به نام خدا

الکترونیک(۱)

مدرس:
میریوسفی
دانشگاه فنی و حرفه ای البرز

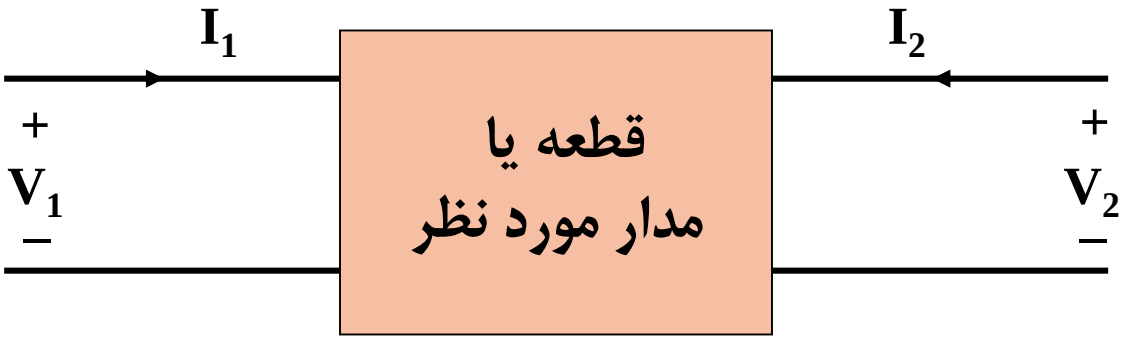
فصل ششم

تقویت کننده های ترانزیستوری در فرکانس پایین

طراحی مدارهای بایاس ترانزیستور

- یادآوری دو قطبی
- مدل هیبرید ترانزیستور BJT
- تقویت کننده امیتر مشترک
- تقویت کننده کلکتور مشترک
- تقویت کننده بیس مشترک
- قضیه میلر
- تقویت کننده های چند طبقه
- زوج دارلینگتون
- مدار معادل پی ترانزیستور BJT

دو قطبی خطی و پارامترهای مهم آن



پارامترهای دو قطبی

Impedance
Z parameters

$$V_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2$$

$$V_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2$$

Admittance
Y parameters

$$I_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V2$$

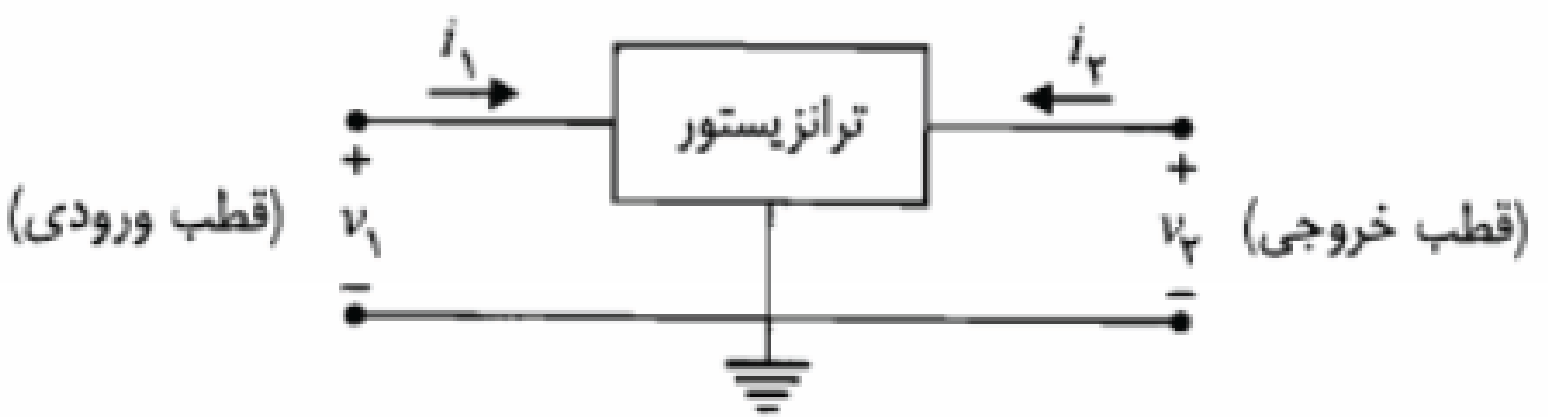
$$I_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2$$

Hybrid
H parameters

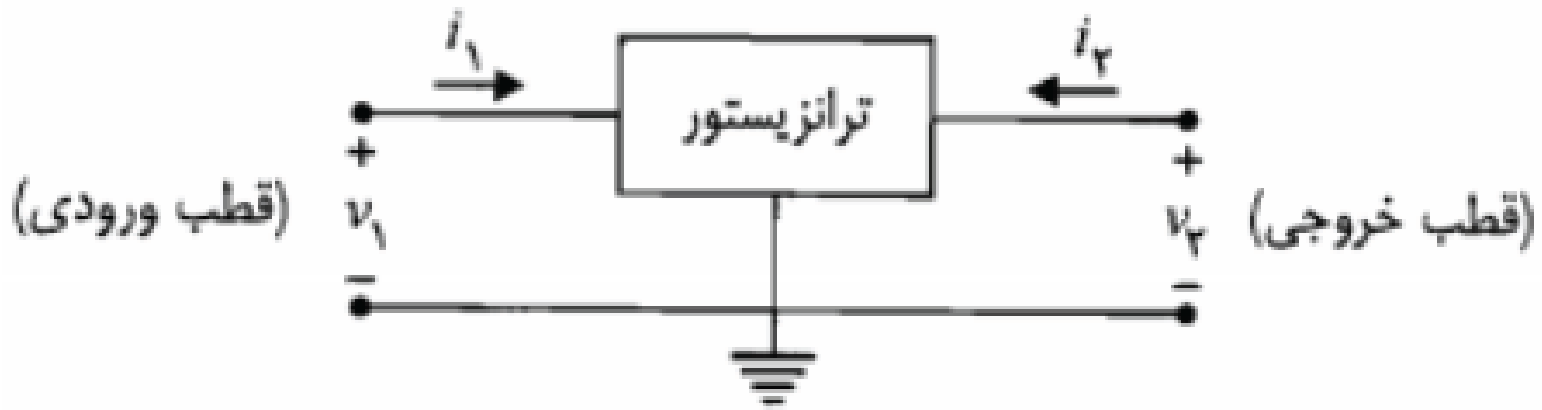
$$V1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2$$

$$I2 = h21I1 + h_{22}V2$$

مدل هیبرید h ترانزیستور



شکل ۶-۲: ترانزیستور به عنوان یک دوقطبی



شکل ۶-۲: ترانزیستور به عنوان یک دوقطبی

$$h_{11} = \left.\frac{v_1}{i_1}\right|_{v_2=0}$$ مقاومت ورودی در حالتی که خروجی اتصال کوتاه باشد.

$$h_{12} = \left.\frac{v_1}{v_2}\right|_{i_1=0}$$ بهره ولتاژ معکوس در حالتی که ورودی مدار باز باشد.

$$h_{21} = \left.\frac{i_2}{i_1}\right|_{v_2=0}$$ بهره جریان مستقیم وقتی که خروجی اتصال کوتاه باشد.

$$h_{22} = \left.\frac{i_2}{v_2}\right|_{i_1=0}$$ هدایت خروجی در حالتی که ورودی مدار باز باشد.

$h_{11} = \left.\frac{v_1}{i_1}\right|_{v_2=0}$ مقاومت ورودی در حالتی که خروجی اتصال کوتاه باشد.

$h_{12} = \left.\frac{v_1}{v_2}\right|_{i_1=0}$ بهره ولتاژ معکوس در حالتی که ورودی مدار باز باشد.

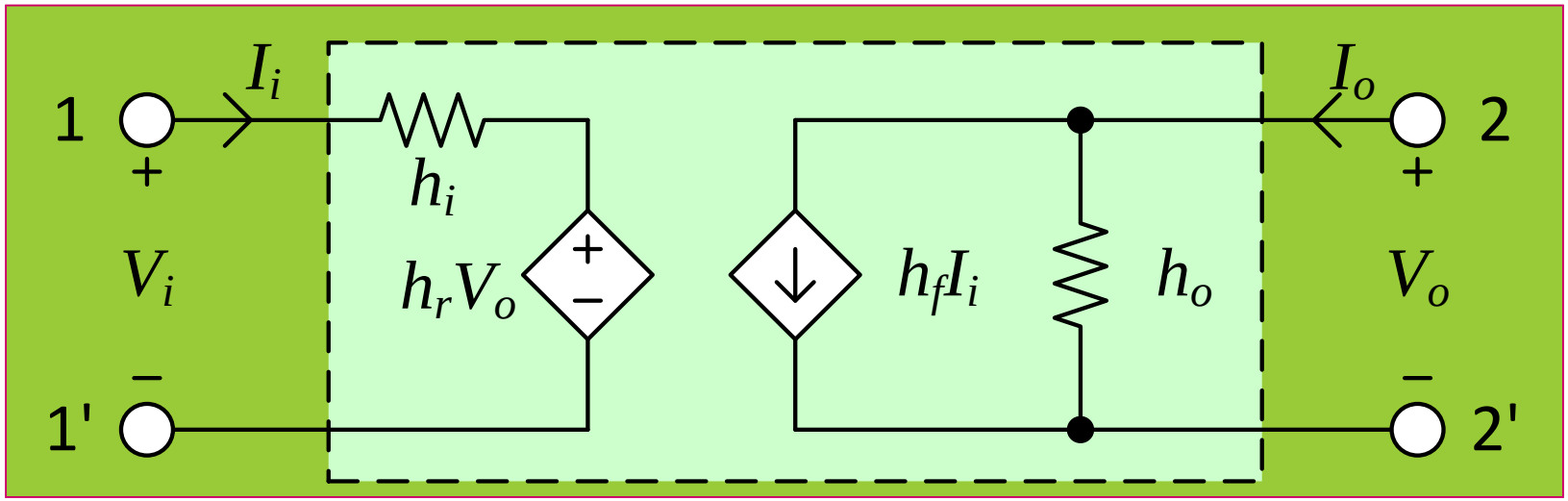
$h_{21} = \left.\frac{i_2}{i_1}\right|_{v_2=0}$ بهره جریان مستقیم وقتی که خروجی اتصال کوتاه باشد.

$h_{22} = \left.\frac{i_2}{v_2}\right|_{i_1=0}$ هدایت خروجی در حالتی که ورودی مدار باز باشد.

		Condition
h_i	Input resistance	Output shorted
h_r	Voltage feedback ratio	Input open
h_f	Forward current gain	Output shorted
h_o	Output conductance	Input open

ورودی $h_i = h_{11}$ انتقال معکوس $h_r = h_{12}$

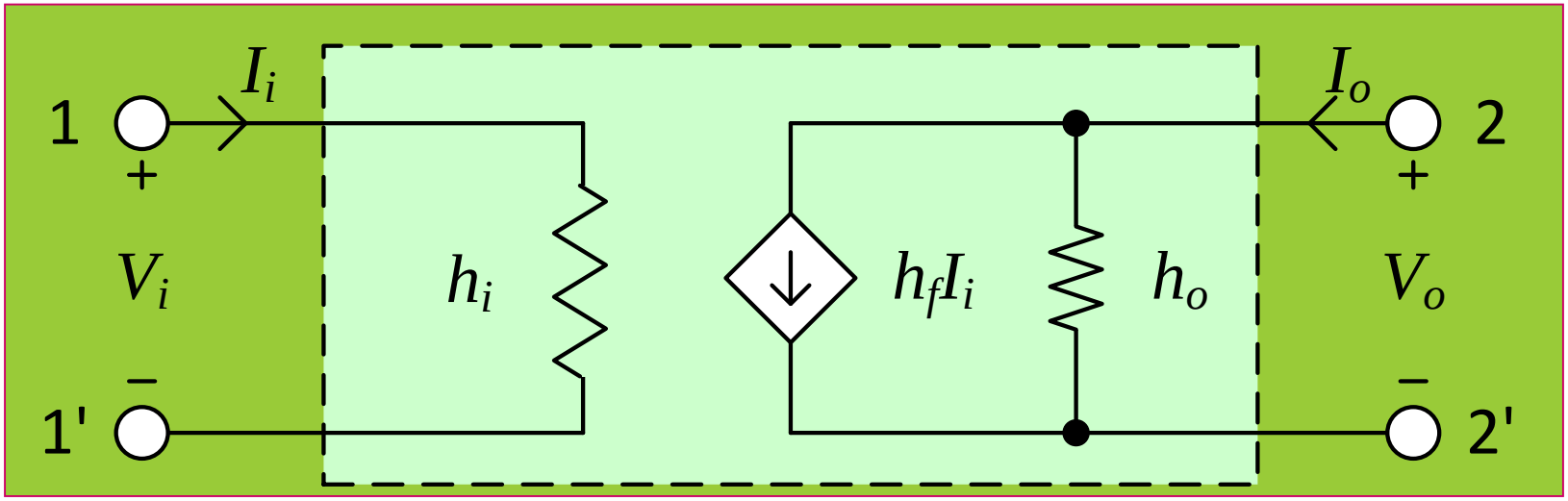
انتقال مستقیم $h_f = h_{21}$ خروجی $h_o = h_{22}$

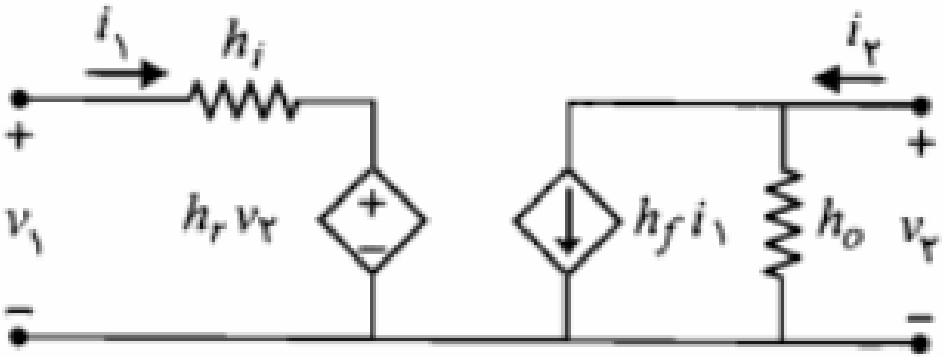


$$V_i = h_{11} I_i + h_{12} V_o = h_i I_i + h_r V_o$$

$$I_o = h_{21} I_i + h_{22} V_o = h_f I_i + h_o V_o$$

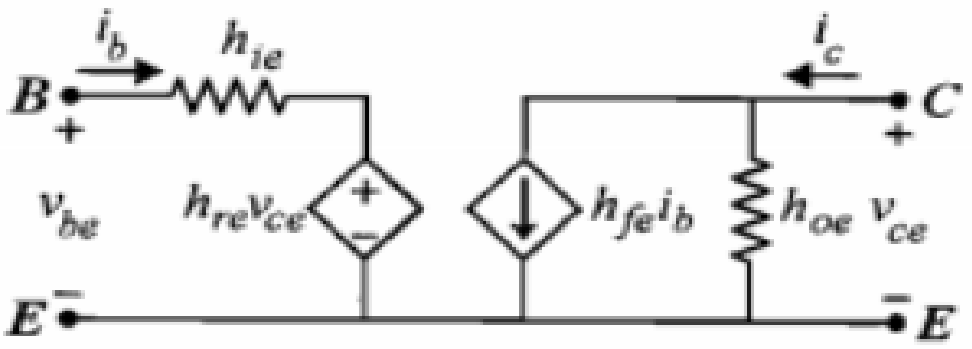
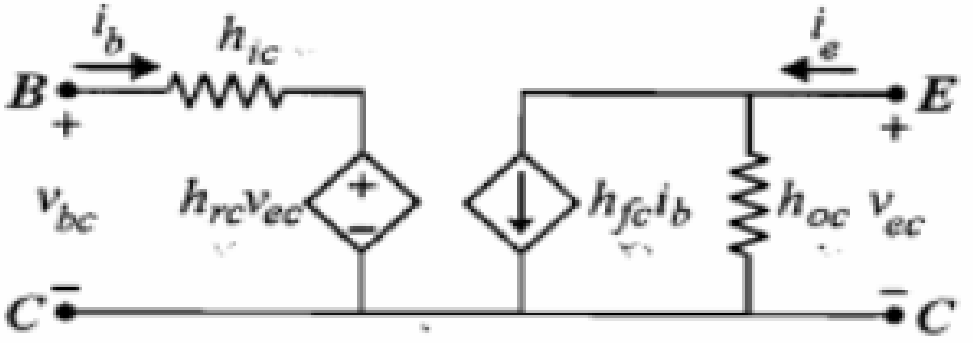
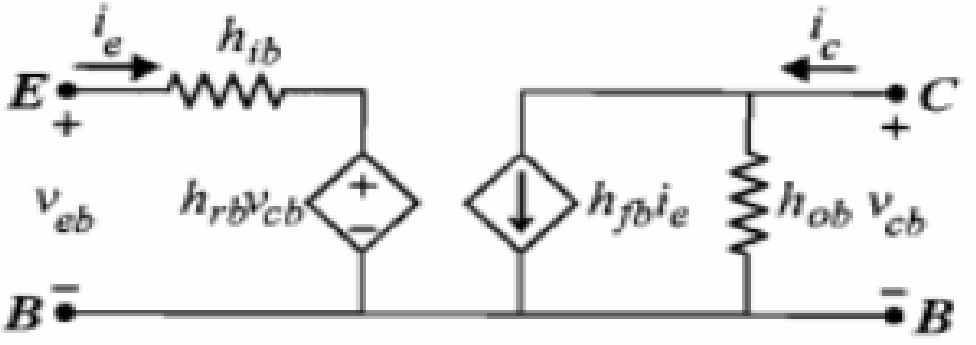
I_i
V_i
Linear Two port Device
I_o
V_o


1
1'
2
2'
I_i
I_o
+
V_i
–
+
V_o
–
h_i
$h_f I_i$
h_o



شکل ۶-۳: مدل هیبرید ترانزیستور در فرکانسهای پایین

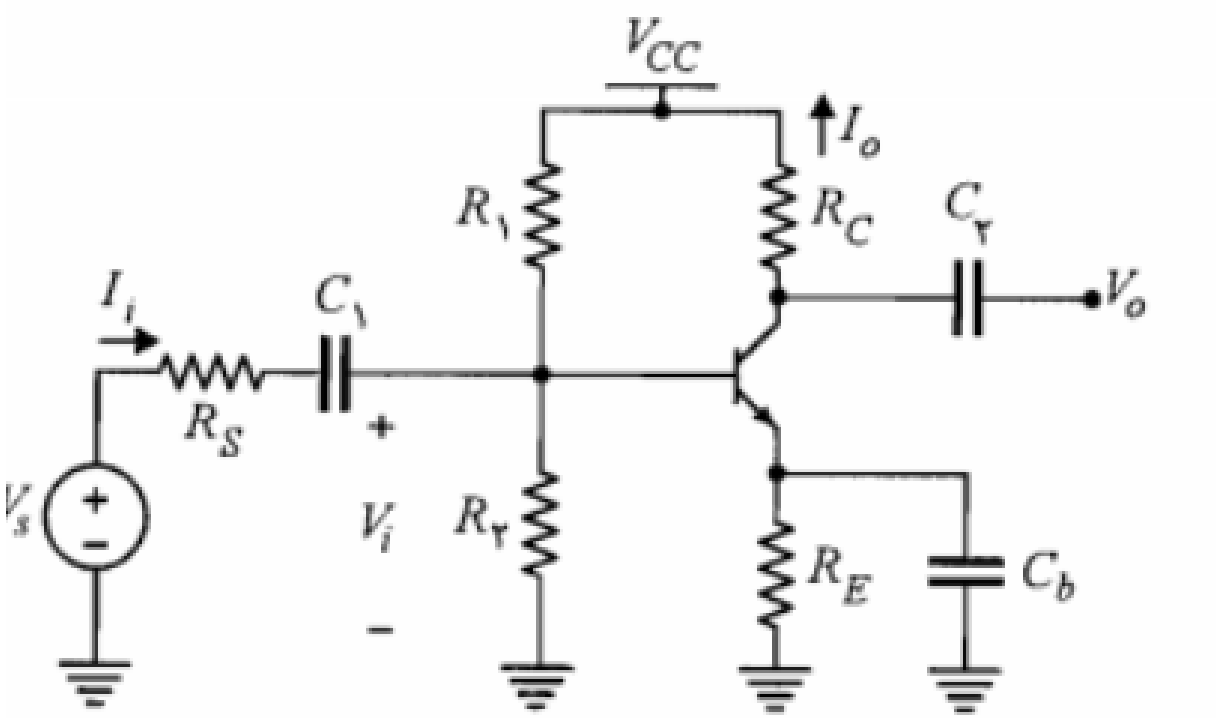
به اندیسهای فوق اندیس دومی هم جهت مشخص نمودن نوع ترکیب مدار اضافه می‌شود. مثلاً h_{ie}، h_{fe} و . . . برای مدار امیتر مشترک؛ h_{ic}، h_{fc} و . . . برای مدار کلکتور مشترک؛ h_{ib}، h_{fb} و . . . برای مدار بیس مشترک به‌کار می‌روند.

معادلات سیگنال کوچک	مدل هیبرید
CE $v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$ $i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce}$	
CC $v_{bc} = h_{ic} i_b + h_{rc} v_{ec}$ $i_e = h_{fc} i_b + h_{oc} v_{ec}$	
CB $v_{eb} = h_{ib} i_e + h_{rb} v_{cb}$ $i_c = h_{fb} i_e + h_{ob} v_{cb}$	

جدول ۶-۲: مقادیر پارامترهای h برای یک ترانزیستور نمونه ($I_{EQ} = ۱٫۳ mA$)

پارامتر	CE	CC	CB
h_i	۱۱۰۰ Ω	۱۱۰۰ Ω	۲۱٫۶ Ω
h_r	$۲٫۵\times۱۰^{-۴}$	≅ ۱	$۲٫۵\times۱۰^{-۴}$
h_f	۵۰	−۵۱	−۰٫۹۸
h_o	$۲۵\times۱۰^{-۶}\ \Omega^{-۱}$	$۲۵\times۱۰^{-۶}\ \Omega^{-۱}$	$۰٫۴۹\times۱۰^{-۶}\ \Omega^{-۱}$
$h_o^{-۱}$	۴۰ KΩ	۴۰ KΩ	۲٫۰۴ MΩ

تقویت کننده امیتر مشترک (Common Emitter: CE)



شکل ۶-۸: مدار یک تقویت‌کننده امیتر مشترک

$$h_{ie} = \left.\frac{\partial f_1}{\partial i_B}\right|_{V_{CQ}} = \left.\frac{\partial v_B}{\partial i_B}\right|_{V_{CQ}}$$

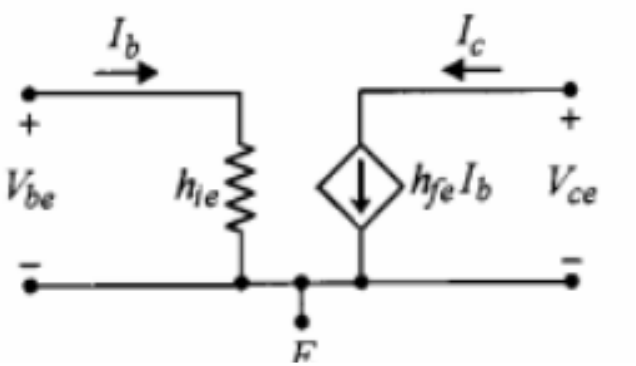
$$h_{re} = \left.\frac{\partial f_1}{\partial v_C}\right|_{I_{BQ}} = \left.\frac{\partial v_B}{\partial v_C}\right|_{I_{BQ}}$$

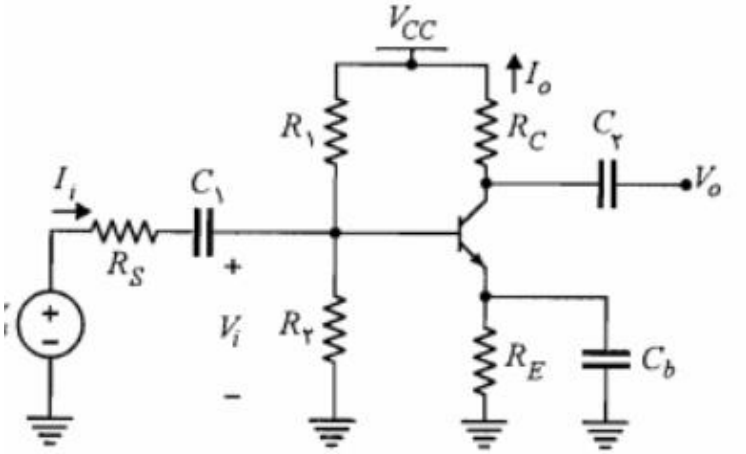
$$h_{fe} = \left.\frac{\partial f_2}{\partial i_B}\right|_{V_{CQ}} = \left.\frac{\partial i_C}{\partial i_B}\right|_{V_{CQ}}$$

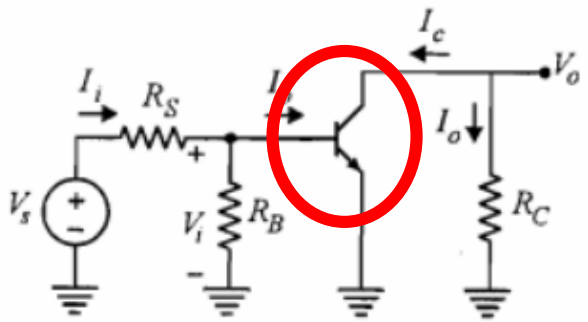
$$h_{oe} = \left.\frac{\partial f_2}{\partial v_C}\right|_{I_{BQ}} = \left.\frac{\partial i_C}{\partial v_C}\right|_{I_{BQ}}$$

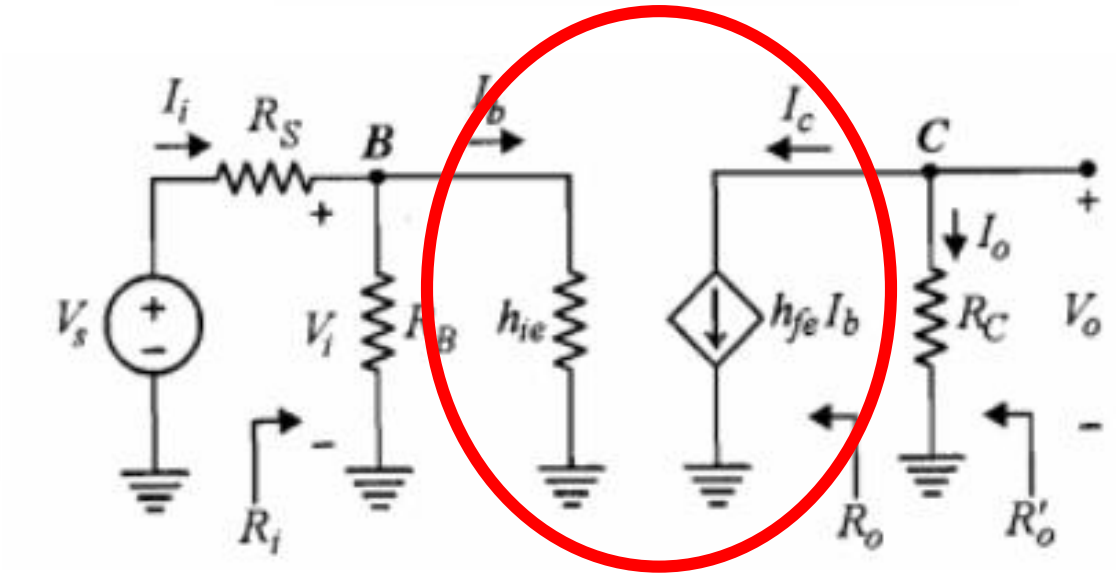
$$h_{ie} = \frac{V_T}{I_{BQ}} \cong \frac{\beta V_T}{I_{EQ}} \cong \frac{h_{fe} V_T}{I_{EQ}}$$

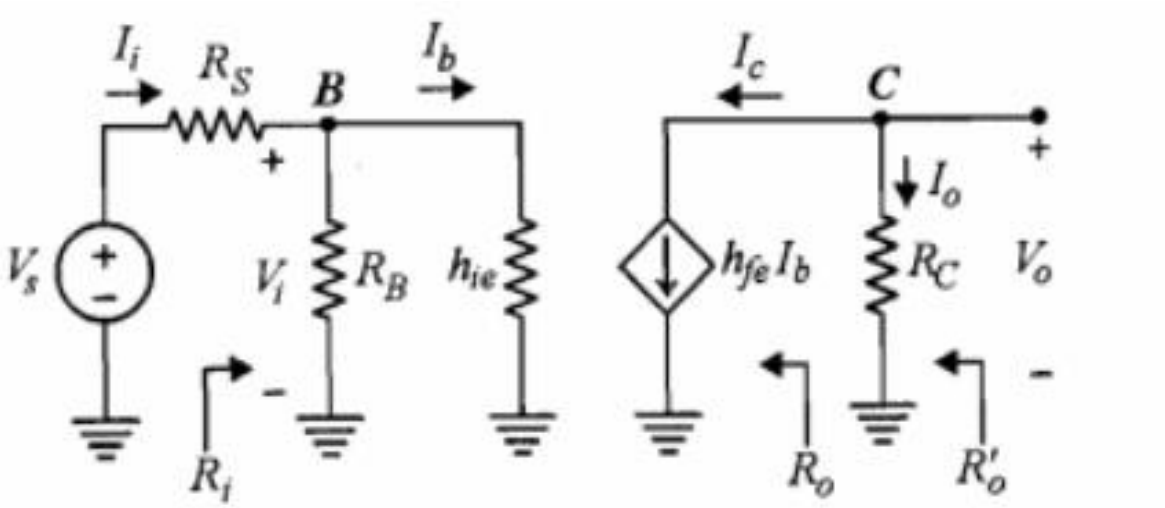
استفاده از مدل تقریبی هیبرید در تقویت کننده امیتر مشترک











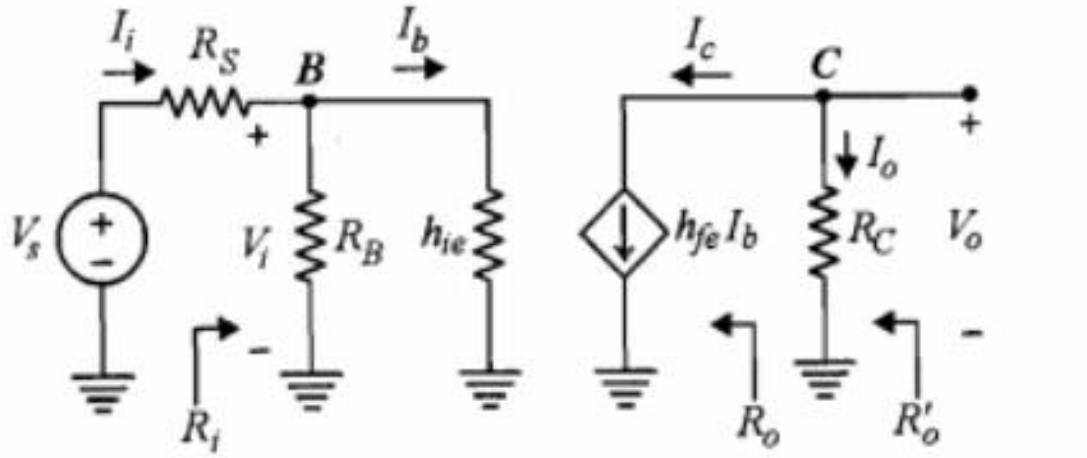
$$R_i = \frac{V_i}{I_i}$$

$$V_i = I_i (R_B \parallel h_{ie})$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_B \parallel h_{ie} = \frac{R_B h_{ie}}{R_B + h_{ie}}$$

صورتی که $R_B \gg h_{ie}$ باشد، خواهیم داشت

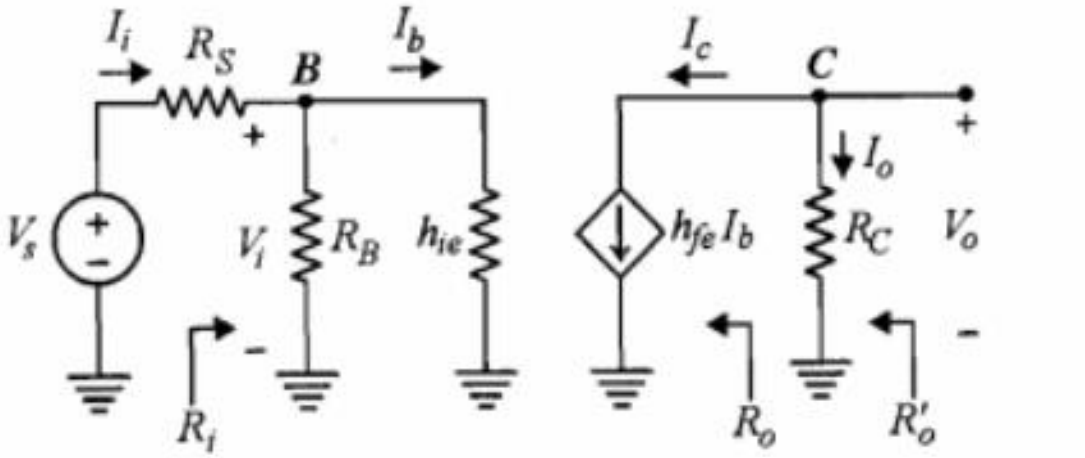
$$R_i \cong h_{ie}$$



$$A_I = \frac{I_o}{I_i} = \frac{-I_c}{I_i} = \frac{-I_c}{I_b}\frac{I_b}{I_i}$$

$$\frac{I_b}{I_i} = \frac{R_B}{R_B + h_{ie}}$$

$$A_I = \frac{-h_{fe} R_B}{R_B + h_{ie}}$$



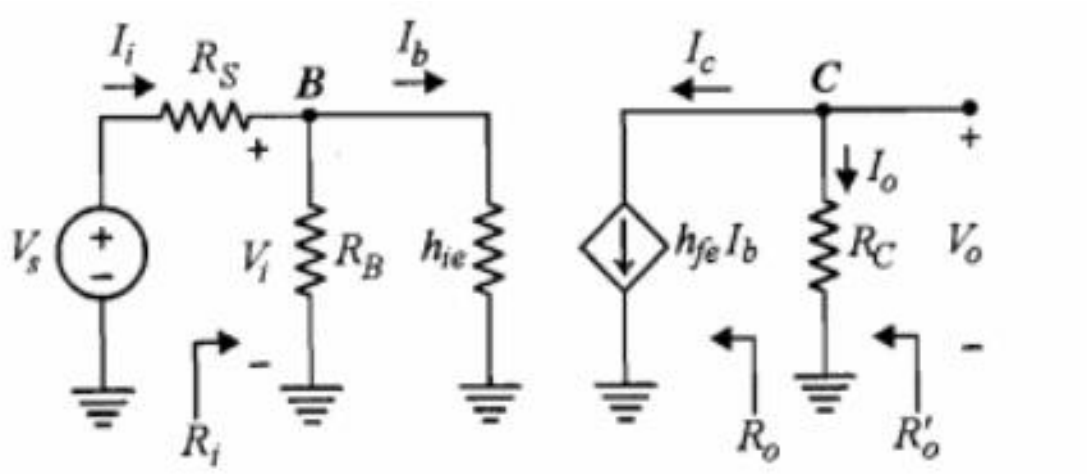
$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_C}{R_i}\frac{I_o}{I_i} = \frac{R_C}{R_i} A_I$$

$$A_V = \frac{-h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

$$A_{V_s} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o}{V_i}\frac{V_i}{V_s} = A_V \frac{V_i}{V_s}$$

$$\frac{V_i}{V_s} = \frac{R_i}{R_i + R_S}$$

$$A_{V_s} = \frac{A_V R_i}{R_i + R_S} = \frac{A_I R_C}{R_i + R_S}$$

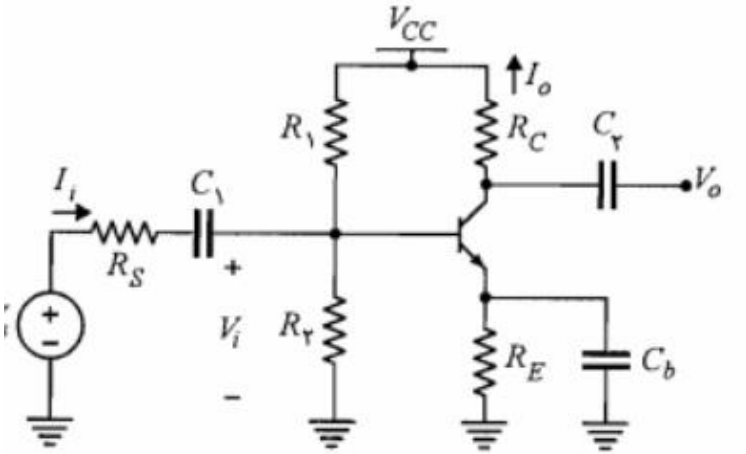


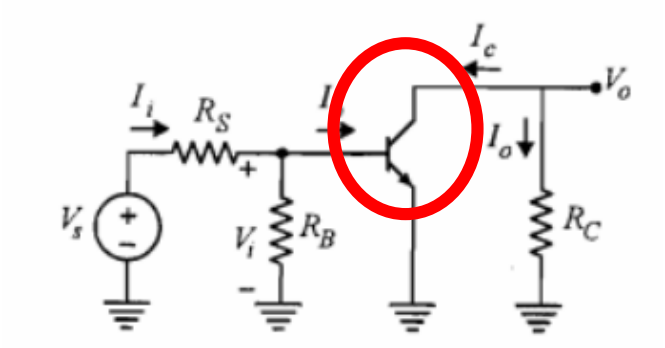
$$R_o = \frac{V_2}{I_2}$$

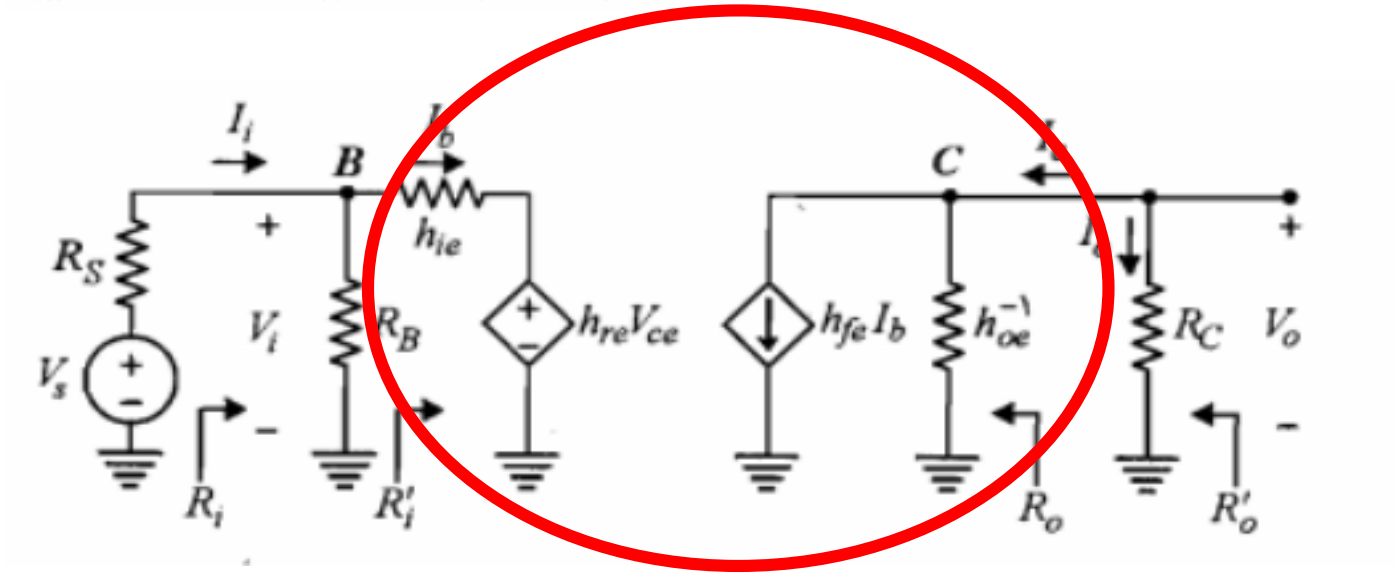
$$R_o = \frac{V_2}{0} = \infty$$

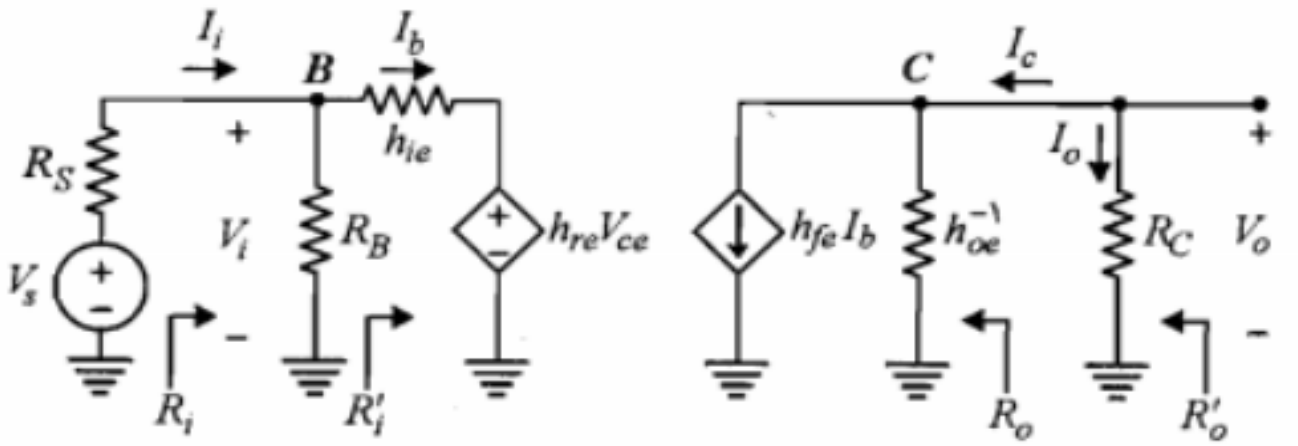
$$R'_o = R_o \| R_C = R_C$$

استفاده از مدل دقیق هیبرید در تقویت کننده امیتر مشترک







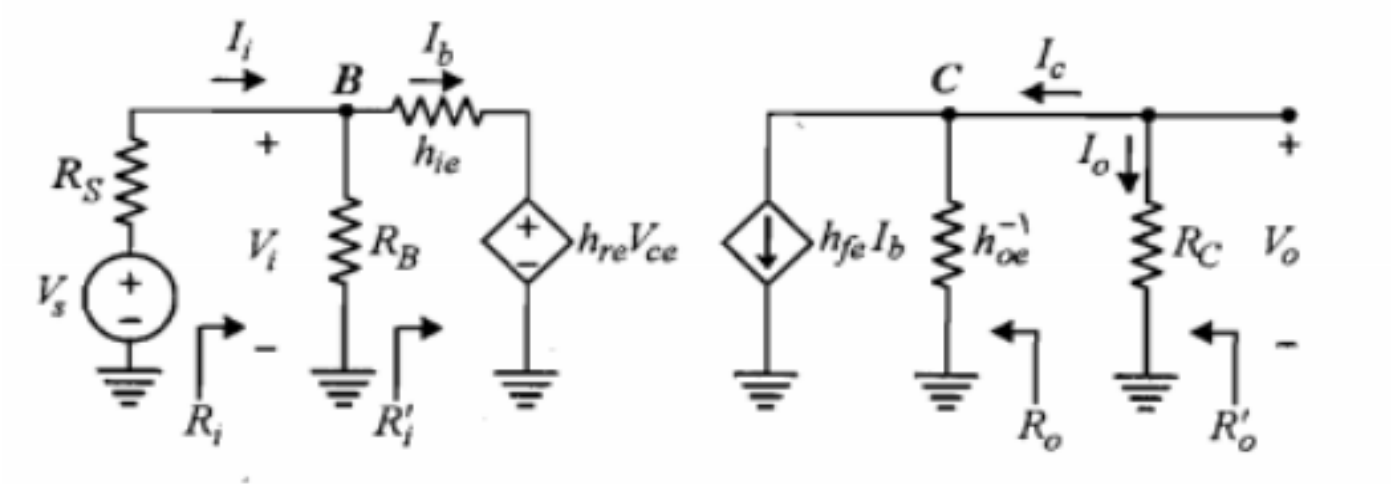


$$V_o = -h_{fe} I_b R_P = -h_{fe} I_b (R_C \| h_{oe}^{-1})$$

$$V_i = h_{ie} I_b + h_{re} V_{ce}$$

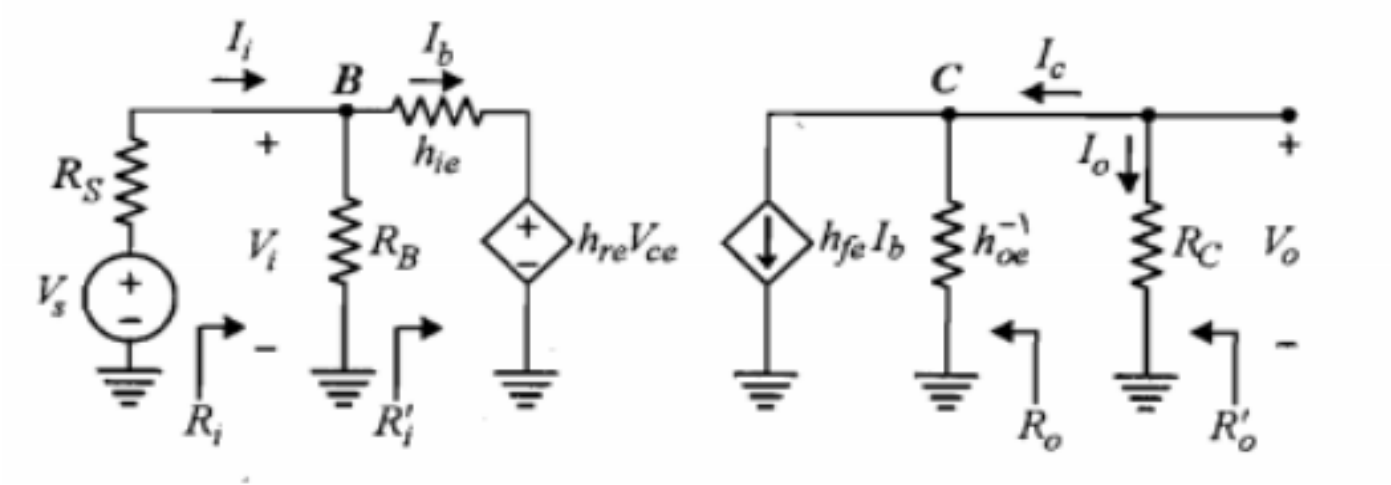
$$V_i = h_{ie} I_b + h_{re} V_o = I_b \left[h_{ie} - h_{re} h_{fe} (R_C \| h_{oe}^{-1}) \right]$$

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-h_{fe} (R_C \| h_{oe}^{-1})}{h_{ie} - h_{re} h_{fe} (R_C \| h_{oe}^{-1})}$$

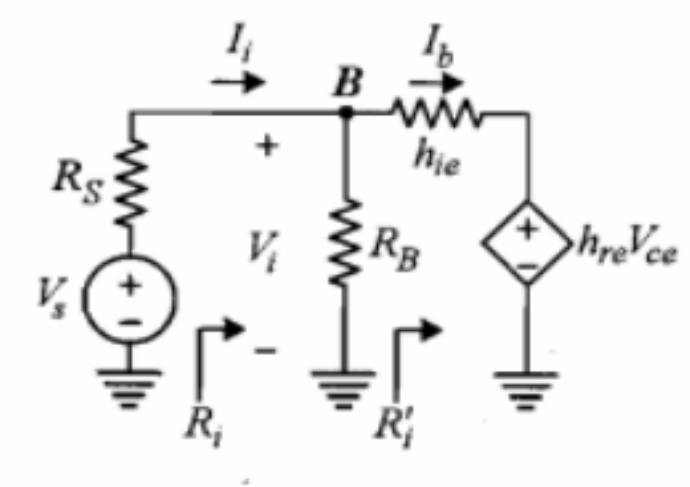


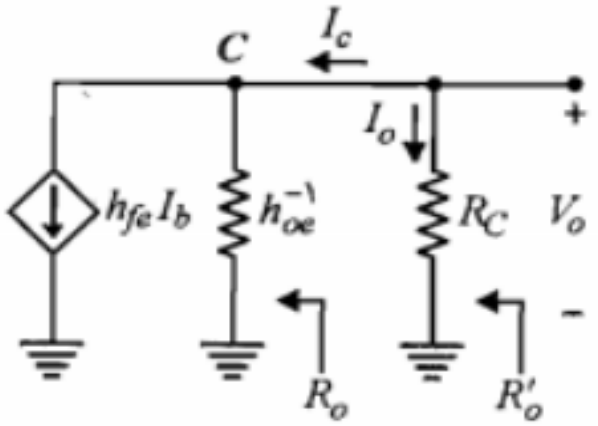
$$R_i = R_i' \| R_B$$

$$R_i' = \frac{V_i}{I_b} = h_{ie} - h_{re}h_{fe}(R_C \| h_{oe}^{-1})$$



$$A_I = A_V \frac{R_i}{R_C}$$





$$R_o = \frac{V_2}{I_2}$$

$$I_2 = h_{fe} I_b + h_{oe} V_2$$

$$I_b = \frac{-h_{re} V_2}{h_{ie} + R_S \| R_B}$$

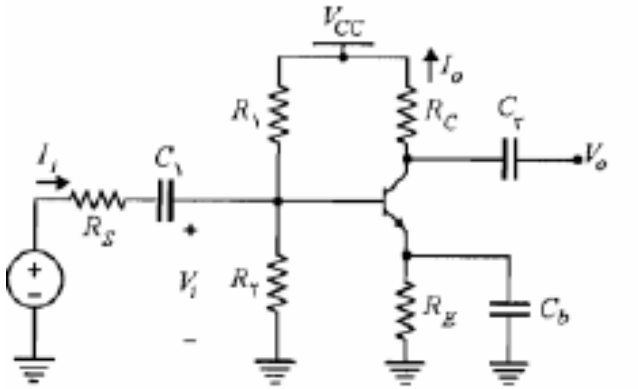
$$I_2 = \left(h_{oe} - \frac{h_{fe} h_{re}}{h_{ie} + R_S \| R_B} \right) V_2$$

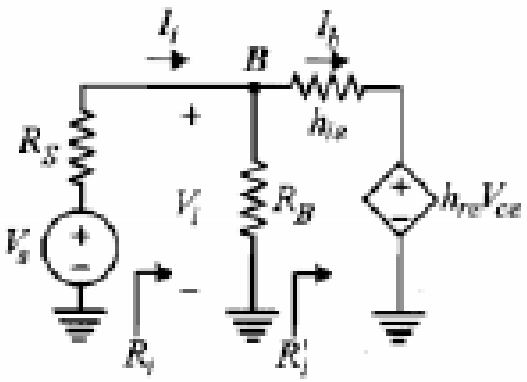
$$\frac{1}{R_o} = \frac{I_2}{V_2} = h_{oe} - \frac{h_{fe} h_{re}}{h_{ie} + R_S \| R_B}$$

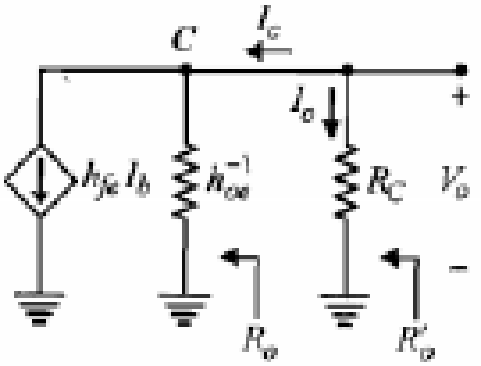
مثال ۶-۱: مدار شکل ۶-۱۲ را در نظر بگیرید. فرض کنید $R_C = ۱\ K\Omega$، $R_S = ۱۰۰\ \Omega$ و $R_B \gg h_{ie}$ باشد. با استفاده از پارامترهای ترانزیستور که در جدول ۶-۲ داده شده‌اند، مطلوب است

الف) محاسبه A_V، R_i، A_I، R_o و R_o'

ب) محاسبه کمیتهای فوق با صرف‌نظر از h_{re} و h_{oe} (مدل تقریبی)

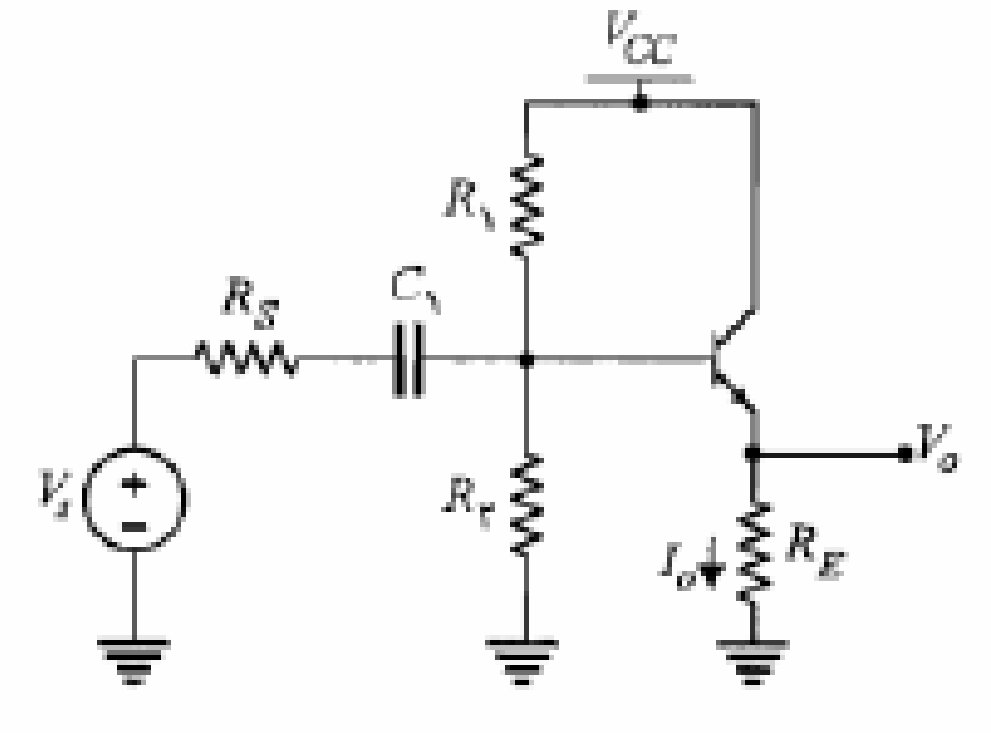




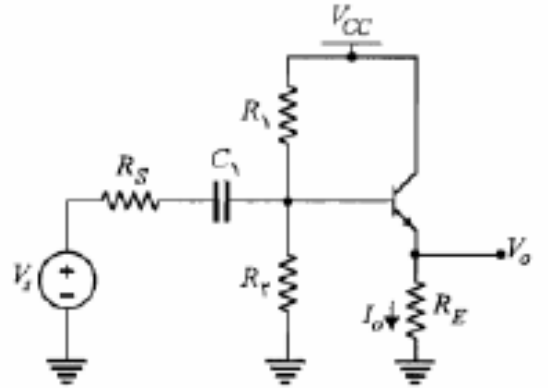


پارامتر	CE
h_i	۱۱۰۰ Ω
h_r	$۲٫۵\times۱۰^{-۴}$
h_f	۵۰
h_o	$۲۵\times۱۰^{-۶}\ \Omega^{-۱}$
$h_o^{-۱}$	۴۰ KΩ

تقویت کننده کلکتور مشترک (Common Collector: CC)

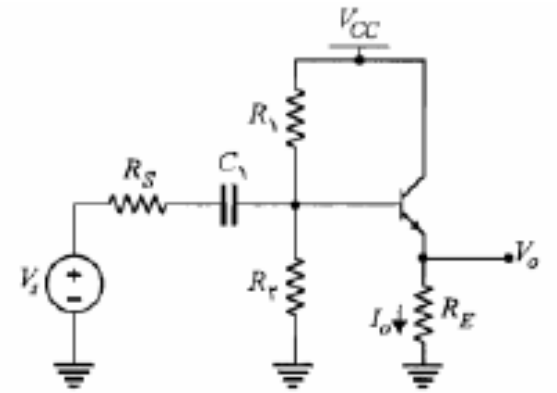


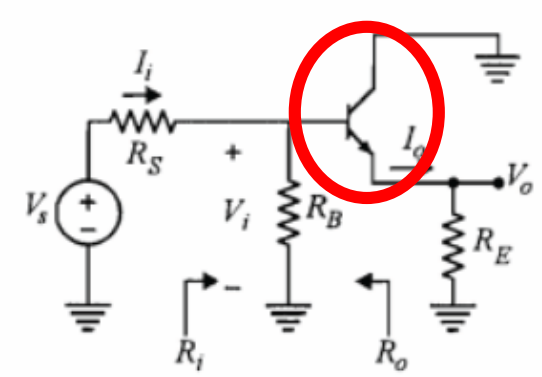
پارامترهای هیبرید تقویت کننده کلکتور مشترک (Common Collector: CC)

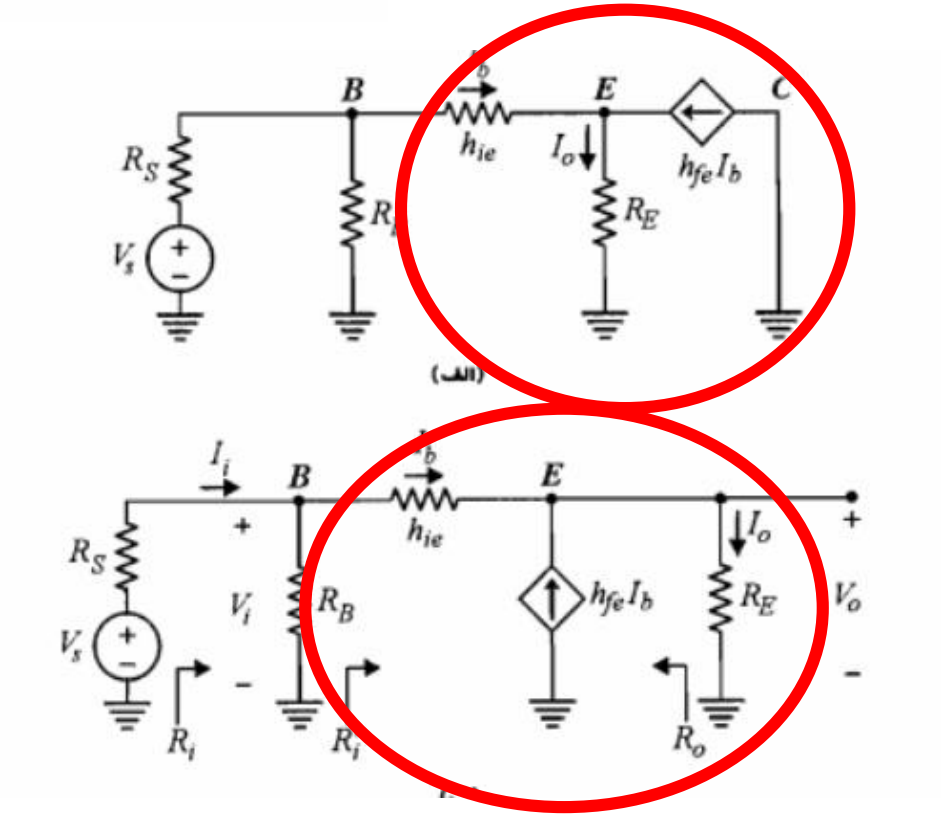


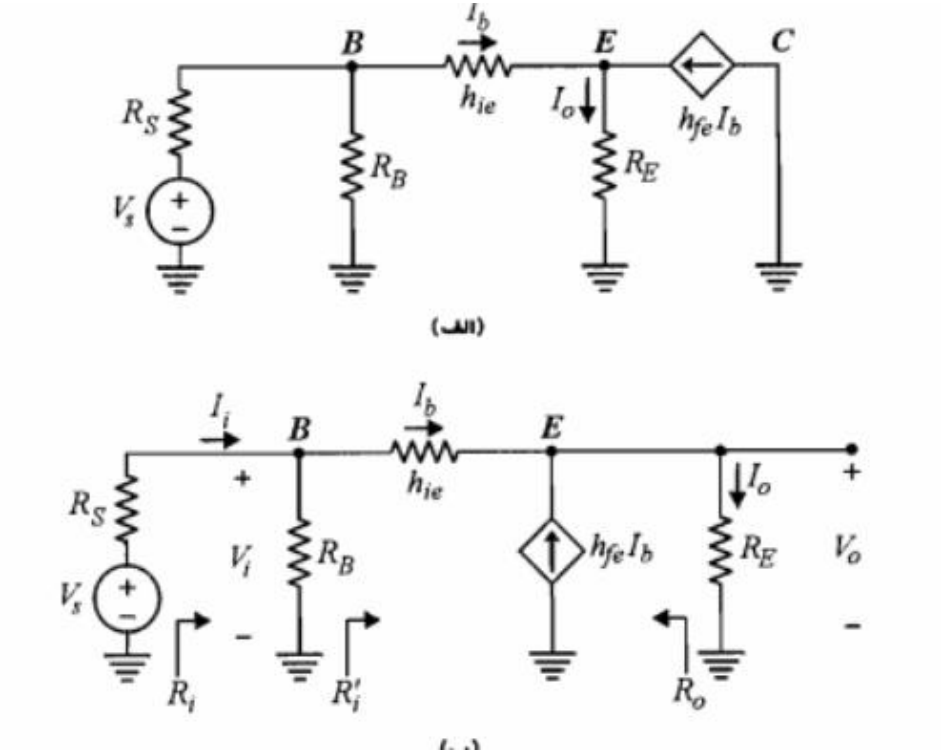
$$h_{oc} = \left.\frac{I_e}{V_{ec}}\right|_{I_b=0} \qquad h_{rc} = \left.\frac{V_{bc}}{V_{ec}}\right|_{I_b=0} \qquad h_{fc} = \left.\frac{I_e}{I_b}\right|_{V_{ec}=0} \qquad h_{ic} = \left.\frac{V_{bc}}{I_b}\right|_{V_{ec}=0}$$

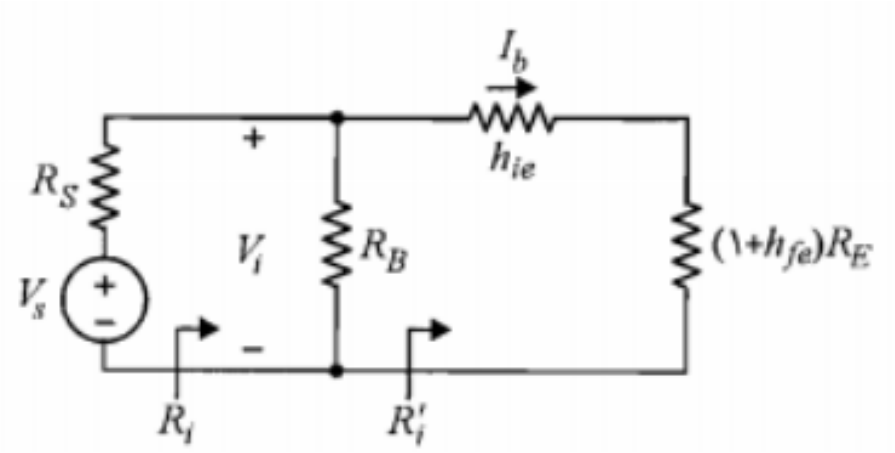
$h_{ic} = h_{ie}$	$h_{oc} = h_{oe}$
$h_{fc} = -(1 + h_{fe})$	$h_{rc} = 1 - h_{re}$

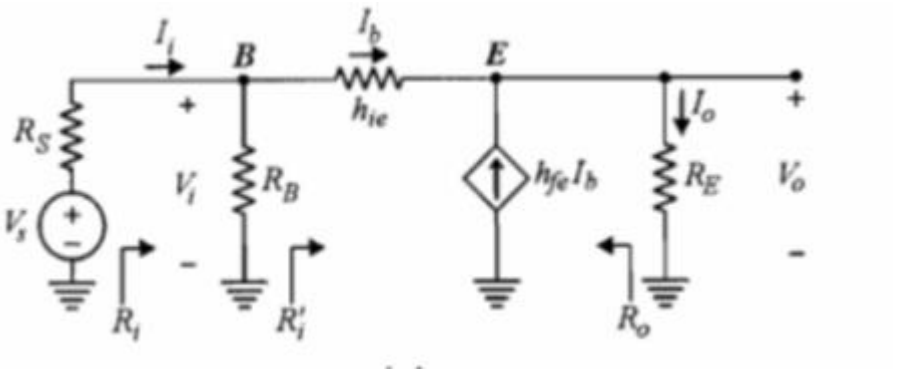

V_{CC}
R_1
R_S
C_1
V_s
R_2
I_o
R_E
V_o


I_i
R_S
V_s
V_i
R_B
I_o
R_E
V_o
R_i
R_o


B
E
C
h_{ie}
I_o
$h_{fe}I_b$
R_S
V_s
R_E
(الف)
I_i
R_B
V_i
R_i
R_o
V_o


B
E
C
I_b
h_{ie}
I_o
$h_{fe}I_b$
R_S
R_B
R_E
V_s
(الف)
I_i
V_i
V_o
R_i
R'_i
R_o


I_b
h_{ie}
R_S
V_s
V_i
R_B
$(1+h_{fe})R_E$
R_i
R'_i

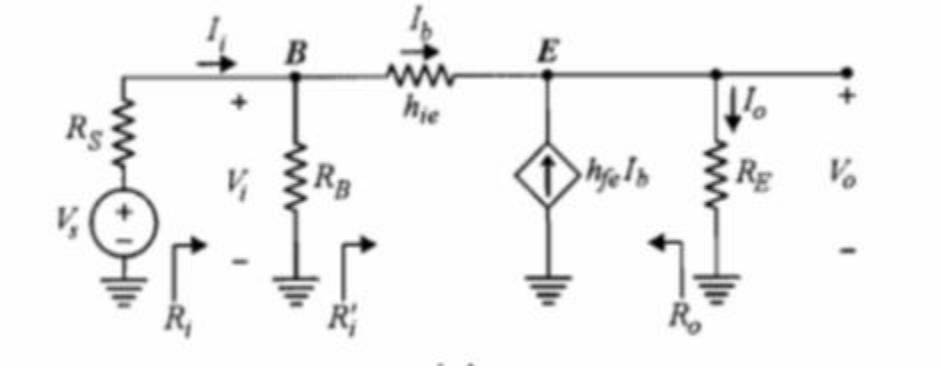


$$R_i' = V_i / I_b$$

$$V_i = h_{ie} I_b + (I_b + h_{fe} I_b) R_E = \left[h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E \right] I_b$$

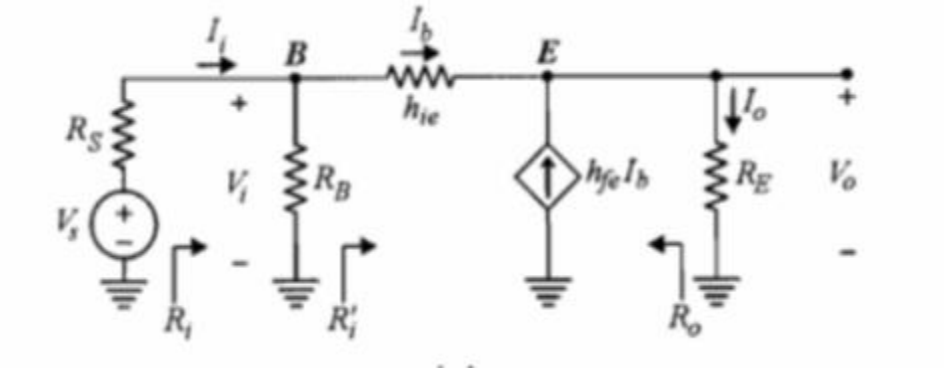
$$R_i' = \frac{V_i}{I_b} = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E$$

$$R_i = R_i' \parallel R_B$$

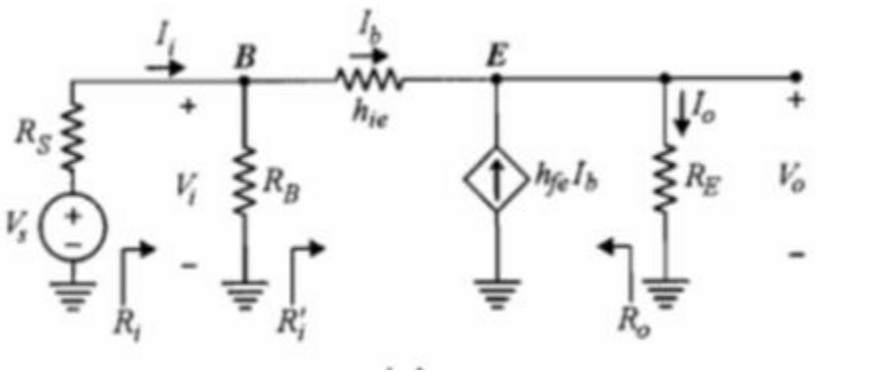


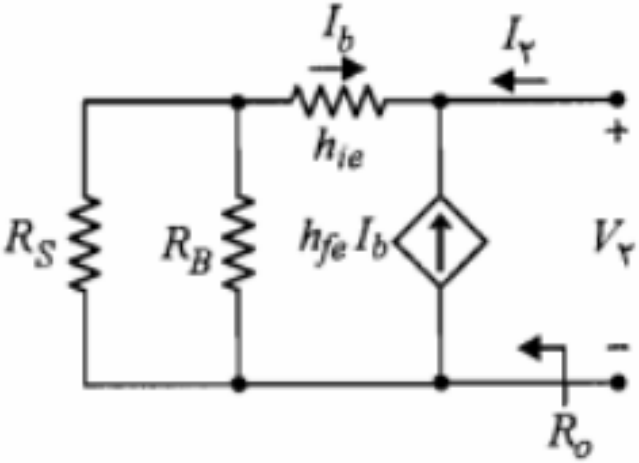
$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_E I_o}{\left[h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E\right] I_b} = \frac{(1 + h_{fe}) R_E}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E}$$

$$h_{ie} \ll (1 + h_{fe}) R_E$$



$$A_I = \frac{I_o}{I_i} = \frac{I_o}{I_b}\frac{I_b}{I_i} = (1 + h_{fe})\frac{R_B}{R_i' + R_B}$$



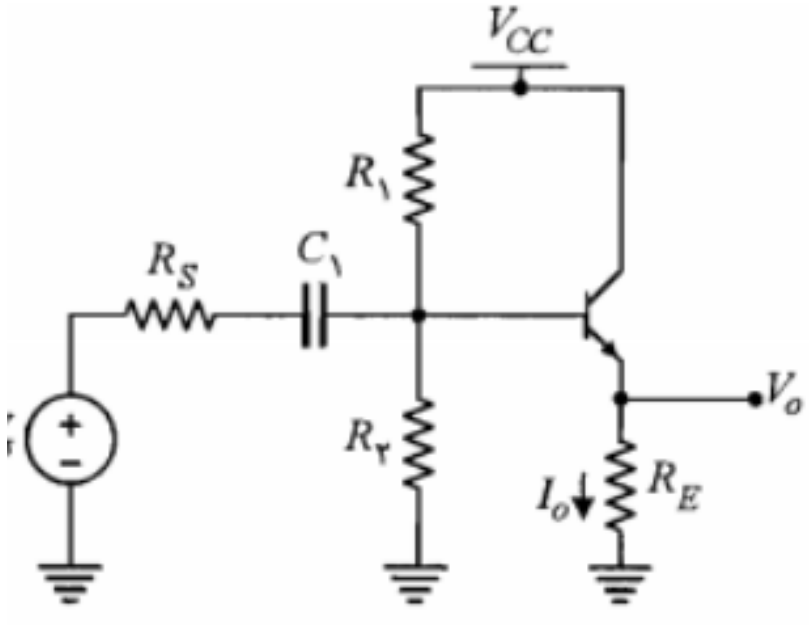


$$I_2 = -(1 + h_{fe})I_b$$

$$V_2 = -(h_{ie} + R_S \parallel R_B)I_b$$

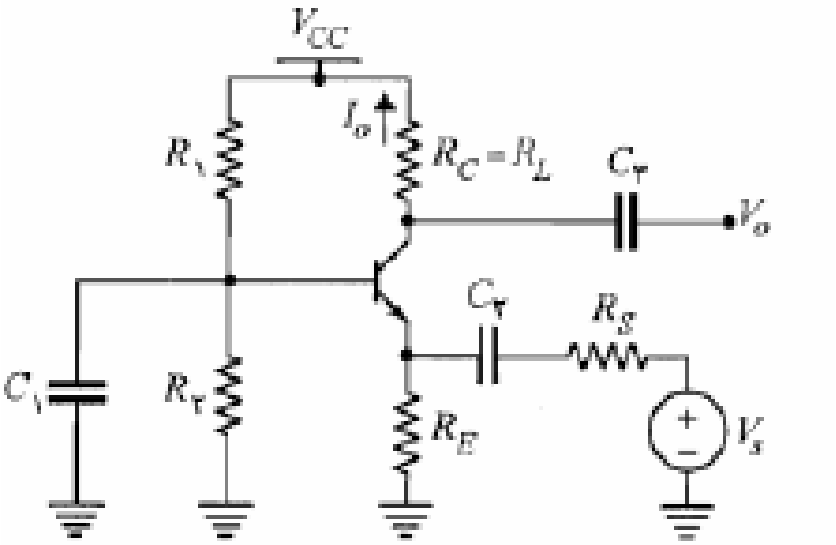
$$R_o = \frac{V_2}{I_2} = \frac{h_{ie} + R_S \parallel R_B}{1 + h_{fe}}$$

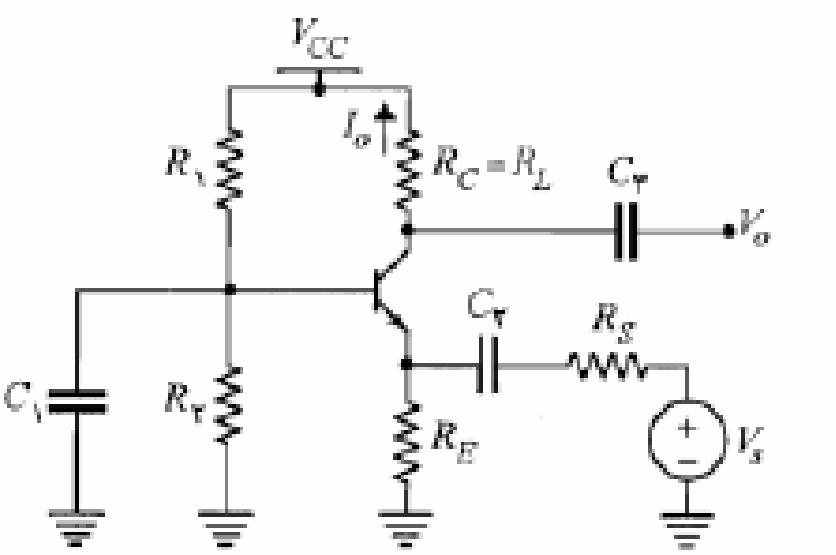
مثال ۶-۳: برای مدار تقویت‌کننده شکل ۶-۱۶، $R_E = ۱\ K\Omega$، $R_B = R_۱ \| R_۲ = ۵۰۰\ K\Omega$ و $R_S = ۱۰۰\ \Omega$ داده شده‌اند. در صورتی که ترانزیستور به‌کار رفته همان ترانزیستور مثال ۶-۱ باشد با صرف‌نظر از h_{re} و h_{oe}، کمیتهای A_V، R_i، A_I و R_o را محاسبه نمایید.

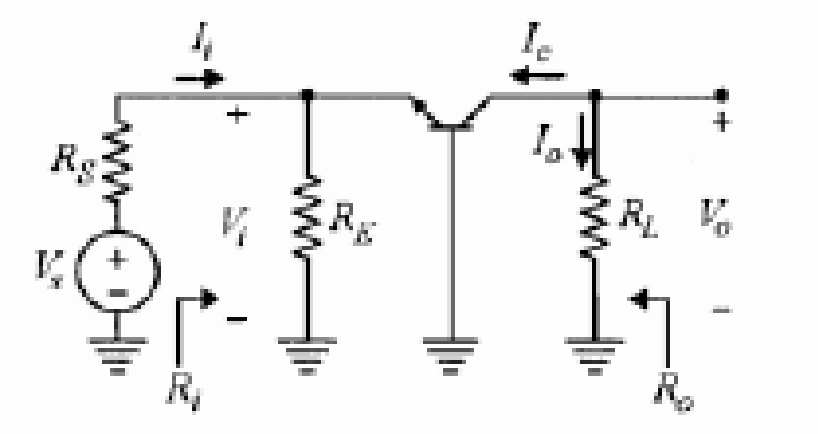


پارامتر	CE
h_i	۱۱۰۰ Ω
h_r	$۲٫۵\times۱۰^{-۴}$
h_f	۵۰
h_o	$۲۵\times۱۰^{-۶}\ \Omega^{-۱}$
$h_o^{-۱}$	۴۰ KΩ

تقویت کننده بیس مشترک (Common Base: CB)




V_{CC}
I_o
R_1
$R_C = R_L$
C_3
V_o
C_2
R_S
C_1
R_2
R_E
V_s


I_i
I_c
R_S
I_o
V_i
R_E
R_L
V_o
V_s
R_i
R_o

پارامترهای هیبرید تقویت کننده بیس مشترک

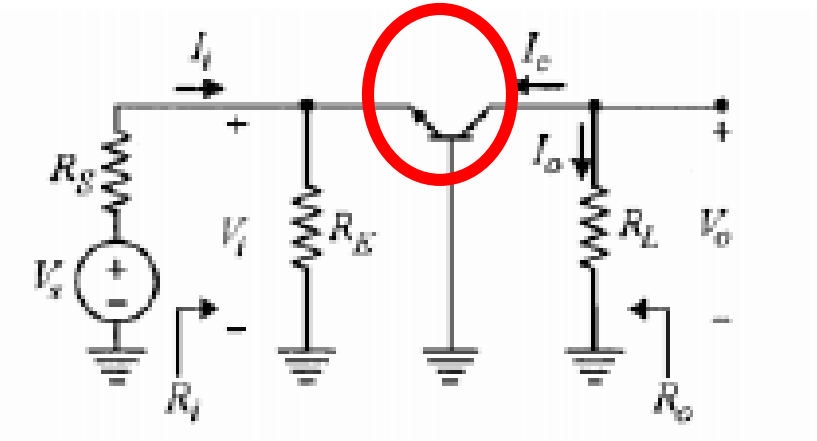
$$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{(1+h_{fe})(1-h_{re}) + h_{ie}h_{oe}}$$

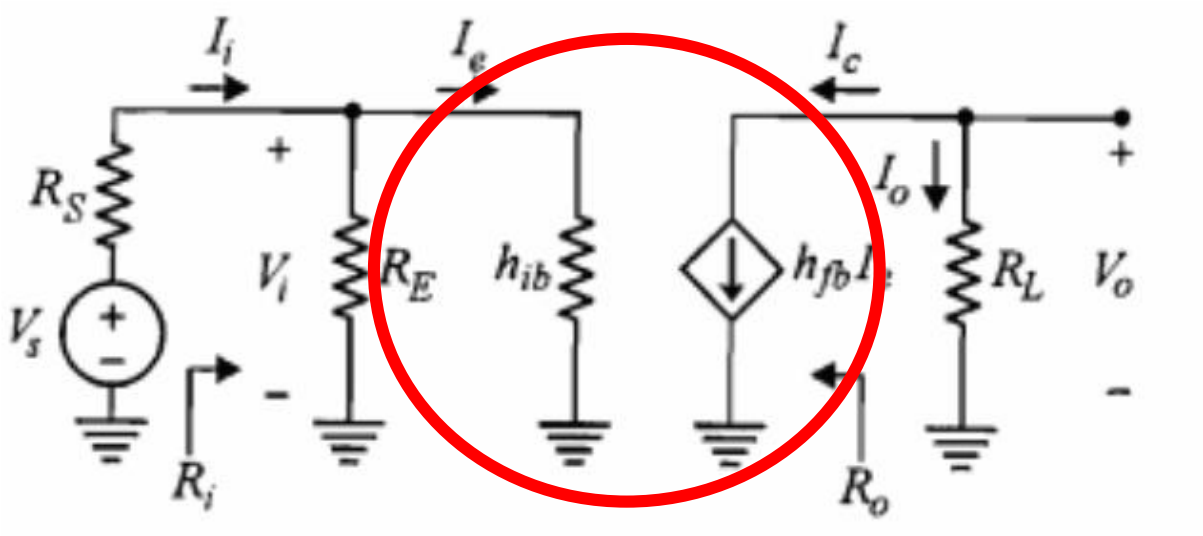
$$h_{fb} = \frac{-h_{fe}(1-h_{re}) - h_{oe}h_{ie}}{(1+h_{fe})(1-h_{re}) + h_{ie}h_{oe}}$$

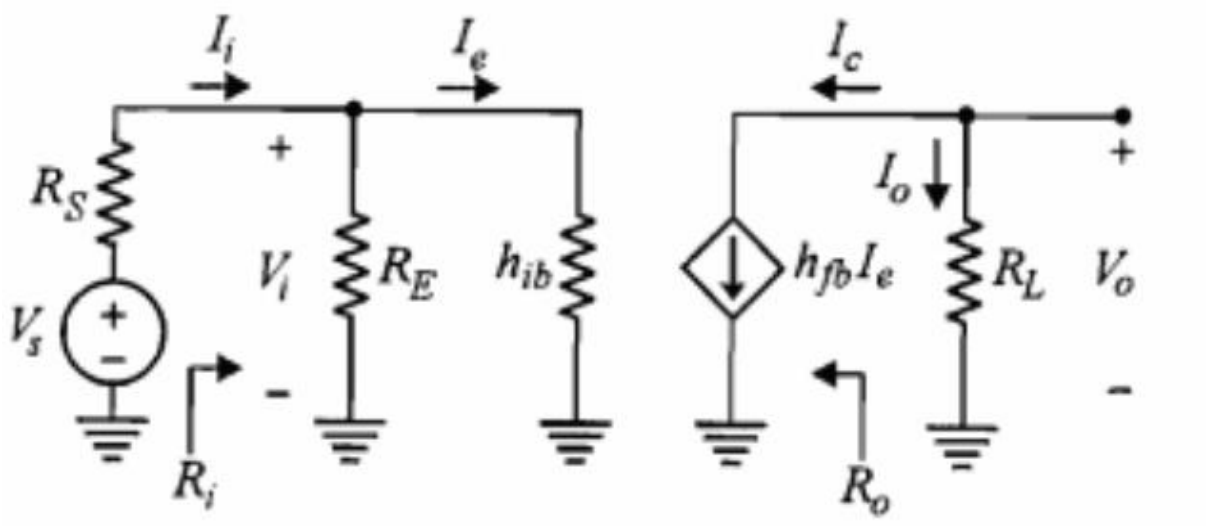
$$h_{rb} = \frac{h_{ie}h_{oe} - h_{re}(1+h_{fe})}{(1+h_{fe})(1-h_{re}) + h_{ie}h_{oe}}$$

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

$h_{fb} = \frac{-h_{fe}}{1+h_{fe}}$	$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}$
$h_{ob} = \frac{h_{oe}}{1+h_{fe}}$	$h_{rb} = \frac{h_{ie}h_{oe}}{1+h_{fe}} - h_{re}$

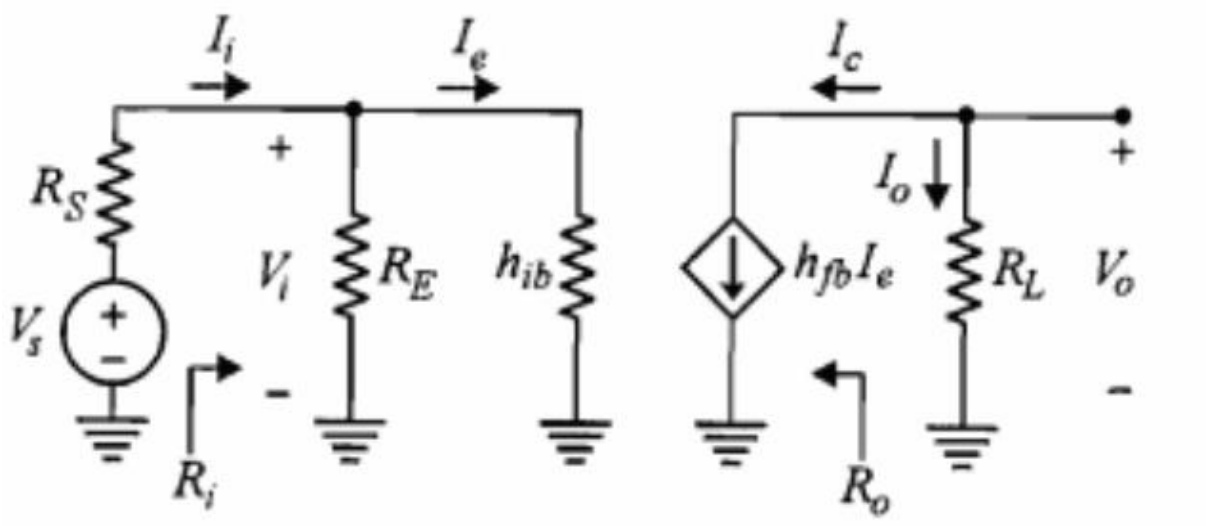

I_i
I_c
I_o
R_S
V_i
R_E
R_L
V_o
V_s
R_i
R_o


I_i
I_e
I_c
I_o
R_S
V_i
R_E
h_{ib}
$h_{fb}I_e$
R_L
V_o
V_s
R_i
R_o

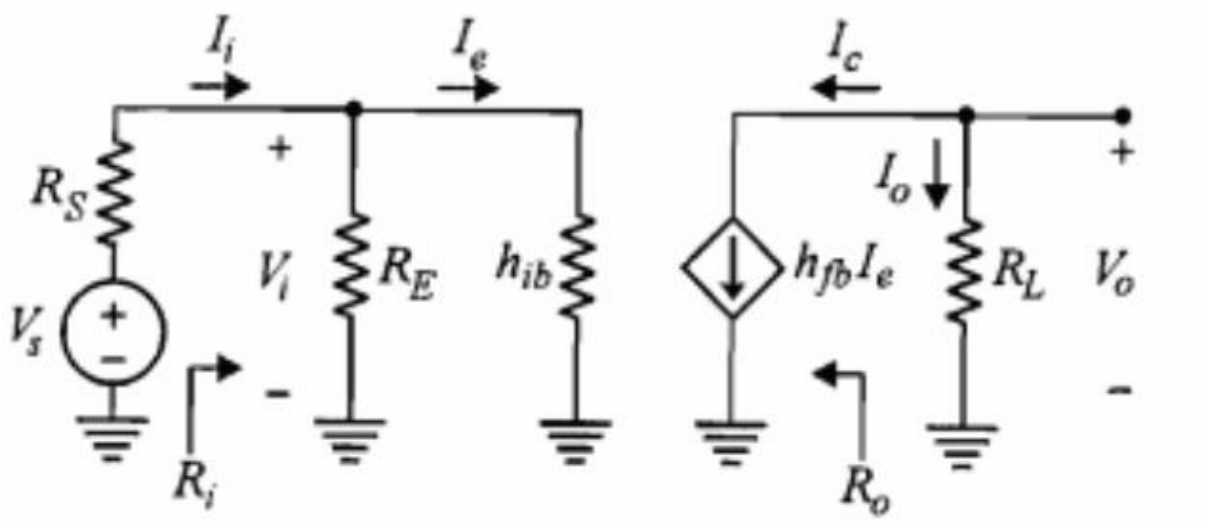


$$A_I = \frac{I_o}{I_i} = \frac{I_o}{I_c}\frac{I_c}{I_e}\frac{I_e}{I_i}$$

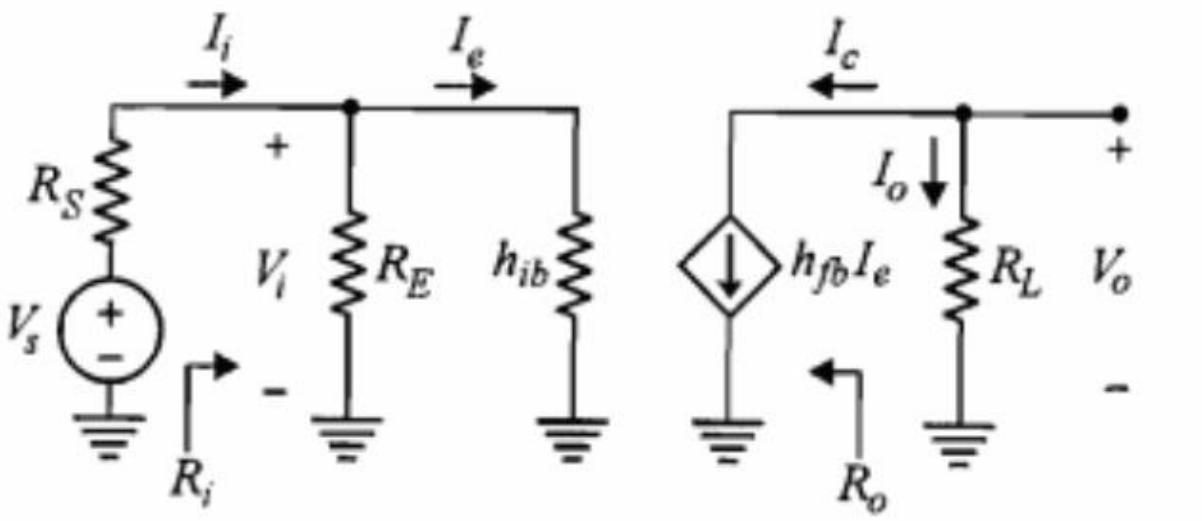
$$A_I = (-1)h_{fb}\frac{R_E}{R_E + h_{ib}} = \frac{-h_{fb}R_E}{R_E + h_{ib}}$$



$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_E \parallel h_{ib} = \frac{R_E h_{ib}}{R_E + h_{ib}}$$

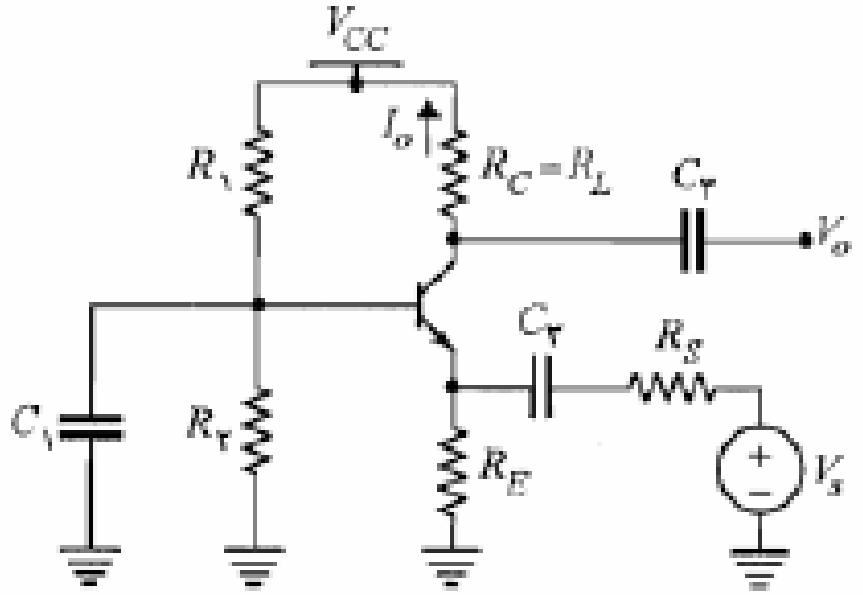


$$A_V = A_I \frac{R_L}{R_i} = \frac{-h_{fb}R_L}{h_{ib}}$$

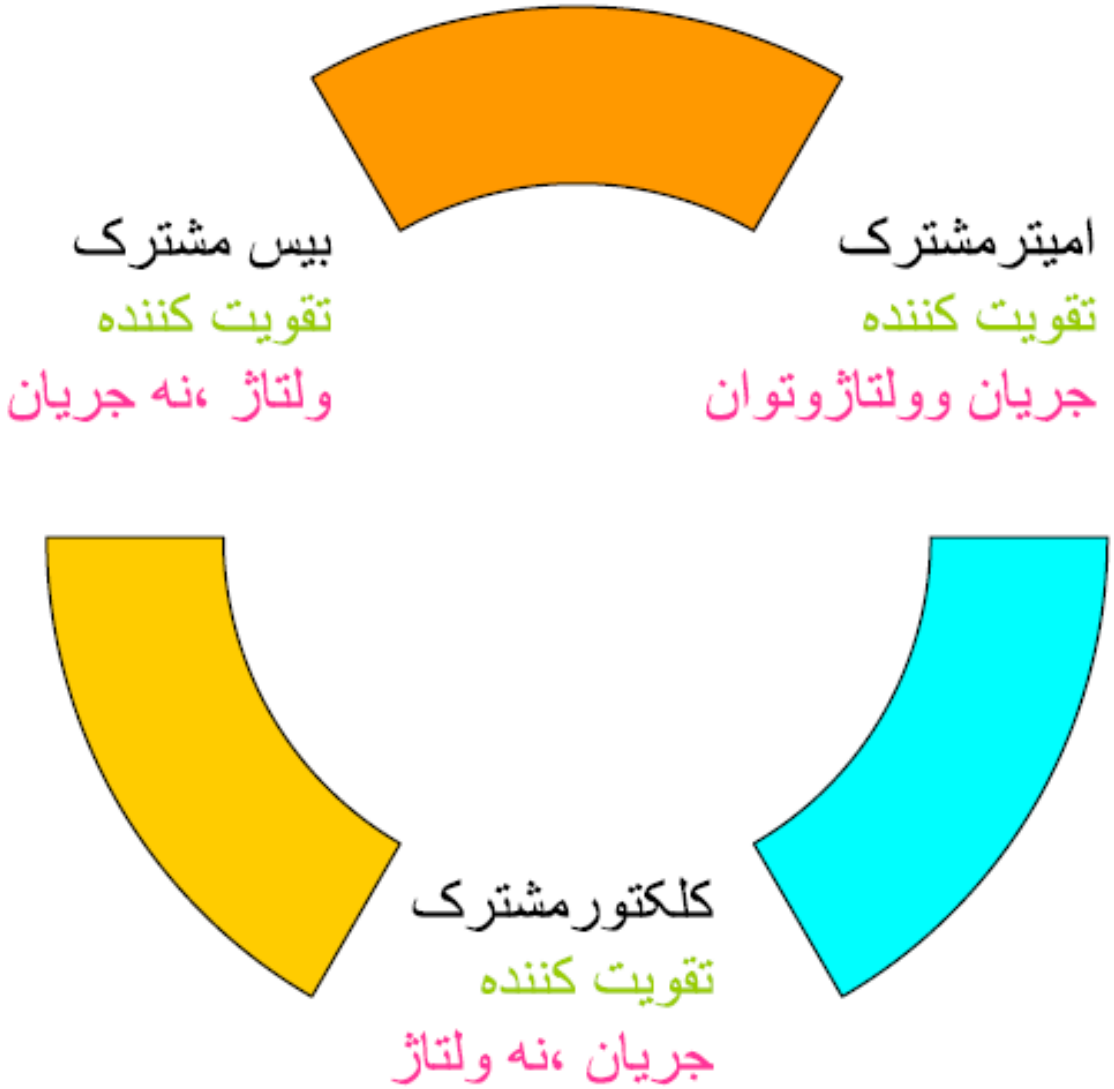


$$R_o = \infty$$

مثال ۶-۵: در تقویت‌کننده شکل ۶-۲۶ فرض کنید، $R_E = ۱\,K\Omega$ ، $R_L = ۱\,K\Omega$ و $R_S = ۱۰\,\Omega$ باشند. پارامترهای h ترانزیستور در جدول ۶-۲ داده شده‌اند (از h_{rb} و h_{ob} صرف‌نظر نمایید). مقادیر کمیتهای A_I، R_i، A_V، R_o و A_{V_s} را برای تقویت‌کننده مذکور محاسبه کنید.

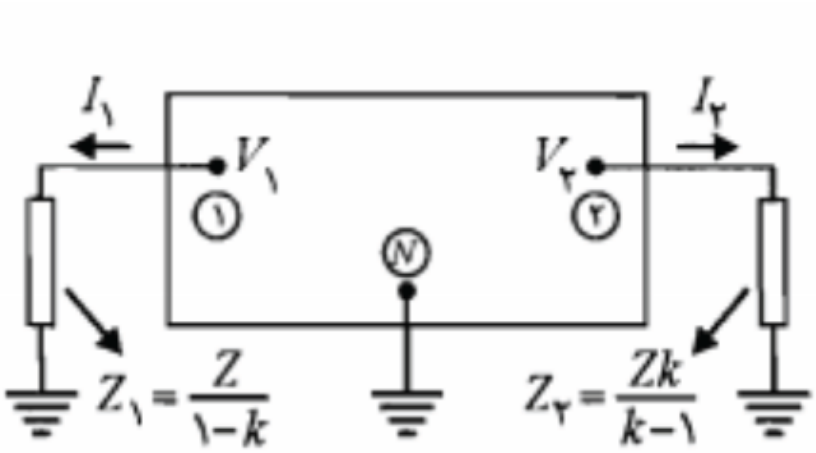


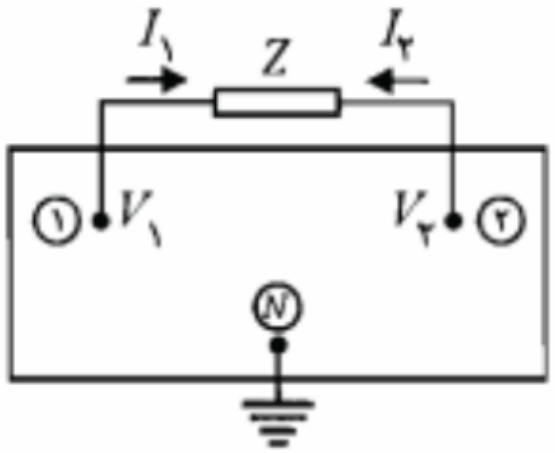
پارامتر	CE	CC	CB
h_i	۱۱۰۰ Ω	۱۱۰۰ Ω	۲۱٫۶ Ω
h_r	$۲٫۵\times۱۰^{-۴}$	≅ ۱	$۲٫۵\times۱۰^{-۴}$
h_f	۵۰	−۵۱	−۰٫۹۸
h_o	$۲۵\times۱۰^{-۶}\,\Omega^{-۱}$	$۲۵\times۱۰^{-۶}\,\Omega^{-۱}$	$۰٫۴۹\times۱۰^{-۶}\,\Omega^{-۱}$
$h_o^{-۱}$	۴۰ KΩ	۴۰ KΩ	۲٫۰۴ MΩ


امیترمشترک
تقویت کننده
جریان وولتاژوتوان
بیس مشترک
تقویت کننده
ولتاژ ،نه جریان
کلکتورمشترک
تقویت کننده
جریان ،نه ولتاژ

Type	Common Base	Common Emitter	Common Collector
Relation between input/output phase	0°	180°	0°
Voltage Gain	High	Medium	Low
Current Gain	Low (a)	Medium (b)	High (g)
Power Gain	Low	High	Medium
Input Z	Low	Medium	High
Output Z	High	Medium	Low

قضیه میلر





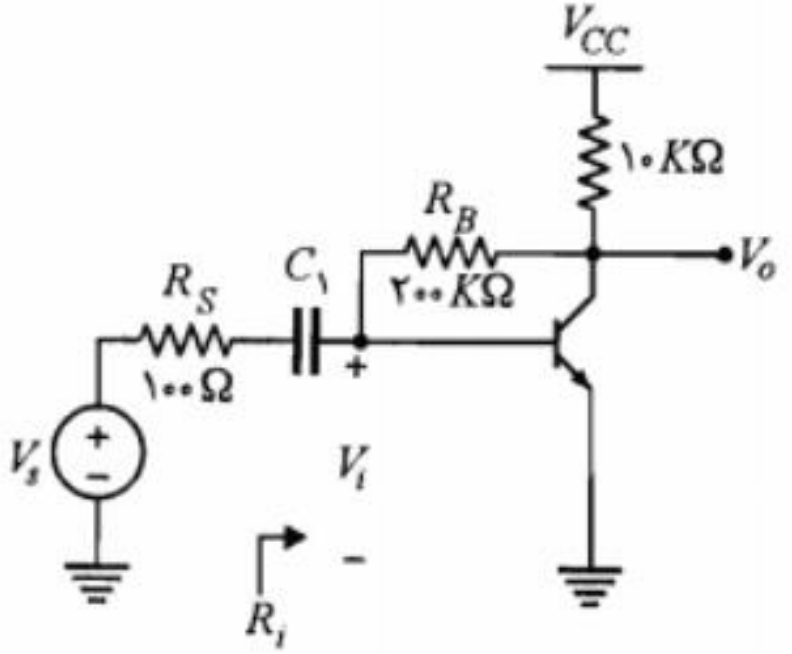
$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} \quad , \quad Z_2 = \frac{V_2}{I_2} = \frac{kV_1}{I_2}$$

$$I_2 = -I_1 = \frac{V_2 - V_1}{Z} = \frac{V_1(k-1)}{Z}$$

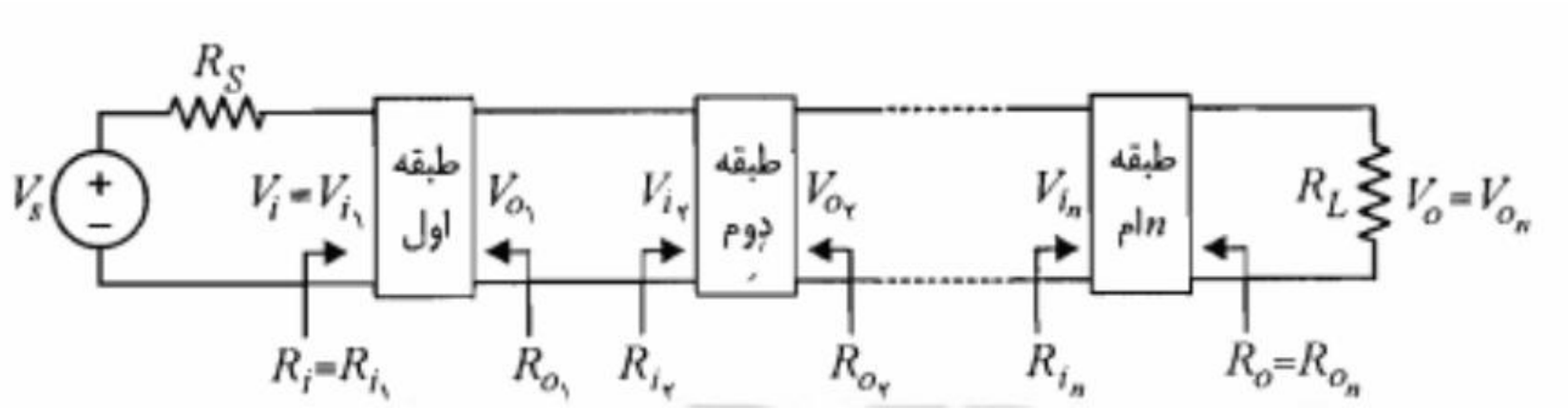
$$Z_1 = \frac{Z}{1-k}$$

$$Z_2 = \frac{kZ}{k-1}$$

مثال ۶-۶: در تقویت‌کننده شکل ۶-۳۱، با فرض $h_{fe} = ۱۰۰$، $h_{ie} = ۱/۵ K\Omega$ و $h_{oe}^{-1} = ۴۰ K\Omega$، مقادیر A_V، A_{V_s} و R_i را محاسبه کنید.



تقویت کننده چند طبقه



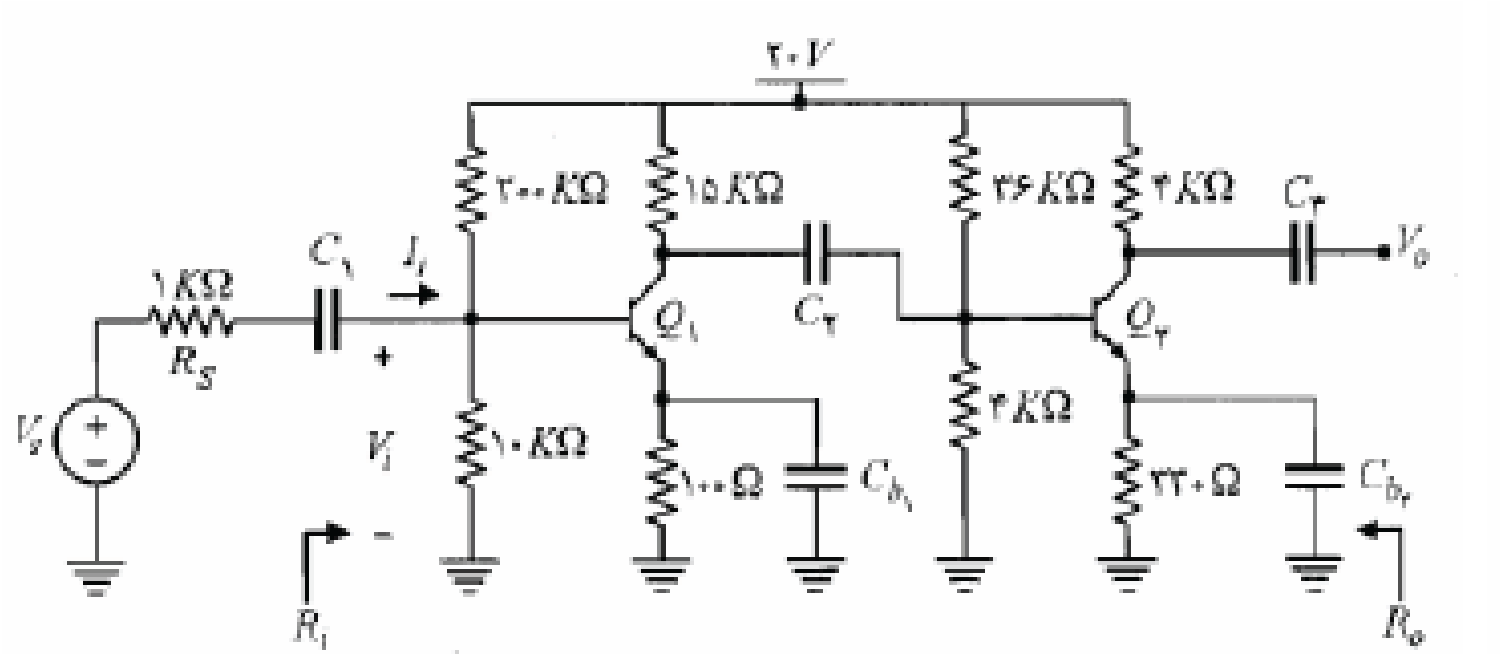
$$A_V = A_{V_n} \times A_{V_{n-1}} \times \ldots \times A_{V_2} \times A_{V_1}$$

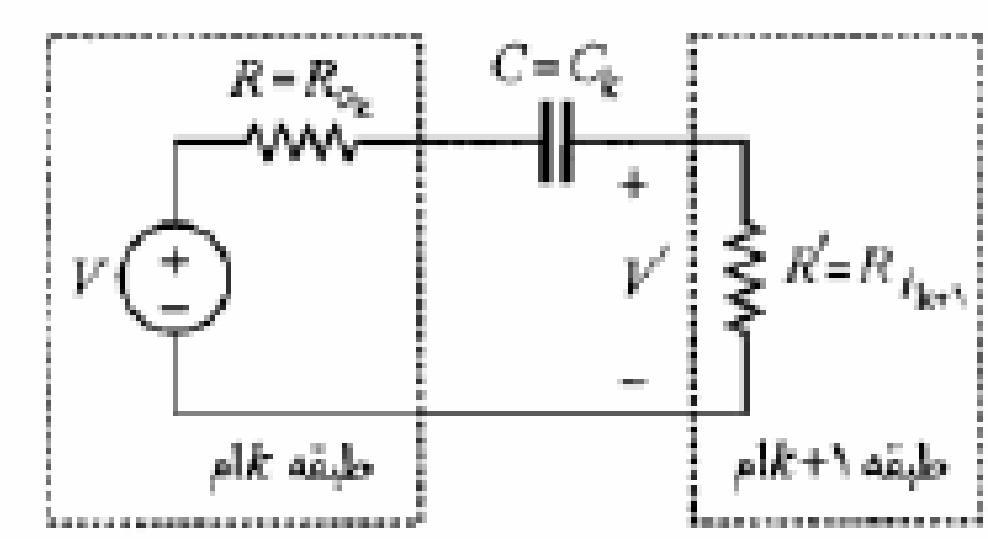
$$A_I = A_{I_1} \times A_{I_2} \times \ldots \times A_{I_{n-1}} \times A_{I_n}$$

تقویت کننده چند طبقه

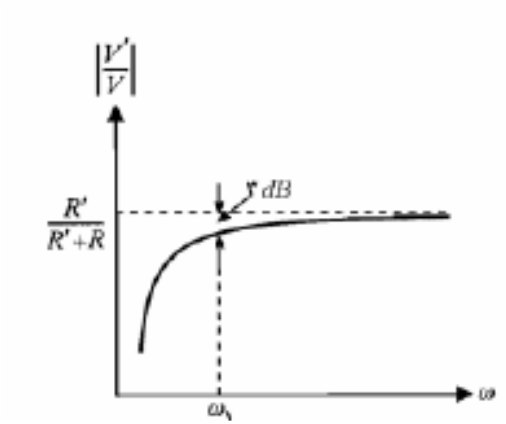
گاهی ساختن یک تقویت کننده که همه ویژگی های یک تقویت کننده ایده آل را داشته باشد مشکل است از این رو بجای استفاده از یک تقویت کننده از چندین تقویت کننده پشت سر هم استفاده می شودکه هر کدام یکی از ویژگی های مورد نظر را برآورده می سازند. مثلا در طبقه اول از تقویت کننده ای استفاده می شود که از مقاومت ورودی بالائی برخوردار باشد و در خروجی از تقویت کننده ای استفاده می شود که مقاومت خروجی کمی داشته باشد.

مثال ۶-۸: در مدار تقویت‌کننده دو طبقه شکل ۶-۳۸ ترانزیستورها مشابه بوده و برای آنها $h_{oe}^{-1} = ۴۰\ K\Omega$ ،$h_{fe} = ۵۰$ و $h_{re} = ۰$ است. کمیتهای A_V، A_{V_s}، R_i، A_I و R_o تقویت‌کننده را محاسبه نمایید.

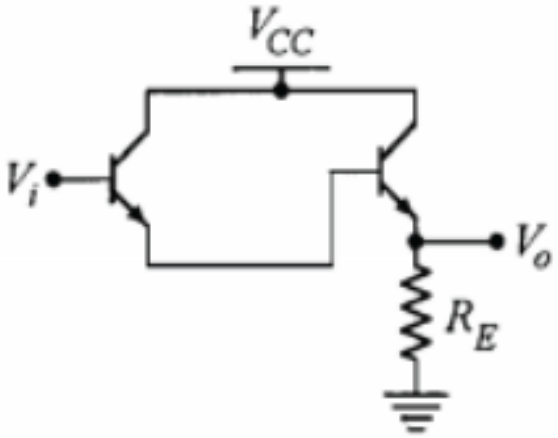


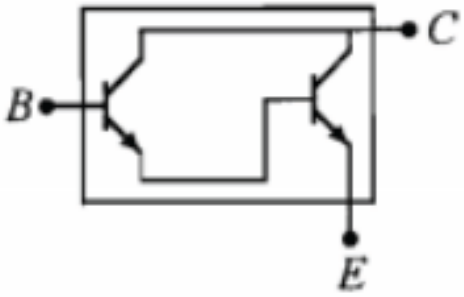


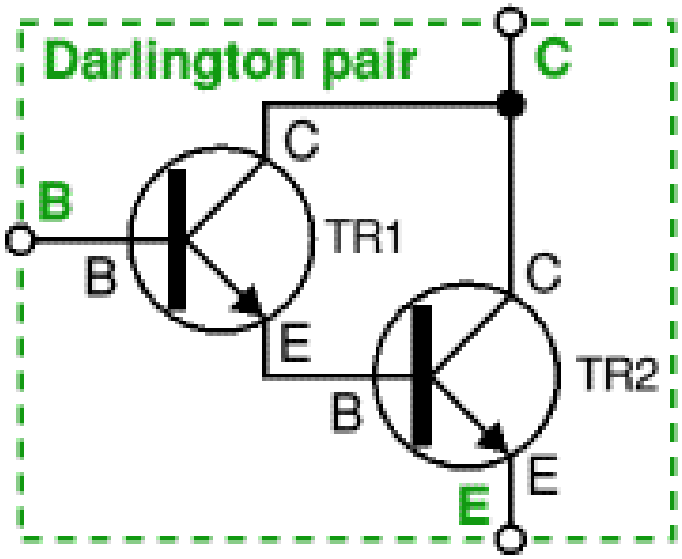
$$\left|\frac{V'}{V}\right| = \frac{R'C\omega}{\sqrt{1+(R+R')^2 C^2 \omega^2}}$$



بررسی زوج دارلینگتون

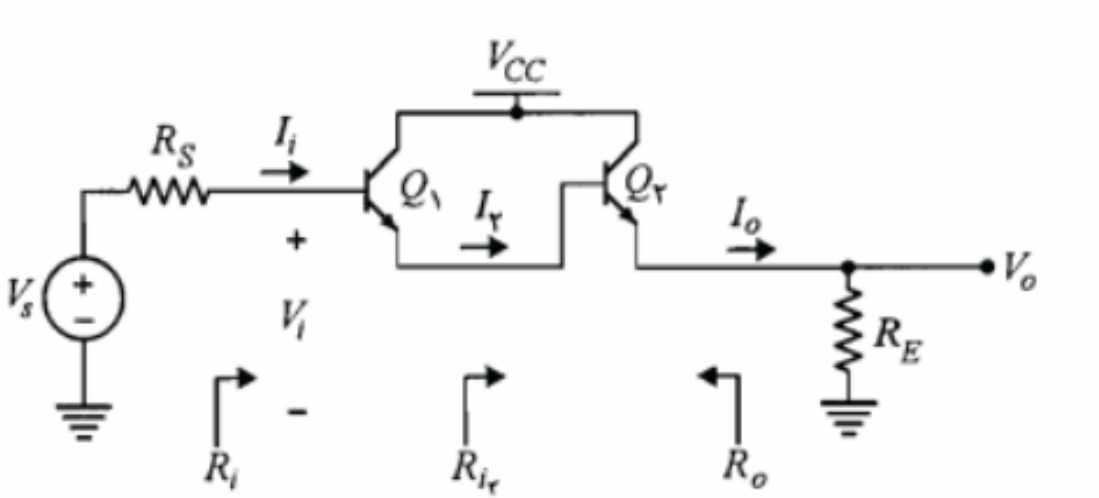






سری نمودن ترانزیستورها سبب افزایش بهره جریان می گردد

$\beta = \beta_1 * \beta_2$



$$R_{i_2} = h_{ie_2} + (1 + h_{fe}) R_E$$

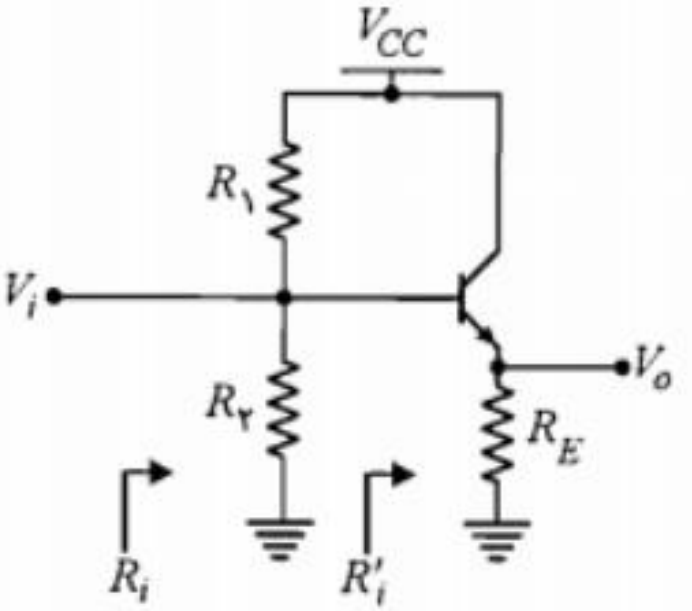
$$A_{I_2} = \frac{I_o}{I_2} \cong 1 + h_{fe}$$

$$A_{I_1} = \frac{I_2}{I_i} = (1 + h_{fe}) \frac{h_{oe}^{-1}}{h_{oe}^{-1} + R_{i_2}} = \frac{1 + h_{fe}}{1 + h_{oe} R_{i_2}}$$

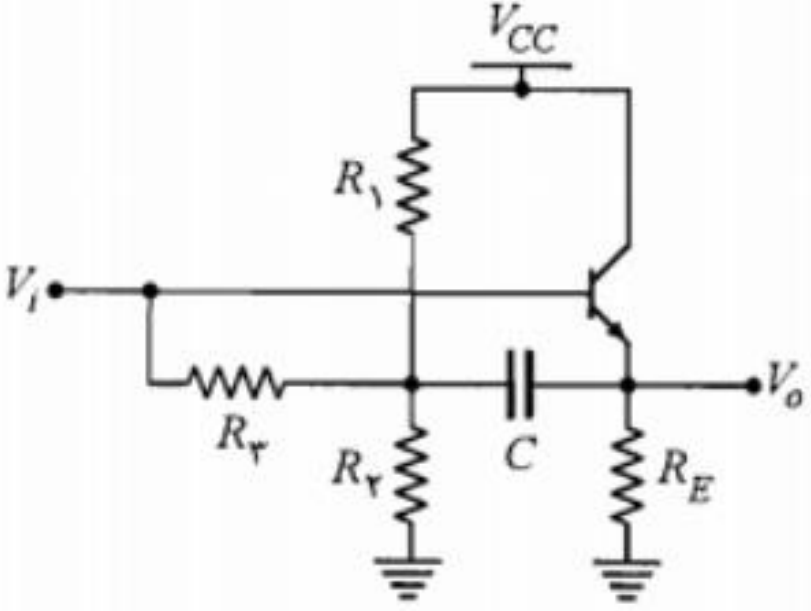
$$R_i \cong \frac{(1 + h_{fe})^2 R_E}{1 + h_{oe} h_{fe} R_E}$$

$$A_I = \frac{(1 + h_{fe})^2}{1 + h_{oe} R_{i_2}} \cong \frac{(1 + h_{fe})^2}{1 + h_{oe} h_{fe} R_E}$$

اثر مقاومت های بایاس و روش بوت استرپ

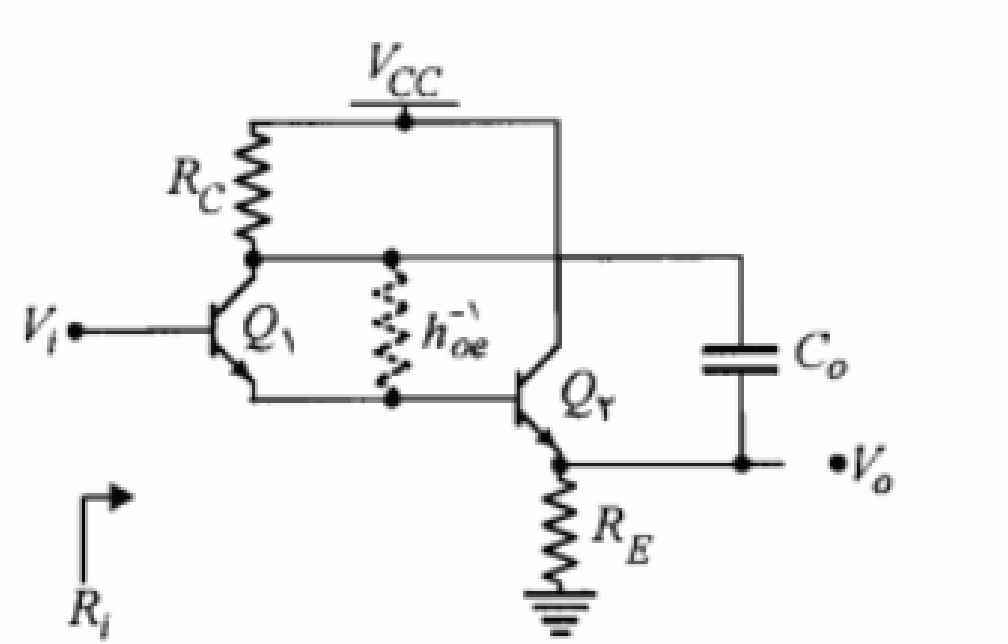


الف) مدار خود بایاس

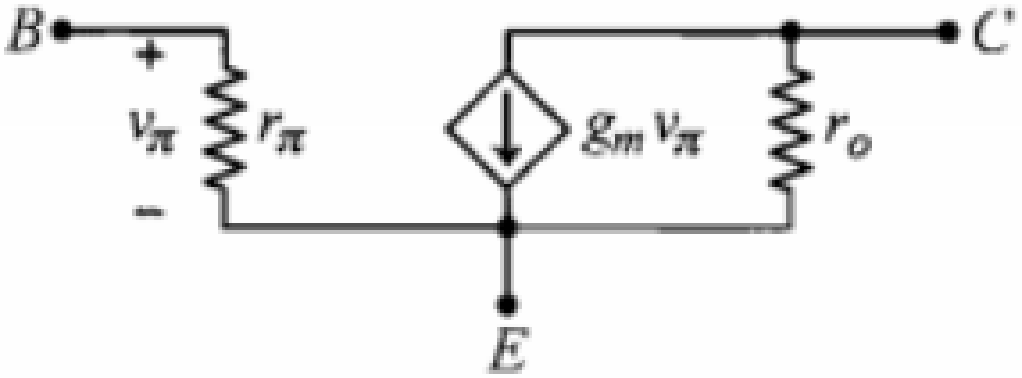


ب) بایاس با استفاده از روش بوت استرپ

روش بوت استرپ در زوج دارلینگتون



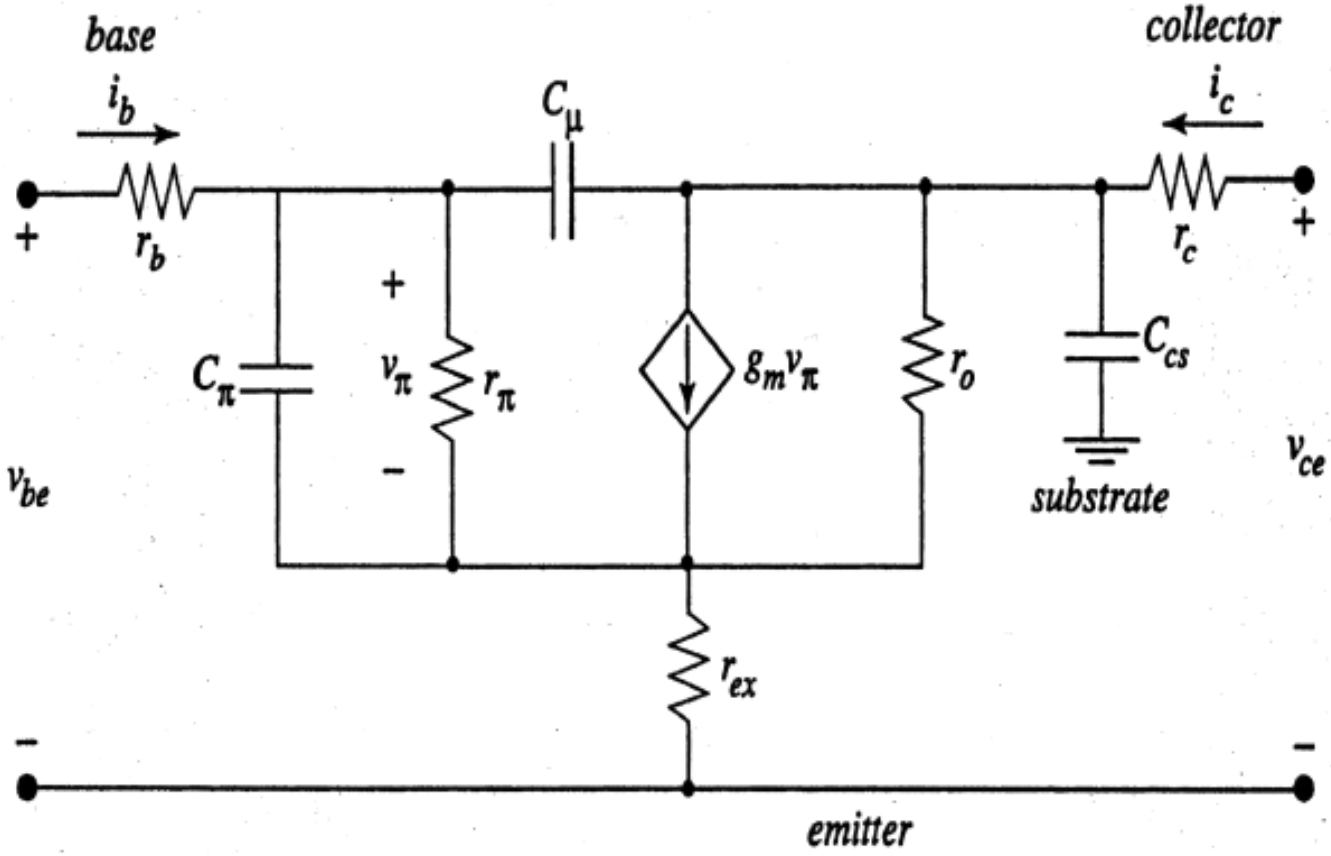
مدار معادل پی ترانزیستور BJT



$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

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

$$r_o = \frac{V_A}{I_C}$$


base
i_b
C_μ
collector
i_c
r_b
r_c
C_π
v_π
r_π
$g_m v_\pi$
r_o
C_{cs}
v_{be}
v_{ce}
substrate
r_{ex}
emitter