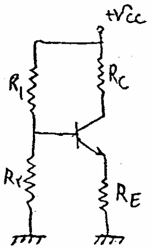
بسم الله الرحمن الرحیم

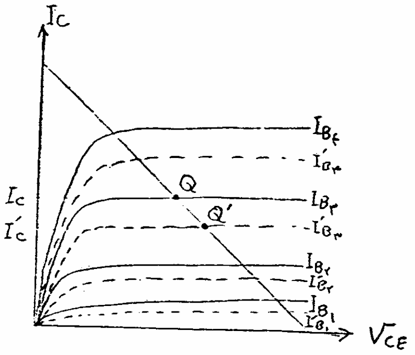
"" جزوه الکترونیک 1 – بخش دوم ""

تهیه کننده : حامد مظاهری
Hamed.Mazaher@Gmail.com

پایداری نقطه کار

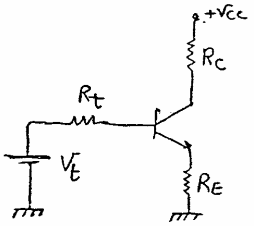
- I_{CBO} *
- V_{BE} *
- β *
- V_{CC}
- R

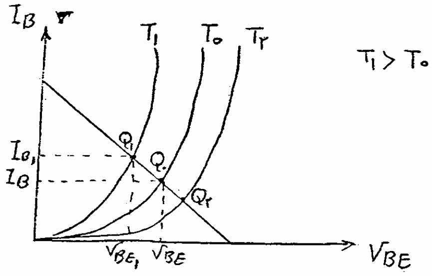




به‌ازای تغییرات β بین β_{min} ، β_{max} جریانهای I_{Bi} به I'_{Bi} تبدیل می‌شوند.

$$V_{CC} \simeq (R_C + R_E) I_C + V_{CE} \quad , \quad I_C = \beta I_B + I_{CEO}$$





$T_1 > T_0 > T_2$

$$V_t = R_t I_B + V_{BE} + R_E (1+\beta) I_B$$

ضرایب پایداری حرارتی

$$I_C \to f(I_{CBO}, V_{BE}, \beta, \ldots)$$

برای نمایش تغییرات I_C از dI_C یا $\Delta I_C = I_{Q_1} - I_{Q_2}$ استفاده می‌کنیم که اگر تغییرات I_C نسبت به پارامترهای f بصورت خطی باشد آنگاه $dI_C \approx \Delta I_C$

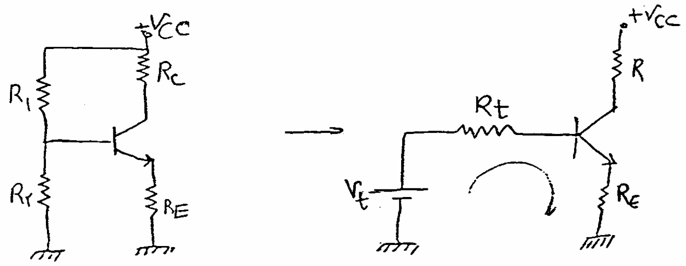
$$dI_C = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} dI_{CBO} + \frac{\partial I_C}{\partial I_\beta} d\beta + \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} dV_{BE}$$

در سطح تغییرات وسیع : $S_{I_{CBO}} = S_I = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CBO}}$, $S_{V_{BE}} = S_V = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}}$

$$, \quad S_\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta \beta}$$

در تغییرات کم $S_I \simeq \dfrac{\partial I_c}{\partial I_{CBO}}$, $S_V \simeq \dfrac{\partial I_c}{\partial V_{BE}}$

, $S_B \simeq \dfrac{\partial I_c}{\partial \beta}$



$$\begin{cases} I_C = \beta I_B + (1+\beta) I_{CBO} \\ V_t = R_t I_B + V_{BE} + R_E(1+\beta) I_B \end{cases}$$

$$\longrightarrow \quad I_C = \frac{\beta}{R_E(1+\beta)+R_t}(V_t - V_{BE}) + \frac{(1+\beta)(R_E+R_t)}{R_E(1+\beta)+R_t} I_{CBO}$$

$$\longrightarrow \quad S_I = \frac{\partial I_c}{\partial I_{CBO}} = (1+\beta) \times \frac{1+ R_t/R_E}{(1+\beta) + R_t/R_E}$$

$$\text{if} \quad R_t \ll R_E \longrightarrow S_I = 1$$

$$\text{if} \quad \underset{\text{شرط عملی}}{\underline{R_t \ll (1+\beta) R_E}} \longrightarrow R_t = \frac{(1+\beta)R_E}{10}$$

$$\longrightarrow S_I = 1 + \frac{R_t}{R_E}$$

$$S_V = \frac{\partial I_c}{\partial V_{BE}} = -\frac{\beta}{R_E(1+\beta)+R_t}$$

$$\text{if} \quad R_t \ll (1+\beta) R_E \longrightarrow S_V = \frac{-1}{R_E}$$

برای محاسبهٔ S_β :

$$V_t - V_{BE} \gg (R_E + R_t) I_{CBO} \longrightarrow I_C \simeq \frac{\beta}{R_E(1+\beta)+R_t}(V_t - V_{BE})$$

$$T_۱ \longrightarrow I_{C۱}, \beta_۱ \longrightarrow I_{C۱} = \frac{\beta_۱}{R_E(1+\beta_۱)+R_t}(V_t - V_{BE})$$

$$T_۲ \longrightarrow I_{C۲}, \beta_۲ \longrightarrow I_{C۲} = \frac{\beta_۲}{R_E(1+\beta_۲)+R_t}(V_t - V_{BE})$$

$$\Delta I_C = I_{C۲} - I_{C۱}$$
$$\Delta\beta = \beta_۲ - \beta_۱ \quad , \quad \frac{I_{C۱}}{I_{C۲}} = \frac{\beta_۱}{\beta_۲} \times \frac{R_E(1+\beta_۲)+R_t}{R_E(1+\beta_۱)+R_t}$$

$$\longrightarrow \frac{I_{C۲} - I_{C۱}}{I_{C۱}} = \frac{\Delta I_C}{I_{C۱}} = \frac{\Delta\beta(R_t + R_E)}{\beta_۱(R_t + (1+\beta_۲)R_E)}$$

$$\longrightarrow S_\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta\beta} = \frac{I_{C۱}(R_t + R_E)}{\beta_۱[R_t + (1+\beta_۲)R_E]}$$

$$\Delta I_C = \left(1 + \frac{R_t}{R_E}\right)\Delta I_{CBO} - \frac{1}{R_E}\Delta V_{BE} + \frac{I_{C۱}}{\beta_۱} \cdot \frac{R_E + R_t}{R_t + (1+\beta)R_۲}\Delta\beta +$$

رابطهٔ بالا وقتی است که $R_t \ll (1+\beta)R_E$

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

مثال : $R_C = ۴K\Omega$, $V_{CC} = ۲۰^V$, $\begin{cases} I_C = ۲mA \\ V_{CE} = ۱۰V \end{cases}$

$۳۴ < \beta < ۹۰$, $\overset{mA}{۱٫۷۵} < I_C < \overset{mA}{۲٫۲۵}$, $R_۱, R_۲$

$$\longrightarrow V_{CC} = (R_E + R_C) I_C + V_{CE} \longrightarrow R_E = ۱\ K\Omega$$

$$S_\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta\beta} = \frac{I_{C۲} - I_{C۱}}{\beta_۲ - \beta_۱} = \frac{۲٫۲۵ - ۱٫۷۵}{۹۰ - ۳۴} = \frac{I_{C۱}(R_t + R_E)}{\beta_۱[R_t + (1+\beta_۲)R_E]}$$

$$\longrightarrow R_t = ۲۰٫۱\ K\Omega$$

$$\begin{cases} R_1 = \dfrac{V_t}{V_{CC}} R_t \\ R_2 = \dfrac{R_t}{1 - \dfrac{V_{CC}}{V_t}} \end{cases} , \quad V_t = R_t \overset{I_C/\beta}{I_B} + V_{BE} + R_E \overset{\frac{\beta+1}{\beta} I_C}{I_E}$$

$$\longrightarrow ۱٫۷۵^{mA} < I_C \simeq I_E = \frac{V_t - V_{BE}}{R_t/\beta + R_E} < ۲٫۲۵^{mA}$$

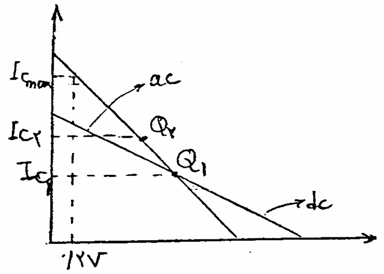
$$\longrightarrow ۱٫۷۵\Big(\underbrace{\frac{R_t}{\beta}}_{\beta_{min}} + R_E\Big) < V_t - V_{BE} < ۲٫۲۵\Big(\underbrace{\frac{R_t}{\beta}}_{\beta_{max}} + R_E\Big)$$

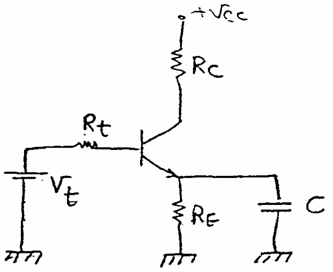
$$\longrightarrow ۳٫۳۸ < V_t < ۳٫۴ \longrightarrow \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \end{matrix}$$

مثال ۲: اگر $۴۰ < \beta < ۱۲۰$, $۰/۶^V < V_{BE} < ۰/۸^V$ باشد V_t، R_E، R_t را طوری پیدا کنید که سوئینگ ۵^{mA} در I_c را داشته باشیم.

$V_{CC} = ۱۵V$, $R_C = 1K\Omega$

$V_{CE_{sat}} = /۲V$





$$\longrightarrow I_{C_1} = ۵^{mA}$$

$$\overset{\text{متناوب}}{(ac)\, v_{ce}} = -R_C\, i_c \quad \text{خط بار}\ ac$$

$$\longrightarrow (\underset{\text{کلی}}{v_{CE}} - \underset{dc}{V_{CE}}) = -R_C(i_C - I_C) \quad ①$$

$$①, ② \longrightarrow I_{C_2} = \frac{۹٫۸}{1+R_E}$$

$$V_{CC} \simeq R_C I_C + V_{CE} + R_E I_C \quad \text{خط بار}\ dc \quad ②$$

$$\longrightarrow \underbrace{۵^{mA}}_{I_{C_1}} < I_{CQ} < \underbrace{\frac{۹٫۸}{1+R_E}}_{I_{C_2}}$$

$$V_{CE} = /۲V , \quad I_{C_m} = I_{C_2} + ۵\ mA$$

$$\Delta I_C = I_{C_2} - I_{C_1} = \frac{۹٫۸}{1+R_E} = ۵ \longrightarrow \underset{I}{\boxed{\Delta I_C = \frac{۴٫۸ - ۵R_E}{1+R_E}}}$$

$$\Delta I_C = S_\beta \Delta\beta + S_V \cdot \Delta V_{BE}$$

$$[illegible] = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \times \frac{R_t + R_E}{R_t + (1+\beta_2)R_E}\Delta\beta - \frac{1}{R_E}\Delta V_{BE} \longrightarrow \boxed{\Delta I_C = \frac{۰/۲}{R_E} + \frac{۲}{۵}}$$

II

$$R_t \ll (1+\beta)R_E \xrightarrow{\text{از شرط فوق}} R_t = \frac{\beta_{min} \cdot R_E}{۱۰}$$

$$I, II \longrightarrow R_E = ۴۴\,\Omega \,,\ \boxed{R_E = ۷۲۵\,\Omega}$$

$$\longrightarrow R_t = ۲/۹\,k\Omega \,,\quad \begin{matrix} I_{C1} = ۵\,mA \\ I_{C2} = ۵/۴۸\,mA \end{matrix}$$

$$\longrightarrow ۵ < I_C < ۵/۴۸$$

$$\longrightarrow ۵ < \frac{V_t - V_{BE}}{R_E + \frac{R_t}{\beta}} < ۵/۴۸ \xrightarrow{\text{خودتان حل کنید}} ۴/۷ < V_t < ۴/۹۲$$

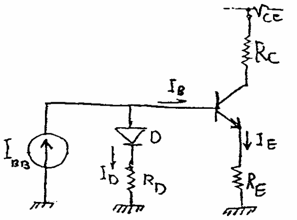
$$\longrightarrow \boxed{\begin{matrix} V_t = ۴/۸\,V \\ R_t = ۲/۸\,k\Omega \\ R_E = ۷۵۵\,\Omega \end{matrix}}$$

جبران اثر حرارتی :

V_{BE}

I_{CBO}

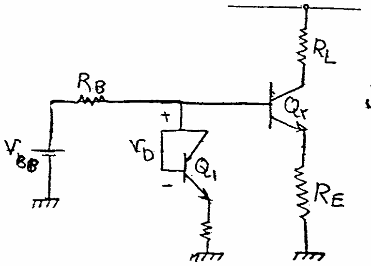
β



$$\begin{cases} I_{BB} = I_D + I_B \\ V_D + R_D I_D = V_{BE} + R_E I_E \end{cases}$$

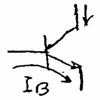
$$\longrightarrow I_E = \frac{V_D - V_{BE} + I_{BB}R_D}{R_E + \frac{R_D}{1+\beta}}$$

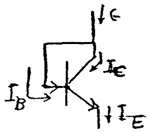
$$\rightarrow \frac{\Delta I_E}{\Delta T} = \frac{\frac{\Delta V_D}{\Delta T} - \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T}}{R_E + R_D/_{1+\beta}} \longrightarrow \frac{\Delta V_D}{\Delta T} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T} = -K$$



استفاده از ترانزیستور Q به فرم روبرو و به جای دیود مدار بالا

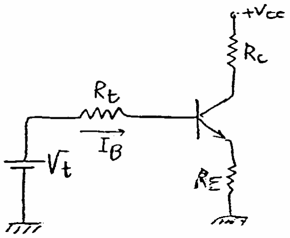
این مزیت را دارد که امپدانس ورودی ترانزیستور کم است.





$h_{ie}=\frac{\eta V_T}{I_C}$

$\frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}$



$R_t = R_D \| R_B$

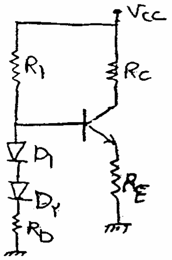
$V_t=\frac{R_D V_{BB}+R_B V_D}{R_D+R_B}$

$V_t = R_t I_B + V_{BE} + R_E I_E$

$$\longrightarrow \quad I_E=\frac{(V_{BB}R_D+V_D R_B)/R_B+R_D}{R_E}$$

$$\longrightarrow \quad \frac{\Delta I_E}{\Delta T}=\frac{1}{R_E}\left[\frac{\Delta V_D}{\Delta T}\cdot\frac{R_B}{R_B+R_D}-\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T}\right]$$

$$, \quad \frac{\Delta V_D}{\Delta T}=\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T}=-K \quad \longrightarrow \quad \frac{\Delta I_E}{\Delta T}=\frac{K}{R_E}\left[\frac{1}{1+\frac{R_B}{R_D}}\right]$$

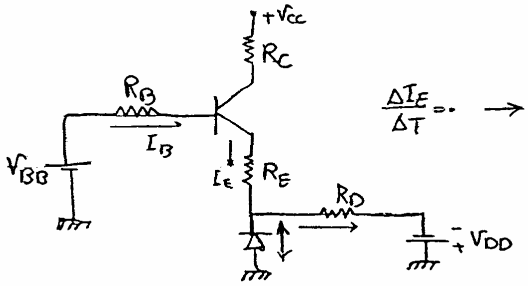


$V_t=\frac{V_{CC}R_D+۲V_D R_B}{R_D+R_B}$

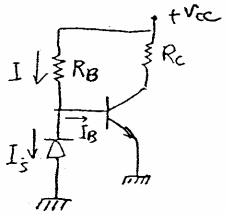
$R_t = R_D \| R_B$

$I_E=\frac{(V_{CC}R_D+۲V_D R_B)/R_B+R_D \quad -V_{BE}}{R_E}$

$$\frac{\Delta V_D}{\Delta T}\simeq\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T} \longrightarrow \frac{\Delta I_E}{\Delta T}=۰ \longrightarrow R_B=R_D$$



تمرین: با شرط اینکه $\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T}=\frac{\Delta V_D}{\Delta T}$ $\longleftarrow$ $\frac{\Delta I_E}{\Delta T}=۰$



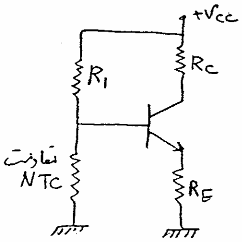
جبران اثر حرارتی I_{CBO} :

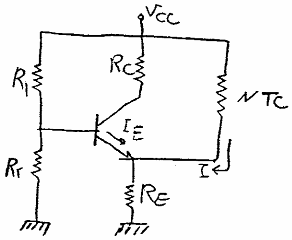
$$\begin{cases} I_C = \beta I_B + (1+\beta) I_{CBO} \\ I_C = \beta (I - I_S) + (1+\beta) I_{CBO} \end{cases}$$

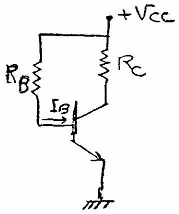
با فرض رفتار معادل دیود و ترانزیستور و β بزرگ

$$\longrightarrow \frac{\Delta I_C}{\Delta T} = -\beta \frac{\Delta I_S}{\Delta T} + (1+\beta)\frac{\Delta I_{CBO}}{\Delta T} \simeq 0 \quad , \quad \beta \gg$$

تثبیت کنندگی حرارتی با استفاده از مقاومت‌های NTC, PTC :

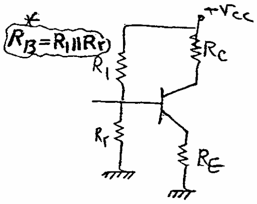






$$\Delta I_C = S_I \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CBO}} + \cdots$$

$$S_0 = \frac{\Delta I_C \text{ مدار بدون پایداری}}{\Delta I_C \text{ مدار پایدار}}$$



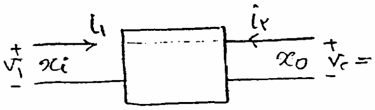
$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CEO}} \simeq 1 \longrightarrow I_C = \beta I_B + \overbrace{(1+\beta) I_{CBO}}^{I_{CEO}}$$

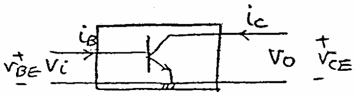
$$\longrightarrow S_0 = \frac{1}{\left(\frac{R_B^* + R_E(1+\beta)}{R_B^* + R_E}\right)^{-1}} = \frac{R_E(1+\beta)}{R_B^* + R_E} \quad , \quad R_B^* \ll (1+\beta) R_E$$

$$\longrightarrow S_0 = \frac{(1+\beta) R_E}{R_B^* + R_E}$$

$$S_0 = 1 + \frac{\beta R_E}{R_E + R_B} \quad , \quad \beta \gg$$

$$S_0 > 10$$





$$Z\ \text{امپدانس}\begin{cases} V_1 = Z_{11} i_1 + Z_{12} i_2 \\ V_2 = Z_{21} i_1 + Z_{22} i_2 \end{cases}$$

$$h\ \text{هیبرید}\begin{cases} V_1 = h_{11} i_1 + h_{12} V_2 \\ i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} V_2 \end{cases}$$

$$Y\ \text{ادمیتانس}\begin{cases} i_1 = y_{11} V_1 + y_{12} V_2 \\ i_2 = y_{21} V_1 + y_{22} V_2 \end{cases}$$

$Z_{11} = \frac{V_1}{i_1}\Big|_{i_2=0}$ امپدانس ورودی خروجی باز

$Z_{22} = \frac{V_2}{i_2}\Big|_{i_1=0}$ امپدانس خروجی ورودی باز

$Z_{12} = \frac{V_1}{i_2}\Big|_{i_1=0}$ امپدانس انتقالی معکوس

$Z_{21} = \frac{V_2}{i_1}\Big|_{i_2=0}$ امپدانس انتقالی مستقیم

$y_{11} = \frac{i_1}{V_1}\Big|_{V_2=0}$ ادمیتانس ورودی

$y_{22} = \frac{i_2}{V_2}\Big|_{V_1=0}$ ادمیتانس خروجی

$y_{12} = \frac{i_1}{V_2}\Big|_{V_1=0}$ ادمیتانس انتقالی معکوس

$y_{21} = \frac{i_2}{V_1}\Big|_{V_2=0}$ ادمیتانس انتقالی مستقیم

$h_{11} = \frac{V_1}{i_1}\Big|_{V_2=0}$ امپدانس ورودی (h_{ie})

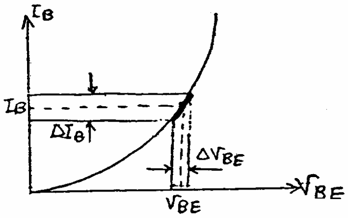
امیتر مشترک

$h_{22} = \frac{i_2}{V_2}\Big|_{i_1=0}$ ادمیتانس خروجی (h_{oe})

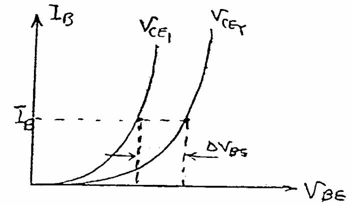
$h_{12} = \frac{V_1}{V_2}\Big|_{i_1=0}$ بهرهٔ ولتاژ انتقالی معکوس (h_{re})

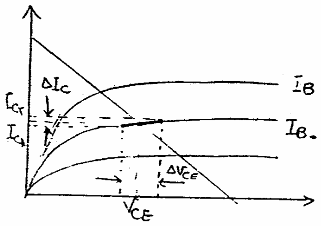
$h_{21} = \frac{i_2}{i_1}\Big|_{V_2=0}$ بهرهٔ جریان انتقالی مستقیم (h_{fe})

$$h_{11} = h_{ie} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}\Big|_{V_{CE}\ \text{ثابت}}$$

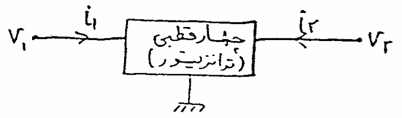


$$h_{۱۲} = h_{re} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}}\Bigg|_{I_B \text{ ثابت}}$$





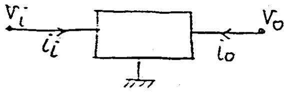
مدار هیبرید :



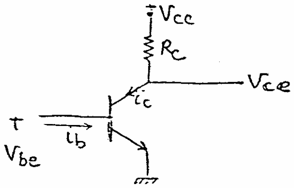
پارامترهای h

$$\begin{cases} v_1 = h_{11} i_1 + h_{12} v_2 \\ i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} v_2 \end{cases}$$

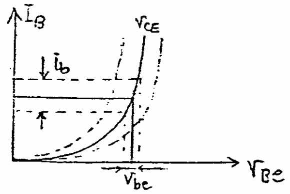
$$\begin{cases} V_i = h_{ie} i_i + h_{re} V_o \\ i_o = h_{fe} i_i + h_{oe} V_o \end{cases}$$

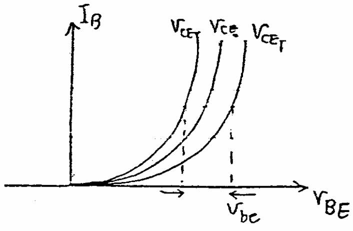


$$\begin{cases} V_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} V_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} V_{ce} \end{cases}$$

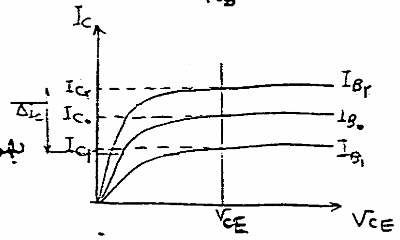


$$h_{ie} = \frac{V_{be}}{i_b}\bigg|_{V_{ce}=0}$$ امپدانس ورودی

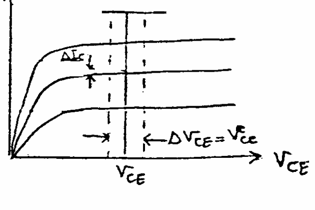




$$h_{re} = \frac{V_{be}}{V_{ce}}\bigg|_{i_b=0}$$ بهرهٔ ولتاژ معکوس

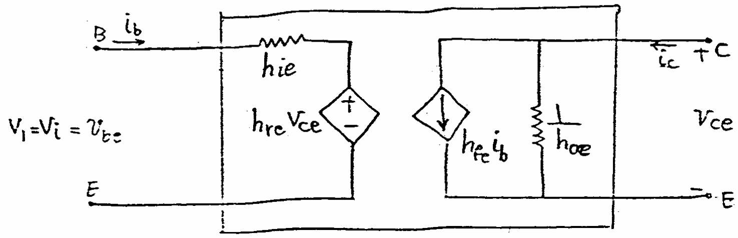


$$h_{fe} = \frac{i_c}{i_b}\bigg|_{V_{ce}=0}$$ بهره جریان مستقیم

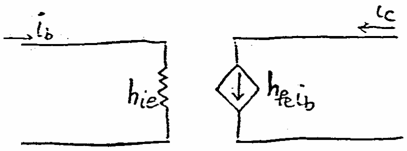


$$\begin{cases} i_b - \Delta I_B = I_{B_2} - I_{B_1} \\ i_c = \Delta I_C = I_{C_2} - I_{C_1} \end{cases}$$

$$h_{oe} = \frac{i_c}{V_{ce}}\bigg|_{i_b=0}$$ ادمیتانس خروجی

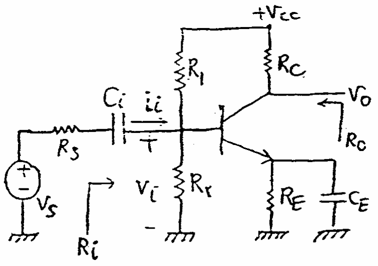


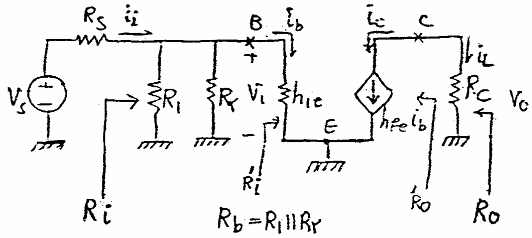
مدل هیبرید C.E (دقیق)



مدل تقریبی

مدار معادل ac :





گین ولتاژ $A_V=\frac{V_o}{V_i}$ گین جریان $A_i=\frac{i_L}{i_i}$

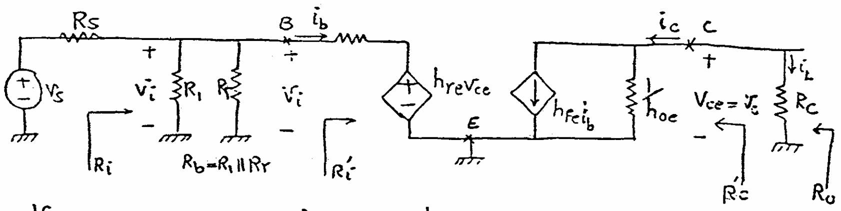
$$A_V=\frac{V_o}{V_i}=\frac{-R_C\,\boxed{i_c}}{h_{ie}\,\boxed{i_b}}^{A_i'} \longrightarrow A_V=-\frac{h_{fe}\cdot\overset{R_o}{\boxed{R_C}}}{h_{ie}}=-\frac{R_o}{R_i'}A_i'$$

$$A_i=\frac{i_L}{i_i}=\frac{-i_c}{i_b}\times\frac{i_b}{i_i}=h_{fe}\times\frac{R_b}{R_b+h_{ie}} \longrightarrow A_i=h_{fe}\frac{R_b}{R_b+h_{ie}}$$

امپدانس دیده شده از E

$$R_i=\frac{V_i}{i_i}=R_1\|R_2\|\boxed{R_i'}=R_1\|R_2\|\left(\frac{V_i}{i_b}\right)=R_1\|R_2\|h_{ie} \longrightarrow R_i=R_1\|R_2\|h_{ie}$$

$$R_o=\frac{V_o}{i_o}\Big|_{V_S=0}=R_o'\|R_C=\infty\|R_C=R_C \longrightarrow R_o=R_C$$



$$A_V = \frac{V_o}{V_i} \rightarrow \begin{cases} V_o = -R_C \cdot i_C = -R_C(h_{fe} i_b + V_o h_{oe}) \\ V_i = h_{ie} i_b + h_{re} V_{ce} = h_{ie} i_b + h_{re} V_o \end{cases}$$

$$\longrightarrow A_V = \frac{-h_{fe}\left(R_C \| \frac{1}{h_{oe}}\right)}{h_{ie} - h_{re} h_{fe}\left(R_C \| \frac{1}{h_{oe}}\right)}$$

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} = R_1 \| R_r \| R_i' = R_1 \| R_r \| \frac{V_i}{i_b} = R_1 \| R_r \| R_i'$$

$$, \; R_i' = h_{ie} - h_{re} h_{fe}\left(R_C \| \frac{1}{h_{oe}}\right)$$

$$\longrightarrow R_i = R_1 \| R_r \| \left(h_{ie} - h_{re} h_{fe}\left(R_C \| \frac{1}{h_{oe}}\right)\right)$$

$$A_i = \frac{i_c}{i_b} \quad , \quad A_V = \frac{R_o}{R_i'} \times A_i$$

$$, \; A_i = \frac{i_c}{i_b} = \frac{i_c}{h_{fe} i_b} \times \frac{h_{fe} i_b}{i_b} = \frac{1/h_{oe}}{1/h_{oe} + R_C} \times h_{fe} \longrightarrow A_i = \frac{\frac{1}{h_{oe}}}{\frac{1}{h_{oe}} + R_C} \cdot h_{fe}$$

$$A_{i_S} \triangleq \frac{i_c}{i_i} = \frac{i_c}{i_b} \times \frac{i_b}{i_i} = A_i \times \frac{R_b}{R_b + R_i'} \longrightarrow A_{i_S} = A_i \frac{R_b}{R_b + R_i'}$$

$$R_o = \left.\frac{V_o}{i_o}\right|_{V_S = 0} = R_C \| R_o'$$

$$R_o' = \left.\frac{V_o}{i_c}\right|_{V_S = 0} \quad , \quad i_c = h_{fe} i_b + V_o h_{oe} \quad , \quad \overset{i_b =}{h_{re} V_o} = i_b (h_{ie} + R_S \| R_b)$$

$$\longrightarrow Y_o = \frac{1}{R_o'} = h_{oe} - \frac{h_{fe} h_{re}}{h_{ie} + R_S \| R_b}$$

مثال عددی: $R_C = ۱\,k\Omega$ ، $R_S = ۱۰۰\,\Omega$ ، $R_b \gg h_{ie}$

$h_{fe} = \beta = ۵۰$ ، $h_{ie} = ۱۱۰۰\,\Omega$ ، $h_{re} = ۲٫۵ \times ۱۰^{-۴}$ $h_{oe} = ۲۵\,\mu s$

$\rightarrow \frac{۱}{h_{oe}} = ۴۰\,k\Omega$

الف) مقدار A_V و R_i ، R_o' ، A_i ، $R_o = R_c \| R_o'$ را به طور دقیق بدست آورید. ب) با فرض h_{oe} و h_{re} تقریباً صفر مقادیر قسمت الف را بدست آورید.

الف)

$$\longrightarrow A_V = \frac{-h_{fe}(R_c \| {}^{1}\!/h_{oe})}{h_{ie} - h_{re} h_{fe} R_c} \simeq -۴۶$$

$$R_i = R_i' = h_{ie} - h_{re} h_{fe} R_L = ۱٫۰۹K \simeq ۱٫۱\,K\Omega$$

$$A_i = -۵۰٫۶ = \frac{-i_c}{i_b} \overset{\text{با فرض بزرگ } R_1 R_L}{=} \frac{-i_c}{i_L}$$

$$Y_o = h_{oe} - \frac{h_{fe} h_{re}}{h_{ie} + R_S \| R_b} = ٫۱۴۶ \times ۱۰^{-۴}\,s \longrightarrow R_o' = \frac{۱}{Y_o} \simeq ۶۸K$$

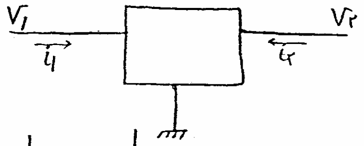
$$R_o = R_c \| R_o' \simeq ۱\,k\Omega$$

$$\longrightarrow R_i = R_b \| h_{ie} = ۱٫۱\,K\Omega$$

$$R_o = R_o' \| R_c = \infty \| R_c = R_c = ۱\,k\Omega$$

$$A_V = \frac{-h_{fe} R_c}{h_{ie}} = -۴۵٫۵$$

$$A_i = \frac{-i_c}{i_b} = -h_{fe} = -۵۰$$



$$\begin{cases} V_1 = \underset{h_f}{\overset{h_i}{h_{11}}} i_1 + \overset{h_r}{h_{12}} V_2 \\ i_2 = \underset{h_f}{h_{21}} i_1 + \underset{h_o}{h_{22}} V_2 \end{cases}$$

Common Collector

$$\xrightarrow{C \cdot C} \begin{cases} V_{bc} = h_{ic} i_b + h_{rc} V_{ec} \\ i_e = h_{fc} i_b + h_{oc} V_{ec} \end{cases}$$

$$h_{ic} = \left.\frac{V_{bc}}{i_b}\right|_{V_{ec}=0}$$ امپدانس ورودی

$$h_{rc} = \left.\frac{V_{bc}}{V_{ec}}\right|_{i_b=0}$$ بهرهٔ ولتاژ انتقالی معکوس

$$h_{fc} = \left.\frac{i_e}{i_b}\right|_{V_{ec}=0}$$ بهرهٔ جریان مستقیم

$$h_{oc} = \left.\frac{i_e}{V_{ec}}\right|_{i_b=0}$$ ادمیتانس خروجی

$$V_{bc} = V_{be} + V_{ec} = V_{be} \cancel{= h_{ie} \times i_b}$$

$$\rightarrow h_{ic} = \left.\frac{V_{bc}}{i_b}\right|_{V_{ec}=0} = \frac{h_{ie} \times i_b}{i_b} = h_{ie} \rightarrow \boxed{h_{ic} = h_{ie}}$$

$$h_{rc} = \left.\frac{V_{be} + V_{ec}}{V_{ec}}\right|_{i_b=0} = \frac{h_{re} \cdot V_{ec} + V_{ec}}{V_{ec}} = 1 - h_{re}$$

$$V_{be}\Big|_{i_b=0} = h_{ie} \overset{0}{\cancel{i_b}} + h_{re} V_{ce} = -h_{re} V_{ec}$$

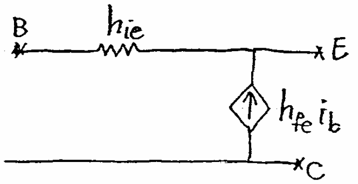
$$\rightarrow \boxed{h_{rc} = 1 - h_{re}}$$

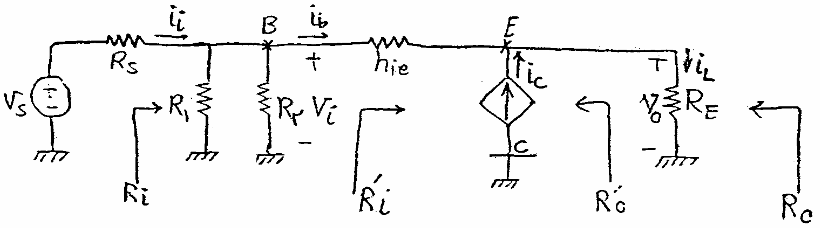
$$h_{fc} = \left.\frac{i_e}{i_b}\right|_{V_{ec}=0} \longrightarrow h_{fc} = \left.\frac{-(1+h_{fe}) i_b}{i_b}\right|_{V_{ec}=0} = -(1+h_{fe})$$

$$V_{ec}=0 \longrightarrow i_e = h_{fe} i_b$$

$$\longrightarrow \boxed{h_{fc} = -(1+h_{fe})}$$

$$h_{oc} = \frac{i_e}{V_{ec}}\bigg|_{i_b=0} = \frac{-i_c}{i_c \times \frac{1}{h_{oe}}} = h_{oe} \longrightarrow \boxed{h_{oc} = h_{oe}}$$





$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_L}{i_b} \cdot \frac{i_b}{i_i} = \frac{i_b + h_{fe} i_b}{i_b} \cdot \frac{R_b}{R_b + R_i'}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(1+h_{fe})\, i_b \cdot R_E}{(1+h_{fe})\, i_b \cdot R_E + h_{ie} \cdot i_b} = \frac{(1+h_{fe}) R_E}{h_{ie} + (1+h_{fe}) R_E} \simeq 1$$

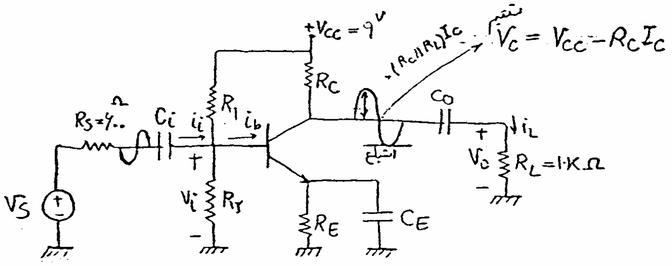
$$\longrightarrow A_v = \frac{(1+h_{fe})\, R_E}{h_{ie} + (1+h_{fe})\, R_E}$$

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} = R_1 \| R_r \| R_i'$$

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

$$R_o = \frac{V_o}{i_o}\bigg|_{V_s=0} = R_o' \| R_E$$

$$R_o' = \frac{V_o}{i_e}\bigg|_{V_s=0} = \frac{-i_b \cdot h_{ie} - i_b \cdot R_1 \| R_r \| R_s}{-(1+h_{fe})\, i_b} = \frac{h_{ie} + R_1 \| R_r \| R_s}{(1+h_{fe})}$$

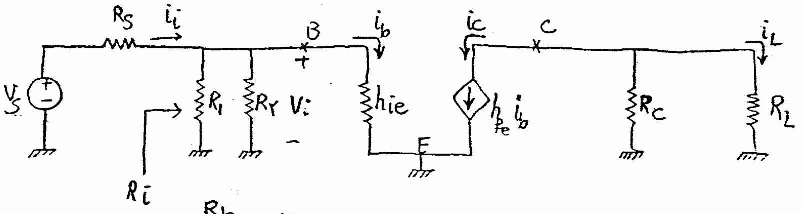


مدار مقابل را با داده های

زیر طراحی کنید.

داده ها :

$$\beta = h_{fe} = ۲۰۰ \quad , \quad \frac{i_L}{i_i} = A_i \geqslant ۱۲۰ \quad , \quad R_i \geqslant ۲^{K\Omega} \quad , \quad V_{o_{pp}} \geqslant ۲^V$$



$$\overset{R_b}{\overline{R_1 \| R_۲}} \overset{*}{\gg} h_{ie}$$

برای راحتی کار از تقریب مقابل استفاده می کنیم :

$$A_i \geqslant ۱۲۰ \longrightarrow \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_L}{i_b} = \frac{i_L}{i_c} \times \frac{i_c}{i_b} = \frac{-R_C}{R_C + R_L} \times h_{fe} \geqslant ۱۲۰$$

$$\longrightarrow R_C \geqslant ۱٫۵ \; K\Omega$$

مقاومتهای استاندارد

۱٫۸ K

۲٫۲ K

$R_C = \boxed{۲٫۷ \; K}$

$$R_i \overset{*}{\simeq} h_{ie} \geqslant ۲K\Omega \quad , \quad h_{ie} = \frac{\eta V_T}{I_C}\beta \geqslant ۲K\Omega \longrightarrow \boxed{I_C \leqslant ۳٫۵ \; mA}$$ ①

$$(R_C \| R_L) I_C \geqslant ۱^V \longrightarrow \boxed{I_C \geqslant ۱٫۳۷ \; mA} \leftarrow V_{o_p}^+$$ ②

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_C$$

چون $V_{CE_{sat}}$ را اندک بوده آن را صفر می گیریم.

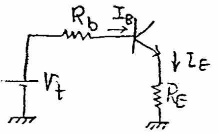
$$\longrightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \geqslant ۱ \; V \longrightarrow I_C \leqslant \frac{۸}{R_C + R_E}$$

$$\text{if } R_E = ۰ \longrightarrow \boxed{I_C \leqslant ۲٫۹۶ \; mA} \leftarrow V_{o_p}^-$$ ③

① , ② , ③ $\longrightarrow I_C = ۲ \; mA$

$$I_c < \frac{۸}{R_E+R_C} \xrightarrow{I_C=۲^{mA}} \boxed{R_E = 1\,k\Omega}$$

$$R_b = \frac{\beta_{min} R_E}{10} = ۲۰\,k\Omega$$



مدار DC :

$$\begin{cases} R_1 = R_b \dfrac{V_{CC}}{V_t} \\ R_۲ = \dfrac{R_b}{1-\dfrac{V_t}{V_{CC}}} \end{cases} \quad , \; V_t = R_b I_B + V_{BE} + R_E I_E = ۲٫۹^{v}$$

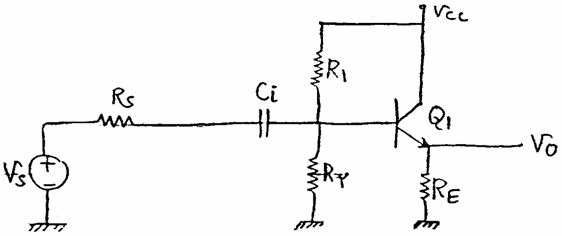
$$\longrightarrow \; R_1 = ۴۳\,k\Omega \quad , \quad R_۲ = ۲۹٫۹\,k\Omega$$

$R_1 = ۶۸\,k$ استاندارد $R_۲ = ۳۳\,k$ استاندارد

اگر اعداد بدست آمده را در مسئله قرار داده و یکبار دیگر تحلیل کنیم خواهیم دید که :

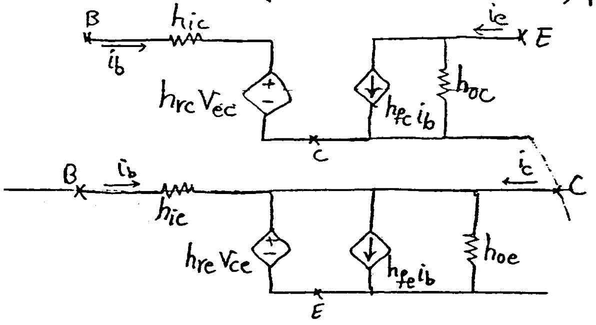
$$\longrightarrow \; R_i = R_1 \| R_۲ \| h_{fe} = ۲٫۹۷^{k\Omega} \quad , \quad A_i = -۱۲۴٫۲ \quad . \quad V_{CE} = ۱٫۶^{v}$$

تقویت کنندهٔ کلکتور مشترک :



با فرض اینکه پارامترهای هیبرید را در تقویت کنندهٔ امیتر مشترک داریم پارامترهای هیبرید

کلکتور مشترک را بدست می آوریم (h_{ic} , h_{fc} , h_{rc} , h_{oc}) :



C.E.

مثال: $R_E = R_L = ۱\ K\Omega$, $R_S = ۱۰۰^{\Omega}$

$R_b = R_۱ \| R_۲ = ۵۰۰\ K\Omega$, $h_{fe} = ۵۰^{\Omega}$, $h_{ie} = ۱۱۰۰\,\Omega$

مقادیر A_v، R_i، A_i، R_o رابدست آورید:

$\longrightarrow$

$$A_v = \frac{(1+h_{fe})(R_E \| R_L)}{h_{ie} + (1+h_{fe})(R_E \| R_L)} = \frac{(۵۱)(/۵)}{۱/۱ + ۵۱(/۵)} = /۹۸$$

$$R_i = R_b \| R_i' = R_b \| \left[h_{ie} + (1+h_{fe})(R_E \| R_L) \right] = ۴۷\ K\Omega$$

$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_L}{i_e} \cdot \frac{i_e}{i_b} \cdot \frac{i_b}{i_i} = \frac{R_E}{R_E + R_L} \cdot (1+h_{fe}) \cdot \frac{R_b}{R_b + R_i'} = ۴۶\ K\Omega$$

می توان A_i را از رابطهٔ مقابل بدست آورد:

$$A_i = \frac{\overbrace{i_L R_L}^{V_o} R_i}{\underbrace{i_i R_i}_{V_i} R_L} = A_v \cdot \frac{R_i}{R_L}$$

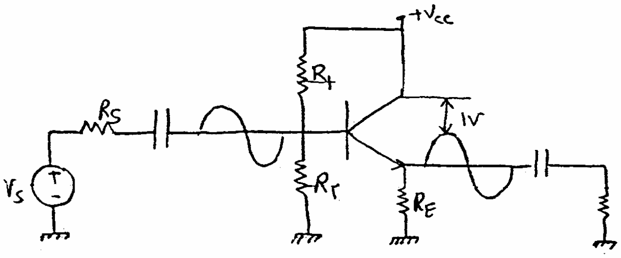
$$R_o = R_E \| \frac{(R_S \| R_b) + h_{ie}}{1 + h_{fe}} \simeq ۲۳/۵\ \Omega$$

مثال: تقویت کنندهٔ کلکتور مشترکی با داده های زیر طراحی کنید:

$A_{V_S} \geqslant /۹۸$, $R_i \geqslant ۱۵\,K\Omega$, $V_{ip} = ۲V \longrightarrow V_{op} = ۲V$

$V_{CE_{min}} = ۱^{V}$, $R_S = ۱۰۰\ \Omega$, $R_L = ۱\ K\Omega$, $\overset{\text{ترانزیستور}}{BC107} \downarrow$ $۱۴۰ < \beta < ۲۰۰$

$V_{CC} = ۹^{V}$, $\rho = ۱/۴$, $V_T = ۲۵^{mV}$

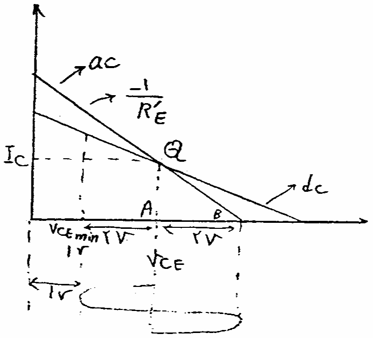


$$A_V = \frac{(1+h_{fe})(R_E \| R_L)}{h_{ie} + (1+h_{fe})(R_E \| R_L)} > ۰/۹۸ \longrightarrow \frac{h_{fe}(R_E \| R_L)}{\underbrace{\frac{\eta V_T \beta}{I_C}}_{h_{ie}} + h_{fe}(R_E \| R_L)} > ۰/۹۸$$

$$\longrightarrow 1 + \frac{1}{R_E} < ۰/۵۸ I_C$$

$$V_{CC} = R_E I_C + V_{CE} \longrightarrow I_C \overset{}{\underset{\circledast}{=}} \frac{۹ - V_{CE}}{R_E}$$

$$\longrightarrow \boxed{R_E + ۰/۵۸ V_{CE} < ۴٫۳^{V}} \ ①$$

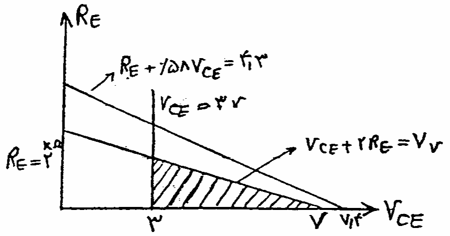


$$\longrightarrow \boxed{V_{CE} \geqslant ۳\,V} \ ②$$

$$AB = I_C \cdot R'_E > ۲V \quad , \quad R'_E = \frac{R_E \cdot R_L}{R_E + R_L}$$

$$\longrightarrow I_C \cdot \frac{R_E}{1 + R_E} > ۲V$$

$$\xrightarrow{\circledast} \boxed{۲R_E + V_{CE} < ۷_V} \ ③$$



مقاومت استاندارد

$$\longrightarrow R_E = ۱٫۵\ k\Omega \qquad \longrightarrow V_{CE} = ۴^{V} \quad , \quad I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_E} = ۳٫۳^{mA}$$

$$R_i = R'_i \| R_b = \left[h_{ie} + (1+h_{fe})(R_E \| R_L)\right] \| R_b > ۱۵k$$

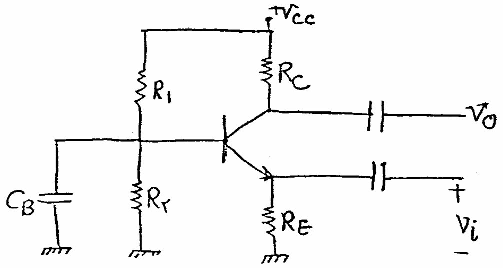
$$, \quad h_{ie_{min}} = \frac{\eta V_T \beta_{min}}{I_C} = ۱٫۲۴\ k\Omega$$

$$\longrightarrow R_b > ۱۸٫۸^{k\Omega}$$

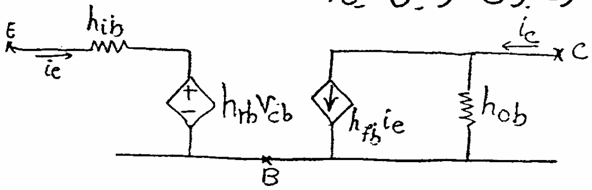
$$R_b = \frac{\beta_{min} \cdot R_E}{۱۰} \simeq ۱۸\ k\Omega \longrightarrow R_{۱} \| R_{۲} = ۱۸\ k\Omega$$

$$\xrightarrow{\text{با انتخاب}} R_{۱} = \underset{\underset{۳۳k}{\downarrow \text{استاندارد}}}{۳۰k} \;,\; R_{۲} = \underset{\underset{۵۶k}{\downarrow \text{استاندارد}}}{۵۰k}$$

تقویت کنندهٔ بیس مشترک :



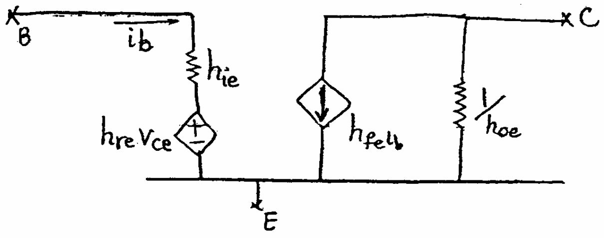
استفاده از خازن C_B صرفاً برای افزایش گین است.



$$\begin{cases} v_{eb} = h_{ib} \cdot i_e + h_{rb} v_{cb} \\ i_c = h_{fb} i_e + v_{cb} h_{ob} \end{cases}$$

$$h_{ib} = \left.\frac{v_{eb}}{i_e}\right|_{v_{cb}=۰} \quad , \quad h_{rb} = \left.\frac{v_{eb}}{v_{cb}}\right|_{i_e=۰}$$

$$h_{fb} = \left.\frac{i_c}{i_e}\right|_{v_{cb}=۰} \qquad h_{ob} = \left.\frac{i_c}{v_{cb}}\right|_{i_e=۰}$$



تمرین: پارامترهای هیبرید را محاسبه کنید.

جواب:

$$h_{ib} = \frac{h_{ie}}{h_{ie}h_{oe} + (1+h_{fe})(1-\cancelto{0}{h_{re}})}$$

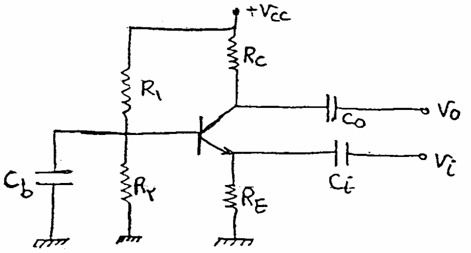
$$h_{fb} = \frac{-h_{fe}(1-\cancelto{0}{h_{re}}) - h_{oe}h_{ie}}{(1+h_{fe})(1-\cancelto{0}{h_{re}}) - h_{oe}h_{ie}} \quad , \quad h_{rb} = \frac{h_{ie}h_{oe}}{1+h_{fe}} - h_{re}$$

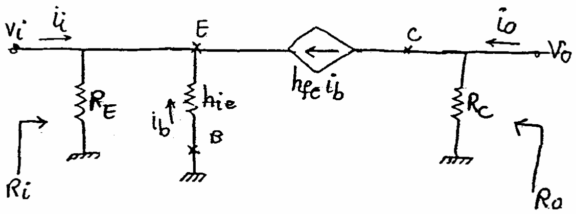
$$h_{ob} = \frac{h_{oe}}{h_{ie}h_{oe} + (1+\cancelto{0}{h_{re}})(1+h_{fe})}$$

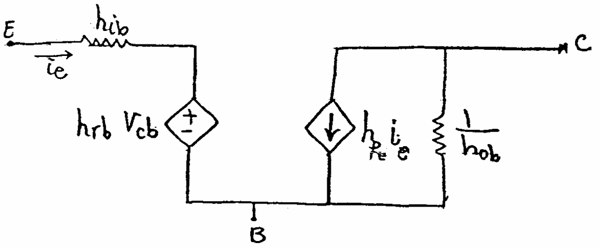
می‌توان از تقریب‌های $h_{ie}h_{oe} \ll h_{fe}$

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

تقویت کننده بیس مشترک:

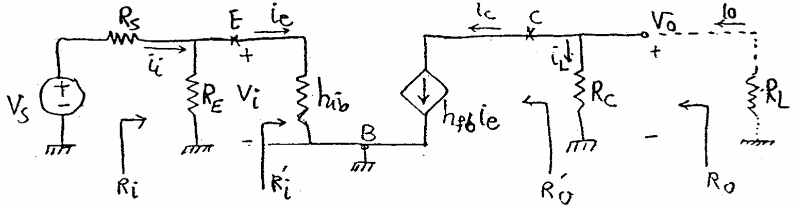






$$h_{ib} = \frac{v_{eb}}{i_e} = \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} \quad , \quad h_{rb} = \frac{v_{eb}}{v_{cb}} = \frac{h_{ie} h_{oe}}{1+h_{fe}} - h_{re}$$

$$h_{fb} = \frac{i_c}{i_e} = \frac{-h_{fe}}{1+h_{fe}} \quad , \quad h_{ob} = \frac{i_c}{v_{cb}} = \frac{h_{oe}}{1+h_{fe}}$$



$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_L}{i_c} \cdot \frac{i_c}{i_e} \cdot \frac{i_e}{i_i} = -1 \times h_{fb} \times \frac{R_E}{R_E + h_{ib}}$$

$$\longrightarrow A_i = \frac{-h_{fb} R_E}{R_E + h_{ib}} \simeq -h_{fb}$$

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} = R_E \parallel R_i'$$

$$R_i' = \frac{V_i}{i_e} = \frac{i_e h_{ib}}{i_e} = h_{ib} \longrightarrow R_i' = h_{ib}$$

$$\longrightarrow R_i = R_E \parallel h_{ib} \simeq h_{ib}$$

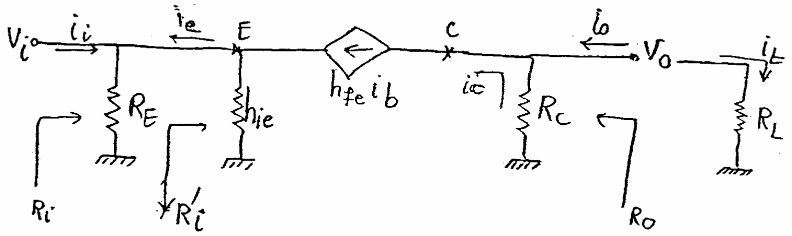
$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_C i_c}{h_{ib} i_e} = -\frac{\overset{\text{عدد منفی}}{\boxed{h_{fb}}}}{h_{ib}} R_C = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_C \longrightarrow A_V = \frac{-h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

راه دیگر برای بدست آوردن A_V :

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

$$R_o = \left.\frac{V_o}{i_o}\right|_{V_S=0} = R_C \parallel R_o' = R_C \longrightarrow R_o = R_C$$

$$R_o' = \left.\frac{V_o}{i_c}\right|_{V_S=0} = \infty \longrightarrow R_o' = \infty$$



$$A_i = \frac{i_c}{i_i} = \frac{i_c}{i_e} \cdot \frac{i_e}{i_i} = \frac{h_{fe}i_b}{(1+h_{fe})i_b} \times \frac{-R_E}{R_E+R'_i} = \frac{-h_{fe}}{1+h_{fe}}$$

$$\longrightarrow \quad A_i = -\frac{h_{fe}}{1+h_{fe}}$$

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} = R_E \| R'_i = R_E \| \frac{V_i}{-i_e} = R_E \| \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} \simeq \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}$$

$$\longrightarrow \quad R_i = R_E \| \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} \simeq \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}$$

$$R'_i = \frac{-i_b h_{ie}}{-(1+h_{fe})i_b} = \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} \quad \longrightarrow \quad R'_i = \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}$$

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_C i_c}{-i_b h_{ie}} = \frac{h_{fe}}{h_{ie}}R_C \quad \longrightarrow \quad A_V = \frac{h_{fe}}{h_{ie}}R_C$$

$$R_o = \frac{V_o}{i_o}\bigg|_{V_s=0} = R_C \| R'_o = R_C \| \frac{V_o}{i_i} \simeq R_C \quad \longrightarrow \quad R_o \simeq R_C$$

اگر خازن C_b را از مدار برداریم آنگاه:

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} = R_E \| R'_i = R_E \| \frac{V_i}{-i_e} = R_E \| \frac{h_{ie}+R_b}{1+h_{fe}} = \frac{h_{ie}+R_b}{1+h_{fe}}$$

$$R'_i = \frac{-i_b h_{ie} - i_b(R_b)}{-(1+h_{fe})i_b} = \frac{h_{ie}+R_b}{1+h_{fe}}$$

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_C i_c}{-i_b h_{ie} - i_b R_b} = \frac{h_{fe}R_C}{h_{ie}+R_b}$$

مثال: تقویت کنندهٔ بیس مشترک بایپس شده: $R_E = ۱K$, $R_S = ۱۰\,\Omega$

$h_{ib} = ۲۱٫۶\,\Omega$, $R_L = ۱K$, $h_{\cancel{rb}} = ۲٫۵\times۱۰^{-۶}$, $h_{fb} = -٫۹۸$

$h_{\cancel{ob}} = ٫۴۹\times۱۰^{-۶}\,s$

$\longrightarrow A_i = -h_{fb} = ٫۹۸$

$A_v = \frac{-h_{fb} R'_L}{h_{ib}} = ۴۵۸$, $R'_L \to R_L \| R_C$, $R_o = \frac{1}{h_{ob}} \| R_C = R_C = ۱K\Omega$

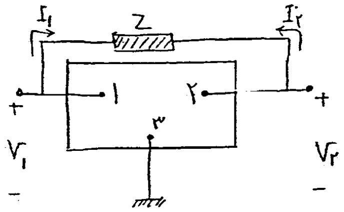
$R_i = h_{ib} \| R_E \simeq h_{ib} = ۲۱٫۶$, $A_{V_S} = \frac{V_o}{V_S} = \frac{V_o}{V_i} \cdot \frac{V_i}{V_S}$

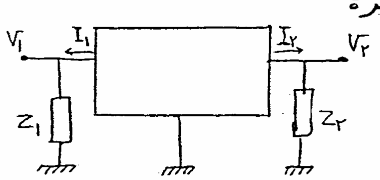
$A_{V_S} = A_V \cdot \frac{R_i}{R_i + R_S} = ۳۱٫۲$

نوع تقویت کننده	A_i	A_v	R_i	R_o
C.E با خازن بای پاس	h_{fe} بالا	$-\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_C \gg$ بالا	متوسط	بالا
C.E بدون خازن	متوسط	پائین	بالا	بالا
C.C	متوسط	$\simeq ۱$	بالا	پائین
C.B با خازن بیس	$\simeq ۱$	بالا	پائین	بالا

کاربرد در فرکانس متوسط

قضیهٔ میلر:

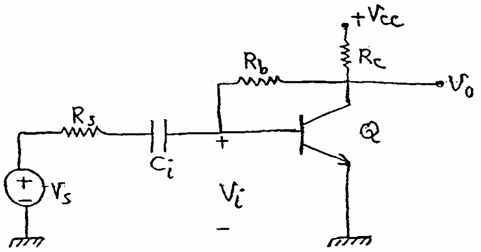




$$\begin{cases} \dfrac{V_۲}{V_۱} = K & \longrightarrow \quad Z_۱ = \dfrac{V_۱}{I_۱} \ , \quad Z_۲ = \dfrac{V_۲}{I_۲} = \dfrac{KV_۱}{V_۲} \\ I_۱ = -I_۲ = \dfrac{V_۱ - V_۲}{Z} & \longrightarrow \quad Z_۱ = \dfrac{Z}{۱-K} \end{cases}$$

$$Z_۲ = \frac{Z}{۱-\frac{۱}{K}} = \frac{KZ}{K-۱}$$

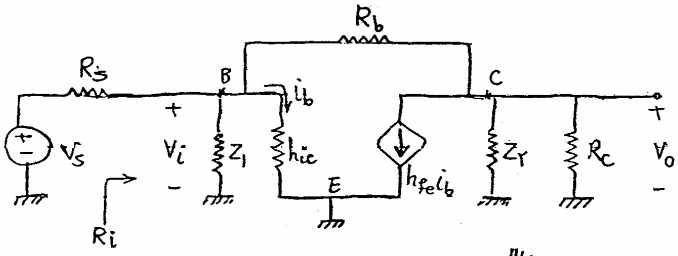
مثال:



$A_V = ?$

$A_{V_S} = ?$

$R_i = ?$



$$Z_۱ = \frac{Z}{۱-K} \quad , \quad Z_۲ = \frac{KZ}{K-۱} \overset{\text{با فرض } K \gg ۱}{\simeq} Z$$

$h_{ie} = ۱٫۵ K\Omega$

$h_{fe} = ۱۰۰$

$(h_{oe})^{-۱} = ۴۰ K$

$R_b = ۲۰۰ K$

$R_C = ۱۰ K$

$R_S = ۱۰ K$

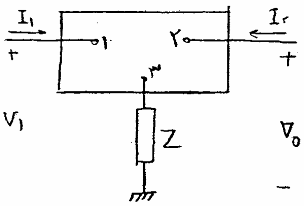
$|A_V| \gg$

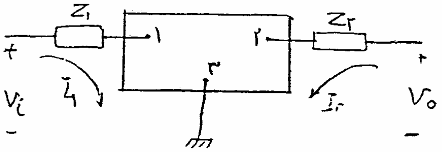
$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-h_{fe} i_b \left(\frac{۱}{h_{oe}} \| \overset{R_b}{Z_۲} \| R_C\right)}{i_b h_{ie}} \simeq -۵۱۳$$

$$R_i = Z_۱ \| h_{ie} = ۳۰۸٫۹ \ \Omega$$

$$A_{V_S} = \frac{V_o}{V_S} = \frac{V_o}{V_i} \cdot \frac{V_i}{V_S} = A_V \cdot \frac{R_i}{R_i + R_S} = -۱۵٫۴ \ \Omega$$

قضیهٔ دوم میلر:

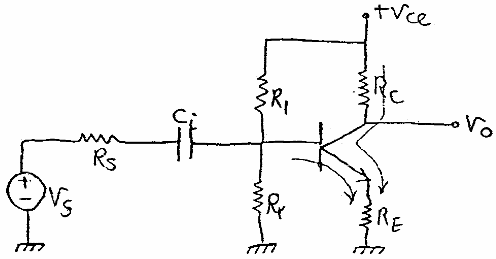


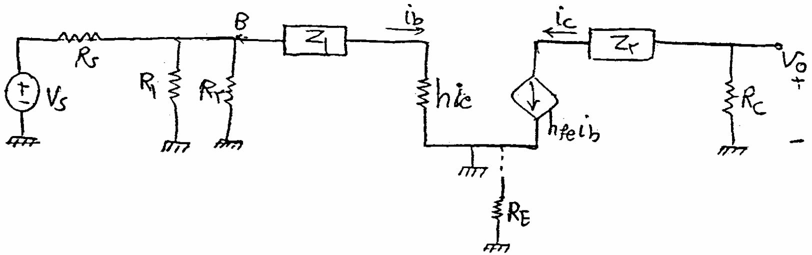


$$\frac{I_۲}{I_۱} = K \quad , \quad \begin{cases} V_i = V_{۱۳} + Z(I_۱ + I_۲) \\ V_0 = V_{۲۳} + Z(I_۱ + I_۲) \end{cases} \quad , \quad \begin{cases} V_i = Z_۱ I_۱ + V_{۱۳} \\ V_۲ = Z_۲ I_۲ + V_{۲۳} \end{cases}$$

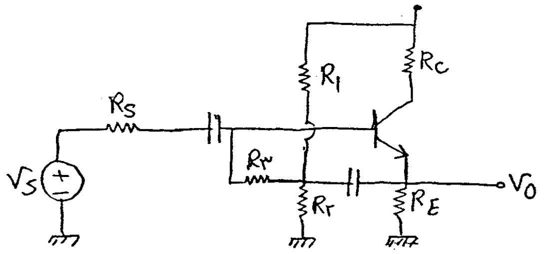
$$\longrightarrow \begin{cases} Z_۱ = Z(1+k) \\ Z_۲ = \frac{k+1}{k} Z \end{cases}$$

مثال:

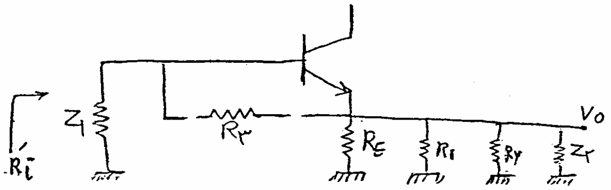




$$Z_1 = R_E(1+h_{fe}) \quad , \quad Z_۲ = \frac{1+h_{fe}}{h_{fe}} R_E \simeq R_E \quad , \quad (h_{oe})^{-1} \gg (R_E + R_C)$$



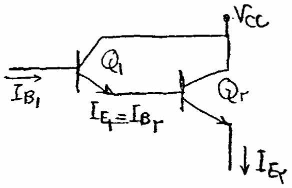
مدار معادل AC:



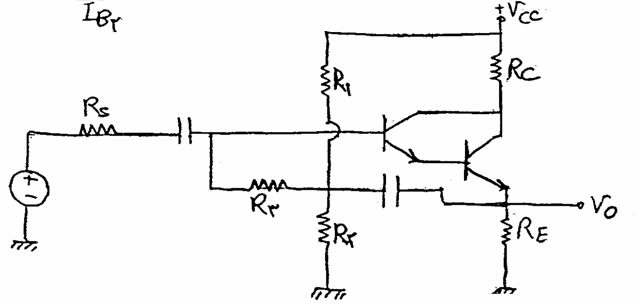
$$R_i' = Z_1 \,||\, [h_{ie} + (1+r_e)(R_E || R_1 || R_2 || Z_2)]$$

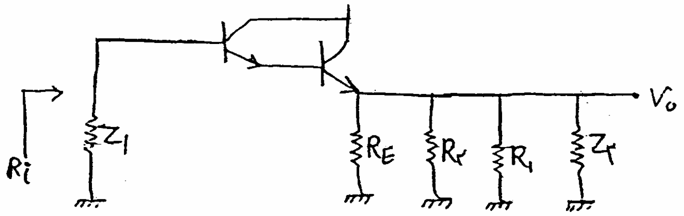
$$Z_1 = \frac{R_3}{1-A_v} \quad , \quad Z_2 = \frac{R_3}{1-\frac{1}{A_v}}$$

دارلینگتون:

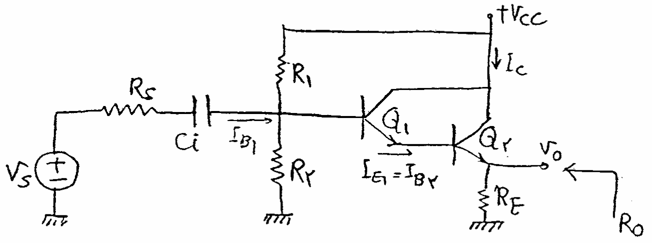


$$I_{E_2} = \underbrace{I_{B_1}(1+\beta_1)}_{I_{B_2}}(1+\beta_2)$$

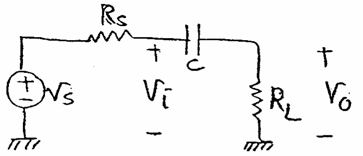




$$R_i' = Z_1 \parallel \left[h_{ie_1} + (1+h_{fe_1})\left[h_{ie۲} + (1+h_{fe_۲})(R_E \parallel R_1 \parallel R_۲ \parallel Z_۲) \right] \right]$$



$$R_0 = R_E \parallel \frac{1}{1+h_{fe_۲}}\left[h_{ie_۲} + \frac{1}{1+h_{fe_1}}\left[h_{ie_1} + R_1 \parallel R_۲ \parallel R_S \right] \right]$$



$(R_L+R_S)C = \tau$ ثابت زمانی

قطب سیستم $p = \frac{1}{\tau}$

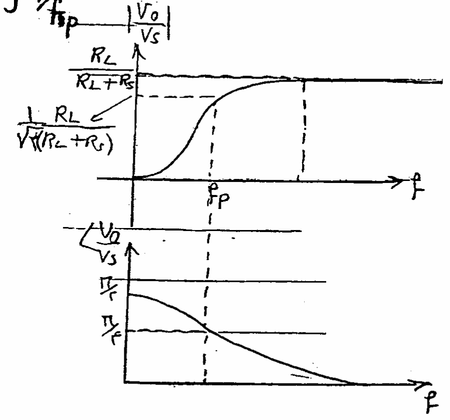
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{R_L}{R_L+R_S+\frac{1}{CS}} = \frac{R_L C S}{(R_L+R_S)CS+1} = \frac{R_L}{R_L+R_S}\cdot\frac{S}{S+p}$$

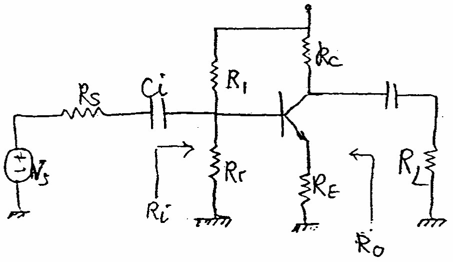
$$\frac{V_o(j\omega)}{V_s(j\omega)} = \frac{jR_L C\omega}{1+j(R_L+R_S)\omega_p C} \qquad \text{if} \quad \omega_p = \frac{1}{(R_S+R_L)}$$

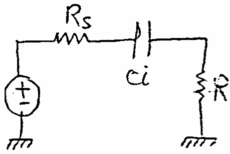
$$\longrightarrow \frac{V_o(j\omega)}{V_s(j\omega)} = \frac{jR_L C\omega}{1+j\frac{\omega}{\omega_p}} = \frac{j۲\pi R_L C f}{1+j\,f/f_p}$$

$$\left|\frac{V_o}{V_s}\right| = \frac{۲\pi R_L C f}{\sqrt{1+(f/f_p)^۲}} = \frac{1}{\sqrt{۲}}$$

$$\angle\frac{V_o}{V_s} = \frac{\pi}{۲} - \mathrm{Arctg}\frac{f}{f_p} = \frac{\pi}{۴}$$

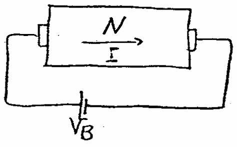


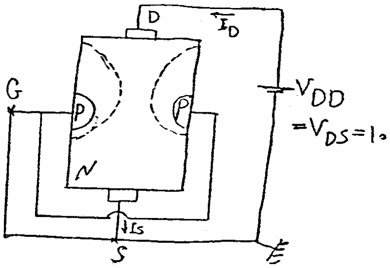


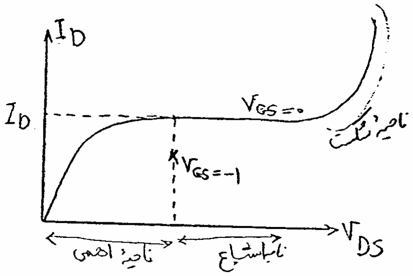


$$f_L = \frac{1}{۲\pi(R_i+R_s)C_i}$$

FET (field effect transistor)(ترانزیستور اثر میدانی):



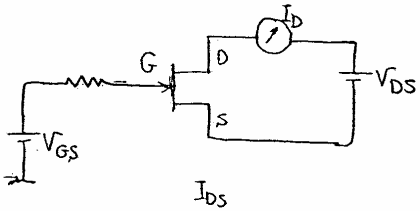


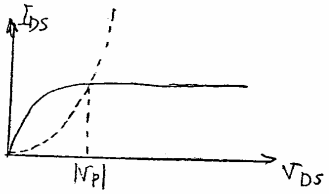


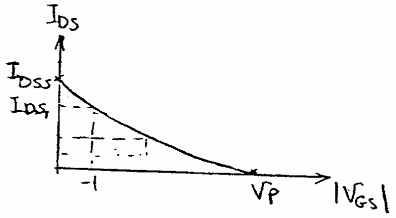
$I_{DSS} \longrightarrow V_{GS}=0$

$V_{GS}=V_P \longrightarrow I_D=0$

قطع







مشخصهٔ انتقالی:

$V_{GS}=0 \longrightarrow I_{DS}=I_{DSS}$

$V_{GS}=V_P \longrightarrow I_{DS}=0$

$$I_{DS}=I_{DSS}\left(1-\left|\frac{V_{GS}}{V_P}\right|\right)^2$$

مثال عددی:

$$\begin{matrix} V_P=-4^V \\ I_{DSS}=12mA \end{matrix} \longrightarrow \begin{cases} V_{GS}=0 \\ V_{GS}=-1.2 \\ V_{GS}=-2V \end{cases}$$

$V_{GS}=۰ \longrightarrow I_{DS}=I_{DSS}=۱۲mA$

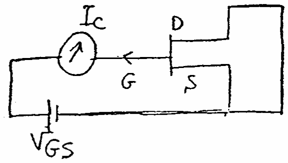
$V_{GS}=-۱/۲V \longrightarrow I_{DS}=۱۲\left(۱-\frac{-۱/۲}{-۴}\right)^{۲}=۵/۸۸\ mA$

$V_{GS}=۲ \longrightarrow I_{DS}=۳\ mA$

$\boxed{I_G=۱nA}$

$P_D=۰/۵\ W$,

$T=-۶۵°t+۳۰۰°$

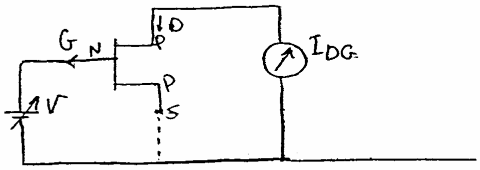


$I_{GSS}=۰/۰۱\ \mu A$

$V_{GS}=۱۰V$

$T=۱۰۰° \longrightarrow I_{GSS}=۱\ \mu A$

$V_{GS}=۱۰V$



درحالتی که خط‌چین نیست

$BV_{DG_0}=-۲۰V$

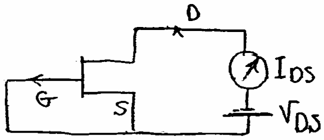
۲N۴۳۸۲

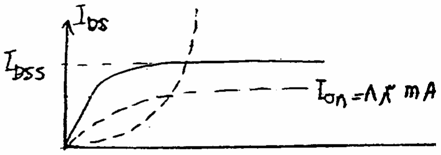
۱۰ μA

درحالتی که خط‌چین وجود دارد:

$BV_{DG_0}=-BV_{GSS}$

$V_{GS}=۰ \longrightarrow I_{DSS}=I_{DS}$



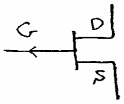


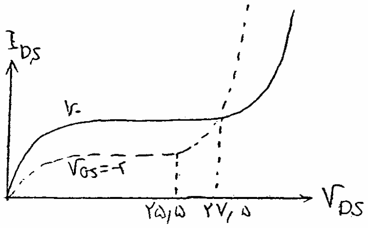
$V_{DS}=۱۰V$

$V_{GS}=۳/۵V$

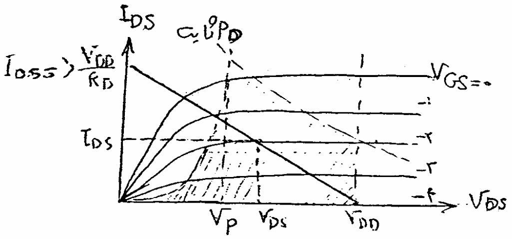
$$I_{D_{off}} = ۱۰\,\mu A$$
$$V_{DS} = ۱۲\,V \longrightarrow V_{GS} = ۸^{V} \simeq V_P$$

BV_{DS}



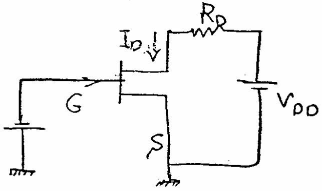


$BV_{DS_0} = -۲۷/۵$, $V_{DS} = V_{DG} + V_{GS}$



$P_D = I_{DS} V_{DS}$

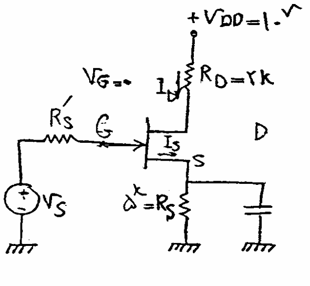
$T = ۲۵°$



معادلهٔ خط بار $V_{DD} = R_D I_D + V_{DS}$

$V_{GS} = ۰$ ، $V_{DS} = |V_P|$ ناحیهٔ اشباع

$$\boxed{V_{DS} \geqslant V_{GS} - V_P}$$



مثال : V_{GS}، I_{DS}، V_D را برای مدار نشان داده شده بدست آورید

$I_{DSS} = ۵^{m}A$, $V_P = -۵^{V}$

$$\longrightarrow \begin{cases} V_{GS} = V_G - V_S = -V_S = -R_S I_{DS} \\ I_{DS} = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^{۲} = I_{DSS}\left(1 + \frac{R_S I_{DS}}{V_P}\right)^{۲} \end{cases}$$

$\longrightarrow I_{DS} \nearrow \boxed{}$, $\searrow$

$$\longrightarrow I_{DS} = \frac{-V_{GS}}{R_S} = ۱/۵۴$$

$$\longrightarrow \quad \frac{-V_{GS}}{R_S} = I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^{۲} \longrightarrow V_{GS} = \begin{cases} -۳٫۲ \checkmark \\ \boxed{-۷٫۸} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{DS} < I_{DSS} \\ |V_{GS}| < |V_P| \end{cases}$$

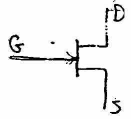
شرایطی که باید حتماً در مدار چک شود.

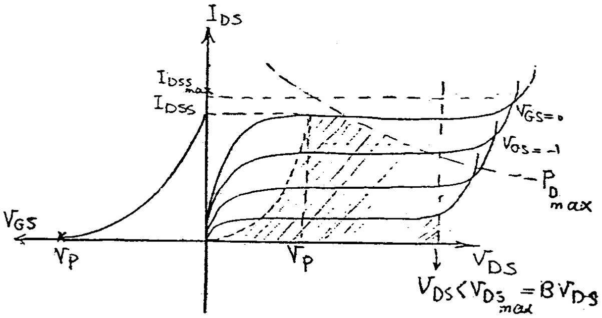
$$V_{DS} = V_D - V_S = V_{DD} - R_D I_{DS} = R_S . I_{DS}$$

$$\longrightarrow V_{DS} = ۵٫۵۲ \ \text{v}$$

$$V_{DS} \geqslant V_{GS} - V_P \longrightarrow V_{DS} \geqslant -۳٫۲-(-۵)=۱٫۸^{\text{v}}$$

چک کردن برای ناحیهٔ مجاز



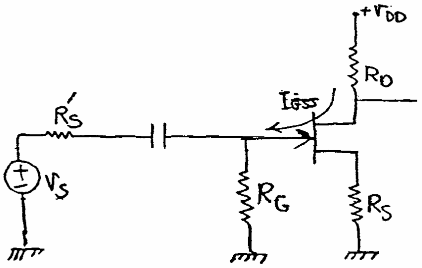


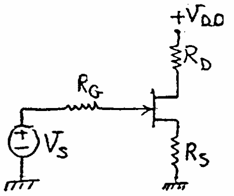
$$\begin{cases} V_{DS} \geqslant V_{GS} - V_P \\ BV_{DS} \\ I_{DS_{max}} \\ P_{D_{max}} = V_{DS} \cdot I_{DS} \end{cases}$$

پارامترهای محدودکننده

$$I_{DS} = I_{DSS}\left(1-\left|\frac{V_{GS}}{V_P}\right|\right)^{۲}$$

$$I_{DS} < I_{DSS}$$





$$
① \begin{cases} I_{GSS} \\ V_G = I_{GSS} \times R_G = \overset{nA}{۱۰} \times \overset{m}{۱۰۰} = 1\,V \end{cases}
$$

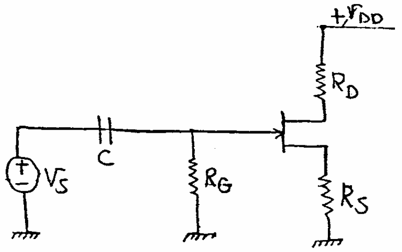
$$
③ \; I_{DS} - I_{GSS} = I_S
$$

$$
② \begin{cases} I_{GSS} = ۱۰\,nA \\ V_{GS} = V_G - V_S = V_G - R_S I_S \\ \quad = ۱ - ۴ = -۳ \end{cases}
$$

R_G اگر کوچک باشد دیگر امپدانس ورودی آن خیلی بزرگ نخواهد بود و اگر خیلی بزرگ باشد با تغییرات دما که I_{GSS} تغییر می‌کند V_G تغییر خواهد کرد و احتمال این است که FET از ناحیه اشباع خارج شود. همچنین با توجه به اینکه در ورودی سیگنال‌های noise وجود دارند اگر R_G خیلی بزرگ باشد این سیگنال به خروجی منتقل می‌شود و در خروجی با توان بالایی تقویت و ظاهر می‌شود امّا اگر R_G مناسب باشد noise توسط R_G به زمین منتقل می‌شود و در خروجی ظاهر نخواهد شد.

$$
①, ②, ③ \longrightarrow \boxed{V_{GS} = R_S I_{DS} + (R_S + R_G) I_{GSS}}
$$

مثال :



$۲۵^\circ < T < ۷۵^\circ$

$I_{GSS}(۲۵^\circ) = ۱۰\,nA$

$\Delta T = ۵^\circ c \longrightarrow I_{GSS} \times ۱۰$

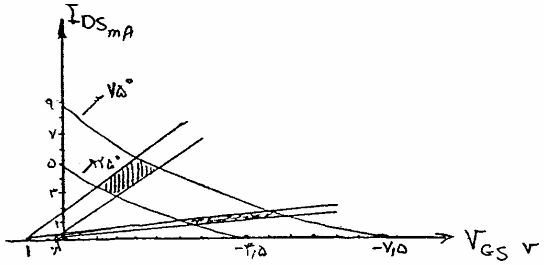
$$
I_{DS} = I_{DSS}\left(1 - \left|\frac{V_{GS}}{V_P}\right|\right)^۲
$$

$$
۲۵^\circ \begin{cases} I_{DSS} = ۵\,mA \\ V_P = -۴٫۵\,V \end{cases} \qquad ۷۵^\circ \begin{cases} I_{DSS} = ۹\,mA \\ V_P = -۷٫۵\,V \end{cases}
$$

a) $R_S = ۵۰۰\,\Omega$

b) $R_S = ۵\,K\Omega$

مشخصه انتقالی را رسم کنید.



a) $R_S = ۵۰۰\,\Omega$

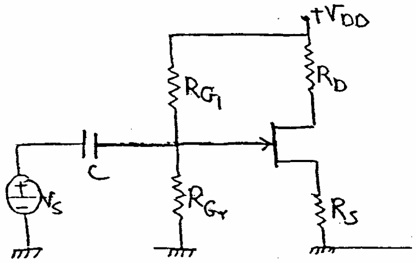
$$۲۵° \longrightarrow V_{GS} = -۵۰۰ I_{DS} + ۰/۱$$

$$۷۵° \longrightarrow V_{GS} \simeq -۵۰۰ I_{DS} + ۱$$

b) $R_S = ۵\,k\Omega$

$$۲۵° \longrightarrow V_{GS} = -۵۰۰۰\, I_{DS} + ۰/۱$$

$$۷۵° \longrightarrow V_{GS} = -۵۰۰۰\, I_D + ۱$$



$$V_{GS} = V_G - V_S$$

$$V_{GS} = V_{DD} \times \frac{R_{G۲}}{R_{G۱} + R_{G۲}} - R_S I_S$$

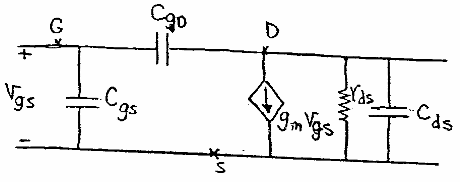
$$\begin{cases} V_t = \dfrac{R_{G۲}}{R_{G۱}+R_{G۲}} V_{DD} \\ R_t = R_{G۱} \parallel R_{G۲} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_D = I_S + I_{GSS} \\ V_G = R_t \times I_{GSS} + V_t \\ V_S = -R_S I_S \end{cases} \quad , \quad V_{GS} = V_G - V_S$$

تحلیل ac و تقویت کننده ها:

C.S	G ورودی	D خروجی	$\lvert A_V \rvert > 1$
C.D	G ورودی	S خروجی	$A_V \simeq 1$
C.G	S ورودی	D خروجی	$A_V > 1$ ← کاربرد چندانی ندارد

مدار معادل:



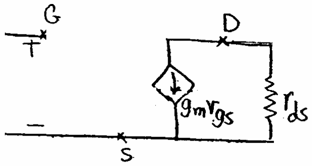
$C_{gs}, C_{gd} \simeq PF$

$C_{ds} \ll C_{gs}, C_{gd}$

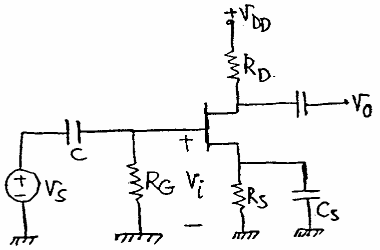
$$\left.\begin{array}{l} \text{(وقتی خروجی اتصال کوتاه است) خازن ورودی} \leftarrow C_{iss} = C_{gs} + C_{gd} \\ \text{(وقتی ورودی اتصال کوتاه است) خازن خروجی} \leftarrow C_{rss} \simeq C_{gd} \end{array}\right\}$$

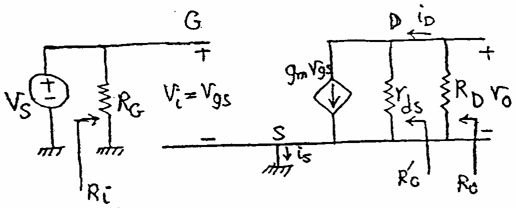
مقادیری که در کاتالوگ FET داده می شوند.

مدل سیگنال کوچک FET:



تقویت کننده سورس مشترک C.S :



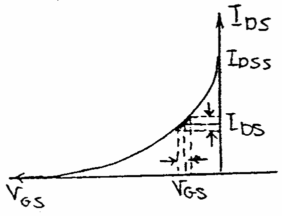


$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-g_m V_{gs}\,(R_D \parallel R_{ds})}{V_{gs}} = -g_m\,(R_D \parallel R_{ds})$$

شیب

$$\begin{cases} g_m = \dfrac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}} = g_{m_0}\left(1 - \dfrac{V_{GS}}{V_P}\right) \\ \boxed{g_{m_0}} = \dfrac{2 I_{DSS}}{|V_P|} \end{cases}$$

شیب منحنی در نقطه I_{DSS}



$$R_i = R_G$$

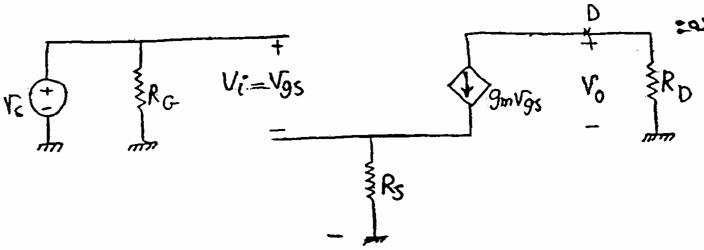
$$R_o = \frac{V_o}{i_o}\bigg|_{V_S=0} \quad , \quad R_o = R_D \parallel R'_o$$

$$R'_o = \frac{V_o}{i_D} = r_{ds} \quad \longrightarrow \quad R_o = R_D \parallel r_{ds}$$

باتوجه به اینکه V_s از نظر ac زمین است درنتیجه $\boxed{V_i = V_{GS}}$ لذا در این نوع تقویت کننده ها علاوه بر پارامترهای بالا باید V_{ipp} را نیز محاسبه و محدود کنیم.

$$V_{ipp} = \frac{V_{opp}}{A_V}$$

درحالت بایپاس نشده:

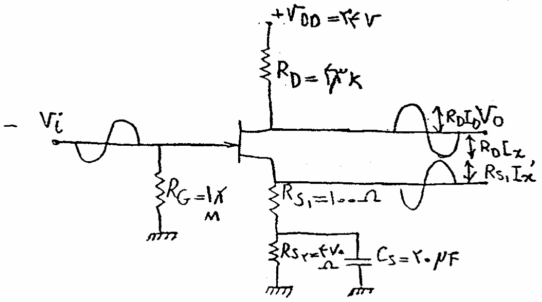


$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-g_m V_{gs} R_D}{V_{gs}+V_{gs}g_m R_s} = \frac{-g_m R_D}{1+g_m R_s}$$

$$\longrightarrow A_V = \frac{-g_m R_D}{1+g_m R_s}$$

$R_i = R_G$, $R_o = R_D$

مثال :



$I_{DSS} = ۴\ mA$

$V_P = -۴\ V$

R_i , R_o , A_V, V_{opp} , f_L = ?

$$\left\{\begin{array}{l} I_{DS} = I_{DSS}\left(1-\left|\frac{V_{GS}}{V_P}\right|\right)^۲ \\ V_{GS} = V_G - V_S = ۰ - I_{DS}(R_{S1}+R_{S2}) = -۰٫۵۷ I_{DS} \end{array}\right] \longrightarrow I_{DS} = ۲٫۹۸\ mA \longrightarrow V_{GS} = -۱٫۷۴\ V$$

$$g_m = \underbrace{\boxed{\frac{۲ I_{DSS}}{|V_P|}}}_{g_{m0}=۲ms}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right) = ۱٫۴۱۳\ ms$$

$A_V = \frac{-g_m R_D}{1+g_m R_{S1}} = -۵٫۲$, $R_i = R_G = ۱٫۲\ M\Omega$

$R_o = R_D = ۴٫۳\ M\Omega$, $V_D = V_{DD} - R_D I_D$

$V_{op}^{+} = R_D I_D \longrightarrow V_{op}^{+} = ۱۲٫۸\ V$

(dc) $V_S = \boxed{R_{S1} I_{DS}} + R_{S2} I_{DS}$

(ac) $V_s = R_{S1} I_D$

$V_{op}^{-} = V_{DS} \times \frac{R_D}{R_{S1}+R_D}$

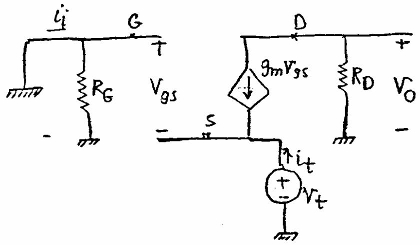
نقطه کار،

(dc) $V_{DS} = V_D - V_S = V_{DD} - R_D I_D - I_D(R_{S1}+R_{S2}) = ۹٫۵\ V$ $\longrightarrow V_{op}^{-} = ۹٫۲۴\ V$

$$\longrightarrow \boxed{V_{opp} = ۲ \times ۹٫۲۴ = ۱۸٫۴۸\ V}$$

مقاومت سورس تا زمین

$$R_{CS} = R_{S_۲} \| (R_{S_1} + \overset{\nearrow}{r_s})$$



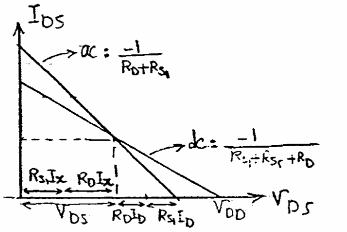
$$i_t = -g_m V_{gs}$$

$$V_t = -V_{gs} \longrightarrow \boxed{r_s = \frac{V_t}{i_t} = \frac{1}{g_m}}$$

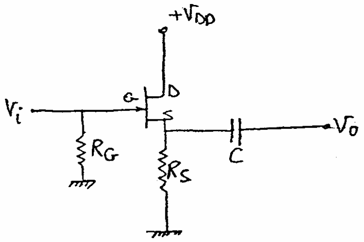
$$\longrightarrow R_{CS} = ۴۷۰ \| (۱۰۰ + ۷۲۸) \simeq ۳۰۰\Omega$$

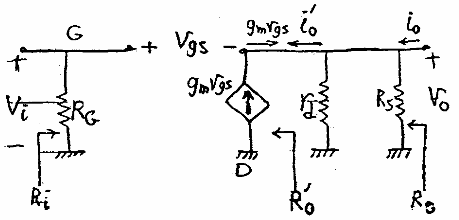
$$\longrightarrow f_L = \frac{1}{۲\pi R_{CS} \cdot C_{CS}} = ۲۶٫۵ \text{ Hz}$$

روش دیگر یافتن Vopp از روی خط بار dc و ac ⟶



تقویت کننده درین مشترک C.D :





$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{g_m V_{gs} \overset{R'_L}{\cancel{(r_d \| R_S)}}}{V_{gs} + g_m V_{gs} (r_d \| R_S)}$$

$$\longrightarrow A_V = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} < 1 \quad , \quad R_i = R_G$$

$$R_o = \left. \frac{V_o}{i_o} \right|_{V_i=0} = R'_o \| (r_d \| R_s)$$

$$\longrightarrow R_o = \underset{1/g_m}{\boxed{R'_o}} \| (r_d \| R_s) \simeq \frac{1}{g_m} \| R_s$$

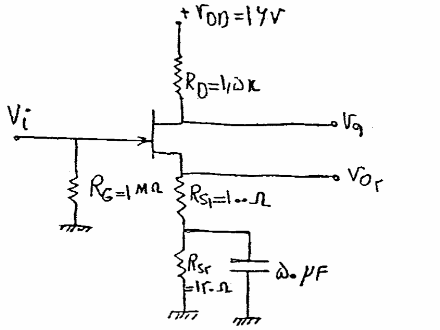
$$R'_o = \frac{V_o}{i'_o} = \frac{-V_{gs}}{-g_m V_{gs}} = \frac{1}{g_m}$$

مثال:

$I_{DSS} = \text{۱۲}\ mA$

$g_{m_o} = \text{۴٫۵}\ ms$

$R_{o_1}, R_{o_2}, A_{v_1}, A_{v_2}, R_i, f_L = ?$



$$I_{DS} = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = \text{۰} - (R_{S_1} + R_{S_2}) I_{DS}$$

$$g_{m_o} = \frac{\text{۲} I_{DSS}}{|V_P|} = \text{۴٫۵}\ ms$$

$$\longrightarrow V_P = -\text{۵٫۳۳}\ v$$

$$\longrightarrow \begin{cases} I_{DS} = \text{۶٫۵}\ mA \\ V_{GS} = -\text{۱٫۴}V \end{cases}$$

$$g_m = g_{m_o}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) = \text{۳٫۳۲}\ ms$$

$$(C.S)\ :\ A_{v_1} = \frac{-g_m R_D}{\text{۱} + g_m R_{S_1}} = -\text{۳٫۷۴}$$

$$(C.D)\ :\ A_{v_2} = \frac{V_{o_2}}{V_i} = \frac{g_m R_L'}{1 + g_m R_L'} = \frac{g_m R_{S_1}}{1 + g_m R_{S_1}} = \text{۰٫۲۵}$$

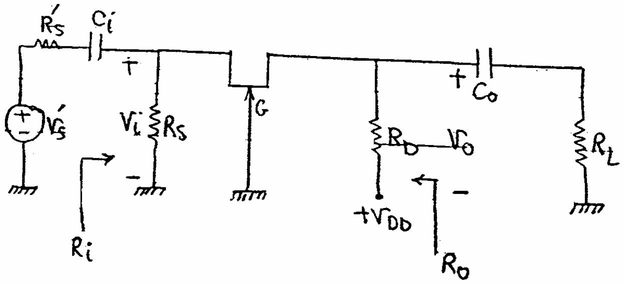
$R_i = R_G = 1\ MG$, $R_{o_1} = R_D = \text{۱٫۵}K$

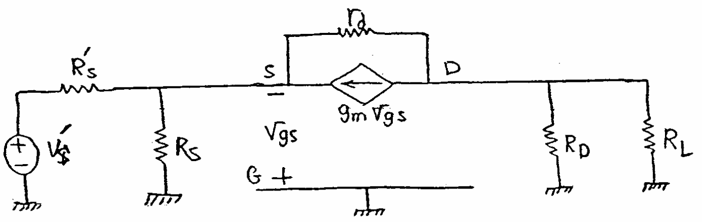
$R_{o_2} = \frac{1}{g_m} \| R_{S_1} = \text{۷۵}\ \Omega$, $r_s = \frac{1}{g_m} = \text{۳۰۱}$

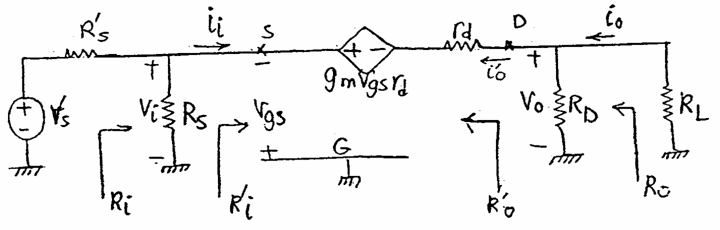
$$f_L = ? \longrightarrow R_{CS} = R_{S_2} \| \left[R_{S_1} + \frac{1}{g_m}\right] = \text{۴۶٫۱۵}\ \Omega$$

$$\longrightarrow f_L = \frac{1}{\text{۲}\pi R_{CS} C_S} = \text{۶۸٫۹}\ Hz$$

تقویت‌کننده گیت‌مشترک C.G :







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

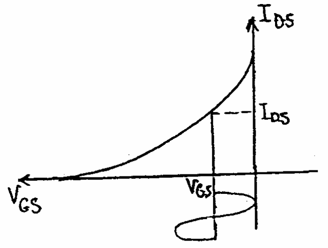
$V_o = (R_D \| R_L) i_i$, $KVL: \; +V_{gs} + g_m V_{gs} r_d + r_d i_i + (R_D \| R_L) i_i = 0$

$V_i \underset{*}{=} -V_{gs}$

$$\longrightarrow \; i_i \underset{*}{=} -V_{gs} \frac{1+g_m r_d}{r_d + (R_D \| R_L)}$$

$$\longrightarrow A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\cancel{-}(R_D \| R_L)\left[\frac{\cancel{V_{gs}}(1+g_m r_d)}{r_d + (R_D \| R_L)}\right]}{\cancel{-}\cancel{V_{gs}}}$$

$$\longrightarrow A_V = \frac{(R_D \| R_L)(1+g_m r_d)}{r_d + (R_D \| R_L)}$$



$V_D = V_{DD} - R_D I_D$

$V_i \downarrow$ $I_{DS} \uparrow$ $V_D \downarrow$

$$A_V \simeq \frac{(R_D \| R_L)(g_m r_d)}{r_d} \simeq g_m (R_D \| R_L) \longrightarrow A_V \simeq g_m (R_D \| R_L)$$

$R_i = \frac{V_i}{i'_s} = R_S \| R'_i$, $R'_i = \frac{V_i}{i_i} \overset{*}{=} \frac{\cancel{-V_{gs}}}{\cancel{-V_{gs}} \frac{1+g_m r_d}{r_d + (R_D \| R_L)}} \simeq \frac{1}{g_m}$

$$\longrightarrow R'_i = \frac{r_d + (R_D \| R_L)}{1 + g_m r_d} \simeq \frac{1}{g_m}$$

$$\longrightarrow R_i = R_S \parallel \left(\frac{r_d + (R_D \parallel R_L)}{1 + g_m r_d}\right) \simeq R_S \parallel \frac{1}{g_m}$$

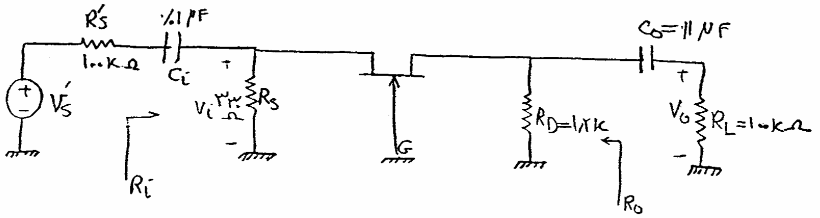
$$R_o = \left.\frac{V_o}{i_o}\right|_{V_S=0} = R_D \parallel R'_o$$

$$R'_o = \frac{V_o}{i'_o} = \frac{r_d i'_o \mp g_m \overset{-(R_S \parallel R'_S)\, i'_o}{\boxed{V_{gs}}}\, r_d + i'_o (R_S \parallel R'_S)}{i'_o} = r_d + g_m r_d (R_S \parallel R'_S) + (R_S \parallel R'_S)$$

بزرگ $r_d \longrightarrow R'_o = r_d\,(1 + g_m (R_S \parallel R'_S))$

$$\longrightarrow R_o = R_D \parallel \left[r_d\,(1 + g_m (R_S \parallel R'_S)) \right] \simeq R_D$$

مثال :



$V_{GS} = -۱٫۴۱\,V$, $g_m = ۲٫۷۴۷\ ms$, $r_d = \infty$

R_i , R_o , A_V , f_L = ?

$$A_V = \frac{(1 + g_m r_d)}{r_d + R'_L} \times R'_L \simeq R'_L \left(\frac{1}{r_d} + g_m\right) \longrightarrow A_V \simeq g_m R'_L = g_m (R_L \parallel R_D) = ۳٫۲۵۸$$

$R_i = R_S \parallel \frac{1}{g_m} = ۱۷۴\,\Omega$, $R_o = R_D = ۱٫۲\,K$

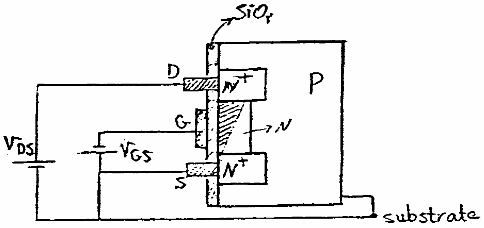
$R_{C_i} = R_i + R'_S \simeq ۱۰۰\,k\Omega$, $\tau_{C_i} = R_{C_i} \times C_i = ۱0\,ms$

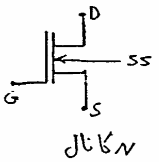
$R_{C_o} = R_D + R_L \simeq ۱۰۰\,k\Omega$, $\tau_{C_o} = R_{C_o} \times C_o = ۱۰\,ms$, $f_{C_i} = \frac{1}{۲\pi \tau_{C_i}} = ۱۵۹\,Hz$

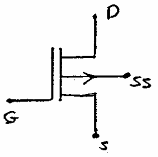
Mos FET : دونوع ازاین تقویت کننده داریم.

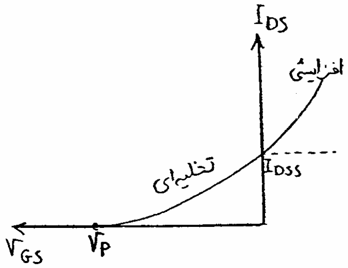
۱- تخلیه‌ای Depletion ۲- افزایشی Enhancement

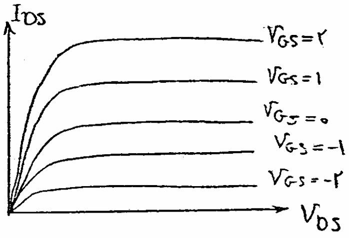
نوع تخلیه‌ای:











$$I_{DS} = I_{DSS}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)^۲ \quad , \quad g_m = g_{m0}\left(1-\frac{V_{GS}}{V_P}\right)$$

$$g_{m0} = \frac{۲ I_{DSS}}{|V_P|}$$

مثال:

$I_{DSS} = ۱۸\ mA$, $V_P = -۵\ V$

الف_ N کانال

$V_{GS} = -۳ \longrightarrow I_{DS} = ۱۸\left(1-\frac{-۳}{-۵}\right)^۲ = ۲,۸۸\ mA$

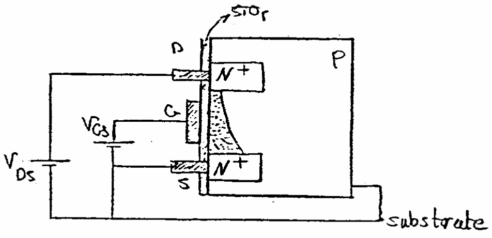
$V_{GS} = ۲/۵ \longrightarrow I_{DS} = ۱۸\left(1-\frac{۲/۵}{-۵}\right)^۲ = ۴۰/۵\ mA$

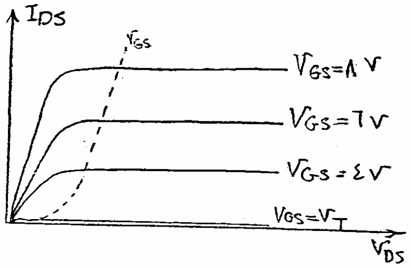
ب- P کانال $I_{DSS} = ۱۸^{mA}$ $V_P = ۵^V$

$V_{GS} = -۳ \longrightarrow I_{DS} = ۴۶/۰۸\ mA$

$V_{GS} = ۲/۵^V \longrightarrow I_{DS} = ۴/۵\ mA$

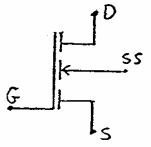
۲-نوع افزایشی :



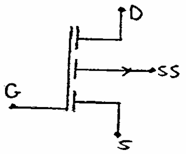


$V_T = V_{GD} \simeq$ ۱،۳ ولت

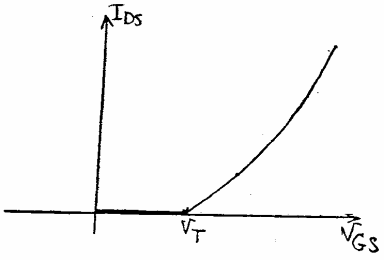
ولتاژ آستانه تشکیل کانال



N کانال



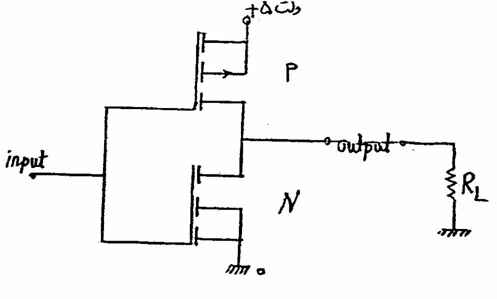
P کانال



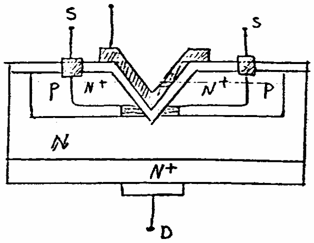
$I_D = \overset{K}{\text{/۵}\beta}(V_{GS}-V_T)^{۲}$, $V_{GS} \geq V_T$, $\beta \simeq \text{/۵}\times 10^{-۳}\ A/V^{۲}$

$V_{DS_{sat}} = V_{GS} - V_T$

از ترکیب NMOS (N کانال MOSFET) , PMOS المانی به نام **CMOS** بوجود می‌آید.

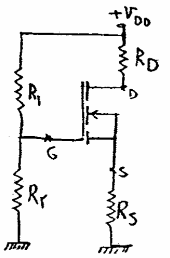


VMOS :



کاربرد VMOS درمدارهای سوئیچینگ با جریان بالا است چون مقاومت کمی دارد.

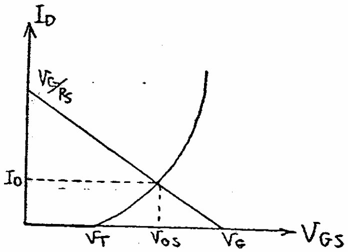
مدارهای بایاس MOSFET :



$$I_D = ۰/۵\beta\,(V_{GS} - V_T)^۲$$

$$V_G = \frac{R_۲}{R_۱ + R_۲} V_{DD}$$

$$V_S = R_S I_D$$



$$\longrightarrow V_{GS} = V_G - V_S = V_G - R_S I_D \longrightarrow \boxed{I_D = \frac{V_G}{R_S} - \frac{V_{GS}}{R_S}}$$

$$I_D = \frac{-B - \sqrt{B^۲ - ۴AC}}{۲A}$$

درحالت کلی NMOS , PMOS

$$,\ A = R_S^۲ \quad , \quad B = -۲\left[(|V_G| - |V_T|)R_S + \frac{۱}{\beta}\right] \quad , \quad C = (|V_G| - |V_T|)^۲$$

مثال:

$$V_{DD} = ۱۸^V \quad , \quad R_۲ = ۲۲M\Omega \quad , \quad R_D = ۲/۲K \quad , \quad R_۱ = ۴۷M\Omega \quad , \quad R_S = ۵۰۰\Omega \quad , \quad \begin{cases} \beta = ۰/۵\times۱۰^{-۳}\ A/V^۲ \\ V_T = ۲V \end{cases}$$

$$\longrightarrow I_D = ۰/۵\times۰/۵\times۱۰^{-۳}(V_G - ۲)^۲ \quad , \quad I_D = \frac{V_G}{R_S} - \frac{V_{GS}}{R_S}$$

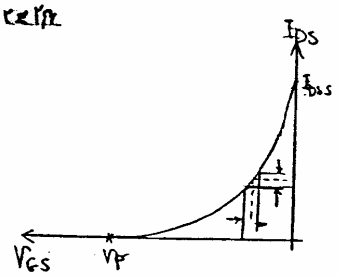
$$V_G = \frac{۲۲}{۲۲+۴۷}\times۱۸ = ۵/۷۴^V \longrightarrow \boxed{I_D = \frac{۵/۷۴}{۰/۵} - \frac{V_{GS}}{۰/۵}}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = (V_{DD} - R_D I_D) - R_S I_D = ۱۲/۴^V$$

$$|V_{DS}| > |V_{GS} - V_T| \quad - \quad ۱۲/۴ > ۳/۴ - ۲ = ۱/۴$$

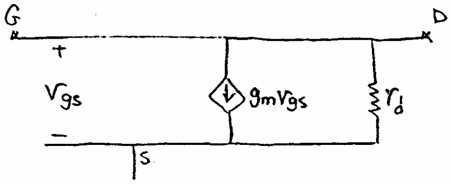
$$g_m^{-1} = \frac{\Delta V_{GS}}{\Delta I_{DS}} \longrightarrow g_m = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}}$$

JFET , Depletion:
$$\begin{cases} I_{DS} = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^۲ \\ g_m = \frac{۲I_{DSS}}{|V_P|}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) \end{cases}$$



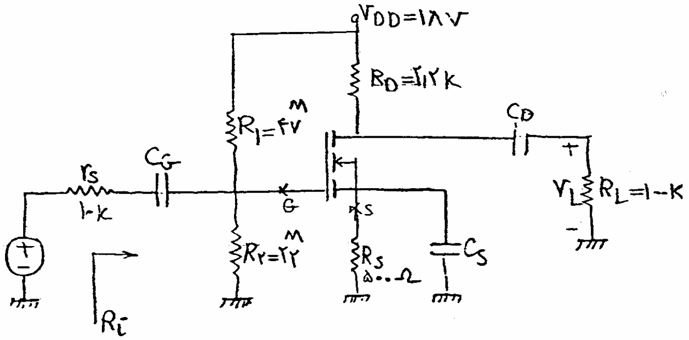
MOSFET Enhancement :

$$\begin{cases} \dfrac{dI_D}{\Delta V_{GS}} = \boxed{۰٫۵ \times ۲ \beta (V_{GS} - V_T) = g_m} \\ \beta (V_G - V_T) = g_m \end{cases}$$



درحالت کلی برای اینکه در ناحیه فعال قرار داشته باشیم : $|V_{DS}| \geqslant |V_{GS} - V_T|$

مثال :



۱- ناحیه فعال ؟

۲- R_i

۳- $A_{V_S} = \dfrac{V_L}{V_S}$

$V_T = ۲V$. $\beta = ۰٫۵ \times ۱۰^{-۳}\ A/V^۲$, $r_d = ۷۵\ K$, $I_D = ۱٫۹\ mA$

$\longrightarrow V_{DS} \geqslant V_{GS} - V_T \longrightarrow ۱۲٫۸۷ \geqslant ۴٫۷۹ - ۲$

$V_{DS} = V_D - V_S = (V_{DD} - R_D I_D) - (R_S I_D) = ۱۲٫۸۷\ V$

$V_{GS} = V_G - V_S = ۴٫۷۹\ V$

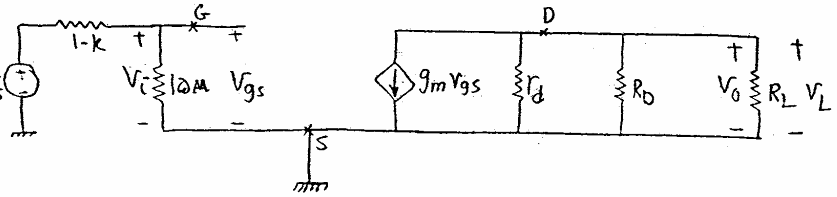
$V_G = V_{DD} \times \dfrac{R_۲}{R_۱ + R_۲} = ۵٫۷۴\ V$

$I_D = -B - \sqrt{B^۲ - ۴AC}$, $A = +R_S^۲$

$B = -۲\left[(|V_G| - |V_T|)R_S + \dfrac{1}{\beta}\right]$

$C = (|V_G| - |V_T|)^۲$

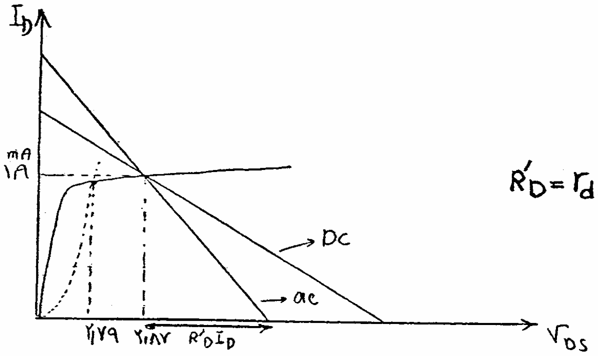
$R_{in} = R_1 \| R_۲ = ۴۷ \| ۲۲ = ۱۵\ M\Omega$



$g_m = \beta (V_{GS} - V_T) = ۱٫۴\ ms$

$$A_{VS} = \frac{V_L}{V_s} = \frac{V_L}{V_i} \cdot \frac{V_i}{V_s} = \frac{-g_m V_{gs} (R_D \| R_L \| r_d)}{V_{gs}} \times \frac{۱۵ \times ۱۰^۶}{۱۵ \times ۱۰^۶ + ۱۰ \times ۱۰^۳} = -۲٫۹۲$$

تعیین سوئینگ :

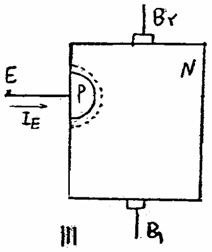


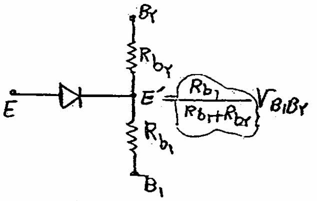
$R'_D = r_d \| R_D \| R_L$

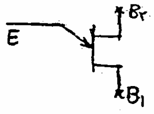
خط بار DC : $V_{DD} = V_{DS} + (R'_D + R_S) I_D$

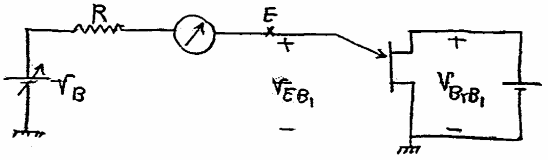
خط بار ac : $V_{DS} = -R'_D I_D$

UJT :







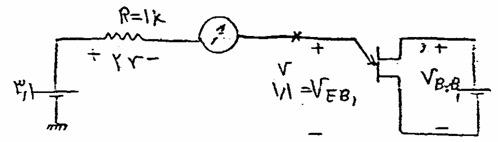


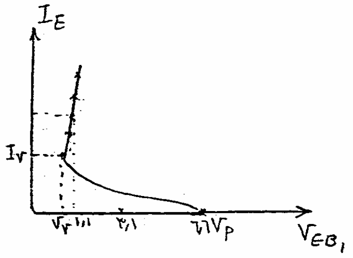
$$\eta = \frac{R_{b_1}}{R_{b_1} + R_{b_۲}}$$

بعد از روشن شدن دیود → ناقل ↑ → $R_{b_1}\downarrow$ → $V_{EB_1}\downarrow$

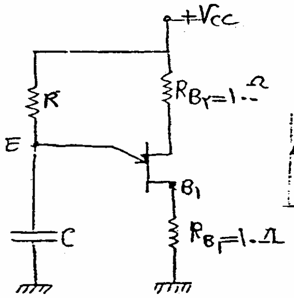
$$V_P = V_D + V_E'$$

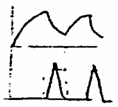
$$V_P = V_D + \eta V_{B_2B_1}$$

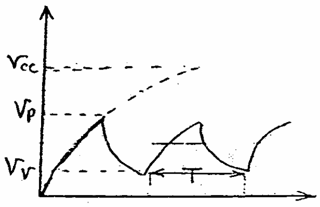




استفاده از UJT در نوسان سازی:







$$\boxed{T \approx \frac{1}{RC} Ln\frac{1}{1-\eta}}$$

$$V_P = \eta V_{CC} + V_D$$

اگر به جای R از منبع جریان استفاده کنیم خازن به صورت خطی شارژ می‌شود:

$$C V_P = Q = I \times T \longrightarrow \boxed{T = \frac{CV_P}{I}}$$

کاربرد دیگری از UJT: