۱ سعید دانشگر

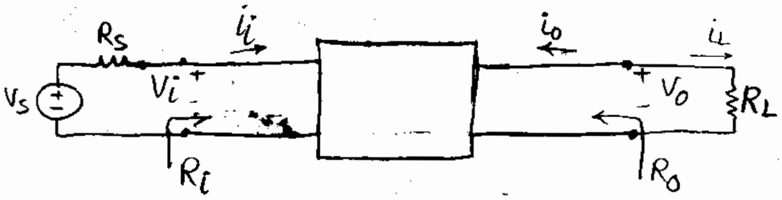
بحث فیدبک جریان-سری بین صفحه‌های ۳۹، ۴۱ ناقص است.

بسم الله

۱

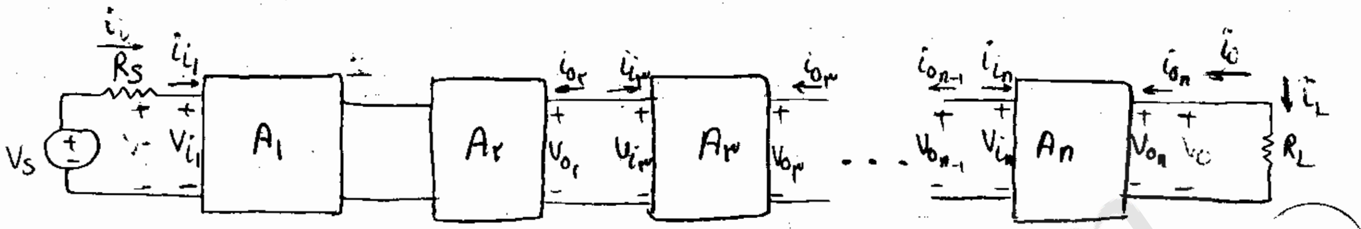
الکترونیک II

تقویت کننده های چندطبقه:



(R_i, R_o, A_v, A_i)

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} \quad , \quad R_o = \frac{V_o}{i_o}\Big|_{V_s=0} \quad , \quad A_v = \frac{V_o}{V_i} \quad , \quad A_i = \frac{i_L}{i_i}$$



$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \underline{\frac{V_o}{V_{o_n}}} \times \frac{V_{o_n}}{V_{i_n}} \times \underline{\frac{V_{i_n}}{V_{o_{n-1}}}} \times \cdots \times \frac{V_{o_3}}{V_{i_3}} \times \underline{\frac{V_{i_3}}{V_{o_2}}} \times \frac{V_{o_2}}{V_{i_2}} \times \underline{\frac{V_{i_2}}{V_{o_1}}} \times \frac{V_{o_1}}{V_{i_1}} \times \underline{\frac{V_{i_1}}{V_i}}$$

$$= 1 \times A_{v_n} \times 1 \times \cdots \times A_{v_3} \times 1 \times A_{v_2} \times 1 \times A_{v_1} \times 1$$

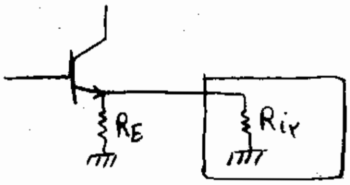
$$\longrightarrow A_v = \prod_{i=1}^{n} A_{v_i}$$

$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \boxed{\frac{i_L}{i_o}} \cdot \frac{i_o}{i_{o_n}} \cdot \frac{i_{o_n}}{i_{i_n}} \cdot \boxed{\frac{i_{i_n}}{i_{o_{n-1}}}} \cdots \frac{i_{o_3}}{i_{i_3}} \cdot \boxed{\frac{i_{i_3}}{i_{o_2}}} \cdot \frac{i_{o_2}}{i_{i_2}} \cdot \boxed{\frac{i_{i_2}}{i_{o_1}}} \cdot \frac{i_{o_1}}{i_{i_1}} \cdot \frac{i_{i_1}}{i_i}$$

$$= (-1) \times (-A_{i_n}) \times (-1)(-A_{i_{n-1}}) \times \cdots \times (-1)(-A_{i_3})(-1)(-A_{i_2})(-1)(-A_{i_1})(1$$

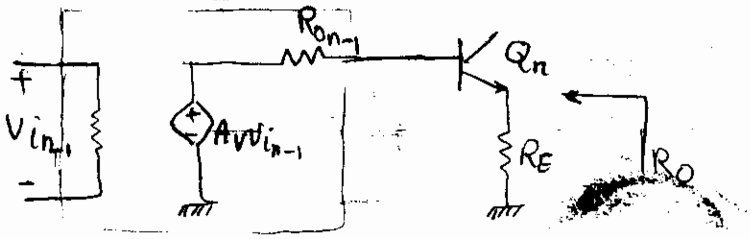
$$\longrightarrow A_i = \prod_{i=1}^{n} A_{i_i}$$

$$R_i = \frac{V_i}{i_i} \quad , \quad R_{i_1} = \frac{V_{i_1}}{i_{i_1}} = R_i \quad \longrightarrow R_{i_1} = \frac{V_{i_1}}{i_{i_1}} = R_i$$

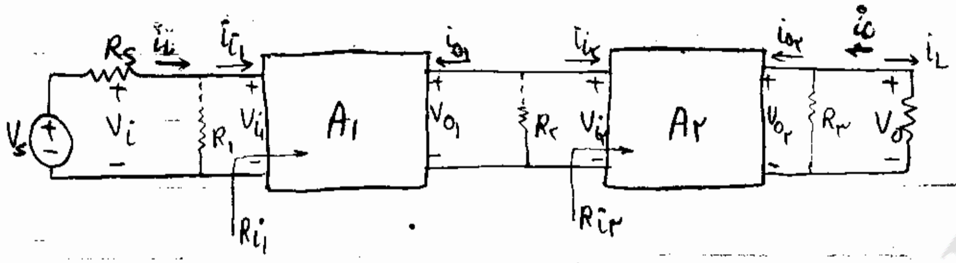


$$R_i = h_{ie} + (R_E \parallel R_{i_2})(1+h_{fe}).$$

$$R_o = \frac{V_o}{i_o}\Big|_{V_s=0}$$



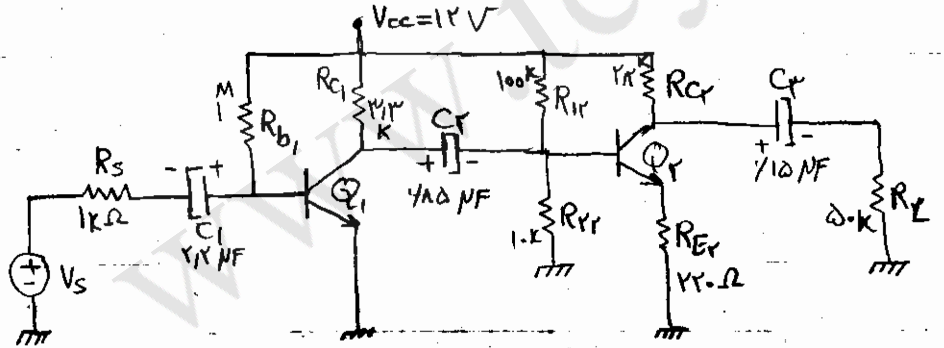
$$\longrightarrow R_o = R_E \parallel \left[\frac{R_{o_{n-1}} + h_{ie_n}}{1 + h_{fe}}\right]$$



$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \underbrace{\frac{i_L}{i_o}}_{-1} \cdot \frac{i_o}{i_{o_۲}} \cdot \frac{i_{o_۲}}{i_{i_۲}} \cdot \frac{i_{i_۲}}{i_{o_1}} \cdot \frac{i_{o_1}}{i_{i_1}} \cdot \frac{i_{i_1}}{i_i}$$

$$\longrightarrow A_i = (-1) \times \frac{R_۲}{R_۲ + R_L} \times h_{fe_۲} \times \frac{-R_۲}{R_۲ + R_{i_۲}} \times h_{fe_1} \times \frac{R_1}{R_1 + R_{i_1}}$$

مثال :



Si

$\eta = ۲$

$V_{BE} = ۰/۶$

$\beta = h_{fe} = ۱۰۰$

نقاط‌کار ، A_v ، A_i ، R_i ، R_o ، V_{opp} را در فرکانس میانی بیابید.

$$V_{CC} = R_{b_1} i_{b_1} + V_{BE_1} \longrightarrow i_{b_1} = ۱۱٫۴\ \mu A \longrightarrow i_{C_1} = ۱٫۱۴\ mA$$

$$،\ V_{CE_1} = V_{C_1} - V_{E_1} = V_{CC} - R_{C_1} I_{C_1}$$

$$V_{CE_1} = ۸٫۲۴\ V$$

$$\longrightarrow Q_1 \begin{cases} i_{C_1} = ۱٫۱۴\ mA \\ V_{CE_1} = ۸٫۲۴\ V \\ h_{ie} = ۴٫۶ \end{cases}$$

$$\left.\begin{array}{l} V_{B۲} = \dfrac{R_۲}{R_۱+R_۲}\cdot V_{CC} \\ I_{C۲} \simeq I_{E۲} = \dfrac{V_{E۲}}{R_{E۲}} = \dfrac{V_{B۲}-V_{BE۲}}{R_{E۲}} \end{array}\right\} \longrightarrow I_{C۲} = ۲٫۲۳\ mA$$

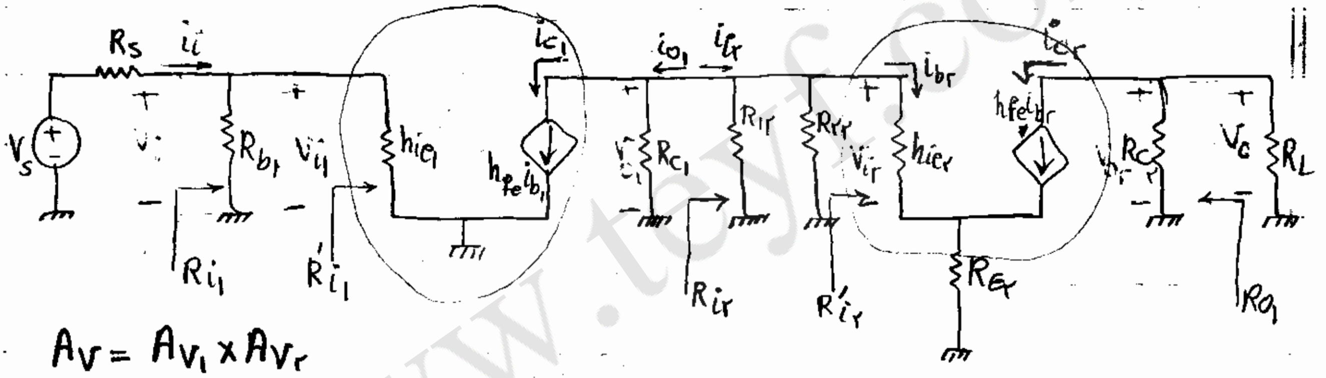
$$\longrightarrow I_{B۲} = ۲۲٫۳\ \mu A$$

$$i_{R_۱} = ۱۰۰\ \mu A \qquad i_R \not> ۱۰ I_{B۲}$$

تقریب درنظر گرفته شده درست نیست و باید از تونن گیری نقطهٔ کار را بیابیم (به عهدهٔ خودشما)

$$V_{CE۲} = V_{C۲} - V_{E۲} = V_{CC} - R_{C۲} I_{C۲} - R_{E۲} I_{E۲} = ۴٫۴\ V$$

$$\xrightarrow{Q_۲} \begin{cases} I_C = ۲٫۲۳\ mA \\ V_{CE} = ٦٫٦\ V \\ h_{ie} = ۲٫۳\ K \end{cases}$$



$$A_V = A_{V_۱} \times A_{V_۲}$$

$$A_{V_۲} = \frac{V_{o۲}}{V_{i۲}} = \frac{-i_{c۲}(R_{C۲} \| R_L)}{i_{b۲} h_{ie۲} + (1+h_{fe}) i_{b۲} R_{E۲}} = \frac{-h_{fe}(R_{C۲} \| R_L)}{h_{ie۲} + (1+h_{fe}) R_{E۲}} = -۸٫۹$$

$$A_{i۲} = \frac{i_{c۲}}{i_{b۲}} = h_{fe}$$

$$\boxed{R_{i۲}} = \frac{V_{i۲}}{i_{i۲}} = R_۱ \| R_۲ \| R'_{i۲} = R_۱ \| R_۲ \| (h_{ie۲} + (1+h_{fe}) R_{E۲}) = ۴٫۴۳\ K\Omega$$

$$\boxed{R_{o۲}} = \left.\frac{V_{o۲}}{i_o}\right|_{V_s=0} = R_{C۲} \| \overset{\text{با فرض } V_s=0}{\overset{\infty}{\left(\frac{V_{o۲}}{i_{c۲}}\right)}} \simeq R_{C۲}$$

$$\longrightarrow \quad Q_۲ \left(A_V = -۸٫۹\ ,\ A_i = ۱۰۰\ ,\ R_i = ٦٫۴۳\ K\ ,\ R_o = ۲٫۲\ K\right)$$

$$A_{v_1} = \frac{V_{o_1}}{V_{i_1}} = \frac{-i_{c_1}(R_{c_1} \| R_{i_۲})}{i_{b_1} \times h_{ie_1}} = \frac{-h_{fe}(R_{c_1} \| R_{i_۲})}{h_{ie_1}} \simeq \frac{-(R_c \| R_{i_۲}) I_c}{\eta V_T} = -۴۸$$

$$A_{i_1} = \frac{i_{c_1}}{i_{b_1}} = h_{fe}$$

$$R_{i_1} = \frac{V_i}{i_i} = R_{b_1} \| R'_{i_1} = R_{b_1} \| h_{ie_1} \simeq ۴٫۶\ K$$

$$R_{o_1} = \frac{V_{o_1}}{i_{o_1}}\Big|_{V_s=0} = R_{c_1}$$

$$\longrightarrow Q_۲ \left(A_v = -۴۸ \ ,\ A_i = ۱۰۰ \ ,\ R_i = ۴٫۶\ K \ ,\ R_o = ۳٫۳\ K \right)$$

$$\longrightarrow A_v = -۸٫۶ \times -۴۸ = ۴۱۳$$

$$\longrightarrow A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_L}{i_o} \cdot \frac{i_o}{i_{c_۲}} \cdot \frac{i_{c_۲}}{i_{b_۲}} \cdot \frac{i_{b_۲}}{i_{c_1}} \cdot \frac{i_{c_1}}{i_{b_1}} \cdot \frac{i_{b_1}}{i_i}$$

$$= -۱ \times \frac{R_{c_۲}}{R_{c_۲}+R_L} \times h_{fe} \times \frac{R}{\underset{(R_{c_1} \| R_{i_۲} \| R_{۲۲})}{\boxed{R}} + \underset{(h_{ie_۲} + (1+h_{fe})R_{E_۲})}{\boxed{R'_{i_۲}}}} \times h_{fe} \times \frac{R_{b_1}}{R_{b_1}+h_{ie_1}} \simeq ۳۸$$

~~۸۱ = ۷۸~~

$$R_i = ۴٫۶\ K \ ,\quad R_o = ۲٫۲\ K$$

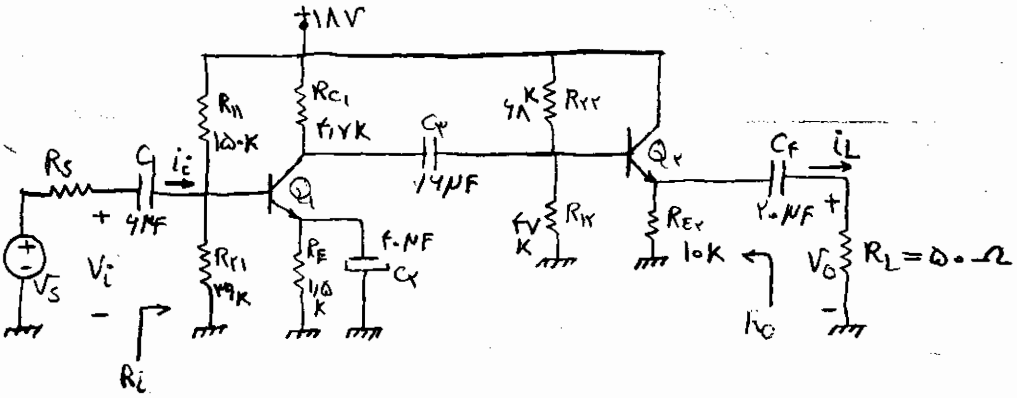
$$V_{c_۲} = V_{cc} - \underset{R_{c_۲} \| R_L}{\boxed{R_{c_۲}}} I_{c_۲} \longrightarrow V^+_{op} = (R_{c_۲} \| R_L) I_{c_۲} \simeq ۴٫۷\ v$$

$$V_E = R_E I_{c_۲} \longrightarrow \underbrace{\overset{R_{c_۲} \| R_L}{\underset{۲٫۲}{\boxed{R_{c_۲}}}} I_x}_{۶} + \underbrace{\underset{۰/۲۲}{R_{E_۲}} I_x}_{۰/۶} = \underset{۶/۶}{V_{CE_۲}} \xrightarrow{۶} V^-_{op} = ۶\ v$$

$$\longrightarrow V_{o_{pp}} = ۲ \times ۴٫۷ = ۹٫۴\ v$$

چک کردن جواب بدست آمده: $(R_{c_1} \| R_{i_۲}) I_{c_1} = V^+_{o_1 p} > ۲۰ \cdot \frac{۹٫۴}{۸٫۶}$

مثال:

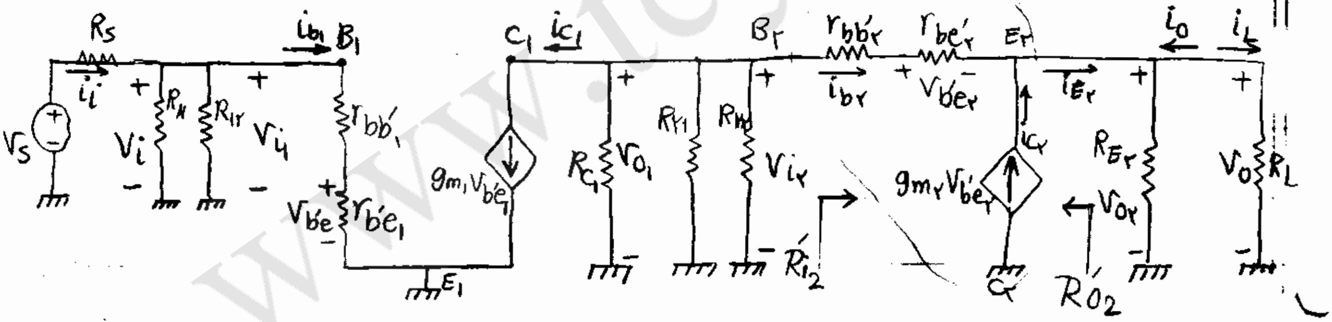


Q_1 : $r_{bb'}=0$, $r_{b'e}=2.4K$, $g_{m1}=42.5\ (mA/V)$

Q_2 : $r_{bb'}=0$, $r_{b'e}=2.5K$, $g_{m2}=50\ ms$

A_V , A_i , R_i , R_o , V_{opp} ?

$$\begin{cases} r_{bb'}+r_{b'e}=h_{ie} \\ g_m=\dfrac{h_{fe}}{h_{ie}} \end{cases}$$



$$\boxed{A_{V2}}=\frac{V_{o2}}{V_{i2}}=\frac{(R_{E2}\|R_L)\,i_{e2}}{V_{b'e2}+V_{o2}}\overset{*}{=}\frac{(R_{E2}\|R_L)\left(g_{m2}+\frac{1}{r_{b'e2}}\right)V_{b'e2}}{V_{b'e2}\left[1+(R_{E2}\|R_L)\left(g_{m2}+\frac{1}{r_{b'e2}}\right)\right]}$$

$$=\frac{(R_{E2}\|R_L)(g_{m2}r_{b'e2}+1)}{r_{b'e2}+(R_{E2}\|R_L)(g_{m2}r_{b'e2}+1)}\simeq 0.97$$

$$i_{e2}\overset{*}{=}g_{m2}V_{b'e2}+\frac{V_{b'e2}}{r_{b'e2}}=V_{b'e2}\left(g_{m2}+\frac{1}{r_{b'e2}}\right)$$

$$\boxed{A_{i2}}=\frac{i_{e2}}{i_{b2}}=\frac{V_{b'e2}\left(g_{m2}+\frac{1}{r_{b'e2}}\right)}{\frac{V_{b'e2}}{r_{b'e2}}}=g_{m2}r_{b'e2}+1=101$$

$$R_{i۲} = \frac{V_{i۲}}{i_{i۲}} = R_{۱۲} \| R_{۲۲} \| \underset{R'}{\frac{V_{i۲}}{i_{b۲}}} = R_{۱۲} \| R_{۲۲} \| \left(\frac{V_{b'e۲}\left[۱+(R_{E۲}\|R_L)(g_{m۲}+\frac{۱}{r_{b'e۲}})\right]}{V_{b'e۲}/r_{b'e۲}} \right)$$

$$= R_{۱۲} \| R_{۲۲} \| \left[r_{b'e۲} + (R_{E۲}\|R_L)(g_{m۲} r_{b'e۲}+۱) \right] = ۶\,K$$

$$R_{O۲} = \frac{V_{O۲}}{i_{O۲}}\Big|_{V_S=۰} = R_{E۲} \| \frac{V_{O۲}}{-i_{e۲}}\Big|_{V_S=۰} = R_{E۲} \| \frac{-V_{b'e۲} - (R_{C۱}\|R_{۱۲}\|R_{۲۲})\overset{\frac{V_{b'e۲}}{r_{b'e۲}}}{i_{b۲}}}{-V_{b'e۲}(g_{m۲}+\frac{۱}{r_{b'e۲}})}$$

$$= R_{E۲} \| \left(\frac{r_{b'e۲} + (R_{C۱}\|R_{۱۲}\|R_{۲۲})}{g_{m۲} r_{b'e۲}+۱} \right) = ۶۴\,\Omega$$

$$\longrightarrow Q_۲ : \; A_{v۲} = ۰/۹۷ \;,\; A_{i۲} = ۱۰۱ \;,\; R_{i۲} = ۶\,K \;,\; R_{O۲} = ۶۴\,\Omega$$

$$A_{v۱} = \frac{V_{O۱}}{V_{i۱}} = \frac{-g_{m۱} V_{b'e۱}(R_{C۱}\|R_{i۲})}{V_{b'e۱}} = -g_{m۱}(R_{C۱}\|R_{i۲}) = -۱۴۲/۵$$

$$A_{i۱} = \frac{i_{C۱}}{i_{b۱}} = \frac{g_{m۱} V_{b'e۱}}{\frac{V_{b'e۱}}{r_{b'e۱}}} = g_{m۱} r_{b'e۱} = -۱۵۰$$

$$R_{i۱} = \frac{V_{i۱}}{i_{i۱}} = R_{۱۱} \| R_{۱۲} \| \frac{V_{i۱}}{i_{b۱}} = R_{۱۱} \| R_{۱۲} \| \frac{V_{b'e۱}}{\frac{V_{b'e۱}}{r_{b'e۱}}} = R_{۱۱} \| R_{۱۲} \| r_{b'e۱} = ۲/۲\,K$$

$$R_{O۱} = \frac{V_{O۱}}{R_{O۱}}\Big|_{V_S=۰} = R_{C۱} = ۴/۷\,K$$

$$\longrightarrow Q_۱ : \; A_{v۱} = -۱۴۲/۵ \;,\; A_{i۱} = -۱۵۰ \;,\; R_{i۱} = ۲/۲\,K \;,\; R_{O۱} = ۴/۷\,K$$

$$\longrightarrow A_v = A_{v۱} \times A_{v۲} = -۱۰۸$$

$$, \; A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_L}{i_O} \cdot \frac{i_O}{i_{e۲}} \cdot \frac{i_{e۲}}{i_{b۲}} \cdot \frac{i_{b۲}}{i_{C۱}} \cdot \frac{i_{C۱}}{i_{b۱}} \cdot \frac{i_{b۱}}{i_i}$$

$$= -۱ \times \left(\frac{-R_{E۲}}{R_{E۲}+R_L} \right) \times A_{i۲} \times \frac{-\overset{\to R_{۱۲}\|R_{۲۲}\|R_{C۱}}{R}}{R+\underset{\text{در بالا آمده}}{R'}} \times A_{i۱} \times \frac{R_{۱۱}\|R_{۲۱}}{R_{۱۱}\|R_{۲۱}+r_{b'e}} = -۴۹۳۰$$

$$R_i = R_{i۱} = ۲/۲\,K \qquad , \qquad R_O = R_{O۲} = ۶۴\,\Omega$$

$V_{CE}=0$ اشباع

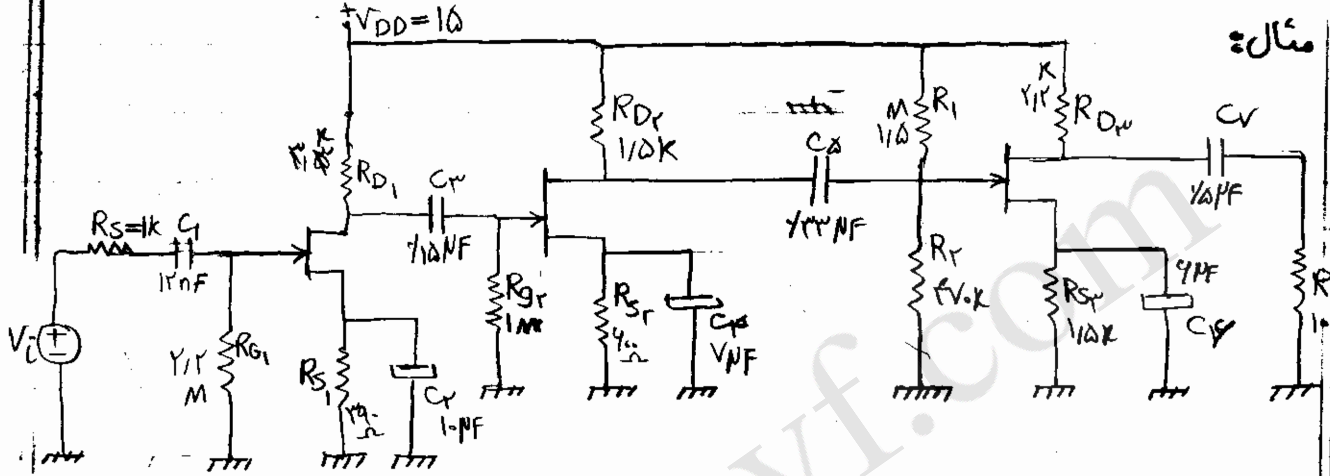
بدون بار $V_{E2}=R_{E2}\times I_{E2}=۶/۷۵$ ،

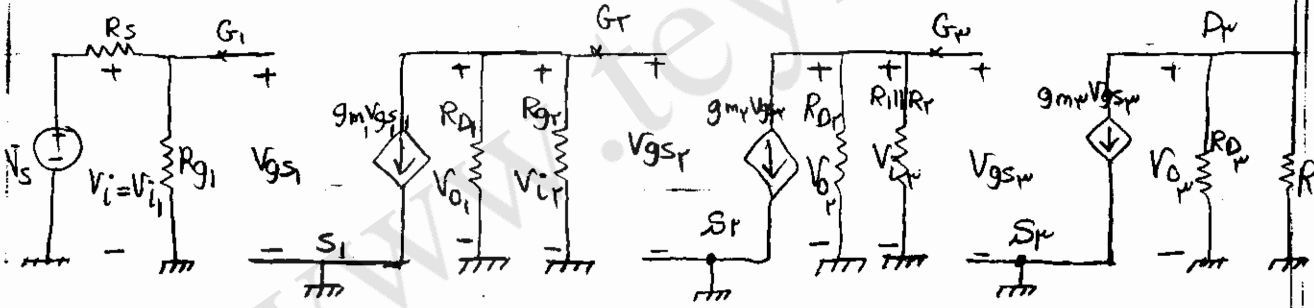
$V_{op}^{+}=|V_{EE2}|$ $\frac{۶/۷۵}{۲۰۰}$

$V_{op}^{-}=\underline{R_{E2}I_{E2}}$ یا $\overset{\text{با بار}}{\underline{(R_{E2}\|R_L)I_{E2}}}$

با سوئینگ کمی که برای طبقهٔ دوم بدست می‌آید لازم به بررسی سوئینگ طبقهٔ اول نیست.

مثال:





$g_{m1}=۲/۵\,ms$ ، $g_{m2}=۲/۷\,ms$ ، $g_{m3}=۳/۲\,ms$

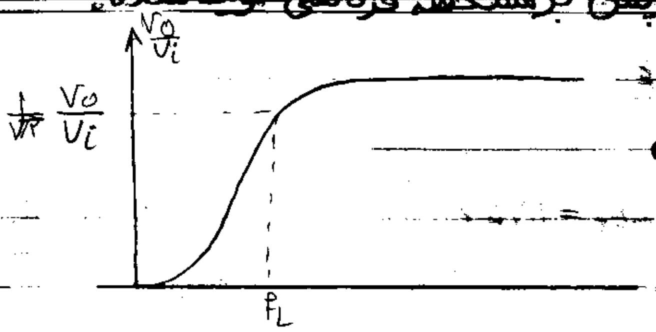
$$A_{V3}=\frac{V_{o3}}{V_{i3}}=\frac{-g_{m3}V_{gs3}(R_{D3}\|R_L)}{V_{gs3}}=-g_{m3}(R_{D3}\|R_L)=-۵/۸$$

$$A_{V2}=\frac{V_{o2}}{V_{i2}}=\frac{-g_{m2}V_{gs2}(R_{D2}\|R_1\|R_2)}{V_{gs2}}=-g_{m2}R_{D2}=-۴$$

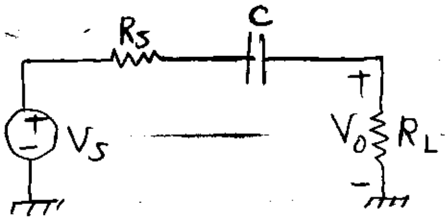
$$A_{V1}=\frac{V_{o1}}{V_{i1}}=\frac{-g_{m1}V_{gs1}(R_{D1}\|R_{g2})}{V_{gs1}}=-g_{m1}R_{D1}=-۸/۲۵$$

$\rightarrow A_V=-۱۹۱/۴$

اثر خازن‌های کوپلاژ و بای‌پس بر مشخصه فرکانسی تقویت‌کننده:



این خازنها تعیین‌کنندهٔ فرکانس قطع پائین هستند و فرکانس قطع بالا را خازنهای داخلی مدار تعیین می‌کنند.



$$\frac{V_o}{V_s}=\frac{R_L}{R_L+R_S+\frac{1}{CS}}=\frac{R_L CS}{1+(R_L+R_S)CS} \quad , \quad (R_L+R_S)C=\overset{\text{ثابت زمانی}}{\tau_p}$$

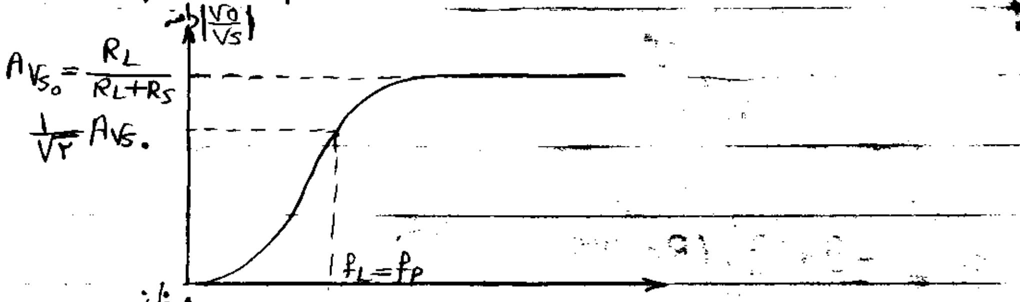
$$S=\frac{-1}{(R_L+R_S)C}=\frac{-1}{\tau_p} \quad , \quad \overset{\text{قطب}}{p}=\frac{1}{\tau_p}$$

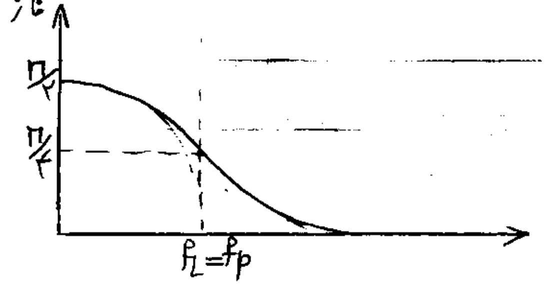
$$\rightarrow \frac{V_o}{V_s}=\frac{R_L}{R_L+R_S}\times\frac{S}{S+p} \quad , \quad S\rightarrow j\omega$$

$$\rightarrow \frac{V_o}{V_s}(j\omega)=\frac{jR_L C\omega}{1+j(R_L+R_S)C\omega} \quad , \quad \omega_p=\frac{1}{(R_L+R_S)C}=\frac{1}{\tau_p}$$

$$\rightarrow \frac{V_o}{V_s}(j\omega)=\frac{jR_L C\omega}{1+j\frac{\omega}{\omega_p}}=\frac{j2\pi R_L C f}{1+j.\,f/f_p}$$

$$\rightarrow \left|\frac{V_o}{V_s}\right|=\frac{2\pi R_L C f}{\sqrt{1+(f/f_p)^2}} \quad , \quad \angle\frac{V_o}{V_s}=\frac{\pi}{2}-\text{Arctg}\frac{f}{f_p}$$

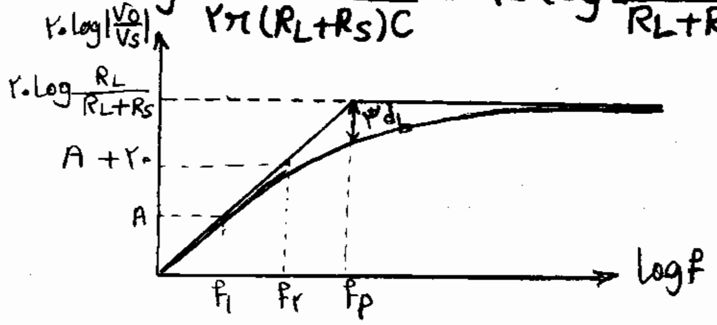




$$۲۰\log\left|\frac{V_o}{V_s}\right| = ۲۰\log(۲\pi R_L C f) - ۲۰\log\left(۱+\left(\frac{f}{f_p}\right)^۲\right)^{\frac{۱}{۲}} \qquad A$$

$$\underset{f\gg f_p}{۲۰\log\left|\frac{V_o}{V_s}\right|} = ۲۰\log ۲\pi R_L C + \cancel{۲۰\log f} - \cancel{۲۰\log f} + ۲۰\log f_p = ۲۰\log ۲\pi R_L C f_p$$

$$= ۲۰\log\frac{۲\pi R_L C}{۲\pi(R_L+R_s)C} = ۲۰\log\frac{R_L}{R_L+R_s}$$



$$\underset{f\ll f_p}{۲۰\log\left|\frac{V_o}{V_s}\right|} = ۲۰\log ۲\pi R_L C + ۲۰\log f$$

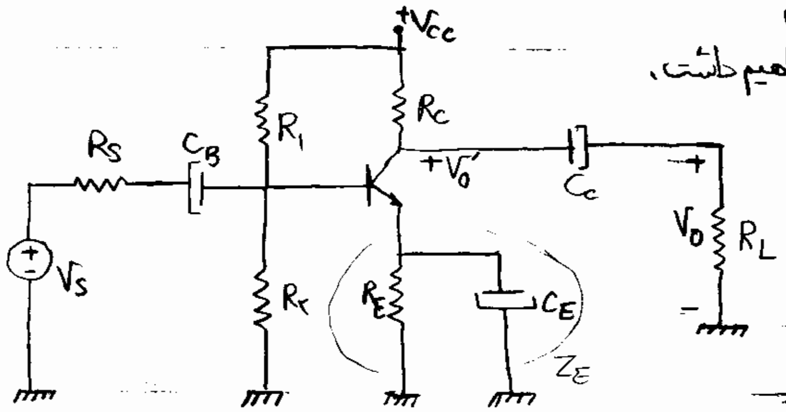
$$f=f_1 \longrightarrow ۲۰\log\left|\frac{V_o}{V_s}\right| = ۲۰\log ۲\pi R_L C + ۲۰\log f_1$$

$$f=f_۲=۱۰f_1 \longrightarrow ۲۰\log\left|\frac{V_o}{V_s}\right| = ۲۰\log ۲\pi R_L C + ۲۰\log ۱۰ f_1 = ۲۰\log ۲\pi R_L C + ۲۰\log f_1 + \underbrace{\boxed{۲۰\log ۱۰}}_{۲۰ d_b}$$

$$f=f_p \longrightarrow ۲۰\log\left|\frac{V_o}{V_s}\right| = ۲۰\log(۲\pi R_L C)f_p - \underbrace{۲۰\log\sqrt{۲}}_{۱۰\log ۲ = ۳d_b}$$

در دیاگرام بعد هر قطبی $۲۰d_b$ شیب را افزایش می‌دهد و هر صفری $۲۰d_b$ شیب را کاهش می‌دهد.

اگر تعداد خازن‌های مدار افزایش یابد به ازای هر خازن $۲۰\ \frac{db}{decade}$ افزایش شیب خواهیم داشت.



$$A_{v_{s_0}} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_i}{V_s} \cdot \frac{V_o}{V_i} \longrightarrow A_{v_{s_0}} = \frac{R_i}{R_i+R_s} \cdot \frac{-h_{fe}(R_c \| R_L)}{h_{ie}}$$

$$C_c : \quad A_{v_s} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_i}{V_s} \cdot \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_i}{V_s} \cdot \frac{V_o'}{V_i} \cdot \frac{V_o}{V_o'}$$

$$= \frac{R_i}{R_i+R_s} \cdot \frac{-h_{fe}\left[R_c \| \left(\frac{1}{C_c S} + R_L\right)\right]}{h_{ie}} \cdot \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{C_c S}}$$

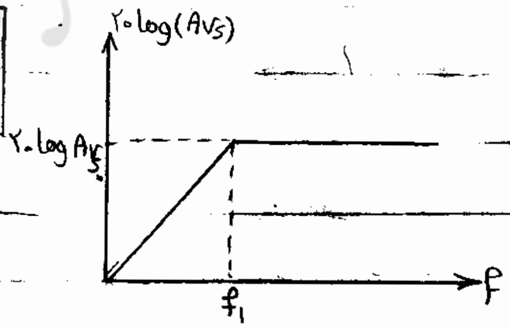
$$\longrightarrow A_{v_s} = \frac{R_i}{R_i+R_s} \times \frac{-h_{fe}(R_L \| R_c)}{h_{ie}} \times \frac{S(R_L+R_c)C_c}{1+S(R_L+R_c)C_c}$$

$$, \quad \tau_1 = (R_L+R_c)C_c$$

$$\longrightarrow A_{v_s} = A_{v_{s_0}} \times \frac{S\tau_1}{1+S\tau_1}$$

$$\longrightarrow A_{v_s}(j\omega) = A_{v_{s_0}} \times \frac{j(R_L+R_c)C_c\omega}{1+j\omega\tau_1} \quad , \quad \omega_1 = \frac{1}{\tau_1}$$

$$\longrightarrow \boxed{A_{v_s}(j\omega) = A_{v_{s_0}} \times \frac{j(R_L+R_c)C_c\omega}{1+j\,\omega/\omega_1}}$$



$$C_B : \quad A_{v_s} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o}{V_i} \cdot \frac{V_i}{V_s} = \frac{-h_{fe}(R_L \| R_c)}{h_{ie}} \cdot \frac{R_i}{R_i+R_s+\frac{1}{C_B S}}$$

$$A_{v_s} = A_{v_{s_0}} \cdot \frac{s(R_i+R_s)C_B}{1+s(R_i+R_s)C_B} \quad , \quad \tau_2 = (R_i+R_s)C_B$$

$$\longrightarrow \boxed{A_{v_s}(j\omega) = A_{v_{s_0}} \cdot \frac{j(R_i+R_s)C_B\omega}{1+j\,\omega/\omega_2}}$$

$$C_E : \quad A_{v_s} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o}{V_i} \cdot \frac{V_i}{V_s} = \frac{-h_{fe}(R_c \| R_L)}{h_{ie}+(1+h_{fe})Z_E} \times \frac{R_1 \| R_2 \| [h_{ie}+(1+h_{fe})Z_E]}{R_s + \text{صورت}}$$

$$\rightarrow A_{v_s} = A_{v_{s0}} \times \frac{R'_s + h_{ie}}{R'_s + h_{ie} + (1+h_{fe})R_E} \times \frac{1 + S R_E C_E}{1 + \frac{S R_E C_E (R'_s + h_{ie})}{[R'_s + h_{ie} + (1+h_{fe})R_E]}}$$

$$\tau_{۳} = R_E C_E \quad , \quad R'_s = R_s \| R_1 \| R_{۲} \quad , \quad \omega_{۳} = \frac{1}{\tau_{۳}}$$

$$, \quad \tau_{۴} = R_E C_E (R'_s + h_{ie}) / [R'_s + h_{ie} + (1+h_{fe})R_E] \quad , \quad \omega_{۴} = \frac{1}{\tau_{۴}}$$

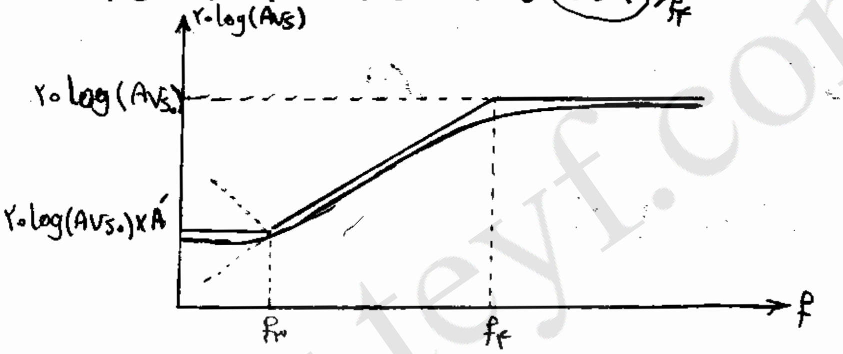
$$\rightarrow A_{v_s} = A_{v_{s0}} \times \frac{R'_s + h_{ie}}{R'_s + h_{ie} + (1+h_{fe})R_E} \times \frac{1 + s\tau_{۳}}{1 + s\tau_{۴}} \quad ,$$

$\boxed{\tau_{۳} > \tau_{۴}}$

$\rightarrow \boxed{f_{۳} < f_{۴}}$

صفرها همیشه پائین تر از قطبها قرار می گیرند.

$$\rightarrow A_{v_s} = A_{v_{s0}} \times \frac{R'_s + h_{ie}}{R'_s + h_{ie} + (1+h_{fe})R_E} \times \frac{1 + j\overbrace{\omega/\omega_{۳}}^{f/f_{۳}}}{1 + j\underbrace{\omega/\omega_{۴}}_{f/f_{۴}}}$$



$$f \gg f_{۴} \longrightarrow A_{v_s} = A_{v_{s0}} \times \frac{R'_s + h_{ie}}{R'_s + h_{ie} + (1+h_{fe})R_E} \times \frac{f/f_{۳}}{f/f_{۴}}$$

$$, \quad f_{۴} = \frac{1}{۲\pi\tau_{۴}} = \frac{R'_s + h_{ie} + (1+h_{fe})R_E}{۲\pi(R_E C_E)(R'_s + h_{ie})}$$

$$f_{۳} = \frac{1}{۲\pi\tau_{۳}} = \frac{1}{۲\pi R_E C_E}$$

$$\longrightarrow A_{v_s} = A_{v_{s0}} \times \frac{\cancel{R'_s + h_{ie}}}{R'_s + \cancel{h_{ie} + (1+h_{fe})} R_E} \times \frac{R'_s + h_{ie} \cancel{+ (1+h_{fe})} R_E}{\cancel{R'_s + h_{ie}}} = A_{v_{s0}}$$

$$f \ll f_{۳} \longrightarrow A_{v_s} = A_{v_{s0}} \times \underbrace{\frac{R'_s + h_{ie}}{R'_s + h_{ie} + (1+h_{fe})R_E}}_{A'} \times 1$$

$$\left.\begin{array}{l}C_B\\C_E\\C_C\end{array}\right\} : \quad A_{V_S} = A_{V_{S_0}} \times \frac{(R_L+R_C)(R'_S+h_{ie})C_B C_C}{1+S(R_L+R_C)C_C} \times \frac{S^2(1+SR_EC_E)}{1+S[R_EC_E+[R'_S+h_{ie}+(1+h_{fe})R_E]C_B]+S^2R_E(R'_S+h_{ie})\times C_EC_B}$$

به طور کلی : $A_{V_S} = A_{V_{S_0}} \times \frac{(S+Z_1)(S+Z_2)\cdots(S+Z_n)}{(S+P_1)(S+P_2)\cdots(S+P_n)}$

$$\longrightarrow A_{V_S} = A_{V_{S_0}} \cdot \frac{a_n}{b_n} \cdot \frac{1+b_1S_1+b_2S_2+\cdots+b_nS_n}{1+a_1S_1+a_2S_2+\cdots+a_nS_n}$$

برای ساده سازی محاسبات فوق از شرایط زیر استفاده می کنیم :

روش اول :

۱- قطب ها به اندازهٔ کافی از هم دور باشند یا یک قطب خیلی دورتر از بقیه باشد .

۲- قطب ها حقیقی باشند . ۳- پایین ترین قطب به اندازهٔ کافی از بالاترین صفر بالاتر باشد

$$f_L = \frac{1}{2\pi}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\tau_i} = f_1 + f_2 + \cdots + f_n$$

در تقویت کنندهٔ فوق :

$$f_{C_B} = \frac{1}{2\pi C_B R_{C_B}} = \frac{1}{2\pi \tau_B}$$

$$\tau_B = (R_S+R_i)C_B \quad , \quad \tau_C = (R_i+R_C)C_C$$

$$R_{C_E} = R_E \parallel \left[\frac{1}{1+h_{fe}}(h_{ie} + R_1\parallel R_2\parallel R_S)\right]$$

روش دوم (قطب مسلط) : نه تنها اینکه شرایط روش اول برقرار باشد بلکه یک فرکانس بسیار بزرگتر (حداقل ۱۰ برابر) فرکانسهای دیگر باشد. در این حالت خازنی که مقاومت کمتری را می بیند به عنوان قطب مسلط گرفته می شود (معمولاً خازن امیتر). این روش معمولاً در طراحی استفاده می شود

روش سوم : این روش ، روش مساوی بودن قطبها است.

$$A_{v_s}=A_{v_{s_0}}\times\frac{1}{1+j\,f_1/f}\times\frac{1}{1+j\,\cancel{f_2/f}}\times\cdots\times\frac{1}{1+j\,f_n/f}$$

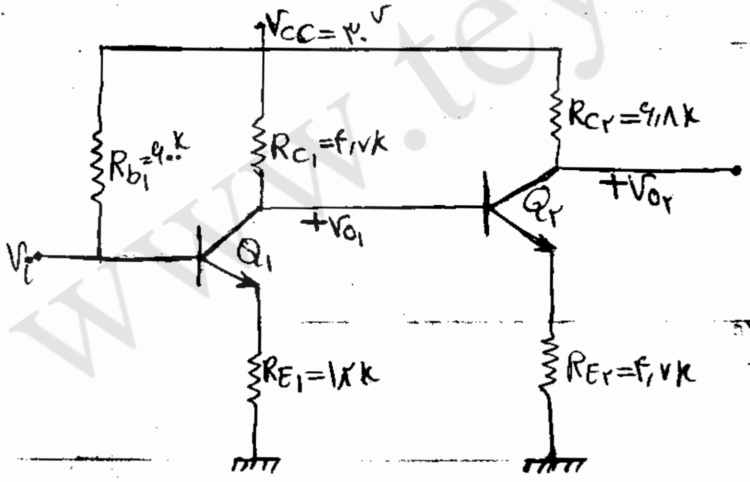
$$,\ f_1=f_2=\cdots=f_n=f'_L$$

$$\longrightarrow |A_{v_s}|=|A_{v_{s_0}}|\cdot\frac{1}{\sqrt{1+(f_1/f)^2}}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+(f_2/f)^2}}\cdot\cdots\cdot\frac{1}{\sqrt{1+(f_n/f)^2}}$$

$$\longrightarrow |A_{v_s}|=|A_{v_{s_0}}|\times\left[\frac{1}{\sqrt{1+(f'_L/f_L)^2}}\right]^n=\frac{1}{\sqrt{2}}A_{v_{s_0}}$$

$$\longrightarrow f_L=\frac{f'_L}{\sqrt{2^{1/n}-1}}$$

کوپلاژ مستقیم (DC):



$\beta=h_{fe}=۱۰۰$

$n=۲$

$V_{BE}=۰٫۶$

الف) نقاط کار

ب) $R_i\ ,A_v$

$V_{CC}=R_{b_1}I_{B_1}+V_{BE_1}+R_{E_1}I_{C_1}\longrightarrow I_{C_1}=۲٫۱\ mA$, $h_{ie_1}=۱٫۲۷K$

$V_{CE_1}=V_{C_1}-V_{E_1}=V_{CC}-R_{C_1}I_{C_1}-R_{E_1}I_{C_1}\longrightarrow V_{CE_1}=۵٫۸\ V$

$V_{CC}=R_{C_1}(I_{C_1}+\cancel{I_{B_2}})+V_{BE_2}+R_{E_2}I_{E_2}\longrightarrow I_{C_2}=۲٫۱۵\ mA$, $h_{ie_2}=۲٫۴۴^K$

$V_{CE_2}=V_{C_2}-V_{E_2}=V_{CC}-R_{C_2}I_{C_2}-R_{E_2}I_{C_2}\longrightarrow V_{CE_2}=۵٫۳\ V$

$$A_v = A_{v_۱} \cdot A_{v_۲}$$

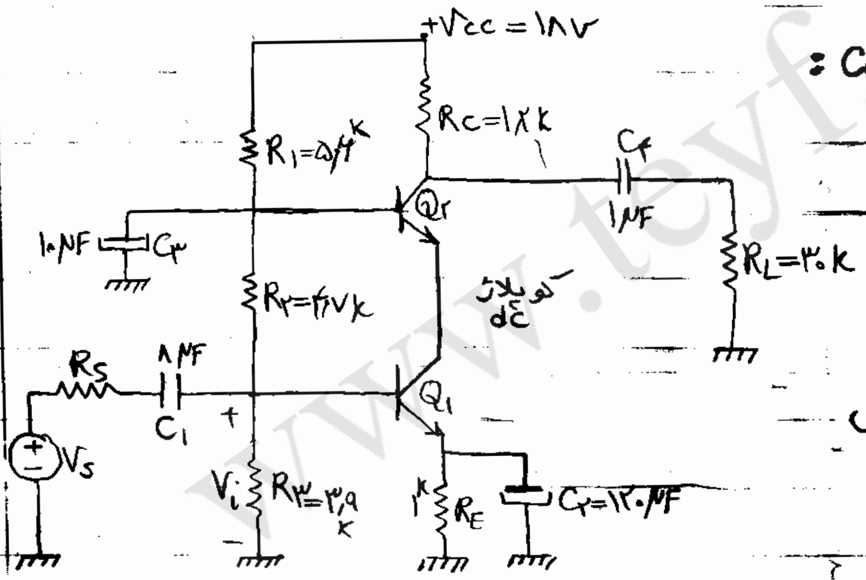
$$A_{v_۲} = \frac{V_{o_۲}}{V_{i_۲}} = \frac{-h_{fe}(R_{C_۲})}{h_{ie_۲} + (1+h_{fe})R_{E_۲}} \simeq -\frac{R_{C_۲}}{R_{E_۲}} = -۱٫۴۵ \nearrow -۱٫۴۳$$

$$A_{v_۱} = \frac{V_{o_۱}}{V_{i_۱}} = \frac{-h_{fe}(R_{C_۱} \parallel R_{i_۲})}{h_{ie_۱} + (1+h_{fe})R_{E_۱}} \simeq -\frac{R_{C_۱}}{R_{E_۱}} = -۳٫۲۵$$

$$R_{i_۲} = h_{ie_۲} + (1+h_{fe})R_{E_۲} = ۴۷۷K$$

$$\longrightarrow \quad A_v \simeq ۴٫۷$$

$$R_i = R_{i_۱} = R_{b_۱} \parallel [h_{ie_۱} + (1+h_{fe})R_{E_۱}] = ۱۰۲\ K$$



تقویت کنندهٔ cascode :

$\beta = h_{fe} = ۱۲۰$

$\eta = ۲$

$V_{BE} = ۰/۶\ V$

نقاط کار و گین ولتاژ را در فرکانس قطع پائین بیابید.

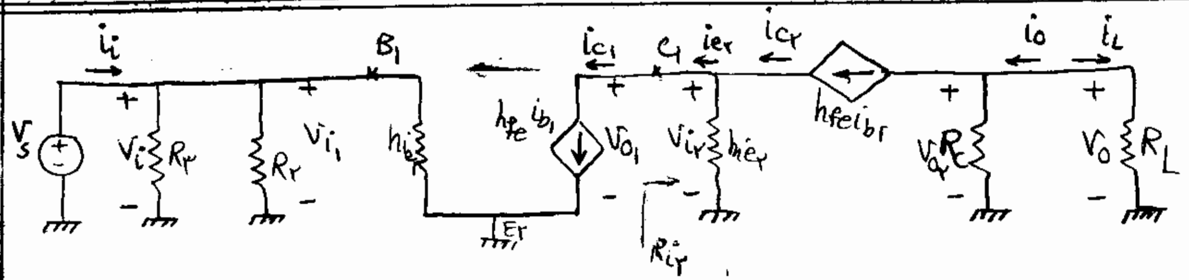
$$V_{B_۱} = \frac{R_۳}{R_۱+R_۲+R_۳} V_{cc} = ۴٫۹۴\ V \quad , \quad V_{B_۲} = \frac{R_۲+R_۳}{R_۱+R_۲+R_۳} V_{cc} = ۱۰٫۹\ V$$

$$I_{C_۱} = I_{C_۲} \simeq I_{E_۱} = \frac{V_{B_۱} - V_{BE_۱}}{R_E} = ۴٫۳۴\ mA$$

$$V_{CE_۱} = V_{C_۱} - V_{E_۱} = (V_{B_۲} - V_{BE_۲}) - R_E I_E \simeq ۶\ V \qquad , \quad h_{ie_۱} = h_{ie_۲} = ۱٫۴۴_K$$

$$V_{CE_۲} = V_{C_۲} - V_{E_۲} = V_{cc} - R_c I_c - (V_{B_۲} - V_{BE_۲}) = ۲٫۴۵\ V$$

در هر تقویت کننده: $\underset{\text{گین}}{G} \times \underset{\text{پهنای باند}}{BW} = K^{\text{ثابت}}$



$$A_V = A_{V_1} \cdot A_{V_2}$$

$$A_{V_2} = \frac{V_{o2}}{V_{i2}} = \frac{-h_{fe} i_{b2}(R_C \| R_L)}{-i_{b2} \cdot h_{ie2}} = \frac{h_{fe}(R_C \| R_L)}{h_{ie2}} = 94$$

$$A_{V_1} = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = \frac{-i_{c1} \cdot R_{i2}}{i_{b1} \cdot h_{ie1}} =$$

$$R_{i2} = \frac{V_{i2}}{-i_{e2}} = \frac{-h_{ie2} i_{b2}}{-(1+h_{fe}) i_{b2}} = \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}$$

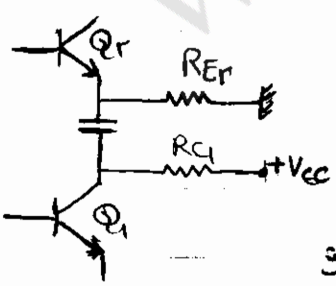
$$\rightarrow A_{V_1} = \frac{-h_{fe}\left(\frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}\right)}{h_{ie}} \simeq -1$$

$$\longrightarrow \quad A_V = 94 \times (-1) = -94$$

اگر خازن C_3 را قطع کنیم:
(برداریم)

$$A_{V_2} = \frac{V_{o2}}{V_{i2}} = \frac{h_{fe}(R_C \| R_L)}{h_{ie2} + R_{B2}}$$

$$A_{V_1} = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = \frac{-h_{fe} \frac{h_{ie} + R_{B2}}{1+h_{fe}}}{h_{ie}}$$



در تقویت کننده Cascode با کوپلاژ خازنی بین Q_1 و Q_2

یک خازن و دو مقاومت نیز اضافه می‌شوند در این حالت:

$$\overset{\text{کوپلاژ}}{DC}: \; V_{CC} = R_C I_C + V_{CE2} + V_{CE1} + R_E I_C$$

$$\overset{\text{کوپلاژ}}{AC}: \begin{cases} V_{CC} = R_C I_C + V_{CE2} + R_{E2} I_C \\ V_{CC} = R_{C1} I_C + V_{CE1} + R_E I_C \end{cases}$$

مزیت این حالت نسبت به حالت قبلی این است که به Vcc با مقدار کمتری نیاز داریم.

$R_{C_1} = R_S + R_i = R_S + R_2 \| R_3 \| h_{ie_1} =$ ۸۴۰ Ω $\longrightarrow$ $\tau_{C_1} = R_{C_1} \cdot C_1 =$ ۱۵٫۵ ms

$R_{C_2} = R_E \| \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} =$ ۱۲ Ω $\longrightarrow$ $\tau_{C_2} = R_{C_2} \cdot C_2 =$ ۱٫۴۴ ms

$R_{C_3} = R_1 \| R_2 =$ ۲٫۶ K , $R_{C_4} = R_C + R_L =$ ۳۱٫۲ K

$\downarrow$ $\downarrow$

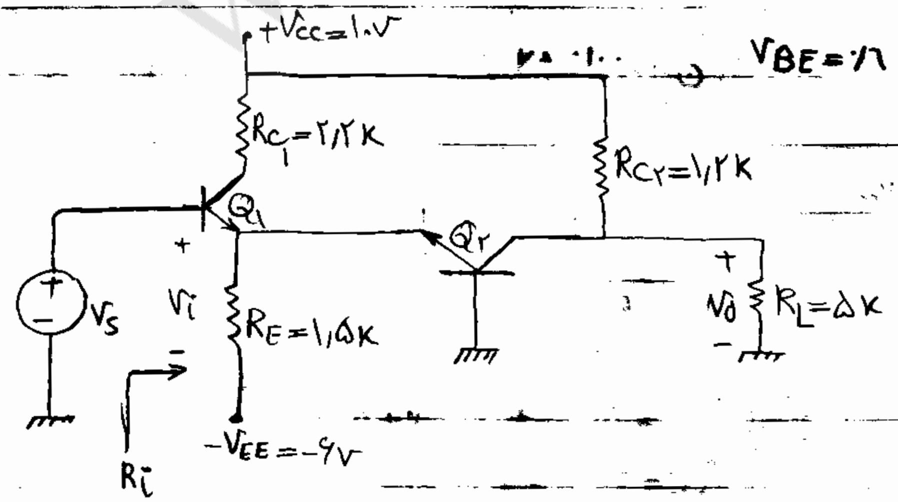
$\tau_{C_3} = R_{C_3} \cdot C_3 =$ ۲۶ ms $\tau_{C_4} = R_{C_4} \cdot C_4 =$ ۳۱ ms

اگر C۲ را قطب غالب بگیریم $\longrightarrow$ $f_L = f_{C_2} = \frac{1}{2\pi R_{C_2} \cdot C_2} =$ ۱۱۱ Hz

البته درنظر گرفتن C۲ به عنوان قطب غالب حالت تقریبی است چون f_{C_2} باید ۱۰ برابر مجموع فرکانسهای خازنهای دیگر باشد که اینگونه نیست.

$f_L = \sum_{i=1}^{4} \frac{1}{2\pi\tau_i} =$ ۱۳۲ Hz حالت دقیق

ترکیب تقویت کننده‌های C.B و C.C :



$V_{BE}=$ ۰/۶ $r_{bb'}=$ ۵۰ Ω

$r_{b'e}=$ ۲k

$g_m=$ ۵۰ ms

نقطه کار, R_i , A_v.

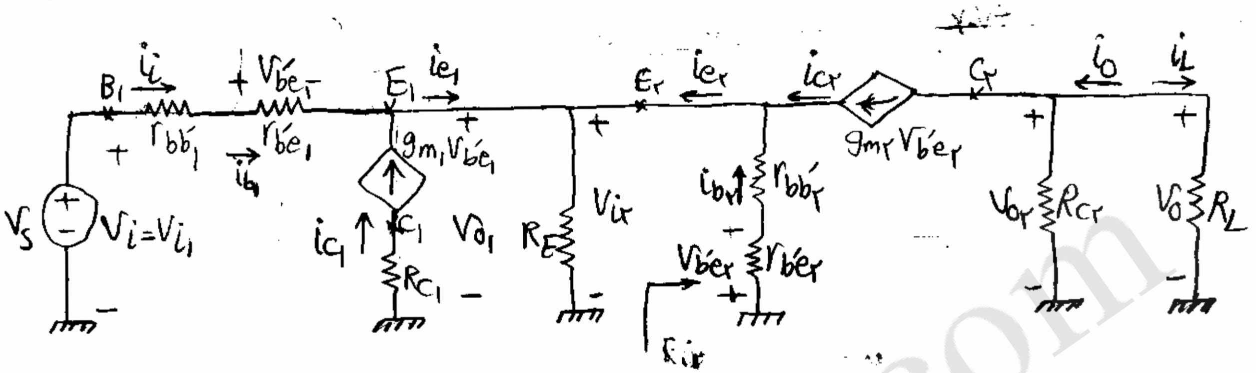
ترانزیستورها مشابهند.

$I_{R_E} = \frac{-V_{BE}-(-V_{EE})}{R_E} =$ ۳٫۶ mA , $I_{C_1} = I_{C_2} = I_{E_1} = I_{E_2} = \frac{I_{R_E}}{2} =$ ۱٫۸ mA

$$V_{CE_۱}=V_{C_۱}-V_{E_۱}=(V_{CC}-R_{C_۱}I_{C_۱})-(-V_{BE})=۴/۸\ V$$

$$V_{CE_۲}=V_{C_۲}-V_{E_۲}=\left[V_{CC}-R_{C_۲}(I_{C_۲}+I_L)\right]-(-V_{BE})=۴/۹\ V$$

$$V_{C_۲}=V_{CC}-R_{C_۲}(I_{C_۲}+I_L)=۹/۳\ V$$



$$A_{V_۲}=\frac{V_{o_۲}}{V_i}=\frac{-g_{m_۲}V_{b'e_۲}(R_{C_۲}\|R_L)}{-V_{b'e_۲}-\frac{V_{b'e_۲}}{r_{b'e_۲}}\times r_{bb'_۲}}=\frac{g_{m_۲}\cancel{V_{b'e_۲}}(R_{C_۲}\|R_L)}{\cancel{r_{b'e_۲}}+r_{bb'_۲}}=۴۸$$

$$\left.\begin{array}{l} A_{V_۱}=\dfrac{V_{o_۱}}{V_{i_۱}}=\dfrac{i_{e_۱}(R_E\|R_{i_۲})}{\frac{V_{b'e_۱}}{r_{b'e_۱}}(r_{bb'_۱})+V_{b'e_۱}+i_{e_۱}(R_E\|R_{i_۲})} \\ i_{e_۱}=i_{c_۱}+i_{b_۱}=g_{m_۱}V_{b'e_۱}+\dfrac{V_{b'e_۱}}{r_{b'e_۱}} \end{array}\right\}\longrightarrow$$

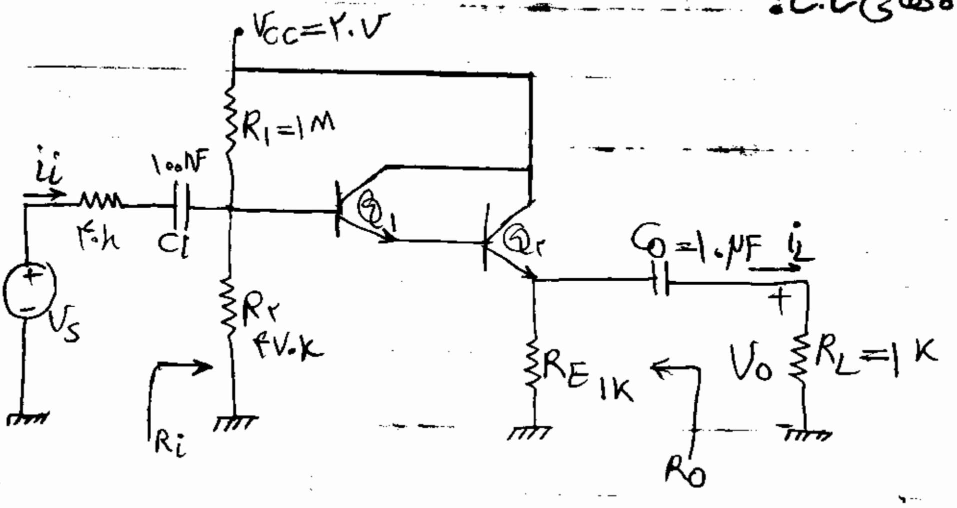
$$A_{V_۱}=\frac{(1+g_{m_۱}r_{b'e_۲})(R_E\|R_{i_۲})}{r_{bb'}+r_{b'e_۱}+(1+g_{m_۱}r_{b'e_۲})}=\frac{۱}{۲}\longrightarrow A_V=A_{V_۱}\cdot A_{V_۲}=۲۴$$

$$R_{i_۲}=\frac{V_{i_۲}}{-i_{e_۲}}=\frac{-V_{b'e_۲}-\frac{V_{b'e_۲}}{r_{b'e_۲}}\cdot r_{bb'_۲}}{-(g_{m_۲}V_{b'e_۲}+\frac{V_{b'e_۲}}{r_{b'e_۲}})}=\frac{r_{b'e_۲}+r_{bb'_۲}}{g_{m_۲}r_{bb'_۲}+1}\simeq ۲۰$$

$$R_i=\frac{V_{i_۱}}{i_{b_۱}}=\frac{V_{i_۱}}{\frac{V_{b'e_۱}}{r_{b'e_۱}}}=r_{bb'_۱}+r_{b'e_۱}+(1+g_{m_۱}r_{b'e_۱})(R_E\|R_{i_۲})=۴\ K$$

تمرین: سوئینگ را در تمرین قبلی و مثال بالا بیابید.

ترکیب تقویت کننده های C.C:



$\beta_1=120$

$\beta_2=80$

$h_{fe_1}=150$

$h_{fe_2}=100$

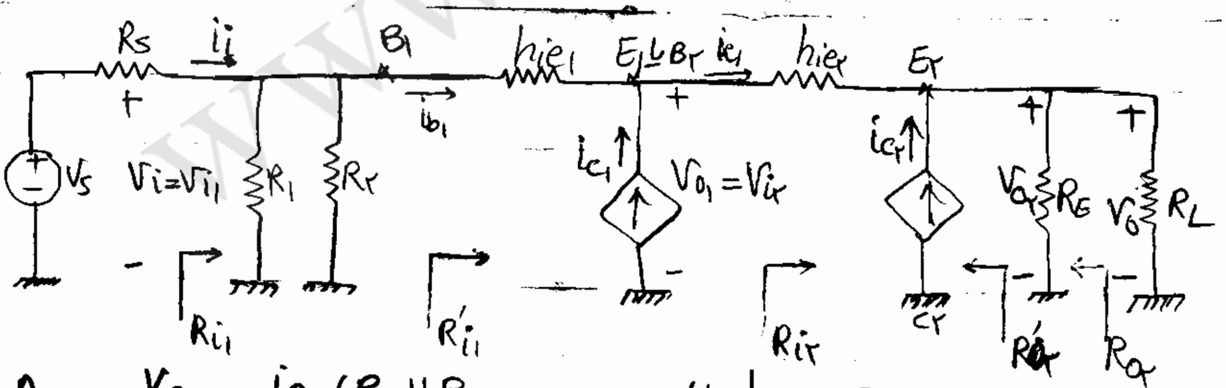
$\frac{i_L}{i_i}=?\ ,\ \frac{V_o}{V_i}=?$

$f_L, R_o, R_i=?$

$$V_{B_1}=\frac{R_2}{R_1+R_2}V_{CC}=6.4\ V$$

$$I_{C_2}\simeq I_{E_2}=\frac{V_{B_1}-V_{BE_1}-V_{BE_2}}{R_E}\simeq 5.2\ mA$$

$$I_{C_1}\simeq\frac{I_{C_2}}{\beta_2}=65\ \mu A$$, $h_{ie_1}=64k\Omega$, $h_{ie_2}=800\ k\Omega$



$$A_{V_2}=\frac{V_{o_2}}{V_{i_2}}=\frac{i_{e_2}(R_E\|R_L)}{i_{b_2}h_{ie_2}+i_{e_2}(R_E\|R_L)}=\frac{(1+h_{fe_2})(R_E\|R_L)}{h_{ie_2}+(1+h_{fe_2})(R_E\|R_L)}=.98$$

$$R_{i_2}=\frac{V_{i_2}}{i_{b_2}}=h_{ie_2}+(1+h_{fe_2})(R_E\|R_L)=51.3\ k\Omega$$

$$R_{o_2}=\left.\frac{V_{o_2}}{i_o}\right|_{V_s=0}=R_E\|\left[\frac{V_{o_2}}{-i_{e_2}}\right]_{V_s=0}$$

$$V_{o_2}=-i_{b_2}h_{ie_2}-i_{b_1}h_{ie_1}-i_{b_1}(R_1\|R_2\|R_s)$$

$$i_{e1} = i_{b2} \quad , \quad (1+h_{fe})\, i_{b1} = i_{b2}$$

$$\longrightarrow R_{o2} = R_E \parallel \left[\frac{-i_{b2}\left(h_{ie2} + \frac{h_{ie1}}{1+h_{fe1}} + \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_S}{1+h_{fe1}}\right)}{-(1+h_{fe2})\, i_{b2}} \right.$$

$$= R_E \parallel \left[\frac{h_{ie2}}{1+h_{fe2}} + \frac{h_{ie1} + R_1 \parallel R_2 \parallel R_S}{(1+h_{fe1})(1+h_{fe2})} \right] = \text{۱۹,۴}\ \Omega$$

$$A_{i2} = \frac{-i_{e2}}{i_{b2}} = -(1+h_{fe2}) = -\text{۱۰۱}$$

$$A_{v1} = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = \frac{i_{e1} R_{i2}}{i_{b1} h_{ie1} + i_{e1} R_{i2}} = \frac{(1+h_{fe1}) R_{i2}}{h_{ie1} + (1+h_{fe1}) R_{i2}} = \text{/۹۹}$$

$$R_{i1} = R_1 \parallel R_2 \parallel R'_{i1} = R_1 \parallel R_2 \parallel \frac{V_{i1}}{i_{b1}} = R_1 \parallel R_2 \parallel [\underbrace{h_{ie1} + (1+h_{fe1}) R_{i2}}_{\text{۷,۸}M}] = \text{۳۰۷}^{k}$$

$$R_{o1} = \frac{V_{o1}}{-i_{c1}}\bigg|_{V_S=0} = \frac{-h_{ie1}\cancel{i_{b1}} - \cancel{i_{b1}}(R_S \parallel R_1 \parallel R_2)}{-(1+h_{fe1})\cancel{i_{b1}}} = \text{۸۷۰}\ \Omega$$

$$A_{i1} = \frac{-i_{e1}}{i_{b1}} = -(1+h_{fe1}) = -\text{۱۵۱}$$

$$A_v = A_{v1} \times A_{v2} \simeq \text{/۹۷}$$

$$A_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_L}{i_o} \cdot \frac{i_o}{i_{e2}} \cdot \frac{i_{e2}}{i_{b2}} \cdot \frac{i_{e1}}{i_{b1}} \cdot \frac{i_{b1}}{i_i}$$

$$= (-1) \times \frac{R_E}{R_E + R_L} \times (-A_{i2})(-A_{i1}) \times \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2 + R'_{i1}} = \text{۲۹۷}$$

$R_{ci} = R_S + R_i = \text{۳۴۷}\ K$ ——— $R_{co} = R_o + R_L = 1\ K$

$\tau_{ci} = R_{ci} \times C_i = \text{۳۴,۷}\ ms$ ——— $\tau_{co} = R_{co} \times C_o = \text{۱۰}\ ms$

$$f_L = \frac{1}{\text{۲}\pi}\left(\frac{1}{\tau_{ci}} + \frac{1}{\tau_{co}}\right) \simeq \text{۲۰}\ Hz$$

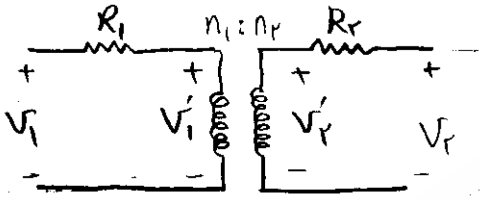
$$V_{OPP_{NL}} = \begin{cases} \nearrow V_{CE_2}^{+} = \text{۱۴٫۸} \\ \searrow V_{OP}^{-} = \text{۵٫۲} = R_E I_E \end{cases} \rightarrow \text{۲×۵٫۲} \quad \text{،} \qquad V_{OPP} = \begin{cases} \nearrow \\ \searrow V_{OP}^{-} = \underbrace{(R_E \| R_L) I_E}_{\text{۲٫۶}} \end{cases} \rightarrow \text{۲×۲٫۶}$$

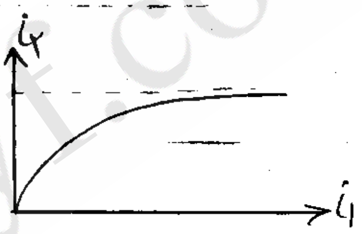
کوپلاژ ترانسفورماتوری:

از محاسن این نوع کوپلاژ این است که اتصال الکتریکی کاملاً قطع بوده و فقط اتصال مغناطیسی است.

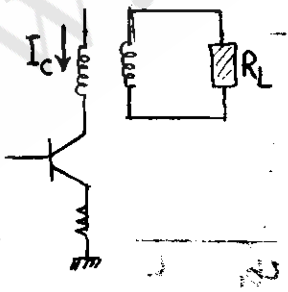
از معایب این نوع کوپلاژ این است که راندمان ترانسفورماتور ۱۰۰٪ نیست. (به علت مقاومت سیم پیچ)

همچنین از معایب دیگر جریان ترانسفورماتور است. (به علت تلفات هسته).

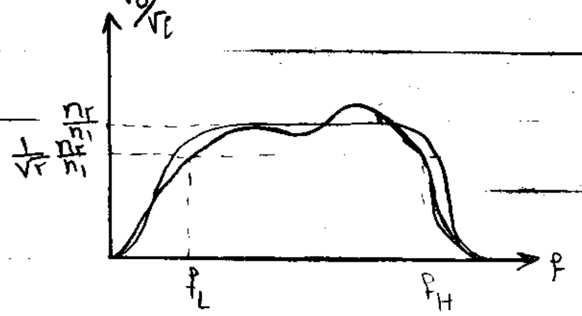




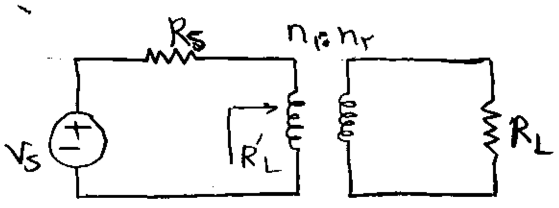
$$\frac{V_2}{V_1} \neq \frac{n_2}{n_1} \qquad \frac{i_2}{i_1} \neq \frac{n_1}{n_2}$$



ترانسفورماتور هم دارای فرکانس قطع خواهد بود و در فرکانسهای بالا به علت تولید خازن مدار LC بوجود آمده و در نقاطی تشدید خواهد داشت.



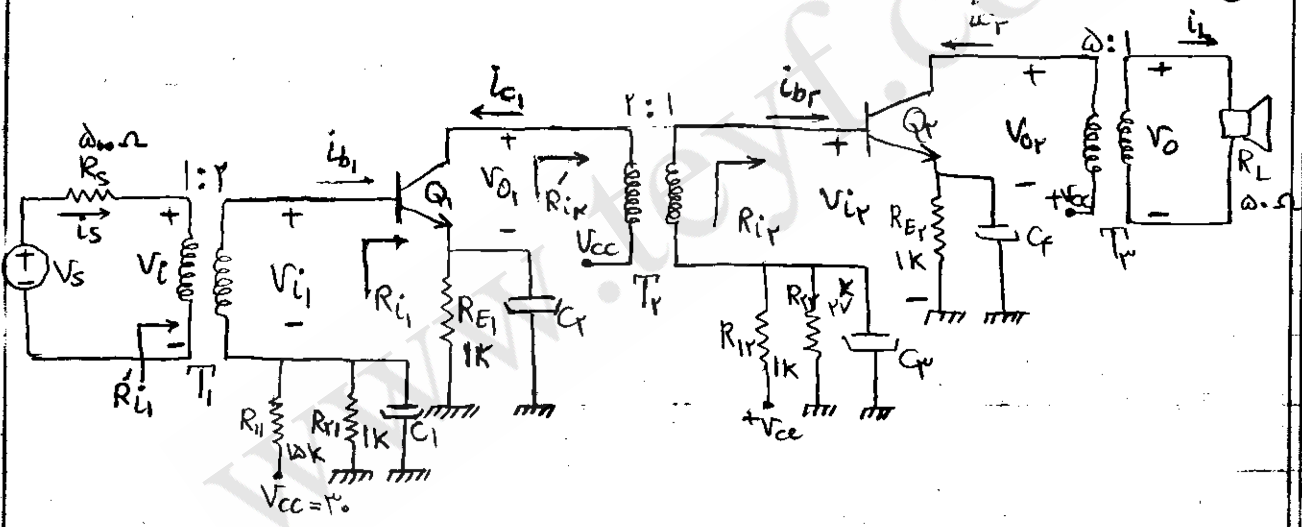
انتقال توان ماکزیمم از پارامترهای نسبتاً خوب برای ترانسفورماتور حساب می‌شود و از اهمیت زیادی برخوردار است:



$$R_S = R'_L = R_L\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

امروزه از کوپلاژ ترانسفورماتوری در فرکانسهای بالا استفاده می‌شود. (در فرکانسهای پائین از کوپلاژ خازنی استفاده می‌شود)

مثال:



فرکانس قطع هر ترانسفورماتور به تنهایی در مدار $f_{L_{T_{1,2,3}}} = 50^{Hz}$ ، $\beta_2 = h_{fe_2} = 50$ ، $\beta_1 = h_{fe_1} = 100$

کل $f_L = 150^{Hz}$ ، $C_{1\ldots4} = ?$ ، R_{i_1} ، R'_{i_1} ، $\frac{i_L}{i_S} = ?$ ، $\frac{V_o}{V_S} = ?$

$$V_{B_1} = \frac{R_{21}}{R_{21}+R_{11}}V_{CC} = \quad , \quad I_{C_1} \simeq I_{E_1} = \frac{V_{E_1}}{R_{E_1}} = \frac{V_{B_1}-V_{BE_1}}{R_{E_1}} = 1.28\,mA$$

$$V_{B_2} = \frac{R_{22}}{R_{22}+R_{21}}V_{CC} \quad , \quad I_{C_2} \simeq I_{E_2} = \frac{V_{E_2}}{R_{E_2}} = \frac{V_{B_2}-V_{BE_2}}{R_{E_2}} = 470\,\mu A$$

$h_{ie_1} = 4.1\ k\Omega$, $h_{ie_2} = 5.5\ k\Omega$ ~~[illegible]~~

$$A_{V_S} = \frac{V_o}{V_S}$$

$$A_{V_2} = \frac{V_{o2}}{V_{i2}} = \frac{-h_{fe_2} R'_L}{h_{ie_2}} = \frac{-h_{fe_2}\left(\frac{n_{13}}{n_{23}}\right)^2 R_L}{h_{ie_2}} = -11.4$$

$$A_{V_1} = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = \frac{-h_{fe_1}(R'_{i2})}{h_{ie_1}} = \frac{-h_{fe_1}\left(\frac{n_{12}}{n_{22}}\right)^2 R_{i2}}{h_{ie_1}} = -537 \quad , R_{i2} = h_{ie_2}$$

$$A_{V_S} = \frac{V_o}{V_S} = \frac{V_o}{V_{o2}} \times \frac{V_{o2}}{V_{i2}} \times \frac{V_{i2}}{V_{o1}} \times \frac{V_{o1}}{V_{i1}} \times \frac{V_{i1}}{V_i} \times \frac{V_i}{V_S}$$

$$= \frac{n_{23}}{n_{13}} \times A_{V_2} \times \frac{n_{22}}{n_{12}} \times A_{V_1} \times \frac{n_{21}}{n_{11}} \times \frac{R'_{i1}}{R'_{i1} + R_S} \longrightarrow A_{V_S} = 820$$

$$, R'_{i1} = R_{i1}\left(\frac{n_{11}}{n_{21}}\right)^2 = h_{ie_1}\left(\frac{n_{11}}{n_{21}}\right)^2 = 1\ k\Omega$$

$$A_{i_S} = \frac{i_L}{i_S} = \frac{i_L}{i_{c2}} \cdot \frac{i_{c2}}{i_{b2}} \cdot \frac{i_{b2}}{i_{c1}} \cdot \frac{i_{c1}}{i_{b1}} \cdot \frac{i_{b1}}{i_S}$$

$$= \left(-\frac{n_{13}}{n_{23}}\right) \cdot \left(h_{fe_2}\right) \cdot \left(-\frac{n_{12}}{n_{22}}\right) \cdot \left(h_{fe_1}\right)\left(\frac{n_{11}}{n_{21}}\right) = 25000$$

فرض می‌کنیم $f_{C_2} = f_{C_4} = 50$. (چون در هر حال C_2، C_4 مقاومتهای کمتری می‌بینند و قطب غالب خواهند بود:)

$$f_1 = \frac{f'_{L1}}{\sqrt{2^{1/n}-1}} = \frac{50}{\sqrt{2^{1/5}-1}} = 130\ Hz$$

$$\longrightarrow f_{C_1}, f_{C_3} \longrightarrow f'_{L2} = f_L - f'_{L1} = 20\ Hz$$

$$, f_2 = \frac{f'_{L2}}{\sqrt{2^{1/4}-1}} \longrightarrow f'_{L2} = 13\ Hz$$

$$R_{C_1} = R_{11} \parallel R_{21} \parallel [R'_s + R_{i1}] \quad , \quad R'_s = R_s \left(\frac{n_{21}}{n_{11}}\right)^2 \longrightarrow R_{C_1} = ۸۱۰\ \Omega$$

$$R_{C_2} = R_{E_1} \parallel \left[\frac{1}{1+h_{fe_1}}(h_{ie} + R'_s)\right] = ۶۰\ \Omega$$

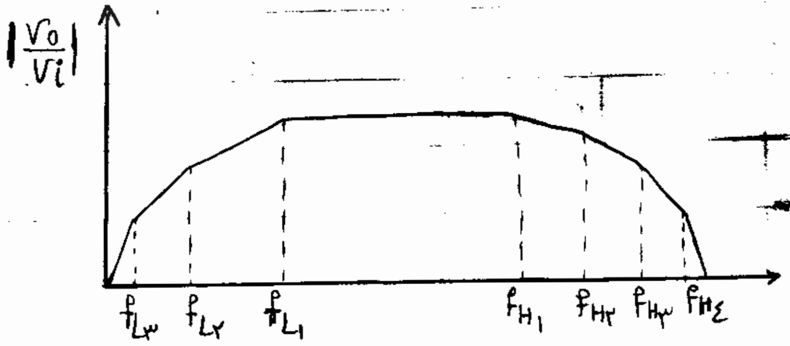
$$R_{C_3} = R_{12} \parallel R_{22} \parallel \infty = ۹۶۰\ \Omega \quad , \quad R_{C_4} = R_{E_2} = 1K$$

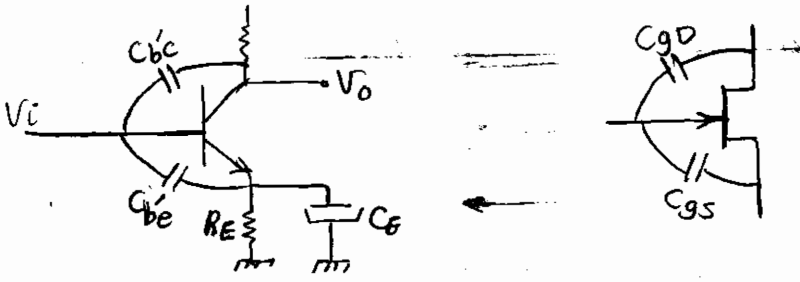
لذا روشی که در پیش گرفته بودیم نادرست بود و باید فقط خازن C۲ را قطب غالب می‌گرفتیم و خازن C۴ را همراه با C۳ و C۱ محاسبه می‌کردیم. اگر روش قبلی را ادامه دهیم:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi R_{C_1} f'_{L_4}} = ۱۵\ \mu F \quad , \quad C_2 = \frac{1}{2\pi R_{C_2} f'_{L_4}} = ۵۳\ \mu F$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi R_{C_3} f'_{L_2}} = ۱۳\ \mu F \quad , \quad C_4 = \frac{1}{2\pi R_{C_4} f'_{L_4}} = ۳/۲\ \mu F$$

چون خازنها از هم دور نیستند می توان قبول کرد. امّا روش دقیقتر این بود که از اول مقاومتها را حساب می‌کردیم و بعد ادامه می‌دادیم. اگر خازنها از هم دور بودند باید روش را عوض می‌کردیم





در فرکانسهای بالا