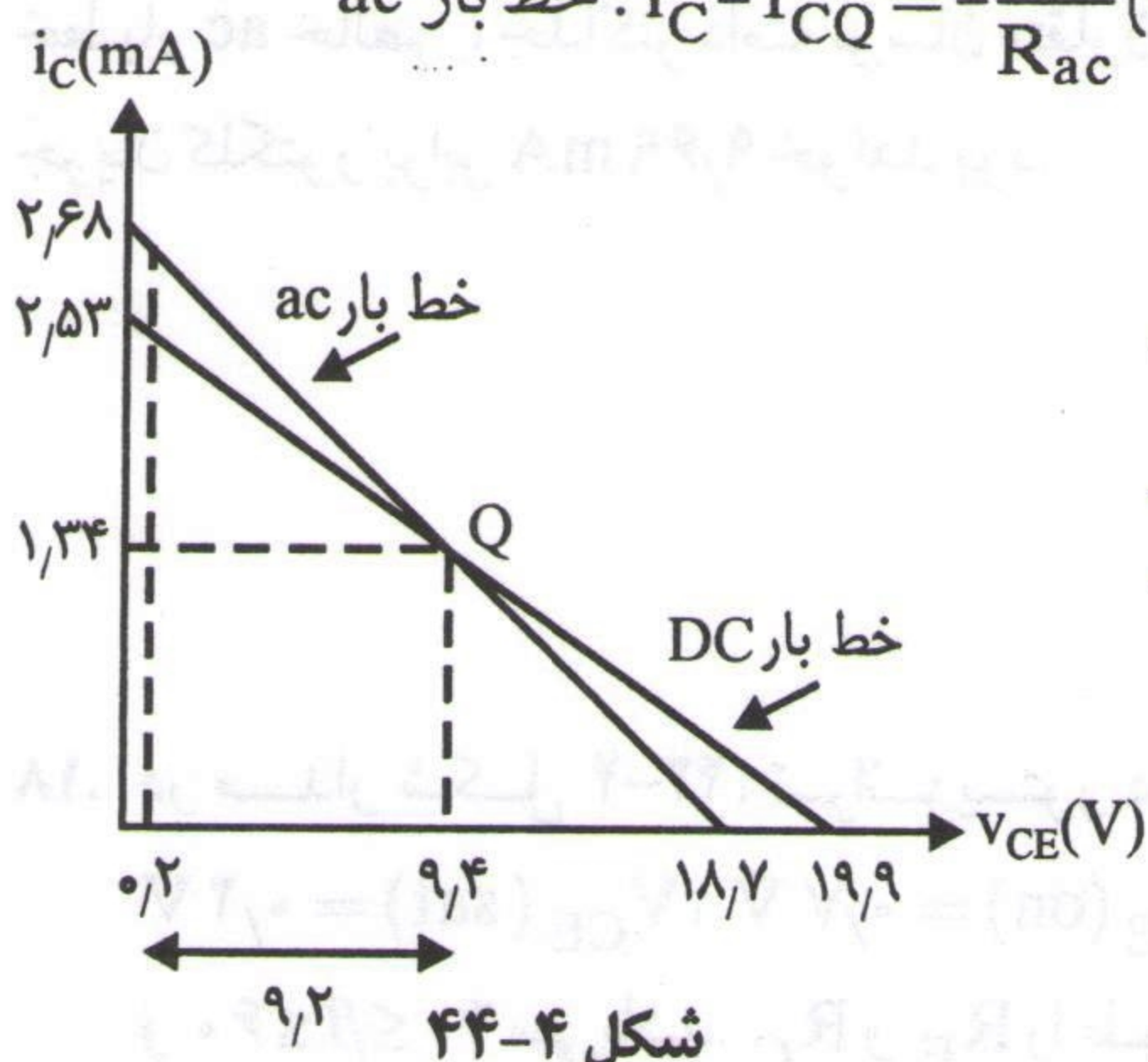
$$I_E = 1.34mA \Rightarrow I_{CQ} = \frac{20}{2R_C + 0.9} \approx 1.34mA \Rightarrow R_C = 7K\Omega$$

$$V_{CEQ} = 20 - (R_C + R_E)I_E = 9.4 \text{ V}$$

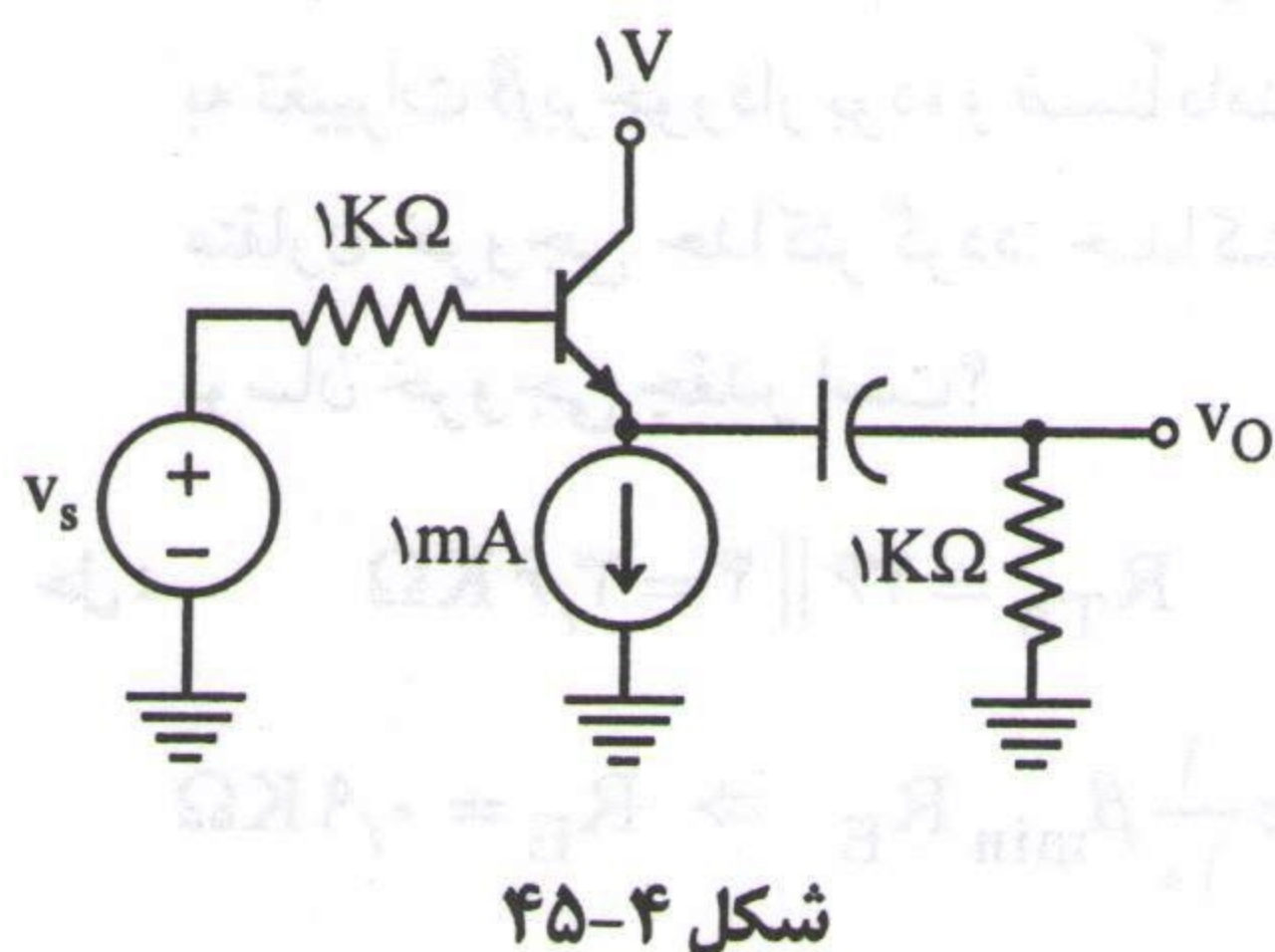
$$\text{DC بار خط: } V_{CE} = V_{CC} - R_{DC}I_C \Rightarrow I_C = 2.53 - 0.127V_{CE}$$

$$\text{خط بار ac خالص: } i_c = \frac{-1}{R_{ac}}v_{ce} = -0.143v_{ce}$$

$$\text{خط بار ac: } i_C - I_{CQ} = -\frac{1}{R_{ac}}(v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_C = -0.143v_{CE} + 2.68$$



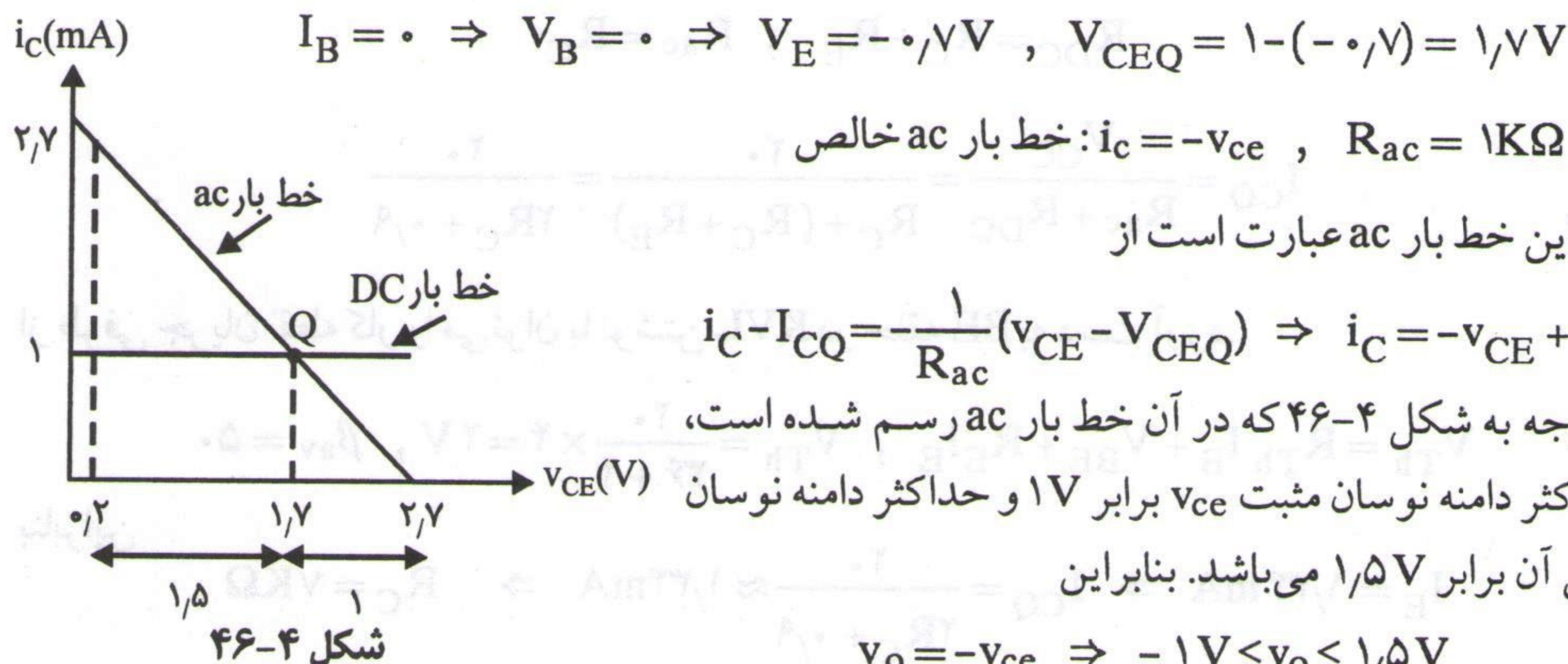
با توجه به شکل ۴-۴۴ که در آن خط بار ac رسم شده است، حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ کلکتور ($v_{ce} = v_o$) برابر 9.2 V و با توجه به معادله خط بار ac خالص حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور (i_c) برابر 1.3 mA می باشد.



۱۹. در مدار شکل ۴-۴۵ با فرض $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{ V}$ و $V_{BE}(\text{on}) = 0.7 \text{ V}$ و $\beta = \infty$ حداکثر دامنه ولتاژ خروجی v_o و ولتاژ ورودی v_s را در هر یک از حالات زیر به دست آورید:
(الف) در نیم سیکل مثبت ولتاژ خروجی برش ایجاد شود.
(ب) در نیم سیکل منفی ولتاژ خروجی برش ایجاد شود.

حل: DC بار خط: $I_{CQ} = 1 \text{ mA}$, $R_{DC} = \infty$

$$I_B = 0 \Rightarrow V_B = 0 \Rightarrow V_E = -0.7 \text{ V} , V_{CEQ} = 1 - (-0.7) = 1.7 \text{ V}$$



$$\text{خط بار ac خالص: } i_c = -v_{ce} , R_{ac} = 1 \text{ K}\Omega$$

بنابراین خط بار ac عبارت است از

$$i_C - I_{CQ} = -\frac{1}{R_{ac}}(v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_C = -v_{CE} + 2.7$$

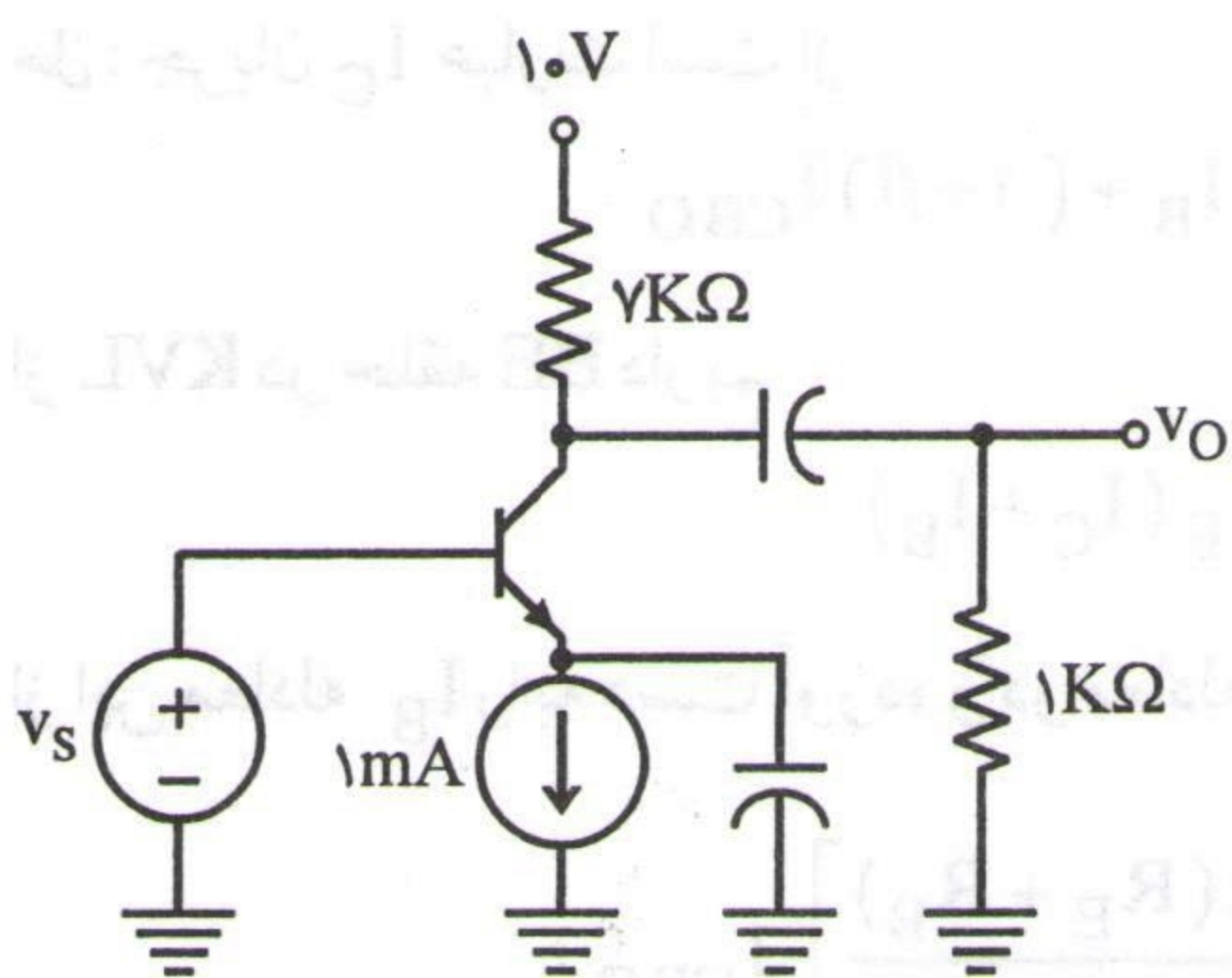
با توجه به شکل ۴-۴۶ که در آن خط بار ac رسم شده است، حداکثر دامنه نوسان مثبت v_{ce} برابر 1 V و حداکثر دامنه نوسان منفی آن برابر 1.5 V می باشد. بنابراین

$$v_o = -v_{ce} \Rightarrow -1 \text{ V} \leq v_o \leq 1.5 \text{ V}$$

همچنین در مدار معادل ac با توجه به اینکه $v_c = 0$ و $v_e = v_s$ (زیرا $\beta = \infty$ است) داریم

$$v_{ce} = v_c - v_e = -v_s$$

بنابراین مقادیر حداقل و حداکثر v_s نیز با مقادیر حداقل و حداکثر v_o برابر است



شکل ۴-۴۷

۲۰. در مدار تقویت کننده شکل ۴-۴۷، ترانزیستور دارای

$V_{BE} = 0.7V$ و $V_{CE(sat)} = 0.2V$ است. حداکثر

دامنه نوسان مثبت و منفی خروجی را محاسبه کنید.

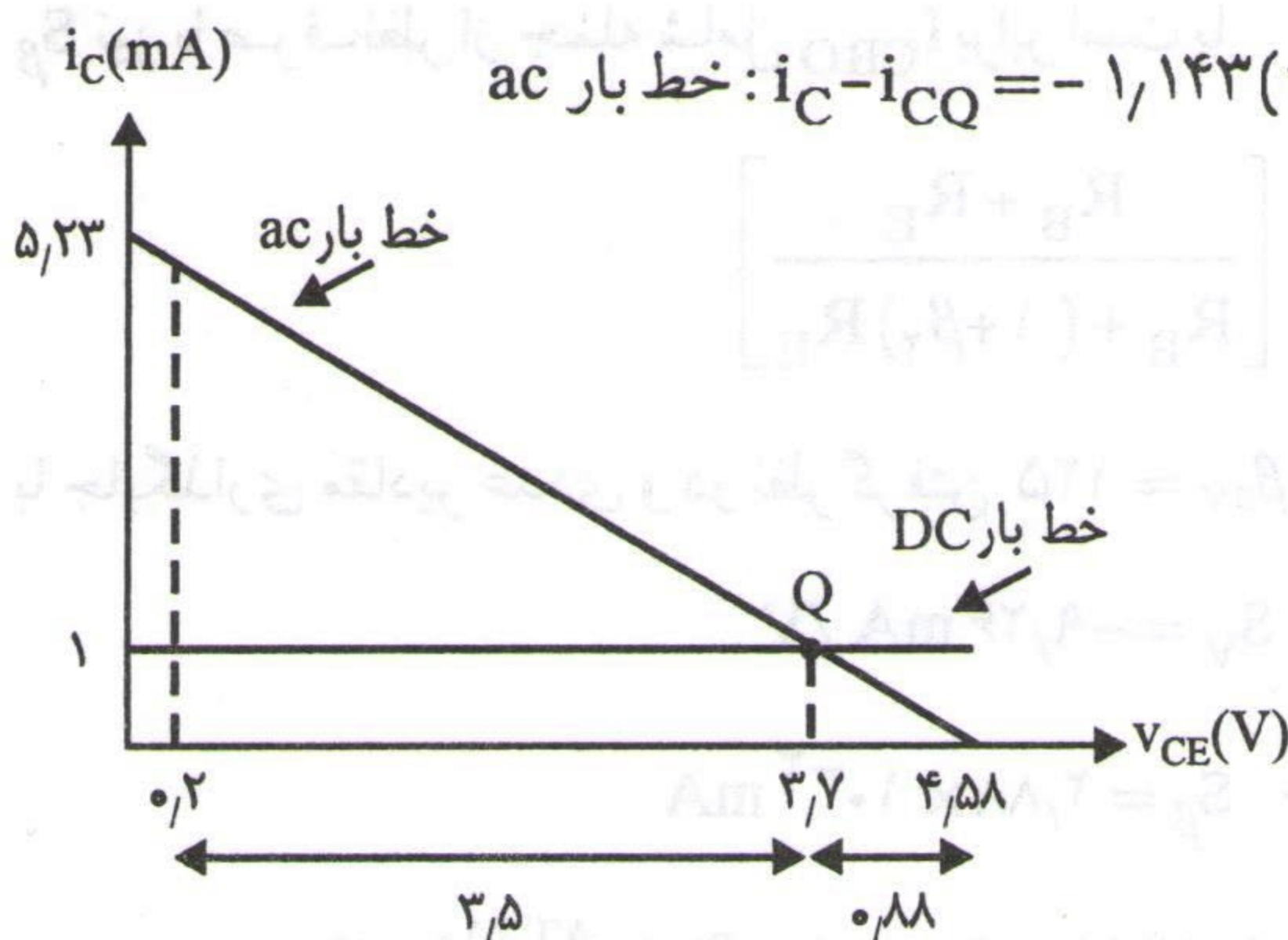
حل: $R_{DC} = \infty$ ، $I_C = 1mA$: خط بار DC

$$V_B = 0 \Rightarrow V_E = -0.7V$$

$$V_{CQ} = 10 - 7 \times 1 = 3V \Rightarrow V_{CEQ} = 3.7V$$

$$R_{ac} = 7 \parallel 1 = 0.875K\Omega$$

$$\text{خط بار ac: } i_c = \frac{-1}{R_{ac}} v_{ce} \Rightarrow i_c = -1/143 v_{ce}$$



شکل ۴-۴۸

$$\text{خط بار ac: } i_c - i_{CQ} = -1/143 (v_{CE} - V_{CEQ}) \Rightarrow i_c = -1/143 v_{CE} + 5.23$$

با توجه به خط بار ac که در شکل ۴-۴۸ رسم

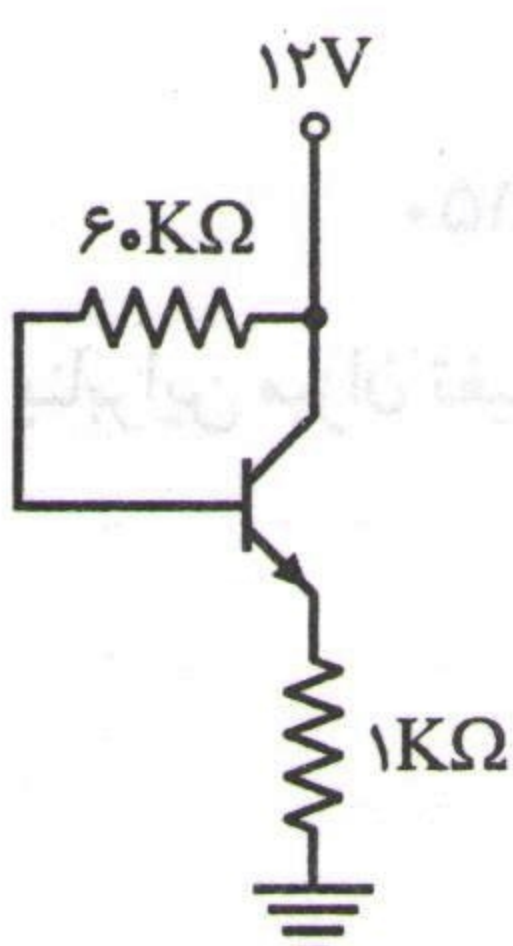
شده است، حداکثر دامنه مثبت و منفی خروجی

$v_o = v_{ce}$ به ترتیب ۰.۸۸ و ۳.۵ ولت می باشد.

همچنین حداکثر دامنه نوسان مثبت و منفی

جریان کلکتور با توجه به خط بار ac خالص به

ترتیب برابر ۱ و ۴ میلی آمپر است.



شکل ۴-۴۹

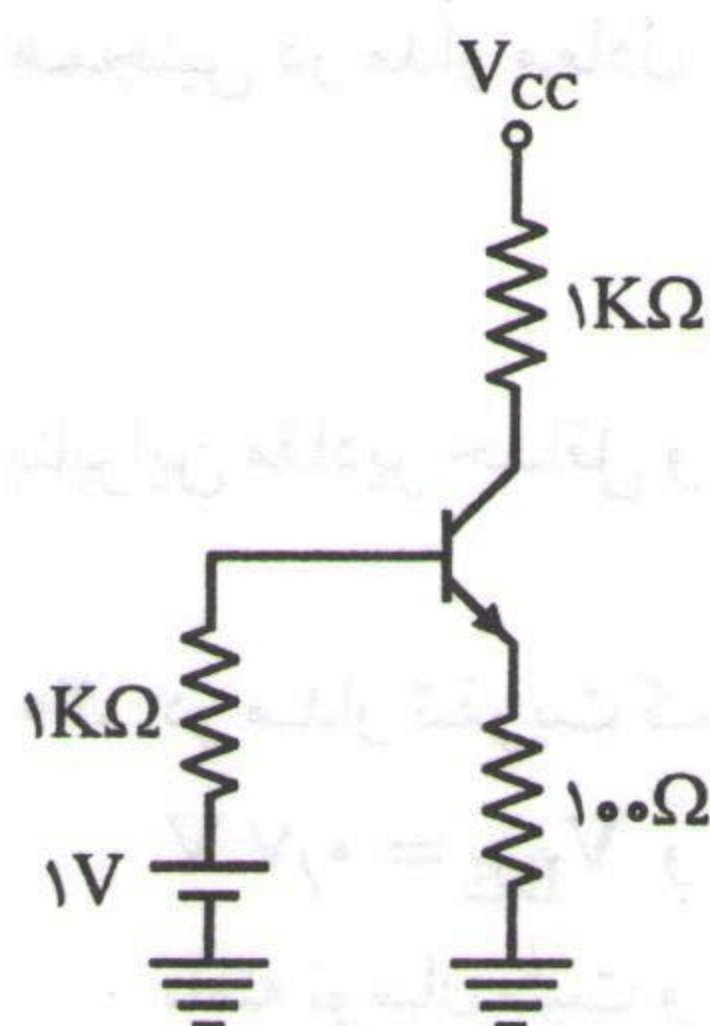
۲۱. در مدار شکل ۴-۴۹، با فرض $V_{BE(on)} = 0.7V$ و $50 < \beta < 200$ ، تغییرات

جریان کلکتور را محاسبه کنید.

$$\text{حل: KVL CBE: } 12 = 60 I_B + V_{BE(on)} + 1 \times (I_C + I_B)$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \Rightarrow I_C = \frac{11.3}{1 + 61/\beta}$$

$$50 < \beta < 200 \Rightarrow 5.1mA < I_C < 8.66mA \Rightarrow \Delta I_C = 3.56mA$$



شکل ۴-۵۰

۲۲. در مدار شکل ۴-۵۰، با فرض $50 < \beta < 200$ ، $25^\circ\text{C} < T < 75^\circ\text{C}$ ، $V_{BE} = 0.7\text{V}$ و $I_{CBO} = 0.1\mu\text{A}$ در 25°C ، $V_{CC} = 6 \pm 0.2\text{V}$ ، جریان کلکتور، ضرایب پایداری و تغییرات جریان کلکتور را در بدترین حالت محاسبه کنید.

حل: جریان I_C عبارت است از

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO}$$

از KVL در حلقه BE داریم

$$V_{BB} = R_B I_B + V_{BE} + R_E (I_C + I_B)$$

از این معادله I_B را به دست آورده و در معادله I_C قرار می‌دهیم. بنابراین

$$I_C = \frac{\beta (V_{BB} - V_{BE})}{R_B + (1 + \beta) R_E} + \left[\frac{(1 + \beta) (R_E + R_B)}{R_B + (1 + \beta) R_E} \right] I_{CBO}$$

$$S_I \approx \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} = \frac{(1 + \beta) (R_B + R_E)}{R_B + (1 + \beta) R_E}, \quad S_V \approx \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{-\beta}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

S_β نیز با صرف نظر از جمله شامل I_{CBO} برابر است با

$$S_\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta \beta} = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \left[\frac{R_B + R_E}{R_B + (1 + \beta_2) R_E} \right]$$

با جایگذاری مقادیر عددی و در نظر گرفتن $\beta_{av} = 125$ داریم

$$S_I = 10.19, \quad S_V = -9.26 \text{ mA/V}$$

$$I_{C1} \approx 2.76 \text{ mA} \Rightarrow S_\beta = 2.88 \times 10^{-3} \text{ mA}$$

$$\Delta I_{CBO} = I_{CBO}(75^\circ\text{C}) - I_{CBO}(25^\circ\text{C}) = I_{CBO}(25^\circ) (2^{\Delta T/10} - 1)$$

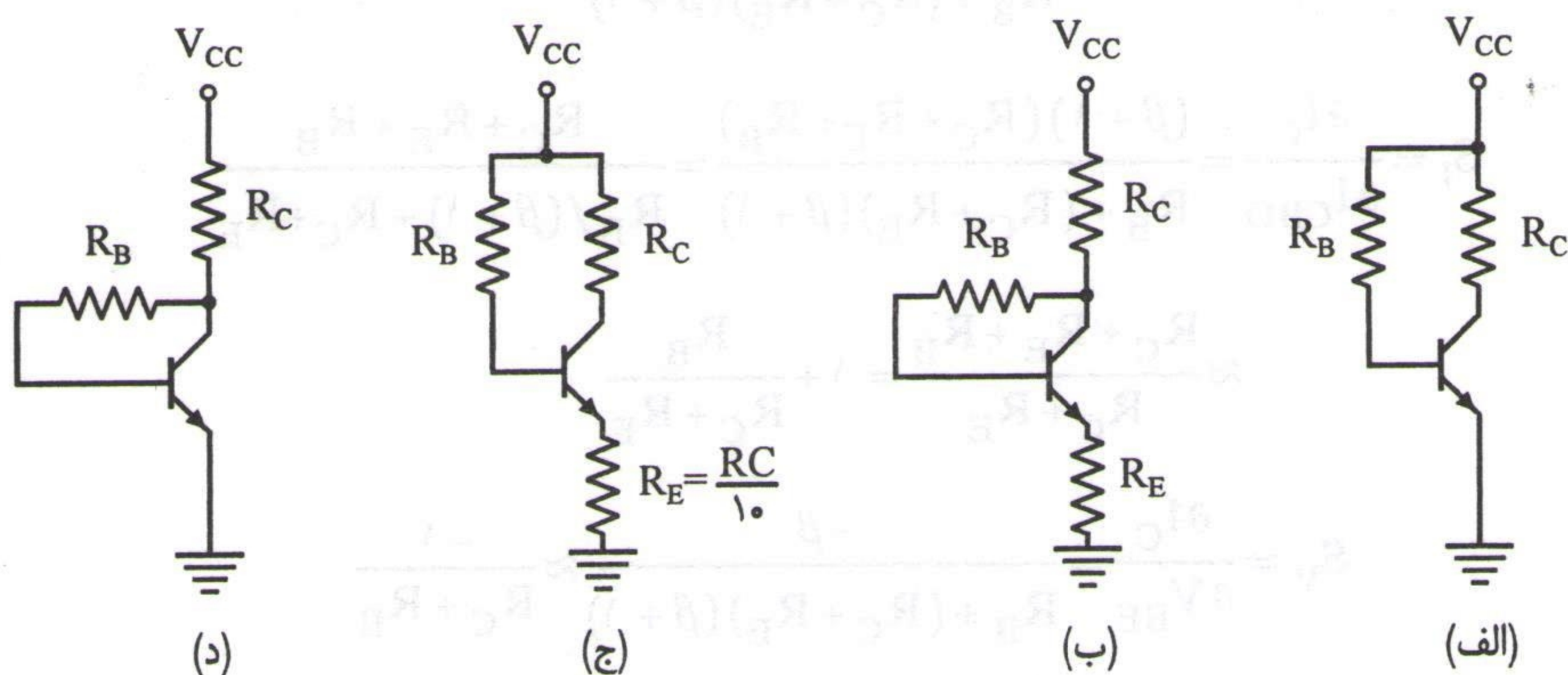
$$= 0.31 \times 10^{-3} \text{ mA}$$

$$\Delta V_{BE} = -2.5 \times 10^{-3} (T_2 - T_1) = -0.125 \text{ V}, \quad \Delta \beta = \beta_2 - \beta_1 = 150$$

بنابراین میزان تغییرات جریان کلکتور برابر است با

$$\Delta I_C = S_I \Delta I_{CBO} + S_V \Delta V_{BE} + S_\beta \Delta \beta = 1.59 \text{ mA}$$

۲۳. در هر یک از مدارهای شکل ۴-۵۱ ضرایب پایداری S_I ، S_V و S_β را محاسبه کنید.



شکل ۴-۵۱

ه) برای مدار شکل ۴-۵۱-د، به ازای $V_{CC} = 20V$ ، $R_C = 1K\Omega$ و $V_{BE} = 0.7V$ مقدار R_B را طوری تعیین کنید که $I_{CQ} = 10mA$ شود. اگر I_{CBO} در دمای $25^\circ C$ برابر $1\mu A$ باشد، تغییرات نقطه کار را به ازای $50 < \beta < 200$ و $25^\circ C < T < 100^\circ C$ به دست آورید.

حل: الف) جریان I_C در این مدار برابر است با

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO} = \beta \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \right) + (\beta + 1) I_{CBO}$$

$$S_I = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} = (\beta + 1), \quad S_V = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = -\frac{\beta}{R_B}$$

$$S_\beta = \frac{\partial I_C}{\partial \beta} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} + I_{CBO} \approx \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

ب) در این مدار جریان در مقاومت R_C برابر $I_E = I_C + I_B$ می باشد و داریم

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO}, \quad I_E = (\beta + 1) (I_B + I_{CBO})$$

$$\text{KVL: } V_{CC} = R_C I_E + R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E = (R_C + R_E) I_E + R_B I_B + V_{BE}$$

با جایگذاری مقدار I_E بر حسب I_B در رابطه فوق، جریان I_B برابر است با

$$I_B = \frac{(V_{CC} - V_{BE}) - (R_C + R_E)(\beta + 1) I_{CBO}}{R_B + (R_C + R_E)(\beta + 1)}$$

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO}$$

$$= \frac{\beta(V_{CC} - V_{BE}) + (\beta + 1)(R_C + R_E + R_B)I_{CBO}}{R_B + (R_C + R_E)(\beta + 1)}$$

$$S_I = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} = \frac{(\beta + 1)(R_C + R_E + R_B)}{R_B + (R_C + R_E)(\beta + 1)} = \frac{R_C + R_E + R_B}{R_B/(\beta + 1) + R_C + R_E}$$

$$\approx \frac{R_C + R_E + R_B}{R_C + R_E} = 1 + \frac{R_B}{R_C + R_E}$$

$$S_V = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{-\beta}{R_B + (R_C + R_E)(\beta + 1)} \approx \frac{-1}{R_C + R_E}$$

برای محاسبه S_β با فرض I_{CBO} ناچیز، عبارتهای I_{C_1} و I_{C_2} را به ازای β_1 و β_2 بر هم تقسیم می‌کنیم.

$$\frac{I_{C_2}}{I_{C_1}} = \frac{\beta_2 [R_B + (R_E + R_C)(\beta_1 + 1)]}{\beta_1 [R_B + (R_E + R_C)(\beta_2 + 1)]}$$

حال اگر از طرفین عبارت فوق یک واحد کم کنیم داریم

$$\frac{\Delta I_C}{I_{C_1}} = \frac{\Delta \beta (R_B + R_E + R_C)}{\beta_1 [R_B + (R_E + R_C)(\beta_2 + 1)]}$$

$$\Rightarrow S_\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta \beta} = \frac{I_{C_1} (R_B + R_E + R_C)}{\beta_1 [R_B + (R_E + R_C)(\beta_2 + 1)]}$$

(ج) جریان I_C عبارت است از

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO}$$

از KVL در حلقه BE داریم

$$V_{CC} - V_{BE} = R_B I_B + R_E (I_C + I_B)$$

اگر از این معادله I_B را به دست آورده و در معادله I_C قرار دهیم، داریم

$$I_C = \frac{\beta(V_{CC} - V_{BE})}{R_B + (1 + \beta)R_E} + \left[\frac{(1 + \beta)(R_E + R_B)}{R_B + (1 + \beta)R_E} \right] I_{CBO}$$

$$S_I \approx \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} = (1 + \beta) \frac{R_B + R_E}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

$$R_E = 0.1 R_C \Rightarrow S_I = (1 + \beta) \frac{R_B + 0.1 R_C}{R_B + 0.1(1 + \beta)R_C}$$

$$S_V \simeq \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{-\beta}{R_B + (1+\beta)R_E}$$

$$R_E = 0,1 R_C \Rightarrow S_V = \frac{-\beta}{R_B + 0,1(1+\beta)R_C}$$

برای محاسبه S_β می توان از جمله شامل I_{CBO} در مقابل جمله اول صرف نظر نمود. بنابراین

$$S_\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta \beta} = \frac{I_{C_2} - I_{C_1}}{\beta_2 - \beta_1} = \frac{I_{C_1}}{\beta_1} \left[\frac{R_B + R_E}{R_B + (1+\beta_2)R_E} \right]$$

$$R_E = 0,1 R_C \Rightarrow S_\beta = \frac{I_{C_1}}{\beta_1} \left[\frac{R_B + 0,1 R_C}{R_B + 0,1(1+\beta_2)R_C} \right]$$

(د) این مسأله حالت خاص بند (ب) با $R_E = 0$ می باشد. بنابراین از نتایج بند (ب) داریم

$$S_I = \frac{R_C + R_B}{R_C + R_B / (1+\beta)}, \quad S_V = \frac{-\beta}{R_B + (1+\beta)R_C}, \quad S_\beta = \frac{I_{C_1}(R_C + R_B)}{\beta_1 [R_B + (\beta_2 + 1)R_C]}$$

ملاحظه می شود در این حالت S_I و S_V هر دو بزرگ شده و در نتیجه پایداری نقطه کار کاهش می یابد.

$$V_{CC} = R_C(I_B + I_C) + R_B I_B + V_{BE}, \quad I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad (ه)$$

$$I_C = 10 \text{ mA}, \quad \beta = \beta_{av} = 125 \Rightarrow R_B = 115,25 \text{ K}\Omega$$

از نتایج بند (د) داریم

$$S_I = \frac{R_C + R_B}{R_C + R_B / (1+\beta)} = 60,72$$

$$S_V = \frac{-\beta}{R_B + (1+\beta)R_C} = -0,518 \text{ mA/V}$$

$$S_\beta = \frac{I_{C_1}(R_C + R_B)}{\beta_1 [R_B + (1+\beta_2)R_C]}, \quad I_{C_1} = 5,8 \text{ mA} \Rightarrow S_\beta = 0,43 \text{ mA}$$

$$\Delta I_{CBO} = I_{CBO}(100^\circ\text{C}) - I_{CBO}(25^\circ\text{C}) = I_{CBO}(25^\circ\text{C})[2^{\Delta T/10} - 1] = 0,18 \text{ mA}$$

$$\Delta V_{BE} = -2,5 \times 10^{-3} \Delta T = -0,1875 \text{ V}, \quad \Delta \beta = \beta_2 - \beta_1 = 150$$

بنابراین تغییرات جریان نقطه کار برابر است با

$$\Delta I_C = S_I \Delta I_{CBO} + S_V \Delta V_{BE} + S_\beta \Delta \beta \approx 17,5 \text{ mA}$$