



فصل ۱

مقدمه‌ای بر فیزیک الکترونیک

- ۱- مقاومت یک سیم مسی به قطر $1/0.3 \text{ mm}$ برابر $2/14 \times 10^{-4} \frac{\Omega}{\text{cm}}$ است. در صورتی که بدانیم چگالی الکترون‌های آزاد در مس 10^{28} m^{-3} است و با فرض اینکه چگالی جریان برابر $2 \times 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ باشد، مطلوبست محاسبه:
- (الف) مقدار جریان
(ب) رسانایی ویژه سیم
(ج) سرعت حرکت الکترون‌های آزاد
(د) قابلیت تحرک الکترون‌های آزاد
- ✓ (۱۵ اه):

(الف) می‌دانیم که رابطه چگالی جریان (J) و جریان (I) الکتریکی به صورت زیر می‌باشد:

$$J = \frac{I}{A}, \quad A = \pi R^2, \quad 2R = 1/0.3 \Rightarrow R = \frac{1/0.3}{2} \text{ m.m}$$

$$\Rightarrow I = JA = 2 \times 10^6 \times \pi \times \left(\frac{1/0.3 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 = 1/66 \text{ (A)}$$

(ب) با توجه به داده مسئله مقاومت این رشته سیم به طول یک سانتیمتر $2/14 \times 10^{-4}$ اهم خواهد بود و از طرفی برای مقاومت داریم:

$$R = \frac{\rho L}{A} \text{ یا } \sigma A \Rightarrow \sigma = \frac{L}{AR} = \frac{1(\text{cm})}{2/14 \times 10^{-4} \times \pi \times \left(\frac{1/0.3 \times 10^{-1}}{2} \right)^2} = 0.56 \times 10^6 \text{ } (\Omega\text{-cm})^{-1}$$

ج) طبق رابطه (۱ - ۲ کتاب) داریم:

$$J = (nq) \cdot v \Rightarrow v = \frac{J}{nq}$$

$$\Rightarrow v = \frac{2 \times 10^6}{8/4 \times 10^{28} \times 1/6 \times 10^{-19}} = 1/488 \times 10^{-4} \left(\frac{m}{s} \right)$$

د) طبق رابطه (۱ - ۳) خواهیم داشت:

$$n = 8/4 \times 10^{28} (m^{-3}) = 8/4 \times 10^{22} (cm^{-3})$$

$$\rightarrow \mu_e = \frac{\sigma}{nq} = \frac{0.56 \times 10^6}{8/4 \times 10^{22} \times 1/6 \times 10^{-19}} = 41/66 \left(\frac{cm^2}{v-sec} \right)$$

۲ - ثابت کنید که تعداد الکترون‌های آزاد در یک متر مکعب یک فلز برابر است با:

$$n = \frac{dv}{AM} = \frac{A_0 \times 10^3 dv}{A}$$

که در آن d جرم حجمی $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$ ، v ظرفیت (تعداد الکترون‌های آزاد در هر اتم)، A وزن اتمی (g)، M وزن یک اتم با وزن اتمی واحد (kg) و A_0 عدد آووگادرو است.

☑ (۱۰ اه حل)

$n =$ تعداد مول \times ظرفیت

اگر A_0 عدد آووگادرو باشد خواهیم داشت:

$n =$ تعداد مول $\times A_0 \times$ ظرفیت

$$\text{تعداد مول} = \frac{\text{جرم}}{\text{وزن اتمی}} = \frac{\text{حجم} \times \text{چگالی}}{\text{وزن اتمی}}$$

چون در صورت مسئله فرض شده است که حجم یک متر مکعب را در نظر بگیرید به جای حجم در رابطه فوق یک قرار می‌دهیم. بنابراین خواهیم داشت:

$$\text{تعداد مول} = \frac{d \times 1}{A}$$

$$\Rightarrow n = v \cdot A_0 \cdot \frac{d \times 1}{A \times 10^{-3} (gr)} = \frac{A_0 \times vd \times 10^3}{A (gr)}$$

همچنین می‌توان نوشت:

$$n = \text{ظرفیت} \times \frac{\text{جرم کل}}{\text{جرم یک اتم فلز}} = \frac{d \times \text{حجم}}{\text{جرم یک اتم فلز}} \times v$$

$$M.A = (\text{وزن اتمی}) \times A \times (\text{وزن اتمی با وزن واحد}) = M$$

$$\Rightarrow n = \frac{d \times 1 \times v}{MA} = \frac{dv}{MA}$$

۳- مقاومت یک میله از جنس سیلیکن به طول ۵ cm و سطح مقطع 8 mm^2 را به دست آورید.

✓ (۵ه حل):

برای سیلیکن $\mu_n = 1300$ و $\mu_p = 500$ و $n_i = 1/5 \times 10^{10}$ می باشد. بنابراین σ قابل محاسبه می باشد:

$$\sigma = q \times n_i (\mu_n + \mu_p)$$

$$\sigma = 1/6 \times 10^{-19} \times 1/5 \times 10^{10} (1300 + 500) = 4/32 \times 10^{-6} = \frac{1}{\rho}$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{1}{4/32 \times 10^{-6}} = 231/48 \times 10^3 (\Omega\text{-cm})$$

با توجه به رابطه مقاومت $R = \frac{\rho L}{A}$ خواهیم داشت:

$$R = \frac{231/48 \times 5 \times 10^3}{8 \times 10^{-2} (\text{cm}^2)} = 14/46 \times 10^6 \Omega \text{ یا } 14/46 \text{ M}\Omega$$

۴- به یک قطعه نیمه هادی، هم ناخالصی نوع N و هم ناخالصی نوع P تزریق شده است. اگر چگالی

ناخالصی ها به ترتیب برابر $N_D = 2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ و $N_A = 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ باشند، چگالی

حفره ها (P) و چگالی الکترون های آزاد (n) را محاسبه نمایید. برای نیمه هادی مورد نظر چگالی

خالص $n_i = 3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ می باشد.

✓ (۵ه حل):

$$P + N_D = n + N_A$$

با توجه به رابطه (۱-۹) داریم:

$$\Rightarrow P + 2 \times 10^{12} = n + 5 \times 10^{11} \quad (1)$$

$$np = n_i^2 \Rightarrow np = (3 \times 10^{11})^2 = 9 \times 10^{22} \quad (2)$$

از حل معادله (۱) و (۲) خواهیم داشت:

$$p = n - 1/5 \times 10^{12} \Rightarrow n(n - 1/5 \times 10^{12}) = 9 \times 10^{22}$$

$$n^2 - 1/5 \times 10^{12} n - 9 \times 10^{22} = 0 \Rightarrow n = 15/57 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

$$p = (15/57 - 15) \times 10^{11} = 0/57 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

۵- چگالی حفره ها و الکترون های آزاد را در دمای 300°K برای بلورهای زیر محاسبه کنید:

الف) ژرمانیوم نوع P با مقاومت ویژه $0.2 \Omega\text{-cm}$

ب) سیلیکن نوع N با مقاومت ویژه $20 \Omega\text{-cm}$

✓ (اه حل)

الف) می‌دانیم که $n = \frac{n_i^2}{p}$ اگر p را محاسبه کنیم مقدار n به دست خواهد آمد. داریم:

$$nq\mu_n + pq\mu_p = \sigma$$

چون در نیمه هادی نوع p ، p از n خیلی بزرگتر است بنابراین:

$$pq\mu_p \approx \sigma \Rightarrow p = \frac{\sigma}{q\mu_p} = \frac{\frac{1}{0.02}}{1/6 \times 10^{-19} \times 1800} = 1/74 \times 10^{17} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(2/5 \times 10^{12})^2}{1/74 \times 10^{16}} = 3/59 \times 10^9 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

ب) در نیمه هادی نوع N ، n از p بزرگتر است بنابراین:

$$nq\mu_n = \sigma \Rightarrow n = \frac{\sigma}{q\mu_n} = \frac{\frac{1}{20}}{1/6 \times 10^{-19} \times 1300} = 2/4 \times 10^{14} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{(1/5 \times 10^{10})^2}{2/4 \times 10^{14}} = 9/37 \times 10^5 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

۶- چگالی حفره‌ها و الکترون‌های آزاد را برای یک نمونه سیلیکن با $N_D = 1/874 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ و $N_A = 3/748 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ به دست آورید.

✓ (اه حل)

در سیلیکن $n_i = 1/5 \times 10^{10}$ می‌باشد.

در نیمه هادی نوع N : $P_n \approx \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(1/5 \times 10^{10})^2}{1/874 \times 10^{13}} = 1/2 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$

در نیمه هادی نوع P : $n_p \approx \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1/5 \times 10^{10})^2}{3/748 \times 10^{13}} = 6 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$

۷- مقاومت ویژه ($\rho = \delta^{-1}$) سیلیکن خالص را در دمای 300°K به دست آورید. در صورتی که با افزایش ناخالصی نوع N مقاومت ویژه تا حد $9/6 \Omega\text{-cm}$ کاهش یابد، نسبت چگالی اتم‌های ناخالصی به اتم‌های سیلیکن را در واحد حجم محاسبه نمایید.

✓ (اه حل)

در یک بلور سیلیکن خالص هم حفره‌ها و هم الکترون‌ها در هدایت الکتریکی دخالت دارند بنابراین:

$$\sigma = qn_i (\mu_n + \mu_p) = 1/6 \times 10^{-19} \times 1/5 \times 10^{10} (1300 + 500) = 4/32 \times 10^{-16} (\Omega\text{-cm})^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 231/4 (\text{k}\Omega\text{-cm})^{-1}$$

اگر ناخالصی نوع N اضافه شود خواهیم داشت:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{9/6} = 0.14 (\Omega\text{-cm})^{-1}$$

از طرفی داریم:

$$P_n = \frac{n_i^2}{N_D}, \quad n_p \cong N_D, \quad \sigma = q\mu_n n_p + q\mu_p p_n$$

$$\sigma = q \left(1300 N_D + 500 \frac{n_i^2}{N_D} \right) = 0.14 \Rightarrow N_D = 5 \times 10^{14}$$

$$\frac{N_D}{n_i} = \frac{5 \times 10^{14}}{1/5 \times 10^{10}} = 3/34 \times 10^4 \simeq 33400$$

۸- در یک بلور حاوی ناخالصی‌های نوع N و P، چگالی حفره‌ها ۱۰۰ برابر چگالی الکترون‌های آزاد است. در صورتی که برای این بلور $n_i = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ باشد، چه مقدار ناخالصی نوع N در واحد حجم باید به آن اضافه نمود تا به بلور خالص تبدیل شود؟

☑ (۱۰) اه حل:

$$p = 100n, \quad np = n_i^2$$

$$100n^2 = (10^{-11})^2 \Rightarrow n = 10^{-10} (\text{cm}^{-3})$$

با توجه به دو رابطه فوق داریم:

$$P = 10^{12} (\text{cm}^{-3})$$

برای اینکه بلور خالص شود باید اندازه p و n با هم برابر شوند بنابراین به مقدار $10^{10} - 10^{12}$ الکترون آزاد

$$N_D = 99 \times 10^{10} (\text{cm}^{-3})$$

تقریباً تعداد الکترون‌های آزاد باید همان 10^{12} باشد.

۹- به یک بلور نوع P آنقدر ناخالصی نوع N اضافه کرده‌ایم که به بلور خالص تبدیل شده است. اکنون

اگر بخواهیم چگالی الکترون‌های آزاد را به ۱۰۰ برابر چگالی حفره‌ها برسانیم، چه مقدار ناخالصی

$$\text{نوع N در واحد حجم باید به آن اضافه کنیم. } (n_i = 10^{12} \text{ cm}^{-3})$$

☑ (۱۰) اه حل:

$$n = 100p \quad (1)$$

مشابه مسئله قبل داریم:

$$np = n_i^2 = 10^{24} \quad (2)$$

$$(1), (2) \Rightarrow p = 10^{11} \text{ (cm}^{-3}\text{)} \Rightarrow n = 100 \cdot p = 10^{13} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

در نتیجه مقدار الکترون‌های آزاد N_D باید برابر با n باشد یعنی:

$$N_D \approx 10^{13} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

۱۰ - در یک قطعه بلور چگالی حفره‌ها ۵ برابر چگالی الکترون‌های آزاد است. اگر با تزریق ناخالصی مناسب به این بلور، چگالی الکترون‌های آزاد را تا ۳ برابر چگالی حفره‌ها افزایش دهیم، مقاومت ویژه بلور با چه نسبتی تغییر می‌کند؟ (فرض کنید $(\mu_n = 2\mu_p)$)

☑ راه حل:

در حالت اول $P = 5n$ می‌باشد پس خواهیم داشت:

$$\sigma_1 = nq\mu_n + pq\mu_p = q(2\mu_p n + p\mu_p) = q\mu_p(2n + p) = 8q\mu_p n$$

در حالت دوم $n = 3p$:

$$\sigma_2 = q\mu_p(2n + \frac{n}{3}) = q\mu_p n \cdot \frac{10}{3}$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{q\mu_p n \times 8}{q\mu_p \cdot n \times \frac{10}{3}} = 2/5$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{5}{2} = \frac{5}{12} = 0/416$$

۱۱ - در یک نمونه ژرمانیوم چگالی ناخالصی نوع N برابر 10^{14} cm^{-3} و چگالی ناخالصی P برابر 10^{13} cm^{-3} است. در دمای معمولی، مقاومت ویژه ژرمانیوم خالص برابر $60 \Omega\text{-cm}$ است. در صورتی که چگالی جریان هدایت کل برابر $52/3 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$ باشد، شدت میدان الکتریکی اعمال شده چقدر است؟

☑ راه حل:

برای ژرمانیوم خالص می‌توان نوشت:

$$\delta = q \cdot n_i (\mu_n + \mu_p) \Rightarrow \delta = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{60} = n_i \times 1/6 \times 10^{-19} \times (3800 + 1800)$$

$$\Rightarrow n_i = 1/85 \times 10^{13}$$

در نیمه هادی فوق $N_A = 7 \times 10^{13}$ و $N_D = 10^{14}$ می‌باشد. پس داریم:

$$n \cdot p = n_i^2, \quad n + N_A = P + N_D$$

$$\begin{cases} n \cdot p = (1/85 \times 10^{13})^2 \\ n + 7 \times 10^{13} = p + 10^{14} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} n = 3/88 \times 10^{13} \\ p = 0/88 \times 10^{13} \end{cases}$$

حال برای ژرمانیوم ناخالص با توجه به مقادیر به دست آمده داریم:

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p = q(n\mu_n + p\mu_p) = 1/6 \times 10^{-19} (3/88 \times 0.1^{13} \times 3800 + 0/88 \times 10^{13} \times 1800) \Rightarrow \sigma = 261/5 \times 10^{-4}$$

$$J = \sigma E \Rightarrow E = \frac{J}{\sigma} = \frac{52/3 \times 10^{-4}}{261/5} = 2 \left(\frac{V}{cm} \right)$$

۱۲- یک قطعه بلور نوع P با $N_A = 6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ در اختیار داریم. به این بلور به طور یکنواخت مقداری فسفر اضافه می‌کنیم. چگالی اتم‌های فسفر را برای هر یک از حالت‌های زیر تعیین کنید:

(الف) چگالی الکترون‌های آزاد در بلور حاصل 10^6 برابر چگالی حفره‌ها شود

$$(n_i = 2/5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3})$$

(ب) مقاومت ویژه بلور حاصل k برابر بلور اولیه شود. (فرض کنید $\frac{\mu_n}{\mu_p} = b$ ، جواب را به صورت پارامتری بیان کنید و در صورت امکان در مورد مقادیر مناسب k بحث کنید.)

☑ (۱۵ اه حل):

فرض مسئله $n = 10^6 p$

(الف)

$$n \cdot p = n_i^2 \rightarrow (10^6 p) \times p = n_i^2 \rightarrow 10^6 p = n_i \rightarrow p = \frac{n_i}{10^6} \quad (I)$$

$$n = 10^6 p = 10^6 \times \frac{n_i}{10^6} = 10^3 n_i \quad (II)$$

$$n + N_A = p + N_D \quad (III)$$

روابط (I) و (II) را در رابطه (III) قرار می‌دهیم:

$$10^3 n_i + N_A = \frac{n_i}{10^6} + N_D$$

$$\text{داریم: } n_i = 2/5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \quad N_A = 6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \quad N_D = ?$$

$$\rightarrow 10^3 \times 2/5 \times 10^{11} + 6 \times 10^{14} = \frac{2/5 \times 10^{11}}{10^6} + N_D \rightarrow 2/5 \times 10^{14} = 2/5 \times 10^5 + N_D$$

$$\rightarrow N_D = 2/5 \times 10^{14} - 2/5 \times 10^5 \approx 2/5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

ب) قبل از اضافه کردن فسفر مقاومت ویژه بلور به صورت زیر می باشد:

$$\rho_1 = \frac{1}{\delta_1} = \frac{1}{n_1 q \mu_n + p_1 q \mu_p} \quad (I')$$

$$\text{از طرفی: } n_1 + N_{A_1} = P_1 + N_{D_1}$$

قبل از اضافه کردن فسفر $N_{D_1} = 0$ می باشد و همچنین $n_1 \ll N_{A_1}$ می باشد پس داریم:

$$P_1 = N_{A_1} = 6 \times 10^{14}$$

$$\text{از طرفی: } n_1 p_1 = n_i^2 \rightarrow n_1 = \frac{(2/5 \times 10^{11})^2}{(6 \times 10^{14})} = 1/0.4 \times 10^8$$

$$(I') \Rightarrow \rho_1 = \frac{1}{\delta_1} = \frac{1}{q(1/0.4 \times 10^8 \mu_n + 6 \times 10^{14} \mu_p)} \approx \frac{1}{q \times 6 \mu_p \times 10^{14}}$$

در حالت دوم با اضافه کردن فسفر مقاومت ویژه به صورت زیر می باشد:

$$\rho_2 = \frac{1}{\delta_2} = \frac{1}{q(n_2 \mu_n + p_2 \mu_p)} = k \rho_1 \rightarrow \frac{1}{q(n_2 \mu_n + p_2 \mu_p)} = k \times \frac{1}{6 q \mu_p \times 10^{14}} \quad (II')$$

$$\text{از طرفی: } n_2 p_2 = n_i^2 \rightarrow p_2 = \frac{n_i^2}{n_2} \quad \text{فرض مسئله } \mu_n = b \mu_p$$

$$(II') \Rightarrow \frac{1}{n_2 \mu_n + \frac{n_i^2}{n_2} \mu_p} = k \times \frac{1}{6 \mu_p \times 10^{14}} \rightarrow \frac{n_2}{n_2^2 \times b + (2/5 \times 10^{11})^2} = k \times \frac{1}{6 \times 10^{14}} = a$$

$$\rightarrow ab n_2^2 - n_2 + 6/25 \times 10^{22} a = 0 \rightarrow n_2 = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 25 \times 10^{22} a^2 b}}{2ab}$$

$$p_2 = \frac{n_i^2}{n_2} = \frac{6/25 \times 10^{22}}{\frac{1 \pm \sqrt{1 - 25 \times 10^{22} a^2 b}}{2ab}} = \frac{6/25 \times 10^{22} \times 2ab}{1 \pm \sqrt{1 - 25 \times 10^{22} a^2 b}}$$

$$\text{داریم: } n_2 + N_{A_2} = P_2 + N_{D_2}$$

$$\Rightarrow \frac{1 \pm \sqrt{1 - 25 \times 10^{22} a^2 b}}{2ab} + N_{A_2} = \frac{6/25 \times 10^{22} \times 2ab}{1 \pm \sqrt{1 - 25 \times 10^{22} a^2 b}} + N_{D_2}$$

$$\rightarrow N_{D_2} = \frac{1 + 1 - 25 \times 10^{22} a^2 b \pm 2\sqrt{1 - 25 \times 10^{22} a^2 b} - (6/25 \times 10^{22} \times 2ab) \times 2ab}{2ab(1 \pm \sqrt{1 - 25 \times 10^{22} a^2 b})} + N_{A_2}$$

$$N_{A_1} = N_{A_2} = 6 \times 10^{14}$$

$$\rightarrow N_{D_r} = \frac{2 - 25 \times 10^{-22} a^2 b (1+b) \pm 2\sqrt{1 - 25 \times 10^{-22} a^2 b}}{2ab(1 \pm \sqrt{1 - 25 \times 10^{-22} a^2 b})} + 6 \times 10^{14}$$

$$\rightarrow N_{D_r} = \frac{2(1 \pm \sqrt{1 - 25 \times 10^{-22} a^2 b}) - 2/5 \times 10^{-22} a^2 b (1+b)}{2ab(1 \pm \sqrt{1 - 25 \times 10^{-22} a^2 b})} + 6 \times 10^{14}$$

$$\rightarrow N_{D_r} = \frac{1}{ab} - \frac{12/5 \times 10^{-22} a \times (1+b)}{(1 \pm \sqrt{1 - 25 \times 10^{-22} a^2 b})} + 6 \times 10^{14}$$

از طرفی: $a = \frac{k}{6 \times 10^{14}}$

$$\Rightarrow N_{D_r} = \frac{6 \times 10^{14}}{kb} - \frac{20/83 \times 10^{-6} k \times (1+b)}{1 \pm \sqrt{1 - 0.694 \times 10^{-6} k^2 b}} + 6 \times 10^{14}$$

از آنجایی که N_{D_r} باید عدد مثبتی باشد پس باید داشته باشیم:

$$\frac{6 \times 10^{14}}{kb} + 6 \times 10^{14} > \frac{20/83 \times 10^{-6} k (1+b)}{1 \pm \sqrt{1 - 0.694 \times 10^{-6} k^2 b}}$$

$$\rightarrow (1 \pm \sqrt{1 - 0.694 \times 10^{-6} k^2 b})(1+kb) > \frac{20/83 \times 10^{-6} k^2 b (1+b)}{6 \times 10^{14}}$$

$$\rightarrow (1 \pm \sqrt{1 - 0.69 \times 10^{-6} k^2 b})(1+kb) > 3/47 \times 10^{-7} \times k^2 b (1+b)$$

$$1 - 0.694 \times 10^{-6} k^2 b > 0 \rightarrow k^2 b < \frac{10^6}{0.694} = 1/44 \times 10^6$$

۱۳- به یک قطعه نیمه هادی از جنس ژرمانیم در دمای معمولی، اتم‌های ناخالصی پذیرنده اضافه شده است. اگر مقاومت کل که دارای طول یک سانتیمتر و سطح مقطع ۲۰ میلیمتر مربع است برابر ۴۰ اهم باشد.

الف) میزان چگالی ناخالصی (N_A) اضافه شده به قطعه را به دست آورید.

ب) اگر به همین قطعه علاوه بر ناخالصی پذیرنده بند (الف) ناخالصی بخشنده نیز با چگالی

$$N_D = 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

اضافه شود، مقدار مقاومت جدید قطعه را به دست آورید.

☑ راه حل:

الف) با توجه به رابطه $R = \frac{L}{\sigma A}$ خواهیم داشت:

$$\sigma = \frac{L}{R \cdot A} = \frac{1}{40 \times 20 \times 10^{-2}} = 0.125 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$$

$$N_A = \frac{\sigma}{q \mu_p} = \frac{0.125}{1/6 \times 10^{-19} \times 1800} = 4.34 \times 10^{14}$$

ب) مانند مسائل قبل:

$$\begin{cases} np = (n_i)^2 \Rightarrow np = 2/5 \times 10^{13} \\ n + N_A = p + N_D \quad n + 4.34 \times 10^{14} = p + 3 \times 10^{14} \end{cases}$$

از حل دو معادله فوق مقادیر n و p به صورت زیر به دست می‌آیند و با داشتن این دو مقدار می‌توان هدایت ویژه جدید را محاسبه نمود.

$$n = 0.18 \times 10^{13} \quad , \quad p = 13/8 \times 10^{13}$$

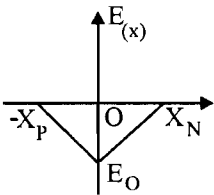
$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p = q(n\mu_n + p\mu_p) = 1/6 \times 10^{-19} (0.18 \times 3800 + 13/8 \times 1800) \times 10^{13}$$

$$\Rightarrow \sigma = 398/53 \times 10^{-4}$$

$$R = \frac{L}{\sigma \cdot A} = \frac{1}{398/53 \times 10^{-4} \times 20 \times 10^{-2}} = 125/5 \Omega$$

۱۴- روابط ۱-۲۷ و ۱-۲۸ متن کتاب را اثبات کنید.

☑ راه حل: با توجه به شکل مقابل:



$$V_o = - \int E dx = - \int_{-x_p}^{x_n} E dx = - \int_{-x_p}^0 E dx - \int_0^{x_n} E dx$$

با توجه به رابطه (۱-۲۳) و (۱-۲۴) کتاب و شکل بالا می‌توان معادله خط را به صورت دو ضابطه‌ای نوشت:

$$E(x) = \begin{cases} \frac{E_o}{x_p} x + E_o & ; \quad -x_p < x < 0 \\ -\frac{E_o}{x_n} x + E_o & ; \quad 0 < x < x_n \end{cases} = \begin{cases} -\frac{qN_A}{\epsilon} x - \frac{qN_A x_p}{\epsilon} & ; \quad -x_p < x < 0 \\ +\frac{qN_D}{\epsilon} x - \frac{qN_D}{\epsilon} x_n & ; \quad 0 < x < x_n \end{cases}$$

از طرفی داریم:

$$(a) \quad x_N = \frac{N_A}{N_D} x_P \quad \Leftrightarrow \quad N_A x_P = N_D x_N$$

$$V_0 = - \int_{-x_P}^0 \left(-\frac{qN_A}{\epsilon} x - \frac{qN_A x_P}{\epsilon} \right) dx - \int_0^{x_N} \left(+\frac{qN_D}{\epsilon} x - \frac{qN_D}{\epsilon} x_N \right) dx$$

$$V_0 = -\frac{qN_A}{\epsilon} x_P^2 + \frac{qN_A}{\epsilon} x_P^2 - \frac{qN_D}{\epsilon} + \frac{qN_D}{\epsilon} x_N^2 = \frac{1}{\epsilon} \frac{qN_A}{\epsilon} x_P^2 + \frac{qN_D}{\epsilon} \left(\frac{N_A}{N_D} x_P \right)^2 \quad (b)$$

$$V_0 = x_P^2 \cdot \frac{qN_A}{\epsilon} \left(1 + \frac{N_A}{N_D} \right) \Rightarrow x_P = \left[\frac{\epsilon V_0}{qN_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه (۱-۲۷)}$$

اگر در رابطه (b) به جای x_P معادل آن را از رابطه (a) قرار دهیم خواهیم داشت:

$$V_0 = \frac{1}{\epsilon} qN_D \left(1 + \frac{N_D}{N_A} \right) \cdot x_N^2 \Rightarrow x_N = \left[\frac{\epsilon V_0}{qN_D \left(1 + \frac{N_D}{N_A} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه (۱-۲۸)}$$

۱۵- دو قطعه بلور سیلیکن در دمای معمولی، یکی از نوع N با $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ و دیگری از نوع P با $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ موجودند.

الف) چگالی حامل‌های اقلیت و اکثریت را در هر یک از این قطعه‌ها محاسبه نمایید.

ب) در صورتی که این قطعه دارای سطح مقطع یکسان باشند، اختلاف پتانسیل تماس ناشی از پیوند آنها چه مقدار خواهد بود؟

ج) عرض ناحیه تهی و پیشرفتگی آن در هر ناحیه محاسبه نمایید.

(۱۵) الف:

الف) در دمای معمولی برای سیلیکن $n_i = 1/5 \times 10^{10}$ می‌باشد.

$$P_N \cong \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(1/5 \times 10^{10})^2}{10^{16}} = 2/25 \times 10^4 \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad \text{برای نیمه هادی نوع N:}$$

$$n_P \cong \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1/5 \times 10^{10})^2}{10^{14}} = 2/25 \times 10^6 \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad \text{برای نیمه هادی نوع P:}$$

(ب) می دانیم $V_T = 26 \text{ mV}$ و $V_0 = V_T L_n \frac{N_A \cdot N_D}{(n_i)^2}$ در نتیجه داریم:

$$V_0 = 26 \times 10^{-3} \times L_n \frac{10^{14} \times 10^{16}}{(1/5 \times 10^{10})^2} = 0.387 \text{ (V.H)}$$

$$W = x_p + x_n = \left[\frac{2\epsilon V_0}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \text{ و } \epsilon_r = 12 \quad (\text{ج})$$

$$= \left[\frac{2 \times 11.854 \times 10^{-12} \times 12 \times 0.387}{1/6 \times 10^{-19}} \times \left(\frac{1}{10^{14}} + \frac{1}{10^{16}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$= 2/27 \text{ mm}$$

$$x_p = \left[\frac{2\epsilon V_0}{q N_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{2 \times 11.854 \times 10^{-12} \times 12 \times 0.387}{1/6 \times 10^{-19} \times 10^{14} \left(1 + \frac{1/14}{10^{16}}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} = 2/25 \text{ mm}$$

$$x_n = W - x_p = 2/27 - 2/25 = 0.02 \text{ mm}$$

۱۶- در یک پیوند P-N، $N_D = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ و $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ است. این پیوند را در دمای

معمولی به یک ولتاژ خارجی 5 ولتی به صورت بایاس معکوس وصل می کنیم

$$\left(n_i = 1/5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}, \epsilon = 1/1 \times 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \right)$$

الف) پیشرفتگی ناحیه تهی را در هر قسمت به دست آورید.

ب) عرض ناحیه تهی (W) چقدر می شود.

(اه حل):

$$x_p = \left[\frac{2\epsilon V_j}{q N_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

(الف)

$$V_j = V_0 + V_d = V_0 + V_T L_n \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 5 + 26 \times 10^{-3} L_n \frac{10^{17} \times 10^{13}}{(1/5 \times 10^{13})^2} = 5 + 0.218 = 5.218$$

ε بر حسب $\frac{F}{m}$ داده شده آن را بر حسب $\frac{F}{cm}$ می نویسیم:

$$\varepsilon = 1/1 \times 10^{-14} \frac{F}{cm}$$

$$x_p = \left[\frac{2 \times 1/1 \times 10^{-14} \times 5/218}{1/6 \times 10^{-19} \times 10^{17} \left[1 + \frac{10^{17}}{10^{13}} \right]} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{11/5 \times 10^{-14}}{1600 \cdot 1/6 \times 10^{-2}} \right]^{\frac{1}{2}} = 2/68 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$x_N = \left[\frac{2 \times 1/1 \times 10^{-14} \times 5/218}{1/6 \times 10^{-19} \times 10^{13} \left[1 + \frac{10^{13}}{10^{17}} \right]} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{11/5 \times 10^{-14}}{1/600 \cdot 16 \times 10^{-6}} \right]^{\frac{1}{2}} = 2/68 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

$$W = x_N + x_p = 2/68 \times 10^{-8} + 2/68 \times 10^{-4} = 2/68 \times 10^{-4} \text{ cm} \quad (\text{ب})$$

۱۷- در یک پیوند P-N از جنس سیلیکن، $N_D = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ است.

الف) N_A را طوری تعیین کنید که اختلاف پتانسیل تماس ϕ در دمای معمولی برابر 0.7 V ولت شود

$$(n_i = 2/5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3})$$

ب) عرض ناحیه تهی (W) و پیشرفتگی آن در هر قسمت را به دست آورید.

✓ (۱۵ هـ):

$$N_D = 3 \times 10^{16} (\text{cm}^{-3}), \quad N_A = ? \text{ (الف)}$$

$$V_0 = V_T L_n \frac{N_A N_D}{n_i^2} \Rightarrow 0.7 = 26 \times 10^{-3} L_n \frac{3 \times 10^{16} \times N_A}{(2/5 \times 10^{10})^2}$$

$$\Rightarrow e^{-0.7/0.26} = \frac{3 \times 10^{16} \times N_A}{(2/5 \times 10^{10})^2} \Rightarrow N_A = 1/26 \times 10^{16} (\text{cm}^{-3})$$

(ب) $\varepsilon_r \cong 12$

$$W = \left[\frac{\gamma \varepsilon V_0}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{2 \times 12 \times \varepsilon_0 \times 0.7}{1/6 \times 10^{-19}} \left(\frac{10^{-16}}{1/0.26} + \frac{10^{-16}}{3} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$W = 0.348 \mu\text{m}$$

$$x_p = \left[\frac{\gamma \varepsilon + \varepsilon_0 V_0}{q N_D \left(1 + \frac{N_D}{N_A} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{2 \times 12 \times 1/854 \times 10^{-12} \times 0.7}{1/6 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^{16} \left(1 + \frac{3}{1/0.2} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.9 \mu\text{m}$$

$$x_N = W - x_p = 0.348 - 0.9 = 0.258 \mu\text{m}$$

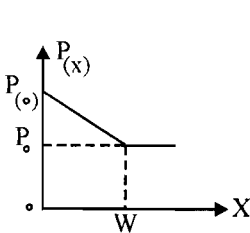
۱۸ - تغییرات چگالی حفره‌ها در یک نمونه هادی مطابق شکل م - ۱۸ است.

الف) در صورتی که هیچ گونه میدان الکتریکی خارجی اعمال نشود، عبارت چگالی جریان $J_p(x)$ را به دست آورده و آن را رسم نمایید.

ب) شدت میدان الکتریکی داخلی $E(x)$ که باید وجود داشته باشد تا توزیع حفره نشان داده شده در شکل منجر به هیچ گونه جریان انتشاری حفره نشود را به دست آورید.

ج) با فرض $p_0 = 10^3$ ، اختلاف پتانسیل بین نقاط $x = 0$ و $x = W$ را محاسبه کنید.

☑ راه حل:

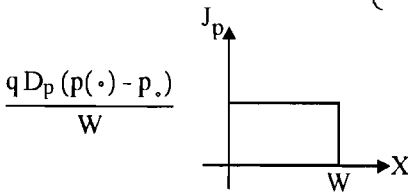


شکل م - ۱۸

$$p(x) = \begin{cases} -\frac{(p_0 - p_0)}{W}x + p_0 & ; 0 < x < W \\ p_0 & ; x > W \end{cases} \quad (\text{الف})$$

$$J_p = -q D_p \frac{dp(x)}{dx} = -q D_p \frac{(p_0 - p_0)}{W}$$

$$J_p = \begin{cases} 0 & ; x > W \\ \frac{q D_p (p_0 - p_0)}{W} & ; x < W \end{cases}$$



ب) با فرض $\frac{p_0 - p_0}{W} \triangleq M$

و با استفاده از رابطه $E(x) = \frac{V_T}{p(x)} \cdot \frac{dp(x)}{dx}$ خواهیم داشت:

$$E(x) = \frac{V_T \cdot (-M)}{-Mx + p_0} = \begin{cases} \frac{M V_T}{Mx - p_0} & ; x < W \\ 0 & ; x > W \end{cases}$$

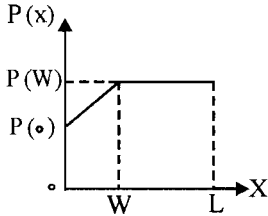
$$V_0 = V_T L_N \frac{p_0}{p_0} = 26 \times 10^{-3} \times L_n \cdot 10^3 = 179/6 \text{ mv} \quad (\text{ج})$$

۱۹ - در یک قطعه بلور نیمه هادی توزیع چگالی حفره‌ها مطابق شکل م - ۱۹ است.

الف) در صورتی که هیچ گونه میدان خارجی اعمال نشود چگالی جریان انتشاری حفره‌ها را به دست آورده (به صورت پارامتری) و ترسیم نمایید.

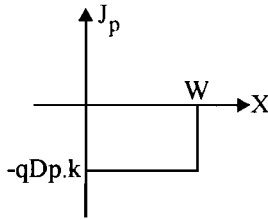
ب) چه میدان الکتریکی داخلی به وجود می‌آید. عبارت آن را به دست آورده و ترسیم نمایید.
 ج) اگر $\frac{p(W)}{p(0)} = 10^{14}$ باشد، اختلاف پتانسیل بین نقاط $x=0$ و $x=1$ چقدر است؟

☑ (اه حل):



شکل م-۱۹

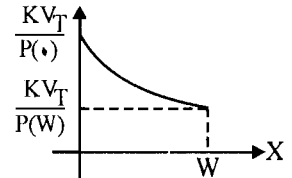
$$p(x) = \begin{cases} \frac{p(W) - p(0)}{W}x + p(0) & ; 0 < x \leq W \\ p(W) & ; W < x \leq L \\ 0 & ; x > L \end{cases} \quad (\text{الف})$$



$$J_p = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} = \begin{cases} -\frac{p(W) - p(0)}{W} \cdot qD_p & ; x < W \\ 0 & ; x > W \end{cases}$$

ب) با فرض: $\frac{p(W) - p(0)}{W} \triangleq K$

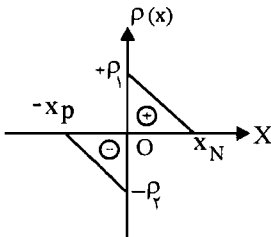
$$E(x) = \frac{V_T}{p(x)} \cdot \frac{dp(x)}{dx} = \begin{cases} \frac{K V_T}{Kx + p(0)} & ; x < W \\ 0 & ; x > W \end{cases}$$



$$V_0 = V_T L_n \frac{p(W)}{p(0)} = 26 \times 10^{-3} L_n 10^{14} = 239/46 \text{ (mv)}$$

(ج)

۲۰- منحنی تغییرات چگالی بار الکتریکی در ناحیه تهی یک پیوند P-N در شکل م-۲۰ آمده است.



شکل م-۲۰

الف) منحنی تغییرات شدت میدان الکتریکی داخلی در طول این ناحیه را به دست آورده و آن را رسم کنید.

ب) منحنی تغییرات پتانسیل الکتریکی در طول ناحیه تهی را به دست آورده و آن را رسم کنید.

ج) بین مقادیر x_p و x_n چه رابطه‌ای برقرار است؟

☑ (اه حل):

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \rightarrow \frac{d}{dx} \left(\frac{dv}{dx} \right) = -\frac{\rho}{\epsilon} \rightarrow \frac{d}{dx} (-E) = -\frac{\rho}{\epsilon} \rightarrow$$

(الف)

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} \rightarrow dE = \frac{\rho}{\epsilon} dx \rightarrow \int dE = \int \frac{\rho}{\epsilon} dx \quad (I)$$

اما تغییرات چگالی بار طبق شکل م - ۲۰ به صورت زیر می باشد:

$$-x_p < x < 0 \Rightarrow \frac{\rho - (-\rho_2)}{x - 0} = -\frac{\rho_2}{x_p} \rightarrow \rho = -\left(\frac{\rho_2}{x_p}\right)x - \rho_2$$

$$\rightarrow \rho = -\rho_2 \left(1 + \frac{x}{x_p}\right)$$

$$0 < x < x_N \Rightarrow \frac{\rho - \rho_1}{x - 0} = -\frac{\rho_1}{x_N} \rightarrow \rho = \left(\frac{\rho_1}{x_N}\right)x + \rho_1 \left(1 - \frac{x}{x_N}\right)$$

حال تغییرات ρ در فاصله $-x_p < x < 0$ را در رابطه با I قرار می دهیم:

$$E(x) - E(-x_p) = \int_{-x_p}^x \frac{-\rho_2}{\epsilon} \left(\frac{x}{x_p} + 1\right) dx \Rightarrow E(x) = \left[\frac{-\rho_2}{\epsilon} \left(x + \frac{x^2}{2x_p}\right) \right]_{-x_p}^x$$

$$= -\frac{\rho_2}{\epsilon} \left(x + \frac{x^2}{2x_p}\right) - \frac{\rho_2}{\epsilon} x_p$$

$$x = 0 \rightarrow E(x=0) = -\frac{\rho_2}{\epsilon} x_p$$

$$0 < x < x_N \Rightarrow E(x) - E(x=0) = \int_0^x \frac{\rho_1}{\epsilon} \left(1 - \frac{x}{x_N}\right) dx \rightarrow E(x) + \frac{\rho_2}{\epsilon} x_p = \frac{\rho_1}{\epsilon} \left(x - \frac{x^2}{2x_N}\right)$$

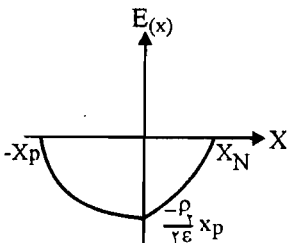
$$\rightarrow E(x) = \frac{\rho_1}{\epsilon} \left(x - \frac{x^2}{2x_N}\right) - \frac{\rho_2}{\epsilon} x_p$$

$$x = x_N \Rightarrow E(x_N) = \frac{\rho_1}{\epsilon} \left(x_N - \frac{x_N^2}{2x_N}\right) - \frac{\rho_2}{\epsilon} x_p$$

$$\Rightarrow E(x_N) = \frac{\rho_1}{\epsilon} x_N - \frac{\rho_2}{\epsilon} x_p$$

شکل را با فرض $\rho_1 x_N = \rho_2 x_p$ رسم می کنیم یعنی در $x = x_N$ داریم $E = 0$ و همچنین داریم

$$E(x=0) = -\frac{\rho_2}{\epsilon} x_p$$



ب) داریم: $E = -\frac{dv}{dx}$: برای $x < -x_p$ در E تغییرات نداشتیم پس v ثابت می باشد که این مقدار برابر صفر

می باشد چون در این قسمت هیچ باری نداریم و همچنین هیچ تغییرات باری نداریم.

$$x < -x_p \Rightarrow v = \bullet$$

$$-x_p < x < \bullet \Rightarrow \frac{dv}{dx} = -E(x)$$

مقدار $E(x)$ را از قسمت الف داریم و آن را در رابطه بالا جایگزین می کنیم:

$$E(x) = -\frac{\rho_{\gamma}}{\varepsilon} \left(x + \frac{x^{\gamma}}{\gamma x_p} \right) - \frac{\rho_{\gamma}}{\gamma \varepsilon} x_p$$

$$\Rightarrow \frac{dv}{dx} = \frac{\rho_{\gamma}}{\varepsilon} \left(x + \frac{x^{\gamma}}{\gamma x_p} \right) + \frac{\rho_{\gamma}}{\gamma \varepsilon} x_p \Rightarrow$$

$$\int_{v(-x_p)}^{v(x)} \frac{dv}{dx} = \int_{-x_p}^x \left(\frac{\rho_{\gamma}}{\varepsilon} \left(x + \frac{x^{\gamma}}{\gamma x_p} \right) + \frac{\rho_{\gamma}}{\gamma \varepsilon} x_p \right) dx$$

$$\Rightarrow v(x) - v(-x_p) = \left(\frac{\rho_{\gamma}}{\varepsilon} \left(\frac{x^{\gamma}}{\gamma} + \frac{x^{\gamma}}{\gamma x_p} \right) + \frac{\rho_{\gamma}}{\gamma \varepsilon} x_p \times x \right)_{-x_p}^x$$

$$\Rightarrow v(x) - v(-x_p) = \left(\frac{\rho_{\gamma}}{\varepsilon} \left(\frac{x^{\gamma}}{\gamma} + \frac{x^{\gamma}}{\gamma x_p} \right) + \frac{\rho_{\gamma}}{\gamma \varepsilon} x_p x \right)_{-x_p}^x$$

$$v(x) = \frac{\rho_{\gamma} x^{\gamma}}{\gamma \varepsilon} \left(1 + \frac{x}{x_p} \right) + \frac{\rho_{\gamma} x_p x}{\gamma \varepsilon} + \frac{1}{\gamma} \frac{\rho_{\gamma} x_p^{\gamma}}{\varepsilon}$$

$$x = \bullet \Rightarrow v(\bullet) = \frac{1}{\gamma} \frac{\rho_{\gamma} x_p^{\gamma}}{\varepsilon}$$

$$E(x) = \frac{\rho_{\gamma}}{\varepsilon} \left(x - \frac{x^{\gamma}}{\gamma x_N} \right) - \frac{\rho_{\gamma}}{\gamma \varepsilon} x_p$$

در $\bullet < x < x_N$

$$\bullet < x < x_N \Rightarrow \int_{v(x=\bullet)}^{v(x)} \frac{dv}{dx} = \int_{\bullet}^x \left(-\frac{\rho_{\gamma}}{\varepsilon} \left(x - \frac{x^{\gamma}}{\gamma x_N} \right) + \frac{\rho_{\gamma}}{\gamma \varepsilon} x_p \right) dx$$

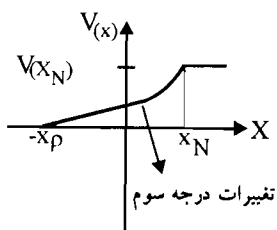
$$\Rightarrow v(x) - v(x=\bullet) = \left(-\frac{\rho_{\gamma}}{\varepsilon} \left(\frac{x^{\gamma}}{\gamma} - \frac{x^{\gamma}}{\gamma x_N} \right) + \frac{\rho_{\gamma}}{\gamma \varepsilon} x_p x \right)_{\bullet}^x$$

$$\Rightarrow v(x=\bullet) = \frac{1}{\gamma} \frac{\rho_{\gamma} x_p^{\gamma}}{\varepsilon}$$

به دست آوردیم:

$$\Rightarrow v(x) = \frac{-\rho_{\gamma}}{\varepsilon} \left(\frac{x^{\gamma}}{\gamma} - \frac{x^{\gamma}}{\gamma x_N} \right) + \frac{\rho_{\gamma}}{\gamma \varepsilon} x_p x + \frac{1}{\gamma} \frac{\rho_{\gamma} x_p^{\gamma}}{\varepsilon}$$

$$\Rightarrow v(x=x_N) = -\frac{1}{\gamma} \frac{\rho_{\gamma}}{\varepsilon} x_N^{\gamma} + \frac{\rho_{\gamma}}{\gamma \varepsilon} x_N x_p + \frac{1}{\gamma} \frac{\rho_{\gamma} x_p^{\gamma}}{\varepsilon}$$



در $x > x_N$ فرض می‌کنیم $\rho_1 x_N = \rho_2 x_p$

$E(x) = 0$ و لذا $v(x)$ ثابت می‌باشد. \Leftarrow

(ج) در $x = x_N$ باید $E(x) = 0$ گردد برای برآورده شدن این شرط:

$$E(x_N) = 0 \Rightarrow \frac{\rho_1 x_N}{\gamma \varepsilon} - \frac{\rho_2 x_p}{\gamma \varepsilon} = 0$$

$$\rightarrow \rho_1 x_N = \rho_2 x_p \rightarrow \frac{x_p}{x_N} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

فصل ۲ دیود پیوندی

۱۳ - الف) مطلوب است محاسبه مقادیر I_s و η برای یک دیود پیوندی که در ولتاژ مستقیم 0.7 ولت، جریان 1 mA و در ولتاژ 0.8 ولت، جریان 10 mA از آن عبور می‌کند.

ب) مقاومت دینامیکی این دیود در ولتاژهای مستقیم 0.7 و 0.8 ولت چقدر است؟

(۱۵) حل: در بایاس مستقیم می‌توان رابطه جریان - ولتاژ دیود پیوندی را تقریباً به صورت زیر نوشت. (یعنی از یک می‌توان صرف‌نظر کرد)

$$I_D = I_s e^{\frac{V_D}{\eta V_T}}$$

$$I_{D_1} = I_s e^{\frac{V_{D_1}}{\eta V_T}}, \quad I_{D_2} = I_s e^{\frac{V_{D_2}}{\eta V_T}} \quad (a) \quad \text{الف)}$$

$$\frac{I_{D_1}}{I_{D_2}} = e^{\frac{V_{D_1} - V_{D_2}}{\eta \times V_T}} \Rightarrow \frac{1}{10} = e^{\frac{0.7 - 0.8}{\eta \times 26 \times 10^{-3}}} \Rightarrow \boxed{\eta = 1/67}$$

با جایگذاری $\eta = 1/67$ در یکی از روابط (a) می‌توان I_s را محاسبه نمود. مثلاً:

$$I_s = \frac{I_{D_1}}{\frac{V_{D_1}}{e^{\frac{1}{67} V_T}}} = \frac{1 \times 10^{-3}}{e^{\frac{0.7}{1/67 \times 26 \times 10^{-3}}}} = 0.1 \text{ (nA)}$$

ب) مقاومت دینامیکی از رابطه (۲ - ۶) محاسبه می‌شود. بنابراین:

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_D + I_s} = \frac{\eta V_T}{I_s e^{\left(\frac{V_D}{\eta V_T}\right)}}$$

$$r_{d_1} = \frac{1/67 \times 26 \times 10^{-3}}{10^{-3} + 0.1 \times 10^{-9}} = 43/42 \Omega$$

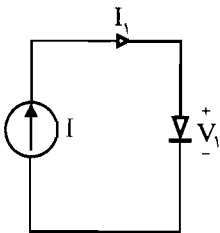
$$\Leftarrow I_{D_1} = 1 \text{ mA}$$

$$r_{d_2} = \frac{1/67 \times 26 \times 10^{-3}}{10^{-3} + 10^{-10}} = 4/34 \Omega$$

$$\Leftarrow I_{D_2} = 10 \text{ mA}$$

۲ - یک دیود پیوندی در یک مدار، توسط یک منبع جریان I تغذیه می‌شود. اگر این دیود با یک دیود مشابه خود موازی شود ولتاژ مستقیم دو سر آن چه تغییری می‌کند؟

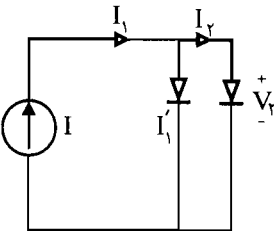
☑ (۵۱ هـ): برای یک دیود تنها می‌توان مدار را مطابق شکل (a) فرض کرد بنابراین داریم:



شکل (a)

$$I_1 = I = e^{\frac{V_1}{\eta V_T}}$$

اگر دیود مشابهی با دیود اول موازی شود مطابق شکل (b) می‌توان نوشت:



شکل (b)

$$I_2 = I'_1 = \frac{I}{2} = e^{\frac{V_2}{\eta V_T}}$$

با توجه به دو رابطه بالا خواهیم داشت:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{2} = e^{\frac{V_2 - V_1}{\eta V_T}} \Rightarrow V_2 - V_1 = -\eta V_T \ln(2)$$

۳- جریان اشباع معکوس دیودی به ازای هر 10°C افزایش دما دو برابر می شود.

الف) چه افزایش دمایی این جریان را تا 30° برابر مقدار اولیه اش در دمای معمولی بالا می برد؟
 ب) چه تغییری در دما (نسبت به 25°C) باعث کاهش جریان اشباع معکوس تا سطح $0/1$ مقدار اولیه اش در دمای معمولی می شود؟

(۱۵ هـ): می دانیم I_S تابعی از دما (θ) می باشد اگر به ازای هر 10°C افزایش دما I_S دو برابر شود پس می توان رابطه I_S را در دو دمای متفاوت به صورت زیر نوشت:

$$I_S(\theta_2) = I_S(\theta_1) \times 2^{\left[\frac{\theta_2 - \theta_1}{10}\right]}$$

$$I_S(\theta_2) = 30 \cdot I_S(\theta_1) \rightarrow \frac{I_S(\theta_2)}{I_S(\theta_1)} = 30 = 2^{\frac{\theta_2 - \theta_1}{10}} \quad (\text{الف})$$

$$\Rightarrow \theta_2 - \theta_1 = 49/06^{\circ}\text{C}$$

$$I_S(\theta_2) = 0/1 I_S(25^{\circ})$$

$$\frac{I_S(\theta_2)}{I_S(25^{\circ}\text{C})} = \frac{1}{10} = 2^{\frac{\theta_2 - 25}{10}} \Rightarrow \theta_2 - 25 = -31/21^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_2 = -8/21^{\circ}\text{C}$$



(ب)

۴- الف) در دمای معمولی در چه ولتاژی جریان اشباع معکوس یک دیود سیلیکنی به 95% مقدار اشباع آن می رسد؟

ب) نسبت جریان دیود با ولتاژ مستقیم $0/1$ ولت را به جریان دیود با همان مقدار ولتاژ معکوس به دست آورید.

ج) با فرض $I_S = 10 \text{ nA}$ جریان دیود را برای ولتاژهای $0/5$ و $0/6$ و $0/7$ ولت محاسبه نمایید.

(۱۵ هـ):

$$I_D = \frac{95}{100} I_S$$

(الف)

برای سیلیکن می توان $\eta \cong 2$

$$I_D = I_S (e^{\eta V_T} - 1) \Rightarrow 0/95 = e^{\frac{V_D \times 10^3}{2 \times 26}} - 1$$

$$\Rightarrow e^{\frac{1000 \cdot V_D}{2 \times 26}} = 1/95 \Rightarrow V_D = 34/72 \text{ mv}$$

(ب) در بایاس مستقیم $V_D = 0.1$

$$I_1 = I_s (e^{\frac{-34/72}{\Delta T}} - 1)$$

در بایاس معکوس $V_D = -34/72$ mv

$$I_2 = I_s (e^{\frac{-34/72}{\Delta T}} - 1)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\left| e^{\frac{100}{\Delta T}} - 1 \right|}{\left| e^{\frac{-34/72}{\Delta T}} - 1 \right|} \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = 11/99$$

$$I_D(V_D = 0.5) = 10 \times 10^{-9} (e^{\frac{0.5 \times 10^3}{\Delta T}} - 1) = 0.149 \text{ (mA)} \quad \text{(ج)}$$

$$I_D(V_D = 0.6) = 10^{-8} (e^{\frac{600}{\Delta T}} - 1) = 1/0.25 \text{ (mA)}$$

$$I_D(V_D = 0.7) = 10^{-8} (e^{\frac{700}{\Delta T}} - 1) = 7/0.2 \text{ (mA)}$$

۵- الف) در صورتی که جریان اشباع معکوس یک دیود برابر 1 nA باشد به ازای چه ولتاژ مستقیمی جریان دیود برابر $0.5 \mu\text{A}$ خواهد شد؟

ب) چنانچه ولتاژ محاسبه شده در بند (الف) را به یک دیود ژرمانیم در جهت مستقیم اعمال کنیم

چه جریانی از آن عبور خواهد کرد؟ (فرض کنید $I_s = 20 \mu\text{A}$ است.)

☑ (۱۰ اه مل):

$$V_D = ? \Leftarrow I_D = 0.5 \mu\text{A}, \quad I_s = 1 \text{ nA}, \quad \eta = 2 \quad \text{(الف)}$$

$$I_D = I_s (e^{\eta \frac{V_D}{V_T}} - 1) \Rightarrow 0.5 \times 10^{-6} = 10^{-9} (e^{\frac{1000 V_D}{\Delta T}} - 1)$$

$$\Rightarrow V_D = 0.3223 \text{ (Volt)}$$

$$I_D = ? \Leftarrow V_D = 0.3223 \text{ V}, \quad I_s = 20 \mu\text{A}, \quad \eta = 2 \quad \text{(ب)}$$

$$I_D = I_s (e^{\eta \frac{V_D}{V_T}} - 1) = 20 \times 10^{-6} (e^{\frac{0.3223 \times 1000}{\Delta T}} - 1) = 9/949 \text{ (mA)}$$

۶- از یک دیود سیلیکنی در دمای 300°K و در ولتاژ 0.7V ولت جریان 5mA عبور می‌کند. چنانچه ولتاژ را تا حد 0.8V ولت افزایش دهیم جریان دیود چقدر خواهد شد؟ برای این دیود I_S چقدر است؟

☑ راه حل:

برای محاسبه جریان I_S مورد نیاز است. مقدار I_S را می‌توان با توجه به داده‌های ابتدای مسئله محاسبه نمود به صورت زیر:

$$I_S = ? \Leftarrow I_D = 5\text{mA}, \quad V_D = 0.7$$

$$I_D = 5 \times 10^{-3} = I_S \left(e^{\frac{0.7 \times 1000}{52}} - 1 \right) \Rightarrow I_S = 7/12 \text{ (nA)}$$

حال با توجه به I_S محاسبه شده، برای $V_D = 0.8\text{V}$ داریم:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{0.8 \times 1000}{52}} - 1 \right) = 7/12 \times 10^{-9} \times 4/8 \times 10^6 = 34/2 \text{ (mA)}$$

۷- یک دیود سیلیکنی در ولتاژ مستقیم 0.7V ولت در حال کار است. چنانچه دما از 25°C

به 55°C کاهش یابد جریان دیود به چه میزان تغییر خواهد کرد؟ ($\eta = 1$)

☑ راه حل:

واضح است که با تغییر دما V_T و هم I_S تغییر می‌نمایند.

$$V_T \cong \frac{T_p^{(ok)}}{11500}$$

برای V_T جدید داریم:

$$T_p = -55 + 273 = 218^{\circ}\text{K} \Rightarrow V_{T_p} \cong \frac{218}{11500} = 18/95 \text{ (mv)}$$

$$I_{S_p}(T_p) = I_S(T_1) \times 2^{\frac{T_p - T_1}{10}} \Rightarrow \frac{I_{S_p}}{I_{S_1}} = 2^{\frac{-55 - 25}{10}} = 2^{-8}$$

$$I_{D_1} = I_{S_1} \left(e^{\frac{0.7 \times 1000}{\eta \times 26}} \right) \Rightarrow \frac{I_{D_p}}{I_{D_1}} = \frac{I_{S_p}}{I_{S_1}} \times e^{1000 \left(\frac{1}{18/95} - \frac{1}{26} \right)}$$

$$I_{D_p} = I_{S_p} \left(e^{\frac{0.7 \times 1000}{\eta \times 18/95}} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{I_{D_p}}{I_{D_1}} = 2^{-8} \times e^{1000 \left(\frac{1}{18/95} - \frac{1}{26} \right)} = 79/42$$

۸- ثابت کنید که در یک پیوند P-N آلیاژی را با ($N_A \ll N_D$) عرض ناحیه تهی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = \left[\frac{\gamma \epsilon \mu V_j}{\delta_p} \right]^{\frac{1}{2}}$$

که در آن V_j اختلاف پتانسیل پیوند با وجود ولتاژ خارجی V_d است.

☑ راه حل:

از فصل اول داریم:

$$W = \left[\frac{\gamma \epsilon V_j}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

چون $N_A \ll N_D$ پس می‌توان از $\frac{1}{N_D}$ در مقابل $\frac{1}{N_A}$ صرف‌نظر کرد. بنابراین داریم:

$$W = \left[\frac{\gamma \epsilon V_j}{q N_A} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (a)$$

$$\sigma_p = q N_A \mu_p \Rightarrow q N_A = \frac{\sigma_p}{\mu_p} \quad (b)$$

از طرفی دیگر داریم:

$$(a), (b) \Rightarrow W = \left[\frac{\gamma \epsilon \mu_p V_j}{\sigma_p} \right]^{\frac{1}{2}}$$

۹- برای یک دیود در دمای 125°C ، جریان اشباع معکوس برابر $1 \mu\text{A}$ است.

الف) در دمای 105°C مقاومت دینامیکی را در ولتاژ مستقیم 0.8V و ولت به دست آورید.

ب) در همان دما مقاومت دینامیکی را در ولتاژ معکوس 0.8V و ولت محاسبه نمایید.

☑ راه حل:

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_s e^{\left(\frac{V_D}{\eta V_T}\right)}}$$

الف) واضح است که در دمای 105°C مقدار I_s عوض می‌شود. یعنی

$$I_s(105^\circ\text{C}) = I_s(125^\circ\text{C}) \cdot 2^{\frac{105-125}{10}} = 1 \times 10^{-6} \times 2^{-2} = 25 \mu\text{A}$$

$$r_d(V_D = 0.8\text{V}) = \frac{\eta V_T}{I_D + I_s} = \frac{2 \times 26 \times 10^{-3}}{I_s(e^{\frac{0.8}{\eta V_T}})}$$

(ب) در بایاس معکوس $V_D = -0.8V$

$$r_d (V_D = -0.8V) = \frac{\eta V_T}{\frac{V_D}{I_s (e^{\eta V_T})}} = \frac{2 \times 26 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-9} (e^{-\frac{0.8}{0.026}})} \cong 1.12 \Omega$$

۱۰- رابطه ۲- ۱۱ را به دست آورید.

📖 (اهتمایی): برای این کار می‌توانید از تعریف ظرفیت خازنی $C_T = \frac{dQ}{dV_r}$ این گونه استفاده

نمایید که ابتدا آن را به شکل $\frac{dQ}{dV_r} = \frac{dQ}{dx_p} \frac{dx_p}{dV_r}$ نوشته و به جای $\frac{dQ}{dx_p}$ مقدار معادلش (qN_A) را قرار دهید و سپس $\frac{dx_p}{dV_r}$ را با استفاده از رابطه ۱- ۲۷ که در آن $V_0 + V_r$ جایگزین نموده‌اید،

محاسبه کنید.

$$C_T = \frac{dQ}{dV_r} = \frac{dQ}{dx_p} \cdot \frac{dx_p}{dV_r} \quad (a)$$

☑ (ا ه حل):

$$\frac{dQ}{dx_p} = qN_A \quad (b)$$

$$x_p = \left[\frac{\gamma \epsilon (V_0 + V_r)}{qN_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \Rightarrow \frac{dx_p}{dV_r} = \frac{1}{\gamma \sqrt{\gamma \epsilon (V_0 + V_r)}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \epsilon}{qN_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)}} \quad (c)$$

اگر (b) و (c) را در (a) قرار دهیم خواهیم داشت:

$$C_T = qN_A \cdot \frac{1}{\gamma \sqrt{\gamma \epsilon (V_0 + V_r)}} \times \sqrt{\frac{\gamma \epsilon N_D}{qN_A (N_A + N_D)}} = \sqrt{\frac{q^2 N_A^2 \gamma \epsilon N_D}{\gamma \epsilon (V_0 + V_r) \cdot qN_A (N_A + N_D)}}$$

$$C_T = \sqrt{\frac{q \epsilon N_A N_D}{\gamma \epsilon (V_0 + V_r) (N_A + N_D)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{V_r}{V_0}}}, \quad \sqrt{\frac{q \epsilon N_A N_D}{\gamma \epsilon (V_0 + V_r) (N_A + N_D)}} = C_{T_0}$$

$$C_T = C_{T_0} \left(1 + \frac{V_r}{V_0}\right)^{-\frac{1}{\gamma}}$$

۱۱- برای یک دیود سیلیکنی، $N_A \gg N_D$ و $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ و $V_0 = 0.5 \text{ V}$ است. در صورتی که

به این دیود یک ولتاژ معکوس 10 ولتی اعمال شود، مطلوب است:

(الف) عرض ناحیه تهی (W)

(ب) مقدار شدت میدان الکتریکی در محل پیوند

(ج) مقدار ظرفیت خازنی در سانتیمتر مربع

☑ (ا ه حل):

چون $N_A \gg N_D$ نتیجه می شود که $x_N \gg x_P \Rightarrow W \cong x_N$

(الف) همچنین داریم: $V_0 = 0.5$ ، $V_r = 10$ ، $\epsilon_s = \sqrt{1.17} \times 10^{-12}$

$$W = \left[\frac{2\epsilon(V_0 + V_r)}{q} \times \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{2 \times 1.17 \times 10^{-12} \times 10.5}{1.6 \times 10^{-19}} \times \frac{1}{10^{15}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$W = 3.73 \times 10^{-2} \text{ mm} \text{ یا } 3.73 \mu\text{m}$$

$$|E_s| = \frac{qN_D x_N}{\epsilon} \text{ و } N_D = 10^{21} \text{ (m}^{-3}\text{)} \quad (\text{ب})$$

$$E_s = \frac{qN_D W}{\epsilon} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{21} \times 3.73 \times 10^{-6}}{1.17 \times 10^{-12}} = 56/17 \times 10.5 \frac{\text{V}}{\text{m}} \text{ یا}$$

$$56/17 \times 10.5 \left(\frac{\text{V}}{\text{cm}} \right)$$

(ج) چون N_A از N_D بسیار بزرگتر است پس از $\frac{1}{N_A}$ صرف نظر می کنیم.

$$\epsilon_s = 1.17 \times 10^{-14} \left(\frac{\text{F}}{\text{cm}} \right)$$

$$C_T = \left(\frac{q\epsilon N_A N_D}{2V_0(N_A + N_D)} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 1.17 \times 10^{-14} \times 10^{15}}{2 \times 0.5 \times 10^{15}} \right)^{\frac{1}{2}} = 1/3 \times 10^{-8} \left(\frac{\text{F}}{\text{cm}^2} \right)$$

$$C_T = C_T \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{V_r}{V_0}}} = 1/3 \times 10^{-8} \times \frac{1}{\sqrt{1 + 20}} = 2/83 \frac{\text{nF}}{\text{cm}^2}$$

۱۲- الف) ثابت کنید که برای یک پیوند آلیازی P-N از جنس سیلیکن (با $N_A \ll N_D$)، ظرفیت خازنی

ناحیه تهی (C_T) بر حسب پیکوفاراد بر سانتیمتر مربع از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$C_T = 2/913 \times 10^{-4} \left[\frac{N_A}{V_j} \right]^{1/2}$$

(ب) در صورتی که مقاومت ویژه (ρ) بلور برابر $4 \text{ cm} - \Omega$ ، اختلاف پتانسیل تماس V برابر $0/3$ ولت، ولتاژ خارجی اعمال شده 4 ولت و سطح مقطع دایره‌ای به قطر $1/25 \text{ mm}$ باشد، مقدار C_T را محاسبه نمایید.

☑ (ا ه حل:

$$C = C_T \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{V_r}{V_o}}} = \sqrt{\frac{q\epsilon}{2V_o \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \cdot \frac{V_o}{V_o + V_r}}$$

(الف)

$$V_r + V_o = V_j$$

$$\epsilon_r = 12, \epsilon_o = 8/854 \times 10^{-14} \left(\frac{F}{\text{cm}} \right)$$

$$C = \sqrt{\frac{1/6 \times 10^{-19} \times 12 \times 8/854 \times 10^{-14}}{2 \times \frac{1}{N_A} \cdot V_j}} = 2/91 \times 10^{-16} \sqrt{\frac{N_A}{V_j}} \left(\frac{F}{\text{cm}^2} \right)$$

$$\text{یا } 2/91 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{N_A}{V_j}} \left(\frac{PF}{\text{cm}^2} \right)$$

$$\mu = 500, \delta = N_A q \mu \Rightarrow N_A = \frac{\sigma}{q \mu} = \frac{1}{\rho q \mu} = \frac{1}{4 \times 1/6 \times 10^{-19} \times 500}$$

(ب)

$$\Rightarrow N_A = 3/125 \times 10^{15}$$

$$V_j = V_o + V_r = 4 + 0/3 = 4/3 V$$

$$C_T = 2/91 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{3/125 \times 10^{15}}{4/3} \frac{PF}{\text{cm}^2}} = 7844/83 \times 10^{-9} \left(\frac{F}{\text{cm}^2} \right)$$

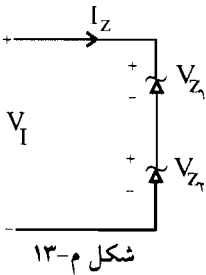
$$\text{سطح مقطع} = \pi R^2 = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \pi \times \left(\frac{1/25 \times 10^{-1}}{2} \right)^2 = 0/122 \text{ cm}^2$$

$$C_T = 7844/83 \times 10^{-9} \times 0/122 = 95/86 (\rho F)$$

۱۳ - در شکل م- ۱۳ جریان اشباع معکوس دو دیود ۱ و ۲ میکروآمپر است. ولتاژ شکست دو دیود مساوی برابر ۱۰۰ ولت است.

الف) جریان و ولتاژ هر دیود را برای ولتاژهای ورودی ۸۰ و ۱۲۰ ولت به دست آورید.
ب) برای حالتی که هر دیود با یک مقاومت $8\text{ M}\Omega$ موازی شود، بند الف) را حل نمایید.

✓ (۱۰ه) حل:



شکل م-۱۳

$$V_I = 80\text{ V} \text{ (الف)}$$

چون دو دیود با هم سری هستند پس جریان هر دو با هم مساوی است.

$$2 \times 10^{-6} (e^{\frac{V_Z \times 10^3}{52}} - 1) = 10^{-6} (e^{\frac{V_I \times 1000}{52}} - 1)$$

$$2e^{\frac{V_Z \times 1000}{52}} - e^{\frac{V_I \times 100}{52}} = -1 \quad \text{(a)}$$

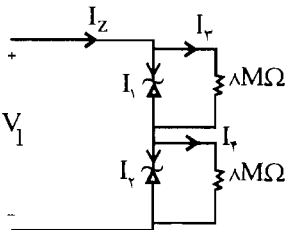
$$V_1 + V_F = 80 \quad \text{(b)}$$

باید معادله (a) و (b) را حل کنیم. سپس از حل: $V_1 = 79/96\text{ V}$ و $V_F = 36\text{ mV}$

$$I_F = I_1 = 10^{-6} (e^{\frac{79/96 \times 10^3}{52}} - 1) \approx 1\text{ }\mu\text{A}$$

اگر $V_I = 120$ همانند روش بالا خواهیم داشت:

$V_1 = 100\text{ V}$ و $V_F = 20\text{ V}$ در این حالت چون $V_1 = 100\text{ V}$ شده است، می‌شکند و جریان مدار $2\text{ }\mu\text{A}$ خواهد شد.



ب) در این حالت مدار مشابه شکل مقابل خواهد شد.

با اعمال KVL در حلقه مربوط به مقاومت‌ها داریم:

$$V_I = 8I_3 + 8I_4 = 80 \quad \Leftarrow \quad V_I = 80$$

$$I_3 + I_4 = 10\text{ }\mu\text{A} \quad \text{(a)}$$

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 \quad \text{(b) از طرفی داریم:}$$

$$I_1 = 1\text{ }\mu\text{A}, \quad I_2 \approx 2\text{ }\mu\text{A}$$

چون هر دو دیود به صورت معکوس تغذیه شده‌اند داریم:

$$I_f = 4/5 \mu A, \quad I_r = 5/5 \mu A$$

بنابراین:

$$V_1 = 8 \times 10^6 \times 5/5 \times 10^{-6} = 44 V, \quad V_r = 8 \times 10^6 \times 4/5 \times 10^{-6} = 36 V$$

در حالتی که $V_I = 120$ خواهیم داشت:

$$\begin{cases} I_r + I_f = 15 \mu A \\ I_1 + I_r = I_r + I_f \end{cases}$$

مشابه حالت قبل:

$$I_1 = 1 \mu A, \quad I_r = 2 \mu A$$

$$I_r = 8 \mu A, \quad I_f = 6 \mu A$$

$$V_1 = 8 \times 8 = 64 V, \quad V_r = 8 \times 7 = 56 V$$

مشاهده می شود که در این حالت به علت موازی شدن مقاومت ها هیچکدام از دیودها نمی شکنند.

۱۴- ظرفیت خازنی ناحیه تهی یک پیوند P-N ژرمانیم با سطح مقطع 0.25 mm^2 و عرض ناحیه

تهی $3 \times 10^{-4} \text{ cm}$ را به دست آورید.

☑ (۱۰۰ امتیاز)

برای دیود ژرمانیم داریم: $\epsilon_r = 16$

$$A = 0.25 \text{ mm}^2 = 0.25 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$W = 3 \times 10^{-4} \text{ cm} = 3 \times 10^{-6} \text{ (m)}$$

$$C = \frac{\epsilon A}{W} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{W} = \frac{16 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.25 \times 10^{-6}}{3 \times 10^{-6}} = 11/8 \times 10^{-12} \text{ F یا } 11/8 \text{ (PF)}$$

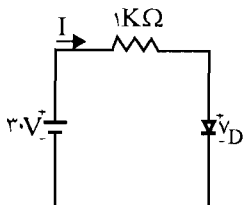
۱۵- در مدار شکل م- ۱۵ دیود ژرمانیم در دمای معمولی دارای جریان اشباع معکوس $10 \mu A$ ، ولتاژ

شکست $100V$ و مقاومت اهمی ناچیز است. جریان مدار را در حالت های زیر به دست آورید:

الف) دیود به صورت مستقیم بایاس شده باشد.

ب) دیود به صورت معکوس بایاس شده باشد.

☑ (۱۰۰ امتیاز)



شکل م- ۱۵

الف) در حالت بایاس مستقیم با اعمال KVL در حلقه مدار خواهیم داشت:

$$30 = I \times 10^3 + V_D \quad (a)$$

از طرفی برای خود دیود نیز داریم:

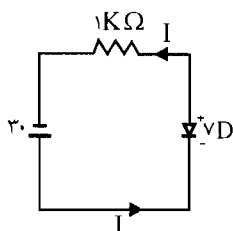
$$I = 10 \times 10^{-6} (e^{\frac{V_D \times 10^3}{52}} - 1) \quad (b)$$

با جایگذاری (b) در (a) یک معادله غیرخطی بر حسب V_D به دست می‌آید با حل این معادله V_D را به دست می‌آوریم:

$$30 = 0.01 \times (e^{\frac{1000 V_D}{52}} - 1) + V_D$$

$$V_D = 0.18 \text{ V} \Rightarrow I = \frac{30 - V_D}{10^3} = \frac{30 - 0.18}{10^3} = 29.82 \text{ (mA)}$$

(ب) در این حالت مدار مطابق شکل روبرو خواهد بود:



$$I \times 10^3 - V_D = 30$$

$$I = 10 \times 10^{-6} (e^{\frac{1000 V_D}{52}} - 1)$$

باز هم اگر معادله روبرو حل شود خواهیم داشت:

$$V_D \cong -29.99 \Rightarrow I = \frac{30 + V_D}{10^3} = \frac{0.01}{10^3} = 10 \mu\text{A}$$

۱۶- یک دیود سیلیکونی با یک مقاومت $10 \text{ M}\Omega$ سری شده و توسط یک منبع ولتاژ ۱ ولتی به صورت معکوس بایاس شده است.

(الف) ولتاژ دو سر دیود را به دست آورید.

(ب) در صورتی که جای قطب‌های منبع ولتاژ را عوض کنیم، ولتاژ دو سر دیود چقدر خواهد شد؟

(۱۵) حل:

(الف) چون مقدار جریان اشباع معکوس را نداریم آن را $I_s = 1 \text{ nA}$ در نظر می‌گیریم و با توجه به قسمت (ب) مسئله قبل داریم

$$I_D = I_s \rightarrow I_D = 1 \text{ nA}$$

$$V_R = R I_D = 10 \text{ M}\Omega \times 1 \text{ nA} = 0.01 \text{ V}$$
 ولتاژ دو سر مقاومت

$$V_D = 1 - 0.01 = 0.99 \text{ V} \rightarrow$$
 ولتاژ دو سر مقاومت - ولتاژ منبع V_D ولتاژ دو سر دیود

(ب) ابتدا مقدار I_D را از حل دو معادله زیر به دست می‌آوریم:

$$(1) \quad 1 \text{ V} = 10 I_D + V_D \rightarrow V_D = 1 - 10 I_D$$

$$(2) \quad I_D = 10^{-3} (e^{\frac{V_D}{52}} - 1)$$

با جایگذاری رابطه (۱) در رابطه (۲) مقدار I_D به دست می‌آید.

$$(۱) , (۲) \rightarrow I_D = 0.077 \mu A$$

$$V_R = 10 M\Omega \times 0.077 \mu A = 0.77 \Omega \rightarrow V_D = 1 - V_R = 1 - 0.77 = 0.23 V$$

۱۷- یک دیود سیلیکنی در دمای $300^\circ K$ و در ولتاژ 0.7 ولت، دارای جریان $5 mA$ است.

الف) جریان اشباع معکوس را محاسبه نمایید.

ب) اگر ولتاژ به 0.8 ولت برسد جریان چقدر خواهد شد؟

ج) چه تغییر ولتاژی در ناحیه هدایت باعث ده برابر شدن جریان می‌شود؟ (در دمای $300^\circ K$)

✓ (۱۰) اه حل:

الف) با توجه به رابطه مقابل داریم:

$$I_D = I_s (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1) \rightarrow 5 mA = I_s (e^{\frac{0.7}{0.026}} - 1) \rightarrow I_s = 7/12 nA$$

$$I_D = 7/12 nA (e^{\frac{0.8}{0.026}} - 1) = 34/19 mA \quad (ب)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = 10 \rightarrow \frac{I_2}{I_1} = 10 = \frac{e^{\frac{V_2}{V_T}} - 1}{e^{\frac{V_1}{V_T}} - 1} = \frac{e^{\frac{V_2}{0.026}}}{e^{\frac{V_1}{0.026}}} = e^{\frac{V_2 - V_1}{0.026}} \quad (ج)$$

$$\rightarrow (\ln 10) \times 0.026 = V_2 - V_1 \rightarrow V_2 - V_1 = 119 mV$$

۱۸- در مدار شکل م- ۱۸ دیودها مشابه، از نوع سیلیکن و دارای $I_s = 10 nA$ می‌باشند.

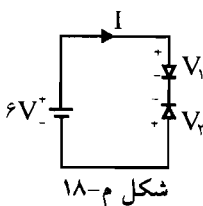
الف) در صورتی که ولتاژ شکست دیودها برابر 10 ولت باشد، جریان I مدار و ولتاژ دو سر هر دیود

را به دست آورید.

ب) با فرض اینکه ولتاژ شکست دیودها برابر 5 ولت باشد جریان I مدار و ولتاژ دو سر هر دیود

چقدر خواهد بود؟

✓ (۱۰) اه حل:



الف) چون دو دیود سری هستند پس جریان آنها برابر و ولتاژ آنها متفاوت است.

$$I = I_s = 10 nA$$

$$I_D = I_s (e^{\frac{V_1}{V_T}} - 1) \rightarrow 10 = 10 (e^{\frac{V_1}{0.026}} - 1) \rightarrow 1 = e^{\frac{V_1}{0.026}} - 1 \rightarrow$$

$$2 = e^{\frac{V_1}{\Delta T}} \rightarrow \frac{V_1}{\Delta T} = \ln 2 \rightarrow V_1 = \Delta T \ln 2 = 36 \text{ mV}$$

$$V_2 = 6 \text{ V} - 0.036 \text{ V} = 5.964 \text{ V}$$

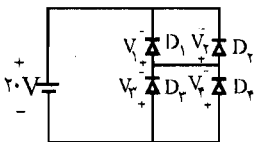
$$V_2 = 5 \text{ V} \rightarrow V_1 = 6 - 5 = 1 \text{ V}$$

(ب)

$$I = I_1 = 10 \text{ nA} \left(e^{\frac{6 \text{ V} - 5 \text{ V}}{\Delta T}} - 1 \right) = 2/24 \text{ A}$$

۱۹ - مدار شکل م - ۱۹ را در نظر بگیرید. با فرض $I_{S1} = I_{S2} = 15 \text{ nA}$ و $I_{S3} = 2I_{S2} = 40 \text{ nA}$ ولتاژها و جریان‌های دیودها را به دست آورید.

راه حل:



شکل م-۱۹

با توجه به فرض مسئله $I_{S3} = 2I_{S2}$ با برابر بودن ولتاژها داریم:

$$I_1 = I_2 = 15 \text{ nA} \leftarrow I_{S1} = I_{S2}$$

$$I_4 = 2I_3$$

$$\text{KCL: } \begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 + I_4 = 15 + 15 = 30 \text{ nA} \\ 2I_3 = I_4 \end{cases} \Rightarrow I_3 + 2I_3 = 30 \text{ nA} \rightarrow I_3 = 10 \text{ nA}$$

$$\rightarrow I_4 = 2I_3 = 2 \times 10 \text{ nA} = 20 \text{ nA}$$

$$\rightarrow \begin{cases} I_1 = I_2 = 15 \text{ nA} \\ I_3 = 10 \text{ nA} \\ I_4 = 20 \text{ nA} \end{cases}$$

برای به دست آوردن ولتاژها:

دیودهای D_1 و D_2 موازی هستند پس ولتاژها برابر دارند و همچنین دیودهای D_3 و D_4 موازی هستند پس آنها نیز ولتاژ برابر دارند.

$$I_{D3} = I_{S3} \left(e^{\frac{V_3'}{\Delta T}} - 1 \right) \rightarrow I_{D3} = -20 = 40 \left(e^{\frac{V_3'}{\Delta T}} - 1 \right) \rightarrow$$

$$V_3' = 36 \text{ mV} \rightarrow V_3 = V_4 = -36 \text{ mV}$$

$$V_1 = V_2 = 2.0 \text{ V} + 0.036 \text{ V} = 2.036 \text{ V}$$

۲۰- در دیود ژرمانیم پدیده شکست زنر در $E_r = 2 \times 10^7$ ولت بر متر اتفاق می افتد. نشان دهید $V_z = 50/93 \rho_p$ است، که در آن ρ_p مقاومت ویژه بلور ژرمانیم نوع P می باشد. فرض کنید $N_A \ll N_D$ است.

☑ (اه هل):

با توجه به صورت مسأله ۲۲ داریم:

$$V_z = \frac{\epsilon E_z^2}{2qN_D}$$

$$\delta_p = q\mu_p N_D$$

و همچنین رابطه مقابل را داریم:

$$\rightarrow qN_D = \frac{\delta_p}{\mu_p} \quad \delta_p = \frac{1}{\rho_p}$$

پس با توجه به روابط فوق داریم:

$$\mu_p = 1800 \text{ ژرمانیم}$$

$$\epsilon_r = 16 \text{ برای دیود ژرمانیم}$$

$$V_z = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 E_z^2}{2qN_D} \rightarrow V_z = \frac{16 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (2 \times 10^7 \times 10^{-2})^2 \times 1800 \rho_p}{2}$$

$$\rightarrow V_z = 50/976 \rho_p$$

چون با توجه به جدول صفحه (۱۶) ρ_p بر حسب $(\Omega\text{-cm})$ است ϵ_z را بر حسب ولت بر سانتیمتر می نویسیم.

۲۱- در مدار شکل م- ۲۱ دیودها مشابه و از جنس ژرمانیم با ولتاژ شکست بیشتر از ۵ ولت هستند.

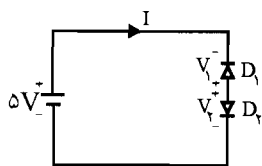
الف) ولتاژ دوسر هر دیوار را در دمای معمولی به دست آورید.

ب) چنانچه ولتاژ شکست دیودها برابر $4/9$ ولت و جریان اشباع معکوس $5\mu A$ باشد، جریان مدار را به دست آورید.

ج) با فرض ولتاژ شکست ۲ ولتاژ، جریان اشباع معکوس $5\mu A$ و اضافه کردن مقاومت 100 اهم

به صورت سری در مدار، جریان مدار را به دست آورید.

☑ (اه هل):



شکل م- ۲۱

(الف)

$$I_V = I_s \rightarrow I_s = I_s (e^{\frac{V_V}{\phi}} - 1) \rightarrow e^{\frac{V_V}{\phi}} = 2 \rightarrow V_V = \phi \times \ln 2 = 36 \text{ mV}$$

$$V_1 = V_V - \phi^V = 36 \times 10^{-2} - \phi = -4/964 \text{ V}$$

$$I = I_s (e^{\frac{V_V}{\phi}} - 1) = 5 \mu\text{A} \left(e^{\frac{(\phi^V - 4/9^V) \times 10^{-2}}{\phi}} - 1 \right) = 29/2 \mu\text{A} \quad (\text{ب})$$

$$V_1 = \phi^V$$

$$(1) \quad \phi^V = V_D + 0/1 I_D, \quad I_D = 5 \times 10^{-2} (e^{\frac{V_D}{\phi}} - 1) \quad (2) \quad (\text{ج})$$

$$(1) \quad \text{از رابطه (a)} \quad V_D = (\phi - 0/1 I_D) \times 10^{-2} \text{ mV} \quad (\text{a})$$

حال رابطه (a) را در رابطه (2) قرار می‌دهیم پس داریم:

22 - ثابت کنید که در یک دیود زنر که در آن $N_A \gg N_D$ است، ولتاژ زنر (V_V) از رابطه زیر به دست

می‌آید:

$$V_V = \frac{\epsilon E_z^V}{2q N_D}$$

که در آن E_z میدان لازم برای شکست زنر است.

📖 (اِهْنَمَیْی): از رابطه V بر حسب W و نیز روابط E استفاده کنید.

☑ (اِهْل): در فصل اول روابط زیر را داشتیم:

$$E_z = \frac{-q N_D x_N}{\epsilon} \rightarrow x_N^V = \frac{\epsilon^2 E_z^V}{q^2 N_D^2} \quad (1)$$

رابطه (1 - 23) صفحه 22

رابطه (1 - 28) صفحه 22

$$x_N = \left[\frac{2\epsilon \cdot V_0}{qND \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{مسئله فرض } N_A \gg N_D \rightarrow \frac{N_D}{N_A} = 0$$

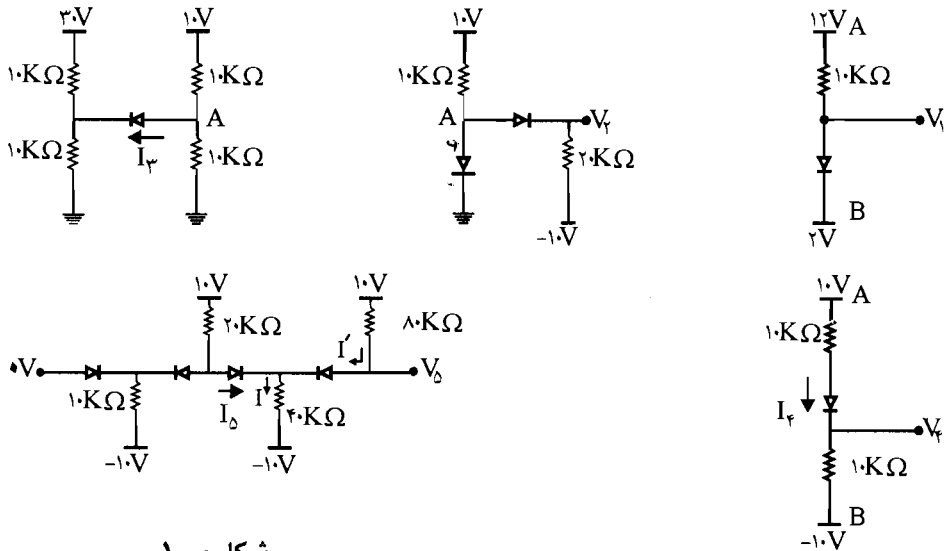
$$\rightarrow x_N = \left(\frac{2\epsilon \cdot V_0}{qND} \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow x_N^V = \frac{2\epsilon V_0}{qND} \quad (2)$$

$$\rightarrow \begin{cases} x_N^V = \frac{\epsilon^2 E_z^V}{q^2 N_D^2} & (1) \\ x_N^V = \frac{2\epsilon V_0}{qND} & (2) \end{cases} \rightarrow \frac{\epsilon^2 E_z^V}{q^2 N_D^2} = \frac{2\epsilon V_0}{qND}$$

$$\frac{\epsilon E_z^V}{qND} = 2V_0 \rightarrow V_0 = \frac{\epsilon E_z^V}{2qND}$$

فصل ۳ مدارهای دیودی

۱- در مدارهای دیودی شکل م- ۱ ولتاژها و جریان‌های نشان داده شده را محاسبه کنید. دیودها را ایده‌آل در نظر بگیرید.



شکل م- ۱

☑ راه حل:

در شکل (۱) چون $V_A > V_B$ است پس دیود روشن بوده و هدایت می‌کند پس داریم: $V_1 = V = 2V$

در شکل (۲) چون $V_A > 0$ است پس دیود روشن بوده و $V_A = 0V$ می‌باشد. و چون $V_A > -10V$ است پس دیود (۲) نیز روشن بوده و ولتاژ آن هم صفر ولت می‌باشد
 $V_A = V_2 = 0V$
 در شکل (۳): چون $V_A < V_B$ می‌باشد پس دیود قطع است و هیچ جریانی از آن نمی‌گذرد پس $I_3 = 0$ می‌باشد.

در شکل (۴): چون $V_A > V_4$ می‌باشد پس دیود روشن بوده و هدایت می‌کند پس جریان آن از KVL به دست می‌آید.

$$-10V + 10I_6 + 10I_4 - 10 = 0 \rightarrow 20K\Omega I_6 = 20V \rightarrow I_4 = 1mA$$

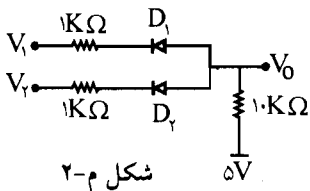
$$V_4 = 10I_4 - 10 = 10(1) - 10 = 0V$$

در شکل (۵): هر چهار دیود هدایت می‌کنند پس داریم:

$$V_5 = 0V$$

$$I_5 = I - I' \quad \begin{cases} I = \frac{10}{40} mA \\ I' = \frac{10}{80} mA \end{cases} \rightarrow I_5 = \frac{10}{40} - \frac{10}{80} = \frac{10}{80} = \frac{1}{8} = 0.125 mA$$

۲- در مدار شکل م-۲ دیودها ایده‌آل هستند. مطلوب است ولتاژ خروجی V_0 برای حالت‌های زیر:



شکل م-۲

$$V_1 = V_2 = 5V \quad \text{الف)}$$

$$V_1 = 5V \text{ و } V_2 = 0V \quad \text{ب)}$$

$$V_1 = V_2 = 0V \quad \text{ج)}$$

☑ راه حل:

الف) با فرض اینکه هر دو دیود در حالت وصل قرار دارند داریم:

$$KCL: \frac{V_0 - 5}{10K\Omega} = \frac{V_0 - V_1}{1K\Omega} + \frac{V_0 - V_2}{1K\Omega} \rightarrow$$

$$\frac{V_0 - 5}{10K\Omega} = \frac{V_0 - 5V}{1K\Omega} + \frac{V_0 - 5}{1K\Omega} = 2V_0 - 10V \rightarrow V_0 - 5V = 20V_0 - 100V$$

$$\rightarrow 190V_0 = 95V \rightarrow V_0 = \frac{95}{19} = 5V$$

(ب) با فرض اینکه D_1 خاموش و D_2 روشن باشد داریم:

$$V_o = 5 \times \frac{1}{10+1} = \frac{5}{11} = 0.45V$$

که با این ولتاژ قطع بودن D_1 محقق است. چون ولتاژ آند از کاتد کوچکتر می باشد و وصل بودن D_2 نیز

$$I_{D_2} = \frac{5-0}{11} = \frac{5}{11} > 0 \quad \text{محقق است چون}$$

(ج) با فرض وصل بودن هر دو داریم:

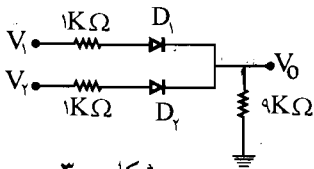
$$\frac{V_o - 5}{10} + \frac{V_o - 0}{1} + \frac{V_o - 0}{1} = 0 \Rightarrow V_o = \frac{5}{19}$$

با این ولتاژ به دست آمده وصل بودن هر دو دیود ثابت می شود.

۳- در مدار شکل م-۳، برای دیودها $V_D(ON) = 0.7V$ است. ولتاژ خروجی را به ازای ولتاژهای ورودی داده شده به دست آورید و وضعیت قطع یا وصل هر یک از دیودها را مشخص کنید.

$$V_1 = 10V, \quad V_2 = 5V \quad (\text{ج}) \quad V_1 = 10V, \quad V_2 = 0V \quad (\text{الف})$$

$$V_1 = 5V, \quad V_2 = 5V \quad (\text{د}) \quad V_1 = 5V, \quad V_2 = 0V \quad (\text{ب})$$



شکل م-۳

☑ (۱۰) راه حل:

(الف) در این حالت D_1 به صورت مستقیم بایاس شده و دیود D_2 به صورت معکوس بایاس شده پس داریم: دیود D_1 روشن و دیود D_2 قطع خواهد بود:

$$\frac{V_o}{9K\Omega} = \frac{10 - V_o - 0.7}{1K\Omega} \rightarrow V_o = 9.0 - 9V_o - 6/3$$

$$10V_D = 83/7V \rightarrow V_o = 8/37V$$

(ب) در این حالت نیز D_1 روشن و D_2 خاموش می باشد پس داریم:

$$\frac{V_o}{9K\Omega} = \frac{5 - V_o - 0.7}{1K\Omega} \rightarrow V_o = 4.5 - 9V_o - 6/3$$

$$\rightarrow 10V_o = 38/7V \rightarrow V_o = 3/87V$$

ج) در این حالت هر دو دیود روشن می‌باشند:

$$\frac{V_1 - 0/V}{1K\Omega} + \frac{V_2 - 0/V}{1K\Omega} = V_o \left(\frac{1}{9} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1} \right)$$

$$\rightarrow V_o (1 + 9 + 9) = 9(V_1 - 0/V) + 9(V_2 - 0/V) \rightarrow V_o = \frac{9(10 - 0/V) + 9(5 - 0/V)}{19}$$

$$\rightarrow V_o = 6/44$$

با این V_o به دست آمده مشخص می‌شود که D_2 خاموش می‌باشد و D_1 روشن می‌باشد پس داریم

$$V_o = (V_1 - 0/V) \times \frac{9}{9+1} = 1/37V$$

د) با فرض وصل بودن هر دو دیود داریم:

$$KCL: \frac{V_1 - V_o - 0/V}{1} + \frac{V_2 - V_o - 0/V}{1} = \frac{V_o}{9}$$

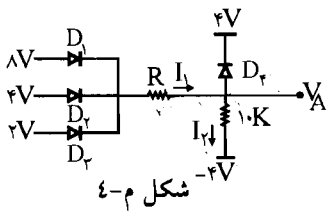
$$5 - V_o - 0/V + 5 - V_o = \frac{V_o}{9} \rightarrow 10/6 - 2V_o = \frac{V_o}{9} \rightarrow V_o = 4/0.7V$$

با این ولتاژ به دست آمده مشخص می‌شود که هر دو دیود روشن می‌باشد پس فرض ما درست است.

۴- در مدار شکل م-۴ دیودها را ایده‌آل فرض کنید.

الف) مقاومت R را طوری تعیین کنید که V_A برابر $2V$ شود. در این صورت I_1 و I_2 چقدر خواهد بود؟

ب) به ازای $R = 2K\Omega$ مقادیر V_A ، I_1 و I_2 را تعیین کنید.



راه حل:

$$V_A = 2V \rightarrow$$

الف) D_2 قطع می‌باشد و دیودهای دیگر هدایت می‌کنند.

$$KCL: \frac{8 - V_A}{R} + \frac{4 - V_A}{R} + \frac{2 - V_A}{R} = \frac{V_A + 4}{10} \quad \text{از طرفی } V_A = 2V$$

$$\frac{6}{R} + \frac{2}{R} + 0 = \frac{6}{10} = 0/6 \rightarrow \frac{8}{R} = 0/6 \rightarrow R = \frac{80}{6} = \frac{40}{3} = 13/33 \Omega$$

و چون داریم دیود D_4 قطع می‌باشد پس I_1 و I_2 برابرند پس داریم:

$$I_1 = I_2 = \frac{V_A + 4}{10} = \frac{4 + 4}{10} = 1/74 \text{ mA}$$

(ب) چون نمی‌دانیم مقدار V_A چند است پس ابتدا فرض می‌کنیم D_4 قطع است پس داریم:

$$\text{KCL: } \frac{8 - V_A}{2} + \frac{4 - V_A}{2} + \frac{2 - V_A}{2} = \frac{V_A + 4}{10} \rightarrow \frac{14 - 3V_A}{2} = \frac{V_A + 4}{10}$$

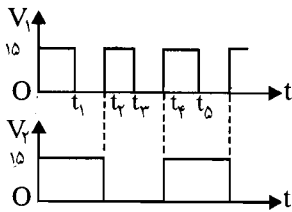
$$140 - 30V_A = 2V_A + 8 \rightarrow 32V_A = 132 \rightarrow V_A = 4/125 \text{ V}$$

پس فرض قطع بودن D_4 اشتباه است پس مسأله را با فرض روشن بودن D_4 حل می‌کنیم در این حالت V_A برابر 4 V می‌باشد.

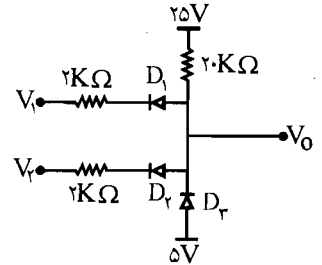
$$\text{پس } I_2 = \frac{4 + 4}{10} = 0/8 \text{ mA}$$

$$\text{پس } I_1 = \frac{8 - V_A}{R} + \frac{4 - V_A}{R} + \frac{2 - V_A}{R} = \frac{8 - 4}{2} + \frac{4 - 4}{2} + \frac{2 - 4}{2} = 2 + 0 - 1 = 1 \text{ mA}$$

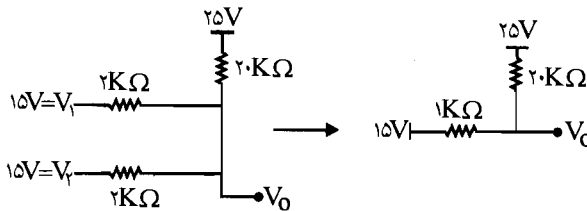
۵- در مدار شکل م- ۵ دیودها ایده‌آل هستند. با توجه به شکل موج ولتاژهای V_1 و V_2 ، شکل موج ولتاژ خروجی را رسم کنید.



شکل م- ۵



در زمان $0 < t < t_1$ داریم دیود D_3 قطع و دیودهای D_1 و D_2 روشن هستند پس مدار معادل به صورت زیر خواهد بود: (دیودها ایده‌آل)



$$V_o = 15 + \frac{(25 - 15)}{20 + 1} = 15/48 \text{ V}$$

در زمان $t_1 < t < t_2$: هر سه دیود هدایت می‌کنند پس داریم $V_o = 5V$

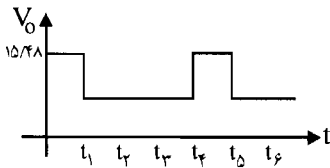
در زمان $t_2 < t < t_3$: هر سه دیود هدایت می‌کنند پس داریم $V_o = 5V$

در زمان $t_3 < t < t_4$: هر سه دیود هدایت می‌کنند پس داریم $V_o = 5V$

در زمان $t_4 < t < t_5$: باز دیود D_3 قطع و دیود D_1 و D_2 روشن هستند و همانند حالت اول می‌باشد پس

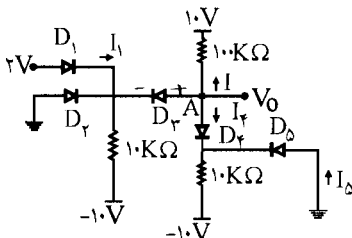
$$V_o = 15/48 r$$

پس مدار معادل V_o به صورت زیر خواهد بود:



۶- در مدار شکل م- ۶، با فرض ایده‌آل بودن همه دیودها، ولتاژ V_o و جریان‌های I_1 و I_5 را تعیین

کنید.



شکل م- ۶

☑ (راه حل):

D_1 : ON D_2 : OFF D_3 : OFF D_4 : ON D_5 : ON

با توجه به مدار داریم:

$$I_1 = \frac{2V - (-10V)}{10K\Omega} = 1/2 \text{ mA}$$

و چون D_4 و D_5 روشن می‌باشند پس $V_o = 0V$ می‌باشد.

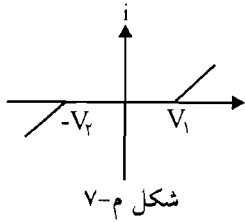
$$\text{A در نقطه KCL: } \frac{V_o - 10V}{100K\Omega} - I_5 + \frac{V_o - (-10V)}{10K\Omega} = 0$$

$$V_o = 0V \rightarrow \frac{-10}{100} - I_5 + \frac{10}{10} = 0 \rightarrow I_5 = 1 - 0/1 = 0/9 \text{ mA}$$

۷- منحنی مشخصه ولتاژ - جریان در شکل م-۷ را در نظر بگیرید:

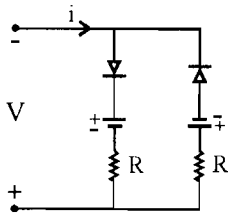
الف) با استفاده از دیودهای ایده‌آل، منابع و مقاومت مداری طراحی کنید که دارای مشخصه مزبور باشد.

ب) طرح خود را به نحوی اصلاح کنید که دو شیب موجود در مشخص متفاوت باشند.



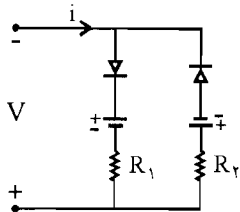
✓ (۱۰) حل:

الف) با فرض اینکه دو شیب برابر باشند.



ب) با فرض اینکه دو شیب برابر نباشند مدار همان مقدار قبلی می‌باشد ولی باید R ها متفاوت باشند

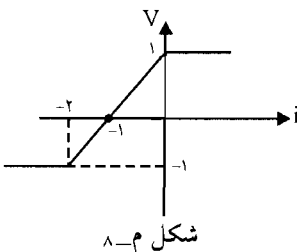
یعنی $R_1 \neq R_2$



$R_1 \neq R_2$

۸- با استفاده از کمترین تعداد مقاومت، منبع ولتاژ و دیود ایده‌آل مداری با مشخصه جریان - ولتاژ

مطابق شکل م-۸ طراحی کنید.



☑ راه حل:

با توجه به شکل م - ۸ داریم:

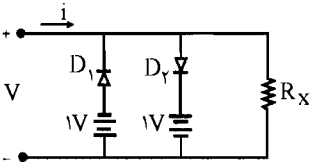
$$i > 0 \rightarrow V = 1V$$

V مقدار ثابت می‌باشد:

$$i > -2 \rightarrow V = -1V$$

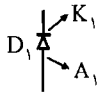
V مقدار ثابت می‌باشد:

بنابراین مدار باید دارای چنین فرمی باشد:



در این مدار داریم:

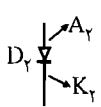
اگر D_1 و D_2 هر دو خاموش باشند: $V = R_x \times i$ و شرط خاموش بودن D_1 به صورت زیر می‌باشد:



شرط خاموش بودن D_1 : $V_{A_1} < V_{K_1}$ داریم و $V_{A_1} = -1V$ و $V_{K_1} = R_x i$

$$V_{A_1} < V_{K_1} \Rightarrow -1V < R_x \times i \rightarrow i > \frac{-1}{R_x}$$

شرط خاموش بودن D_2 :



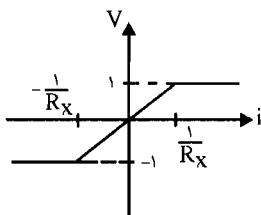
$$V_{A_2} < V_{K_2}$$

از طرفی داریم: $V_{A_2} = R_x i$ ، $V_{K_2} = 1V$

$$V_{A_2} < V_{K_2} \Rightarrow R_x i < 1V \rightarrow i < \frac{1}{R_x}$$

یعنی در $\frac{1}{R_x} < i < \frac{1}{R_x}$ هر دو دیود خاموش می‌باشند و به ازای $i < -\frac{1}{R_x}$ دیود D_1 روشن می‌شود و دیود D_2 همچنان خاموش می‌ماند و در این حالت $V = -1V$ می‌باشد.

به ازای $i > \frac{1}{R_x}$ دیود D_2 روشن می‌شود و دیود D_1 همچنان خاموش می‌ماند و در این حالت $V = 1V$ می‌باشد.

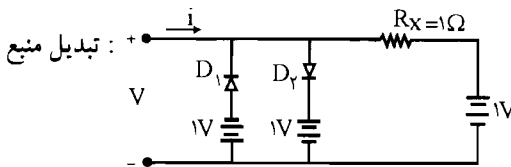
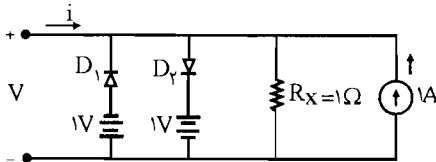


$$\begin{cases} -\frac{1}{R_x} < i < \frac{1}{R_x} \Rightarrow V = R_x \times i \\ \frac{1}{R_x} < i \Rightarrow V = 1V \\ i < -\frac{1}{R_x} \Rightarrow V = -1V \end{cases}$$

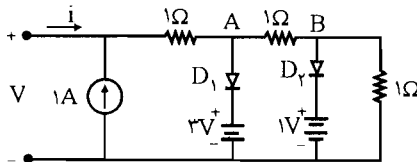
اگر این مشخصه رسم شده را با مشخصه داده شده مقایسه کنیم متوجه می‌شویم که باید در مشخصه داده

شده تغییر محور دهیم یعنی i را به $i-1$ تبدیل کنیم یعنی کافی است که $\frac{1}{R_x} = 1$ انتخاب شود یعنی $R_x = 1\Omega$ خواهد شد و یک تغییر i به $i-1$ نیز انجام گیرد یعنی یک منبع جریان یک آمپر در گره ورودی

اضافه شود سپس مدار به صورت فرم زیر می باشد:



۹- در مدار شکل م-۹ دیودها ایده آل هستند. مشخصه i بر حسب V را در این مدار به دست آورده و رسم کنید.



شکل م-۹

☑ راه حل:

فرض می کنیم هر دو دیود روشن باشند پس داریم: $V_A = 3V$ $V_B = 1V$ $D_1, D_2: ON \Rightarrow$

$$I_{D_2} = \frac{V_A - V_B}{1\Omega} - \frac{V_B}{1\Omega} = \frac{3-1}{1} - \frac{1}{1} = 1A$$

$$I_{D_1} = \frac{V - V_A}{1\Omega} - \frac{V_A - V_B}{1\Omega} = \frac{V-3}{1} - \frac{3-1}{1} = V-5 > 0 \rightarrow V > 5$$

با شرط $V > 5$ هر دو دیود روشن می باشند و داریم:

$$KVL: V = (i+1) \times 1\Omega + 3V = i+4$$

$$V > 5 \Rightarrow \begin{cases} D_1: ON \\ D_2: ON \end{cases}, \quad V = i+4$$

(1) برای اینکه دیود D_2 خاموش شود باید رابطه زیر را داشته باشیم:

$$V_B < 1V \Rightarrow V \times \frac{1}{3} < 1V \rightarrow V < 3V$$

(II) برای اینکه دیود D_1 خاموش باشد باید رابطه زیر را داشته باشیم:

$$V_A < 3^V \Rightarrow V \times \frac{2}{3} < 3^V \Rightarrow V < 4/5^V$$

که قسمت مشترک دو شرط (I) و (II)، $V < 3$ می باشد پس داریم:

$$V < 3^V \Rightarrow \begin{cases} D_1: \text{Off} \\ D_2: \text{Off} \end{cases}, V = 2i + 3$$

اگر D_1 خاموش و D_2 روشن باشد داریم:

$$V_A = (V-1) \times \frac{1}{2} + 1, \quad V_B = 1^V$$

$$ID_2 = \frac{V-1}{2} - 1 = \frac{V-3}{2} > 0 \rightarrow V > 3$$

شرط روشن بودن D_2 :

$$V_A < 3 \Rightarrow V \times \frac{1}{2} = \frac{1}{2} < 3 \rightarrow V < 5^V$$

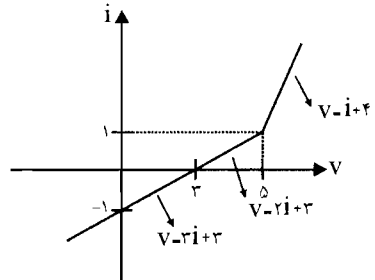
شرط خاموش بودن D_1 :

که قسمت مشترک $3 < V < 5$ می باشد برای اینکه D_1 خاموش و D_2 روشن باشد.

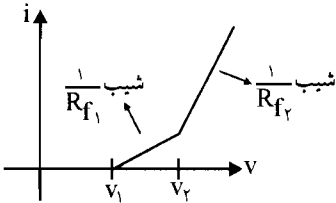
$$V = (i+1) \times 2 + 1$$

$$= 2i + 3$$

$$3 < V < 5 \Rightarrow \begin{cases} D_1: \text{OFF} \\ D_2: \text{ON} \end{cases}, V = 2i + 3$$



۱۰ - منحنی مشخصه یک دیود را مطابق شکل م - ۱۰ مدل سازی کنید. مدار معادل این مدل را با استفاده از دیودهای ایده آل، مقاومت های و منابع طرح کنید. مقادیر قطعه های به کار رفته در مدار را بر حسب پارامترهای مدل به دست آورید.



شکل م-۱۰

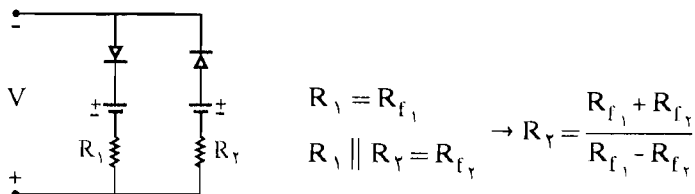
☑ راه حل:

$$V \leq V_1 \rightarrow \text{هر دو دیود قطع}$$

با توجه به شکل م - ۱۰ داریم:

$$V_1 \leq V \leq V_2 \rightarrow D_2 \text{ وصل و } D_1 \text{ قطع}$$

$$V \geq V_2 \rightarrow \text{هر دو دیود روشن}$$

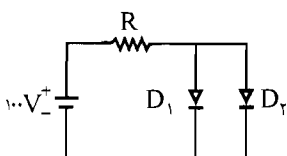


۱۱- در مدار شکل م- ۱۱ دیودها دارای مدل خطی پاره‌ای به صورت زیر هستند:

$$D_1 = V_{\gamma_1} = 0.7, \quad R_f = 20 \Omega$$

$$D_2 = V_{\gamma_2} = 0.6, \quad R_f = 15 \Omega$$

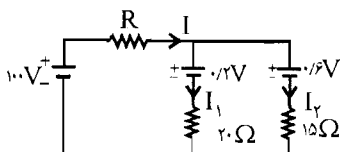
به ازای $R = 10 \text{ K}\Omega$ و $R = 1 \text{ K}\Omega$ جریانی دیودها را به دست آورید.



شکل م- ۱۱

راه حل:

هر دو دیود به صورت مستقیم بایاس شده‌اند پس مدار معادل به صورت شکل زیر می‌باشد.



$$\begin{cases} VD_1 = 0.7 + 0.2 I_1 \\ VD_2 = 0.6 + 0.15 I_2 \end{cases}$$

از طرفی: $VD_1 = VD_2 \rightarrow 0.7 + 0.2 I_1 = 0.6 + 0.15 I_2$

$$\rightarrow 0.2 I_1 = 0.4 + 0.15 I_2 \rightarrow I_1 = 20 + 0.75 I_2$$

$$\text{KCL: } I = I_1 + I_2 = I_2 + 20 + 0.75 I_2 = 20 + 1.75 I_2$$

$$\text{KVL: } 100 = RI + 0.6 + 0.15 I_2 = R(20 + 1.75 I_2) + 0.6 + 0.15 I_2$$

$$R = 1 \text{ K}\Omega \rightarrow 100 = 1 \text{ K}\Omega (20 + 1.75 I_2) + 0.6 + 0.15 I_2$$

$$\rightarrow 100 = 20000 + 1750 I_2 + 0.6 + 0.15 I_2 \rightarrow 79999.4 = 1765 I_2$$

$$\rightarrow I_2 = \frac{79999.4}{1765} = 45 \text{ mA} \rightarrow I_1 = 20 + 0.75 I_2 = 53.75 \text{ mA}$$

$$R = 10 \text{ K}\Omega \rightarrow 100 = 10(20 + 1.75 I_2) + 0.6 + 0.15 I_2 \rightarrow$$

$$100 = 20006 + 1752 I_2 \rightarrow I_2 = -5 \text{ mA}$$

یعنی در این حالت دیود D_2 هدایت نمی‌کند و اگر فرض کنیم دیود D_1 هدایت می‌کند داریم:

$$I = I_1 = \frac{100 - 0/2}{10 + 0/0.2} = 9/96 \text{ mA}$$

۱۲- در مدار شکل م- ۱۲ معادله ولتاژ - جریان دیود آن به صورت زیر است:

$$i_D = 10^{-6} (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1)$$

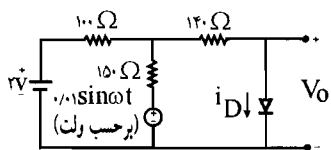
(i_D بر حسب آمپر و V_D بر حسب ولت) مطلوبست محاسبه مقادیر زیر:

الف) مدار معادل تونن دو سر دیود

ب) جریان ثابت گذرنده از دیود

ج) مقاومت دینامیکی دیود (r_d)

د) ولتاژ خروجی V_o

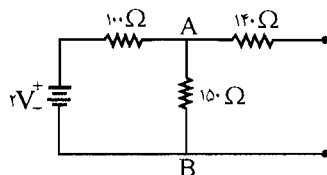


شکل م- ۱۲

☑ راه حل:

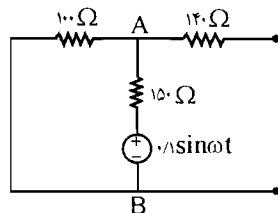
الف) برای به دست آوردن مدار معادل تونن دو سر دیود در شکل dc باید منبع ac را از بین ببریم:

$$\begin{cases} R_{th} = 150 \Omega \parallel 100 \Omega + 140 \Omega = 200 \Omega \\ V_{th} = 2 \times \frac{150}{150 + 100} = 1/2 \text{ V} = V_{AB} \end{cases}$$

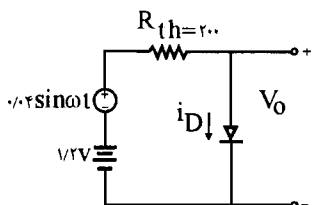


و تونن دو سر دیود در شکل ac با بی‌اثر کردن منبع dc به دست می‌آید.

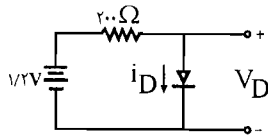
$$\begin{cases} R_{th} = 150 \Omega \parallel 100 \Omega + 140 \Omega = 200 \Omega \\ V_{th} = 100 \sin \omega t \times \frac{100}{100 + 150} = 0.4 \sin \omega t \end{cases}$$



پس مدار معادل تونن به صورت زیر می‌باشد:



ب) برای به دست آوردن جریان DC دیود منبع سینوسی در مدار معادل تونن اتصال کوتاه می‌شود:



$$V_D = 12V - 200 \times 10^{-3} i_D = 12V - 0.2 i_D$$

فرض مسئله $i_D = 10^{-6} (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1)$ از طرفی داریم

$$\Rightarrow i_D = 10^{-6} (e^{\frac{12 - 0.2 i_D}{26 \times 10^{-3}}} - 1) \times 10^3$$

$$\Rightarrow 10^3 i_D = \left[e^{\left(\frac{12 - 0.2 i_D}{26} \times 1000 \right)} - 1 \right]$$

از روش سعی و خطا استفاده می‌کنیم:

فرض $V_D = 0.2V \Rightarrow I_D = \frac{12 - V_D}{0.2} = \frac{12 - 0.2}{0.2} = 5mA$

$$\rightarrow 10^3 \times 5 = e^{\left(\frac{12 - 0.2 \times 5}{26} \right) \times 1000} - 1 \Rightarrow 5000 \neq 2191/4$$

پس طرف دوم باید بزرگتر شوند لذا I_D را باید کوچکتر انتخاب کنیم:

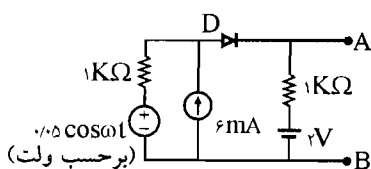
$$i_D = 4/9 mA \Rightarrow 4/9 \times 10^3 = e^{\left(\frac{12 - 4/9 \times 0.2}{26} \right) \times 1000} - 1 = 4728$$

پس $i_D = 4/9 mA$ را می‌پذیریم.

$$r_d = \frac{V_T}{i_D} = \frac{26 mV}{4/9 mA} = 5/3 \Omega \quad \text{(ج)}$$

$$V_o = V_D = 12 - 0.2 i_D = 12 - 0.2 \times 4/9 = 0.22V \quad \text{(د)}$$

۱۳- در مدار شکل م- ۱۳ دیودها دارای $I_s = 1nA$ مطلوبست محاسبه مقادیر زیر:



شکل م- ۱۳

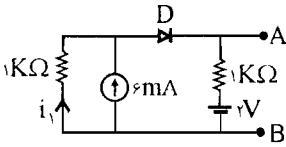
الف) نقطه کار DC دیود *

ب) مقاومت دینامیکی دیود

ج) $V_{AB}(t)$

راه حل:

الف) برای تعیین نقطه کار DC دیود مدار را تحلیل DC می‌کنیم:



$$\text{KVL: } 1\text{k}\Omega \times i_1 + V_D + i_D \times 1\text{k}\Omega + 2 = 0 \rightarrow i_1 + V_D + i_D + 2 = 0$$

$$\text{KCL: } i_1 = i_D - 6\text{ mA}$$

$$\rightarrow \begin{cases} V_D + 2i_D = 4 \\ i_D = I_s e^{\eta V_D / V_T} \end{cases} \rightarrow V_D + 2I_s e^{\eta V_D / V_T} = 4 \rightarrow V_D + 2 \times 1\text{nA} e^{\frac{V_D}{52}} = 4$$

$$\frac{V_D}{52} = x \rightarrow V_D = 52x \rightarrow 52x + 2 \times 10^{-6} e^x = 4$$

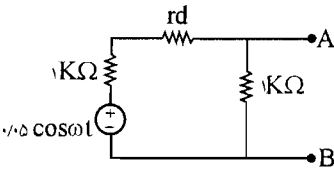
از حل این معادله مقادیر زیر به دست می‌آید $V_D = 0.74\text{ V}$ و $I_{DQ} = 1/6\text{ mA}$

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} = \frac{2 \times 26}{1/63} = 31\Omega \quad (\text{ب})$$

ج) تحلیل ac:

$$V_{AB}(t) = \frac{1000 \times 0.5}{1000 + 31 + 1000} \cos \omega t = 0.24 \cos \omega t$$

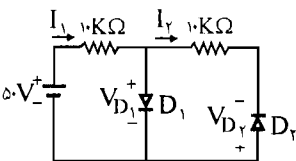
با استفاده از تقسیم ولتاژ داریم:



۱۴- در مدار شکل م- ۱۴، دیودها دارای $V_D = 0.7\text{ V}$ و $R_f = r_z = 50\Omega$ و ولتاژ شکست 25 V هستند. مطلوب است:

الف) V_{D1}, V_{D2}, I_1, I_2

ب) با تغییر جهت هر دو دیود، بند الف) را تکرار کنید.



شکل م- ۱۴

✓ (اه حل):

$$I_2 = 0, \quad I_1 = \frac{50 - 0/V}{10000 + 50} = 4/9 \text{ mA}$$

با فرض قطع بودن دیود D_2 داریم:

$$V_{D_1} = 50 \cdot I_1 + 0/V = 50 \times 4/9 \text{ mA} + 0/V = 0/945 \text{ V}$$

پس فرض قطع بودن دیود D_2 درست می باشد و D_2 به شکست نمی رود.

$$\rightarrow V_{D_2} = -V_{D_1} = -0/945 \text{ V}$$

(ب) وقتی جهت دیودها عوض می شود فرض می کنیم دیود D_1 قطع می باشد و با این فرض مسئله را حل

می کنیم.

$$I_1 = \frac{50 - 0/V}{20000 + 50} = 2/46 \text{ mA}$$

$$V_{D_1} = 50 - 10 \times 2/46 = 25/4$$

پس فرض قطع بودن D_1 اشتباه می باشد و دیود D_1 به شکست می رود.

$$\rightarrow V_{D_1} = 25/4$$

$$I_2 = \frac{25/4 - 0/V}{10000 + 50} = 2/45 \text{ mA}, \quad V_{D_2} = 2/45 \times 0/5 + 0/V = 0/822 \text{ V}$$

۱۵ - در مدار شکل م - ۱۵ معادله مشخصه دیود را به صورت زیر در نظر بگیرید.

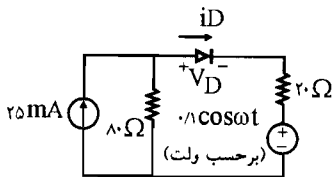
$$i_D = \begin{cases} 200 \cdot (V_D - 0/5)^2 & V_D \geq 0/5 \\ 0 & V_D \leq 0/5 \end{cases}$$

(i_D بر حسب mA و V_D بر حسب V) مطلوب است محاسبه مقادیر زیر:

الف) نقطه کار DC دیود.

ب) مقاومت دینامیکی دیود

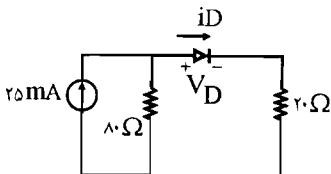
ج) $i_D(t)$



شکل م-۱۵

✓ (اه حل):

الف) برای به دست آوردن نقطه کار DC دیود مدار را تحلیل DC می کنیم:



$$\text{KVL: } 80(I_D - 25 \times 10^{-3}) + V_D + 20 I_D = 0$$

$$\rightarrow 100 I_D + V_D - 2 = 0 \quad (I)$$

طبق فرض مسئله داریم: (II) $I_D = 20 \cdot (V_D - 0.5)^2$ بر حسب mA می‌باشد.

با قرار دادن رابطه (II) در رابطه (I) داریم:

$$100 \times \left[0.2(V_D - 0.5)^2 \right] + V_D - 2 = 0$$

$$\rightarrow 20(V_D - 0.5)^2 + V_D - 2 = 0$$

$$20V_D^2 - 20V_D + 5 + V_D - 2 = 0 \rightarrow$$

$$20V_D^2 - 19V_D + 3 = 0$$



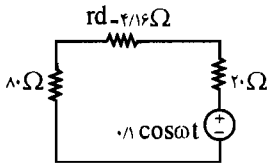
از حل این معادله $V_D = 0.75V$ به دست می‌آید. با قرار دادن این مقدار در رابطه (II) مقدار

$I_D = 12/5 mA$ به دست می‌آید.

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} = \frac{52}{12/5} = 4/16 \Omega$$

(ب)

(ج) تحلیل ac



$$i_D = \frac{-0.1 \cos \omega t}{80 + 20 + 4/16} = -0.96 \cos \omega t \text{ (A)}$$

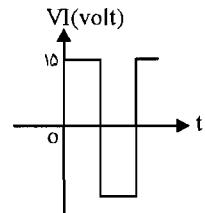
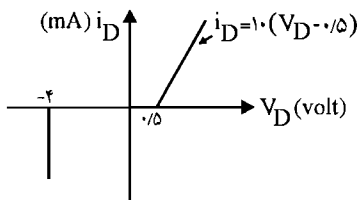
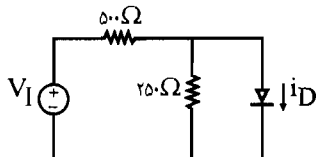
$$i(t) = i_D + I_D = -0.96 \cos \omega t + 12/5 \times 10^{-3} \text{ (A)}$$

۱۶ - شکل موج ورودی، مشخصه ولتاژ - جریان دیود و مدار شکل م - ۱۶ را در نظر بگیرید.

الف) مدار معادل تونن دو سر دیود را به دست آورید.

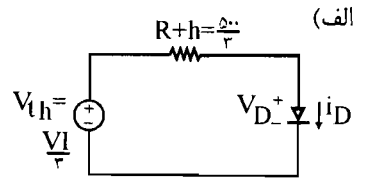
ب) $i_D(t)$ را رسم کنید.

ج) جریان متوسط دیود را به دست آورید.



☑ (اه حل):

$$\begin{cases} R_{th} = 250 \Omega \parallel 500 \Omega = \frac{500 \cdot 250}{750} \\ V_{th} = V_I \times \frac{250}{250 + 500} = V_I \times \frac{1}{3} = \frac{V_I}{3} \end{cases}$$



(ب) تغییرات V_I شامل دو قسمت می باشد

$$\begin{cases} V_I = 15V \\ V_I = -15V \end{cases}$$

$$V_I = 15V \Rightarrow \text{KVL: } V_D = V_{th} - R_{th} \times i_D = \frac{15}{3} - \frac{500}{3} i_D \Rightarrow i_D = \frac{15 - 3V_D}{500} \text{ A}$$

$$\Rightarrow i_D = 2(15 - 3V_D) \text{ mA}$$

این رابطه را در رابطه دیود (نمودار i_D بر حسب V_D) قرار می دهیم. طبق نمودار فرض می کنیم دیود در $V_D > 0.5V$ در ناحیه خطی کار می کند پس داریم:

$$i_D = 10(V_D - 0.5) = 2(15 - 3V_D) \Rightarrow V_D = 2/19 \text{ V}$$

مقدار به دست آمده در $V_D > 0.5V$ صدق می کند پس دیود در این ناحیه خطی کار می کند.
 $\Rightarrow V_I = 15V$, $V_D = 2/19V$

$$i_D = 10(V_D - 0.5) = 10(2/19 - 0.5) = 16/9 \text{ mA}$$

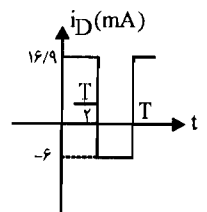
$$V = -15V \Rightarrow$$

با $V_I = -15V$ دیود در ناحیه شکست قرار دارد ($V_D = -4V$) در این حالت i_D باید منفی باشد پس i_D را حساب می کنیم:

$$i_D = \frac{V_{th} - V_D}{R_{th}} = \frac{-\frac{15}{3} - (-4)}{\frac{500}{3}} = \frac{-1}{\frac{500}{3}} = \frac{-3}{500} \text{ A} \Rightarrow i_D = -6 \text{ mA}$$

i_D کمتر از صفر یعنی منفی به دست آمد لذا دیود در ناحیه شکست قرار دارد پس داریم:

$$\Rightarrow V_I = -15V \text{ , } V_D = -4V \text{ , } i_D = -6 \text{ mA}$$

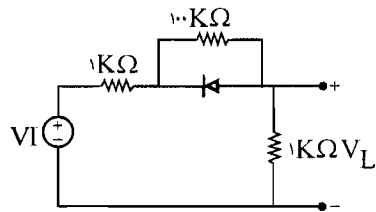
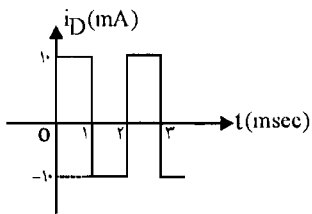


$$i_D = \frac{16/9 \times \frac{T}{2} - 6 \times \frac{T}{2}}{T} = \frac{16/9 - 6}{2} = \frac{10/9}{2} = 5/45 \text{ mA} \quad \text{ج}$$

۱۷- مدار شکل م-۱۷ را در نظر بگیرید.

الف) با فرض ایده‌آل بودن دیود ولتاژ $V_L(t)$ را به دست آورده و رسم کنید.

ب) بند الف) را با فرض ورودی مثلثی تکرار کنید (دامنه موج ورودی را ۱۰ ولت در نظر بگیرید).



شکل م-۱۷

✓ (راه حل):

الف) طبق نمودار V_I را بر حسب t داریم:

اگر $V_I = 10 \text{ V}$ باشد فرض می‌کنیم D خاموش باشد در این صورت داریم:

$$V_L = V_I \times \frac{1}{1 + 100 + 1} = V_I \times \frac{1}{102} = \frac{10}{102} = 0.1 \text{ V}$$

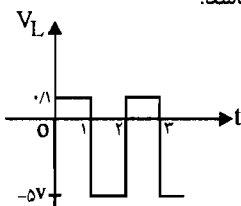
$$V_D = -V_I \times \frac{100}{100 + 1 + 1} = -10 \times \frac{100}{102} = -9.8 \text{ V}$$

چون V_D منفی می‌باشد و مقدارش برابر 9.8 V شد پس فرض قطع بودن دیود درست می‌باشد.

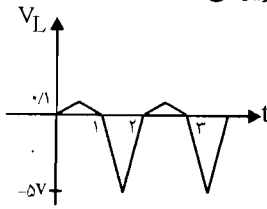
اگر $V_I = -10 \text{ V}$ باشد فرض می‌کنیم دیود روشن می‌باشد پس داریم:

$$V_L = -10 \times \frac{1}{1+1} = -5 \text{ V} \quad , \quad i_D = \frac{-(-10)}{2} = 5 \text{ mA}$$

پس روشن بودن دیود درست می‌باشد پس شکل موج V_L به صورت زیر می‌باشد.



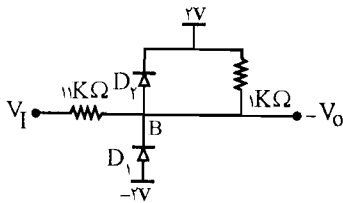
(ب) اگر ورودی موج مثلثی با دامنه 10° ولت باشد خروجی به صورت شکل زیر می باشد:



۱۸- در مدار شکل م- ۱۸ دیودها را ایده آل در نظر بگیرید.

(الف) مشخصه انتقالی را رسم کنید. ($-8V < V_I < 8V$)

(ب) پس از حذف مقاومت موازی D_2 مشخصه را مجدداً رسم نمایید.



شکل م- ۱۸

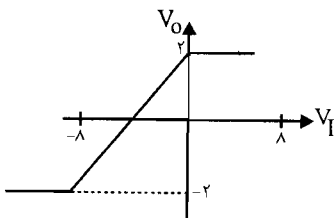
✓ (۵۱) اه حل:

$$V_B = 2 + \frac{1k\Omega \times V_I}{1k\Omega \times 1k\Omega} = 2 + 0.5V_I$$

(الف)

$$\begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{Off} \end{cases} : V_B < -2V \rightarrow 2 + 0.5V_I < -2V \rightarrow V_I < -8, V_O = -2V$$

$$\begin{cases} D_2: \text{ON} \\ D_1: \text{Off} \end{cases} : V_B > 2V \rightarrow 2 + 0.5V_I > 2 \rightarrow V_I > 0, V_O = 2V$$

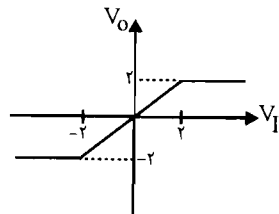


$$\begin{cases} D_1: \text{Off} \\ D_2: \text{Off} \end{cases} : -2 < V_B < 2 \rightarrow V_O = V_B = 2 + 0.5V_I$$

$$\begin{cases} D_1: \text{Off} \\ D_2: \text{ON} \end{cases} : V_I > 2 \rightarrow V_O = 2V$$

$$\begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{Off} \end{cases} : V_I < -2V \rightarrow V_O = -2V$$

$$\begin{cases} D_1: \text{off} \\ D_2: \text{Off} \end{cases} : -2V < V_I < 2V \rightarrow V_O = V_I$$

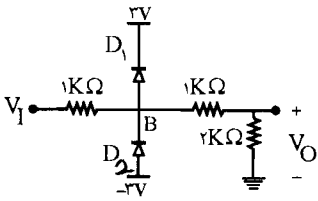


(ب)

۱۹- در مدار شکل م- ۱۹ دیودها را ایده آل فرض کنید.

(الف) مشخصه انتقالی را رسم کنید ($-۷V \leq V_I \leq ۷V$)

(ب) اگر جهت D_1 عوض شود مشخصه جدید را رسم نمایید.



شکل م- ۱۹

☑ راه حل:

(الف) ابتدا ولتاژ نقطه B را بر حسب V_I می نویسیم:

$$V_B = \frac{(1+2)k\Omega \times V_I}{(1+2)k\Omega + 1k\Omega} = \frac{3}{4} V_I$$

از تقسیم ولتاژ استفاده می کنیم:

$$V_o = \frac{2k\Omega \times V_B}{2k\Omega + 1k\Omega} = \frac{2}{3} V_B$$

برای اینکه دیود D_2 روشن باشد ولتاژ نقطه B از $-3V$ کمتر باشد:

$$D_2: ON ; V_B < -3 \rightarrow \frac{3}{4} V_I < -3 \rightarrow V_I < -4V$$

$$\rightarrow V_B = -3V \rightarrow V_o = \frac{2}{3} \times -3V = -2V$$

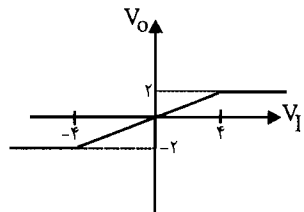
برای اینکه دیود D_1 روشن باشد ولتاژ نقطه B از $3V$ بیشتر باشد:

$$D_1: ON ; V_B > 3V \rightarrow \frac{3}{4} V_I > 3V \rightarrow V_I > 4V \rightarrow V_B = 3V \rightarrow$$

$$V_o = \frac{2}{3} \times 3 = 2V$$

و در حالتی که $-3V < V_B < 3V$ باشد هر دو دیود خاموش می باشند:

$$D_1, D_2: Off ; -3V < V_B < 3V \rightarrow -3V < \frac{3}{4} V_I < 3V \rightarrow V_o = \frac{2k\Omega \times V_I}{(2k\Omega + 1k\Omega + 1k\Omega)} = \frac{1}{2} V_I$$

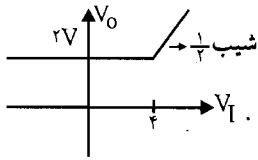


ب) وقتی جهت دیود D_1 عوض می‌شود برای اینکه دیود D_1 باشد باید $V_B < 3V$ باشد.

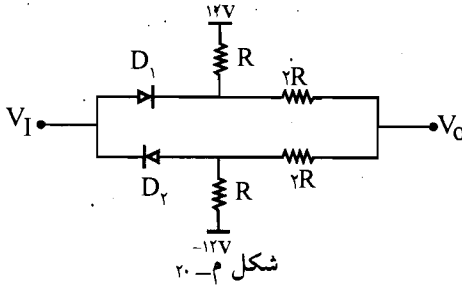
$$D_1: ON ; V_B < 3V \rightarrow V_I < 4V \rightarrow V_B = 3V \rightarrow V_o = 2V$$

و وقتی $V_B > 3V$ شود هر دو دیود خاموش می‌شوند پس داریم:

$$D_1, D_2: off ; V_B > 3V \rightarrow V_I > 4V \rightarrow V = \frac{1}{2} V_I$$

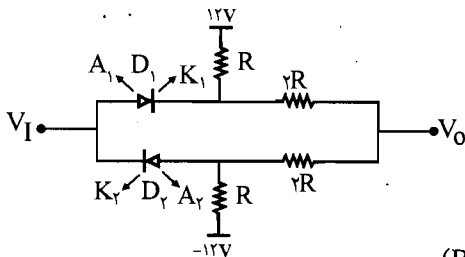


۲۰- در مدار شکل م- ۲۰ برای هر یک از دیودها داریم: $R_f = \infty$ و $R_r = 0$ و $V_\gamma = 0.7V$
مشخصه انتقالی مدار را به دست آورده و رسم کنید.



✓ راه حل:

ابتدا فرض می‌کنیم هر دو دیود خاموش باشند در این صورت با استفاده از جمع آثار خواهیم داشت:



$$V_o = 12 \times \frac{(R + 2R)}{(R + 2R + R + 2R)} + (-12) \times \frac{(R + 2R)}{(R + 2R + R + 2R)}$$

$$\rightarrow V_o = 0V$$

شرط خاموش بودن دیود D_1 به صورت مقابل می‌باشد:

$$V_{A_1} - V_{K_1} < 0.7V$$

$$\begin{cases} V_{K_1} = 12 \times \frac{(2R+R+2R)}{(R+2R+R+2R)} - 12 \times \frac{R}{(R+2R+R+2R)} \Rightarrow V_{K_1} = 12 \times \frac{5}{6} - 12 \times \frac{1}{6} \\ V_{A_1} = V_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{K_1} = 10 - 2 = 8V$$

$$\Rightarrow V_{A_1} - V_{K_1} < 0.7V \Rightarrow V_1 - 8 < 0.7V \Rightarrow V_1 < 8.7V$$

$$V_{A_2} - V_{K_2} < 0.7V \quad \text{شرط خاموش بودن دیود } D_2 \text{ به صورت مقابل می باشد:}$$

$$\begin{cases} V_{A_2} = -12 \times \frac{(R+2R+2R)}{(R+2R+R+2R)} + 12 \times \frac{R}{(R+2R+R+2R)} = -12 \times \frac{5}{6} + 12 \times \frac{1}{6} = -8V \\ V_{K_2} = V_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{A_2} - V_{K_2} < 0.7V \Rightarrow -8 - V_1 < 0.7V \rightarrow V_1 > -8.7V$$

پس در صورتی که $-8.7V < V_1 < 8.7V$ باشد هر دو دیود خاموش می باشند. و در این صورت V_0 نیز صفر می باشد:

$$-8.7V < V_1 < 8.7V \Rightarrow \begin{cases} D_1: \text{off} \\ D_2: \text{off} \end{cases}, \quad V_0 = 0V$$

و اگر $V_1 > 8.7V$ شود در این صورت دیود D_1 روشن می شود و دیود D_2 همچنان خاموش می باشد در این صورت V_0 را با استفاده از جمع آثار به دست می آوریم: (وقتی D_1 روشن می شود به جای آن در مدار یک منبع ولتاژ به اندازه $0.7V$ در نظر می گیریم.)

$$V_0 = (V_1 - 0.7V) \times \frac{(R+2R)}{(R+2R+R)} + (-12) \times \frac{2R}{(R+2R+2R)} = 0.6V_1 - 5/22$$

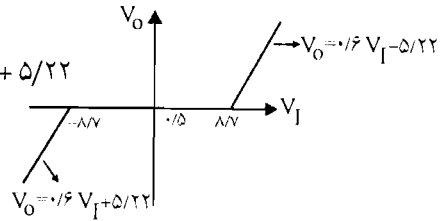
$$\Rightarrow V_1 > 8.7V \Rightarrow \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{Off} \end{cases}, \quad V_0 = 0.6V_1 - 5/22$$

و اگر $V_1 < -8.7V$ باشد در این صورت D_2 روشن می شود و D_1 خاموش می باشد پس داریم: (در این حالت به جای D_2 یک منبع ولتاژ به اندازه $0.7V$ در مدار در نظر می گیریم.)

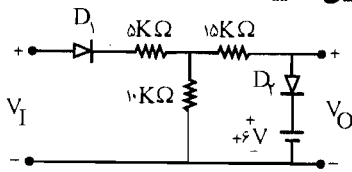
$$V_0 = 12 \times \frac{2R}{2R+2R+R} + (V_1 + 0.7V) \times \frac{(R+2R)}{(R+2R+2R)}$$

$$\Rightarrow V_o = 0.6 V_I + 5/22$$

$$\Rightarrow V_I < -1/5 V \Rightarrow \begin{cases} D_1: \text{Off} \\ D_2: \text{ON} \end{cases} \Rightarrow V_o = 0.6 V_I + 5/22$$



۲۱- در شکل م- ۲۱ دیودها ایده‌آل هستند. مشخصه انتقالی مدار را برای $-20V \leq V_I \leq 20V$ رسم نموده، در هر ناحیه از مشخصه، وضعیت هر یک از دیودها را تعیین نمایید.



شکل م-۲۱

☑ راه حل:

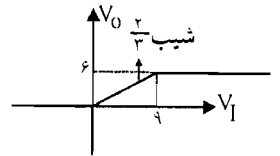
$$V_I < 0.5V \rightarrow \begin{cases} D_1: \text{Off} \\ D_2: \text{Off} \end{cases} \rightarrow V_o = 0.5V$$

$$0.5V < V_I < ? \rightarrow \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{Off} \end{cases} \rightarrow \frac{V_I - V_o}{5} = \frac{V_o}{15} \rightarrow 2V_I - 2V_o = V_o$$

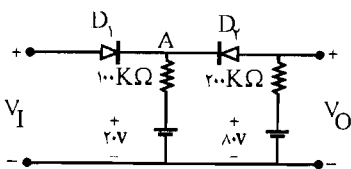
$$\rightarrow V_o = \frac{2}{3} V_I \rightarrow V_o = 6V \rightarrow V_I = 9$$

$$\rightarrow 0 < V_I < 9V \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{Off} \end{cases}$$

$$V_I > 9V \rightarrow \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{ON} \end{cases} \rightarrow V_o = 6V$$



۲۲- ولتاژ ورودی V_I مدار شکل م- ۲۲ از ۰ تا ۱۰۰ ولت به صورت خطی تغییر می‌کند. ولتاژ خروجی V_o را با همان مقیاس زمانی V_I رسم نمایید. (دیودها را ایده‌آل فرض کنید)



شکل م-۲۲

✓ (راه حل):

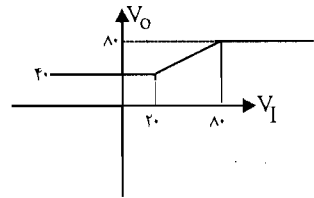
وقتی $V_I < 20V$ باشد D_1 خاموش و D_2 روشن می‌باشد با استفاده از تقسیم ولتاژ مقدار V_O را به دست می‌آوریم.

$$V_I < 20V \rightarrow \begin{cases} D_1: \text{Off} \\ D_2: \text{ON} \end{cases} \rightarrow \frac{V_O - 20}{100} + \frac{V_O - 80}{200} = 0 \rightarrow V_O = 40V$$

وقتی V_I بین $20V$ و $80V$ باشد هر دو دیود روشن می‌باشند پس داریم

$$V_O = V_I$$

$$20V < V_I < 80V \rightarrow \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{ON} \end{cases} \rightarrow V_O = V_I$$

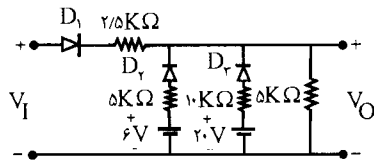


وقتی V_I بزرگتر از $80V$ ولت می‌شود دیود D_1 روشن می‌باشد و D_2 خاموش (چون در این صورت در D_2 ولتاژ آند از کاتد کوچکتر می‌باشد) پس در مدار معادل داریم $V_O = 80V$

$$V_I > 80V \rightarrow \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{Off} \end{cases} \rightarrow V_O = 80V$$

۲۳- در مدار شکل م- ۲۳، با فرض ایده‌آل بودن دیودها: مشخصه انتقالی را به دست آورده و رسم

نمایید. ورودی V_I از 0 تا $50V$ ولت تغییر می‌کند.



شکل م- ۲۳

✓ (راه حل):

حالت اول حالتی است که D_1 خاموش و D_2 روشن و D_3 خاموش است:

$$\begin{cases} D_1: \text{Off} \\ D_2: \text{ON} \\ D_3: \text{Off} \end{cases} \rightarrow V_O = \frac{6 \times 5K\Omega}{5 + 5} = 3V$$

و چون $V_O = 3V$ و D_1 هم خاموش می‌باشد پس $V_I < 3V$

$$3V < V_I < 9V \rightarrow \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{ON} \\ D_3: \text{Off} \end{cases} \rightarrow \frac{V_O - V_I}{2.5} + \frac{V_O - 6}{5} + \frac{V_O}{5} = 0$$

$$\rightarrow V_O = \frac{V_I}{2} + \frac{3}{2}$$

و برای اینکه D_2 روشن باشد و D_3 خاموش V_0 باید از $6V$ کوچکتر باشد یعنی داریم:

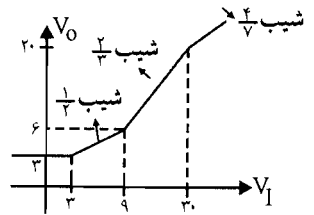
$$V_0 = \frac{V_I}{2} + \frac{3}{2} < 6V \Rightarrow V_I < 9V$$

$$9V < V_I < 30V \rightarrow \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{Off} \\ D_3: \text{Off} \end{cases} \rightarrow V_0 = V_i \times \frac{5}{5+2.5} = \frac{2}{3} V_I$$

برای اینکه D_3 همچنان خاموش باشد باید V_0 کوچکتر از $20V$ باشد:

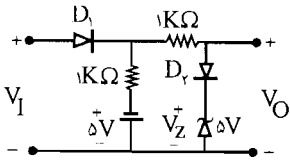
$$V_0 = \frac{2}{3} V_I < 20 \rightarrow V_I < 30V$$

$$V_I > 30V \rightarrow \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{Off} \\ D_3: \text{ON} \end{cases} \rightarrow \frac{V_0 - V_I}{2/5} + \frac{V_0 - 20}{10} + \frac{V_0}{5} = 0$$



$$\rightarrow V_0 = \frac{4}{5} V_I + \frac{20}{5}$$

۲۴- در مدار برش شکل م- ۲۴، مشخصه انتقالی را محاسبه و رسم نمایید (دیودها را ایده‌آل فرض کنید).

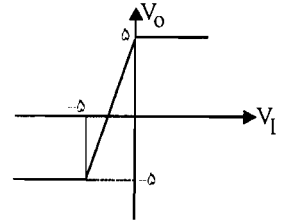


شکل م- ۲۴

$$V_I < -5V \rightarrow \begin{cases} D_1: \text{Off} \\ D_2: \text{Off} \end{cases} \rightarrow V_0 = -5V$$

$$V_I > -5V \rightarrow \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{Off} \end{cases} \Rightarrow \frac{V_I + 5V}{1} + \frac{V_I - V_0}{1} = 0$$

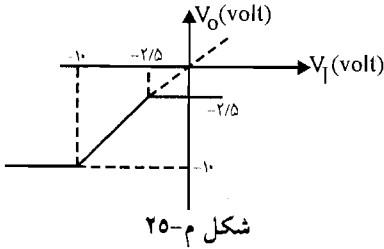
$$\rightarrow V_0 = 2V_I + 5$$



برای اینکه D_2 روشن شود باید V_0 بزرگتر از $5V$ شود.

$$D_2: \text{ON} \rightarrow V_0 > 5V \rightarrow 2V_I + 5V > 5 \rightarrow V_I > 0 \rightarrow V_0 = 5V$$

۲۵- مشخصه انتقالی شکل م- ۲۵ را در نظر بگیرید. یک مدار برای مشخصه مذکور طراحی نموده و مقادیر قطعه‌های به کار رفته را مشخص نمایید. (از دیودهای ایده‌آل، مقاومت و منابع استفاده کنید).



✓ (۱۵ حل):

با توجه به شکل م- ۲۵ داریم:

وقتی V_I کوچکتر از -1.0^V است V_O مقدار ثابت می‌باشد

$$V_I < -1.0^V \rightarrow V_O = -1.0^V$$

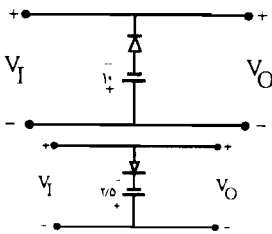
تا به اینجا شکل مدار به صورت مقابل می‌باشد. ←

وقتی V_I بزرگتر از $-2/5^V$ است V_O مقدار ثابت می‌باشد.

$$V_I > -2/5^V \rightarrow V_O = -2/5^V$$

در این حالت مدار به صورت مقابل می‌باشد. ←

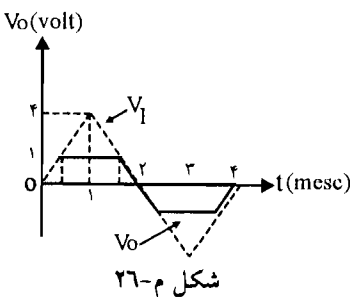
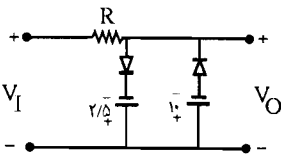
وقتی V_I بین این دو مقدار می‌باشد رابطه خطی $V_O = V_I$ برقرار می‌باشد.



$$-1.0^V < V_I < -2/5^V \rightarrow V_O = V_I \rightarrow$$

در حالت سوم هر دو دیود قطع هستند و همچنین یک مقاومت برای کنترل جریان و حفاظت دیودها

نیاز داریم، پس مداری کلی به صورت زیر می‌باشد.



۲۶- مداری طراحی کنید که از شکل موج مثلثی ورودی نشان

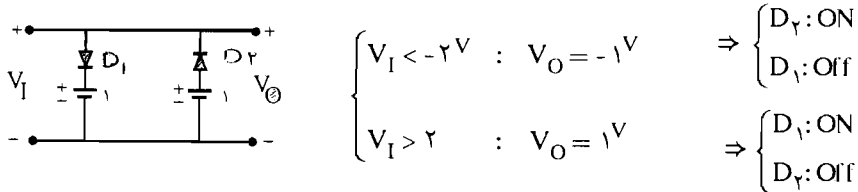
داده شده در شکل م- ۲۶، شکل موج ذوزنقه‌ای نشان داده

شده را ایجاد نماید (از دیودهای ایده‌آل، مقاومت و منابع

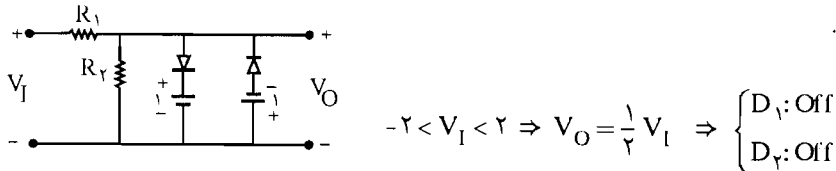
استفاده نمایید).

راه حل:

به ازای V_I های بزرگتر و کوچکتر از یک مقدار خاصی مقدار V_O برابر ± 1 می شود پس قسمت زیر حتماً باید در مدار باشد:



و در بقیه V_I ها، V_O کسری از V_I می باشد پس باید مقاومت های زیر را در مدار قرار دهیم تا تقسیم ولتاژ صورت گیرد.

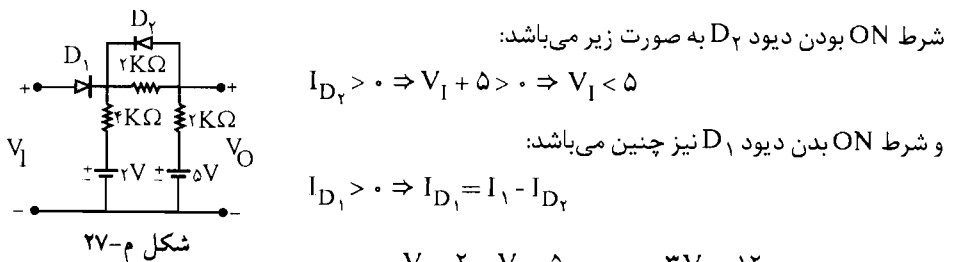


مقادیر R_1 و R_2 با توجه به نسبت V_I و V_O مشخص می شوند.

$$V_O = \frac{R_2 V_I}{R_1 + R_2}$$

۲۷- در مدار شکل م- ۲۷، دیودها ایده آل هستند. مشخصه انتقالی را محاسبه و رسم نمایید.

راه حل:



$$\Rightarrow I_{D_1} = \frac{V_I - 2}{4} + \frac{V_I - 5}{2} \Rightarrow I_{D_1} = \frac{3V_I - 12}{4} > 0 \Rightarrow V_I > 4V$$

پس برای اینکه دیود D_1 خاموش باشد باید $V_I < 4V$ باشد. با توجه به مطالب بالا وقتی $V_I < 4$ است D_1 خاموش و D_2 روشن می باشد.

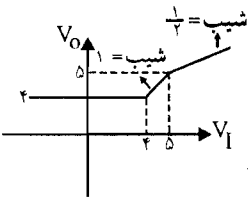
$$V_I < 4V \rightarrow \begin{cases} D_1: \text{Off} \\ D_2: \text{ON} \end{cases} \rightarrow V_O = 5 - \frac{(5-2) \times 2K\Omega}{2+4} = 5 - 1 = 4V$$

وقتی V_I از $4V$ بزرگتر می شود D_1 نیز روشن می گردد \Leftarrow

$$4V < V_I < 5V \rightarrow \begin{cases} D_1: ON \\ D_2: ON \end{cases} \rightarrow V_O = V_I = 5V$$

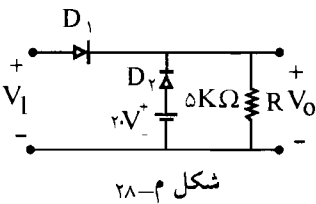
و D_2 تا وقتی روشن می باشد که V_I از $5V$ کوچکتر باشد وقتی V_I از $5V$ بزرگتر می شود D_2 خاموش می شود. \Leftarrow

$$V_I > 5V \rightarrow \begin{cases} D_1: ON \\ D_2: Off \end{cases} \rightarrow V_O = 5 + \frac{V_I - 5}{2+2} \times 2 = 2/5 + \frac{1}{2} V_I$$



۲۸- در مدار برش شکل م- ۲۸، برای دیودهای مدار $R_f = 20\Omega$ ، $R_r = \infty$ و $V_{\gamma} = 0$ است.

الف) مشخصه انتقالی را رسم نمایید. نشان دهید که مدار دارای یک نقطه شکست گسترش یافته (دو نقطه شکست نزدیک به هم) است.



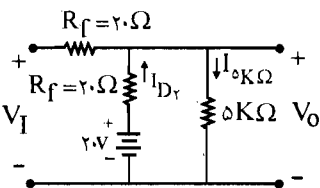
شکل م-۲۸

ب) با فرض تعویض دیود D_2 با یک مقاومت $5K\Omega$ ، مشخصه انتقالی را به دست آورید.

ج) نشان دهید در صورتی که R_f دیود خیلی کوچکتر از R باشد، دو نقطه شکست بند (الف) به یک نقطه شکست بند (ب) تبدیل می شود.

☑ راه حل:

الف) فرض می کنیم D_1 و D_2 روشن باشند در این صورت داریم:



$$V_O \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_f} \right) = \frac{V_I}{R_f} + \frac{2}{R_f} \Rightarrow V_O (2R + R_f) = R V_I + 2 \cdot R \Rightarrow V_O = \frac{R}{2R + R_f} V_I + \frac{2 \cdot R}{2R + R_f}$$

$$\Rightarrow V_O = \frac{5000}{10020} V_I + \frac{20 \times 5000}{10020} \Rightarrow V_O = 0.499 V_I + 9/98 \quad (1)$$

شرط روشن بودن D_2 به صورت مقابل می باشد:

$$I_{D_2} = \frac{20 - V_O}{20} > 0 \Rightarrow 20 - \frac{R}{2R + R_f} V_I - \frac{20R}{2R + R_f} > 0 \Rightarrow 20 \times 2R + 20 \times R_f - R V_I - 20R > 0$$

$$\Rightarrow V_I < 20 + \frac{20R_f}{R} \Rightarrow V_I < 20/0.8$$

شرط روشن بودن D_1 به صورت زیر می باشد:

$$I_{D_1} = -I_{D_2} + I_{\Delta K \Omega} = -\frac{20 - V_O}{R_f} + \frac{V_O}{R} > 0 \Rightarrow V_O(R + R_f) - 20R > 0 \Rightarrow V_O > \frac{20R}{R + R_f}$$

با جایگزینی V_O داریم

$$\frac{R}{2R + R_f} V_I + \frac{20R}{2R + R_f} > \frac{20R}{R + R_f} \Rightarrow V_I(R + R_f) + 20(R + R_f) > 20(2R + R_f)$$

$$\Rightarrow V_I > \frac{20R}{R + R_f} \Rightarrow V_I > \frac{20 \times 5000}{5000 + 20} = 19/92$$

بخش مشترک دو شرط بالا به صورت مقابل می باشد:

$$19/92 < V_I < 20/0.8$$

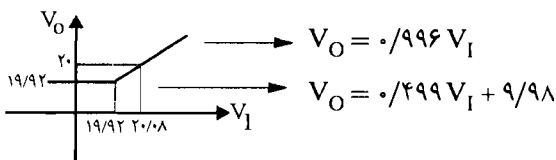
$$\Rightarrow 19/92 < V_I < 20/0.8, \quad V_O = 0.499 V_I + 9/98 \quad \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{ON} \end{cases}$$

و وقتی $V_I < 20/0.8$ باشد D_2 ، off می شود و D_1 ، ON می ماند.

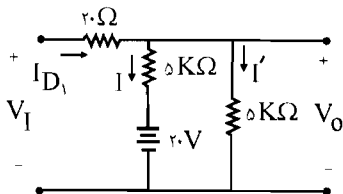
$$V_I > 20/0.8 \Rightarrow V_O = V_I \times \frac{5}{50.2} = 0.996 V_I \quad \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{Off} \end{cases}$$

و وقتی $V_I < 19/92$ ، D_1 ، off می شود و D_2 ، ON می ماند.

$$V_I < 19/92 \Rightarrow V_O = V_I \times \frac{5}{50.2} = 19/92 \quad \begin{cases} D_1: \text{Off} \\ D_2: \text{ON} \end{cases}$$



ب) حال اگر در مدار به جای دیود D_2 مقاومت $5\text{K}\Omega$ قرار دهیم مدار به صورت زیر درمی آید:



برای اینکه D_1 روشن باشد باید داشته باشیم:

$$V_{A_1} > V_{K_1} \Rightarrow \begin{cases} V_{K_1} = 20 \times \frac{5}{5+5} = 10\text{V} \\ V_{A_1} = V_I \end{cases} \Rightarrow V_I > 10\text{V}$$

(ولتاژ کاتد > ولتاژ آنود)

$$V_O = \left(\frac{1}{5000} + \frac{1}{5000} + \frac{1}{20} \right) = \frac{V_I}{20} + \frac{20}{5000} \Rightarrow V_O = \frac{250}{252} V_I + \frac{20}{252}$$

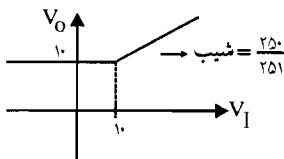
$$\text{پس } D_1: \text{ON} \Rightarrow \begin{cases} V_I > 10\text{V} \\ V_O = \frac{250}{252} V_I + \frac{20}{252} \end{cases}$$

و وقتی $V_I < 10\text{V}$ شود D_1 خاموش می شود و V_O به صورت مقابل به دست می آید:

$$V_O = 20 \times \frac{5}{5+5} = 10\text{V}$$

$$\Rightarrow D_1: \text{Off} \Rightarrow \begin{cases} V_I < 10\text{V} \\ V_O = 10\text{V} \end{cases}$$

مشخصه انتقالی به صورت زیر می باشد:

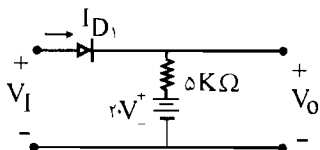


ج) با کوچک بودن مقاومت R_F دو نقطه شکست نزدیک به هم، بسیار نزدیک تر به هم می شوند و تبدیل

به یک نقطه شکست در $V_I = 20\text{V}$ می گردند در قسمت ب صورت مسئله باید به این صورت تصحیح

شود که به جای مقاومت $5\text{K}\Omega$ و دیود D_2 یک مقاومت $5\text{K}\Omega$

در مدار قرار می دهیم یعنی مدار به صورت زیر در می آید:

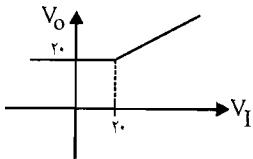


و اگر $V_I < 20V$ شود D_1 خاموش می شود و $V_O = 20V$ می شود.

$$\Rightarrow D_1: ON \Rightarrow \begin{cases} V_I > 20V \\ V_O = V_I \end{cases}$$

$$D_1: Off \Rightarrow \begin{cases} V_I < 20V \\ V_O = 20V \end{cases}$$

و مشخصه انتقالی به صورت زیر می باشد:

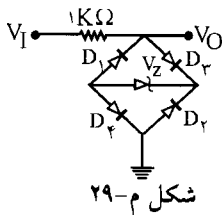


حال بند (ج) می تواند چنین بیان شود که با توجه به بند (الف) شکست چنین پیدا شده بودند.

$$V_I < 20 + \frac{20 \cdot R_f}{R} = 20/0.8 \quad \text{و} \quad V_I > \frac{20 \cdot R}{R + R_f} = 19/92$$

و با کوچک بودن R_f این دو نقطه به سوی $V_I = 20$ میل می نمایند و دو نقطه شکست به یک نقطه شکست در $V_I = 20$ تبدیل می گردد.

۲۹- در مدار شکل م-۲۹ با فرض $V_\gamma = 0/7V$ ، $R_f = \infty$ و $R_r = \infty$ ، $V_z = 9/2V$ ، مشخصه انتقالی را برای $20V \leq V_I \leq 20V$ رسم کنید.



☑ (۱۵ مل):

اگر D_3 و D_4 روشن و D_1 و D_2 خاموش باشند در حالت شکست داریم:

$$V_O = V_z + V_\gamma + V_\gamma = 8/2 + 0/7 + 0/7 = 9/6$$

$$D_3 \text{ و } D_4 \text{ روشن بودن شرط: } I_{D_3} = I_{D_4} = I_{D_z} = \frac{V_I - V_\gamma - V_\gamma - V_z}{1} > 0 = \frac{V_I - 9/6}{1} > 0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_I > 9/6V \\ V_o = 9/6 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} D_1, D_2: Off \\ D_3, D_4: ON \end{cases}$$

اگر D_2 و D_4 خاموش و D_1 و D_3 روشن باشند و D_Z در حالت شکست باشد.

$$V_O = -V_Y - V_Z = -9/6$$

$$D_2 \text{ و } D_1 \text{ روشن بودن شرط } I_{D_1} = I_{D_2} = I_{D_Z} = \frac{-V_I - V_Y - V_Z - V_Z}{1} > 0 \Rightarrow V_I < -9/6$$

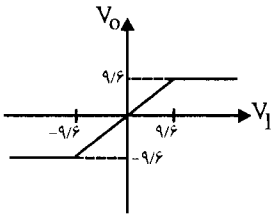
$$\Rightarrow \begin{cases} V_I < -9/6 \\ V_O = -9/6 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} D_1, D_3 : \text{ON} \\ D_2, D_4 : \text{Off} \end{cases}$$

و در حالت $-9/6 < V_I < 9/6$ همه دیودها قطع و D_Z نیز در حالت بایاس معکوس می باشد لذا در این

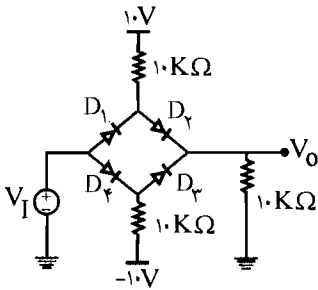
حالت داریم: $V_O = V_I$

$$V_O = V_I \Rightarrow D_1, D_2, D_3, D_4 : \text{Off}$$

مشخصه به صورت زیر می شود:



۳۰- در مدار شکل م- ۳۰ با فرض ایده آل بودن دیودها، مشخصه انتقالی مدار را به دست آورید.



شکل م- ۳۰

☑ راه حل:

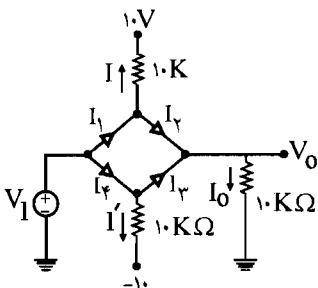
ابتدا فرض می کنیم همه دیودها روشن باشند.

با این فرض مدار مطابق شکل زیر خواهد شد.

در این حالت واضح است که $V_O = V_I$ حالا جهت بررسی

شرایط روشن بودن دیودهای D_1 الی D_4 باید $I_1, I_2,$

I_3 و I_4 مشخص شده برحسب، V حساب شوند و باید



همگی مثبت باشند. برای این منظور داریم:

$$I = I_1 - I_2 = \frac{V_i - 10}{10K} \quad (1)$$

$$I' = I_4 - I_3 = \frac{V_i + 10}{10K} \quad (2)$$

$$I_2 + I_3 = I_0 = \frac{V_i}{10K} \quad (3)$$

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 \quad (4)$$

با حل چهار معادله فوق خواهیم داشت:

$$I_1 = \frac{3V_i - 10}{20} > 0 \Rightarrow V_i > \frac{10}{3}$$

$$I_2 = \frac{V_i + 10}{20} > 0 \Rightarrow V_i > -10$$

$$I_3 = \frac{V_i - 10}{20} > 0 \Rightarrow V_i > 10$$

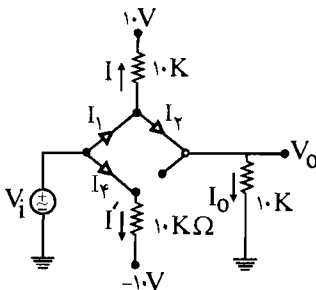
$$I_4 = \frac{3V_i + 10}{20} > 0 \Rightarrow V_i > -\frac{10}{3}$$

اشتراک چهار شرط فوق $V_i > 10$ است.

$$V_i > 10V \Rightarrow V_O = V_i, \quad D_1, D_2, D_3, D_4: ON$$

بنابراین داریم:

اگر $V_i < 10V$ باشد واضح است که D_3 off است و مدار به صورت شکل زیر خواهد شد:



باز خواهیم داشت $V_O = V_i$ و داریم:

$$I_4 = \frac{V_i - (-10)}{10K} = \frac{V_i + 10}{10} > 0 \Rightarrow V_i > -10 \quad (5)$$

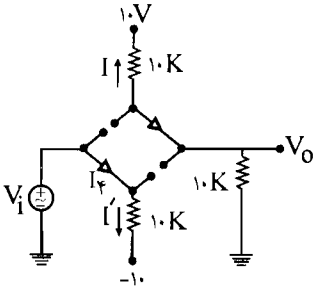
$$I_2 = \frac{V_i}{10} > 0 \Rightarrow V_i > 0 \quad (6)$$

$$I_1 = I + I_2 = \frac{V_i - 10}{10} + \frac{V_i}{10} > 0 \Rightarrow V_i > 5 \quad (7)$$

بنابراین اشتراک شروط (5)، (6) و (7) به صورت $V_i > 5$ خواهد شد. خواهیم داشت:

$$5 < V_i < 10 \Rightarrow V_O = V_i \text{ و } D_1, D_2, D_4: ON, D_3: Off$$

برای $V_i < 5$ باشد با توجه به شرط (V) ، D_1 ، off می‌شود و مدار به شکل زیر خواهد شد.



$$V_O = 10 \times \frac{10}{10+10} = 5V$$

$$I_2 = \frac{10}{20K} > 0$$

شرط بودن D_2 on

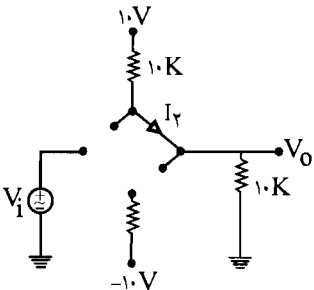
برای بودن D_4 on خواهیم داشت:

$$I_4 = \frac{V_i - (-10)}{10K} > 0 \Rightarrow V_i > -10 \quad (\Delta)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$-10 < V_i < 5 \Rightarrow V_O = 5, D_1, D_3: \text{off}, D_2, D_4: \text{on}$$

اگر $V_i < -10$ باشد. با توجه به رابطه (Δ) ، D_4 ، off خواهد بود و مدار چنین می‌شود.



$$V_O = \frac{10}{20K} \times 10K = 5V$$

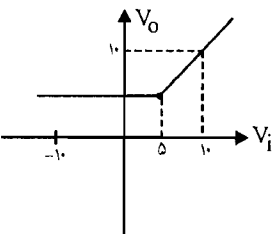
$$I_2 = \frac{10 - 0}{20K} > 0$$

شرط بودن D_2 on

بنابراین خواهیم داشت:

$$V_i < -10 \Rightarrow V_O = 5 \Rightarrow D_1, D_3, D_4: \text{off}, D_2: \text{on}$$

بنابراین مشخصه انتقال مدار مورد بحث به صورت شکل زیر خواهد شد:



۳۱- یک مدار یکسو کننده تمام موج دارای دامنه ولتاژ حداکثر برابر ۱۰۰ ولت است. به این مدار یک صافی خازنی اضافه می‌کنیم. در صورتی که $R_L = 1K\Omega$ و فرکانس برق شهر ۵۰ HZ باشد؛ در هر یک از حالت‌های زیر ضریب ریبیل (r.f.) که به صورت زیر تعریف می‌شود و جریان حداکثر دیود را محاسبه کنید.

$$C = 1000 \mu f \quad (\text{ب})$$

$$C = 10 \mu f \quad (\text{الف})$$

✓ راه حل:

ضریب ریپل به صورت نسبت درصد ولتاژ DC خروجی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\%r.f. = \frac{V_r(rms)}{V_{dc}} \times 100$$

برای $V_r(rms)$ از نتایج مسأله ۳-۳۵ استفاده کنید.

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = \frac{2 \times 100}{\pi} = 63.66V$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R_L} = \frac{63.66V}{1K\Omega} = 63.66mA$$

$$V_r(dc) = \frac{I_{dc}}{2fc} \begin{cases} \text{الف: } C = 10\mu f \rightarrow V_r(dc) = \frac{63.66mA}{2 \times 50 \times 10\mu f} = 63.66V \\ \text{ب: } C = 1000\mu f \rightarrow V_r(dc) = 63.66 \times 10^{-2}V \end{cases}$$

$$V_r(rms) = \frac{V_r(dc)}{2\sqrt{3}} \begin{cases} \text{الف: } C = 10\mu f \rightarrow V_r(rms) = 18.37V \\ \text{ب: } C = 1000\mu f \rightarrow V_r(rms) = 0.1837V \end{cases}$$

$$\%r.f. = \frac{V_r(rms)}{V_{dc}} \times 100 \begin{cases} \text{الف: } C = 10\mu f \rightarrow \%r.f. = \frac{18.37}{63.66} \times 100 = 28.86\% \\ \text{ب: } C = 1000\mu f \rightarrow \%r.f. = \frac{0.1837}{63.66} \times 100 = 0.2886\% \end{cases}$$

$$I_m = V_m \sqrt{\omega^2 C^2 + \frac{1}{R_L^2}}$$

رابطه (۳-۳۲) صفحه ۸۳

$$I_m = \begin{cases} \text{الف: } C = 10\mu f \rightarrow I_m = 100 \sqrt{(\pi \times 50)^2 \times 10\mu f^2 + \frac{1}{1^2}} = 32.9mA \\ \text{ب: } C = 1000\mu f \rightarrow I_m = 100 \sqrt{(\pi \times 50)^2 \times 1000\mu f^2 + \frac{1}{1^2}} = 31/4 \end{cases}$$

۳۲- با استفاده از تعریف بازده (η) در یکسو کننده‌ها نشان دهید که

الف) برای مدار یکسو کننده نیم موج رابطه زیر برقرار است:

$$\eta = \frac{40/5}{1 + \frac{R_f}{R_L}}$$

ب) برای مدار یکسو کننده تمام موج مقدار η دو برابر مقدار فوق است.

✓ (۱۰۰٪)

$$\eta = \frac{(P_{out})_{dc}}{(P_{in})_{av}} \quad \text{رابطه (۳-۲۰) صفحه ۷۶}$$

(الف)

$$\left\{ \begin{aligned} P_{in} (av) &= \frac{V_m^2}{2(R_f + R_L)} \Rightarrow \eta = \frac{\frac{V_m^2 R_L}{\pi^2 (R_f + R_L)^2}}{\frac{V_m^2}{2(R_f + R_L)}} = \frac{V_m^2 R_L}{\pi^2 (R_f + R_L)^2} \times \frac{2(R_f + R_L)}{V_m^2} \\ P_{out} (dc) &= \frac{V_m^2 R_L}{\pi^2 (R_f + R_L)^2} \end{aligned} \right.$$

$$\rightarrow \% \eta = \frac{2 R_L}{\pi^2 (R_f + R_L)} \times 100 = \frac{40/5}{\frac{R_f + R_L}{R_L}} = \frac{40/5}{1 + \frac{R_f}{R_L}} \%$$

ب) در یکسو کننده تمام موج مقدار $(P_{in})_{av}$ و $(P_{out})_{dc}$ به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} (P_{in})_{av} &= \frac{V_m^2}{2(R_f + R_L)} & \rightarrow \eta \% &= \frac{\frac{2 V_m^2 R_L}{\pi^2 (R_f + R_L)^2}}{\frac{V_m^2}{2(R_f + R_L)}} \times 100 \\ (P_{out})_{dc} &= \frac{2 V_m^2 R_L}{\pi^2 (R_f + R_L)^2} \end{aligned}$$

$$\eta \% = \frac{2 V_m^2 R_L}{\pi^2 (R_f + R_L)^2} \times \frac{2(R_f + R_L)}{V_m^2} = \frac{4 R_L}{\pi^2 (R_f + R_L)} = \frac{41}{1 + \frac{R_f}{R_L}} \times 100$$

می‌بینیم که مقدار بازده در حالت دوم دو برابر حالت اول می‌باشد.

۳۳- یک مدار یکسو کننده تمام موج غیر پل با صافی خازن و $C = 40 \mu f$ و $R_L = 5 k\Omega$ را در نظر

بگیرید. در صورتی که ولتاژ بین هر یک از سرهای ثانویه و زمین به صورت $V_I = V_m \sin 2\pi 50 t$ با

$V_m = 100\text{ V}$ باشد.

الف) $V_{L,dc}$ و ولتاژ ریپل V_r خروجی را محاسبه کنید.

ب) با فرض $V_\gamma = 0.6\text{ V}$ ، آیا مقادیر فوق به نحو قابل ملاحظه‌ای تغییر خواهند کرد؟

ج) دیودهای به کار رفته در این مدار چه جریان حداکثر و چه ولتاژ معکوس حداکثری را باید بتوانند

تحمل کنند؟

☑ راه حل:

الف) با توجه به رابطه (۳-۴۱) کتاب داریم:

$$V_{dc} = V_m - \frac{I_{dc}}{4fc} = V_m - \frac{V_{dc}}{R_L \times 4fc} = 100 - \frac{V_{dc}}{5000 \times 4 \times 50 \times 40 \times 10^{-6}}$$

$$\rightarrow V_{dc} = 100 - \frac{V_{dc}}{40} \rightarrow 40 \cdot V_{dc} = 40 \times 100 - V_{dc} \rightarrow V_{dc} = 97/56\text{ V}$$

$$V_r = \frac{V_{dc}}{2fCR} = \frac{97/56\text{ V}}{2 \times 50 \times 10^{-6} \times 50 \times 40 \times 10^{-6}} = 4/87\text{ V}$$

ب) در این صورت $V_m = 100 - 0.6$ خواهد شد.

$$V_{dc} = (100 - 0.6) - \frac{V_{dc}}{40} \rightarrow V_{dc} = 96/97\text{ V}$$

$$V_r = \frac{V_{dc}}{2fCR_L} = \frac{96.97\text{ V}}{2 \times 50 \times 40 \times 10^{-6} \times 50 \times 10^{-6}} = 4/84\text{ V}$$

$$\text{حداکثر ولتاژ معکوس} = 2V_m = 200\text{ V}$$

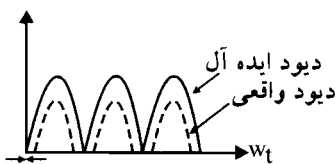
ج)

$$I_m = V_m \sqrt{\omega^2 C^2 + \frac{1}{R_L^2}} = 1/26\text{ A}$$

۳۴- در شکل م-۳۴، خروجی یکسوکننده تمام موج برای دو حالت دیود ایده‌آل و واقعی رسم شده

است. مقدار تأخیر ϕ را بر حسب دامنه ورودی سینوس (V_m) و ولتاژ آستانه هدایت (V_γ) دیود بیان

نمایید. آیا ϕ برای یکسوکننده پل متفاوت خواهد بود؟ چرا؟



شکل م-۳۴

☑ راه حل:

$V(t) = V_m \sin \omega t$ تأخیر فاز φ به دلیل ایده‌آل نبودن دیود می‌باشد.

$$V_O(t) = \begin{cases} |V_i(t)| - V_\gamma & , |V_i(t)| \geq V_\gamma \\ 0 & , |V_i(t)| < V_\gamma \end{cases}$$

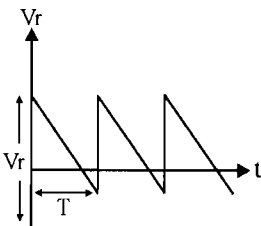
$$V_m \sin \omega t = V_m \sin \varphi = V_\gamma \Rightarrow \varphi = \sin^{-1} \left(\frac{V_\gamma}{V_m} \right)$$

مقدار φ برای یکسو کننده پل متفاوت خواهد بود زیرا V_γ در یکسو کننده تمام موج برابر $V_\gamma = 0.7V$ و برای یکسو کننده تمام موج پل $V_\gamma = 1/4 V$ می‌باشد.

$$\text{مقدار } \varphi \text{ برای یکسو کننده تمام موج پل } V_m \sin \omega t = 2V_\gamma = 2V_\gamma \Rightarrow \varphi = \sin^{-1} \left(\frac{2V_\gamma}{V_m} \right)$$

۳۵ - ریپل خروجی یک یکسو کننده با صافی خازنی را می‌توان با منحنی شکل م - ۳۵ تقریب زد.

مقدار مؤثر ولتاژ ریپل V_r (rms) را بر حسب V_r به دست آورید.



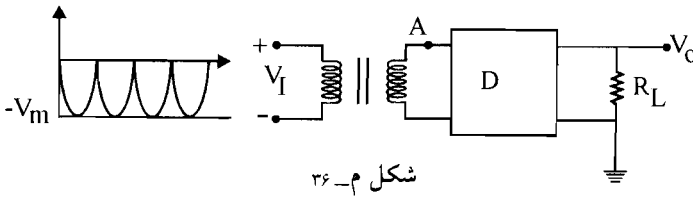
شکل م-۳۵

$$V_{rms} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T (V_r^Y(t) dt) \right]^{\frac{1}{Y}}$$

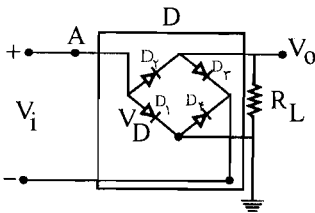
$$V_\gamma \text{ تغییرات: } V_r(t) = \frac{-V_r(P-P)}{T} t + \frac{V_r(P-P)}{2} \quad 0 \leq t \leq T$$

$$\begin{aligned} V_O^Y(rms) &= \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{-V_r(P-P)}{T} t + \frac{V_r(P-P)}{2} \right]^Y dt \\ &= \frac{V_r^Y(P-P)}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{4} + \frac{t^Y}{T^Y} - \frac{t}{T} \right) dt = \frac{V_r^Y(P-P)}{T} \left(\frac{T}{4} + \frac{T^{\frac{Y+1}{2}}}{\frac{Y+1}{2}} - \frac{T^Y}{2T} \right) \\ &= \frac{V_r^Y(P-P)}{12} \rightarrow V_{rms} = \frac{V_r(P-P)}{\sqrt{12}} = \frac{V_r(P-P)}{2\sqrt{3}} \end{aligned}$$

۳۶- در مدار شکل م- ۳۶، در محل جعبه D یک مدار پل دیودی مناسب طوری جایگزین کنید که به ازای یک شکل موج سینوسی ورودی با دامنه V_m ، ولتاژ خروجی V_O دارای شکل موج نشان داده شده باشد شکل موج ولتاژ نقطه A نسبت به زمین چگونه خواهد بود؟ (از دیودهای ایده‌آل استفاده کنید).



شکل م- ۳۶



✓ (۱۵۰ حل):

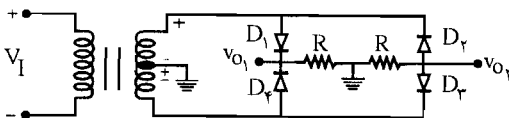
پل دیودی مناسب به صورت مقابل می‌باشد که همان پل دیود یکسو سازی است که در بخش درسی کتاب آمده است با این تفاوت که چون ولتاژ V_O خواسته شده منفی می‌باشد بنابراین دو سر دیودی که کاند آنها به هم وصل می‌شود و مثبت ولتاژ خروجی بوده حال به زمین وصل می‌شود و سر دیگر مدار خروجی می‌باشد.

ولتاژ نقطه A نسبت به زمین $V_A = V_D$ خواهد شد که همان ولتاژ دو سر دیود D_1 می‌باشد که وقتی دیود D_1 روشن باشد برابر V_γ و وقتی D_1 خاموش باشد برابر $V_L + V_\gamma$ یا $V_L + V_\gamma + V_m \sin \omega t$ خواهد شد. ۳۷- در مدار شکل م- ۳۷، ولتاژ آستانه هدایت دیودها را صفر و مقاومت مستقیم آنها را R_f در نظر بگیرید. اگر V_I یک ولتاژ سینوسی باشد.

الف) شکل موج ولتاژهای خروجی V_{O1} و V_{O2} را رسم کنید.

ب) مقادیر متوسط و مؤثر ولتاژهای V_{O1} و V_{O2} را محاسبه کنید.

ج) حداکثر ولتاژ معکوس که روی هر یک از دیودها قرار می‌گیرد، دقیقاً چقدر است؟

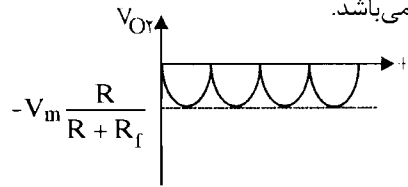
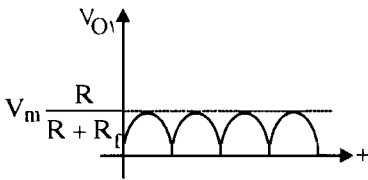


شکل م- ۳۷

☑ راه حل:

در نیم سیکل مثبت D_1 و D_3 و ON و D_2 و D_4 Off می‌باشند و در نیم سیکل منفی D_2 و D_4 و ON و D_1 و D_3 Off می‌باشند.

الف) پیک ولتاژی که روی هر مقاومت افت می‌کند با تقسیم ولتاژ به ترتیب $\frac{V_m R}{R + R_f}$ و $\frac{V_m R}{R + R_f}$ می‌باشد.

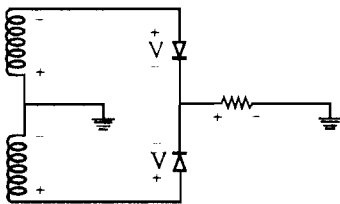


ب) مقدار متوسط ولتاژ برابر خواهد بود با: $\frac{2V_{O1m}}{\pi}$ و مقدار مؤثر برابر است با: $\frac{V_{O1m}}{\sqrt{2}}$ و $\frac{-V_{O2m}}{\sqrt{2}}$

$$\begin{cases} V_{dc1} = \frac{2V_m R}{\pi(R + R_f)} \\ V_{rms1} = \frac{V_m R}{\sqrt{2}(R + R_f)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{dc2} = \frac{-2V_m R}{\pi(R + R_f)} \\ V_{rms2} = \frac{-V_m R}{\sqrt{2}(R + R_f)} \end{cases}$$

ج) اگر در مسیر مشخص شده KVL بزنیم:



$$\begin{aligned} \frac{-V_m R}{R + R_f} + P_{IV} - V_m &= 0 \\ \rightarrow P_{IV} &= \frac{2R + R_f}{R + R_f} V_m \end{aligned}$$

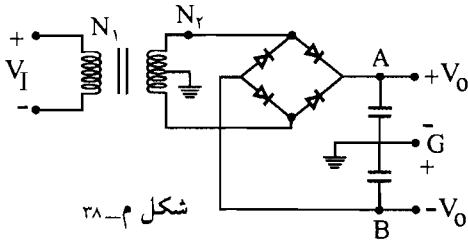
وقتی که V_i مثبت است دیودهای D_1 و D_3 هدایت کرده و در این صورت V_{O1} برابر $V_m + V_{O2}$ برابر $-V_m$ می‌شود. و وقتی که V_i منفی است دیودهای D_2 و D_4 هدایت کرده و در این صورت نیز V_{O1} برابر $V_m + V_{O2}$ برابر $-V_m$ می‌شود. مقدار ولتاژ حداکثر روی هر دیود خاموش دیود می‌شود که عبارت است از:

$$\begin{aligned} \text{مثلاً: } V_{D2} &= V_R + V_R + V_{D2} = 2V_R + R_f I_R & \text{داریم: } I_R &= \frac{V_m}{R + R_f} \\ \Rightarrow V_{D2} &= \frac{2R V_m}{R + R_f} + \frac{R_f V_m}{R + R_f} = \left(\frac{2R + R_f}{R + R_f}\right) V_m \end{aligned}$$

که ولتاژ حداکثر معکوس روی یک دیود را نشان می‌دهد.

۳۸- مدار شکل م - ۳۸ یک مدار پل با سر وسط است. طرز کار آن را توضیح دهید. در صورتی که

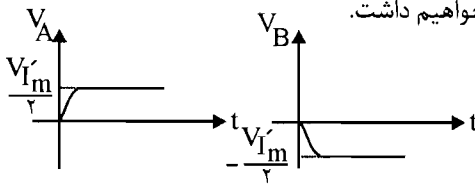
$$\frac{N_2}{N_1} = 0.1 \text{ و } V_1 = 100 \sin \omega t \text{ باشد، ولتاژ خروجی را تعیین نمایید.}$$



شکل م-۳۸

راه حل:

وقتی V_1 مثبت می‌باشد و دیودهای D_2 و D_4 هدایت می‌کنند و بین نقطه A و زمین ولتاژ $\frac{V_1'}{2}$ را خواهیم داشت البته با فرض ایده‌آل بودن دیود و اگر دیود ایده‌آل نباشد برابر $(\frac{V_1'}{2} - V_D)$ خواهد شد و بین نقطه B و زمین ولتاژ $-\frac{V_1'}{2}$ را خواهیم داشت. (V_1') را با استفاده از تبدیل ولتاژ در ثانویه ترانسفورماتور به دست می‌آوریم) و وقتی V_1 منفی می‌باشد دیودهای D_1 و D_3 هدایت می‌کنند و بین نقطه A و زمین ولتاژ $\frac{V_1'}{2}$ و بین نقطه B و زمین ولتاژ $-\frac{V_1'}{2}$ را خواهیم داشت.



$$\begin{cases} \frac{N_2}{N_1} = 0.1 \\ V_1 = 100 \sin \omega t \end{cases} \Rightarrow \frac{V_1'}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{V_1'}{100 \sin \omega t} = 0.1 \rightarrow V_1' = 10 \sin \omega t$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_A = \frac{V_1'}{2} = 5 \sin \omega t \\ V_B = -\frac{V_1'}{2} = -5 \sin \omega t \end{cases}$$

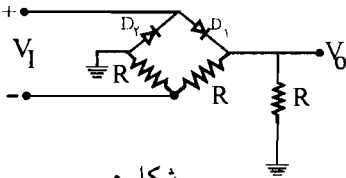
شکل موج خروجی به صورتی که نشان داده شده خواهد بود که ماکزیمم V_A ، 5 ولت که روی این مقدار ثابت باقی می‌ماند و مینیمم V_B ، -5 خواهد شد که با این مقدار ثابت می‌ماند.

۳۹- در مدار شکل م- ۳۹ دیودها ایده‌آل و $V_I = V_m \sin \omega t$ است.

الف) شکل موج ولتاژ خروجی V_O را به دست آورده و رسم کنید.

ب) مقدار DC ولتاژ خروجی را محاسبه کنید.

ج) مشخصه انتقالی مدار را رسم کنید.

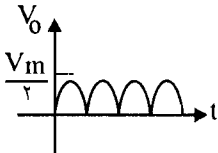


شکل م- ۳۹

☑ راه حل:

الف) ورودی شکل موج سینوسی با دامنه V_m می‌باشد، خروجی نیز موج سینوسی یکسو شده تمام موج

با دامنه $\frac{V_m}{2}$ می‌باشد.



$$V_O(\text{dc}) = \frac{2}{\pi} V_O(\text{max}) \quad , \quad V_O(\text{max}) = \frac{V_m}{2} \quad (\text{ب})$$

$$\Rightarrow V_O(\text{dc}) = \frac{2}{\pi} \times \frac{V_m}{2} = \frac{V_m}{\pi}$$

ج) فرض می‌کنیم D_1 روشن و D_2 خاموش باشد در این صورت داریم:

$$V_O = V_i \times \frac{R}{R+R} = \frac{1}{2} V_i$$

$$I_{D_1} = \frac{V_i}{2R} + \frac{V_i}{R} = \frac{3V_i}{2R}$$

شرط روشن بودن دیود D_1 به صورت زیر است:

$$I_{D_1} > 0 \Rightarrow V_i > 0$$

شرط خاموش بودن دیود D_2 به صورت زیر است:

$$V_{A_2} < V_{K_2} \Rightarrow \frac{V_i}{2} < V_i \Rightarrow V_i > 0$$

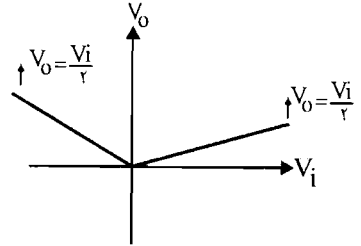
در این صورت به ازای $V_i > 0$ دیود D_1 روشن و دیود D_2 خاموش می‌باشد

$$V_i > 0 \Rightarrow \begin{cases} D_1: \text{ON} \\ D_2: \text{Off} \end{cases} \Rightarrow V_O = \frac{V_i}{2}$$

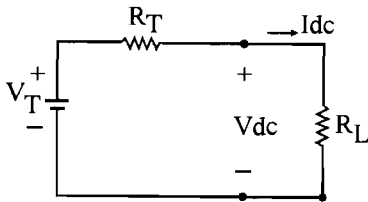
و اگر $V_i < 0$ شود در این صورت D_2 خاموش و D_1 روشن می‌شود:

$$V_O = -V_i \times \frac{R}{R+R} = -\frac{V_i}{2}$$

$$\Rightarrow V_i < 0 \Rightarrow \begin{cases} D_1: \text{Off} \\ D_2: \text{ON} \end{cases} \Rightarrow V_O = \frac{-V_i}{2}$$



۴۰- با استفاده از رابطه ۳- ۴۱ و مدار شکل ۳- ۳۰ معادل تونن یکسوکننده تمام موج با فیلتر خازنی را به دست آورید.



✓ (۱۰) حل:

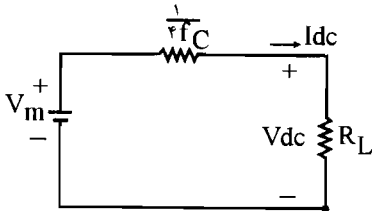
$$V_{dc} = V_m - \frac{I_{dc}}{4fC} \quad (I)$$

$$V_{dc} = V_T - R_T I_{dc} \quad (II)$$

$$\begin{cases} V_T = V_m \\ R_T = \frac{1}{4fC} \end{cases}$$

با مقایسه این دو رابطه داریم:

پس مدار معادل تونن چنین می‌شود:



۴۱- ضریب تنظیم بار را برای هر یک از مدارهای یکسوکننده زیر به دست آورید.

(ب) یکسوکننده تمام موج

(الف) یکسوکننده نیم موج

(د) یکسوکننده تمام موج با صافی خازنی

(ج) یکسوکننده نیم موج با صافی خازنی

راه حل:

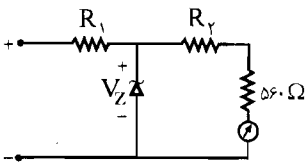
$$V.R = \frac{V_{dcnL} - V_{dcfL}}{V_{dcfL}} = \frac{\frac{V_m}{\pi} - \frac{V_m}{\pi} \times \left(\frac{R_L}{R_f + R_L}\right)}{\frac{V_m}{\pi} \times \left(\frac{R_L}{R_f + R_L}\right)} \quad (\text{الف})$$

$$= \frac{\frac{V_m}{\pi} \left(1 - \frac{R_L}{R_f + R_L}\right) \left(\frac{R_f}{R_f + R_L}\right)}{\frac{V_m}{\pi} \times \left(\frac{R_L}{R_f + R_L}\right) \left(\frac{R_L}{R_f + R_L}\right)} = \frac{R_f}{R_L} \times 100$$

$$V.R = \frac{2 \frac{V_m}{\pi} - \frac{2V_m}{\pi} \left(\frac{R_L}{R_f + R_L}\right)}{\frac{2V_m}{\pi} \left(\frac{R_L}{R_f + R_L}\right)} = \frac{2 \frac{V_m}{\pi} \left(1 - \frac{R_L}{R_f + R_L}\right)}{2 \frac{V_m}{\pi} \left(\frac{R_L}{R_f + R_L}\right)} = \frac{R_f}{R_L} \times 100 \quad (\text{ب})$$

$$V.R = \frac{V_m - V_m \times \left(\frac{R_L}{R_L + \frac{1}{2fc}}\right)}{V_m \times \left(\frac{R_L}{R_L + \frac{1}{2fc}}\right)} = \frac{V_m \left(1 - \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{2fc}}\right)}{V_m \left(\frac{R_L}{R_L + \frac{1}{2fc}}\right)} = \frac{R_L + \frac{1}{2fc} - R_L}{\frac{R_L}{R_L + \frac{1}{2fc}}} = \frac{1}{2fc R_L} \times 100 \quad (\text{ج})$$

$$V.R = \frac{V_m - V_m \times \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{4fc}}}{V_m \times \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{4fc}}} = \frac{V_m \left(1 - \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{4fc}}\right)}{V_m \left(\frac{R_L}{R_L + \frac{1}{4fc}}\right)} = \frac{\left(\frac{R_L + \frac{1}{4fc} - R_L}{R_L + \frac{1}{4fc}}\right)}{\left(\frac{R_L}{R_L + \frac{1}{4fc}}\right)} = \frac{1}{4fc R_L} \times 100 \quad (\text{د})$$



شکل م-۲۲

۴۲- برای حفاظت دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌توان از دیود

زیر استفاده نمود بدون اینکه به خطی بودن دستگاه

خداشه‌ای وارد شود. مدار شکل م- ۴۲ نمایش یک ولت‌متر

DC است که حداکثر ولتاژ قابل خواند با آن ۲۵۷، مقاومت

داخلی آن 560Ω و حداکثر جریان گذرنده از آن 2 mA است. در صورتی که ولتاژ شکست دیود زبر

برابر 20 V باشد، مقاومت‌های R_1 و R_2 را طوری به دست آورید که برای دیود زبر هدایت

نموده و اضافه جریان دستگاه اندازه گیری را از خود عبور دهد.

✓ (راه حل):

$$\text{KVL: } 25 - R_1 \times 0.2 \leq 20 \Rightarrow R_1 \geq 25 \text{ K}\Omega$$

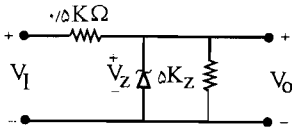
$$\text{KVL: } (R_1 + R_m) \times 0.2 \leq 20 \Rightarrow R_1 + R_m \leq 100 \text{ K}$$

$$R_m = 56 \cdot \Omega = 0.056 \text{ K}\Omega \Rightarrow R_1 + 0.056 \text{ K}\Omega \leq 100 \text{ K}\Omega \Rightarrow R_1 \leq 99.944 \text{ K}\Omega$$

۴۳- در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل م- ۴۳، $I_{Z, \max} = 10 \text{ mA}$ و $I_K = 0.2 \text{ mA}$ و $V_Z = 5 \text{ V}$ است.

الف) با فرض $r_z = 0$ حد اقل و حداکثر مجاز V_1 را تعیین نمایید.

ب) در صورتی که $r_z = 5 \Omega$ باشد ΔV_O را به ازای $\Delta V_1 = 2 \text{ V}$ محاسبه کنید.



شکل م- ۴۳



✓ (راه حل):

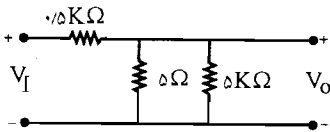
$$i_L = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{5 \text{ V}}{5 \text{ K}\Omega} = 1 \text{ mA}$$

(الف)

$$\text{KCL: } \frac{V_1 - V_Z}{R} = I_Z + I_L \rightarrow \frac{V_1 - 5}{0.5} = I_Z + 1 \text{ mA}$$

$$\rightarrow \begin{cases} I_K = 0.2 \text{ mA} \rightarrow \frac{V_1 - 5}{0.5} = 1/2 \rightarrow V_1 = 5 + 0.6 = 5.6 \text{ V} = V_{1 \min} \\ I_{Z \max} = 10 \text{ mA} \rightarrow \frac{V_1 - 5}{0.5} = 11 \rightarrow V_1 = 5/5 + 5 = 10/5 = V_{1 \max} \end{cases}$$

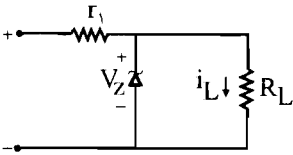
$$\rightarrow 5.6 \leq V_1 \leq 10.5$$



ب) مدار معادل به صورت زیر می باشد:

$$\Delta V_o = \Delta V_1 \times R_{\text{کل}} = \Delta V_1 \times \frac{5000 \parallel 5}{(5000 \parallel 5) + 500} = 19/78 \text{ mV}$$

۴۴ - در مدار تنظیم کننده ولتاژ م - ۴۴ دیود زبر ۱۰ ولتی و جریان حداقل آن ۱۵ mA است. ولتاژ ورودی V_I بین ۱۳ تا ۱۶ ولت و جریان I_L بین ۱۰ mA تا ۸۵ mA تغییر می‌کند.
 الف) حداکثر مقدار R_i را به دست آورد.
 ب) با استفاده از R_i فوق حداکثر توان تلف شده توسط دیود زبر را به دست آورید.



شکل م-۴۴

☑ راه حل:

الف) طبق فرض مسئله $V_Z = 10V$ و $I_K = 15mA$ و $13V \leq V_I \leq 16V$ و $10mA \leq I_L \leq 85mA$

$$I_{L_{max}} = \frac{V_{i_{min}} - V_Z}{R_i} - I_K \rightarrow 85mA = \frac{13 - 10}{R_i} - 15mA$$

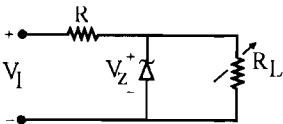
$$\rightarrow 10mA = \frac{3}{R_i} \rightarrow R_i = \frac{3}{0.01} = 300\Omega$$

$$I_{Z_{(max)}} = \frac{V_{i_{max}} - V_Z}{R_i} - I_{L_{(min)}} \quad (ب)$$

$$\Rightarrow I_{Z_{(max)}} = \frac{16 - 10}{0.3K\Omega} - 10 = 190mA$$

$$P_{Z_{(max)}} = I_{Z_{(max)}} \times V_Z = 190mA \times 10V = 1.9W$$

۴۵ - در مدار شکل م - ۴۵، با فرض مقادیر $R_{L, min} = 1K\Omega$ و $I_{Z, max} = 10mA$ و $6/8V \leq V_Z \leq 13V$ و مقدار مقاومت R و نیز $R_{L, max}$ را محاسبه کنید.



شکل م-۴۵

☑ راه حل: این مدار یک مدار تنظیم کننده ولتاژ است و در این مدار رابطه زیر برقرار است:

$$i_{L_{max}} = \frac{V_Z}{R_{L_{min}}} = \frac{6/8V}{1K\Omega} = 6/8mA$$

$$i_{L \max} = i - I_K = \frac{V_{i \min} - V_Z}{R} - I_K = \frac{11 - 6/\lambda}{R} - 0.2 = 6/\lambda$$

$$\rightarrow \frac{11 - 6/\lambda}{R} = v \rightarrow \frac{4/2}{v} = R = 0.6 \text{ K}\Omega$$

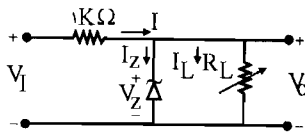
$$I_{L \min} = \frac{V_{i \max} - V_Z}{R} - I_{Z \max} = \frac{13 - 6/\lambda}{0.6} - 10 = 0.33 \text{ mA}$$

$$R_{L \max} = \frac{V_Z}{i_{L \min}} = \frac{6/\lambda}{0.33} = 20.6 \text{ K}\Omega$$

۴۶- مدار شکل م- ۴۶ را با فرض $I_K = 0.2 \text{ mA}$ و $I_{Z \max} = 3/6 \text{ mA}$ در نظر بگیرید.

الف) مقادیر حداقل و حداکثر مقاومت R_L را به گونه‌ای تعیین کنید که تنظیم ولتاژ به خوبی صورت پذیرد. ولتاژ ورودی بین ۸ تا ۱۰ ولت تغییر می‌کند و $V_Z = 6/2 \text{ V}$ است.

ب) اگر $R_L = 20 \text{ K}\Omega$ بوده و دیود زener دارای مقاومت داخلی 5Ω باشد درصد تغییرات ولتاژ خروجی را به ازای تغییرات ولتاژ ورودی به دست آورید.



شکل م-۴۶

☑ راه حل:

الف) این مدار یک مدار تنظیم‌کننده ولتاژ می‌باشد و در این مدار روابط زیر را داریم:

$$\begin{cases} I_{\max} = I_{L \min} + I_{Z \max} & (1) \\ I_{\min} = I_{L \max} + I_{Z \min} & (2) \end{cases}$$

$$(1) \rightarrow I_{\max} = I_{L \min} + I_{Z \min}$$

$$(1) \rightarrow \frac{V_{i \max} - V_Z}{1 \text{ K}\Omega} = \frac{V_Z}{R_{L \max}} + 3/6 \text{ mA}$$

$$\rightarrow \frac{10 - 6/2}{1 \text{ K}\Omega} = \frac{6/2}{R_{L \max}} + 3/6 \rightarrow 3/8 - 3/6 = \frac{6/2}{R_{L \max}} \rightarrow R_{L \max} = \frac{6/2}{0.2} = 31 \text{ K}\Omega$$

$$(2) \rightarrow I_{\min} = I_{L \max} + I_{Z \min}$$

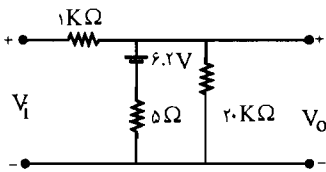
$$\text{از طرفی: } \begin{cases} I_{\max} = \frac{V_{i(\max)} - V_Z}{R_i} \\ I_{L \min} = \frac{V_Z}{R_{L \max}} \end{cases}$$

$$\text{از طرفی } \begin{cases} I_{\min} = \frac{V_{i \min} - V_Z}{R_i} \\ I_{L \max} = \frac{V_Z}{R_{L \min}} \end{cases}$$

$$\rightarrow I_{\min} = \frac{V_{i \min} - V_Z}{R_i} = \frac{V_Z}{R_{L \min}} + I_{Z \min}$$

$$\rightarrow \frac{1 - 6/2}{1 \text{ K}\Omega} = \frac{6/2}{R_{L \min}} + 0/2 \rightarrow 1/8 - 0/2 = \frac{6/2}{R_{L \min}} \rightarrow R_{L \min} = \frac{6/2}{1/6} = 3/875 \text{ K}\Omega$$

(ب) مدار معادل به صورت شکل زیر می باشد:

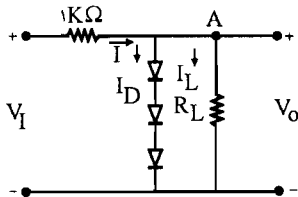


$$V_O = \frac{V_i}{1000 + 5 \parallel 20000} + \frac{6.2}{5 + 1000 \parallel 20000}$$

$$= V_i \times 4/96 \times 10^{-3} + 6/15 \rightarrow \begin{cases} V_{O \max} = 6/1996 \text{ V} \\ V_{O \min} = 6/1896 \text{ V} \end{cases}$$

$$\frac{\Delta V_O}{\Delta V_i} \times 100 = \frac{0.01}{2} \times 100 = 0.5 \%$$

۴۷- در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل م-۴۷ از دیودهای معمولی مشابه با $V_Z = 0.7 \text{ V}$ استفاده شده است. در صورتی که ولتاژ ۴ ولتی ورودی به اندازه $\pm 0.5 \text{ V}$ تغییرات داشته باشد، تغییرات ولتاژ خروجی چه مقدار خواهد بود؟ (لازم است $r_d \ll 2r_d$ ، لازم است rd محاسبه شود).



شکل م-۴۷

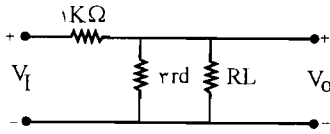
راه حل:

$$V_A = 3 \times V_d = 3 \times 0.7 = 2.1 \text{ V}$$

$$\text{A در نقطه KCL: } I = I_D + I_L \rightarrow \frac{4 - 2/1}{1} = I_D + \frac{2/1}{R_L} \rightarrow I_D \cong 1/9 \text{ mA}$$

$$\rightarrow r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} = \frac{2 \times 26}{1/9} = 27 \Omega$$

مدار معادل به صورت زیر می باشد:



$$R_L \gg r_{rd} \rightarrow R_{R_L \parallel r_{rd}} = r_{rd}$$

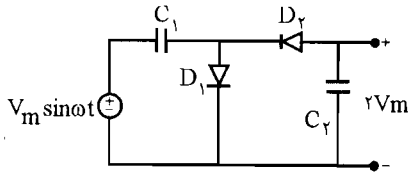
$$V_o = \frac{V_i \times r_{rd}^{\Omega}}{R_i + r_{rd}} = \frac{V_i \times 27 \times 3}{1000 + 27 \times 3} = V_i \times (0.075^{\Omega}) \times 1000 = V_i \times 75 \text{ mV}$$

$$\Delta V_i = \pm 0.5 \text{ V}$$

$$\rightarrow \Delta V_o = (\pm 0.5) \times 75 \cong 38 \text{ mV}$$

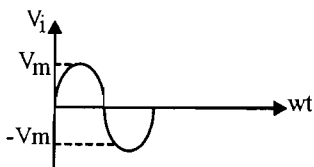
۴۸- مدار شکل م- ۴۸ را در نظر بگیرید.

الف) توضیح دهید که چگونه این مدار به صورت یک مدار دو برابر کننده ولتاژ عمل می کند؟
 ب) چگونه می توان با تکمیل این مدار یک مدار چهار برابر کننده ولتاژ به دست آورد؟



شکل م- ۴۹

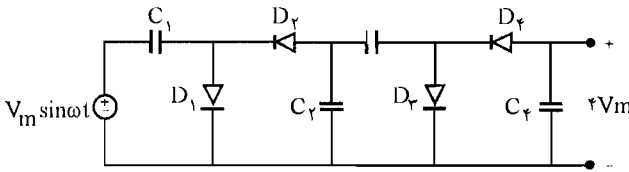
☑ (اه حل):



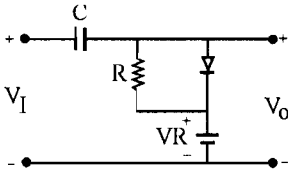
الف) در سیکل اول وقتی V_i مثبت است دیود D_1 هدایت می کند و دیود D_2 قطع می باشد و خازن C_1 از طریق دیود D_1 شارژ شده به اندازه حداکثر مقدار ولتاژ ورودی یعنی مقدار $V_m + V_m$ شارژ می شود، به محض اینکه ولتاژ ورودی از

حداکثر مقدار رد شد و به حداقل مقدار خود یعنی $-V_m$ رسید دیود D_1 قطع شده ولی خازن C_1 همچنان در حالت شارژ می ماند و دیود D_2 وصل می شود در این حالت خازن C_2 نیز به اندازه V_m شارژ می شود. با عبور V_i از مقدار حداقل به مقدار حداکثر دوباره دیود D_2 قطع و دیود D_1 شارژ می شود ولی مقدار ولتاژ خازن C_2 تغییر نمی کند. از این لحظه به بعد ولتاژ خروجی V برابر مجموع ولتاژهای دو خازن C_1 و C_2 است و مساوی $2V_m$ می باشد.

ب) مدار چهار برابر کننده:

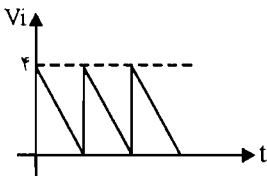


۴۹- در مدار کلمپ شکل م- ۴۹ دامنه شکل موج مثلثی ورودی برابر ۴ ولت است.
 الف) شکل موج خروجی را به ازای مقادیر $V_R = 2V$ و $V_R = -2V$ رسم نمایید.
 ب) در صورتی که $V_R = \pm 5V$ باشد آیا مدار، ورودی را کلمپ خواهد کرد؟ چرا؟

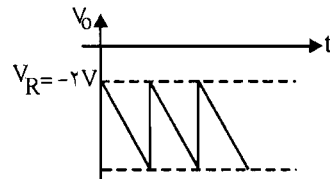
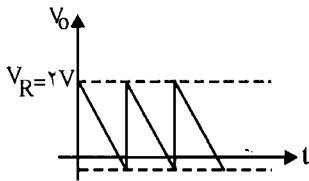


شکل م-۴۹

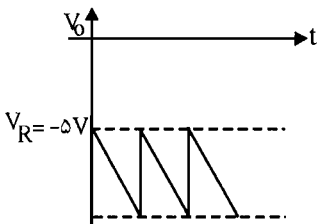
☑ (اه حل):



الف) با توجه به شکل م- ۴۹ ولتاژ خروجی برابر $V_D + V_R$ است و چون $V_D = V_s - V_m$ در سطح صفر کلمپ شده است و در نتیجه خروج (V_O) کلمپ شده در سطح V_R خواهد بود.



ب) در $V_R = 5V$ مدار کار نمی کند ولی در $V_R = -5V$ خروجی در سطح $-5V$ کلمپ می کند.
 با $V_R = +5V$ ($V_R > V_1(max)$) لذا کلمپ انجام نمی شود و دیود ON نمی شود.



فصل ۴

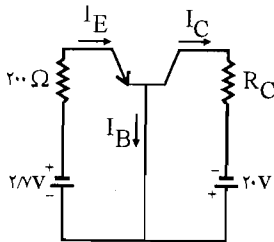
ترانزیستور پیوندی دو قطبی

۱- در مدار شکل م- ۱، ترانزیستور دارای $\alpha = 0.9$ و $V_{BE(ON)} = 0.7V$ است.

الف) جریان های I_E و I_C و I_B را محاسبه کنید.

ب) اگر بخواهیم قدر مطلق ولتاژ V_{CE} از $20V$ تجاوز نکند ($|V_{CE \max}| = 20V$) حداقل

مقدار R_C چقدر باشد؟



شکل م- ۱

☑ راه حل:

الف) در حلقه 200Ω ، $20V$ ، V_{EB} ، KVL می‌زنیم.

$$\text{KVL: } -2/7V + 0.2I_E + 0.7V = 0 \rightarrow I_E = 10\text{ mA}$$

$$I_C = \alpha I_E = 0.9 \times 10 = 9\text{ mA}$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B \rightarrow 9\text{ mA} = \frac{0.9}{1-0.9} I_B \rightarrow I_B = 1\text{ mA}$$

ب) در حلقه R_C و V_{EC} و $20V$ و 200Ω و $2/V$ KVL می‌زنیم.

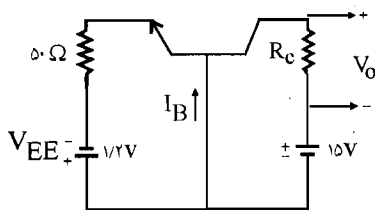
$$KVL: -20 - 2V + 0.2I_E + R_C I_C + V_{EC} = 0 \rightarrow$$

$$|V_{CE}| = 20/V - 9R_C = 20V \rightarrow R_{Cmin} = 77/77\Omega$$

۲- در مدار شکل م- ۲ ترانزیستور دارای $\alpha = 0.9$ و $V_{BE(ON)} = 0.7V$ است.

الف) به ازای چه مقدار R_C ، قدر مطلق ولتاژ خروجی برابر $4/5$ ولت می‌شود؟ در این صورت V_{CE} چقدر خواهد بود؟

ب) اگر بخواهیم با مقاومت R_C محاسبه شده در بند الف) ولتاژ V_{CB} برابر $7/5$ ولت شود، V_{EE} را چقدر باید تغییر داد؟



شکل م- ۲

☑ راه حل:

الف) با نوشتن KVL در حلقه 50Ω و V_{EE} و V_{EB} داریم:

$$KVL: -1/2V + 0.05I_E + 0.7V = 0 \rightarrow I_E = 10\text{ mA}$$

$$I_C = \alpha I_E = 9\text{ mA}$$

$$V_{CE} = R_C I_C = 9R_C = 4/5 \rightarrow R_C = 0.5\text{ k}\Omega$$

ب) در حلقه V_{CE} و R_C و $15V$ و V_{EE} و 50Ω KVL می‌زنیم:

$$V_{CE} = 15V + 1/2V - 0.05 \times 9 - 10 \times 0.05 = 11/2V$$

در حلقه $15V$ و V_{CB} و R_C KVL می‌زنیم: $V_{CB} = 7/5 = 15 - 0.05I_C \rightarrow I_C = 15\text{ mA}$

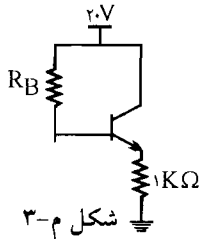
$$I_E = \frac{1}{\alpha} I_C = \frac{15}{0.9} = 16/67\text{ mA}$$

$$V_{EE} = 0.7 + 0.05 \times 16/67\text{ mA} = 1/53V \Rightarrow \Delta V_{EE} = 1/53 - 1/2 = 0.33$$

۳- برای ترانزیستور مدار شکل م- ۳، فرض کنید $\beta = 100$ و $V_{BE(ON)} = 0.7V$ باشد.

الف) مقدار R_B را به گونه‌ای تعیین کنید که $V_{CE} = 10V$ شود.

ب) در صورتی که β ترانزیستور برابر 150 باشد، با R_B محاسبه شده در بند (الف) ولتاژ V_{CE} چقدر خواهد بود؟



✓ (اه حل):

الف) KVL در حلقه $2.0V$ و V_{CE} و R_E : $V_{CE} = 1.0V = 2.0V - 1I_E \rightarrow I_E = 1.0mA$

$$I_B = \frac{I_E}{1+\beta} = 0.0099mA$$

KVL در حلقه $2.0V$ و R_B و V_{BE} و R_E : $-2.0 + R_B I_B + 0.7 + 1 \times I_E = 0 \rightarrow$

$$-2.0 + 0.0099R_B + 0.7 + 1.0 = 0 \rightarrow R_B = 93.94K\Omega$$

ب) KVL: $-2.0 + 93/94 I_B + 0.7 + 1 \times I_E = 0 \rightarrow I_E = 19/3 - 93/94 I_B$ (I)

$$I_E = (1+\beta) I_B = 151 \times I_B \quad \text{(II)}$$

$$\text{در (I) در (II) با قرار دادن} \rightarrow 151 I_B = 19/3 - 93/94 I_B \rightarrow 244/94 I_B = 19/3 \rightarrow$$

$$I_B = 0.0079$$

$$\rightarrow I_E = 151 \times I_B = 11/9 mA$$

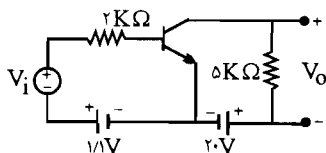
$$V_{CE} = 2.0 - R_E I_E = 2.0 - 11/9 = 8/9 V$$

۴- در تقویت کننده امپتر مشترک شکل م-۴، $\alpha = 0.9$ ، 4 و $V_{BE(ON)} = 0.7V$ و ولتاژ ورودی بر حسب ولت برابر $V_i = 0.1 \sin \omega t$ است.

الف) ولتاژ خروجی V_o چقدر است؟

ب) مقدار حداقل ولتاژ V_{CE} را محاسبه کنید.

ج) در صورتی که بخواهیم V_{CE} از 0.3 ولت کمتر نشود، حداکثر دامنه ولتاژ ورودی سینوسی چقدر می تواند باشد؟



✓ (اه حل):

تحلیل DC: R_B و V_{BE} و $1/1V$ در حلقه KVL: $-1/1 + 0/7 + 2I_B \rightarrow I_B = 0/2 mA$

$$\rightarrow I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B = \frac{0/9}{1-0/9} I_B = 1/8 mA$$

$$V_O = -R_C I_C = -9V$$

$$-V_i + 2I_B = 0 \rightarrow i_B = \frac{V_i}{2} mA$$

$$V_O = -5i_C = -5 \times 9i_B = \frac{V_i}{2} mA$$

$$V_O = -9 - 2/25 \sin \omega t$$

$$\Leftarrow V_O = V_{O(dc)} + V_{O(ac)} \text{ (الف)}$$

$$V_{CE} = 20 + V_O \Rightarrow V_{CE \min} = 20 + V_{O \min} \text{ (ب)}$$

$$V_{O \min} = -9 - 2/25 = -11/25 V$$

$$\rightarrow V_{CE \min} = 20 - 11/25 = 17/25 V \text{ (ج)}$$

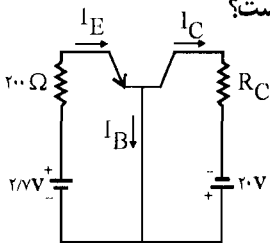
$$V_{CE \min} = 0/3^V \Rightarrow V_{CE} = 20 + V_O = 20 + (-9 - 22/5 V_i) = 0/3^V \Rightarrow V_{i \max} = 0/475 V$$

۵- در مدار شکل م- ۵ ترانزیستور دارای $\alpha = 0/9$ و $V_{BE(ON)} = 0/7V$ می باشد.

(الف) مقدار مقاومت R_E چقدر باشد تا جریان کلکتور در ناحیه $1/8 mA$ شود؟

(ب) مقدار R_C که ترانزیستور را به مرز اشباع می برد چقدر است؟ ($V_{CE(sat)} = 0/2V$)

(ج) برای ثابت ماندن جریان I_C چه مقادیری برای R_C قابل قبول است؟



شکل م- ۱

✓ (اه حل):

$$I_E = \frac{I_C}{\alpha} = \frac{1/8}{0/9} = 2 mA \text{ (الف)}$$

R_E و V_{BE} و $3/7V$ در حلقه KVL: $-3/7 + 0/7 + R_E I_E = 0 \rightarrow R_E = 1/5 K\Omega$

$$(R_C \geq 11/39) \text{ (ب)}$$

KVL در حلقه V_{CE} و R_C و R_E و $3/7V$ و $20V$

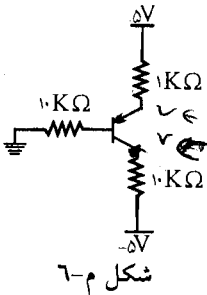
$$|V_{CE}| = 20 - R_C I_C - R_E I_E + 3/7 = 0/2V \rightarrow R_C = 11/39 K\Omega$$

(ج) در صورتی که $R_C < 11/39 K\Omega$ باشد جریان I_C ثابت خواهد ماند. چون به ازای $R_C < 11/39$

ترانزیستور در ناحیه فعال کار می‌کند.

۶- در مدار شکل م- ۶، مقادیر ولتاژهای V_C و V_E و V_B و

جریان‌های I_C ، I_B و I_E را با فرض $\beta = 30$ محاسبه نمایید.



شکل م- ۶

✓ (اه حل):

$$KVL: -5 + 0/7 + 10 I_B + 1 \times I_E = 0 \text{ و } I_E = (1 + \beta) I_B = 31 I_B$$

$$\rightarrow I_B = 104/9 \mu A$$

$$I_E = (1 + \beta) I_B = 3/25 mA$$

$$I_C = \beta I_B = 30 \times 104/9 \mu A = 3/15 mA$$

$$V_B = R_B I_B = 10 \times 104/9 mA = 1/049 V$$

$$V_C = -5 + R_C I_C = -5 + 10 \times 3/15 = 26/5 V$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 26/5 - 1/75 = 24/75 V$$

پس نتیجه می‌گیریم تمام محاسبات اشتباه بوده و ترانزیستور در حالت اشباع قرار دارد:

$$I_{C \text{ sat}} = \frac{5 - (-5) - 0/2}{1 + 10} = 0/89 mA$$

$$V_{CE}(\text{sat}) = 40/2 V$$

$$I_E = I_C = 0/89 mA$$

$$V_E = 5 - I_E(\text{sat}) R_E = 5 - 0/89 \times 1 = 4/11 V$$

$$V_{BE}(\text{sat}) = 0/8 V \rightarrow V_B = 4/11 - 0/8 = 3/31 V$$

$$I_B = \frac{3/31}{10 K\Omega} = 0/331 mA$$

$$\beta_{sat} = \frac{I_{Csat}}{I_{Bsat}} = 3 \ll 30$$

$$V_C = -5 + R_C I_C = 3/9 \text{ V}$$

۷- در مدار شکل م-۷ ترانزیستور دارای $\beta = 9$ و $V_{BE} = 0.7$ است.

الف) مقادیر I_E و I_C و V_{CE} را محاسبه نمایید.

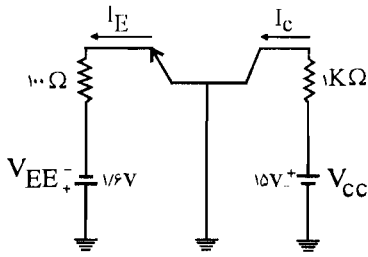
ب) به ازای $V_{CC} = 5 \text{ V}$ اندازه کمیت‌های مذکور را به دست آورید.

$$(| V_{CE}(sat) = 0.2 \text{ V} |)$$

ج) به ازای $V_{CC} = 5 \text{ V}$ ، اگر بخواهیم ترانزیستور را به مرز اشباع ببریم، چه مقدار جدیدی برای

V_{EE} باید اختیار کنیم؟

☑ (راه حل):



شکل م-۷

$$\text{KVL: } V_{EE} = R_E I_E + V_{BE} \rightarrow 1/6 = 0.1 I_E + 0.7 \rightarrow I_E = 9 \text{ mA} \quad (\text{الف})$$

$$I_C = \frac{\beta}{1+\beta} I_E = \frac{9}{10} \times 9 \text{ mA} = 8.1 \text{ mA}$$

$$\text{KVL: } -V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E - V_{EE} = 0$$

$$-15 + 1 \times 8.1 + V_{CE} + 0.1 \times 9 - 1/6 = 0 \rightarrow V_{CE} = 15 - 8.1 - 0.9 + 1/6 = 7/6 \text{ V}$$

$$\text{KVL: } V_{CE} = 5 - 8.1 - 0.9 + 1/6 = -2/4 \text{ V} \quad (\text{ب})$$

$V_{CE}(sat) = 0.2 \text{ V}$ در نتیجه ترانزیستور فعال نمی‌باشد بلکه در حالت اشباع قرار دارد.

I_E هیچ تغییری نمی‌کند ولی مقدار I_C تغییر می‌کند.

$$\text{KVL: } -5 + 1 \times I_C + 0.2 + 0.1 \times 9 - 1/6 = 0 \rightarrow I_C = 6/6 - 1/1 = 5/5 \text{ mA}$$

$$\begin{cases} I_E = \frac{V_{EE} - 0.7}{0.1} \\ (V_{CE} = 0.2, \quad I_C = \frac{\beta}{1+\beta} I_E) \end{cases} \quad (\text{ج}) \quad (I)$$

$$\text{KVL: } -5 + R_C I_C + R_E I_E + 0.2 - V_{EE} = 0 \quad (II)$$

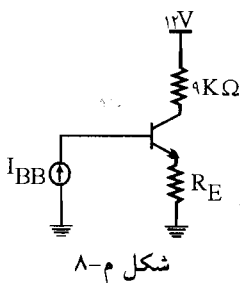
مقادیر روابط (I) را در رابطه (II) قرار می‌دهیم:

$$-5 + 1 \times 0.9 \left(\frac{V_{EE} - 0.8}{0.1} \right) + 0.1 \left(\frac{V_{EE} - 0.8}{0.1} \right) + 0.2 - V_{EE} = 0$$

$$-5 + 10(V_{EE} - 0.8) + 0.2 - V_{EE} = 0 \rightarrow -4.8 + 9V_{EE} - 8 = 0$$

$$9V_{EE} = 12.8 \rightarrow V_{EE} = \frac{12.8}{9} = 1.42V$$

۸- در مدار شکل م-۸ منبع جریان I_{BB} برابر $0.1mA$ است. با فرض $100 < \beta < 200$ ،



(الف) به ازای $R_E = 1K\Omega$ ترانزیستور در چه وضعیتی قرار

دارد؟

(ب) به ازای چه مقادیری از R_E ، ترانزیستور همواره در اشباع

خواهد بود؟

✓ راه حل:

(الف) اگر با β متوسط مقدار I_E را محاسبه کنیم داریم:

$$I_E = \beta_{av} I_B = \left(\frac{100 + 200}{2} \right) \times 0.1 = 15mA$$

$$V_{CE} = 12 - (9 + 1) \times 15 = -3V$$

در نتیجه ترانزیستور در حالت اشباع قرار دارد.

(ب) به ازای $V_{CE} \leq 0.2$ ترانزیستور همواره در حالت اشباع قرار دارد پس:

$$KVL: -9I_C + 12 - R_E(I_B + I_C) \leq 0.2 \Rightarrow -(9 + R_E)I_C - R_E I_B \leq -11.8 \Rightarrow$$

$$-(9 + R_E) \times \beta I_B - R_E I_B \leq -11.8 \Rightarrow [(9 + R_E)\beta + R_E] \times I_B \geq 11.8 \Rightarrow$$

$$[(9 + R_E)\beta + R_E] \times 0.1 \geq 11.8$$

چون می‌خواهیم طرف اول رابطه مقابل به ازای جمیع مقادیر β بزرگتر از 11.8 باشد بنابراین کمترین

مقدار آن یعنی به ازاء $\beta_{min} = 100$ نیز باید طرف اول بزرگتر از 11.8 باشد لذا داریم:

$$(9 + R_E) \times 100 + R_E \geq \frac{11.8}{0.1} \Rightarrow 900 + 101R_E \geq 118 \Rightarrow R_E \geq \frac{280}{101}$$

$$\Rightarrow R_E \geq 2.77K\Omega$$

به ازای این مقادیر R_E ترانزیستور همواره در حالت اشباع قرار دارد.

۹- در مدار شکل م-۹ ترانزیستور از نوع ژرمانیم و دارای $I_{CBO} = 1\mu A$ در دمای $25^\circ C$ است.

الف) V_{BB} را طوری تعیین کنید که ترانزیستور در دمای $25^\circ C$ در حالت قطع باشد.

ب) آیا با V_{BB} محاسبه شده در بند (الف) ترانزیستور در

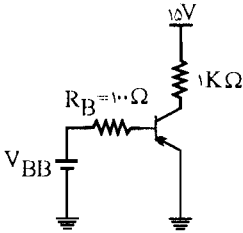
دمای $85^\circ C$ نیز در حالت قطع خواهد ماند؟ مقدار لازم برای

V_{BB} جهت قطع ترانزیستور در این دما چقدر است؟

ج) در صورتی که $V_{BB} = 3V$ و $R_B = 30K\Omega$ باشد، تا چه

دمایی ترانزیستور در وضعیت قطع خواهد ماند؟

✓ (۱۵) اه حل:



شکل م-۹

$$V_{BE(cut)} = +0.1V \quad I_B = I_{CBO} = 1\mu A \quad (\text{الف})$$

$$V_{BB} = 100 \times 10^{-3} + 0.1 = 0.2V$$

پس باید $V_{BB} \geq 0.2V$ باشد.

$$I_{CBO}(85^\circ) = I_{FCBO}(25^\circ) \times 2^{\frac{85-25}{10}} = 1 \times 2^6 = 64\mu A \quad (\text{ب})$$

$$V_B = V_{BB} - R_B I_{CBO} = 0.2 - 100 \times 0.064 = -6.2V$$

ترانزیستور در دمای فوق در حالت فعال قرار دارد.

$$V_{BB} = 100 \times 0.064 + 0.1 = 6.5V \rightarrow V_{BB} > 6.5V$$

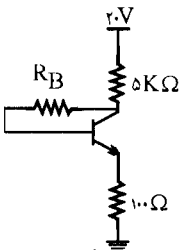
در این حالت ترانزیستور در حالت قطع قرار می‌گیرد.

$$V_{BB} = 30 I_{CBO} + 0.1 = 3V \rightarrow I_{CBO} = 96.67\mu A \quad (\text{ج})$$

$$96.67 = 1 \times 2^{\frac{T-25}{10}} \Rightarrow \ln 96.67 = \frac{T-25}{10} \ln 2 \rightarrow T = 91^\circ C$$

۱۰- در مدار شکل م-۱۰ در صورتی که از یک ترانزیستور با $\beta = 100$ استفاده کرده باشیم، به ازای

چه مقدار R_B ، ولتاژ V_{CE} برابر ۴V خواهد شد؟



شکل م-۱۰

✓ (اه حل):

$$\text{KVL: } -20 + 5k\Omega (I_C + I_B) + V_{CE} + 0.1 I_E = 0$$

$$I_C + I_B = I_E \text{ از طرفی}$$

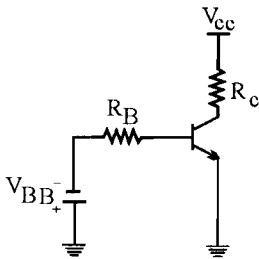
$$\rightarrow -20 + 5/1 I_E + 4 = 0 \rightarrow I_E = 3/14 \text{ mA}$$

$$\text{KVL: } -20 + 5 I_E + R_B \frac{I_E}{1+\beta} + 0.7 + 0.1 I_E = 0$$

$$\rightarrow -20 + 5 \times 3/14 + R_B \times \frac{3/14}{10.1} + 0.7 + 0.1 \times 3/14$$

$$3/289 = R_B \times \frac{3/14}{10.1} \rightarrow R_B = 10.5/7 \text{ k}\Omega$$

۱۱- در مدار شکل م- ۱۱، از یک ترانزیستور سیلیکونی با $I_{CBO} = 10 \text{ nA}$ در دمای 25°C استفاده شده، که به ازای هر 10° درجه افزایش دما این جریان دو برابر می‌شود.



شکل م- ۱۱

الف) با فرض $V_{BB} = 8\text{V}$ ، به ازای چه مقدار R_B ترانزیستور در دمای 185°C در حالت قطع باقی می‌ماند؟

ب) اگر $V_{BB} = 2\text{V}$ و $R_B = 20 \text{ k}\Omega$ باشد، تا چه دمایی ترانزیستور در حالت قطع باقی خواهد ماند؟

✓ (اه حل):

الف) در حالت قطع $V_{BE} = 0\text{V}$

$$I_{CBO}(185^\circ) = 10 \text{ nA} \times 2^{\frac{185-25}{10}} = 0.65 \text{ mA}$$

$$I_B \leq -I_{CBO} \text{ از طرفی}$$

$$R_B I_B = -V_{BB} - V_{BE} = -V_{BB} \Rightarrow I_B = \frac{-V_{BB}}{R_B} \leq -0.65$$

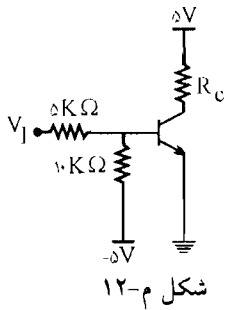
$$\Rightarrow \frac{V_{BB}}{R_B} \geq 0.65 \Rightarrow \frac{2}{R_B} \geq 0.65 \Rightarrow R_B \geq 12/2 \text{ k}\Omega$$

$$V_{BB} - R_B I_{CBO} = 0 \rightarrow 2 - 20 \times I_{CBO} = 0 \rightarrow I_{CBO} = 0.1 \text{ mA}$$

ب)

$$0.1 = 10 \times 10^{-6} \times 2^{\frac{T-25}{10}} \rightarrow \text{Ln } 10^4 = \frac{T-25}{10} \text{ Ln } 2 \rightarrow T = 158^\circ$$

۱۲ - در مدار کلید ترانزیستوری شکل م - ۱۲ برای ترانزیستور $50 < \beta < 200$ و در دمای 25°C ، $I_{CBO} = 20\text{ nA}$ است.

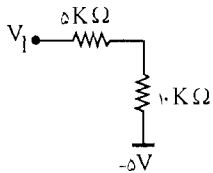


الف) حداکثر V_I برای اینکه ترانزیستور در دمای 75°C در حالت قطع بماند چه مقدار خواهد بود؟

ب) R_C را طوری تعیین کنید که به ازای $V_I = 5\text{V}$ و با فرض $|V_{CE(sat)}| = 0.2\text{V}$ ترانزیستور اشباع شود. این مقدار R_C حداقل است یا حداکثر؟

☑ راه حل:

معادل تونن مدار مقابل را تعیین می‌کنیم.



$$V_{th} = -5 \times \frac{5}{5+10} + V_I \times \frac{10}{10+5} = \frac{10V_I - 25}{15} = \frac{2V_I - 5}{3}$$

$$R_{th} = 10\text{K}\Omega \parallel 5\text{K}\Omega = \frac{50}{15} = 3\frac{1}{3}\text{K}\Omega$$

$$I_{CBO}(75^\circ) = 20\text{ nA} \times 2^{10} = 640\text{ nA}$$

الف) در حالت قطع $V_{BE} = 0\text{V}$ ، $V_{th} = 2/1 \times 10^{-3}\text{V} = V_{BE} = 0\text{V}$

$$\text{از طرفی: } V_{th} = 2/1 \times 10^{-3}\text{V} = \frac{2V_I - 5}{3} \rightarrow 6/3 \times 10^{-3} = 2V_I - 5$$

$$2V_I = 6/3 \times 10^{-3} + 5 \rightarrow V_I = 2/5.3\text{V}$$

$$V_I = 5\text{V} \rightarrow V_{th} = \frac{2 \times 5 - 5}{3} = \frac{5}{3}\text{V} \quad \text{(ب)}$$

$$\text{KVL: } -\frac{5}{3}\text{V} + 3/3 I_B + 0.7\text{V} = 0 \rightarrow I_B = 0.29\text{ mA}$$

$$V_{CE} = 0.2 \quad V_E = 0 \rightarrow V_C = 0.2\text{V}$$

$$V_C = 5 - R_C I_C = 0.2 \Rightarrow 5 - 0.2 = R_C I_C \Rightarrow I_C = \frac{4.8}{R_C} \quad (1)$$

$$I_{C(sat)} = \beta_{\min} I_B = 20 \times 0.29 = 5.8\text{ mA}$$

شرط اینکه ترانزیستور در اشباع باشد این است که $V_{CE} \leq 0.2$ و $I_C = \beta_{\min} I_B$ و $I_B \geq I_B(\text{sat})$ پس

$$(II) \quad I_B \geq \frac{I_C}{\beta_{\min}} \quad \text{باید داشته باشیم}$$

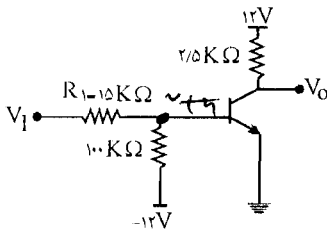
$$(II) \quad \Rightarrow 0.29 \geq \frac{4/8}{R_C \times 20} \Rightarrow R_C \geq \frac{16/55}{20} = 0.142 \text{ K}\Omega$$

۱۳- ترانزیستور سیلکنی مدار شکل م- ۱۳ دارای $30 < \beta < 50$ و $I_{CBO} = 10 \text{ nA}$ در دمای 25°C

است. $(| V_{CE}(\text{sat}) |)$

(الف) به ازای $V_I = 12\text{V}$ ، ولتاژ V_o را محاسبه نمایید. ترانزیستور در چه ناحیه‌ای است؟

(ب) حداقل مقدار R_1 را که به ازای آن ترانزیستور در ناحیه فعال خواهد بود به دست آورید.



شکل م-۱۳

(ج) به ازای مقادیر $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$ و $V_I = 1\text{V}$

ترانزیستور در چه ناحیه‌ای کار می‌کند؟ در این صورت

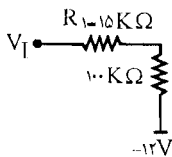
V_o را محاسبه نمایید.

(د) با مقادیر مفروض در بند (ج) ترانزیستور تا حداکثر چه

دمایی در حالت قطع باقی می‌ماند؟

✓ (۱۵) اه حل:

(الف) ابتدا مدار معادل تونن ورودی را به دست می‌آوریم.



$$V_{th} = V_I \times \frac{100}{115} + (-12) \times \frac{15}{115} = \frac{100V_I - 180}{115} = \frac{20V_I - 36}{23}$$

$$R_{th} = 15 \parallel 100 = \frac{100 \times 15}{115} = \frac{300}{23}$$

$$V_I = 12\text{V} \rightarrow V_{th} = \frac{20 \times 12 - 36}{23} = \frac{204}{23}$$

$$\text{KVL: } \frac{-204}{23} + \frac{300}{23} I_B + 0.7 = 0 \rightarrow I_B = 0.63 \text{ mA}$$

$$I_E = (1 + \beta_{av}) I_B = \left(1 + \frac{30 + 50}{2}\right) \times 0.63 = 25.8 \text{ mA}$$

$$V_C = 12 - 2/2 \times 25.8 = -44/75 < 0$$

پس ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار دارد و محاسبات بالا غلط می‌باشد.

$$V_{CE} = 0.2\text{V} \rightarrow V_{CE} = V_C - V_E = 0.2 \rightarrow V_C = 0.2 \rightarrow V_o = 0.2\text{V}$$

$$I_C = \frac{12 - 0.7}{2/2} = 5.36 \text{ mA} \quad (\text{ب})$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{\min}} = 0.178 \text{ mA}$$

$$\text{KVL: } V_{th} = R_{th} I_B + 0.7 \text{ V} \rightarrow$$

$$\frac{12 \times 100}{100 + R_1} - \frac{12 R_1}{100 + R_1} = \frac{100 R_1}{R_1 + 100} \times 0.178 + 0.7$$

$$1200 - 12 R_1 = 100 R_1 \times 0.178 + 0.7(100 + R_1) \rightarrow 1200 - 70 = 12 R_1 + 17$$

$$= 7/8 R_1 + 0.7 R_1$$

$$1130 = 30/8 R_1 \rightarrow R_1 = 37/0.5 \text{ k}\Omega$$

$$V_{th} = \frac{20 \times 1 - 36}{23} = \frac{-16}{23} \quad R_{th} = \frac{300}{23} \quad (\text{ج})$$

$$\text{KVL: } -\frac{16}{23} = \frac{300}{23} \times I_B + 0.7 \text{ V} \rightarrow I_B = -0.107 \text{ mA}$$

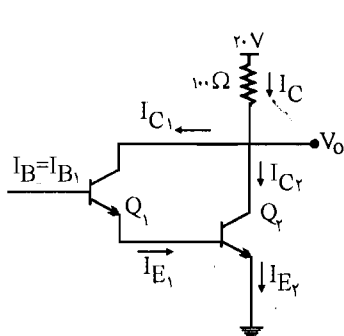
چون I_B کمتر از صفر می باشد پس ترانزیستور در ناحیه قطع می باشد پس:

$$I_C = 0, \quad V_o = V_{CC} = 12 \text{ V}$$

$$-V_{th} = R_{th} I_{CBO} \rightarrow I_{CBO} = \frac{16}{23} = \frac{16}{300} = 0.053 \text{ mA} \quad (\text{د})$$

$$53/3 \mu\text{A} = 10 \times 10^{-2} \times 2^{T_T - 25} \rightarrow \ln 53/3 \times 100 = \left(\frac{T_T - 25}{10} \right) \ln 2$$

$$\rightarrow T_T = 149^\circ\text{C}$$



۱۴- در مدار شکل م- ۱۴، $I_{E_T} = 120 \text{ mA}$ ، $\alpha_T = 0.98$ و

$\alpha_1 = 0.99$ است. با فرض اینکه ترانزیستورها در ناحیه

فعال باشند (مدار بایاس رسم نشده است)، جریان های I_{C_1}

، I_{B_1} ، I_{E_1} و I_{C_r} را محاسبه نمایید. ولتاژ V_o چقدر

است؟ نسبت جریان های I_{C_r} و I_{C_1} را محاسبه نمایید.

✓ (۱۵) حل:

$$I_{E_r} = 120 \mu\text{A} \rightarrow I_{C_r} = \alpha_r I_{E_r} = 0.98 \times 120 \mu\text{A} = 117.6 \mu\text{A}$$

$$I_{B_r} = I_{E_1} \quad I_{B_r} = I_{C_r} \times \frac{1 - \alpha_r}{\alpha_r} = 117.6 \mu\text{A} \times \frac{1 - 0.98}{0.98} = 2.4 \mu\text{A}$$

$$I_{E_1} = I_{B_r} = 2.4 \mu\text{A}$$

$$\rightarrow I_{C_1} = \alpha_1 I_{E_1} = 0.99 \times 2.4 \mu\text{A} = 2.37 \mu\text{A} \rightarrow I_{B_1} = I_{C_1} \times \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1} = 24 \mu\text{A}$$

$$I_C = I_{C_1} + I_{C_r} = 2.37 \mu\text{A} + 117.6 \mu\text{A} = 119.97 \mu\text{A}$$

$$V_o = 20 - 0.1 I_C = 20 - 0.1 \times 119.97 \mu\text{A} = 19.98 \text{ V}$$

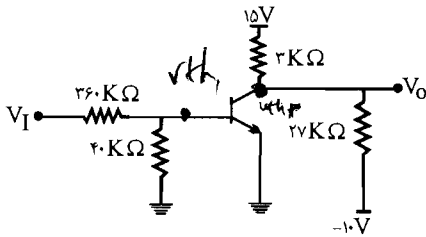
$$\frac{I_C}{I_{B_1}} = \frac{119.97 \mu\text{A}}{24 \mu\text{A}} = 4998.75$$

$$\frac{I_C}{I_{E_r}} = \frac{119.97 \mu\text{A}}{120 \mu\text{A}} = 0.99$$

۱۵- در مدار شکل م- $\beta = 40, 15$ است. مطلوب است محاسبه V_o .

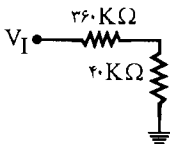
الف) اگر $V_I = 15 \text{ V}$ باشد.

ب) اگر $V_I = 30 \text{ V}$ باشد.



✓ (۱۵) حل:

مدار معادل تونن ورودی را می‌نویسیم:



$$V_{th} = V_I \times \frac{40}{40 + 10} = \frac{V_I}{10}$$

$$R_{th} = \frac{40 \times 36}{40 + 36} = 36 \text{ K}\Omega$$

و مدار معادل کلکتور هم به صورت زیر می‌باشد:

$$V'_{CC} = 5 \times \frac{27}{27 + 3} + \frac{(-10) \times 3}{3 + 27} = \frac{27}{6} - 1 = \frac{21}{6} = 3.5 \text{ V}$$

$$R'_C = 3 \text{ K}\Omega \parallel 27 \text{ K}\Omega = \frac{3 \times 27}{3 + 27} = 2.7 \text{ K}\Omega$$

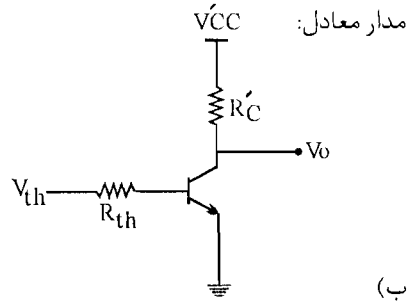
(الف)

$$V_I = 15V \rightarrow \begin{cases} V_{th} = 1/5V \\ R_{th} = 36K\Omega \end{cases} \begin{cases} V'_{CC} = 3/5V \\ R'_C = 2/7K\Omega \end{cases}$$

$$KVL: V_{th} = 36 I_B + 0/7 = 1/5V \rightarrow I_B = 22\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 40 \times 22\mu A = 0/88mA$$

$$V_o = 3/5 - 2/7 \times 0/88 = 1/124V$$



(ب)

$$V_I = 30V \rightarrow \begin{cases} V_{th} = 3V \\ R_{th} = 36K\Omega \end{cases} \begin{cases} V'_{CC} = 3/5V \\ R'_C = 2/7K\Omega \end{cases}$$

$$KVL: 3 = 36 I_B + 0/7 \rightarrow I_B = 63/8\mu A$$

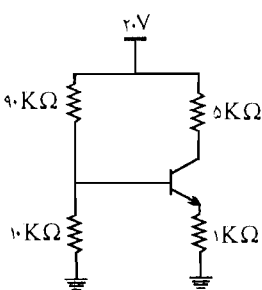
$$I_C = 40 \times 63/8\mu A = 2/55mA$$

$$V_o = 3/5 - 2/7 \times 2/55 = -3/36$$

پس ترانزیستور در حالت اشباع قرار دارد پس محاسبات انجام شده غلط می باشد.

$$V_{CE} = 0/2V \rightarrow V_{CE} = V_C - V_E = V_C - 0 = 0/2 \rightarrow V_o = 0/2V$$

۱۶- مدار شکل م- ۱۶، $\beta = 50$ ، جریان های کلکتور و بیس را محاسبه نمایید.



$$V_{th} = 20 \times \frac{10}{10+90} = 20 \times \frac{10}{100} = 2V$$

$$R_{th} = 10K\Omega \parallel 90K\Omega = \frac{10 \times 90}{10+90} = 9K\Omega$$

$$V_{th} = R_{th} I_B + V_{BE} + R_E I_E$$

$$\rightarrow 2V = 9I_B + 0/7 + 1 \times (1+\beta) I_B \rightarrow 1/3 = 60 I_B \rightarrow I_B = 21/7\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 21/7\mu A = 1/085mA$$

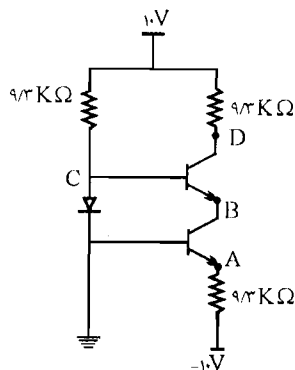
$$V_{CE} = 20 - (50 + 1) \times 1/085 = 13/49V$$

پس ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد.

۱۷ - در مدار شکل م - ۱۷ برای ترانزیستورها $V_{BE} = 0.7V$ و برای دیود $V_\gamma = 0.7V$ است.
مطلوبست محاسبه ولتاژ نقاط A و B و C و D با فرض

الف) $\beta = \infty$

ب) $\beta = 10$



☑ راه حل:

الف) $\beta = \infty$

$$I_B = 0$$

$$V_C = 0 + 0.7V = 0.7V$$

$$V_A = 0 - 0.7V = -0.7V$$

$$V_B = V_C - 0.7V = 0V$$

$$V_D = 10 - 9.3 \times I_C$$

$$I_{C1} = I_{E1} = \frac{10 - 0.7V}{9.3} = 1mA \rightarrow V_D = 10 - 9.3 = 0.7V$$

ب) $\beta = 10$

$$V_C = 0 + 0.7V = 0.7V$$

$$V_A = 0 - 0.7V = -0.7V$$

$$V_B = V_C - 0.7V = 0V$$

$$I_{E1} = \frac{10 - 0.7V}{9.3} = 1mA$$

$$I_{C1} = I_{E1} \times \frac{\beta}{1 + \beta} = \frac{10}{11} mA$$

$$I_{C1} = I_{E1} = I_{C1} \times \frac{\beta}{1 + \beta} = \frac{100}{121} mA$$

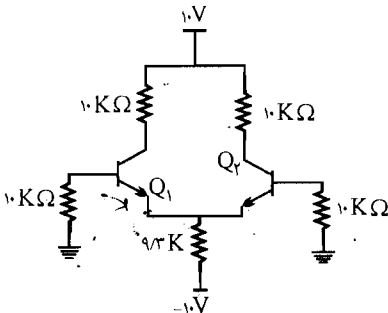
$$V_D = 10 - 9.3 \times \frac{100}{121} = 2.314V$$

۱۸ - در مدار شکل م - ۱۸ ترانزیستورها کاملاً مشابه و دارای $V_{BE} = 0.7V$ هستند. ولتاژ کلکتور

ترانزیستورهای Q_1 و Q_2 را برای حالت‌های زیر محاسبه نمایید:

الف) $\beta_1 = \beta_2 = \infty$

$$\beta_1 = \beta_2 = 100 \text{ (ب)}$$



$$I_B = \frac{I_E}{\beta} \quad \text{شکل م-۱۸}$$

☑ (ا) حل:

$$\beta_1 = \beta_2 = \infty \text{ (الف)}$$

به علت تقارن دو ترانزیستور Q_1 و Q_2 داریم:

$$I_{E_1} = I_{E_2}$$

$$\text{KVL: } 10 \cdot I_{B_1} + V_{BE_1} + 9.3 \text{K}\Omega (I_{E_1} + I_{E_2}) - 10 = 0$$

$$\rightarrow 10 \times \frac{I_{E_1}}{\infty} + 0.7 + 9.3 \times 2I_{E_1} - 10 = 0 \rightarrow 9.3 = 2I_{E_1} \times 9.3 \rightarrow I_{E_1} = I_{E_2} = 0.5 \text{ mA}$$

$$I_{C_1} = I_{C_2} = I_E \rightarrow V_{C_1} = V_{C_2} = 10 - 10 \times I_{E_1} = 10 - 10 \times 0.5 = 5 \text{ V}$$

$$\beta_1 = \beta_2 = 100 \text{ (ب)}$$

$$\text{KVL: } 10 \times \frac{I_{E_1}}{100} + 0.7 + 0.3 \times 2I_{E_1} - 10 = 0 \rightarrow 9.3 = 18.7 I_{E_1} \rightarrow$$

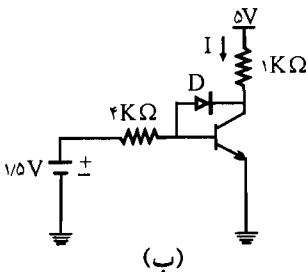
$$I_{E_1} = I_{E_2} = 0.49 \text{ mA}$$

$$I_{C_1} = I_{C_2} = I_E \times \frac{\beta}{1+\beta} = 0.49 \times \frac{100}{101} = 0.48 \text{ mA}$$

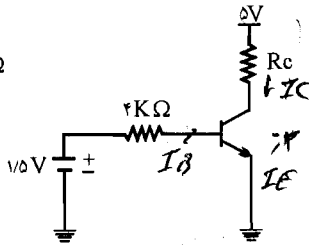
$$V_{C_1} = V_{C_2} = 10 - 10 \times 0.48 = 5.2 \text{ V}$$

۱۹- در مدار شکل م-۱۹ برای ترانزیستور، $\beta = 48$ و $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ و $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{ V}$

است.



(ب)



(الف)

(الف) در مدار شکل

م-۱۹ الف، R_C را طوری

تعیین کنید که ترانزیستور

در مرز اشباع قرار گیرد.

(ب) در شکل م-۱۹ - ب،

شکل م-۱۹

دیود D را به مدار اضافه و $R_C = 1K\Omega$ انتخاب شود. $V_{\gamma} = 0.3V$ باشد و V_{CE} و I چقدر خواهند بود؟ ترانزیستور چه وضعیتی دارد؟ نقش دیود D چیست؟

☑ راه حل:

الف) برای اینکه ترانزیستور در مرز اشباع قرار گیرد باید $V_{CE} = 0.2V$ در نظر گرفته شود.

$$\text{KVL: } -1/5 + 4I_B + 0.7 = 0 \rightarrow I_B = \frac{0.8}{4} = 0.2 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 48 \times 0.2 = 9.6 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 0.2V \rightarrow -5 + R_C I_C + 0.2 = 0 \rightarrow R_C = \frac{4.8}{9.6} = 0.5K\Omega$$

$$V_C = 5 - R_C I_C = 5 - 1 \times 9.6 = -4.6 < 0$$

ب)

پس ترانزیستور در حالت اشباع قرار خواهد گرفت اما به علت وجود دیود ولتاژ کلکتور بیشتر از $0.3V$ ولت از ولتاژ بیس کمتر نمی شود.

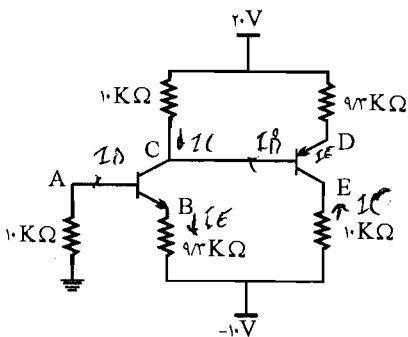
$$V_E = 0 \quad V_B = 0 + 0.7 - 0.7 \quad V_C = 0.7 - 0.3 = 0.4$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 0.4V \rightarrow I = \frac{5 - 0.4}{1K\Omega} = 4.6 \text{ mA}$$

در این حالت ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد و نقش دیود جلوگیری از به اشباع رفتن ترانزیستور می باشد.

۲۰- در مدار شکل م- ۲۰، برای هر یک از ترانزیستورها $V_{BE} = 0.7V$ است. با فرض $\beta = \infty$

مقادیر ولتاژ نقاط A، B، C، D، E را پیدا کنید.



شکل م- ۲۰

☑ راه حل:

وقتی $\beta = \infty$ باشد I_B صفر می شود.

$$I_B = 0 \rightarrow V_A = 0V$$

$$V_B = 0 - 0.7V = -0.7V$$

$$I_{C_1} = I_{E_1} = \frac{1 - 0.7V}{9/3} = 1 \text{ mA} \rightarrow V_C = 20 - 10 \cdot I_{C_1} = 20 - 10 = 10 \text{ V}$$

$$V_D = 0 + 0.7V = 0.7V$$

$$I_{C_2} = I_{E_2} = \frac{20 - 10 - 0.7V}{19/3} = 0.48 \text{ mA}$$

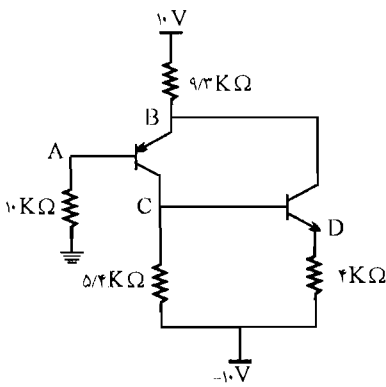
$$V_E = -10 - 10 \times 0.48 = -14.8V$$

۲۱ - در مدار شکل م - ۲۱ ترانزیستورها مشابه بوده و برای هر یک از آنها به $0.7V$ $|V_{BE}|$

است. ولتاژ نقاط A، B، C، D را به دست آورید. اگر:

$$\beta = \infty \text{ (الف)}$$

$$\beta = 100 \text{ (ب)}$$



شکل م-۲۱

راه حل:

$$\beta = \infty \text{ (الف)}$$

$$I_B = 0 \rightarrow V_A = 0 \quad V_B = 0 + 0.7V = 0.7V$$

$$I = \frac{10 - 0.7V}{9/3} = 1 \text{ mA} = I_{C_1} + I_{C_2} \rightarrow I_{C_1} = 1 - I_{C_2} \quad (I)$$

$$\text{KVL: } 5/4 I_{C_1} = 0.7V + 4 I_{C_2} \quad (II)$$

$$(II) \text{ در رابطه (I) با قرار دادن: } 5/4 (1 - I_{C_2}) = 0.7V + 4 I_{C_2} \rightarrow 5/4 - 4/5 I_{C_2} = 0.7V + 4 I_{C_2}$$

$$\rightarrow I_{C_2} = 0.5 \text{ mA} \rightarrow I_{C_1} = 1 - I_{C_2} = 0.5 \text{ mA}$$

$$V_C = -10 + 5/4 \times 0.5 = -7.3V$$

$$V_D = -7.3 - 0.7V = -8.3V$$

$$\beta = 100 \text{ (ب)}$$

$$\text{KVL: } -10 + 9/3(I_{C_1} + I_{C_2}) + 0.7V + 10 \cdot \frac{I_{C_1}}{100} = 0$$

$$\begin{cases} I_{C_2} = I_{E_2} \\ I_{C_1} = I_{E_1} \end{cases} \text{ با تقریب}$$

$$\text{KVL: } 5/4(I_{C_1} - I_{B_1}) = 0/7 + 4I_{C_1} \quad , \quad I_{B_1} = \frac{I_{C_1}}{\beta} = \frac{I_{C_1}}{100}$$

$$\rightarrow \begin{cases} -10 + 9/3 I_{C_1} + 9/3 I_{C_1} + 0/7 + 0/1 I_{C_1} = 0 \\ 5/4 I_{C_1} - 0/054 I_{C_1} = 0/7 + 4 I_{C_1} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 9/4 I_{C_1} + 9/3 I_{C_1} = 9/3 \\ 5/4 I_{C_1} - 4/054 I_{C_1} = 0/7 \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} I_{C_1} = 0/5 \text{ mA} \\ I_{C_1} = 0/49 \text{ mA} \end{cases}$$

$$I_{B_1} = \frac{I_{C_1}}{\beta} = 5 \times 10^{-3} \text{ mA}$$

$$V_A = 10 I_{B_1} = 0/05 \text{ V} \quad V_B = V_A + 0/7 \text{ V} = 0/75 \text{ V}$$

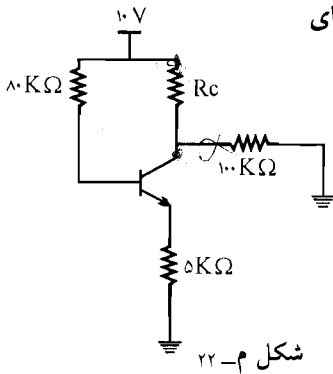
$$V_D = -10 + 4 I_{C_1} = -8/04 \quad V_C = V_D + 0/7 = -7/34 \text{ V}$$

۲۲- مدار شکل م- ۲۲ با فرض $\beta = 100$ و $V_{BE(ON)} = 0/7 \text{ V}$ و $V_{CE(sat)} = 0/2 \text{ V}$

(الف) به ازای $R_C = 5 \text{ K}\Omega$ ولتاژها و جریان‌های پایه‌های

ترانزیستور را محاسبه کنید.

(ب) مقدار R_C را طوری تعیین کنید که $V_{CE} = 1 \text{ V}$ شود.



شکل م- ۲۲

راه حل:

$$\text{KVL: } -10 + 8 I_B + 0/7 + 5 I_E = 0 \quad I_E = (1 + \beta) I_B$$

(الف)

$$\rightarrow -10 + 8 I_B + 0/7 + 5 \times 101 I_B = 0 \rightarrow 585 I_B = 9/3$$

$$\rightarrow I_B = 15/89 \mu\text{A}$$

$$I_E = 101 I_B = 101 \times 15/89 \mu\text{A} = 1/6 \text{ mA}$$

$$V_E = 5 \times 1/6 \text{ mA} = 8 \text{ V} \quad V_B = 8 + 0/7 = 8/7 \text{ V}$$

مدار معادل کلکتور به صورت زیر می‌باشد:

$$V'_{CC} = 10 \times \frac{100}{100 + R_C} = 10 \times \frac{100}{105} = 9.52 \text{ V}$$

$$R_{th} = R_C \parallel 100 \text{ K}\Omega = \frac{5 \times 100}{5 + 100} = 4.76 \text{ K}\Omega$$

$$V_C = V_{th} - R_{th} I_C = 9.52 - 4.76 \times 1/589 = 1/96 \text{ V}$$

$$V_{CE} = 1 \text{ V}$$

(ب)

$$\text{KVL: } -V'_{CC} + R_{th} I_C + V_{CE} + 5I_E = 0$$

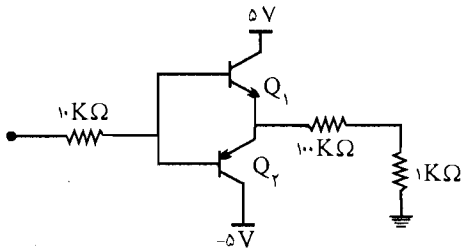
$$\rightarrow -10 \times \frac{100}{100 + R_C} + \frac{100 R_C}{100 + R_C} \times 1/589 + 1 \text{ V} + 5 \times 1/6 = 0$$

$$-1000 + 100 R_C \times 1/589 + 9(100 + R_C) = 0 \rightarrow$$

$$100 = 9 R_C + 158.9 R_C \rightarrow R_C = 0.59 \text{ K}\Omega$$

۲۳.۱ در مدار شکل م - ۲۳ برای $V_I = \pm 5 \text{ V}$ و $\beta = 100$ و $|V_{BE}| = 0.7 \text{ V}$ ، نقطه کار

ترانزیستورها را به دست آورید.



شکل م-۲۳

☑ راه حل:

$$V_I = 5 \text{ V} \rightarrow \begin{cases} Q_1 = \text{ON} \\ Q_2 = \text{Off} \end{cases}$$

$$I_{E1} = \frac{5 - 0.7}{1 + \frac{100}{101}} = 3.9 \text{ mA} \approx I_{C1}$$

در اینجا ابتدا مقاومت R_B را به امیتر انتقال می‌دهیم یعنی مقدار R_B در امیتر برابر می‌شود با

$$\frac{10}{101} = \frac{10}{1 + \beta}$$

$$V_{CE} = 5 - 1 \times I_{E_1} = 5 - 3/9 = 1/1V$$

$$Q_1 \text{ نقطه کار} \Rightarrow \begin{cases} I_{C_1} = 3/9 \text{ mA} \\ V_{CE_1} = 1/1V \end{cases}$$

$$V_I = -5V \rightarrow \begin{cases} Q_1: \text{Off} \\ Q_2: \text{ON} \end{cases}$$

$$I_{E_2} = \frac{5 - 0/V}{1 + \frac{10}{101}} = 3/9 \text{ mA} \approx I_{C_2}$$

$$V_{CE} = -5 + 1 \times I_{E_2} = -5 + 3/9 = -1/1V$$

$$Q_2 \text{ نقطه کار} \Rightarrow \begin{cases} I_{C_2} = 3/9 \text{ mA} \\ V_{CE_2} = -1/1V \end{cases}$$

۲۴ - مسأله ۲۳ را به ازای ولتاژ ورودی ۷ ولت حل کنید.

راه حل:

$$V_I \text{ و } 10K\Omega \text{ و } V_{BE_1} \text{ و } 1K\Omega \text{ در حلقه KVL: } 10I_{10K} + 1 \times I_{1K\Omega} = V_I - V_{BE_1}$$

ترانزیستورها در ناحیه active در نظر گرفته می شوند:

$$10(I_{B_1} - I_{B_2}) + 1(I_{E_1} - I_{E_2}) = 7 - 0/V = 6/3 \Rightarrow 10I_{B_1} + (1+\beta)I_{B_1} - 10I_{B_2} - (1+\beta)I_{B_2} = 6/3$$

$$\Rightarrow 111I_{B_1} - 111I_{B_2} = 6/3 \quad \beta = 100$$

$$V_I \text{ و } 10K\Omega \text{ و } V_{BE_2} \text{ و } 1K\Omega \text{ در حلقه KVL}$$

$$10I_{10K} + 1I_{1K\Omega} = V_I + V_{EB_2} = 7 + 0/V = 7/V \Rightarrow$$

$$111I_{B_1} - 111I_{B_2} = 7/V$$

در این دو معادله به دست آمده دیده می شود که طرف اول برابر ولی طرف دوم متفاوت می باشند پس دو ترانزیستور با هم نمی توانند روشن باشند و Q_2 را در حالت قطع در نظر می گیریم خواهیم داشت:

$$111I_{B_1} = 6/3 \Rightarrow I_{B_1} = \frac{6/3}{111} \quad I_{B_2} = I_{E_2} = 0 \text{ و معادله اول چنین می شود:}$$

$$I_{E_1} = (1+\beta)I_{B_1} = 101 \times \frac{6/3}{111} = 5/73 \text{ mA}$$

$$V_{CE_1} = V_{C_1} - V_{E_1} = 5 - 1 \times I_{E_1} = -0/73$$

پس Q_1 نمی تواند فعال باشد چون $V_{CE} < 0.2V$ به دست آمد پس Q_1 در حالت اشباع می باشد و داریم

$$V_{CE_1} = 0.2$$

$$1K\Omega \text{ و } V_{CE_1} \text{ و } 5K\Omega \text{ در حلقه KVL } 1 \times I_{E_1} = 5 - V_{CE_1} = 5 - 0.2 \Rightarrow I_{E_1} = 4.8 \text{ mA}$$

$$1K\Omega \text{ و } V_{BE_1} \text{ و } V_1 \text{ و } 10K\Omega \text{ در حلقه KVL: } 10 I_{B_1} + 1 I_{E_1} = V_1 - V_{BE_1} \Rightarrow 10 I_{B_1} + 1 \times 4.8$$

$$= 7 - 0.7 I_{B_1} = 0.15 \text{ mA} \Rightarrow V_{E_1} = V_{E_2} = 1 \times I_{E_1} = 1 \times 4.8 = 4.8 \text{ V}$$

$$V_{BE_1} = V_{B_1} - V_{E_1} = 0.7 \Rightarrow V_{B_1} = 0.7 + V_{E_1} = 5.5 \text{ V}$$

$$V_{B_2} = V_{B_1} = 5.5 \text{ V}$$

و با این V_{EB} مشخص می شود که Q_2 در حالت قطع قرار دارد پس نقطه کار ترانزیستور به صورت زیر می باشد:

$$I_{B_1} = 0.15 \text{ mA}$$

$$I_{E_1} = 4.8 \text{ mA}$$

$$I_{B_2} = 0$$

$$I_{C_1} = 4.8 - 0.15 = 4.65 \text{ mA}$$

$$I_{E_2} = 0$$

$$V_{CE_1} = 0.2 \text{ V}$$

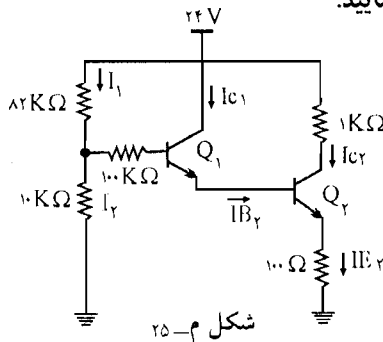
$$I_{C_2} = 0$$

۲۵ مدار شکل م- ۲۵ ترانزیستورهای Q_1 و Q_2 در ناحیه فعال کار می کنند.

$\beta_1 = 100$ و $\beta_2 = 50$ و از جریان اشباع معکوس صرف نظر می شود. $V_{BE_1} = V_{BE_2} = 0.7 \text{ V}$

الف) جریان های I_{B_1} ، I_{B_2} ، I_{C_1} ، I_{C_2} و I_{E_2} را محاسبه نمایید.

ب) ولتاژ V_{E_2} و V_{C_2} را پیدا کنید.



✓ (۱۵ حل)

الف) ابتدا مدار معادل تونن ورودی را می یابیم:

$$V_{th} = 24 \times \frac{10}{10 + 82} = 2.6 \text{ V}$$

$$R_{th} = 82K\Omega \parallel 10K\Omega + 100\Omega = 10.9/9K\Omega$$

I_{E_1} وقتی به بیس ترانزیستور منتقل شود در $(1 + \beta_1)$ و $(1 + \beta_2)$ ضرب می‌شود.

$$\text{KVL: } -V_{th} + R_{th} I_{B_1} + 0.7 + 0.1 \times (1 + \beta_2) \times (1 + \beta_1) I_{B_1} + 0.7 = 0$$

$$\rightarrow -2/6 + 10 \times 9 I_{B_1} + 1/4 + 0.1 \times 10 \times 51 \times I_{B_1} = 0$$

$$1/2 = 624 I_{B_1} \rightarrow I_{B_1} = 1/92 \mu A$$

$$I_{E_1} = I_{B_2} = (1 + \beta_1) I_{B_1} = 51 I_{B_1} = 1 \times 1/92 \mu A = 97/92 \mu A$$

$$I_{C_1} = \beta_1 I_{B_1} = 50 \times 1/92 \mu A = 96 \mu A$$

$$I_{C_2} = \beta_2 I_{B_2} = 100 \times 97/92 \mu A = 9/792 \text{ mA}$$

$$I_{E_2} = (1 + \beta_2) I_{B_2} = 101 \times 97/92 \mu A = 9/89 \text{ mA}$$

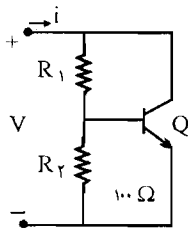
$$\begin{cases} I_1 = ? \\ I_2 = ? \end{cases} \quad \text{KVL: } \begin{cases} -24 + 82 I_1 + 10 I_2 = 0 \\ I_1 - I_2 = I_{B_1} = 1/92 \mu A \rightarrow I_1 = 1/92 \mu A + I_2 \end{cases}$$

$$\rightarrow -24 + 82(I_2 + 1/92 \times 10^{-3}) + 10 I_2 = 0 \rightarrow I_2 = 0.26 \text{ mA}$$

$$I_1 = 0.26 \text{ mA} + 1/92 \times 10^{-3} = 0.261 \text{ mA}$$

$$V_{C_2} = 24 - 1 \text{ K}\Omega \times I_{C_2} = 24 - 9/792 = 14/208 \text{ V} \quad (\text{ب})$$

$$V_{E_2} = 0.1 I_{E_2} = 0.1 \times 9/89 = 0.989 \text{ V}$$



۲۶- در مدار شکل م - ۲۶ با فرض فعال بودن ترانزیستور، رابطه V

بر حسب i را به دست آورده و نشان دهید رفتار مدار مشابه رفتار

دیود در ناحیه مستقیم است. مقادیر V_{BE} و R_T را بر حسب β و V_{BE}

R_2 و R_1 به دست آورید.

☑ (۱۵ مل)

$$V_B = V_{th} = \frac{V \times R_2}{R_1 + R_2}$$

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

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_{th}}, \quad I_C = \beta I_B = \beta \times \frac{V_B - V_{BE}}{R_{th}}$$

$$i = I_C + I_{R_2} + I_B \quad I_{R_2} = \frac{V_{BE}}{R_2}$$

$$\rightarrow i = (1 + \beta) I_B + I_{R_f}$$

$$\rightarrow i = (1 + \beta) \times \frac{V_B - V_{BE}}{R_{th}} + \frac{V_{BE}}{R_f} = (1 + \beta) \times \frac{\frac{VR_f}{R_1 + R_f} - V_{BE}}{\frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f}} + \frac{V_{BE}}{R_f}$$

$$= (1 + \beta) \times V \times \frac{R_f}{R_1 + R_f} \times \frac{R_1 + R_f}{R_1 R_f} - (1 + \beta) \times \frac{V_{BE}}{R_1 R_f} (R_1 + R_f) + \frac{V_{BE}}{R_f}$$

$$= \frac{(1 + \beta)V}{R_1} - V_{BE} \times \left[\frac{1 + \beta}{R_1 \parallel R_f} - \frac{1}{R_f} \right]$$

و رفتار دیود در ناحیه مستقیم به شکل زیر می باشد:

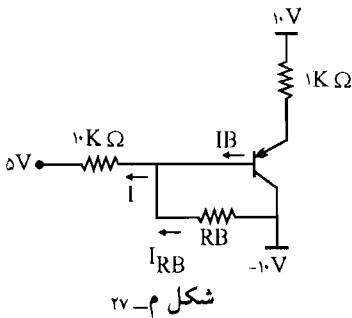
$$i = (V - V_f) \times \frac{1}{R_f}$$

$$R_f = \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

$$V = \frac{R_1}{1 + \beta} \left[\frac{1 + \beta}{R_1 \parallel R_f} - \frac{1}{R_f} \right] V_{BE}$$

۲۷ - در مدار شکل م - ۲۷ برای ترانزیستور $V_{EB}(\text{sat}) = 0.8V$ و $V_{EC}(\text{sat}) = 0.2V$

و $V_{BE}(\text{ON}) = 0.7V$ است. $\beta = 100$



الف) به ازای $R_B = 5K\Omega$ ولتاژ و جریان امیتر را به دست آورید.

ب) آیا می توان R_B را طوری تعیین نمود که ترانزیستور اشباع شود.

ج) آیا می توان R_B را طوری تعیین نمود که ترانزیستور قطع شود.

راه حل:

$$\text{KVL: } 10K\Omega \times I_E + 10I = 10 - 5 - 0.7 \Rightarrow I_E + 10I = 4/3 \quad (I)$$

(الف)

$$\text{KVL: } 10I + R_B \times I_{RB} = -10 - 5 \Rightarrow 10I + 5 \times (I - I_B) = -15 \Rightarrow$$

$$10I + 5 \left(I - \frac{I_E}{100 + 1} \right) = -15 \Rightarrow \frac{-5}{101} I_E + 15I = -15 \quad (II)$$

$$(I), (II) \Rightarrow \begin{cases} I_E + 10I = 4/3 \rightarrow I = \frac{4/3 - I_E}{10} & (III) \\ \frac{-5}{10} I_E + 15I = -15 \Rightarrow & \text{(II) قرار می دهیم} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{-5}{10} I_E + 15 \times \frac{4/3 - I_E}{10} = -15 \Rightarrow I_E = 13/84 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow V_E = 10 - 1 \text{ K}\Omega \times I_E = 10 - 13/84 = -3/84 \text{ V}$$

(ب) برای اینکه ترانزیستور ناحیه اشباع قرار گیرد باید $V_{CE} = -0.2 \text{ V}$ باشد و $V_{EB} = 0.8 \text{ V}$

$$\text{KVL: } 1 \times I_E = 10 - (-10) - 0.2 \Rightarrow I_E = 19/8 \text{ mA}$$

$$I_B(\text{sat}) = \frac{I_E}{1+\beta} = \frac{19/8}{101} = 0.196 \text{ mA}$$

$$\text{KVL: } 10I + 1 \times I_E = 10 - 5 - 0.8 \Rightarrow I = -1/56 \text{ mA}$$

$$I_{RB} = \frac{V_{EB} - V_{EC}}{R_B} = \frac{0.8 - 0.2}{R_B} = \frac{0.6}{R_B}$$

$$\text{از طرفی: } I_{RB} = I - I_B \Rightarrow \frac{0.6}{R_B} = -1/56 - I_B$$

$$\rightarrow I_B = -1/56 - \frac{0.6}{R_B}$$

ملاحظه می کنیم که I_B مقدار منفی دارد و نمی تواند از $I_B(\text{sat})$ بیشتر باشد پس ترانزیستور هیچ وقت به اشباع نمی رود.

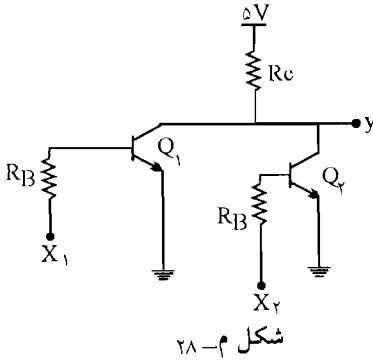
(ج) برای اینک ترانزیستور قطع شود:

$$\begin{cases} I_E = 0 \\ V_{EB} = 0 \end{cases} \Rightarrow \text{KVL: } 10I = 10 - 5 \rightarrow I = 0.5 \text{ mA} \quad , \quad I_{RB} = \frac{-10 - 10}{R_B} = \frac{-20}{R_B}$$

$$I_B = I - I_{RB} = 0.5 + \frac{20}{R_B}$$

برای اینکه ترانزیستور قطع شود باید $I_{B1} < -I_{C0}$ شود می بینیم که I_B مقداری مثبت است و نمی تواند از $I_{C0} -$ کوچکتر شود پس ترانزیستور هیچ وقت به حالت قطع نمی رود.

۲۸- در مدار شکل م-۲۸ با فرض اینکه $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2V$ و با صرف نظر از جریان I_{CB} جدول داده شده را تکمیل نمایید.



x_1	x_2	y
0 V	0 V	
0 V	5 V	
5 V	5 V	

✓ راه حل:

$x_1 = 0V$ پس در ترانزیستور Q_1 $I_B = 0$ و $x_2 = 0V$ در ترانزیستور Q_2 نیز $I_B = 0$ می‌باشد پس $y = V_o = 5V$ یعنی $V_o = V_{CC}$

x_1	x_2	y
0 V	0 V	5 V
0 V	5 V	0.2 V
5 V	5 V	0.2 V

در حالت دوم $x_1 = 0V$ و $x_2 = 5V$ در ترانزیستور اول I_B صفر می‌شود ولی در ترانزیستور دوم جریان

$$R_B I_{B_2} = 5 - V_{BE} \Rightarrow I_{B_2} = \frac{4.3}{R_B} \quad I_{B_2} \text{ داریم.}$$

اگر ترانزیستور Q_2 در حالت اشباع باشد $y = 0.2V$ می‌شود پس باید تحقیق کنید که Q_2 در حالت اشباع قرار دارد یا نه.

$$R_C(I_{C_1} + I_{C_2}) = 5 - V_{CE_2} \Rightarrow R_C I_{C_2} = 4/8 \Rightarrow I_{C_2} = \frac{4/8}{R_C}$$

$$\frac{4/3}{R_B} \geq \frac{4/8}{R_C \times \beta_{\min}} \quad \Leftrightarrow I_{B_2} > I_B(\text{sat}) = \frac{I_{C_2}}{\beta_{\min}}$$

و بین مقاومت‌های R_B و R_C باید رابطه فوق برقرار باشد تا ترانزیستور Q_2 در اشباع باشد.

$$\frac{R_B}{R_C} \leq \frac{4/3 \times \beta_{\min}}{4/8} \Rightarrow \frac{R_B}{R_C} \leq 0.896 \beta_{\min}$$

پس با $x_1 = 0$ و $x_2 = 5$ با شرایط فوق $y = 0.2$ ولت می‌شود.
 واگر $x_1 = x_2 = 5$ ولت باشند.

$$I_{B_1} = I_{B_2} = \frac{4/3}{R_B}$$

با اشباع بودن Q_1 و Q_2 خواهیم داشت ($I_{C_1} = I_{C_2}$)

$$V_{CE_2} = V_{CE_1} = 5 - R_C(I_{C_1} + I_{C_2}) = 5 - I_{C_2} \times R_C = 0.2V$$

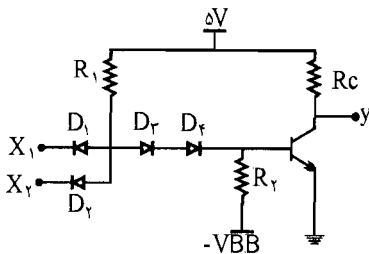
$$\Rightarrow I_{C_2} = \frac{4/8}{2R_C}$$

$$I_{B_2} \geq \frac{I_{C_2}}{\beta_{min}} \Rightarrow \frac{4/3}{R_B} \geq \frac{4/8}{2R_C \beta_{min}}$$

$$\frac{R_B}{R_C} \leq \frac{4/3 \times 2 \times \beta_{min}}{4/8} \Rightarrow \frac{R_B}{R_C} \leq 2 \times 0.896 \beta_{min}$$

لذا با شرط فوق هر دو ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار دارند و $y = 0.2$ ولت می‌باشد.

۲۹- مدار شکل م - ۲۹ یک NAND از خانواده DTL است. با فرض اینکه ولتاژ هدایت هر دیود $0.7V$ بوده و برای ترانزیستور، ولتاژهای آستانه هدایت، ناحیه فعال و اشباع بیس - امیتر به ترتیب برابر $0.5V$ و $0.7V$ و $0.8V$ در نظر گرفته شوند، در مورد نحوه عملکرد مدار و مقدار خروجی y به ازای مقادیر جدول داده شده بحث کنید. ($V_{CE}(\text{sat}) = 0.2V$)



x_1	x_2	y
$0V$	$0V$	
$0V$	$5V$	
$5V$	$5V$	

x_1	x_2	y
$0V$	$0V$	$5V$
$0V$	$5V$	$5V$
$5V$	$5V$	$0.2V$

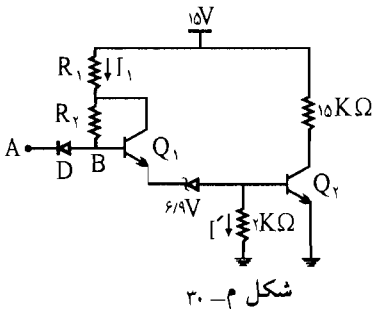
✓ (۱۰هـ حل):

در حالت اول وقتی هر دو ورودی صفر باشند ترانزیستور در حالت قطع قرار دارد و در این حالت ولتاژ خروجی یعنی y با $V_{CC} = 5V$ برابر می‌شود یعنی $y = V_{CC} = 5V$
 در حالت دوم وقتی که یکی صفر و دیگری $5V$ می‌باشد باز هر دو ترانزیستور در حالت قطع قرار دارد و ولتاژ خروجی برابر است با $V_{CC} = 5V$

در حالت سوم وقتی هر دو ورودی $5V$ ولت باشند ترانزیستور در حالت اشباع قرار دارد و ولتاژ خروجی با V_{CE} برابر است یعنی: $y = V_{CE} (sat) = 0.2V$

۳۰- مدار شکل م- ۳۰ بخشی از یک دروازه منطقی است که به صورت یک معکوس کننده عمل می‌کند. با فرض ایده‌آل بودن دیود D ، $V_{CE} (sat) = 0.2V$ و $V_{BE} (sat) = 0.8V$.

الف) وضعیت ترانزیستورهای Q_1 و Q_2 و دیود D را در $Y=0$ و $Y=1$ تعیین نمایید. (منظور 0 و 1 منطقی است).



شکل م- ۳۰

ب) فرض کنید در ورودی و خروجی، این مدار به دروازه مشابه خود وصل شده باشد. ولتاژ نقاط A و B را برای $Y=0$ و $Y=1$ تعیین نمایید.
 ج) در صورتی که $\beta_1 = \beta_2 = 20$ باشد، R_1 و R_2 را طوری تعیین کنید که در حالت $Y=0$ جریان I_1 برابر $I_{C2} (sat) / 2$ شود.

✓ (۱۱هـ حل):

الف) با فرض $Y=0$ ، ترانزیستور Q_2 به اشباع می‌رود و دیود زنر در حالت شکست قرار می‌گیرد پس ولتاژ بیس ترانزیستور Q_1 به صورت زیر می‌شود:

$$KVL: V_{B_1} = V_{B_{E_1}} + V_Z + V_{B_{E_2}} = 0.7 + 6/9 + 0.7 = 8/3V$$

و وقتی $V_{B_1} = 8/3V$ شود در این صورت V_A برابر $15V$ خواهد بود یعنی ورودی در سطح (۱) می‌باشد در این صورت دیود D خاموش می‌باشد و ترانزیستور Q_1 روشن می‌باشد.

و اگر $V_A = 0.2V$ باشد که برابر سطح منطقی صفر است در این صورت V_B برابر است با:

$$V_B = 0.2 + 0.7 = 0.9$$

یعنی $V_B = 0.9V$ می‌شود پس Q_1 و Q_2 هر دو قطع می‌باشد و $Y=1$ می‌شود پس

$V_Y = 15V$ در سطح منطقی یک باشد پس در حالت $Y = 1$ هر دو ترانزیستور خاموش و دیود D روشن می‌باشد و دیود Znr در بایاس معکوس می‌باشد و قطع می‌شود.
 (ب) V_B و V_A در بند الف محاسبه شده است.

(ج) در حالتی که $Y = 0$ می‌باشد، Q_2 به اشباع می‌رود و دیود Znr در حالت شکست می‌باشد و داریم:

$$I_{C_2}(\text{sat}) = \frac{15 - V_Y}{15} = \frac{15 - 0/2}{15} = \frac{14/8}{15} = 0/99 \text{ mA}$$

با توجه به جریان I_1 داریم:

$$I_1 = \frac{I_{C_2}(\text{sat})}{2} = \frac{0/99}{2} = 0/495 \text{ mA}$$

$$I_{E_1} = I' + I_{B_2} \quad I_{E_1} = \frac{V_{BE_2}}{2} + \frac{I_{C_2}}{\beta} = \frac{0/8}{2} + \frac{0/99}{20}$$

$$I_{E_1} = 0/4 + 0/049 = 0/449 \text{ mA}$$

$$I_{C_1} = \frac{\beta}{1+\beta} I_{E_1} = \frac{20}{1+20} \times 0/449 = 0/43 \text{ mA}$$

$$V_B = V_{BE_1} + V_Z + V_{BE_2} = 0/7 + 6/9 + 0/8 = 1/4$$

$$V_B = 15 - R_1 I_1 - R_2 (I_1 - I_{C_1}) = 1/4$$

$$15 - R_1 \times 0/495 - R_2 (0/495 - 0/43) = 1/4$$

$$0/65 R_2 = 6/6 - 0/495 R_1 \quad (I)$$

طرف دوم رابطه (I) باید عدد مثبتی باشد پس:

$$6/6 - 0/495 R_1 > 0 \rightarrow R_1 < 13/46 \text{ K}\Omega$$

$$\text{فرض: } R_1 = 12/25 = R_2 = \frac{6/6 - 0/495 \times 12/25}{0/65} = 1/5 \text{ K}\Omega$$

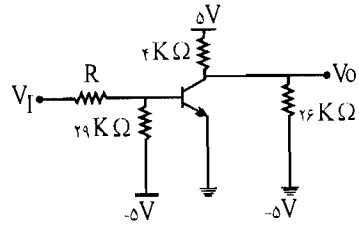
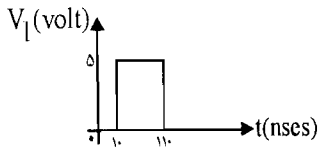
۳۱- در مدار شکل م- ۳۱، با فرض $\beta = 100$ و $V_{CE}(\text{sat}) = 0/2V$

(الف) حداکثر مقدار R را طوری تعیین کنید که با شکل موج ورودی نشان داده شده تغییر وضعیت ترانزیستور بین حالت‌های قطع و اشباع امکان پذیر باشد.

(ب) ولتاژ خروجی بین چه مقادیری تغییر می‌کند؟

(ج) در صورتی که ترانزیستور مورد نظر $t_s = 60 \text{ nsec}$ و $t_f = 10 \text{ nsec}$ و $t_r = 20 \text{ nsec}$ و

$t_d = 20 \text{ nsec}$ باشد، شکل موج V_o را با مقیاس مناسب رسم کنید.



شکل م-۳۱

راه حل:

(الف)

$$V_B = \frac{-5 \times R}{R + 29 \text{K}\Omega} + \frac{29 V_I}{R + 29}$$

$$R_B = 29 \parallel R = \frac{29R}{29 + R}$$

$$V_C = \frac{-5 \times 4}{4 + 26} + \frac{5 \times 26}{26 + 4} = -\frac{2}{3} + \frac{13}{3} = 3.7 \text{V}$$

$$R_C = 4 \text{K}\Omega \parallel 26 \text{K}\Omega = \frac{4 \times 26}{26 + 4} = 3.5 \text{K}\Omega$$

$$V_I = 0 \rightarrow V_B = \frac{-5R}{R + 29}$$

به ازای تمام مقادیر R مقادیر V_B منفی است و ترانزیستور در حالت قطع قرار دارد.

$$V_I = 5 \text{V}$$

در حالت اشباع داریم:

$$V_B = \frac{-5R + 29 V_I}{R + 29} = 0.8$$

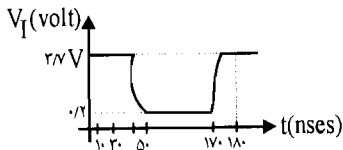
$$\frac{-5R + 29 \times 5}{R + 29} = 0.8 \rightarrow -5R + 145 = 0.8R + 23/2$$

$$5/8 R = 121/8 \rightarrow R_{\max} = 21 \text{K}\Omega$$

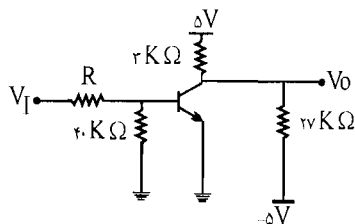
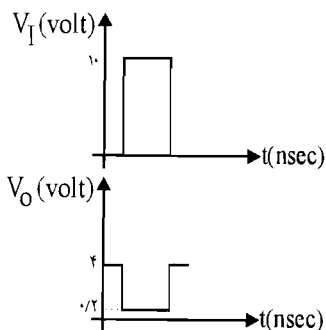
(ب) بین $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{V}$ و $V_C = 3.7 \text{V}$

(ج) وقتی $V_I = 5 \text{V}$ است، ترانزیستور در حالت اشباع قرار دارد و $V_o = 0.2 \text{V}$ می‌باشد، و وقتی

$V_I = 0 \text{V}$ است، ترانزیستور در حالت قطع قرار دارد و $V_o = 3.7 \text{V}$ می‌باشد.



۳۲- در مدار شکل م- ۳۲، با فرض $\beta = 100$ و $V_{CE(sat)} = 0.2V$ ، به ازای شکل موج ورودی V_I ، شکل موج خروجی V_O حاصل شده است. (از زمان‌های قطع و وصل ترانزیستور صرف نظر شده است) مقدار مقاومت R چقدر باید باشد؟ این مقدار حداقل است یا حداکثر؟



شکل م- ۳۲

☑ راه حل:

مدار معادل تونن را در کلکتور در نظر می‌گیریم:

$$V_C = 5 \times \frac{27}{27+3} + \frac{(-5) \times 3}{27+3} = 4V$$

$$R_C = 3K\Omega \parallel 27K\Omega = \frac{3 \times 27}{3+27} = 2.7K\Omega$$

همچنین مدار معادل تونن در بیس به صورت زیر است:

$$V_B = \frac{V_I \times 40}{40 + R}$$

$$R_B = R \parallel 40 = \frac{40 \cdot R}{R + 40}$$

وقتی $V_I = 0V \rightarrow V_O = V_C = 4V$ و ترانزیستور در حالت قطع است

وقتی $V_I = 10V$ ترانزیستور در حالت اشباع قرار دارد.

$$V_I = 10V \rightarrow V_B = \frac{10 \times 40}{40 + R} = 0.8$$

$$\frac{400}{40 + R} = 0.8 \rightarrow 400 = 32 + 0.8R \rightarrow R = 460K\Omega$$

این مقدار برای R حداکثر می‌باشد چون اگر مقدار R از این مقدار بیشتر باشد مقدار V_B از 0.8 کوچکتر می‌شود و ترانزیستور به حالت قطع پیش می‌رود.

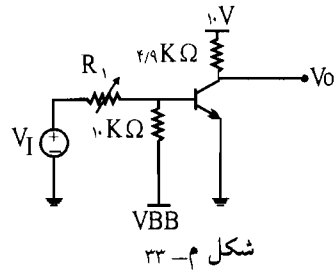
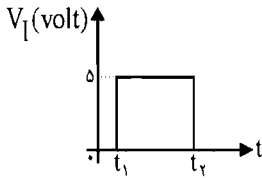
۳۳- در مدار کلید ترانزیستوری شکل م- ۳۳، $I_{CBO} = 0.1\mu A$ (در دمای $25^\circ C$) و $20 \leq \beta \leq 50$ و

$V_{BE(sat)} = 0.8V$ و $V_{BE(cut)} = 0$ و $0 \leq R_1 \leq 10K\Omega$ است.

الف) در صورتی که بخواهیم به ازای $V_I = 0$ ترانزیستور تا دمای $175^\circ C$ در حالت قطع باشد،

حداکثر مقدار ولتاژ منبع V_{BB} چقدر باید باشد؟

ب) به ازای $R_1 = 6\text{ K}\Omega$ و $V_{BB} = -5\text{ V}$ ، در دمای 25°C شکل موج ولتاژ خروجی را برای شکل موج ورودی V_I نشان داده شده به دست آورید.
ج) وجود مقاومت متغیر R_1 چه اشکال عملی می تواند داشته باشد؟



راه حل:

$$V_B = V_I \times \frac{10}{R_1 + 10} + \frac{V_{BB} \times R_1}{R_1 + 10}$$

الف) مدار معادل تونن ورودی را می نویسیم:

$$R_B = R_1 \parallel 10\text{ K}\Omega$$

$$I_{CBO}(175) = I_{CBO}(25) \times 2^{\frac{175-25}{10}} = 0.01\mu\text{A} \times 2^{15} = 327.68\mu\text{A}$$

در حالت قطع باید داشته باشیم $I_B \leq -I_{CBO}$

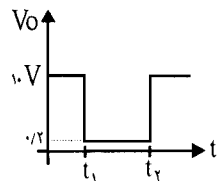
$$I_B = \frac{V_{BB}}{10} \Rightarrow \frac{V_{BB}}{10} \leq -327.68 \times 10^{-3} \Rightarrow V_{BB} \leq 3.28\text{ V}$$

ب)

$$V_B = \frac{10 \cdot V_I}{10 + R_1} + \frac{V_{BB} R_1}{10 + R_1} \begin{cases} V_{BB} = -5\text{ V} \\ R_1 = 6\text{ K}\Omega \end{cases}$$

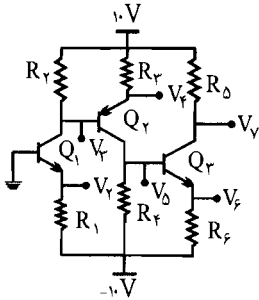
$$V_B = \frac{10 \cdot V_I}{16} - \frac{30}{16}, \quad R_B = \frac{10 \times 6}{10 + 6} = \frac{60}{16} = 3.75$$

$$\rightarrow \begin{cases} V_I = 0 \rightarrow V_B = \frac{-30}{16} \rightarrow \text{ترانزیستور قطع} \rightarrow V_O = V_{CC} = 10\text{ V} \\ V_I = 5 \rightarrow V_B = \frac{20}{16} \rightarrow \text{ترانزیستور اشباع} \rightarrow V_O = 0.2\text{ V} \end{cases}$$



ج) اگر R_1 پتانسیومتر باشد R_1 صفر باشد در این صورت $V_I = 5\text{ V}$ ، همه ولتاژ ورودی روی پیوند بیس، آمیتر می افتد که این کار موجب آسیب دیدن ترانزیستور می شود.

۳۴- در مدار شکل م- ۳۴ با فرض $\beta = \infty$ ، مقادیر مقاومت‌ها را طوری تعیین کنید که جریان کلکتورهای Q_1 و Q_2 و Q_3 به ترتیب ۲، ۲ و ۴ میلی‌آمپر؛ $V_3 = 0$ ، $V_5 = -4$ ، $V_7 = 2$ ولت باشد. با مقادیر به دست آمده فوق به ازای $\beta = 100$ مقادیر V_3 و V_2 و V_5 و V_6 و V_7 را به دست آورید.



شکل م- ۳۴

☑ راه حل:

$$\beta = \infty \rightarrow I_B = 0$$

$$\begin{cases} I_{Q_1} = 2 = \frac{10 - V_2}{R_2} = \frac{10 - 0}{R_2} \rightarrow R_2 = 5K\Omega \\ I_{Q_2} = 2 = \frac{10 - V_4}{R_4} = \frac{10 - (V_2 + 0/10)}{R_4} = \frac{10 - 0/10}{R_4} \rightarrow R_4 = 4/65K\Omega \\ I_{Q_3} = 4 = \frac{10 - V_6}{R_6} = \frac{10 - (2)}{R_6} \rightarrow R_6 = 2K\Omega \end{cases}$$

$$\text{KVL: } V_2 - (-10) = R_1 \times I_{Q_1} = 2R_1 \rightarrow (0 - 0/10) + 10 = 2R_1 \rightarrow R_1 = 4/65K\Omega$$

$$\text{KVL: } V_4 - (-10) = R_3 \times I_{Q_2} = 2R_3 \rightarrow 10 - 4 = 2R_3 \rightarrow R_3 = 3K\Omega$$

$$\text{KVL: } V_6 - (-10) = R_5 \times I_{Q_3} = 4R_5 \rightarrow (V_4 - 0/10) + 10 = 4R_5$$

$$\rightarrow 10 - 4/10 = 4R_5 \rightarrow R_5 = 1/325K\Omega$$

$$V_2 = 0 - 0/10 = -0/10V$$

$$:\beta = 100$$

$$I_{E_1} = \frac{10 - 0/10}{4/65} = 2mA \rightarrow I_{C_1} = 1/98mA \rightarrow I_{C_1} = \frac{10 - V_2}{R_2} = \frac{10 - 0}{5} = 1/98mA$$

$$10 - V_2 = 9/9 \rightarrow V_2 = 0/1V \rightarrow V_4 = V_2 + 0/10 = 0/1 + 0/10 = 0/10V$$

$$V_4 = -10 + R_3 I_{C_2} \Rightarrow I_{C_2} = \frac{\beta}{1 + \beta} I_{E_2}$$

$$I_{C_2} = \frac{\beta}{1 + \beta} I_{E_2} \rightarrow I_{E_2} = \frac{10 - V_4}{R_3} = \frac{10 - 0/10}{4/65} = 1/98mA$$

$$I_{C_r} = \frac{100}{101} \times 1/98 = 1/96 \text{ mA} \rightarrow V_{\Delta} = -10 + 3 \times 1/96 = -4/12 \text{ V}$$

$$V_{\varphi} = V_{\Delta} - 0.7 \text{ V} = -4/12 - 0.7 \text{ V} = -4/12 \text{ V}$$

$$V_V = 10 - R_{\Delta} I_{C_r}$$

$$I_{C_r} = \frac{\beta}{\beta + 1} I_{E_r} \rightarrow I_{E_r} = \frac{V_{\varphi} - (-10)}{R_{\varphi}} = \frac{-4/12 + 10}{1/325} = 3/9 \text{ mA}$$

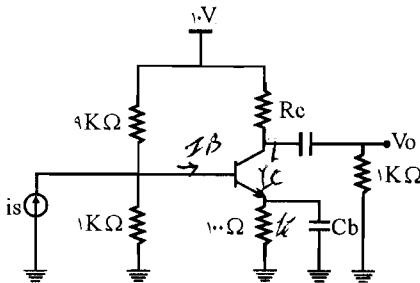
$$\rightarrow I_{C_r} = \frac{100}{101} \times 3/9 \text{ mA} = 3/18 \text{ mA}$$

$$\rightarrow V_V = 10 - 2 \times 3/18 \text{ mA} = 2/28 \text{ V}$$

فصل ۵

طراحی مدارهای بایاس ترانزیستور

۱- در مدار شکل م- ۱، با فرض $\beta = 100$ و $V_{CE(sat)} = 0.2V$ ، مقدار R_C را طوری تعیین نمایید که دامنه نوسان متقارن ولتاژ V_O حداکثر شود.



شکل م- ۱

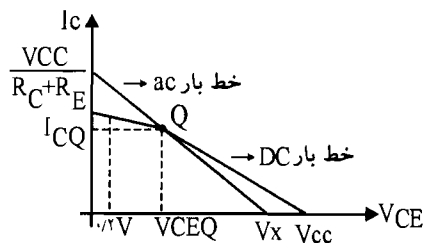
☑ راه حل:

مدار معادل ورودی به صورت زیر می باشد:

$$\begin{cases} V_{th} = \frac{10V \times 1K\Omega}{1K\Omega + 9K\Omega} = 1V \\ R_{th} = 1K\Omega \parallel 9K\Omega = \frac{9}{10} = 0.9K\Omega \end{cases}$$

$$I_{EQ} \approx I_{CQ}$$

$$I_{EQ} = \frac{V_{th} - 0.7V}{R_E + \frac{R_{th}}{\beta}}$$



$$\rightarrow I_{EQ} = \frac{1 - 0.7}{0.1 + \frac{0.9}{100}} = \frac{0.3}{0.1 + 9 \times 10^{-3}} = 2.75 \text{ mA}$$

$$\rightarrow I_{CQ} = 2.75 \text{ mA}$$

برای اینکه دامنه نوسان متقارن حداکثر شود باید:

$$V_{CEQ} = \frac{V_x - 0.7}{2} \quad (I)$$

$$\text{KVL: } V_{CEQ} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C = 10 - (0.1 + R_C) \times 2.75 \quad (II)$$

$$\text{ac بار } V_{CE} = V_{CEQ} = -R_{ac}(I_C - I_{CQ})$$

$$V_x = 0 \rightarrow I_C = 0 \rightarrow V_x = R_{ac} I_{CQ} + V_{CEQ} \quad (III)$$

$$R_{ac} = 1 \text{ k}\Omega \parallel R_C = \frac{R_C}{1 + R_C}$$

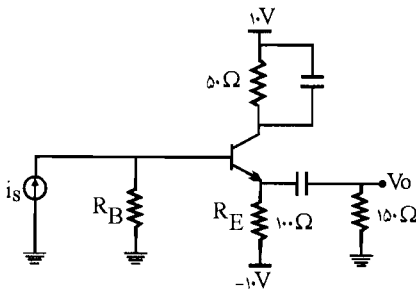
(II) و (III) را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

$$10 - 2.75(0.1 + R_C) = \frac{\left(\frac{R_C}{1 + R_C}\right) \times 2.75 + 10 - (0.1 + R_C) \times 2.75 - 0.7}{2}$$

این معادله یک معادله درجه (2) می‌باشد که با حل آن مقدار $R_C = 2.83 \text{ k}\Omega$ به دست می‌آید.

2- در مدار شکل م-2، با فرض $R_B \ll \beta R_E$ ، نقطه کار را به دست آورده، خط بارها را رسم نمایید.

حداکثر دامنه نوسان متقارن V_o را مشخص کنید.



شکل م-2

$$\text{KVL: } V_{CEQ} = V_{CC} - V_{EE} - (R_C + R_E) I_{CQ} \quad (I)$$

☑ راه حل:

KVL در حلقه R_B و R_E و V_{BE} و V_{EE} و $I_{CQ} = ?$:

$$\rightarrow \frac{R_B}{\beta} I_{CQ} + 0.7 + R_E I_E - 10 = 0 \Rightarrow I_{CQ} = \frac{9.3}{R_E + \frac{R_B}{\beta}}$$

طبق فرض مسئله $R_B \ll \beta R_G$ یعنی $R_B \ll R_E$ از $\frac{R_B}{\beta} \leftarrow \frac{R_B}{\beta} \ll R_E$ در برابر R_E صرف نظر می کنیم.

$$I_{CQ} = \frac{9/3}{R_E} = \frac{9/3}{0/1} = 93 \text{ mA}$$

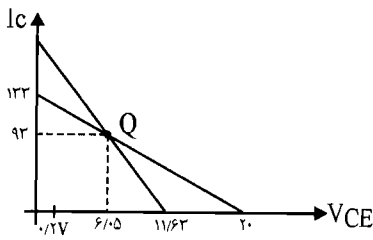
$$(I) \rightarrow V_{CEQ} = 10 - (-10) - (0/05 + 0/1) \times 93 = 20 - 0/15 \times 93 = 6/05 \text{ V}$$

$$\text{خط بار CD: } 20 - 0/15 I_C = V_{CE}$$

$$\text{خط بار ac: } V_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac}(I_C - I_{CQ}), \quad R_{ac} = 0/1 \text{ K}\Omega \parallel 0/15 \text{ K}\Omega = 60 \Omega$$

$$I_C = 0 \rightarrow V_{CE} - V_{CEQ} = 60 \Omega I_{CQ} \times 10^{-3} = 0/06 I_{CQ} \rightarrow \text{محل تقاطع خط بار ac با ولتاژ}$$

$$\rightarrow V_{CE} = V_x = 0/06 I_{CQ} + V_{CEQ} = 11/63$$



حداکثر دامنه نوسان متقارن V_O :

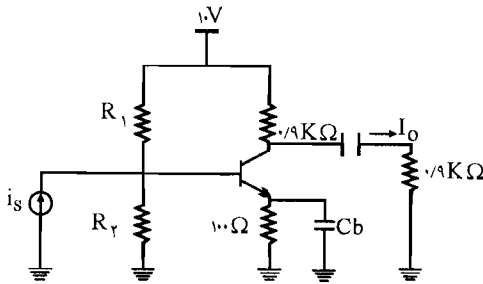
$$V_O^+ = V_x - V_{CEQ} = 11/63 - 6/05 = 5/58 \text{ V}$$

حداقل دامنه نوسان متقارن V_O :

$$V_O^- = V_{CEQ} - V_{CE}(\text{sat})$$

$$\rightarrow V_O^- = 6/05 - 0/2 = 5/85$$

۳- تقویت کننده شکل م-۳ را با فرض $\alpha = 0/99$ در نظر بگیرید.



شکل م-۳

الف) R_1 و R_2 را طوری محاسبه کنید که دامنه نوسان متقارن جریان i_o حداکثر شود.

ب) خط بارهای ac و DC را رسم کنید؛ حداکثر دامنه جریان کلکتور چقدر است؟

ج) حداکثر دامنه جریان i_o چقدر

می تواند باشد؟

✓ (راه حل):

الف) شرط اینکه دامنه نوسان خروجی حداکثر شود این است که نقطه کار در وسط خط بار ac قرار گیرد.

$$R_{ac} = 0/9 \text{ K}\Omega \parallel 0/9 \text{ K}\Omega = \frac{0/9 \times 0/9}{0/9 + 0/9} = 0/45 \text{ K}\Omega$$



$$R_{DC} = 0.9 \text{ K}\Omega + 0.1 \text{ K}\Omega = 1 \text{ K}\Omega$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = \frac{10 \text{ V}}{1 + 0.45} = 6.9 \text{ mA}$$

$$\text{مدار معادل تونن: } V_{th} = \frac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad (I)$$

$$R_{th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_{th}}{R_1} \quad (II)$$

$$\text{از طرفی: } R_{th} = \frac{\beta R_E}{10} \Rightarrow \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0.99}{1 - 0.99} = 99 \rightarrow R_{th} = \frac{99 \times 0.1}{10} = 0.99 \text{ K}\Omega$$

$$(II): \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_{th}}{R_1} = \frac{0.99}{R_1}$$

$$(I): V_{th} = \frac{10 \times 0.99}{R_1} = \frac{9.9}{R_1}$$

$$\text{از طرفی: } I_{CQ} = \beta I_B \Rightarrow 6.9 \text{ mA} = 99 \times \frac{V_{th} - 0.7 \text{ V}}{R_{th} + \beta R_E} = 99 \times \frac{\left(\frac{9.9}{R_1} - 0.7\right)}{0.99 + 99 \times 0.1}$$

$$\rightarrow 6.9 \text{ mA} = \frac{\frac{9.9}{R_1} - 0.7}{0.11 + 0.1} = \frac{\frac{9.9}{R_1} - 0.7}{0.11} \rightarrow 0.759 = \frac{9.9}{R_1} - 0.7$$

$$\rightarrow R_1 = 6.78 \text{ K}\Omega$$

$$\rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{0.99}{R_1} \rightarrow \frac{R_2}{6.78 + R_2} = \frac{0.99}{6.78} = 0.15$$

$$\rightarrow R_2 = 1.017 + 0.15 R_2 \rightarrow R_2 = 1.19 \text{ K}\Omega$$

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

$$\text{ac بار: } V_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac} (I_C - I_{CQ})$$

$$\text{از طرفی: } V_{CEQ} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_{CQ} = 10 - (0.1 + 0.9) \times 6.9 = 3.17$$

محل تقاطع خط بار ac با ولتاژ:

$$i_C = 0 \rightarrow V_{CE} = 3.17 + 0.45 \times 6.9 \text{ mA} = 6.2 \text{ V}$$

محل تقاطع خط بار ac با جریان:

$$V_{CE} = 0 \rightarrow -V_{CEQ} = -R_{ac} (i_C - I_{CQ}) \rightarrow$$

$$-3/1 = -0.45(i_C - 6/9) \rightarrow i_C - 6/9 = 6/86 \rightarrow i_C = 13/77 \text{ mA}$$

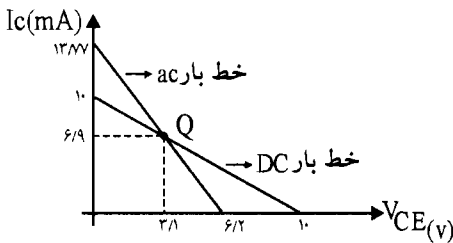
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \rightarrow I_C = 13/77 \text{ mA}$$

محل تقاطع خط بار DC با ولتاژ

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \rightarrow I_C = 0 \rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 10 \text{ V}$$

محل تقاطع خط بار DC با جریان

$$V_{CE} = 0 \rightarrow I_C = \frac{10}{0.1 + 0.9} = 10 \text{ mA}$$



حداکثر مقدار جریان کلکتور

$$i_{C \max} = i_C - I_{CQ} = 13/77 - 6/9 = 6/87 \text{ mA} \approx 6/9 \text{ mA}$$

(ج) از قانون تقسیم جریان استفاده می‌کنیم:

$$i_o = i_C \times \frac{R_L}{R_C + R_L}$$

$$i_{o \max} = i_{C \max} \times \frac{0.9 \text{ K}\Omega}{0.9 \text{ K}\Omega + 0.9 \text{ K}\Omega} = 6/9 \text{ mA} \times \frac{1}{2} = 3/45 \text{ mA}$$

۴- در مدار شکل م-۴، با فرض $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{ V}$ و $V_{EB} = 0.7 \text{ V}$ و $50 < \beta < 100$ ،

الف) معادل خط بارهای DC و ac را

به دست آورید.

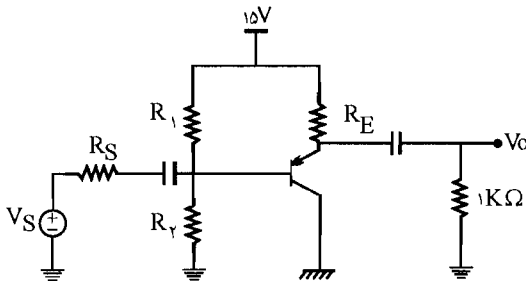
ب) مقادیر مقاومت‌های R_1 ، R_E و R_2

را طوری تعیین کنید که نقطه کار

نسبت به تغییرات β پایدار بوده و

V_o بتواند در سیکل مثبت تا ۸ ولت و

در سیکل فرض تا ۴ ولت نوسان بدون اعوجاج داشته باشد.



شکل م-۴

✓ (۱۵) الف:

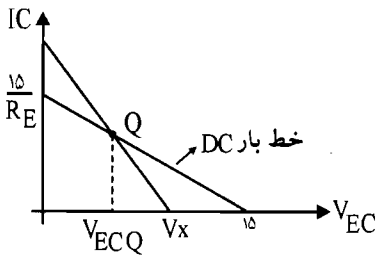
$$\text{DC بار خط: } V_{EC} = V_{CC} - I_C(R_E + R_C) = V_{CC} - I_C R_E = 15 - I_C R_E$$

(الف)

خط بار ac: $V_{EC} - V_{ECQ} = -R_{ac}(i_C - I_{CQ})$

از طرفی: $R_{ac} = R_E \parallel K\Omega = \frac{R_E}{1 + R_E}$

برای رسم خط بارهای DC و ac ابتدا محل تقاطع این خطوط با V_{CE} و I_C را پیدا می‌کنیم سپس آنها را رسم می‌کنیم.



محل تلاقی خط بار DC با ولتاژ:

$$I_C = 0 \rightarrow V_{EC} = V_{CC} = 15$$

محل تلاقی خط بار DC با جریان:

$$V_{EC} = 0 \rightarrow V_{CC} - I_C R_E = 0$$

$$\Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_E} = \frac{15}{R_E}$$

$$I_C = 0 \rightarrow V_{EC} = V_{ECQ} + R_{ac} I_{CQ} = V_x$$

محل تلاقی خط بار ac بار ولتاژ:

$$V_{EC} = 0 \rightarrow -V_{ECQ} = -R_{ac}(i_C - I_{CQ})$$

محل تلاقی خط بار ac با جریان:

$$\begin{cases} V_s^- = 4V \\ V_{EC}(\text{sat}) = 0.7 \end{cases} \rightarrow V_{ECQ} - 0.7 = 4 \rightarrow V_{ECQ} = 4.7 \text{ (ب)}$$

$$V_s^+ = 8V \rightarrow V_x = 8 + 4.7 = 12.7V$$

$$\text{خط بار DC } V_{ECQ} = V_{CC} - I_{CQ}(R_C + R_E) = 15 - R_E I_{CQ} \Rightarrow 15 - 4.7 = I_{CQ} R_E \quad (I)$$

$$\text{خط بار ac } I_C = 0 \rightarrow V_x = V_{ECQ} + R_{ac} I_{CQ} = 4.7 + \frac{R_E}{1 + R_E} I_{CQ}$$

$$12.7 = 4.7 + \frac{R_E}{1 + R_E} I_{CQ} \rightarrow 8 = \frac{R_E}{1 + R_E} I_{CQ} \quad (II)$$

با استفاده از روابط (I) و (II) داریم:

$$8/8 = 8(1 + R_E) \rightarrow (1 + R_E) = 1/35 \rightarrow R_E = 0.35 \text{ K}\Omega$$

طبق فرض مسئله نقطه کار نسبت به β پایدار بوده در نتیجه داریم:

$$R_{th} = \frac{\beta_{\min} R_E}{10} = \frac{50 \times 0.35}{10} = 1.75 \text{ K}\Omega$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - 0.7 - V_{th}}{R_E + \frac{R_{th}}{\beta_{av}}} = \frac{15 - 0.7 - V_{th}}{0.35 + \frac{1/75}{\beta_{av}}} \quad (III)$$

$$\beta_{av} = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} = \frac{50 + 100}{2} = 75$$

$$V_{ECQ} = V_{CC} - R_E I_{CQ} \rightarrow I_{CQ} = \frac{15 - 4/2}{0.35} = 30.86 \text{ mA}$$

$$(III) \rightarrow 30.86 = \frac{14/3 - V_{th}}{0.35 + \frac{1/75}{75}} \rightarrow 14/3 - V_{th} = 11/52 \rightarrow V_{th} = 2/75 \text{ V}$$

$$\text{از طرفی } V_{th} = \frac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{15 R_2}{R_1 + R_2}$$

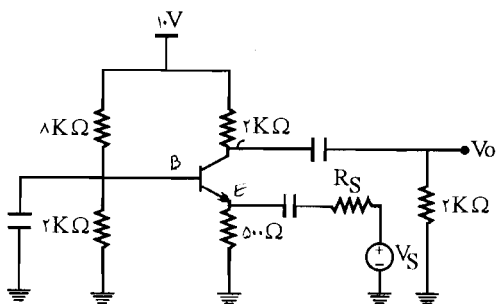
$$R_{th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 1/75 \rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1/75}{R_1}$$

$$\rightarrow V_{th} = \frac{15 \times 1/75}{R_1} = 2/75 \rightarrow R_1 = 9/54 \text{ K}\Omega$$

$$\frac{R_2}{9/54 + R_2} = \frac{1/75}{9/54} = 0.18 \rightarrow R_2 = 1/72 + 0.18 R_2 \rightarrow$$

$$\rightarrow R_2 = 2/1 \text{ K}\Omega$$

۵- در تقویت کننده شکل م-۵ با فرض $\beta = 100$ و $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ ، مشخصات نقطه کار و حداکثر دامنه نوسان متقارن V_o را به دست آورید.



شکل م-۵

✓ راه حل:

مدار بیس مشترک است. ابتدا مدار معادل تونن ورودی را می یابیم:

$$V_{th} = \frac{10 \times 2 \text{ K}\Omega}{2 \text{ K}\Omega + 8 \text{ K}\Omega} = 2 \text{ V}$$

$$R_{th} = 2K\Omega \parallel 8K\Omega = \frac{2 \times 8}{2+8} = 1/6 K\Omega$$

در معادله خط بار ac داریم:

$$I_{CQ} = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{th}}{\beta}} = \frac{2 - 0.7}{0.5 + \frac{1/6}{100}} = 2/52 \text{ mA}$$

$$V_{CBQ} = (V_{CC} - V_{BE}) - (R_C + R_E) I_C = (10 - 0.7) - (2 + 0.5)(2/52) = 3V$$

$$\rightarrow \text{مختصات نقطه کار} \begin{cases} I_{CQ} = 2/52 \text{ mA} \\ V_{CE} = 3V \end{cases}$$

در معادله خط بار ac داریم:

$$V_{CB} - V_{CBQ} = -R_{ac}(i_C - I_{CQ})$$

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

$$i_C = 0 \rightarrow V_{CB} = 3 + 2/52 = 5/52 V = V_x$$

به دست آوردن حداکثر دامنه نوسان متقارن V_o :

$$V_o^- = V_{CBQ} - V_{CBQ}(\text{sat})$$

$$V_{CB}(\text{sat}) = V_{CE}(\text{sat}) - V_{BE}(\text{sat}) = 0.2 - 0.8 = -0.6$$

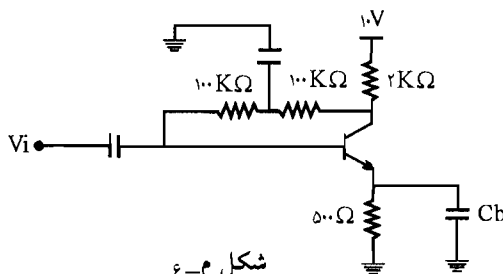
$$\rightarrow V_o^- = 3V - (-0.6) = 3.6V$$

$$V_o^+ = V_x - V_{CBQ} = V_{CB} - V_{CBQ} = 5/52 - 3 = 2/52 V$$

$$\rightarrow V_o^+ = \text{حداکثر دامنه نوسان متقارن} = V_o^+ = 2/52 V$$

از دو مقدار به دست آمده کمترین مقدار به عنوان حداکثر دامنه نوسان متقارن V_o می‌باشد.

۶- در مدار شکل م-۶، با فرض $\beta = 400$ و $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2V$ ، مختصات نقطه کار ترانزیستور را به دست آورید. حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور چقدر است.



راه حل:

معادله خط بار DC:

$$\text{KVL: } V_{CEQ} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C = 10 - (2 + 0.5) I_C \quad (I)$$

$$\text{KVL: } 10 - 2(1 + \beta) I_B - 200 I_B - 0.7 - 0.5(1 + \beta) I_B = 0$$

$$\rightarrow I_B = \frac{10 - 0.7}{(2 + 0.5) \times 4 / (1 + 200)} = 7/7 \text{ mA} \rightarrow I_{CQ} = \beta I_B = 400 \times 7/7 \mu\text{A} = 3/0.8 \text{ mA}$$

$$(I) \rightarrow V_{CEQ} = 10 - 2/5 \times 3/0.8 = 2/3 \text{ V}$$

$$R_{ac} = 2 \text{ K}\Omega \parallel 100 \text{ K}\Omega = \frac{2 \times 100}{2 + 100} = 1/96 \text{ K}\Omega$$

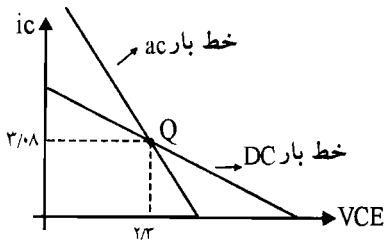
$$\text{معادله خط بار ac: } V_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac}(i_C - 3/0.8)$$

$$V_{CE} = 0 \rightarrow i_C = 4/26 \text{ mA}$$

$$i_{C \max} = i_C - I_{CQ} = 4/26 - 3/0.8 = 1/18 \text{ mA}$$

حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور

مختصات نقطه کار:



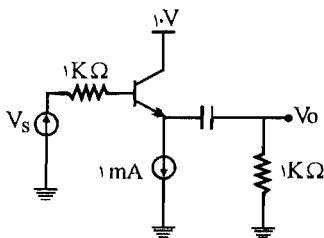
$$\begin{cases} I_{CQ} = 3/0.8 \text{ mA} \\ V_{CEQ} = 2/3 \text{ V} \end{cases}$$

۷- در مدار شکل م-۷، حداکثر دامنه ولتاژ ورودی V_s برای هر یک از حالت‌های زیر با فرض

$\beta = \infty$ و $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{ V}$ و $V_{BE} = 0.7$ چقدر می‌تواند باشد؟

(الف) در سیکل منفی ولتاژ خروجی برش ایجاد شود.

(ب) در سیکل مثبت ولتاژ خروجی برش ایجاد شود.

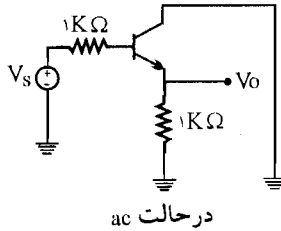
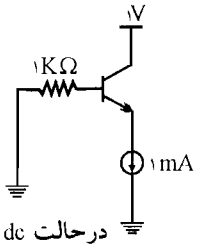


شکل م-۷

راه حل:

$$I_{CQ} = 1 \text{ mA}$$

الف) مدار معادل DC و ac را رسم می‌کنیم:

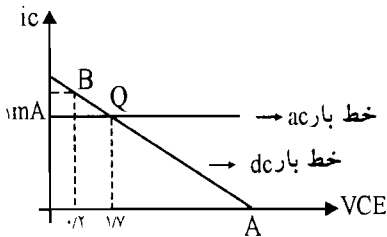


$$\text{در مدار dc: } V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

چون $V_B = 0$ و $I_B = 0$ (پس داریم $\beta = \infty$):

$$V_{CE} = V_C - V_B + V_{BE} = 1 - 0 + 0.7 = 1.7 \text{ V}, \quad I_{CQ} = 1 \text{ mA} = I_E$$

$$\text{در مدار ac: } V_{ce} = -1 \times i_c = -i_c$$



برای اینکه سیگنال برش نخورد باید: $V_{CE}(B) \leq V_{CE} \leq V_{CE}(A)$ که نقاط A و B محل تلاقی خط بار

ac با $i_C = 0$ و $V_{CE} = 0.7$ می‌باشد:

$$\text{نقطه A: } i_C = 0$$

$$\text{نقطه B: } V_{CE} = 0.7$$

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

$$\begin{cases} V_{CEQ} = 1.7 \text{ V} \\ I_{CQ} = 1 \text{ mA} \end{cases} \quad \begin{cases} V_{CE}(B) = 0.7 \\ V_{CE}(A) = V_{CE}(Q) + I_{CQ} = 1.7 + 1 = 2.7 \end{cases}$$

$$V_{CE} = V_{cc} + V_{CEQ} \quad \text{از طرفی } 0.7 \leq V_{CE} \leq 2.7$$

$$\Rightarrow 0.7 \leq V_{cc} + V_{CEQ} \leq 2.7 \Rightarrow 0.7 \leq V_c - V_e + 1.7 \leq 2.7$$

در مدار معادل ac داریم: $V_e = V_s$ و $V_c = 0$

$$\Rightarrow 0/2 \leq 0 - V_s + 1/V \leq 2/V \Rightarrow 0/2 \leq -V_s + 1/V \leq 2/V$$

پاسخ خواسته شده به صورت زیر می باشد:

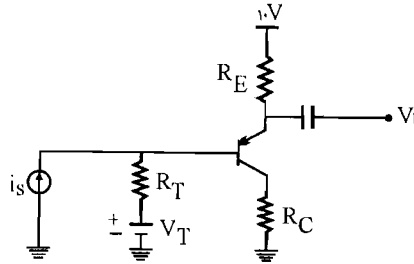
الف) $V_s \geq 1$ در سیکل منفی: $-V_s + 1/V \leq 2/V \Rightarrow V_s \geq 1$

ب) $V_s \leq 1/5$ در سیکل مثبت: $-V_s + 1/V \geq 0/2 \Rightarrow V_s \leq 1/5$

۸- در مدار بیس مشترک شکل م-۸ با شرط پایداری نقطه کار نسبت به تغییرات β و اینکه نقطه کار

وسط خط بار ac قرار داشته باشد، نشان دهید:

$$\frac{R_C}{R_E} = \frac{V_T}{2(9/3 - V_T)}$$



شکل م-۸

☑ راه حل:

معادله خط بار ac: $V_{Cb} - V_{CB} = +R_{ac}(i_C - I_C)$

$i_C = 0 \rightarrow V_{Cb} = V_{CB} - R_{ac} I_C$

از طرفی $R_{ac} = R_C \rightarrow V_{Cb} = V_{CB} + R_C I_C$

وقتی نقطه کار وسط خط بار ac باشد یعنی دامنه متقارن حداکثر می باشد.

(وسط خط بار ac): $V_{CB} = \frac{1}{2} V_{Cb}$ برای اینکه حداکثر دامنه متقارن را داشته باشیم

$$\rightarrow V_{CB} = \frac{1}{2} (V_{CB} - R_C I_C) \rightarrow V_{CB} = -R_C I_C \quad (I)$$

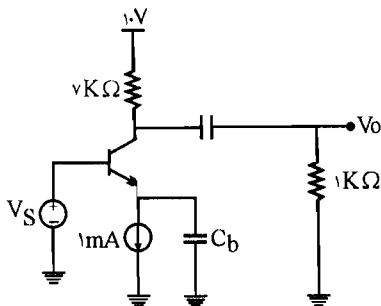
معادله خط بار DC: $-V_T - V_{CB} + R_C I_C = 0 \quad (II)$

رابطه (I) را در رابطه (II) قرار می دهیم $-V_T + R_C I_C + R_C I_C = 0 \rightarrow I_C = \frac{V_T}{2R_C} \quad (III)$

KVL: $-10 + R_E I_C + 0/V + V_T = 0 \rightarrow I_C = \frac{9/3 - V_T}{R_E} \quad (IV)$

(III), (IV) $\Rightarrow \frac{V_T}{2R_C} = \frac{9/3 - V_T}{R_E} \rightarrow \frac{R_C}{R_E} = \frac{V_T}{2(9/3 - V_T)}$

۹- برای تقویت کننده شکل م- ۹ با فرض $V_{BE} = 0.7V$ و $V_{CE(sat)} = 0.2V$ حداکثر ولتاژ مثبت و منفی خروجی چقدر است؟



شکل م- ۹

راه حل:

حداکثر دامنه ولتاژ مثبت و منفی از روابط زیر به دست می آید:

$$\begin{cases} V_o^+ = V_{CEmax} - V_{CEQ} \\ V_o^- = V_{CEQ} - V_{CE(sat)} \end{cases} \quad (I)$$

با توجه به این روابط مشخص می شود که باید معادله خط بار DC و ac را مشخص کنیم.

$$\begin{cases} I_{CQ} = 1mA \\ V_C = 10 - R_C I_C = 10 - 7 \times 1 = 3V \\ V_{BE} = V_B - V_E \rightarrow 0.7 = 0 - V_E \rightarrow V_E = -0.7V \end{cases} \rightarrow V_{CEQ} = V_C - V_E = 4.7V$$

مختصات نقطه کار:

$$ac \text{ بار خط: } V_{Ce} - V_{CEQ} = -R_{ac}(i_C - I_{CQ}) \quad (II)$$

$$از طرفی: R_{ac} = 7K\Omega \parallel 1K\Omega = \frac{7K\Omega \times 1K\Omega}{7K\Omega + 1K\Omega} = 0.875K\Omega$$

$$(II) \rightarrow V_{Ce} - 3/7 = -0.875(i_C - 1) \rightarrow V_{Ce max} = ?$$

$V_{Ce max}$ وقتی به دست می آید که $i_C = 0$ باشد.

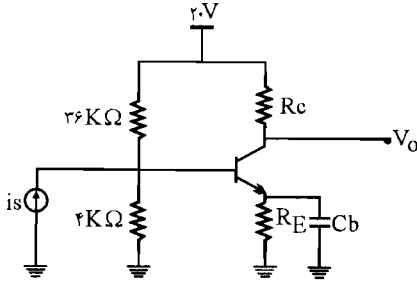
$$\rightarrow V_{Ce max} = 3/7 + 0.875V = 4/55V$$

سپس با استفاده از روابط (I) داریم:

$$\begin{cases} V_o^+ = 4/55 - 3/7 = 0.875V \\ V_o^- = 3/7 - 0.2 = 3/5 \end{cases}$$

۱۰- در شکل م- ۱۰، برای ترانزیستور $40 < \beta < 60$ و $V_{BE} = 0.7V$ است. R_C و R_E را طوری

تعیین کنید که نقطه کار از پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β برخوردار بوده و ضمناً دامنه نوسان متقارن خروجی حداکثر شود. حداکثر دامنه نوسان خروجی چقدر است؟



شکل ۴-۱۰

راه حل:

مدار معادل تونن ورودی:

$$\begin{cases} V_{th} = \frac{4 \times 20}{4 + 36} = 2V \\ R_{th} = 4K\Omega \parallel 36K\Omega = \frac{4 \times 36}{4 + 36} = 3/6 K\Omega \end{cases}$$

طبق فرض مسئله داریم نقطه کار نسبت به تغییرات β پایدار می‌باشد پس داریم:

$$R_{th} = \frac{\beta_{min} R_E}{10} \rightarrow 3/6 K\Omega = \frac{40 R_E}{10} \rightarrow R_E = 0/9 K\Omega$$

$$KVL: I_{CQ} = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E} = \frac{2 - 0/7}{0/9} = \frac{1/3}{0/9} = 1/44 mA$$

برای داشتن حداکثر دامنه نوسان خروجی:

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} \quad \begin{cases} R_{ac} = R_C \\ R_{DC} = R_C + R_E \end{cases}$$

$$\rightarrow I_{CQ} = 1/44 mA = \frac{20}{R_C + R_C + 0/9} = \frac{20}{2R_C + 0/9} \rightarrow 2/88 R_C + 12/96 = 20$$

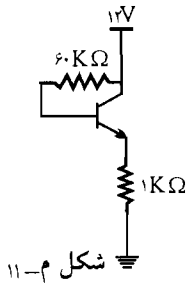
$$\rightarrow R_C = 6/47 K\Omega$$

$$V_O^+ = V_{CE} - V_{CEQ} \Rightarrow \begin{cases} \text{خط بار ac: } V_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac}(I_C - I_{CQ}) \\ I_C = 0 \rightarrow V_{CE} - V_{CEQ} = -6/47(0 - 1/44) = 9/32 \end{cases}$$

$$\rightarrow V_O^+ = 9/32$$

۱۱- در مدار شکل م- ۱۱، با فرض $V_{BE} = 0.7V$ و $200 < \beta < 50$ ، تغییرات جریان کلکتور نقطه

کار را محاسبه کنید.



✓ راه حل:

طبق روابط (۵-۵۷) و (۵-۴۳) کتاب داریم:

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

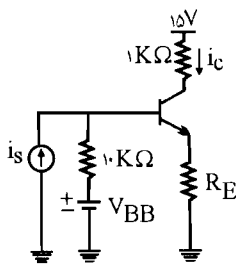
از طرفی در این مدار (شکل م- ۱۱) داریم:

$$\begin{cases} V_T = 12V \\ R_T = 60K\Omega \end{cases}$$

$$\text{KVL: } I_{C1} = \frac{12 - 0.7V}{1K\Omega + \frac{60}{50}} = 5/13 \text{ mA}$$

$$\text{داریم: } S_{\beta} = \frac{5/13}{50} \left[\frac{60 + 1}{60 + (1 + 200) \times 1} \right] = 0.024$$

$$\Delta \beta = 200 - 50 = 150 \rightarrow \Delta I_C = S_{\beta} \times \Delta \beta = 0.024 \times 150 = 3/6 \text{ mA}$$



شکل م- ۱۲

۱۲- در تقویت کننده شکل م- ۱۲ می خواهیم تقویت کننده را طوری

طراحی نماییم که دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور حداکثر باشد.

اگر برای ترانزیستور به کار رفته β بین ۵۰ تا ۱۵۰ تغییر کند و

$V_{BE} = 0.7V$ باشد، V_{BB} و R_E را محاسبه نمایید. حداکثر دامنه

نوسان I_C را به دست آورید.

✓ راه حل:

$$R_T = \frac{\beta_{\min} R_E}{10} = \frac{50 \times R_E}{10} = 10 \rightarrow R_E = 2K\Omega$$

برای داشتن حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور:

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} \quad \begin{cases} R_{ac} = R_C + R_E \\ R_{DC} = R_C + R_E \end{cases}$$

$$I_{CQ} = \frac{15}{2R_C + 2R_E} = \frac{15}{2+4} = \frac{15}{6} = 2.5 \text{ mA}$$

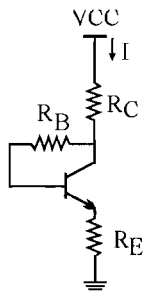
→ حداکثر دامنه نوسان متقارن جریان کلکتور = 2.5 mA

$$I_C = \frac{V_{BB} - 0.7}{R_E + \frac{R_B}{\beta_{av}}} = \frac{V_{BB} - 0.7}{2 + \frac{10}{100}} = 2.5 \text{ mA}$$

$$\rightarrow 2.5 = \frac{V_{BB} - 0.7}{2/1} \Rightarrow V_{BB} = 5.95 \text{ V}$$

$$\beta_{av} = \frac{50 + 150}{2} = 100$$

۱۳- در مدار شکل م- ۱۳



شکل م-۱۳

الف) ضرایب پایداری جریان نقطه کار را نسبت به تغییرات V_{BE} و I_{CBO} را به دست آورید.
ب) با فرض $R_E = 0$ ، حساسیت نقطه کار نسبت به تغییرات دو عامل فوق چگونه است؟ چرا؟

☑ راه حل:

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

$$\text{از طرفی: } I = I_B + I_C = I_E$$

$$\Rightarrow R_C I_E + R_B I_B + R_E I_E = V_{CC} - V_{BE}$$

$$\Rightarrow I_E (R_C + R_E) + R_B I_B = V_{CC} - V_{BE}$$

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

از طرفی داریم:

$$I_B = \frac{I_C - (1+\beta) I_{CO}}{\beta} \leftarrow I_C = \beta I_B + (1+\beta) I_{CO}$$

$$\Rightarrow (R_C + R_E) I_C + (R_C + R_E + R_B) \left(\frac{I_C - (1 + \beta) I_{CO}}{\beta} \right) = V_{CC} - V_{BE}$$

$$\Rightarrow I_C \left((R_C + R_E) \left(\frac{1 + \beta}{\beta} \right) + R_B \times \frac{1}{\beta} \right) = V_{CC} - V_{BE} + \left(\frac{1 + \beta}{\beta} \right) (R_C + R_E + R_B) I_{CO} \quad (I)$$

حال از رابطه (I) نسبت به V_{BE} مشتق می‌گیریم و بقیه عوامل را ثابت در نظر می‌گیریم:

$$\Rightarrow dI_C \left((R_C + R_E) \left(\frac{1 + \beta}{\beta} \right) + \frac{R_B}{\beta} \right) = -dV_{BE}$$

$$\Rightarrow S_V = \frac{dI_C}{dV_{BE}} = \frac{-\beta}{(R_B + (1 + \beta)(R_C + R_E))}$$

حال از رابطه (I) نسبت به I_{CO} مشتق می‌گیریم و بقیه عوامل را ثابت فرض می‌کنیم:

$$dI_C \left((R_C + R_E) \left(\frac{1 + \beta}{\beta} \right) + \frac{R_B}{\beta} \right) = \left(\frac{1 + \beta}{\beta} \right) (R_C + R_E + R_B) dI_{CO}$$

$$S_I = \frac{dI_C}{dI_{CO}} = \frac{(R_C + R_E + R_B)}{R_C + R_E + \frac{R_B}{1 + \beta}} = \frac{(1 + \beta)(R_C + R_E + R_B)}{(1 + \beta)(R_C + R_E) + R_B}$$

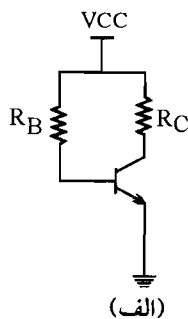
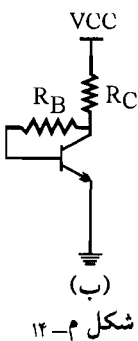
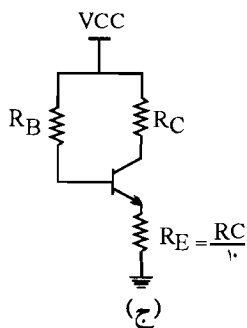
(ب) با فرض $R_E = 0$

$$S_V = \frac{-\beta}{R_B + (1 + \beta)R_C} \quad , \quad S_I = \frac{(R_C + R_B)(1 + \beta)}{(1 + \beta)R_C + R_B}$$

در این حالت S_V و S_I هر دو بزرگ شدند در نتیجه از پایداری نقطه کار کاسته می‌شود.

۱۴ - ضرایب پایداری S_I و S_V و S_β را برای سه مدار شکل م - ۱۴ به دست آورده و با هم مقایسه

نمایید.



☑ راه حل:

$$\begin{cases} R_T = R_B \\ V_T = V_{CC} \\ R_E = 0 \end{cases}$$

الف) مدار (الف) مدار بایاس امیتر مشترک است:

طبق رابطه (۵ - ۵۰) کتاب داریم:

$$S_I = (1 + \beta) \frac{R_T + R_E}{(1 + \beta) R_E + R_T}$$

$$\rightarrow S_I = (1 + \beta) \frac{R_B + 0}{(1 + \beta) \times 0 + R_B} = (1 + \beta)$$

$$S_V = \frac{-\beta}{R_E (1 + \beta) + R_T} = \frac{-\beta}{R_B}$$

رابطه (۵ - ۵۴) کتاب:

رابطه (۵ - ۵۷) کتاب:

$$S_B = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \left[\frac{R_T + R_E}{R_T + (1 + \beta_2) R_E} \right] = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \times \left(\frac{R_B}{R_B} \right) = \frac{I_{C1}}{\beta_1}$$

ب) این مدار، مدار مسئله (۱۳) در قسمت ب می باشد:

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

$$S_V = \frac{-\beta}{R_B + (1 + \beta) R_C}$$

$$S_B = \frac{\Delta I_C}{\Delta \beta} = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \left(\frac{R_B + R_C}{R_B + (1 + \beta) R_C} \right)$$

ج) مدار (ج) راه هم می توان مدار خود بایاس در نظر گرفت؛ پس روابط (۵ - ۵۰) و (۵ - ۵۴) و (۵ - ۵۷) در

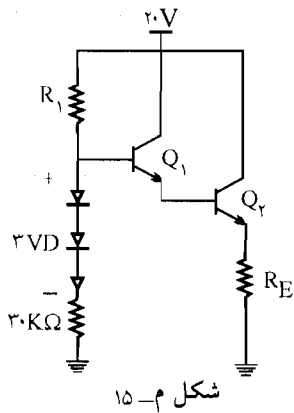
مورد این مدار هم صدق می کند.

$$S_I = \frac{(1 + \beta)(R_B + \frac{R_C}{10})}{(1 + \beta) \frac{R_C}{10} + R_B} = (1 + \beta) \frac{R_B + 0.1 R_C}{(1 + \beta) \times 0.1 R_C + R_B}$$

$$S_B = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \left[\frac{R_B + 0.1 R_C}{R_B + (1 + \beta_2) \times 0.1 R_C} \right] \quad \text{و} \quad S_V = \frac{-\beta}{R_B + 0.1 (R_C) (1 + \beta)}$$

مدار (ب) به علت دارا بودن فیدبک در کلکتور و مدار (ج) به علت وجود مقاومت R_E پایداری بهتری

نسبت به مدار الف دارند به همین علت ضرایب پایداری آنها کوچکتر است.



۱۵- در مدار شکل م- ۱۵ ترانزیستورها مشابه و دیودها از نظر تغییرات حرارتی مشابه پیوندهای بیس-امیتر ترانزیستورها هستند. آیا می توان R_1 را طوری تعیین کرد که تغییرات حرارتی I_E صفر شود؟ (محاسبه کنید) اگر $100 < \beta_1 = \beta_2 < 50$ باشد، R_E را طوری تعیین کنید که نقطه کار پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β داشته باشد ($V_D = V_{BE} = 0.7V$)

☑ راه حل:

مدار معادل ورودی را می یابیم:

$$\begin{cases} V_{th} = 20 \times \frac{30}{30 + R_1} + 3V_D \times \frac{R_1}{R_1 + 30} = \frac{600 + 3V_D R_1}{R_1 + 30} \\ R_{th} = R_1 \parallel 30 \text{ K}\Omega, \quad \beta_{ab} = \frac{50 + 100}{2} = 75 \end{cases}$$

$$I_C = \frac{V_{th} - 2V_{BE}}{\frac{R_{th}}{(\beta_{av})^2} + R_E} = \frac{\frac{600 + 3V_D R_1}{R_1 + 30} - 2 \times V_{BE}}{\frac{R_{th}}{(75)^2} + R_E}$$

$$\frac{\partial I_C}{\partial T} = \frac{3R_1}{R_1 + 30} \times \frac{\partial V_D}{\partial T} - \frac{2 \partial V_{BE}}{\partial T} \quad (I)$$

$$\text{از طرفی داریم } V_D = V_{BE} \rightarrow \frac{\partial V_D}{\partial T} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T}$$

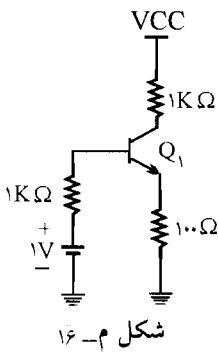
$$\text{پس (I) } \rightarrow \frac{3R_1}{R_1 + 30} - 2 = 0 \rightarrow 3R_1 = 2R_1 + 60 \rightarrow R_1 = 60 \text{ K}\Omega$$

برای اینکه نقطه کار پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β داشته باشد باید داشته باشیم:

$$R_{th} = \frac{(1 + \beta_{\min})^2 R_E}{10} = \frac{(1 + 50)^2 \times R_E}{10} = R_{th} = R_1 \parallel 30 = 60 \parallel 30 = 20$$

$$\rightarrow R_E = 77 \Omega$$

۱۶- در مدار شکل م-۱۶، با فرض $۵۰ < \beta < ۲۰۰$ ، $۲۵^{\circ}\text{C} < T < ۷۵^{\circ}\text{C}$ ،
 $V_{BE} = ۰/۷\text{V}$ و $I_{CBO} = ۰/۰۱\ \mu\text{A}$ ، $V_{CC} = ۶ \pm ۰/۲\text{V}$
 جریان کلکتور، ضرایب پایداری و تغییرات جریان کلکتور را در بدترین
 حالت محاسبه کنید.



✓ (۱۰ه حل):

$$I_{CQ} = \frac{V_T - V_{BE}}{R_E + \frac{R_T}{\beta_{av}}}$$

$$\text{از طرفی: } \beta_{av} = \frac{۵۰ + ۲۰۰}{۲} = ۱۲۵$$

$$I_{CQ} = \frac{۱ - ۰/۷}{۰/۱ + \frac{۱}{۱۲۵}} = ۲/۷۷\text{mA}$$

پس داریم:

ضرایب پایداری: (از روابط صفحه ۱۸۶ استفاده می‌کنیم چون این دو مدار مشابه هستند.)

$$S_I = 1 + \frac{R_T}{R_E} = 1 + \frac{۱}{۰/۱} = ۱۱$$

$$S_V = \frac{-1}{R_E} = \frac{-1}{۰/۱} = -۱۰$$

$$S_{\beta} = \frac{I_{CQ_1}}{\beta_1} \left[\frac{R_T + R_E}{R_T + (1 + \beta_2)R_E} \right] = \frac{I_{CQ_1}}{۵۰} \left[\frac{۱ + ۰/۱}{۱ + (1 + ۲۰۰) \times ۰/۱} \right]$$

$$\text{از طرفی: } I_{CQ_1} = \frac{V_T - V_{BE}}{R_E + \frac{R_T}{\beta_1}} = \frac{۱ - ۰/۷}{۰/۱ + \frac{۱}{۵۰}} = ۲/۵$$

$$\rightarrow S_{\beta} = \frac{۲/۵}{۵۰} \left[\frac{۱/۱}{۱ + ۲۰/۱} \right] = \frac{۱}{۲۰۰} \times \frac{۱۱}{۲۰۱} = ۲/۷ \times ۱۰^{-۳}$$

برای به دست آوردن تغییرات جریان کلکتور از رابطه (۵ - ۷۱) استفاده می‌کنیم.

$$\Delta I_{CQ} = |S_{I_{CBO}} \Delta I_{CBO}| + |S_{V_{BE}} \Delta V_{BE}| + |S_{\beta} \Delta \beta| + |S_{V_{CC}} \Delta V_{CC}| + |S_{R_{RE}} \Delta R_{RE}|$$

$$\Delta I_{CBO} = I_{CBO} \times 2^{10} = 0.1 \mu A \times 2^{10} = 32 \times 0.1 \mu A = 32 \times 10^{-5}$$

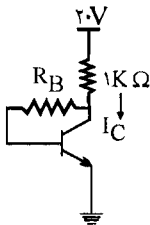
$$\Delta V_{BE} = -2/5 \Delta T = -2/5 \times 50 = -125 \text{ mV} \quad , \quad \Delta \beta = 150$$

$$\Delta V_{CC} = 0.4 \text{ V} \quad \Delta R_{RE} = 0$$

تغییرات V_{CC} در I_C تأثیری ندارد مگر اینکه اثر مدولاسیون عرض بین را در نظر بگیریم که ضرورتی ندارد.

$$\Delta I_{CQ} = 11 \times 32 \times 10^{-5} + |(-10)| \times |(-125)| \times 10^{-3} + 2/7 \times 10^{-3} \times 150 = 1/65 \text{ mA}$$

۱۷- در مدار شکل م-۱۷، R_B را طوری محاسبه کنید که $I_{CQ} = 10 \text{ mA}$ شود. ضرایب پایداری S_{I_1} و S_{β} و S_{V_1} را به دست آورید. تغییرات نقطه کار را با فرض $I_{CBO} = 1 \mu A$ (در دمای $25^\circ C$) برای $200 < \beta < 50$ و $100^\circ C < T < 25^\circ C$ محاسبه نمایید.



شکل م-۱۷

راه حل:

$$\beta_{av} = \frac{200 + 50}{2} = 125$$

$$\text{KVL: } 20 - 1 \text{ K}\Omega (I_B + I_C) - R_B I_B - V_{BE} = 0 \rightarrow$$

$$\begin{cases} 20 - I_B - I_C - R_B I_B - 0.7 = 0 & (I) \\ I_{CQ} = 10 \text{ mA} ; I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{I_{CQ}}{\beta_{av}} = \frac{10 \text{ mA}}{\left(\frac{50+200}{2}\right)} = 8 \times 10^{-2} \text{ mA} \end{cases}$$

$$(I): 19.3 - 8 \times 10^{-2} - 10 - R_B \times 8 \times 10^{-2} = 0 \rightarrow$$

$$R_B = 115.25 \text{ K}\Omega \quad I_{C_1} = \frac{20 - 0.7}{R_C + \frac{R_B}{\beta_1}} = 5/8 \text{ mA}$$

برای به دست آوردن S_I و S_V و S_B از روابطی که در مسئله ۱۴ (ب) به دست آوریم، استفاده می‌کنیم:

$$S_I = \frac{(1 + \beta_{av})(R_B + R_C)}{R_B + (1 + \beta_{ab})R_C} = \frac{(1 + 125)(115/25 + 1)}{(115/25) + (1 + 125) \times 1} = \frac{14647/5}{241/25} = 6.0/7$$

$$S_V = \frac{-\beta_{av}}{R_B + (1 + \beta_{av})R_C} = \frac{-125}{115/25 + 126} = -0.52$$

$$S_B = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \left(\frac{R_B + R_C}{R_B + (1 + \beta_2)R_C} \right) = \frac{5/\mu A}{50} \left(\frac{115/25 + 1}{115/25 + 20.1 \times 1} \right) = 0.429$$

$$\Delta I_{CBO} = 1 \mu A \times 2^{10} = 0.18 \text{ mA}$$

$$\Delta V_{BE} = -2/5 \times \Delta T = 0.187 \text{ V}$$

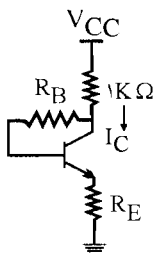
$$\rightarrow \Delta I_C = |S_V \times \Delta V_{BE}| + |S_I \times \Delta I_{CBO}| + |S_B \times \Delta \beta|$$

$$\rightarrow \Delta I_C = |(-0.51)| \times |(-0.187)| + |6.0/7 \times 0.18| + |0.429 \times 150|$$

$$= 17/4 \text{ mA}$$

۱۸- اگر در مدار شکل م-۱۷، مقاومت R_E را به امیتر اضافه کنیم. نشان دهید جریان کلکتور نقطه کار

از رابطه زیر به دست می‌آید:



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

همچنین S_I و S_V و S_B را محاسبه کنید.

☑ (اه حل):

$$\text{KVL: } -V_{CC} + R_C(I_B + I_C) + R_B I_B + V_{BE} + R_E(I_C + I_B) = 0$$

$$\rightarrow V_{CC} - V_{BE} = (R_C + R_B + R_E)I_B + (R_C + R_E)I_C \quad (I)$$

$$\text{از طرفی داریم: } I_B = \frac{I_C}{\beta} - I_{CBO} \frac{\beta + 1}{\beta} \quad (II)$$

رابطه (II) را در رابطه (I) قرار می دهیم.

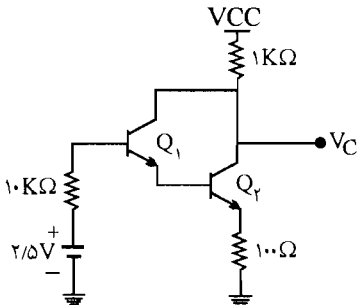
$$\begin{aligned}
 (I) \rightarrow V_{CC} - V_{BE} &= (R_C + R_B + R_E) \left(\frac{I_C}{\beta} - I_{CBO} \frac{\beta + 1}{\beta} \right) + (R_C + R_E) I_C \\
 &= (R_C + R_B + R_E) \left(\frac{I_C}{\beta} \right) - I_{CBO} \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right) (R_C + R_B + R_E) + (R_C + R_E) I_C \\
 &= I_C \left(\frac{R_C + R_B + R_E}{\beta} + (R_C + R_E) \right) - I_{CBO} \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right) (R_C + R_E + R_B) \\
 \rightarrow I_C \left[\frac{R_C + R_B + R_E}{\beta} + (R_C + R_E) \right] &= (V_{CC} - V_{BE}) + I_{CBO} \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right) (R_C + R_E + R_B) \\
 \rightarrow I_C &= \frac{(V_{CC} - V_{BE}) + I_{CBO} \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right) (R_C + R_E + R_B)}{\frac{(R_B + R_C + R_E)}{\beta} + (R_C + R_E)} \\
 \rightarrow I_C &= (V_{CC} - V_{BE}) \times \frac{\beta}{R_B + (1 + \beta)(R_C + R_E)} + \frac{I_{CBO} \times \beta (R_B + R_C + R_E)}{R_B + (1 + \beta)(R_C + R_E)} \\
 \rightarrow I_C &= \frac{\beta (V_{CC} - V_{BE}) + I_{CBO} \times (R_B + R_C + R_E) \beta}{R_B + (1 + \beta)(R_C + R_E)}
 \end{aligned}$$

S_{β} و S_V و S_I در مسئله ۱۳ (الف) محاسبه شده اند:

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

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

$$S_{\beta} = \frac{I_{C1}}{\beta_1} \left[\frac{R_T + R_E}{R_T + (1 + \beta_T) R_E} \right]$$



شکل م-۱۹

۱۹ - در تقویت کننده مدار شکل م-۱۹، ترانزیستورهای Q_1 و Q_2 مشابه و از جنس سیلیکن می باشند. برای این ترانزیستورها در دمای $25^{\circ}C$ ، $I_{CBO} = 0.1 \mu A$ ، $V_{BE} = 0.7V$ و $\beta = 20$ ، تغییرات ولتاژ V_C را وقتی دما از $25^{\circ}C$ تا $100^{\circ}C$ تغییر نماید محاسبه کنید.

☑ **اهل:** در این مدار دو ترانزیستور به صورت زوج دارلینگتون قرار گرفته‌اند β معادل برابر β^2 خواهد شد و ΔV_{BE} نیز دو برابر می‌شود. I_{CBO} مربوط به Q_1 از بیس Q_2 می‌گذرد پس $\frac{1}{\beta}$ برابر I_{CBO} مربوط به Q_2 است پس I_{CBO} اکل به صورت زیر خواهد شد.

$$I_{CBO} = I_{CBO_1} + I_{CBO_2} = \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) I_{CBO}$$

از روابط (50^{-5}) و $(54 - 5)$ استفاده می‌کنیم.

$$S_V = \frac{-\beta^2}{(1 + \beta^2)R_E + R_B} = \frac{-(20)^2}{(1 + (20)^2) \times 0/1 + 10} = -7/98$$

$$S_I = \frac{(1 + \beta^2)(R_B + R_E)}{(1 + \beta^2)R_E + R_B} = \frac{(1 + (20)^2)(10 + 0/1)}{(1 + (20)^2) \times 0/1 + 10} = 80/84$$

علت این رابطه در صفحه ۱۷۶ کتاب ذکر شده است.

$$\Delta V_{BE} = 2 \times (-2/5 \times \Delta T) \text{ mv} = -0/375 \text{ V}$$

$$\Delta I_{CBO} = I_{CBO} \times 2^{10} = 1/5 \times 0/1 \mu\text{A} \times 10^{-3} \times 2^{10/5} = 0/27 \text{ mA}$$

$$\rightarrow \Delta I_C = S_V \Delta V + S_I \Delta I = 7/98 \times 0/375 + 80/84 \times 0/27 = 5/1 \text{ mA}$$

$$\Delta V_C = V_{C_2} - V_{C_1} = (V_{CC} - R_C I_{C_2}) - (V_{CC} - R_C I_{C_1}) = -R_C (I_{C_2} - I_{C_1})$$

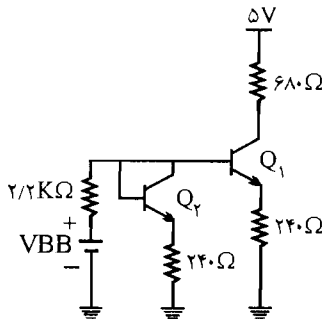
$$= -R_C \times \Delta I_C = -1 \text{ K}\Omega \times 5/1 = -5/1 \text{ V}$$

۲۰- مدارهای شکل م- ۲۰ در دمای 25°C تا 90°C کار می‌کنند. در مدار شکل م- ۲۰ ب ترانزیستور

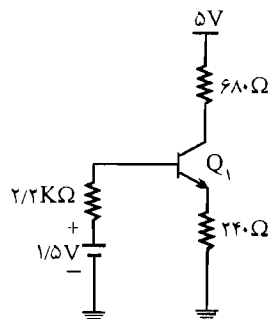
Q_2 به منظور جبران تغییرات حرارتی V_{BE} قرار داده شده است. با فرض $\beta = 200$ و $I_{CBO} = 0$

الف) تغییرات جریان نقطه کار را برای هر دو مدار به دست آورید.

ب) برای مدار شکل (ب)، V_{BB} را محاسبه کنید.



(ب) با مدار جبران کننده



(الف) بدون مدار جبران کننده

✓ (راه حل):

الف) بدون مدار جبران کننده:

$$R_B \ll \beta R_E \rightarrow S_V = \frac{-1}{R_E} = \frac{-1}{0.24} = -4/16$$

$$\Delta V_{BE} = -2/5 \times \Delta T = -2/5 \text{ mV} \times 65 = -162/5 \text{ mV} = -1/625 \text{ V}$$

$$\Delta I_C = \Delta V_{BE} \times S_V = 4/16 \times 1/625 = 6/7 \text{ mA}$$

چون I_{CBO} صفر می باشد پس $S_I \times \Delta I_{CBO}$ صفر می شود و β نیز ثابت و برابر 200 است پس $\Delta \beta$ صفر می باشد و $\Delta \beta \beta$ نیز صفر می باشد یعنی در رابطه (۵-۷۱) کتاب ΔI_C فقط برابر $\Delta V_{BE} \times S_V$ می شود. با مدار جبران کننده:

$$R_{th} = 0.24 \parallel 2/2 = 0.22 \text{ K}\Omega$$

$$R_{th} = 0.24 \parallel 2/2 = 0.22 \text{ K}\Omega$$

$$V_{th} = \frac{V_B \times 0.24 + V_{BE} \times 2/2}{0.24 + 2/2}, \quad I_C = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{th}}{\beta}} = \frac{\frac{0.24 V_{BB} + 2/2 V_{BE}}{2.44} - V_{BE}}{0.24 + \frac{0.22}{200}}$$

$$\frac{\partial I_C}{\partial T} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} \left(\frac{2/2}{0.24} - 1 \right) \rightarrow S_V = \frac{\partial I_C}{\partial V} = -0.409$$

$$\Delta V = -2/5 \text{ mV} \times 65 = -1/625 \text{ V} \rightarrow \Delta I_C = -0.409 \times (-1/625) = 0.665 \text{ mA}$$

ب) برای مدار بدون جبران کننده:

$$I_{CQ} = \frac{1/5 - 0.7}{0.24 + \frac{2/2}{200}} = 3/18 \text{ mA}$$

برای مدار با جبران کننده:

$$I_{CQ} = \frac{V_{th} - V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta} + 0.24} = \frac{\frac{0.24 V_{BB} + 2/2 \times 0.7}{2.44}}{0.2411} = 3/18$$

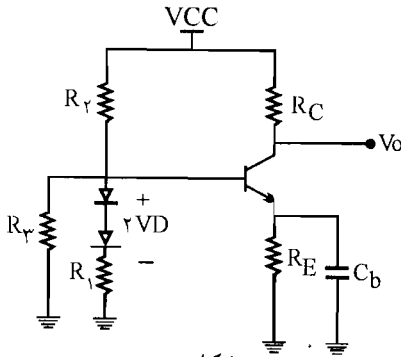
$$\rightarrow V_{BB} = 2/2 \text{ V}$$

۲۱- مدار شکل م- ۲۱ را در نظر بگیرید.

الف) چه رابطه ای بین مقاومت های R_1 و R_2 و R_3 برقرار باشد تا تغییرات V_{BE} در اثر تغییر دما به طور کامل جبران شود.

ب) اگر $R_C = 1 \text{ K}\Omega$ و $R_E = 100 \Omega$ و $V_{CC} = 10 \text{ V}$ و $V_D = V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ و $\beta = 200$

باشد، مقادیر R_1 و R_2 و R_3 را چنان تعیین کنید که دامنه نوسان در خروجی حداکثر شود.



شکل م- ۲۱

راه حل: ✓

الف) مدار معادل تونن ورودی را می نویسیم:

$$V_{th} = V_{CC} \times \frac{(R_1 \parallel R_2)}{(R_1 \parallel R_2) + R_3} + 2V_D \times \frac{(R_2 \parallel R_3)}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} \quad \text{و} \quad R_{th} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3$$

از طرفی: $\frac{\partial V_D}{\partial T} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T}$

$$I_C = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{th}}{\beta}} = \frac{\left[\frac{V_{CC} \times (R_1 \parallel R_2)}{(R_1 \parallel R_2) + R_3} + \frac{2V_D \times (R_2 \parallel R_3)}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} \right] - V_{BE}}{R_E + \frac{(R_1 \parallel R_2 \parallel R_3)}{\beta}}$$

$$\frac{\partial I_C}{\partial T} = \frac{\frac{\partial V_D}{\partial T} \times \left[\frac{2(R_2 \parallel R_3)}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} \right] - 1}{R_E + \frac{(R_1 \parallel R_2 \parallel R_3)}{\beta}}$$

$$\rightarrow \frac{\partial I_C}{\partial V_D} = \frac{\left[\frac{2(R_2 \parallel R_3)}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} - 1 \right]}{\left(R_E + \frac{(R_1 \parallel R_2 \parallel R_3)}{\beta} \right)} = 0$$

برای اینکه رابطه بالا صفر شود باید صورت کسر صفر شود.

$$\rightarrow \frac{2(R_2 \parallel R_3)}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} - 1 = 0 \rightarrow 2(R_2 \parallel R_3) = R_1 + (R_2 \parallel R_3) \rightarrow R_1 = R_2 \parallel R_3$$

(ب) تحلیل ac :

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = \frac{10V}{(R_C) + (R_C + R_E)} = \frac{10V}{1 + (1 + 0/1)} = 4/76 \text{ mA}$$

$$V_{th} = \frac{V_{CC} \times (R_1 \parallel R_2)}{(R_1 \parallel R_2) + R_3} + \frac{2V_D \times (R_2 \parallel R_3)}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} \quad R_{th} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3$$

$$\text{KVL: } I_{CQ} = \frac{V_{th} - V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta} + R_E} = \frac{\left[\frac{10 \times (R_1 \parallel R_2)}{(R_1 \parallel R_2) + R_3} + \frac{2 \times 0/7(R_2 \parallel R_3)}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} \right] - 0/7}{\frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_3}{200} + 0/1} = 4/76 \text{ mA}$$

$$\text{از طرفی در قسمت الف به دست آوریم} \quad R_1 = R_2 \parallel R_3 \quad (I)$$

$$\text{و داریم: } R_{th} = \frac{\beta R_E}{10} = \frac{200 \times 0/1}{10} = 2 \text{ K}\Omega = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \quad (II)$$

$$I_{CQ} = \frac{10(R_1 \parallel R_2)}{R_3 + (R_1 \parallel R_2)} + \frac{1/4(R_2 \parallel R_3)}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} = \left(\frac{2}{200} + 0/1 \right) \times 4/76 + 0/7 = 1/22 \quad (III)$$

با توجه به رابطه زیر داریم:

$$R_{th} = 2 \text{ K}\Omega = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 = R_2 \times \frac{(R_1 \parallel R_3)}{R_2 + (R_1 \parallel R_3)}$$

$$(III): 10 \times \frac{R_{th}}{R_2} + \frac{1/4 \times R_1}{R_1 + R_1} = 1/22 \rightarrow 10 \times \frac{2 \text{ K}\Omega}{R_2} + \frac{1/4}{2} = 1/22$$

$$\rightarrow R_2 = 38/4 \text{ K}\Omega$$

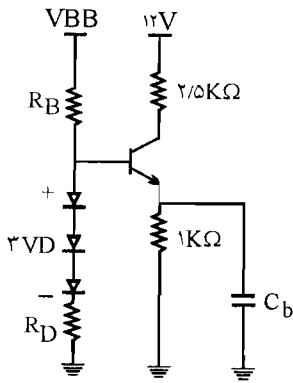
برای به دست آوردن R_1 و R_2 :

$$\begin{cases} R_1 = R_2 \parallel R_3 \\ R_{th} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 = 2 \text{ K}\Omega \rightarrow R_1 \parallel R_1 = 2 \text{ K}\Omega \rightarrow R_1 = 4 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

$$\rightarrow R_1 = R_2 \parallel R_3 \rightarrow R_1 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \rightarrow$$

$$4 = \frac{38/4 R_3}{38/4 + R_3} \rightarrow 4R_3 + 152/6 = 38/4 R_3 \rightarrow R_3 = 4/46 \text{ K}\Omega$$

۲۲- در مدار شکل م-۲۲، با فرض $V_{BE} = V_D = 0.7V$ و $100 < \beta < 200$



شکل م-۲۲

(الف) تحت چه شرایطی مدار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار بوده و اثرات حرارتی کاملاً جبران می‌شود (اثبات کنید).

(ب) مقادیر R_B و R_D و V_{BB} را طوری تعیین کنید که ضمن محقق شدن شرایط بند (الف)، نقطه کار ترانزیستور در وسط خط بار ac آن قرار گیرد.

☑ راه حل:

(الف) برای اینکه مدار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشد باید داشته باشیم:

$$R_{th} = \frac{\beta_{min} R_E}{10} = \frac{100 \times 1}{10} = 10 \text{ K}\Omega \quad (1)$$

از طرفی مدار معادل تونن به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{cases} R_{th} = R_B \parallel R_D \\ V_{th} = \frac{3V_D \times R_B}{R_B + R_D} + \frac{V_{BB} \times R_D}{R_B + R_D} \end{cases}$$

$$I_C \text{ از طرفی} = \frac{V_{th} - V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta_{av}} + R_E} = \frac{\frac{3V_D \times R_B + R_D \times V_{BB}}{R_B + R_D} - V_{BE}}{\frac{R_B \parallel R_D}{\beta_{av}} + R_E}$$

$$\frac{\partial I_C}{\partial T} = \frac{\partial V_D}{\partial T} \left(\frac{3R_B}{R_B + R_D} \right) - \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} \text{ از طرفی} \quad \frac{\partial V_D}{\partial T} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T}$$

$$\frac{\partial I_C}{\partial T} = 0 \rightarrow \frac{3R_B}{R_B + R_D} - 10 = 0 \rightarrow 3R_B = R_D$$

برای اینکه نقطه کار در وسط خط بار باشد

(ب)

$$I_{CO} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{DC}} = \frac{12}{R_C + (R_C + R_E)} = \frac{12}{2/5 + (2/5 + 1)} = 2 \text{ mA}$$

در بند الف به دست آوردیم :

$$R_D = 2R_B \quad , \quad R_{th} = R_B \parallel R_D = \frac{R_B \times R_D}{R_B + R_D} = \frac{R_B \times 2R_B}{R_B + 2R_B} = 10 \text{ K}\Omega$$

$$\rightarrow \frac{2R_B}{3R_B} = 10 \text{ K}\Omega \rightarrow R_B = 15 \text{ K}\Omega$$

$$R_D = 2R_B = 30 \text{ K}\Omega$$

$$I_C = 2 = \frac{2 \times 0.7 \times 115 + 30 \times V_{BB} - 0.7}{\frac{30 \parallel 15}{150} + 1} \rightarrow V_{BB} = 3/2 \text{ V}$$

۲۳- در مدار شکل م-۲۳، ترانزیستور مشابه و دارای β بسیار بزرگ هستند. به منظور افزایش سهم مقاومت بار از منبع تغذیه، R_2 را تا حد نصف R_1 کاهش می‌دهیم. مقاومت‌های R_3 و R_4 را طوری محاسبه‌نمایید که وابستگی Q به تغییرات V_{BE} ، $V_{BE_1} = V_{BE_2} = V_{BE}$ حداقل شود. تریب دهنده یک مجریان $R_4/10$ جریان‌های ترانزیستورهای Q_1 و Q_2 باشد و $I_0 = 10 \text{ mA}$ شود.

☑ (راه حل):

$$R_2 = \frac{R_1}{2} \quad \text{طبق فرض مسئله}$$

$$I_{R_2} = \frac{V_{BE}}{R_2} = 0.1 I_0 = 0.1 \times 10 = 1 \text{ mA}$$

$$\rightarrow \frac{0.7}{R_2} = 1 \text{ mA} \rightarrow R_2 = 700 \Omega$$

$$\text{KVL: } R_1 I_{R_1} + R_2 I_{R_2} + V_{BE_1} + R_3 I_{R_3} + R_4 I_{R_4} = 10$$

$$\rightarrow 10 = R_1 (I_0 + 0.1 I_0) + R_2 \times 0.1 I_0 + 0.7 + 0.7 \times 0.1 I_0$$

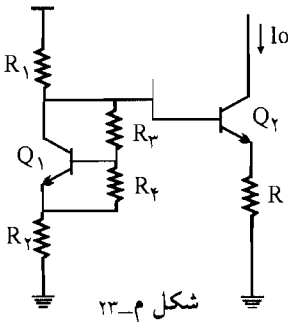
$$+ \frac{R_1}{2} R_1 (I_0 + 0.1 I_0)$$

$$\rightarrow \frac{3}{2} R_1 \times 1/10 = 10 - 0.7 - 0.07 I_0 - 0.1 R_2 I_0 \quad \text{(I)}$$

$$\text{KVL: } R_1 I_{R_1} + R I_0 = 10 - V_{BE} \rightarrow$$

$$R_1 (I_0 + 0.1 I_0) + R I_0 = 10 - 0.7 \quad \text{(II)}$$

$$\text{(II)} \rightarrow R_1 (1/10) I_0 = 10 - 0.7 - R I_0 \quad \text{(III)}$$

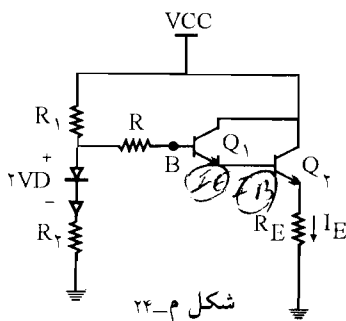


$$(I), (III) \Rightarrow \frac{V}{\beta} \times [10 - 0.7 - R I_E] = 10 - 0.7 - 0.07 I_E - 0.1 R I_E$$

$$I_E = 10 \text{ mA} \rightarrow \frac{V}{\beta} \times (9/3 - R \times 10) = 9/3 - 0.07 \times 10 - 0.1 \times 10 \times R$$

$$\rightarrow 13/95 - 15R = 9/3 - 0.7 - R \rightarrow R = 5/35 - 15R$$

۲۴- در مدار دارلینگتون شکل م- ۲۴، β معادل برای زوج ترانزیستورها را ۲۵۰۰ در نظر بگیرید.



الف) معادل تونن مدار بایاس بیس از دید نقطه β را به دست آورید.

ب) در مدار حاصل جریان I_E را به دست آورید.

ج) آیا می توان مقادیر مقاومت های R_1 و R_2 را طوری تعیین نمود که تغییرات حرارتی نقطه کار کاملاً جبران شود؟ (از تغییرات I_{CBO} و β صرف نظر می شود) در صورتی که جواب منفی است، در مدار جبران کننده اصلاح لازم

را به عمل آورده و شرایط لازم را برای پایداری I_E بیان کنید.

د) در مدار اصلاح با فرض $R_E = 1 \text{ K}\Omega$ و $R = 200 \text{ K}\Omega$ ، مقادیر R_1 و R_2 را طوری تعیین

کنید که مدار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β نیز برخوردار باشد.

☑ (۱۵ اه حل):

$$\left\{ \begin{aligned} V_{th} &= \frac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2} + \frac{2V_D R_1}{R_1 + R_2} = \frac{V_{CC} R_2 + 2V_D R_1}{R_1 + R_2} \\ R_{th} &= (R_1 \parallel R_2) + R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R \end{aligned} \right. \quad \text{الف)}$$

پس از اجرای مدار معادل تونن، مدار معادل به صورت زیر می باشد:

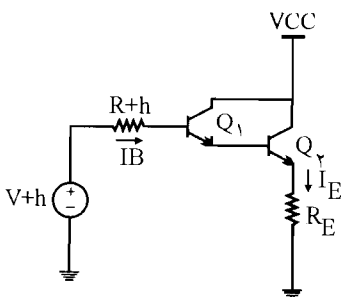
ب) برای محاسبه I_E ، KVL می نویسیم:

$$\text{KVL: } R_{th} I_B + R_E I_E = V_{th} - 2V_{BE}$$

$$\Rightarrow R_{th} \times \frac{I_E}{1 + \beta} + R_E I_E = V_{th} - 2V_{BE}$$

β معادل برای زوج ترانزیستورها طبق فرض مسأله ۲۵۰۰ می باشد و در $(1 + \beta)$ از عدد یک در برابر ۲۵۰۰ صرف نظر می کنیم.

$$\Rightarrow I_E \left(\frac{R_{th}}{\beta} + R_E \right) = V_{th} - 2V_{BE}$$



ج) در قسمت ب I_E را به دست آوریم:
 به جای V_{th} مقادیر آنها را جایگزین می‌کنیم:

$$I_E \left(\frac{R_{th}}{\beta} + R_E \right) = 2V_D \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} + V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} - 2V_{BE} \quad (I)$$

$V_D = V_{BE}$ در نظر می‌گیریم:

$$I_E \left(\frac{R_{th}}{\beta} + R_E \right) = 2V_{BE} \left(\frac{-R_2}{R_1 + R_2} \right) + V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

چون ضریب V_{BE} نمی‌تواند صفر گردد پس تغییرات I_E در رابطه با تغییرات درجه حرارت جبران نمی‌شود و اگر بخواهیم جبران شود باید یک دیود دیگر به مدار اضافه نماییم در این صورت در رابطه V_{th} به جای $2V_D$ ، $2V_D$ جایگزین می‌شود در این صورت رابطه (I) به صورت زیر در می‌آید.

$$I_E \left(\frac{R_{th}}{\beta} + R_E \right) = 2V_D \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} + V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} - 2V_{BE} \quad (I)$$

$V_D = V_{BE}$ در نظر می‌گیریم:

$$I_E \left(\frac{R_{th}}{\beta} + R_E \right) = 2V_{BE} \left(\frac{-R_2}{R_1 + R_2} \right) + V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

چون ضریب V_{BE} نمی‌تواند صفر گردد پس تغییرات I_E در رابطه با تغییرات درجه حرارت جبران نمی‌شود و اگر بخواهیم جبران شود باید یک دیود دیگر به مدار اضافه نماییم در این صورت در رابطه V_{th} به جای $2V_D$ ، $2V_D$ جایگزین می‌شود در این صورت رابطه (I) به صورت زیر در می‌آید.

$$I_E \left(\frac{R_{th}}{\beta} + R_E \right) = 2V_D \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} + V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} - 2V_{BE}$$

$$\Rightarrow I_E \left(\frac{R_{th}}{\beta} + R_E \right) = V_{BE} \left(\frac{2R_1 - 2R_1 - 2R_2}{R_1 + R_2} \right) + V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow I_E \left(\frac{R_{th}}{\beta} + R_E \right) = V_{BE} \left(\frac{R_1 - 2R_2}{R_1 + R_2} \right) + V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

حال برای جبران کامل تغییرات درجه حرارت ضریب V_{BE} باید صفر شود یعنی:

$$\frac{R_1 - 2R_2}{R_1 + R_2} = 0 \rightarrow R_1 - 2R_2 = 0 \rightarrow R_1 = 2R_2$$

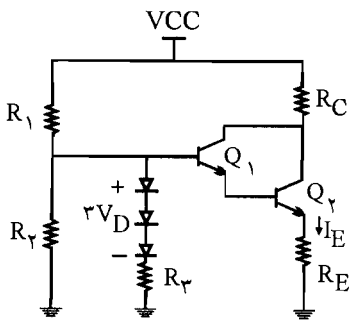
د) برای اینکه مدار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشد باید داشته باشیم:

$$\frac{R_{th}}{\beta} = 0.1 R_E \Rightarrow R_{th} = 0.1 R_E \times \beta = 0.1 R_E \times \beta = 0.1 \times 1 \times 2500 = 250 \text{ K}\Omega$$

$$\Rightarrow R + \frac{R_1 R_T}{R_1 + R_T} = 250 \quad \text{از طرفی} \begin{cases} R_1 = 2R_T \\ R = 200 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

$$\Rightarrow 200 + \frac{2R_T^2}{3R_T} = 250 \Rightarrow \frac{2}{3} R_T = 50 \Rightarrow R_T = 75 \text{ K}\Omega$$

$$\Rightarrow R_1 = 2 \times 75 \text{ K}\Omega = 150 \text{ K}\Omega$$



شکل م- 25

25- در مدار شکل م- 25، با فرض $I_{CBO} = 0$

الف) I_E را بر حسب سایر مقادیر مدار به دست می‌آید.
ب) با فرض تشابه کامل تغییرات حرارتی ولتاژ پیوند ترانزیستورها و دیودها، شرط لازم برای صفر شدن

$$\frac{\Delta I_E}{\Delta T} \text{ را تعیین کنید.}$$

☑ راه حل:

$$I_E = (1 + \beta)^T I_B = (1 + \beta)^T \frac{V_{th} - 2V_{BE}}{R_{th} + (1 + \beta)^T R_E} \quad \text{(الف)}$$

$$\begin{cases} R_{th} = (R_1 \parallel R_T \parallel R_T) \\ V_{th} = \frac{V_{CC} \times (R_T \parallel R_T)}{R_1 + (R_T \parallel R_T)} + 2V_D \times \frac{(R_1 \parallel R_T)}{(R_1 \parallel R_T) + R_T} \end{cases}$$

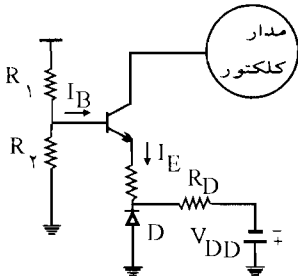
مقادیر به دست آمده برای R_{th} و V_{th} را در رابطه I_E قرار می‌دهیم.

$$\Rightarrow I_E = (1 + \beta)^T = \frac{\frac{V_{CC} \times (R_T \parallel R_T)}{R_1 + (R_T \parallel R_T)} + 2V_D \times \left(\frac{R_1 \parallel R_T}{(R_1 \parallel R_T) + R_T} \right)}{(R_1 \parallel R_T \parallel R_T) + (1 + \beta)^T \times R_E}$$

$$\frac{\partial I_E}{\partial T} = (1 + \beta)^T \frac{\frac{\partial V_D}{\partial T} \times \frac{2(R_1 \parallel R_T)}{(R_1 \parallel R_T) + R_T} - 2 \frac{\partial V_{BE}}{\partial T}}{R_{th} + (1 + \beta)^T R_E} = 0 \quad \text{(ب)}$$

$$\rightarrow \frac{2(R_1 \parallel R_T)}{(R_1 \parallel R_T) + R_T} - 2 = 0 \rightarrow (R_1 \parallel R_T) = 2R_T$$

۲۶- در مدار شکل ۵-۳۵، نشان دهید که با شرط $\frac{\partial V_{BE}}{\partial T} = \frac{\partial V_D}{\partial T}$ تغییرات حرارتی I_E برابر صفر خواهد بود.



☑ راه حل:

مدار معادل تونن در بیس را می نویسیم:

$$\begin{cases} R_{th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

در حلقه R_{th} و V_{th} و R_E و V_D و V_{BE} یک KVL می نویسیم:

$$\text{KVL: } R_{th} I_B + R_E I_E = V_{th} + V_D - V_{BE}$$

$$R_{th} \times \frac{I_E}{1+\beta} + R_E I_E = V_{th} + V_D - V_{BE}$$

$$I_E \left(\frac{R_{th}}{1+\beta} + R_E \right) = V_{th} + V_D - V_{BE}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta I_E}{\Delta T} \left(\frac{R_{th}}{1+\beta} + R_E \right) = \frac{\Delta V_{th}}{\Delta T} + \frac{\Delta V_D}{\Delta T} - \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T}$$

$$\frac{\Delta V_D}{\Delta T} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T} \text{ چون } V_{th} \text{ عدد ثابتی است پس } \frac{\Delta V_{th}}{\Delta T} \text{ برابر صفر خواهد بود و طبق فرض مسئله}$$

می باشد پس:

$$\frac{\Delta I_E}{\Delta T} \left(\frac{R_{th}}{1+\beta} + R_E \right) = 0 \Rightarrow \frac{\Delta I_E}{\Delta T} = 0$$

چون $\left(\frac{R_{th}}{1+\beta} + R_E \right)$ نمی تواند صفر شود پس باید $\frac{\Delta I_E}{\Delta T}$ برابر صفر گردد یعنی تغییرات حرارتی I_E برابر

صفر خواهد بود.

تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری در فرکانس‌های پایین

فصل ۶

۱ - مشخصات ترانزیستورهای فرکانس بالا غالباً بر حسب پارامتری y داده می‌شود. این پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$i_1 = y_{11} V_1 + y_{12} V_2$$

$$i_2 = y_{21} V_1 + y_{22} V_2$$

الف) یک مدار معادل شبیه ۶-۳ با استفاده از پارامترهای y ترسیم نمایید؟

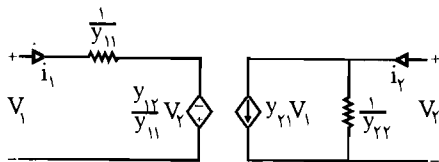
ب) برای هر یک از پارامترهای y یک تعریف مشخص ارائه نمایند؟

✓ (۱۰) اه حل:

الف) اگر معادله فوق به صورت زیر مرتب شود می‌توان یک مدار معادل شبیه معادل هیبرید به دست

$$V_1 = \frac{1}{y_{11}} i_1 - \frac{y_{12}}{y_{11}} V_2, \quad i_2 = y_{21} V_1 + y_{22} V_2 \quad (1)$$

مدار معادل رابطه (۱) می‌تواند به صورت زیر بیان شود.



(ب)

$$y_{11} = \left. \frac{i_1}{V_1} \right|_{V_2 = 0}$$

(۱) ادمیتانس ورودی وقتی که خروجی اتصال کوتاه است ←

$$y_{21} = \frac{i_2}{V_1} \Big|_{V_2=0} \quad \leftarrow \text{(۲) ادمیتانس انتقالی وقتی خروجی اتصال کوتاه شود}$$

$$y_{12} = \frac{i_1}{V_2} \Big|_{V_1=0} \quad \leftarrow \text{(۳) ادمیتانس انتقالی وقتی ورودی اتصال کوتاه است}$$

$$y_{22} = \frac{i_2}{V_2} \Big|_{V_1=0} \quad \leftarrow \text{(۴) ادمیتانس خروجی وقتی ورودی اتصال کوتاه است}$$

۲ - پارامترهای تقویت کننده بیس مشترک را بر حسب پارامترهای h_{fe} ، h_{ie} ، h_{oe} ، h_{re} به دست آورید؟

☑ راه حل: معادلات مدار معادل ترانزیستور با پارامترهای هیبرید در فرم امیتر مشترک چنین است که:

$$V_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} V_{ce} \quad (۱) \quad , \quad i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} V_{ce} \quad (۲)$$

اگر در معادله (۲) به جای $i_b = i_e - i_c$ و $V_{ce} = V_{cb} - V_{eb}$ قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$i_c = h_{fe} (-i_e - i_c) + h_{oe} (V_{cb} - V_{eb})$$

$$\Rightarrow i_c = \frac{-h_{fe}}{1+h_{fe}} i_e + h_{oe} \frac{V_{cb}}{1+h_{fe}} + \frac{h_{oe}}{1+h_{fe}} V_{be} \quad (۳)$$

معادله (۱) نیز با جایگذاری فوق به صورت زیر خواهد شد:

$$V_{be} = h_{ie} (-i_e - i_c) + h_{re} (V_{cb} - V_{eb}) \quad (۴)$$

اگر i_c را از معادله (۳) در معادله (۴) قرار دهیم خواهیم داشت:

$$V_{be} = -h_{ie} i_e + \frac{h_{ie} h_{fe}}{1+h_{fe}} i_e - \frac{h_{ie} h_{oe}}{1+h_{fe}} V_{cb} - \frac{h_{ie} h_{oe}}{1+h_{fe}} V_{be} + h_{re} V_{cb} + h_{re} V_{be} \quad (۵)$$

از معادله (۵) می توان V_{be} را به صورت زیر نوشت:

$$V_{be} = \frac{-h_{ie}}{(1-h_{re}) + (1+h_{fe}) + h_{ie} h_{oe}} i_e + \frac{h_{re} (1+h_{fe}) - h_{ie} h_{oe}}{(1-h_{re})(1+h_{fe}) + h_{ie} h_{oe}} V_{eb}$$

$$V_{eb} = -V_{be} = \frac{h_{ie}}{(1-h_{re})(1+h_{fe}) + h_{ie} h_{oe}} i_e + \frac{h_{ie} h_{oe} - h_{re} (1+h_{fe})}{(1-h_{re})(1+h_{fe}) + h_{ie} h_{oe}} V_{eb}$$

$$V_{eb} = h_{ib} i_c + h_{rb} V_{cb}$$

ضرایب هیبرید در مدل بیس مشترک عبارتست از:

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

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

مطابق روش فوق، V_{be} را از معادله (۴) محاسبه می‌کنیم:

$$V_{be} = \frac{-h_{ie}}{\lambda - h_{re}} i_c - \frac{h_{ie}}{\lambda - h_{re}} i_c + \frac{h_{re}}{\lambda - h_{re}} V_{cb} \quad (۶)$$

اگر V_{be} ، معادله (۶) را در معادله (۳) قرار دهیم خواهیم داشت:

$$i_c = \frac{-h_{fe}(\lambda - h_{re}) + h_{oe} h_{ie}}{(\lambda + h_{fe})(\lambda - h_{re}) + h_{oe} h_{ie}} i_c + \frac{h_{oe}}{(\lambda + h_{fe})(\lambda - h_{re}) + h_{oe} h_{ie}} V_{cb}$$

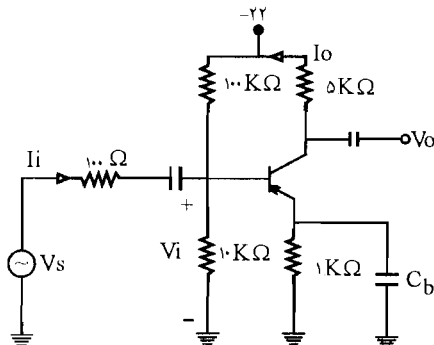
$$i_c = h_{pb} i_c + h_{ob} V_{cb}$$

ضرایب هیبرید در مدل بیس مشترک عبارتست از: ←

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

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

۳- در تقویت کننده شکل زیر ترانزیستور دارای $h_{fe} = 100$ است.



شکل م-۳

الف - کمیت‌های ΔV_s و R_i ، ΔI را محاسبه کنید؟

ب) اگر فقط نیمی از مقاومت امیتر را با خازن

کنارگذر C_b

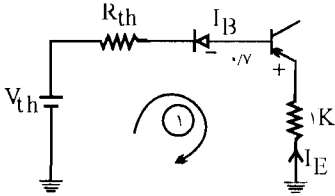
بای پاس نمائیم. ΔI و R_i و ΔV_s چقدر خواهد

شد؟ این عمل چگونه به خطی تر شدن

تقویت کننده سیگنال بزرگ کمک می‌کند؟

✓ (اه حل: الف) برای محاسبه h_{ie} ، ابتدا $I_{CQ} \approx I_{EQ}$ را محاسبه می‌کنیم. با توجه به مدار، بایاس

DC از نوع بایاس مقسم ولتاژ است. بنابراین خواهیم داشت:



$$V_{th} = \frac{-22 \times 10}{100 + 10} = -2V$$

$$R_{th} = 10K \parallel 100K = 9.09K\Omega$$

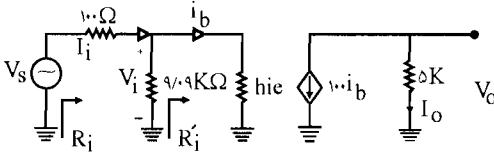
در حلقه ورودی (۱)، با اعمال KVL خواهیم داشت:

$$\frac{KVL}{(1)}: -V_{th} - 0.7V = R_{th} I_B + 1K \times I_E$$

$$\Rightarrow I_{EQ} = 1/19 \text{ mA}$$

$$h_{ie} = \frac{h_{fe} \cdot V_T}{I_{EQ}} = \frac{100 \times 26}{1/19} = 2/18 K\Omega$$

حال مدار معادل ac به صورت زیر خواهد شد:



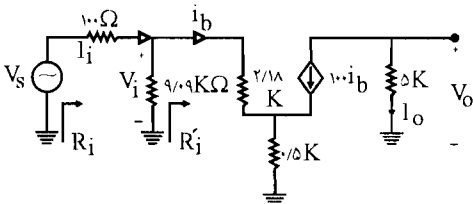
$$R'_i = h_{ie} = 2/18 K\Omega \Rightarrow R_i = 9.09K \parallel 2/18K \cong 1/78 K\Omega$$

$$A'_I = \frac{I_o}{i_b} = -h_{fe} = -100, \quad A_I = \frac{I_o}{I_i} = \frac{I_o}{i_b} \cdot \frac{i_b}{I_i} = \frac{1}{1/25} \times A'_I = -\frac{100}{1/25} = -2500$$

$$A'_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_L \cdot I_o}{R'_i \cdot i_b} = \frac{R_L}{R'_i} \times A'_I = -100 \times \frac{5}{2/18} = -2250$$

$$A_{VS} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o}{V_i} \times \frac{V_i}{V_s} = A'_V \times \frac{V_s \times \frac{R_i}{R_i + 0.1}}{V_s} = -216/8$$

(ب) اگر فقط نصف R_E توسط C_B بای پاس شود به صورت زیر خواهد شد:



$$R'_i = h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_E = 2/18 + (101) \times 0.5 = 52/68 K\Omega$$

$$A'_1 = \frac{I_o}{I_b} = -100, \quad A'_v = \frac{R_L}{R'_i} \times A'_1 = -9/48$$

$$I_b = I_i \times \frac{9/0.9}{9/0.9 + R'_i} = 0.147 \times I_i$$

$$A_1 = A'_1 \times \frac{I_b}{I_i} = A'_1 \times 0.147 \cong -15$$

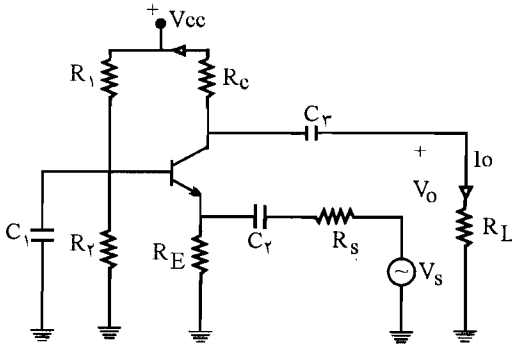
$$R_i = 9/0.9 \text{ K} \parallel R'_i = 7/7 \text{ K}\Omega$$

$$A_{vs} = A'_v \times \frac{R_i}{R_i + 0.1} = -9/4$$

در حالت امیتر، تقویت کاهش می یابد و سیگنال های با دامنه زیاد بریده نمی شوند و بدون برش و اعوجاج عبور خواهند کرد.

۴- یک تقویت کننده بیس مشترک با $R_i < 20$ و $A_{V_o} = \lim A_v > 50$ وقتی که R_L به سمت بی نهایت میل می کند طراحی کنید که در آن نوسان متقارن خروجی حداکثر بوده و پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β داشته باشیم. ($100 < \beta < 150$) در صورتی که β فوق مناسب نباشد به دلخواه از یک β با میزان تغییرات مناسب استفاده کنید؟

☑ راه حل:



مدار کلی تقویت کننده بیس مشترک به صورت مقابل است.

مانند مسئله قبل چون بایاس DC از نوع مقسم ولتاژ است با اعمال KVL در حلقه ورودی خواهیم داشت:

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

$$R_{th} I_B + R_E I_E = V_{th} - V_{BE}$$

$$\left(\frac{R_{th}}{\beta} + R_E\right) I_E = V_{th} - V_{BE}$$

اگر $I_E \approx I_C$ خواهیم داشت:



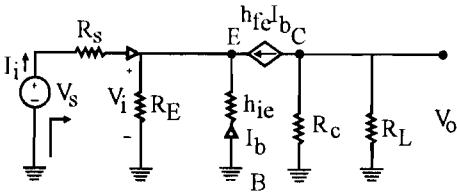
برای داشتن پایداری مناسب نسبت به β باید داشته باشیم:

$$\frac{R_{th}}{\beta_{min}} \leq 10 R_E \quad (1)$$

با در نظر گرفتن حالت مساوی در رابطه (1) خواهیم داشت:

$$R_{th} = 10 R_E \beta_{min} = 10 R_E$$

مدار معادل سیگنال کوچک ac مطابق شکل زیر است.



$$V_i = -h_{ie} I_b, \quad V_o = -h_{fe} I_b \times \frac{R_c \times R_L}{R_c + R_L} \Rightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} \times \frac{R_c R_L}{R_c + R_L}$$

$$A_{V_o} = A_v \Big|_{R_L \rightarrow \infty} = \frac{R_c \cdot h_{fe}}{h_{ie}} \Rightarrow \frac{R_c \times h_{fe}}{h_{ie}} > 50. \quad (2)$$

$$R_i = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} \approx \frac{h_{ie}}{h_{fe}}$$

برای امپدانس ورودی به راحتی می‌توان نوشت ←

$$R_i = \frac{h_{fe} V_T}{I_c} \approx \frac{V_T}{I_c} = \frac{26}{I_c} < 20 \Rightarrow I_c > \frac{26}{20} = 1.3 \text{ mA} \quad (3)$$

از رابطه (2) داریم:

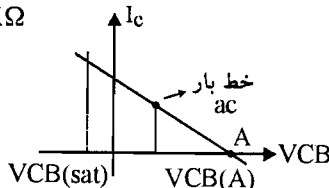
$$\frac{R_c h_{fe}}{h_{ie}} > 50 \quad \text{یا} \quad \frac{R_c h_{fe}}{h_{fe} V_T} > 50 \Rightarrow \frac{R_c \cdot I_c}{V_T} > 50 \Rightarrow \frac{R_c I_c}{26} > 50.$$

اگر فرض کنیم $I_c = 1.3 \text{ mA}$ خواهیم داشت:

$$R_c \times \frac{1.3}{26} > 50 \Rightarrow R_c \geq 1 \text{ K}\Omega$$

R_c را برابر $1 \text{ K}\Omega$ ، انتخاب می‌کنیم. و اگر فرض کنیم $R_E = 1 \text{ K}\Omega$ خواهیم داشت:

$$R_{th} = 10 R_E = 10 \text{ K}\Omega$$



با توجه به رابطه خط بار ac داریم:

برای داشتن حداکثر انحراف متقارن در خروجی، نقطه کار را وسط خط بار ac در نظر می‌گیریم بنابراین:

$$V_{CBQ} = \frac{V_{CB(A)} + V_{CB(sat)}}{2}, \quad V_{CB(A)} = V_{CBQ} + R_C I_{CQ}$$

$$V_{CBQ} = \frac{V_{CBQ} + R_C I_{CQ} + V_{CB(sat)}}{2} \Rightarrow \boxed{V_{CBQ} = R_C I_{CQ} + V_{CB(sat)}} \quad (4)$$

$$V_{CB(sat)} = V_{CE(sat)} - V_{BE(sat)} = 0.2 - 0.7 = -0.5 \text{ Volt}$$

بنابراین از رابطه (4) داریم:

$$V_{CBQ} = 1 \times 1/5 - 0.5 = 1 \text{ V}$$

در حلقه V_{CC} ، R_C ، V_{CB} ، V_{DE} و R_E و زمین داریم:

$$V_{CC} - V_{CBQ} - V_{BE} = R_C I_{CQ} + R_E I_{CQ}$$

$$\Rightarrow V_{CC} = 1 + 0.7 + 1 \times 1/5 + 1 \times 1/5 = 4/7 \text{ V}$$

و از آنجا خواهیم داشت:

$$V_{th} = 4/7 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 10 \text{ K}\Omega$$

در حلقه V_{CC} ، V_{CB} ، R_{th} و V_{th} داریم:

$$-R_C I_C + R_{th} I_B = -V_{CC} - V_{th} - V_{CB}$$

$$\Rightarrow V_{th} = V_{CC} - R_C I_C + R_{th} \times \frac{I_C}{\beta_{av}} - V_{CB} = 4/7 - 1 \times 1/5 + 10 \times \frac{1/5}{125} - 1 = 2/32 \text{ V}$$

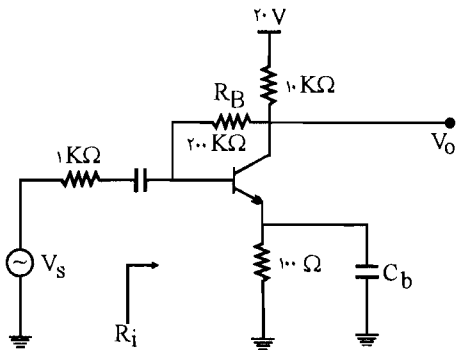
$$B_{av} = \frac{B_{min} + B_{max}}{2}$$

$$\left. \begin{aligned} 2/32 &= 4/7 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} &= 10 \text{ K}\Omega \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} R_1 &= 20/25 \text{ K}\Omega \\ R_2 &= 19/75 \text{ K}\Omega \end{aligned}$$

۵- در تقویت کننده شکل م-۵ ترانزیستور دارای $h_{fe} = 100$ و $h_{re} = 0$ و $h_{oe} = 0$ است.

الف) کمیت‌های A_{vs} و R_i را محاسبه کنید؟

ب) اگر وسط مقاومت R_B را توسط خازن به زمین وصل کنیم. کمیت‌های مذکور چقدر خواهد شد؟



☑ (راه حل):

شکل ۴-۵

الف) برای به دست آوردن h_{ie} ابتدا باید I_C را به دست آوریم.

$$KVL: 10\text{K}\Omega(I_C + I_B) + 200\text{K}\Omega I_B + 0.1(I_E) = 20 - 0.7, \quad I_E = I_C + I_B$$

$$\Rightarrow 10(I_C + I_B) + 200I_B + 0.1(I_C + I_B) = 19.3 \Rightarrow 10.1(I_C + I_B) + 200I_B = 19.3$$

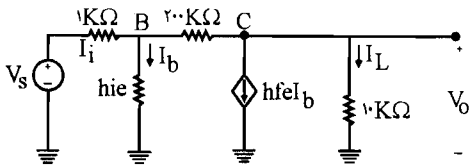
$$\text{از طرفی: } I_C = \beta I_B = 100 I_B$$

$$\Rightarrow 10.1(\beta I_B + I_B) + 200 I_B = 19.3 \Rightarrow 10.1(101 I_B) + 200 I_B = 19.3 \Rightarrow I_B = 0.158 \text{ mA}$$

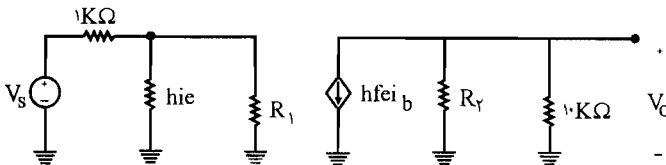
$$\Rightarrow I_C = \beta I_B = 100 \times 0.158 = 15.8 \text{ mA} \Rightarrow I_C = 15.8 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{100 \times 26}{15.8} = 1652 \Omega \Rightarrow h_{ie} = 1.652 \text{ K}\Omega$$

مدار معادل را رسم می‌کنیم:



با استفاده از قضیه میسر مقاومت $200\text{K}\Omega$ را به دو مقاومت R_1 و R_2 تبدیل می‌کنیم:



$$K = A_V = \frac{V_O}{V_i} \Rightarrow R_2 = \frac{200\text{K}}{K-1} \approx 200\text{K}\Omega$$

$$R_L' = 10\text{K}\Omega \parallel 200\text{K}\Omega$$

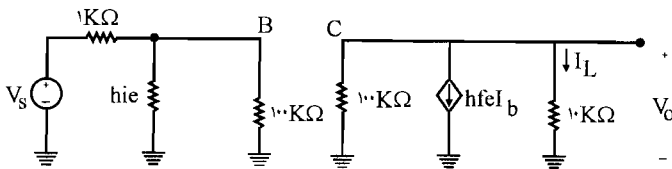
$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{-h_{fe} I_b \times (10 \text{ K}\Omega \parallel 200 \text{ K}\Omega)}{h_{ie} I_b} = \frac{-100 \times \left(\frac{10 \times 200}{10 + 200}\right)}{1/645} = -578/9$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{200}{1-K} = \frac{200}{1-A_V} = \frac{200}{1+578/9} = 0.345 \text{ K}\Omega$$

$$R_i = R_1 \parallel h_{ie} = 0.345 \parallel 1/645 = 0.285 \text{ K}\Omega \Rightarrow R_i = 285 \Omega$$

$$A_{VS} = \frac{V_O}{V_s} = \frac{V_O}{V_i} \times \frac{V_i}{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -578/9 \times \frac{0.285}{0.285 + 1} = -128/4$$

ب) اگر وسط مقاومت R_B را توسط خازن به زمین وصل کنیم مدار معادل به صورت زیر می‌باشد.



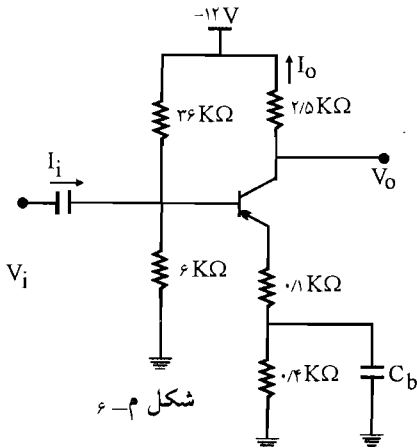
$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{-h_{fe} I_b \times (10 \text{ K}\Omega \parallel 100 \text{ K}\Omega)}{h_{ie} I_b} = \frac{-100 \times \left(\frac{10 \times 100}{10 + 100}\right)}{1/645} = -552/6$$

$$R_i = 100 \parallel h_{ie} = \frac{1/645 \times 100}{1/645 + 100} = 1/62 \text{ K}\Omega$$

$$A_{VS} = -552/6 \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -552/6 \times \frac{1/62}{1/62 + 1} = -34/6$$

۶) در مدار تقویت کننده شکل م-۶، با فرض $h_{fe} = 100$ و $h_{oe} = 0$ ، بهره جریان، بهره

ولتاژ و مقاومت ورودی را محاسبه کنید؟



شکل م-۶

راه حل:

با اجرای تونن در ورودی داریم:

$$\begin{cases} R_{th} = 6\text{K}\Omega \parallel 36\text{K}\Omega = \frac{6 \times 36}{6 + 36} = 5/14 \\ V_{th} = -12 \times \frac{6}{6 + 36} = -1/71\text{V} \end{cases}$$

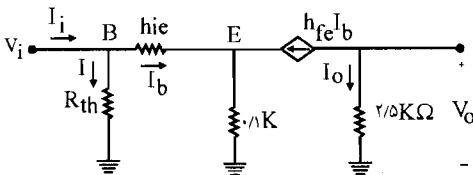
$$\text{KVL: } R_{th} I_B + (0/1 + 0/4) I_E = -(V_{th}) - V_{EB}$$

$$5/14 I_B + 0/5(1 + \beta) I_B = 1/71 - 0/7 = 1/0/1 \Rightarrow I_B = \frac{1/0/1}{55/64} = 0/0/18\text{mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0/0/18 = 1/8\text{mA}$$

$$h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{100 \times 26}{1/8} = 1/44\text{K}\Omega$$

مدار معادل به صورت زیر درمی آید:



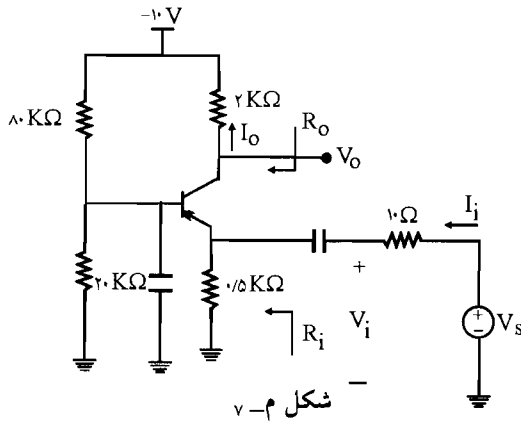
$$I_e = -100 I_B \quad , \quad I_i = I_b + I_e = I_b + \frac{1/44 I_b + 0/1(I_b + 100 I_b)}{5/14}$$

$$\Rightarrow I_i = 3/24 I_b \Rightarrow A_I = \frac{I_0}{I_i} = \frac{-100 I_b}{3/24 I_b} = -30/9$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{1/44 I_b + (0/1)(I_b + 100 I_b)}{3/24 I_b} = 3/56\text{K}\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -30/9 \times \frac{2/5}{3/56} = -21/7$$

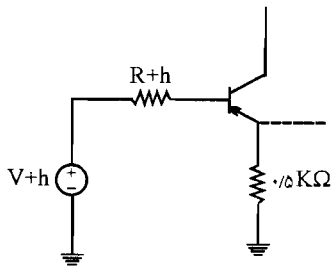
۷- در مدار شکل م-۷ با فرض $h_{fe} = 100$ مقادیر A_V ، A_{V_s} ، R_i ، A_I و R_O را محاسبه کنید؟



راه حل:

ابتدا مدار معادل تونن ورودی را می یابیم:

$$\begin{cases} R_{th} = 20\text{ K}\Omega \parallel 80\text{ K}\Omega = \frac{20 \times 80}{20 + 80} = 16\text{ K}\Omega \\ V_{th} = -10 \times \frac{20}{20 + 80} = -2\text{ V} \end{cases}$$



$$\text{KVL: } R_{th} I_B + 0.5 I_E = -V_{th} - V_{EB}$$

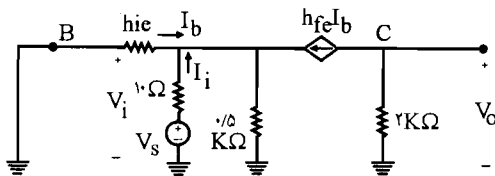
$$\Rightarrow 16 I_B + 0.5 (1 + \beta) I_B = +2 - 0.7 = 1/3$$

$$\Rightarrow I_B (16 + 0.5 + 10.1) + 1/3 \Rightarrow I_B = 0.0195\text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_C = \beta I_B = 100 \times I_B = 1/95\text{ mA}$$

$$\Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{100 \times 26}{1/95} = 1/33\text{ K}\Omega$$

پس مدار معادل به صورت زیر می باشد:



$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{-h_{fe} I_b \times 2\text{ K}\Omega}{-h_{ie} I_b} = \frac{-2 \times 100}{-1/33} = 15/0.3$$

$$\text{KCL: } I_i + I_b + h_{fe} I_b + \frac{V_i}{0.5} = 0 \quad \text{و}$$

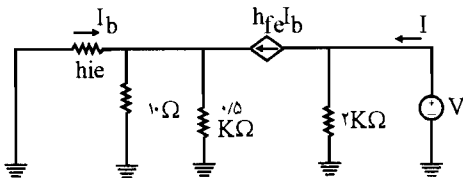
$$\Rightarrow I_i = -(I_b + h_{fe} I_b) - \frac{h_{ie} I_b}{0.5}$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{-h_{ie} I_b}{-(I_b + h_{fe} I_b) - \frac{h_{ie} I_b}{0.5}} = \frac{h_{ie}}{(1 + h_{fe}) - \frac{h_{ie}}{0.5}} = \frac{1/33}{1.01 - \frac{1/33}{0.5}} = 12/8 \Omega$$

$$A_{VS} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = 150/3 \times \frac{12/8}{12/8 + 1.0} = 84/4$$

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{I_b}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b}{-(I_b + h_{fe} I_b) - \frac{h_{ie} I_b}{0.5}} = \frac{+h_{fe}}{(1 + h_{fe}) + 2h_{ie}} = \frac{100}{(1.01) + 2 \times 1/33} = 0/96$$

برای به دست آوردن مقاومت خروجی یک منبع ولتاژ V را در دو سر مقاومت $2K\Omega$ در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ورودی صفر می‌شود.



$$R_O = \frac{V}{I}$$

$$\text{از طرفی: } I = \frac{V}{2K\Omega} + h_{fe} I_b \quad \text{و (I)}$$

$$\text{با استفاده از تقسیم جریان: } I_b = \frac{-h_{fe} I_b \times (1.0 \Omega \parallel 0.5 K\Omega)}{(1.0 \Omega \parallel 0.5 K\Omega) + h_{ie}} = \frac{-h_{fe} I_b \times 1.0}{1.0 + 1/33}$$

$$\Rightarrow I_b = \left(1 + \frac{h_{fe} \times 1.0}{11/33}\right) = 0 \Rightarrow I_b = 0$$

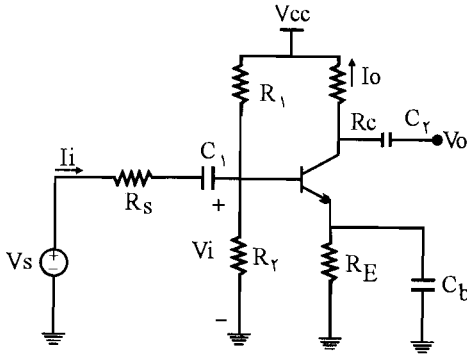
$$(I) : I = \frac{V}{2K\Omega} + h_{fe} I_b = \frac{V}{2K\Omega} \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = 2K\Omega$$

۸- یک تقویت کننده امپتر مشترک با $A_V = 200$ و $R_i = 1K\Omega$ را طوری طراحی نمایند که نقطه کار

آن از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشند. $V_{CC} = 18V$ و $h_{fe} = 100$ است.

☑ راه حل:

شکل کلی تقویت‌کننده به صورت زیر می‌باشد:



معادل تونن در ورودی را می‌یابیم:

$$\begin{cases} R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

فرض: $I_C \simeq I_E$

$$\text{KVL: } R_{th} I_B + R_E I_E = V_{th} - V_{BE} \Rightarrow R_{th} \times \frac{I_C}{\beta} + R_E I_C = V_{th} - V_{BE}$$

$$\Rightarrow I_C \left(R_E + \frac{R_{th}}{\beta} \right) = V_{th} - V_{BE} \quad (I)$$

برای اینکه نقطه کار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشد باید داشته باشیم:

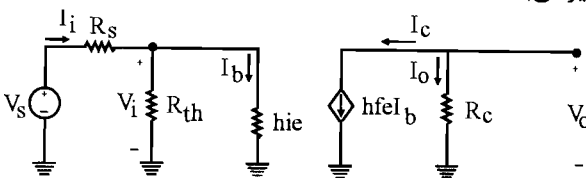
$$\frac{R_{th}}{\beta_{min}} = 0.1 R_E$$

$$\Rightarrow R_{th} = 0.1 \times 100 \times R_E = 10 R_E \quad (II)$$

با جایگذاری (II) در (I) داریم:

$$I_C = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E + \frac{10 R_E}{100}} = \frac{1}{11} R_E$$

مدار معادل سیگنال کوچک به صورت زیر می‌باشد:



$$A_i = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b}{I_b + \frac{V_i}{R_{th}}} = \frac{-h_{fe} I_b}{I_b + \frac{h_{ie} I_b}{R_{th}}} = \frac{-100 R_{th}}{R_{th} + h_{ie}}$$

$$R_i = \frac{R_{th} h_{ie}}{R_{th} + h_{ie}} = \frac{10 R_E h_{ie}}{10 R_E + h_{ie}}$$

$$A_v = A_i \times \frac{R_C}{R_i} = \frac{-100 R_{th}}{R_{th} + h_{ie}} \times \frac{R_C (R_{th} + h_{ie})}{R_{th} \times h_{ie}} = \frac{-100 R_C}{h_{ie}}$$

$$A_v = 200 \Rightarrow 200 = \frac{-100 R_C}{h_{ie}} \Rightarrow \frac{R_C}{h_{ie}} = 2 \quad (III)$$

طبق فرض مسئله $R_i = 1 K\Omega$ می‌باشد پس در رابطه R_i داریم:

$$R_i = \frac{10 R_E \times h_{ie}}{10 R_E + h_{ie}} = 1 K\Omega \Rightarrow 10 R_E h_{ie} = 10 R_E + h_{ie} \Rightarrow 10 R_E (-1 + h_{ie}) = h_{ie}$$

$$\Rightarrow R_E = \frac{h_{ie}}{10 (h_{ie} - 1)} \quad (IV)$$

و در تقویت کننده بهتر آن می‌باشد که نقطه کار وسط خط بار ac باشد یعنی باید داشته باشیم:

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CE}(\text{sat})}{R_{ac} + R_{dc}} \quad \begin{cases} R_{ac} = R_C \\ R_{dc} = R_C + R_E \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_{CQ} = \frac{18}{R_C + R_C + R_E} = \frac{18}{2R_C + R_E} \quad (V)$$

به جای R_C و R_E مقادیر به دست آمده از روابط (III) و (IV) را قرار می‌دهیم:

$$I_{CQ} = \frac{18}{2 \times 2 h_{ie} + \frac{h_{ie}}{10 (h_{ie} - 1)}} = \frac{18 \times 10 \times (h_{ie} - 1)}{40 \cdot h_{ie} (h_{ie} - 1) + h_{ie}}$$

$$\Rightarrow 18 \cdot (h_{ie} - 1) = 2/6 \times 40 \cdot (h_{ie} - 1) + 2/6$$

$$\Rightarrow (h_{ie} - 1) = \frac{2/6}{76} = 0.0026 \Rightarrow h_{ie} = 1.0026 K\Omega$$

$$(III): R_C = 2 h_{ie} = 2 \times 1.0026 = 2.0052 K\Omega$$

$$(IV): R_E = \frac{h_{ie}}{1 \cdot (h_{ie} - 1)} = \frac{1/0.34}{1 \cdot (1/0.34 - 1)} = 3/0.4 \text{ K}\Omega$$

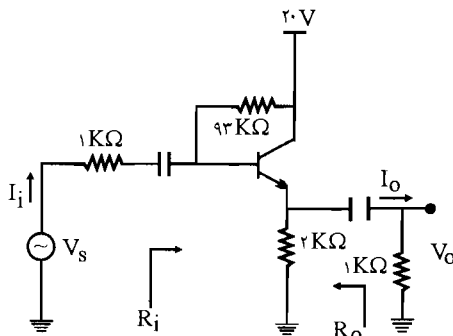
$$(V): I_{CQ} = \frac{1\mu}{2R_C + R_E} = 2/51 \text{ mA} = \frac{V_{th} - 0/V}{1/1 R_E} \Rightarrow V_{th} = 9/0.9 \text{ V}$$

$$R_{th} = 1 \cdot R_E = 1 \cdot 3/0.4 = 3 \cdot 0.4 \text{ K}\Omega = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{3 \cdot 0.4}{R_1}$$

$$V_{th} = 9/0.9 = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 18 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 18 \times \frac{3 \cdot 0.4}{R_1} \Rightarrow R_1 = 59/48 \text{ K}\Omega$$

$$\Rightarrow R_2 = \frac{9/0.9 \times R_1}{18 - 9/0.9} = 6 \cdot 0.68 \text{ K}\Omega$$

۹- در تقویت کننده امیتر فالور شکل م- ۹ که ترانزیستور آن دارای $h_{fe} = 50$ است. مقادیر A_i ،



شکل م- ۹

A_{V_S} و R_i و R_o را محاسبه کنید. حداکثر دامنه ولتاژ ورودی V_s که تقویت کننده در آن خطی می ماند چقدر است؟ در صورت افزایش حداکثر ورودی، شکل موج خروجی از بالا زودتر برش داده می شود یا از پایین؟ توضیح دهید؟

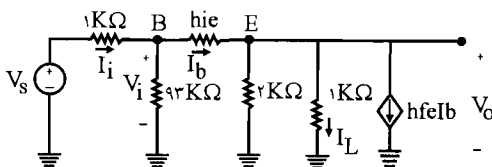
☑ راه حل:

$$\text{KVL: } 93I_B + 2I_E = 20 - V_{BE} = 20 - 0.7 = 19.3 \Rightarrow 93I_B + 2(1 + \beta)I_B = 19.3$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{19.3}{195} = 0.098 \text{ mA} \Rightarrow I_C = \beta I_B = 4/95 \text{ mA}$$

$$h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{50 \times 26}{4/95} = 262/6 \Omega = 0.263 \text{ K}\Omega$$

مدار معادل به صورت زیر می باشد:



$$A_I = \frac{I_L}{I_i} = \frac{(I_b + h_{fe} I_b) \times \frac{Y}{1+Y}}{I_b + \frac{V_i}{93}} = \frac{\frac{Y}{Y} I_b (1 + h_{fe})}{I_b + \left(\frac{h_{ie} I_b + 1 \times I_L}{93} \right)}$$

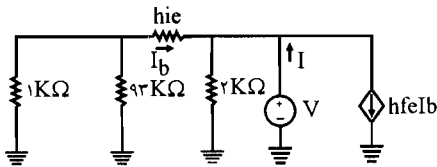
$$= \frac{\frac{Y}{Y} I_b (1 + h_{fe})}{I_b + \left(\frac{h_{ie} I_b + \frac{Y}{Y} I_b (1 + h_{fe})}{93} \right)} = \frac{\frac{Y}{Y} \times 51}{1 + \left(\frac{0.263 + \frac{Y}{Y} \times 51}{93} \right)} = 24/85$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie} I_b + 1 \times I_b}{I_b + \frac{V_i}{93}} = \frac{h_{ie} I_b + \frac{Y}{Y} \times 51 I_b}{I_b + \frac{h_{ie} I_b + \frac{Y}{Y} \times 51 I_b}{93}} = \frac{0.263 + 34}{1 + \frac{0.263 + 34}{93}} = 25 K\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = 24/85 \times \frac{1}{25} = 0.994$$

$$A_{Vs} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = 0.994 \times \frac{25}{25 + 1} = 0.95$$

برای به دست آوردن مقاومت خروجی R_o یک منبع ولتاژ V را در خروجی موازی با مقاومت $2 K\Omega$ (در نبود مقاومت $1 K\Omega$) قرار می‌دهیم و منبع ورودی را صفر قرار می‌دهیم:



$$I = -h_{fe} I_b - I_b + \frac{V}{Y} \quad (I)$$

$$KVL: (1 K\Omega \parallel 93 K\Omega) I_b + h_{ie} I_b = -V$$

$$\Rightarrow \frac{1 \times 93}{1 + 93} I_b + 0.263 I_b = -V \Rightarrow I_b = \frac{-V}{1/25}$$

$$(I): I = -h_{fe} I_b - I_b + \frac{V}{Y} = -50 \times \frac{-V}{1/25} + \frac{V}{1/25} + \frac{V}{2} = V \left[\frac{51}{1/25} + \frac{1}{2} \right] = V \times 41/3$$

$$\Rightarrow R = \frac{V}{I} = \frac{1}{41/3} = 0.24 K\Omega \approx 24 \Omega$$

به دست آوردن حداکثر دامنه ولتاژ ورودی V_s که تقویت کننده در آن خطی می ماند:

$$I_{CQ} = 4/95 \text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - 2K\Omega \times I_E = 20 - 2\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right)I_C$$

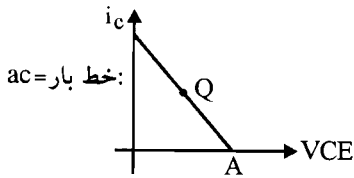
$$\Rightarrow V_{CEQ} = 20 - 2 \times \frac{51}{50} \times 4/95 = 9/9 \text{ V}$$

$$\text{ac بار: } V_{ce} = V_c - V_e = 0 - R_{ac} \times i_e, \quad \begin{cases} R_{ac} = 2K\Omega \parallel 1K\Omega = \frac{2}{3} \\ i_e = \frac{1+\beta}{\beta} i_c \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{CE} = -\frac{2}{3} \times \frac{51}{50} i_c \Rightarrow V_{ce} = -0/69 i_c$$

$$\begin{cases} V_{ce} = V_{CE} - V_{CEQ} \\ i_c = i_C - i_{CQ} \end{cases} \Rightarrow V_{CE} - V_{CEQ} = -0/69 (i_C - i_{CQ})$$

V_{CE} نقطه A به ازای $i_C = 0$ از معادله خط بار ac به دست می آید.



$$V_{CE}(A) = V_{CEQ} + 0/69 i_{CQ}$$

$$V_{CE}(A) = 9/9 + 0/69 \times 4/95 = 13/27$$

$$\text{قطع } V_{CE} = V_{CE}(A) = 13/27 \quad \begin{cases} V_{CEQ} = 9/9 & \text{نقطه کار} \\ V_{CE}(\text{sat}) = 0/27 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{ce} = V_{CE}(A) - V_{CEQ} = 13/27 - 9/9 = 3/37 \text{ V در حالت قطع } V_{ce}$$

$$V_{ce} = 0/2 - 9/9 = -9/9 \text{ در حالت اشباع } V_{ce}$$

$$\begin{cases} V_o = -V_{ce} = +9/9 & \text{در حالت اشباع} \\ V_o = -V_{ce} = -3/37 & \text{در حالت قطع} \end{cases}$$

پس دیده می شود حداکثر دامنه خروجی از سمت منفی $3/37$ می تواند باشد و سیگنال از این طرف با این دامنه برش می خورد. و از سمت بالا $9/9$ ولت می باشد. مقدار متناظر ورودی برای این خروجی عبارت

است از:

$$A_{V_s} = \frac{V_o}{V_s} \Rightarrow V_s = \frac{V_o}{A_{V_s}} = \frac{3/37}{0/954} = 3/53 \quad (\text{مقدار ماکزیمم مجاز بدون برش})$$

۱۰- در تقویت‌کننده شکل م - ۱۰ ترانزیستور دارای $h_{fe} = 40$ است.

الف) مقادیر R_O و A_{V_S} ، A_V ، R_i ، A_I را محاسبه کنید؟

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

لازم است تا مقادیر بند الف تغییر نکند؟

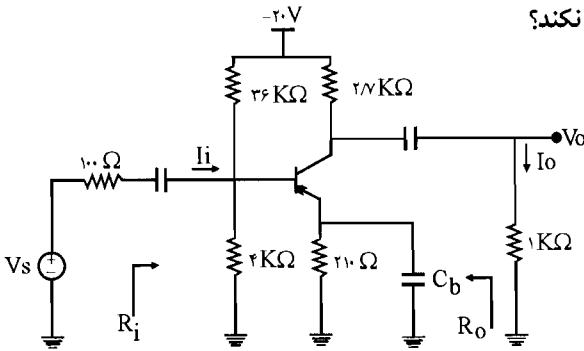
ج) اگر در مدار جدید

ترانزیستور NPN دارای

$h_{fe} = 100$ باشد مقادیر

جدید کمیت‌های A_V ، R_i ، A_I

و A_{V_S} چقدر خواهند شد؟

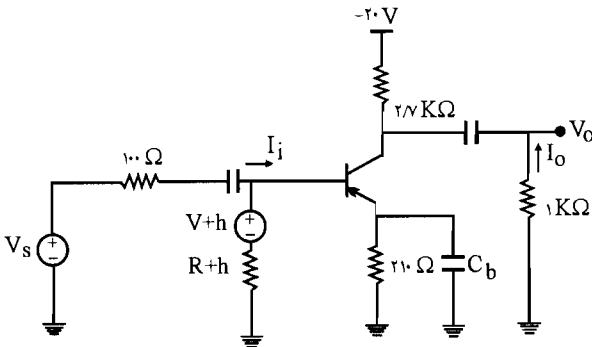


شکل م-۱۰

☑ (راه حل):

$$\begin{cases} R_{th} = 4\text{K}\Omega \parallel 36\text{K}\Omega = \frac{4 \times 36}{4 + 36} = 3/6\text{K}\Omega \\ V_{th} = -20 \times \frac{4\text{K}\Omega}{4\text{K}\Omega + 36\text{K}\Omega} = -2\text{V} \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:

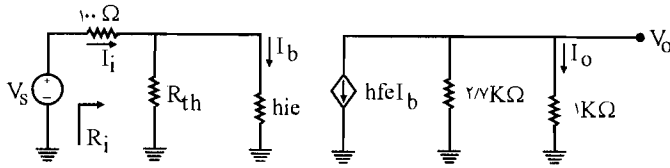


$$\text{KVL: } R_{th} I_B + 0/21 I_E = -V_{th} - V_{EB} \Rightarrow 3/6 I_B + 0/21 (\beta + 1) I_B = 2 - 0/7 = 1/3$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{1/3}{12/21} = 0/106 \text{ mA} \Rightarrow I_C = 40 \times I_B = 4/26 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{40 \times 26}{4/26} = 244\Omega = 0/244\text{K}\Omega$$

پس با h_{ie} مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b \times \frac{2/V}{2/V+1}}{I_b + \frac{.0244 I_b}{3/6}} = \frac{-4 \cdot \frac{2/V}{3/V}}{1 + \frac{.0244}{3/6}} = -\frac{29/2}{1/0.7} = -27/3$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_{th} \parallel h_{ie} = 3/6 \parallel .0244 = 228/5 \Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -27/3 \times \frac{1}{.02285} = -119/5$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -119/5 \times \frac{.02285}{.02285 + .01} = -8/31$$

$$R_O = 2K\Omega$$

(ب) برای این منظور باید منبع V_{CC} را از مقدار $20V$ به مقدار $20V$ تغییر داد.

$$V_{th} = 20 \times \frac{4}{4+36} = 2V \quad (ج)$$

$$KVL: R_{th} I_B + .021 I_E = +V_{th} - V_{BE} \Rightarrow 3/6 I_B + .021(1+\beta) I_B = 2 - .7 = 1/3$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{1/3}{24/81} = .052 \text{ mA} \Rightarrow I_C = \beta I_B = 100 \times .052 = 5/2 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{100 \times 26}{5/2} = 500 \Omega \Rightarrow h_{ie} = .5K\Omega$$

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b \times \frac{2/V}{2/V+1}}{I_b + \frac{.05 I_b}{3/6}} = \frac{-100 \cdot \frac{2/V}{3/V}}{1 + \frac{.05}{3/6}} = -64$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_{th} \parallel h_{ie} = 3/6 \parallel .5 = .439 K\Omega = 439 \Omega$$

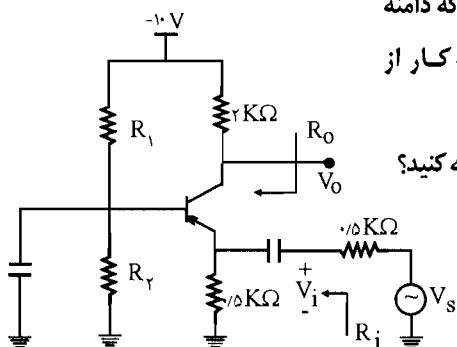
$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -64 \times \frac{1}{0.439} = -145/8$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -145/8 + \frac{0.439}{0.439 + 0.1} = -118/7$$

۱۱ - تقویت کننده شکل م - ۱۱ را در نظر بگیرید. فرض کنید $50 < \beta < 100$ است.

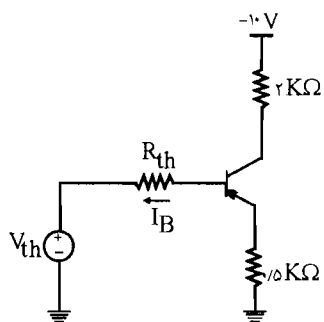
الف) مقاومتهای R_1 و R_2 را طوری تعیین کنید که دامنه نوسانات مقارن خروجی حداکثر شده و نقطه کار از پایداری مطلوبی در برابر β برخوردار باشد.

ب) مقادیر A_V ، A_{V_s} ، R_i ، A_I و R_O را محاسبه کنید؟



شکل م-۱۱

☑ (اه حل: مدار معادل تونن در ورودی به صورت زیر می باشد:



$$\text{KVL: } R_{th} I_B + R_E I_E = -V_{th} - V_{EB}$$

$$\Rightarrow R_{th} I_B + R_E \times (1 + \beta) I_B = -V_{th} - V_{EB}$$

$$\Rightarrow I_B (R_{th} + (1 + \beta) R_E) = -V_{th} - V_{EB} \quad (I)$$

$$\text{از طرفی: } I_C = \beta I_B \Rightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

$$(I): \frac{I_C}{\beta} (R_{th} + (1 + \beta) R_E) = -V_{th} - V_{EB}$$

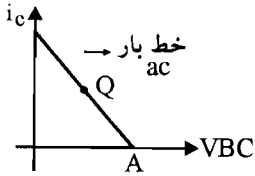
برای اینکه نقطه کار از پایداری خوبی در برابر β برخوردار باشد باید داشته باشیم:

$$\frac{R_{th}}{\beta_{min}} = 0.1 R_E \Rightarrow R_{th} = 0.1 \beta_{min} \times R_E = 0.1 \times 50 \times 0.5 = 2.5 K\Omega$$

برای اینکه در تقویت کننده بیس مشترک حداکثر دامنه نوسان مقارن خروجی را داشته باشیم:

$$V_{BCQ} = \frac{V_{BC(A)} + V_{BC(sat)}}{2} \quad (II)$$

نقطه A محل تلاقی خط بار ac با V_{BC} می باشد.



$$ac \text{ بار خط معادله: } V_{BC} - V_{BCQ} = -R_{ac}(i_C - i_{CQ})$$

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

$$i_C = 0 \Rightarrow V_{BC}(A) = V_{BCQ} + 2i_{CQ}$$

$$(II) : V_{BCQ} = \frac{V_{BC}(A) + V_{BC}(sat)}{2}$$

از $V_{BC}(sat)$ صرف نظر می کنیم.

$$(II) : V_{BCQ} = \frac{V_{BC}(A)}{2} = \frac{V_{BCQ} + 2i_{CQ}}{2}$$

$$\Rightarrow V_{BCQ} = 2i_{CQ} \quad (III)$$

$$KVL: 0.5I_E + 2I_C = -V_{CC} - V_{EB} - V_{BC} \Rightarrow 0.5\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right)I_C + 2I_C = -(-10) - V_{EB} - 2I_C$$

$$\beta = \beta_{av} = \frac{50 + 100}{2} = 75$$

$$\Rightarrow 0.5\left(\frac{1+75}{75}\right)I_C + 2I_C = 10 - 2I_C - 0.7 \Rightarrow 9/3 - 2I_C \Rightarrow I_C = 2/0.6 \text{ mA}$$

در حلقه ورودی KVL را می نویسیم:

$$R_{th}I_B + 0.5(I_B + I_C) = -V_{th} - 0.7 = -V_{th} - 0.7$$

$$\beta_{av} = 75 \Rightarrow 2/0.5 \times \frac{2/0.6}{75} + 0.5\left(\frac{2/0.6}{75} + 2/0.6\right) = -V_{th} - 0.7$$

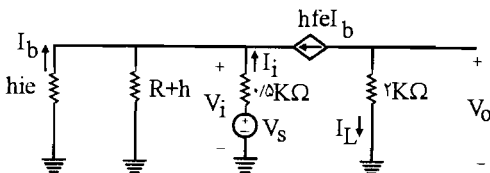
$$\Rightarrow V_{th} = -1/812$$

$$\begin{cases} R_{th} = 2/0.5 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \\ V_{th} = -10 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = -1/812 \Rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0.182 \end{cases} \Rightarrow R_1 \times 0.182 = 2/0.5 \Rightarrow R_1 = 13/8 K\Omega$$

و $R_2 = 3/0.5 K\Omega$

$$h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{75 \times 26}{2/0.6} = 0.94 K\Omega \quad (ب)$$

مدار معادل به صورت زیر می باشد:



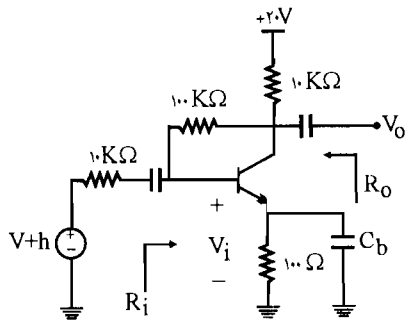
$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_B}{-h_{fe} I_b - I_b - \frac{h_{ie} I_b}{\cdot/5}} = \frac{\cdot/94}{75 + 1 + \frac{\cdot/94}{\cdot/5}} = \cdot/97$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{-h_{ie} I_b}{-h_{fe} I_b - I_b - \frac{h_{ie} I_b}{\cdot/5}} = \frac{\cdot/94}{75 + 1 + \frac{\cdot/94}{\cdot/5}} = 12 \Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = \cdot/97 \times \frac{2}{12 \times 10^{-3}} = 161/7$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = 161/7 \times \frac{12 \times 10^{-3}}{12 \times 10^{-3} + \cdot/5} = 3/8$$

$$R_O = 2 K\Omega$$



شکل م-۱۲

۱۲- در تقویت کننده شکل م-۱۲ با فرض

$h_{re} = 2 \times 10^{-4}$ و $h_{oe}^{-1} = 30 K\Omega$ و $h_{fe} = 150$

با استفاده از دل دقیق هیبرید h مقادیر کمیت های A_I

A_V ، A_{V_s} و R_O را محاسبه کنید؟

☑ (۱۵ اه حل:

$$KVL: 10(I_B + I_C) + 100 I_B + \cdot/1 I_E = V_{CC} - V_{BE} = 20 - \cdot/7 = 19/3$$

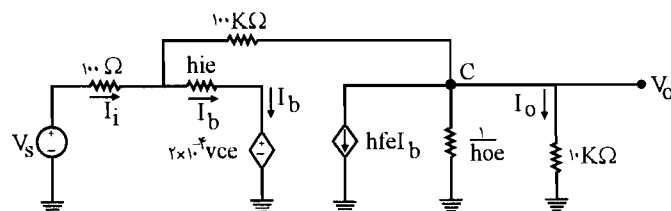
$$\Rightarrow 10(I_B + I_C) + 100 I_B + \cdot/1(I_B + I_C) = 19/3 \Rightarrow 10/1(I_B + I_C) + 100 I_B = 19/3$$

$$\Rightarrow 10/1 \times (I_B + \beta I_B) + 100 I_B = 19/3 \Rightarrow I_B = \frac{19/3}{100 + 10/1 \times 151} = \cdot/11$$

$$I_C = \beta I_B = 1/78 mA$$

$$h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{150 \times 26}{1/78} = 2191 \Omega = 2/191 K\Omega$$

مدار معادل را رسم می کنیم:



در حلقه $10\text{ K}\Omega$ و $100\text{ K}\Omega$ و h_{ie} و $2 \times 10^{-4} V_{cc}$ می نویسیم:

$$\text{KVL: } -h_{ie} I_b + (I_i - I_b) \times 100\text{ K}\Omega + 10 I_O = 2 \times 10^{-4} V_{cc} = 2 \times 10^{-4} V_O$$

$$\begin{cases} V_O = V_{cc} & \Rightarrow -2/19 I_b + 100(I_i - I_b) + 10 I_O = 2 \times 10^{-4} \times 10 V_O \Rightarrow \\ V_O = 10 I_O & 100 I_i - 102/19 I_b + (10 - 2 \times 10^{-3}) I_O = 0 \end{cases} \quad (I)$$

$$\text{KCL: } I_i - I_b = I_{100\text{ K}\Omega} = h_{ie} I_b + I_O + \frac{10 I_O}{h_{oc}^{-1}} = 150 I_b + I_O + \frac{10 I_O}{30}$$

$$\Rightarrow 151 I_b = I_i - \frac{4}{3} I_O \Rightarrow I_b = \frac{I_i}{151} - \frac{4}{453} I_O \quad (II)$$

رابطه (II) را در رابطه (I) جایگذاری می کنیم:

$$100 I_i - 102/19 \times \left(\frac{I_i}{151} - \frac{4}{453} I_O \right) + (10 - 2 \times 10^{-3}) I_O = 0$$

$$\Rightarrow A_1 = \frac{I_O}{I_i} = -9/1$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie} I_b + 2 \times 10^{-4} V_{cc}}{I_i} = \frac{2/19 I_b + 2 \times 10^{-4} \times 10 I_O}{I_i} = \frac{2/19 \left(\frac{I_i}{151} - \frac{4}{453} I_O \right) + 2 \times 10^{-3} I_O}{I_i}$$

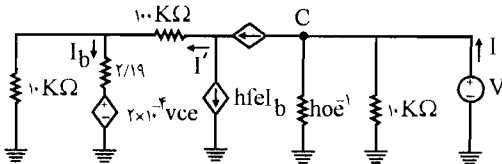
$$= \frac{2/19}{151} - \frac{4 \times 2/19}{453} A_1 + 2 \times 10^{-3} A_1 = \frac{2/19}{151} - \frac{4 \times 2/19}{453} \times (-9/1) + 2 \times 10^{-3} (-9/1) = 172 \Omega$$

$$A_v = A_1 \times \frac{R_L}{R_i} = -9/1 \times \frac{10}{172} = -529$$

$$A_{v_s} = A_v \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -529 \times \frac{172}{172 + 10} = -1/95$$

برای به دست آوردن مقاومت خروجی یک منبع ولتاژی V را در خروجی در دو سر مقاومت $10\text{ K}\Omega$ قرار

می دهیم و ورودی را صفر می کنیم:



$$\text{KCL: } I = \frac{V}{10} + \frac{V}{h_{oc}^{-1}} + h_{fe} I_b + I' \quad (I)$$

$$I' = I_b + I_{10\text{ K}\Omega}$$

$$\Rightarrow I' = I_b + \frac{2/19 I_b + 2 \times 10^{-4} V_{cc}}{10}, \quad V_{cc} = V \Rightarrow I' = I_b + \frac{2/19 I_b + 2 \times 10^{-4} V}{10}$$

$$\Rightarrow I' = 1/219 I_b + 2 \times 10^{-5} \text{ V (II)}$$

$$\text{KVL: } 10 \cdot I' + 2/19 I_b = V - 2 \times 10^{-4} V_{CE} = V - 2 \times 10^{-4} V = 0.9998 \text{ V}$$

$$\Rightarrow 10 \cdot (1/219 I_b + 2 \times 10^{-5} \text{ V}) + 2/19 V = 0.9998 \text{ V}$$

$$\Rightarrow I_b = \frac{0.9978}{124/9} \text{ V} = 1/0.4 \times 10^{-3} \text{ V}$$

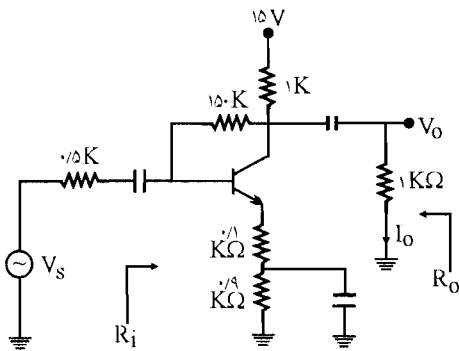
$$\Rightarrow I' = 1/219 \times 1/0.4 \times 10^{-3} \text{ V} + 2 \times 10^{-5} \text{ V} = 9/82 \times 10^{-3} \text{ V}$$

$$(I): I = \frac{V}{10} + \frac{V}{30} + 150 \times 1/0.4 \times 10^{-3} \text{ V} + 9/82 \times 10^{-3} \text{ V}$$

$$\Rightarrow I = V \left(0.1 + \frac{1}{30} + 150 \times 1/0.4 \times 10^{-3} + 9/82 \times 10^{-3} \right) = 1/349$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{1/349} = 349 \Omega$$

۱۳- در مدار شکل م- ۱۳ با فرض $h_{fe} \approx 150$ ، $h_{re} \approx 0$ ، $h_{oe} \approx 0$ و $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{ V}$



شکل م- ۱۳

(الف) نقطه کار DC را تعیین کنید؟

(ب) معادله خط بار DC و ac را بنویسید؟

(ج) حداکثر دامنه نوسان بدون اعوجاج ولتاژ

خروجی از بالا و پایین تقریباً چقدر است؟

(د) مقادیر کمیت‌های A_V ، A_{V_s} ، A_I ، R_i و

R_O را محاسبه کنید؟

☑ (اه حل): برای به دست آوردن نقطه کار باید V_{CEQ} و I_{CQ} را به دست آوریم:

در حلقه V_{CC} و $1 \text{ K}\Omega$ و $150 \text{ K}\Omega$ و $0.1 \text{ K}\Omega$ و $0.9 \text{ K}\Omega$ و V_{BE} و زمین KVL را می‌نویسیم:

$$1 \text{ K}\Omega \times (I_C + I_B) + 150 I_B + 0.1 I_E + 0.9 I_E = V_{CC} - V_{BE} = 15 - 0.7 = 14/3$$

$$1 \times (I_C + I_B) + 150 I_B + (0.1 + 0.9) (I_C + I_B) = 14/3$$

$$\Rightarrow 2 \times (I_C + I_B) + 150 I_B = 14/3 \Rightarrow 2(1 + \beta) I_B + 150 I_B = 14/3$$

$$I_B \times (150 + 2 \times 151) = 14/3 \Rightarrow I_B = \frac{14/3}{150 + 302} = 0.032 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 150 \times 0.032 = 4/74 \text{ mA} \Rightarrow I_{CQ} = 4/74 \text{ mA}$$

$$\text{dc معادله خط بار } V_{CE} \simeq V_{CC} - 1\text{K}\Omega (I_C + I_B) - (0/1 + 0/9) (I_B + I_C)$$

$$\Rightarrow V_{CE} = 15 - 2(I_C + I_B) = 15 - 2(1 + \beta) I_B = 15 - 2 \frac{(1 + \beta)}{\beta} I_C$$

$$\Rightarrow V_{CE} = 15 - 2 \times \frac{151}{150} I_C = 15 - 2 \times \frac{151}{150} \times 4/74 \text{ mA} = 5/46 \text{ V}$$

$$\Rightarrow \text{DC نقطه کار: } \begin{cases} I_{CQ} = 4/74 \text{ mA} \\ V_{CEQ} = 5/46 \text{ V} \end{cases}$$

$$\text{DC معادله خط بار: } V_{CE} = 15 - 2 \times \frac{(1 + \beta)}{\beta} I_C = 15 - 2/0.13 I_C$$

$$\text{ac معادله خط بار: } V_{ce} = -R_{ac} i_c$$

$$R_{ac} = (1\text{K}\Omega \parallel 1\text{K}\Omega) + 0/1 = \frac{1 \times 1}{1 + 1} + 0/1 = 0/6 \text{ K}\Omega$$

$$V_{CE} - V_{CEQ} = -R_{ac} (i_c - i_{CQ})$$

$$V_{CE} - 5/46 = -0/6 (i_c - 4/74) \Rightarrow V_{CE} = 8/3 - 0/6 i_c$$

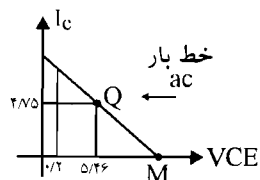
$$\text{ac معادله خط بار: } V_{CE} = 8/3 - 0/6 i_c$$

(ج)

محل تلاقی خط بار ac را با محور V_{CE} ، M می نامیم و داریم:

$$V_{CE}(M) = 8/3 - 0/6 \times 0 = 8/3 \text{ V}$$

$$V_o = V_{ce} + 0/1 I_C = 8/3 + 0/1 \times 0 = 8/3$$



اگر $I_C = I_{CQ}$ و $V_{CE} = V_{CEQ}$ باشد. خروجی V_o مقدار dc خروجی خواهد شد. و داریم:

$$V_o = 5/46 + 0/1 \times 4/74 = 5/93 \text{ V}$$

برای محاسبه جریان اشباع به جای V_{CE} مقدار $0/2$ را قرار می دهیم:

$$V_{CE} = 8/3 - 0/6 i_c \Rightarrow 0/2 = 8/3 - 0/6 i_c \Rightarrow i_c(\text{sat}) = \frac{8/1}{0/6} = 13/5 \text{ mA}$$

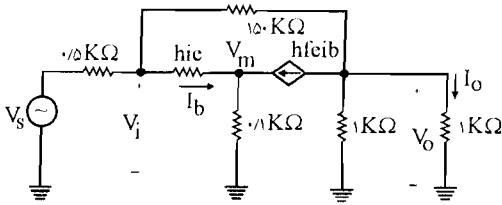
$$V_o = 0/2 + 0/1 i_c(\text{sat}) \quad \text{در حالت اشباع خروجی عبارتست از:}$$

$$V_o = 0/2 + 0/1 \times 13/5 = 1/55 \text{ V}$$

$$V_o = V_o(\text{قطع}) - V_o(\text{نقطه کار}) = 8/3 - 5/93 = 2/37 \text{ V} \Rightarrow \text{حداکثر انحراف بدون اعوجاج از بالا}$$

$$V_o = V_o(\text{اشباع}) - V_o(\text{نقطه کار}) = 1/55 - 5/93 = -4/38 \text{ V} \Rightarrow \text{حداکثر انحراف بدون اعوجاج از بالا}$$

(د) مدار معادل ac به صورت زیر خواهد بود.



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

$$= \frac{26 \times 150}{4/74} = 823 \Omega$$

برای به دست آوردن مقادیر خواسته شده بند (ج) باید مدار معادل ac را تحلیل نمود که با استفاده از قواعد مداری نظیر روش تحلیل گره می توان ولتاژ گره ها را محاسبه نمود و سپس تمامی مقادیر دیگر را به دست آورد.

$$10^{-3} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{0.5} + \frac{1}{150} + \frac{1}{0.823} & -\frac{1}{0.823} & -\frac{1}{150} \\ -\frac{1}{0.823} & \frac{1}{0.823} + \frac{1}{0.1} & 0 \\ -\frac{1}{150} & 0 & 2 + \frac{1}{150} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_m \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_s}{0.5} \\ 150 i_b \\ -150 i_b \end{bmatrix}$$

$$i_b = \frac{V_i - V_m}{0.823}$$

با حل معادله فوق داریم:

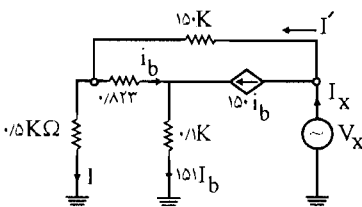
$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = -4/7$$

$$I_i = \frac{V_s - V_i}{0.5 K\Omega}, \quad I_o = \frac{V_o}{1 K\Omega}$$

$$A_I = \frac{I_o}{I_i} = -46/7, \quad R_i = \frac{V_i}{I_i} \cong 10 K\Omega$$

$$A_{V_s} = A_V \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s} = -4/7 \times \frac{10 K}{10 K + 0.5 K} = -4/47$$

برای محاسبه R_o یک منبع فرضی V_x در خروجی قرار می دهیم و V_s را اتصال کوتاه می کنیم بنابراین خواهیم داشت:



$$R'_o = \frac{V_x}{I_x}, \quad R_o = R'_o \parallel 1 K \parallel 1 K$$

ابتدا یک KCL در حلقه، V_x ، 150 K و 0.5 K می‌زنیم:

$$\begin{cases} I' = I_x - 150 I_b \\ I = I_x - 150 I_b - I_b \end{cases}$$

$$-V_x + 150 I' + 0.5 I = 0 \Rightarrow V_x = 150 (I_x - 150 I_b) + 0.5 (I_x - 151 I_b)$$

$$\Rightarrow \boxed{V_x = 15/0.5 I_x - 225/0.5 I_b} \quad (1)$$

KVL در حلقه 0.5 K ، 0.823 K و 0.1 K می‌زنیم

$$-0.5 I + 0.823 I_b + 0.1 \times 151 I_b = 0$$

$$-0.5 (I_x - 151 I_b) + 15/92 I_b = 0 \Rightarrow \boxed{I_b = \frac{0.5}{91/42} I_x} \quad (2)$$

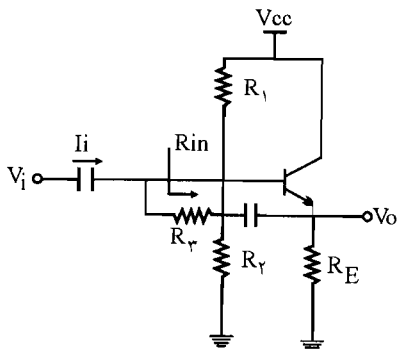
از رابطه (۲) و (۱) خواهیم داشت:

$$V_x = 150/0.5 I_x - \frac{225/0.5 \times 0.5}{91/42} I_x \Rightarrow \boxed{\frac{V_x}{I_x} = 149\text{ K}\Omega = R_o'}$$

$$\boxed{R_o = R_o' \parallel 1\text{ K} \parallel 1\text{ K} = 0.498\text{ }\Omega}$$

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

☑ راه حل:



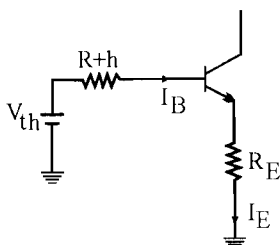
طرح کلی مدار بوت استرپ به صورت مدار مقابل می‌باشد. داریم که:

$$R_{eff} = \frac{V_i}{I_{R_r}} = \frac{V_i}{\frac{V_i - V_o}{R_r}} = \frac{R_r}{1 - A_v}$$

$$R_i = R_{eff} \parallel R_{in} = R_{eff} \parallel (h_{ie} + [1 + h_{fe}] R_E) > 2\text{ M}\Omega$$

با استفاده از مدار معادل تونن داریم:

$$V_{th} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad R_{th} = R_r + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



$$\Rightarrow R_{th} I_B + R_E I_E = V_{th} - V_{BE}$$

$$\left(\frac{R_{th}}{\beta} + R_E\right) I_C \cong V_{th} - V_{BE}$$

اگر بخواهیم دارای پایداری نسبی نسبت به β وجود داشته باشد باید:

$$\frac{R_{th}}{\beta_{min}} = 0.1 R_E$$

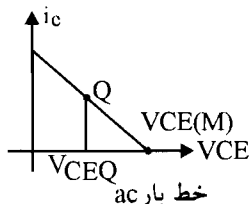
$$R_{th} = 0.1 \times 100 R_E = 10 R_E \quad (1)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$I_C = \frac{V_{th} - V_{BE}}{0.1 R_E} \quad (2)$$

اگر خط بار ac را بکشیم و با صرف نظر از اشباع نقطه کار وسط خط بار ac باشد داریم:

$$V_{CEQ} = \frac{V_{CE(M)}}{2}$$



$$V_{CE(M)} \cong V_{CC}$$

$$V_{CEQ} = \frac{15}{2} = 7.5 \text{ V}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - R_C I_{CQ}$$

$$I_{CQ} R_E = 7.5 \text{ V} \quad (3)$$

از رابطه (2) داریم:

$$V_{th} - 0.7 = 0.1 \times 7.5 \Rightarrow V_{th} = 1.45 \text{ V}$$

در تقویت کننده کلکتور مشترک داریم:

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

اگر به جای h_{fe} مقدار متوسط β را قرار دهیم $h_{fe} = \frac{250}{2} = 125$ خواهیم داشت:

$$A_v = \frac{126 R_E}{h_{ie} + 126 R_E}, \quad I_C = \frac{h_{fe} V_T}{h_{ie}} = \frac{1.45 - 0.7}{0.1 R_E} \Rightarrow h_{ie} = 0.43 R_E$$

$$A_v = \frac{126 R_E}{0.43 R_E + 126 R_E} = 0.996$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$R_{in} = h_{ie}(\min) + [1 + h_{fe}(\min)] R_E > 2 M\Omega$$

$$\frac{h_{fe}(\min) \cdot V_T}{I_{CQ}} + [1 + h_{fe}(\min)] R_E > 2 M\Omega \quad (4)$$

از رابطه (4) و (3) خواهیم داشت:

$$\frac{100 \times 26 \times 10^{-3}}{I_{CQ}} + \frac{(1 + 100) \cdot 7/5}{I_{CQ}} > 2000 \times 10^3$$

و خواهیم داشت:

$$I_{CQ} < 0.38 \text{ mA}$$

$$\frac{7/5}{R_E} < 0.38 \text{ mA} \Rightarrow R_E > 19/74 \text{ K}\Omega$$

$$I_{CQ} = \frac{7/5}{22} = 0.34 \text{ mA}$$

اگر $R_E = 22 \text{ K}\Omega$ باشد.

$$R_{in} = \frac{100 \times 26 \times 10^{-3}}{0.34} + 101 \times 20 = 2/22 \text{ M}\Omega$$

$$\frac{1}{R_{eff}} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2/22} = 19 \text{ M}\Omega$$

$$R_{eff} = \frac{R_T}{1 - A_V} \Rightarrow R_T = (1 - A_V) \times R_{eff} = 78 \text{ K}\Omega$$

$$R_{th} = 10 R_E = 220 \text{ K}\Omega = R_T + \frac{R_1 R_T}{R_1 + R_T} \Rightarrow \frac{R_1 R_T}{R_1 + R_T} = 142 \text{ K}\Omega \quad (5)$$

$$V_{th} = V_{CC} \cdot \frac{R_T}{R_1 + R_T} \Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_T} = \frac{7/95}{15} = 0.596 \quad (6)$$

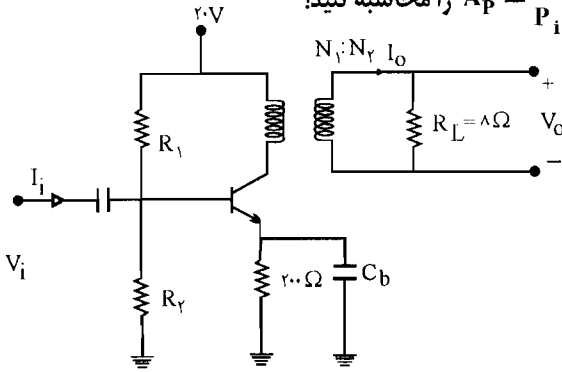
$$(5) \text{ و } (6) \Rightarrow R_1 \times 0.596 = 142 \text{ K}\Omega \Rightarrow R_1 = 238/25 \text{ K}\Omega$$

$$\frac{R_T}{238/25 + R_T} = 0.596 \Rightarrow R_T = 351/5 \text{ K}\Omega$$

15- تقویت کننده شکل م- 15 که بنام تقویت کننده کلاس A با کوپلاژ ترانسفورماتوری معروف است را در نظر بگیرید. با فرض $h_{fe} = 50$ ، ترانسفورماتور ایده آل با مقاومت اهمی صفر و $50 \frac{N_1}{N_2}$

الف) مقادیر R_1 و R_2 را طوری تعیین کنید که نقطه کار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشد و در وسط خط بار ac قرار گیرد.

ب) کمیت‌های A_V و A_I و $A_P = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o I_o}{V_i I_i}$ را محاسبه کنید؟



شکل ۱۵-۴

راه حل:

مدار معادل تونن را در ورودی می‌بایم:

$$\begin{cases} V_{th} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 20 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ R_{th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

و برای اینکه نقطه کار از پایداری خوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشد رابطه زیر را داشته باشیم:

$$\frac{R_{th}}{\beta} \leq 0.1 R_E \Rightarrow R_{th} = 0.1 \beta R_E = 0.1 \times 50 \times 0.2 = 1 \text{ K}\Omega$$

$$\text{KVL: } R_{th} \cdot I_B + R_E I_E = V_{th} - V_{BE} \Rightarrow R_{th} I_B + R_E (1 + \beta) I_B = V_{th} - 0.7$$

$$\Rightarrow \frac{I_C}{\beta} \left[R_{th} + R_E (1 + \beta) \right] = V_{th} - 0.7 \Rightarrow I_C \left[\frac{R_{th}}{\beta} + \frac{R_E (1 + \beta)}{\beta} \right] = V_{th} - 0.7 \quad (1)$$

و برای اینکه نقطه کار در وسط خط بار ac قرار گیرد باید داشته باشیم:

از $V_{CE(sat)}$ صرف نظر می‌کنیم:

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_{dc} + R_{ac}}$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_{ac} + R_{dc}}$$

$$\begin{cases} R_{dc} = 0.2 \text{ K}\Omega \\ R_{ac} = 8 \Omega \times \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = 9 \times 25 = 225 \Omega \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_{CQ} = \frac{20}{0.7 + 20} = 50 \text{ mA}$$

R_{ac} : مقاومت انتقال یافته 8Ω به اولیه ترانس می باشد.

این مقدار به دست آمده را در رابطه (I) قرار می دهیم:

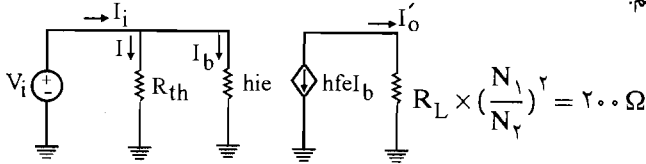
$$50 \text{ mA} \left[\frac{1}{50} + 0.7 \times \frac{51}{50} \right] = V_{th} - 0.7 \Rightarrow V_{th} = 11/9 \text{ V}$$

$$\begin{cases} V_{th} = 20 \frac{R_T}{R_1 + R_T} = 11/9 \Rightarrow \frac{R_T}{R_1 + R_T} = \frac{11/9}{20} \\ R_{th} = \frac{R_1 R_T}{R_1 + R_T} = 1 \text{ K}\Omega \Rightarrow R_1 \times \frac{11/9}{20} = 1 \Rightarrow R_1 = \frac{20}{11/9} = 1/7 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

$$R_T = \frac{R_1 R_{th}}{R_1 - R_{th}} = 2/43 \text{ K}\Omega$$

$$I_{CQ} = 50 \text{ mA} \Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{50 \times 26}{50} = 26 \Omega$$

(ب) مدار معادل ac را رسم می کنیم:



I'_i : جریان خروجی در اولیه ترانس می باشد.

$$A'_I = \frac{I'_O}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b}{I_b + I} = \frac{-h_{fe} I_b}{I_b + \frac{h_{ie} I_b}{R_{th}}} = \frac{-h_{fe}}{1 + \frac{h_{ie}}{R_{th}}} = \frac{-50}{1 + \frac{26}{1 \text{ K}\Omega}} = \frac{-50}{1 + \frac{26}{1000}} = \frac{-50}{1 + 0.026} = -48/7$$

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{I_O}{I'_O} \times \frac{I'_O}{I_i} = \frac{N_1}{N_2} \times A'_I = 5 \times -48/7 = -243/5$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie} I_b}{I_b + \frac{h_{ie} I_b}{R_{th}}} = \frac{h_{ie}}{1 + \frac{h_{ie}}{R_{th}}} = \frac{26 \times 10^{-3}}{1 + \frac{26 \times 10^{-3}}{1}} = 25/3 \Omega$$

$$A'_V = A'_I = A'_I \times \frac{R'_L}{R_i} = -48/7 \times \frac{200}{25/3} = -385$$

$$A_V = \frac{N_2}{N_1} \times A'_V = \frac{1}{5} \times -385 = -77$$

$$A_P = A_V \times A_I = (-77) \times (-243/5) = 1875$$

از رابطه به دست آمده برای h_{ie} داریم:

$$h_{ie} = \frac{26 \times 10^{-3} (R_{th} + 0/55)}{(V_{th} - 0/7)} \Rightarrow \frac{1}{30} \text{ K}\Omega = 26 \times 10^{-3} \left(\frac{55 \times 10^{-3} + 0/55}{V_{th} - 0/7} \right)$$

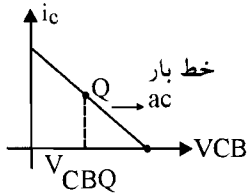
$$\Rightarrow V_{th} - 0/7 = 30 \times 26 \times 10^{-3} \times (0/55 + 55 \times 10^{-3}) \Rightarrow V_{th} = 1/172 \text{ V}$$

یکی دیگر از شرایط مطلوب تقویت کننده وسط بودن نقطه کار در وسط خط بار ac می باشد و این شرط را

نیز بررسی می کنیم:

$$\text{ac بار } V_{cb} = -R_{ac} i_C \quad R_{ac} = R_L$$

$$\Rightarrow V_{CB} - V_{CBQ} = -R_L (i_C - I_{CQ})$$



$$\Rightarrow V_{CB} (A) = V_{CBQ} + R_L I_{CQ}$$

از $V_{CB} (sat)$ صرف نظر می کنیم و برای اینکه نقطه کار در وسط خط بار ac باشد باید داشته باشیم:

$$V_{CBQ} = \frac{V_{CB} (A)}{2} = \frac{V_{CBQ} R_L I_{CQ}}{2} \Rightarrow V_{CBQ} = R_L I_{CQ}$$

$$\text{در خط بار dc داریم: } V_{CBQ} = V_{CC} - R_L I_{CQ} - V_{th} - R_{th} I_{BQ} \Rightarrow$$

$$2 R_L I_{CQ} + \frac{R_{th}}{\beta} I_{CQ} = V_{CC} - V_{th} \Rightarrow 20 I_{CQ} + \frac{55 \times 10^{-3}}{10} I_{CQ} = V_{CC} - 1/172$$

$$\Rightarrow I_{CQ} = \frac{V_{CC} - 1/172}{20/0.055} \quad (IV)$$

و طبق رابطه به دست آمده برای I_B داریم:

$$I_{BQ} = \frac{V_{th} - 0/7}{R_{th} + 0/0.5 \times 11} = \frac{V_{th} - 0/7}{R_{th} + 0/55}$$

$$\Rightarrow I_{BQ} = \frac{1/172 - 0/7}{55 \times 10^{-3} + 0/55} = 0/78 \text{ mA} \Rightarrow I_{CQ} = 10 \times I_{BQ} = 10 \times 0/78 = 7/8 \text{ mA}$$

این مقدار به دست آمده را در رابطه (IV) قرار می دهیم:

$$7/8 \text{ mA} = \frac{V_{CC} - 1/172}{20/0.055} \Rightarrow V_{CC} = 157/2 \text{ V}$$

$$\begin{cases} V_{th} = V_{CC} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 15V/2 \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\ R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 55 \times 10^{-2} \end{cases}$$

$$\frac{55 \times 10^{-2}}{1/1V2} = \frac{R_2}{15V/2} \Rightarrow R_2 = 7/28 \text{ K}\Omega \quad \Leftarrow \text{این دو رابطه را بر هم تقسیم می‌کنیم}$$

$$V_O = h_{Oe}^{-1} (-h_{fe} I_b - \frac{V_O}{10}) - h_{ie} I_b \quad \text{رابطه (II) را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:}$$

$$\Rightarrow V_O = 10 (-h_{fe} I_b - \frac{V_O}{10}) - h_{ie} I_b \Rightarrow 2V_O = -10 h_{fe} I_b - h_{ie} I_b$$

$$\Rightarrow 2V_O = -I_b (10 h_{fe} + h_{ie}) \Rightarrow I_b = \frac{-2V_O}{10 h_{fe} + h_{ie}} \quad \text{(III)}$$

در حلقه R_s و V_s و h_{ie} نیز KVL می‌زنیم:

$$\text{KVL: } V_s = R_s I_1 - h_{ie} I_b = 50 \times 10^{-2} (-I - I_b - h_{fe} I_b) - h_{ie} I_b$$

در این رابطه به جای I مقدار به دست آمده از رابطه (II) را قرار می‌دهیم.

$$= 50 \times 10^{-2} (h_{fe} I_b + \frac{V_O}{10} - I_b - h_{fe} I_b) - h_{ie} I_b$$

$$\Rightarrow V_s = 0.5 (\frac{V_O}{10} - I_b) - h_{ie} I_b$$

و به جای I_b مقدار به دست آمده از رابطه (III) را قرار می‌دهیم:

$$V_s = 0.5 (\frac{V_O}{10} + \frac{2V_O}{10 h_{fe} + h_{ie}}) + h_{ie} \times \frac{2V_O}{(10 h_{fe} + h_{ie})}$$

$$\Rightarrow V_s = V_O (0.05 + \frac{2(h_{ie} + 0.51)}{100 + h_{ie}})$$

$$\Rightarrow A_{vs} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{100 + h_{ie}}{0.5 + 0.05 h_{ie} + 2 h_{ie} + 0.1} = \frac{100 + h_{ie}}{2/0.5 h_{ie} + 0.6}$$

برای اینکه A_{vs} حداکثر شود باید در رابطه بالا h_{ie} مینیمم شود و کمترین مقدار h_{ie} صفر می‌باشد که در

این صورت:

$$h_{ie} = 0 \Rightarrow A_{vs} = \frac{100 + 0}{2/0.5 \times 0 + 0.6} = \frac{100}{0.6} = 167$$

اما از نظر عملی h_{ie} نمی تواند صفر باشد (برای اینکه h_{ie} صفر باشد I_C باید خیلی بزرگ باشد) بنابراین A_{v_s} ماکزیمم ۹۰٪ این ماکزیمم مقدار به دست آمده در نظر گرفته می شود در نتیجه داریم:

$$90\% \times 167 = \frac{100 + h_{ie}}{2/0.05 h_{ie} + 0/6} \Rightarrow h_{ie} = \frac{100 - 90}{2/0.05 \times 150 - 1} = \frac{1}{3} \text{ K}\Omega$$

یکی دیگر از شرایط مورد نیاز پایداری مطلوب نسبت به β می باشد:

$$\text{KVL: } R_{th} I_B + R_s I_E = V_{th} - V_{BE} \Rightarrow R_{th} \frac{I_C}{\beta} + R_s I_C \left(\frac{1+\beta}{\beta} \right) = V_{th} - V_{BE}$$

$$\Rightarrow \frac{R_{th}}{10} I_C + R_s \times \frac{11}{10} I_C = V_{th} - 0.7$$

و برای اینکه پایداری نسبت به تغییرات β باید داشته باشیم:

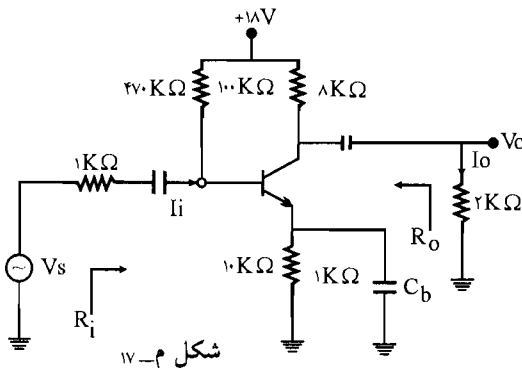
$$\frac{R_{th}}{10} = 0.1 R_s \times \frac{11}{10} \Rightarrow R_{th} = 1/1 R_s = 1/1 \times 50 \Omega = 55 \Omega$$

$$V_{th} = V_{CC} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow R_1 = 55/4$$

۱۷- در تقویت کننده شکل م-۱۷ ترانزیستور دارای $h_{fe} = 20$ ، $h_{re} = h_{oe} \cong 0$ است.

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

ب) اگر خازن کنارگذر C_b را برداریم مقادیر جدید R_o و R_i چقدر خواهند بود؟



☑ راه حل:

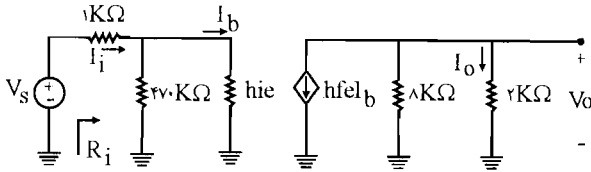
$$\text{KVL: } 270 I_B + 1 \times I_E = V_{CC} - V_{BE} = 18 - 0.7 = 17/3$$

(الف)

$$\Rightarrow 270 \times I_B + (1+\beta) I_B = 17/3 \Rightarrow I_B = \frac{17/3}{270 + (1+20)} = 0.35 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_C = \beta I_B = 20 \times 0.35 = 7.05 \text{ mA} \Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{20 \times 26}{7.05} = 737 \text{ K}\Omega$$

حال مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



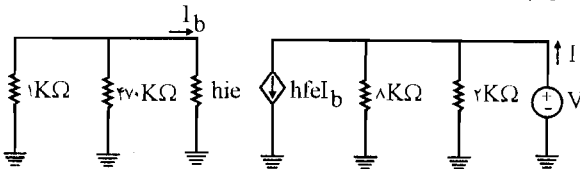
$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b \times \frac{8K\Omega}{8+2}}{I_b + \frac{h_{ie} I_b}{470}} = \frac{-\beta \times 20}{1 + \frac{0.737}{470}} = -16$$

$$R_i = 470K\Omega \parallel h_{ie} = 470K\Omega \parallel 0.737 = 0.735K\Omega$$

$$A_v = A_i \times \frac{R_L}{R_i} = -16 \times \frac{2}{0.735} = -43/5$$

$$A_{v_s} = A_v \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -43/5 \times \frac{0.735}{0.735 + 1K\Omega} = -18/43$$

برای به دست آوردن مقاومت خروجی R_o یک منبع ولتاژ را موازی مقاومت $8K\Omega$ در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را صفر می‌گیریم:

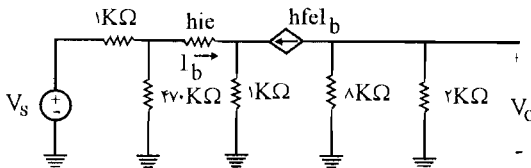


$$I = \frac{V}{2} + \frac{V}{8} + h_{fe} I_b$$

و چون در حلقه ورودی هیچ منبع ولتاژی وجود ندارد پس $I_b = 0$ می‌باشد:

$$\Rightarrow I = \frac{V}{2} + \frac{V}{8} = V \left(\frac{10}{16} \right) \Rightarrow R_o = \frac{V}{I} = \frac{16}{10} = 1.6K\Omega$$

ب) در این صورت مدار معادل ac به صورت زیر در می‌آید:

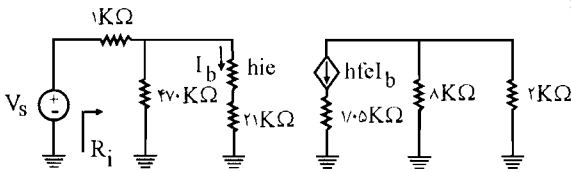


$$K' = \frac{I_2}{I_1} = \frac{h_{fe} I_b}{I_b} = h_{fe} = 20$$

با استفاده از دوگان قضیه میار داریم:

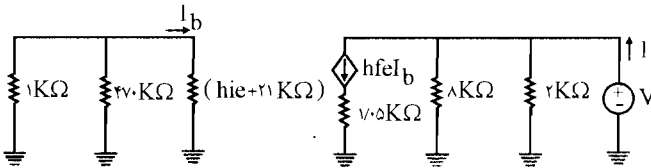
$$\begin{cases} R'_1 = (1 + K')R' = 21 \times 1 \text{ K}\Omega = 21 \text{ K}\Omega \\ R'_r = \left(\frac{K' + 1}{K'}\right)R' = 0.5 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر در می آید:



$$R_i = 470 \text{ K}\Omega \parallel (h_{ie} + R'_1) = 470 \parallel (0.737 + 21) = 20.77 \text{ K}\Omega$$

و برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V را موازی مقاومت $8 \text{ K}\Omega$ قرار می دهیم و منبع ولتاژ ورودی را صفر قرار می دهیم.



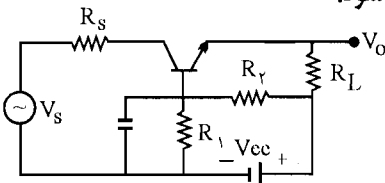
$$I = \frac{V}{8} + 20 I_b + \frac{V}{2}$$

و چون در حلقه ورودی منبع ولتاژ نداریم پس I_b صفر می باشد.

$$I = \frac{V}{8} + \frac{V}{2} = V \left(\frac{1}{16}\right) \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = 16 \text{ K}\Omega$$

۱۶- در مدار شکل م- ۱۶، $h_{re} = 0$ ، $h_{fe} = 100$ ، $h_{oe}^{-1} = 10 \text{ K}\Omega$ ، $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$ و $R_s = 50 \Omega$

است. R_1 ، R_2 و V_{CC} را چنان تعیین کنید که A_{v_s} حداکثر شود؟

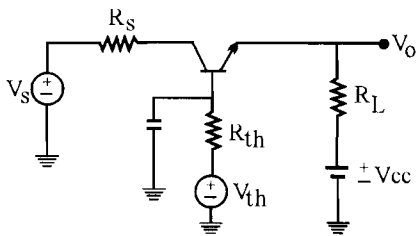


شکل م- ۱۶

راه حل:

$$\begin{cases} R_{th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

مدار معادل تونن بین بیس و زمین را می یابیم:



در تحلیل dc منبع زمین می شود پس در KVL در حلقه V_{BE} و R_s و R_{th} و V_{th} داریم:

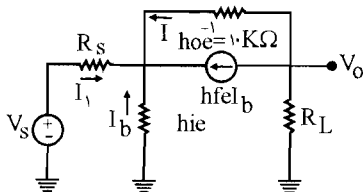
$$\text{KVL: } R_{th} I_B + R_s I_E = V_{th} - V_{BE}$$

$$\Rightarrow R_{th} I_B + 50 \times 10^{-2} (1 + \beta) I_B = V_{th} - 0.7 \Rightarrow I_B = \frac{V_{th} - 0.7}{R_{th} + 0.5 \times (1 + 10)} \quad (A)$$

$$\Rightarrow I_C = \beta I_B = \beta \times \left(\frac{V_{th} - 0.7}{R_{th} + (0.5 \times 11)} \right) = 10 \times \left(\frac{V_{th} - 0.7}{R_{th} + (0.5 \times 11)} \right) \quad (B)$$

$$\Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{10 \times V_T}{10 \times \left(\frac{V_{th} - 0.7}{R_{th} + 0.55} \right)} = \frac{V_T}{\left(\frac{V_{th} - 0.7}{R_{th} + 0.55} \right)} = \frac{26 \times 10^{-2} \times (R_{th} + 0.55)}{(V_{th} - 0.7)}$$

مدار معادل ac: در حلقه h_{ie} و h_{oe} و R_L و KVL می زنیم:



$$\text{KVL: } V_o = h_{oe}^{-1} I - h_{ie} I_b \quad (I)$$

$$\text{KCL: } I = -h_{fe} I_b - \frac{V_o}{R_L}$$

$$\Rightarrow I = -h_{fe} I_b - \frac{V_o}{10} \quad (II)$$

با جایگذاری رابطه (II) در رابطه (I) داریم:

$$V_o = 10 \left(-h_{fe} I_b - \frac{V_o}{10} \right) - h_{ie} I_b \Rightarrow 2V_o = -(10 h_{fe} + h_{ie}) I_b$$

$$\Rightarrow I_b = \frac{-2V_o}{10 h_{fe} + h_{ie}} \quad (III)$$

KVL در حلقه V_s و R_s و h_{ie} می زنیم: $V_s = R_s I_1 - h_{ie} I_b = R_s (-I - I_b - h_{fe} I_b) - h_{ie} I_b$

در رابطه بالا به جای I مقدار به دست آمده از رابطه (II) را قرار می دهیم:

$$\Rightarrow V_s = 50 \times 10^{-2} \left(h_{fe} I_b + \frac{V_o}{10} - I_b - h_{fe} I_b \right) - h_{ie} I_b$$

$$\Rightarrow V_s = 5 \times 10^{-2} \times \frac{V_o}{10} - I_b (h_{ie} + 5 \times 10^{-2})$$

مقدار I_B به دست آمده از رابطه (III) در رابطه بالا قرار می‌دهیم:

$$\Rightarrow V_s = 5 \times 10^{-3} V_o + \frac{2V_o}{10 h_{fe} + h_{ie}} (h_{ie} + 5 \times 10^{-2})$$

$$h_{fe} = 10 \Rightarrow V_s = V_o \left[5 \times 10^{-3} + \frac{2(h_{ie} + 5 \times 10^{-2})}{10 \times 10 + h_{ie}} \right]$$

$$\Rightarrow A_{V_s} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{100 + h_{ie}}{0.5 + 2h_{ie} + 0.005h_{ie} + 0.1} = \frac{100 + h_{ie}}{2.005h_{ie} + 0.6}$$

برای اینکه A_{V_s} ماکزیمم شود، h_{ie} باید مینیمم باشد (مشتق A_{V_s} نسبت به h_{ie} منفی می‌باشد پس با

افزایش h_{ie} ، A_{V_s} کاهش می‌یابد)

$$h_{ie} = 0 \Rightarrow A_{V_s (max)} = \frac{100}{0.6} = \frac{500}{3}$$

اما از نظر عملی h_{ie} نمی‌تواند صفر باشند بنابراین A_{V_s} ، 90% این ماکزیمم مقدار در نظر گرفته می‌شود

پس داریم:

$$90\% \times \frac{500}{3} = \frac{100 + h_{ie}}{2.005h_{ie} + 0.6} \Rightarrow h_{ie} = \frac{1}{3} K\Omega$$

و همچنین پایداری نسبی و مطلوب نسبت به β یکی از شرایط مورد نیاز می‌باشد پس طبق رابطه زیر

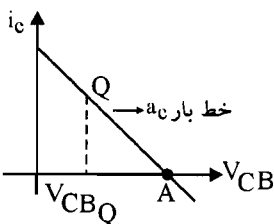
داریم: (KVL در حلقه V_{th} و R_{th} و R_s)

$$\frac{R_{th}}{\beta} \times I_C + R_s I_C \times \frac{1+\beta}{\beta} = V_{th} - V_{BE} \Rightarrow \frac{R_{th}}{10} I_C + R_C \times \frac{11}{10} I_C = V_{th} - V_{BE}$$

برای اینکه پایداری نسبت به β داشته باشیم:

$$\frac{R_{th}}{10} = 0.1 R_s \times \frac{11}{10} \Rightarrow R_{th} = 1/11 R_s = 1/11 \times 50 = 55 \Omega$$

$$\text{طبق رابطه } h_{ie} = \frac{1}{3} : \Rightarrow V_{th} = 1/11 \times 26 \times 10^{-3} \left(\frac{55 \times 10^{-3} + 0.55}{V_{th} - 0.7} \right)$$



وسط بودن نقطه کار در خط بار ac یکی از شرایط مطلوب تقویت

کننده است. حال این حالت را بررسی می‌کنیم.

$$V_{cb} = -R_{ac} I_c \quad R_{ac} = R_L$$

$$V_{CB} - V_{CBQ} = -R_L (I_C - I_{CQ})$$

$$V_{CB(A)} = V_{CBQ} + R_L I_{CQ}$$

از $V_{CB}(\text{sat})$ صرف نظر می‌کنیم برای اینکه نقطه کار در وسط خط بار باشد باید داشته باشیم:

$$V_{CBQ} = \frac{V_{CB}(A)}{\gamma} = \frac{V_{CBQ} + R_L I_{CQ}}{\gamma}$$

$$\Rightarrow V_{CBQ} = R_L I_{CQ}$$

خط بار dc: $V_{CBQ} = V_{CC} - R_L I_{CQ} - V_{th} - R_{th} I_{BQ}$

$$\Rightarrow \gamma R_L I_{CQ} + \frac{R_{th}}{\beta} I_{CQ} = V_{CC} - V_{th}$$

$$\Rightarrow \gamma \cdot I_{CQ} + \frac{55 \times 10^{-3}}{10} I_{CQ} = V_{CC} - 1/172 \Rightarrow I_{CQ} (\gamma + 0.0055) = V_{CC} - 1/172 \quad (C)$$

طبق رابطه (A) مقدار I_B به دست می‌آید:

$$I_{BQ} = \frac{1/172 - 0.7}{55 \times 10^{-3} + 0.55} = 0.78 \text{ mA}$$

(B) طبق رابطه $I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 78 \text{ mA}$

با جایگذاری این مقدار در رابطه (C) داریم:

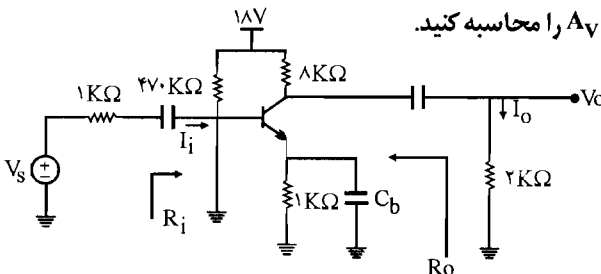
$$78 \text{ mA} (\gamma + 0.0055) = V_{CC} - 1/172 \Rightarrow V_{CC} = 157/2 \times \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_{th} = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow 1/172 = 157/2 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{th} = 55 \times 10^{-3} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow \frac{55 \times 10^{-3}}{1/172} = \frac{R_2}{157/2} \Rightarrow R_2 = 7/28 \text{ K}\Omega$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{1/172 \times 7/28}{157/2 - 1/172} = 55/4 \Omega$$

۱۷ - در تقویت کننده شکل م- ۱۷ ترانزیستور دارای $h_{fe} = 20$ و $h_{re} = 0$ و $h_{oe} = 0$ است.



شکل م- ۱۷

الف) کمیت‌های A_V و R_o ، R_i و A_I را محاسبه کنید.

ب) اگر خازن کنارگذر C_b را برداریم مقادیر جدید R_i و R_o چقدر خواهند بود؟

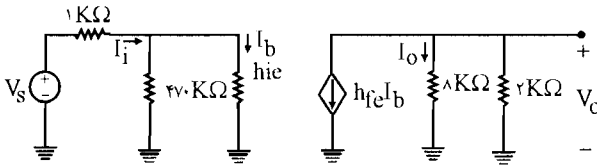
$$\text{KVL: } 470 \cdot I_B + 1 \text{ K}\Omega \times I_E = V_{CC} - 0.7 = 18 - 0.7 = 17.3$$

$$\Rightarrow 470 \cdot I_B + (1 + \beta) \times I_B = 17.3 \Rightarrow I_B = \frac{17.3}{470 + 21} = \frac{17.3}{491}$$

$$\Rightarrow I_C = \beta I_B = \frac{20 \times 17.3}{491} = 0.705 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow h_{ic} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{20 \times 26}{0.705} = 0.737 \text{ K}\Omega$$

مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:

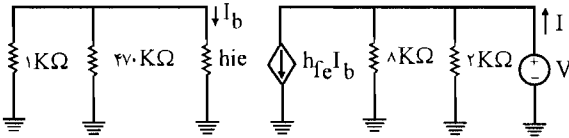


$$A_I = \frac{I_o}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b \times \frac{\Lambda}{\Lambda + 2}}{I_b + \frac{h_{ie} I_b}{470}} = \frac{-20 \times 0.7}{1 + \frac{0.737}{470}} = -16$$

$$R_i = 470 \text{ K}\Omega \parallel h_{ie} = 470 \text{ K}\Omega \parallel 0.737 \Omega = 0.735 \text{ K}\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -16 \times \frac{2}{0.735} = -43.5$$

$$A_{V_S} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -43.5 \times \frac{0.735}{1 + 0.735} = -18.43$$



به دست آوردن R_o :

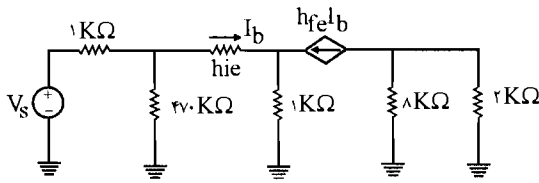
$$\text{KCL: } I = \frac{V}{\Lambda} + h_{fe} I_b$$

در حلقه h_{ie} و $470 \text{ K}\Omega$ و $1 \text{ K}\Omega$ چون منبع وجود ندارد $I_b = 0$ می‌شود پس در رابطه بالا داریم:

$$I = \frac{V}{\Lambda} + h_{fe} \times 0 \Rightarrow I = \frac{V}{\Lambda} \Rightarrow V_I = 8 \text{ K}\Omega = R_o'$$

$$R_o = \frac{V}{I} \parallel 2 \text{ K}\Omega = 8 \text{ K}\Omega \parallel 2 \text{ K}\Omega = \frac{8 \times 2}{8 + 2} = 1.6 \text{ K}\Omega$$

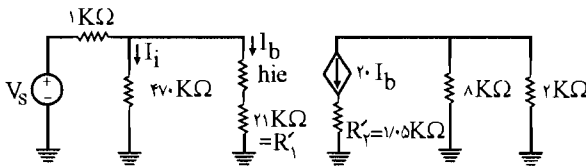
ب) با برداشتن خازن کنار گذر C_b داریم:



مقاومت $1\text{K}\Omega$ که در امیتر قرار می‌دارد را با قضیه دوگان میلر به شاخه‌های کناری تبدیل می‌کنیم.

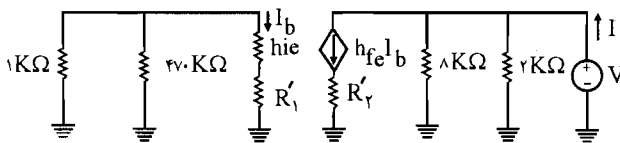
$$K' = \frac{I_2}{I_1} = \frac{h_{fe} I_b}{I_b} = h_{fe} = 20 \quad \left\{ \begin{array}{l} R'_1 = (1 + K') \times R' = 21 \times 1 = 21\text{K}\Omega \\ R'_2 = \frac{1 + K'}{K'} R' = \frac{21}{20} \times 1 = 1/0.5\text{K}\Omega \end{array} \right.$$

مدار معادل به صورت زیر درمی‌آید:



$$R_i = (470\text{K}\Omega) \parallel (R'_1 + h_{ie}) = 470\text{K}\Omega \parallel (21 + 0.737) = 20.77\text{K}\Omega$$

حال محاسبه R_o :



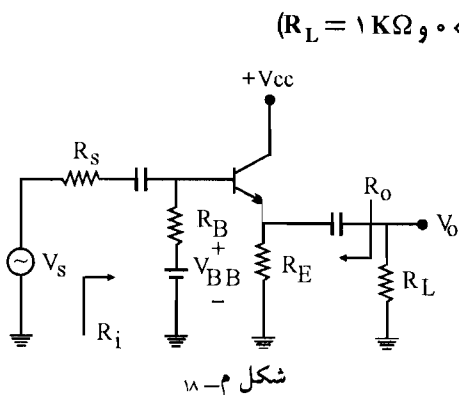
$$I = \frac{V}{8} + 20 \cdot I_b$$

چون در حلقه $470\text{K}\Omega$ و R_i و h_{ie} و $1\text{K}\Omega$ منبع نداریم پس I_b صفر می‌باشد ($I_b = 0$) پس داریم:

$$I = \frac{V}{8} + 20 \times 0 = \frac{V}{8} \Rightarrow I = \frac{V}{8} = 8$$

$$\text{از طرفی: } R_o = \frac{V}{I} \parallel 2\text{K}\Omega = 8\text{K}\Omega \parallel 2\text{K}\Omega = \frac{8 \times 2}{8 + 2} = 1/6\text{K}\Omega$$

۱۸- برای مدار شکل م- ۱۸ با فرض $R_E = 1\text{K}\Omega$ ، $h_{fe} = 160$ ، $h_{ie} = 0$ و $R_B \rightarrow \infty$ مطلوب است:



(الف) رسم تغییرات A_V بر حسب R_s ($0 < R_s < \infty$) و $R_L = 1\text{K}\Omega$

(ب) رسم تغییرات A_V بر حسب R_L

($R_s = 1\text{K}\Omega$ و $0 < R_L < \infty$)

(ج) رسم تغییرات R_i بر حسب R_L

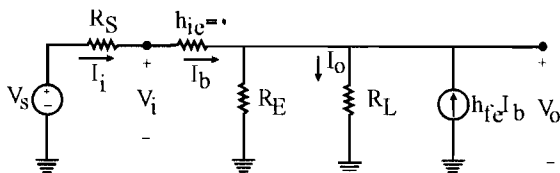
($0 < R < \infty$)

(د) رسم تغییرات R_o بر حسب R_s

($0 < R_s < \infty$)

راه حل:

مدار معادل ac را رسم می‌کنیم.



$$h_{ie} = 0 \rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = 1$$



(الف) اگر $h_{ie} = 0$ باشد V_i در دو سر مقاومت R_E قرار می‌گیرد یعنی $V_O = V_i$ می‌باشد. پس A_V تابعی از هیچ تغییری نمی‌باشد. پس تغییرات A_{Vs} را بر حسب R_L و R_s رسم می‌کنیم:

$$A_{Vs} = \frac{V_O}{V_s} = \frac{V_O}{R_s I_b + V_O} \quad (I)$$

$$\text{طبق مدار: } V_O = (I_b + h_{fe} I_b) (R_E \parallel R_L) = I_b \times (1 + 160) \times \frac{1\text{K}\Omega \times 1\text{K}\Omega}{1\text{K}\Omega + 1\text{K}\Omega}$$

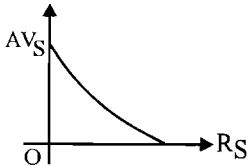
$$\Rightarrow I_b = \frac{V_O \times 2}{161} \quad (II)$$

رابطه (II) را در رابطه (I) جایگزین می‌کنیم.

$$A_{v_s} = \frac{V_O}{V_s} = \frac{V_O}{R_s \times \frac{2V_O}{161} + V_O} = \frac{V_O}{V_O \left(\frac{2R_s}{161} + 1 \right)} = \frac{161}{2R_s + 161}$$

$$\frac{dA_{v_s}}{dR_s} = 161 \times \frac{-2}{(2R_s + 161)^2} \Rightarrow \text{مشتق منفی است پس تابع همواره نزولی است.}$$

در رابطه A_{v_s} به ازای R_s برابر صفر A_{v_s} برابر ۱ می‌شود و به ازای R_s برابر بی‌نهایت A_{v_s} صفر می‌شود پس نمودار به صورت زیر می‌شود.



(ب) رسم تغییرات A_{v_s} بر حسب R_s خواسته شده:

$$A_{v_s} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_O}{R_s I_b + V_O}$$

$$V_O = (I_b + h_{fe} I_b) (R_E \parallel R_L) = I_b (1 + h_{fe}) \left(\frac{R_E R_L}{R_E + R_L} \right) \Rightarrow I_b = \frac{V_O (R_L + R_E)}{(1 + h_{fe}) R_E R_L}$$

$$A_{v_s} = \frac{V_O}{R_s \times \frac{V_O (R_L + R_E)}{(1 + h_{fe}) R_E R_L} + V_O} = \frac{161 R_E R_L}{R_s (R_L + R_E) + 161 R_E R_L}$$

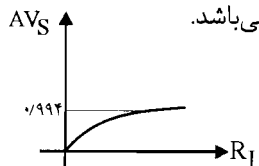
$$\begin{cases} R_s = 1 \text{ K}\Omega \\ R_E = 1 \text{ K}\Omega \end{cases} \Rightarrow A_{v_s} = \frac{161 \times R_L}{(R_L + 1) + 161 R_L} = \frac{161 R_L}{162 R_L + 1}$$

$$\Rightarrow \frac{dA_{v_s}}{dR_L} = \frac{161(162R_L + 1) - 162(161)R_L}{(162R_L + 1)^2} = \frac{161}{(162R_L + 1)^2}$$

$$\Rightarrow \frac{dA_{v_s}}{dR_L} = \frac{161}{(162R_L + 1)^2} > 0 \Rightarrow \text{مشتق مثبت است پس همواره صعودی است.}$$

طبق فرض مسئله $0 < R_L < \infty$ می‌باشد.

$$\begin{cases} R_L = 0 \Rightarrow A_{v_s} = 0 \\ R_L = \infty \Rightarrow A_{v_s} = \frac{161}{162} = 0.994 \end{cases}$$



پس در رابطه A_{v_s} داریم:

(ج)

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_O}{I_b} = \frac{V_O}{\frac{V_O(R_L + R_E)}{161 R_L R_E}} = \frac{161 R_L \times R_E}{(R_L + R_E)}$$

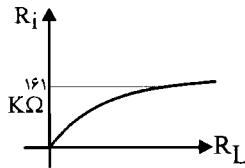
$$R_E = 1 K\Omega \Rightarrow R_i = \frac{161 R_L}{R_L + 1} \Rightarrow \frac{dR_i}{dR_L} = 161 \frac{(1)}{(R_L + R_E)}$$

$$R_E = 1 K\Omega \Rightarrow R_i = \frac{161 R_L}{R_L + 1} \Rightarrow \frac{dR_i}{dR_L} = 161 \frac{(1)}{(R_L + 1)^2} > 0$$

مشتق مثبت است

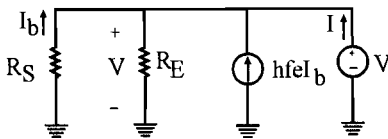
پس تابع همواره صعودی است. و طبق فرض مسئله $0 < R_L < \infty$ می باشد پس در رابطه R_i داریم:

$$\begin{cases} R_L = 0 \Rightarrow R_i = 0 \\ R_L = \infty \Rightarrow R_i = 161 K\Omega \end{cases}$$



(د) برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ در دو سر R_E موازی با آن قرار می دهیم و منبع ولتاژ ورودی را صفر می کنیم. جریان عبوری از آن را I در نظر می گیریم:

$$I = \frac{V}{R_E} - I_b - h_{fe} I_b = \frac{V}{R_E} - (1 + h_{fe}) I_b$$



$$I_b = \frac{-V}{R_S} \text{ از طرفی طبق مدار}$$

$$I = \frac{V}{R_E} - (1 + h_{fe}) \left(\frac{-V}{R_S} \right) = V \times \frac{R_S + (1 + h_{fe}) R_E}{R_E R_S}$$

$$R_O = \frac{V}{I} = \frac{R_S R_E}{R_S + (1 + h_{fe}) R_E}$$

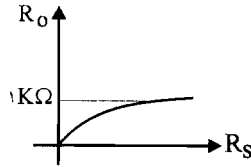
$$R_E = 1 K\Omega \Rightarrow R_O = \frac{R_S}{R_S + 161}$$

مشتق مثبت است پس تابع همواره صعودی است

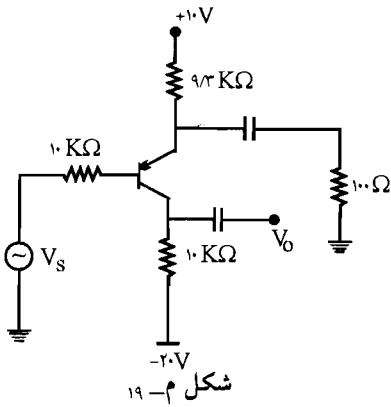
$$\frac{dR_O}{dR_S} = \frac{161}{(R_S + 161)^2} > 0 \Rightarrow$$

طبق فرض مسئله $0 < R_S < \infty$ می باشد پس در رابطه R_O داریم:

$$\begin{cases} R_S = 0 \Rightarrow R_O = 0 \\ R_S = \infty \Rightarrow R_O = 1 \text{ K}\Omega \end{cases}$$



۱۹- در مدار شکل م- ۱۹، با فرض $h_{fe} = 100$ ، مقدار A_{VS} را محاسبه کنید.



✓ (۱۹ حل):

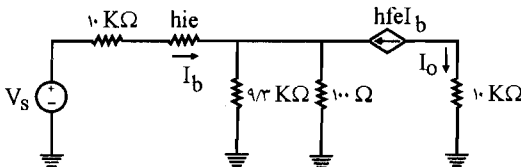
در حلقه V_S و V_{EB} و V_{CC} و R_B و R_C ، می‌زنیم KVL (البته در تحلیل dc منبع ولتاژ V_S بی‌اثر می‌شود).

$$\text{KVL: } 9/3 I_E + 10 I_B = V_{CC} - V_{EB} = 10 - 0/7 = 9/3 \Rightarrow 9/3 I_B (1 + \beta) + 10 I_B = 9/3$$

$$\Rightarrow R_B = \frac{9/3}{10 + 101 \times 9/3} = 0/0098 \text{ mA} \Rightarrow I_C = \beta I_B = 0/98 \text{ mA} \Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C}$$

$$\Rightarrow h_{ie} = \frac{100 \times 26 \times 10^{-3}}{0/98} = 2/65 \text{ K}\Omega$$

مدار معادل:



پس باید R_i محاسبه شود:

$$A_{VS} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_S}$$

$$A_1 = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_b}{I_b} = -h_{fe} = -100 \Rightarrow R_i = h_{ie} + R'_1$$

$$R'_1 = (1 + K') R' \quad , \quad R' = 9/3 \text{ K}\Omega \parallel 0/1 \text{ K}\Omega = \frac{9/3 \times 0/1}{9/4} = 0/099 \text{ K}\Omega$$

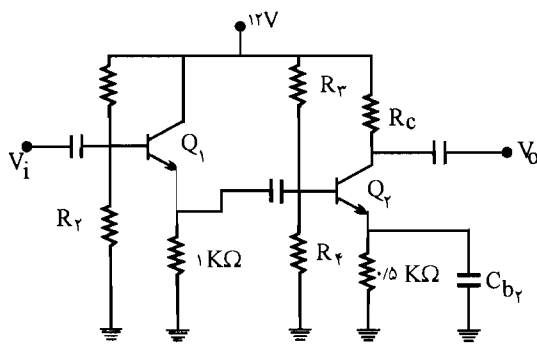
$$K' = \frac{h_{fe} i_b}{i_b} = 100 \Rightarrow R'_1 = (1 + 100) \times 0/099 = 9/999$$

$$\Rightarrow R_i = h_{ie} + 9/999 = 2/65 + 9/999 = 12/65 \text{ K}\Omega$$

$$\Rightarrow A_V = A_1 \times \frac{R_L}{R_i} = -100 \times \frac{10}{12/65} = -79/1$$

$$\Rightarrow A_{VS} = -79/1 \times \frac{12/65}{12/65 + 10} = -44/17$$

۲۰- در تقویت کننده شکل م- ۲۰ برای هر دو ترانزیستور $h_{fe} = 100$ ، $h_{oe} = h_{re} = 0$ و برای Q_2



شکل م- ۲۰

در نقطه کار $h_{ie_2} = 1 \text{ K}\Omega$ است.

مقاومت های $R_c, R_e, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$ و R_6

را طوری تعیین کنید که هر دو

ترانزیستور پایداری خوبی نسبت به

نقطه کار برخوردار بوده و دامنه

نوسان خروجی هر یک حداکثر باشد.

همچنین می خواهیم $|A_V| \geq 100$

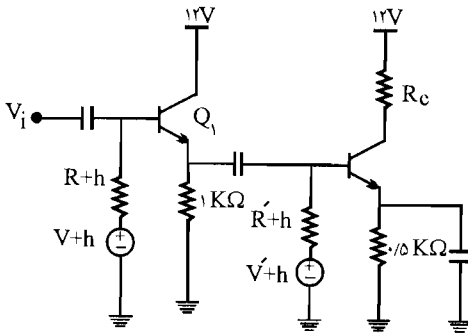
باشد.

☑ راه حل:

$$Q_1: \begin{cases} R_{th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 12 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

$$Q_2: \begin{cases} R'_{th} = R_3 \parallel R_4 = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \\ V'_{th} = V_{CC} \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} = 12 \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \end{cases}$$

با اجرای تونن مدار معادل به صورت زیر می شود:



حلقه R_{th} , V_{th} , $1\text{K}\Omega$, V_{BE}

$$\text{KVL: } R_{th} I_{B_1} + R_E I_{E_1} = V_{th} - V_{BE}$$

فرض: $I_{C_1} = I_{E_1}$

$$R_{th} \cdot \frac{I_{C_1}}{\beta_1} + R_E I_{C_1} = V_{th} - 0.7 \Rightarrow I_{C_1} \left(\frac{R_{th}}{\beta_1} + R_E \right) = V_{th} - 0.7 \quad (I)$$

برای اینکه ترانزیستور پایدار خوبی نسبت به β_1 برخوردار باشد باید داشته باشیم:

$$\frac{R_{th}}{\beta_1} = 0.1 R_{E_1} = 0.1 \times 1\text{K}\Omega = 0.1 \Rightarrow R_{th} = 0.1 \beta_1 = 0.1 \times 100 = 10\text{K}\Omega$$

پس با جایگذاری مقدار R_{th} در رابطه (I) داریم:

$$I_{C_1} \left(\frac{10}{100} + 1 \right) = V_{th} - 0.7 \Rightarrow I_{C_1} = \frac{V_{th} - 0.7}{1.1} \quad (II)$$

و برای اینکه دامنه نوسان خوبی Q_1 حداکثر شود باید داشته باشیم:

$$I_{CQ_1} = \frac{V_{CC} - V_{CE_1}(\text{sat})}{R_{ac_1} + R_{dc_1}} \quad (III)$$

حلقه: R'_{th} , V'_{th} , $0.5\text{K}\Omega$, V_{BE_2}

$$\text{KVL: } R'_{th} I_{B_2} + 0.5 I_{E_2} = V'_{th} - V_{BE_2} \quad , \quad \text{فرض: } I_{C_2} = I_{E_2}$$

$$\Rightarrow R'_{th} \frac{I_{C_2}}{\beta_2} + 0.5 I_{C_2} = V'_{th} - 0.7 \Rightarrow I_{C_2} \left(\frac{R'_{th}}{\beta_2} + 0.5 \right) = V'_{th} - 0.7 \quad (IV)$$

و برای اینکه ترانزیستور از پایدار خوبی نسبت به β_2 برخوردار باشد باید داشته باشیم:

$$\frac{R'_{th}}{\beta_2} = 0.1 R_{E_2} \Rightarrow \frac{R'_{th}}{100} = 0.1 \times 0.5 \Rightarrow R'_{th} = 0.5 \times 100 = 50\text{K}\Omega$$

با جایگذاری این مقدار در رابطه (IV) داریم:

$$I_{C_r} \left(\frac{R'_{th}}{\beta_r} + 0.5 \right) = V'_{th} - 0.7 \Rightarrow I_{C_r} \left(\frac{5}{100} + 0.5 \right) = V'_{th} - 0.7 \Rightarrow I_{C_r} = \frac{V'_{th} - 0.7}{0.55} \quad (V)$$

و برای اینکه دامنه نوسان خروجی Q_r حداکثر شود باید داشته باشیم:

$$I_{CQ_r} = \frac{V_{CC} - V_{CE_r}(sat)}{R_{ac_r} + R_{dc_r}}$$

$$h_{ie_r} = \frac{h_{fe_r} V_T}{I_{C_r}} = \frac{100 \times 26}{I_{C_r}} = 1 K\Omega \Rightarrow I_{C_r} = 2.6 \text{ mA}$$

این مقدار را در رابطه (V) قرار می‌دهیم:

$$I_{C_r} = \frac{V'_{th} - 0.7}{0.55} = 2.6 \text{ mA} \Rightarrow V'_{th} = 2.6 \times 0.55 + 0.7 = 2.13 \text{ V}$$

$$\begin{cases} V'_{th} = V_{CC} \times \frac{R_f}{R_r + R_f} = 12 \frac{R_f}{R_r + R_f} = 2.13 \\ R'_{th} = \frac{R_r R_f}{R_r + R_f} = 5 K\Omega \end{cases} \Rightarrow \frac{12}{R_r} = \frac{2.13}{5} \Rightarrow R_r = \frac{12 \times 5}{2.13} = 28.17 K\Omega$$

تقسیم دو رابطه بر هم

$$R_f = \frac{R'_{th} \times R_r}{R_r - R'_{th}} = \frac{5 \times 28.17}{28.17 - 5} = 6.07 K\Omega$$

در رابطه I_{CQ_r} از $V_{CE}(sat)$ صرف نظر می‌کنیم و در این رابطه داریم:

$$I_{CQ_r} = \frac{V_{CC} - V_{CE_r}(sat)}{R_{ac_r} + R_{dc_r}} \Rightarrow 2.6 \text{ mA} = \frac{12 - 0}{R_{ac_r} + R_{dc_r}} \begin{cases} R_{ac_r} = R_C \\ R_{dc_r} = R_C + R_E = R_C + 0.5 \end{cases}$$

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

و در رابطه I_{CQ_1} (III) از $V_{CE_1}(sat)$ صرف نظر می‌کنیم و داریم:

$$I_{CQ_1} = \frac{V_{CC} - V_{CE_1}(sat)}{R_{ac_1} + R_{dc_1}} = \frac{12}{R_{ac_1} + R_{dc_1}} \quad \begin{cases} R_{dc_1} = R_{E_1} = 1 K\Omega \\ R_{ac_1} = 1 K\Omega \parallel R_{in} \end{cases}$$

$$R_{in} = R'_{th} \parallel R_{b_r}, \quad R_{b_r} = h_{ie_r} = 1 K\Omega$$

$$R_{in} = 5 K\Omega \parallel 1 K\Omega = \frac{5}{6} K\Omega$$

$$\Rightarrow R_{ac_1} = 1 \text{ K}\Omega \parallel R_{in} = 1 \text{ K}\Omega \parallel \frac{5}{6} \text{ K}\Omega = \frac{\frac{5}{6} \times 1}{\frac{5}{6} + 1} = \frac{5}{11} \text{ K}\Omega$$

$$\Rightarrow I_{CQ_1} = \frac{12}{\frac{5}{11} + 1} = \frac{12 \times 11}{5 + 11} = 1/25 \text{ mA}$$

$$(II): I_{C_1} = \frac{V_{th} - 0.7}{1/1} = 1/25 = \frac{V_{th} - 0.7}{1/1} \Rightarrow V_{th} = 9/775 \text{ V}$$

$$\begin{cases} V_{th} = 9/775 = 12 \frac{R_T}{R_1 + R_T} \\ R_{th} = \frac{R_1 R_T}{R_1 + R_T} = 10 \text{ K}\Omega \end{cases} \Rightarrow \text{این دو رابطه را بر هم تقسیم می‌کنیم}$$

$$\frac{9/775}{10} = \frac{R_1}{12} \Rightarrow R_1 = 12/28 \text{ K}\Omega \quad \text{و} \quad R_T = \frac{R_{th} \times R_1}{R_1 - R_{th}} = \frac{10 \times 12/28}{12/28 - 10} = 53/86 \text{ K}\Omega$$

و همچنین می‌خواهیم $|A_V| \geq 100$ شود:

Q_1 : کلکتور مشترک و Q_2 : امیتر مشترک

$$A_{V_1} = \frac{V_{e_1}}{V_{b_1}} = A_T \times \frac{R_{i_1}}{R_{b_1}} = (1 + h_{fe}) \times \frac{R_{L_1}}{R_{b_1}}$$

$$R_{L_1} = R_{E_1} \parallel R_{in} = \frac{5}{11} \text{ K}\Omega \quad , \quad R_{b_1} = h_{ie_1} + (1 + h_{fe}) R_{L_1}$$

$$h_{ie_1} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_1}} = \frac{100 \times 26}{1/26} = 315 \text{ K}\Omega \Rightarrow R_{b_1} = 315 + 101 \times \frac{5}{11} = 46/2 \text{ K}\Omega$$

$$\Rightarrow A_{V_1} = (1 + 100) \times \frac{5/11}{46/2} = 0/994$$

$$A_{V_2} = \frac{V_{C_2}}{V_{b_2}} = -h_{fe} \frac{R_{L_2}}{R_{b_2}} \quad \begin{cases} R_{L_2} = R_{C_2} = 2/0.6 \\ R_{b_2} = h_{ie_2} = 1 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

$$\Rightarrow A_{V_2} = -100 \times \frac{2/0.6}{1} = -206$$

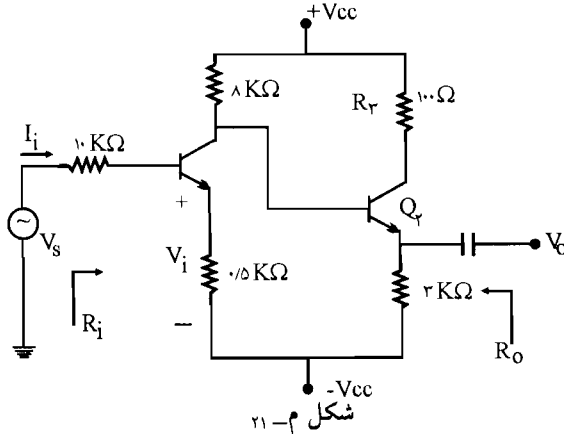
$$A_V = A_{V_1} \times A_{V_2} = 0/994 \times (-206) = -205$$

$$\Rightarrow |A_V| = |-205| = 205 \geq 100$$

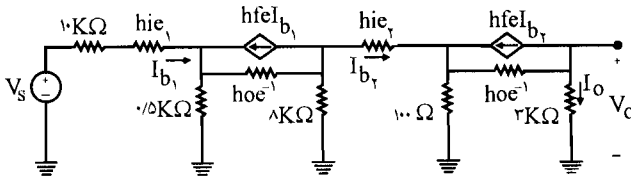
۲۱- در مدار تقویت کننده شکل م- ۲۱، با فرض $h_{fe_1} = h_{fe_2} = 50$ و $h_{ie_1} = h_{ie_2} = 1/1 K\Omega$

و $h_{re_1} = h_{re_2} \cong 0$ و $h_{oe_1}^{-1} = h_{oe_2}^{-1} = 40 K\Omega$ ، مقادیر کمیت های A_V ، A_V ، A_I ، R_i را به دست

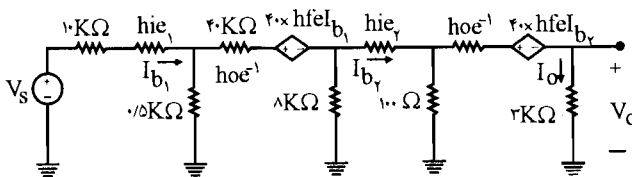
آورید؟



✓ (۱۵ حل): مدار معادل ac را رسم می کنیم:



h_{oe}^{-1} با منبع جریان $h_{fe} I_b$ موازی می باشد با استفاده از قضیه نورتن داریم:



حلقه: $3 K\Omega$ ، 100Ω ، h_{oe}^{-1} ، $40 \times h_{fe} I_{b_1}$

$$KVL: 3 I_O + h_{oe}^{-1} I_O + 0.1 (I_O - I_{b_1}) = -40 \cdot h_{fe} I_{b_1} = -40 \times 50 \cdot I_{b_1} = -2000 \cdot I_{b_1}$$

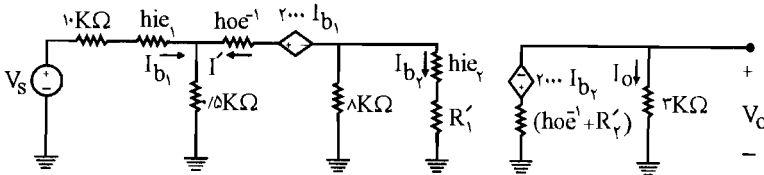
$$\Rightarrow 43/1 I_O = -1999/9 I_{b_1} \Rightarrow I_O = -46/4 I_{b_1}$$

با استفاده از دوگان قضیه میلر در مقاومت $R_{E_1} = 0.1 \text{ K}\Omega$ داریم:

$$\begin{cases} I_1 = I_{b_1} \\ I_2 = -I_O \end{cases} \quad K' = \frac{I_2}{I_1} = \frac{+46/4 I_{b_1}}{I_{b_1}} = +46/4$$

$$\begin{cases} R'_1 = R' \times (1 + K') = 0.1 \times (1 + 46/4) = 4/74 \text{ K}\Omega \\ R'_2 = R' \times \left(\frac{1 + K'}{K'}\right) = 0.1 \times \frac{1 + 46/4}{46/4} = 0.1 \times 2 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



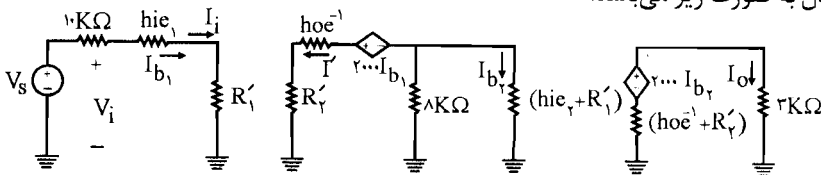
$$\text{KVL: } I'(40 + (8\text{K}\Omega \parallel (h_{ie2} + R'_1))) + 0.5(I' + I_{b_1}) = 2000 \cdot I_{b_1}$$

$$I' \times 43/37 + 0.5 I_{b_1} + 0.5 I' = 2000 \cdot I_{b_1} \Rightarrow I' = 45/58 I_{b_1}$$

حال با استفاده از دوگان قضیه میلر در مقاومت R_{E_1} یعنی $0.5 \text{ K}\Omega$ داریم:

$$K' = \frac{I_2}{I_1} = \frac{I'}{I_{b_1}} = \frac{45/58 I_{b_1}}{I_{b_1}} = 45/58 \Rightarrow \begin{cases} R'_1 = R' (1 + K') = 0.5 (1 + 45/58) = 23/29 \text{ K}\Omega \\ R'_2 = R' \left(\frac{1 + K'}{K'}\right) = 0.5 \times \frac{1 + 45/58}{45/58} = 0.51 \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



$$A_1 = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-46/4 I_{b_1}}{I_{b_1}}, \quad I_{b_1} = -I' \times \frac{8\text{K}\Omega}{8\text{K}\Omega + (h_{ie2} + R'_1)} = -I' \times \frac{8}{8 + 5/14}$$

$$\Rightarrow I_{b_1} = -45/58 I_{b_1} \times \frac{8}{13/14} = -26/35 I_{b_1}$$

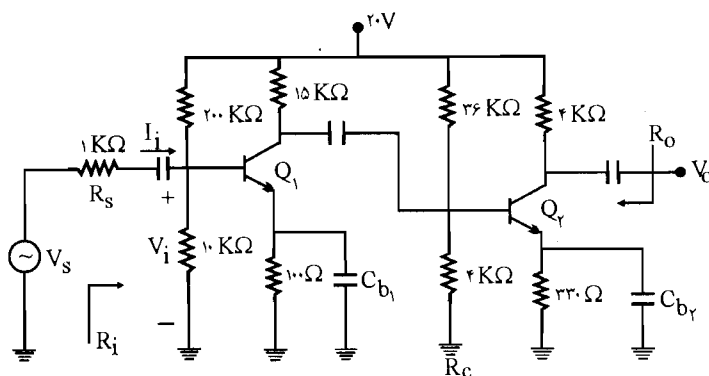
$$\Rightarrow A_1 = \frac{-\beta \times \frac{R_c}{R_b} \times I_{b1}}{I_{b1}} = 1222/64$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = h_{ie1} + R'_1 = 1/1 + 23/29 = 24/29 \text{ K}\Omega$$

$$A_V = A_1 \times \frac{R_L}{R_i} = 1222/64 \times \frac{3 \text{ K}\Omega}{24/29} = 150/38$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = 150/38 \times \frac{24/29}{24/29 + 10 \text{ K}\Omega} = 106/65$$

۲۲- در مدار تقویت کننده شکل م- ۲۲ ترانزیستورها مشابه و دارای $h_{fe} = 50$ و $h_{oe}^{-1} = 40 \text{ K}\Omega$ و $h_{re} \cong 0$ هستند. مقادیر A_V ، A_{V_s} ، R_i ، A_1 و R_O را محاسبه کنید؟



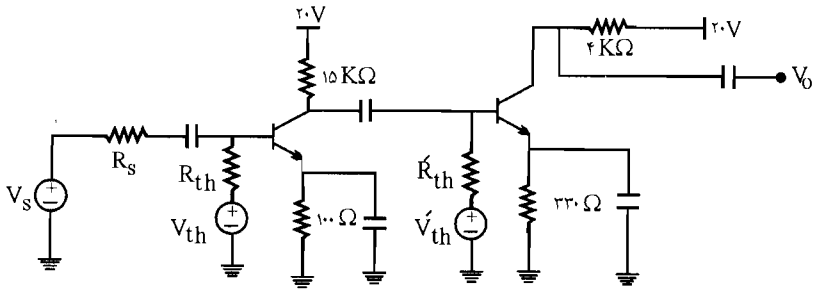
شکل م- ۲۲

☑ راه حل:

$$Q_1 \text{ در تون: } \begin{cases} R_{th} = 10 \text{ K}\Omega \parallel 200 \text{ K}\Omega = \frac{10 \times 200}{10 + 200} = 9/52 \text{ K}\Omega \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 20 \times \frac{10}{10 + 200} = 0/95 \text{ V} \end{cases}$$

$$Q_2 \text{ در تون: } \begin{cases} R'_{th} = 36 \Omega \parallel 4 \text{ K}\Omega = \frac{36 \times 4}{36 + 4} = 3/6 \text{ K}\Omega \\ V'_{th} = V_{CC} \times \frac{4 \text{ K}\Omega}{36 \text{ K}\Omega + 4 \text{ K}\Omega} = \frac{20 \times 4}{40} = 2 \text{ V} \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



$$\text{KVL: } R_{th} I_{B_1} + R_{E_1} I_{E_1} = V_{th} - V_{BE_1}$$

$$\text{فرض: } I_{C_1} = I_{E_1} \Rightarrow R_{th} = \frac{I_{C_1}}{\beta_1} + R_{E_1} \times I_{C_1} = V_{th} - V_{BE_1}$$

$$\Rightarrow 9/52 \times \frac{I_{C_1}}{50} + 0.1 \times I_{C_1} = 0.95 - 0.7 = 0.25 \Rightarrow I_{C_1} = 0.186 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow h_{ie_1} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_1}} = \frac{50 \times 26}{0.186} = 1/5 \text{ K}\Omega$$

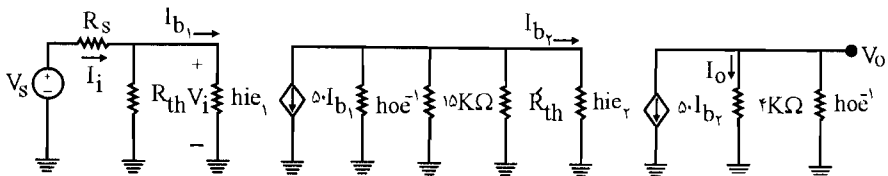
$$\text{KVL: } R'_{th} I_{B_2} + R_{E_2} I_{E_2} = V'_{th} - V_{BE_2}$$

$$\text{فرض: } I_{C_2} = I_{E_2}$$

$$3/6 \frac{I_{C_2}}{\beta_2} + 0.33 I_{C_2} = 2 - 0.7 = 1.3$$

$$\Rightarrow I_{C_2} = \frac{1.3}{0.402} = 3/23 \text{ mA} \Rightarrow h_{ie_2} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_2}} = \frac{50 \times 26}{3/23} = 0.4 \text{ K}\Omega$$

پس مدار معادل ac به صورت زیر درمی‌آید:



با استفاده از تقسیم جریان:

$$A_1 = \frac{I_O}{I_i}, \quad I_O = -50 \cdot I_{b_2} \times \frac{4 \cdot \text{K}\Omega}{40 + 4} = -45/45 I_{b_2}$$

$$I_i = I_{b_1} + \frac{h_{ie_1} I_{b_1}}{R_{th}} = I_{b_1} + \frac{1/5 I_{b_1}}{9/52} = 1/16 I_{b_1}$$

$$\Rightarrow A_1 = \frac{-45/45 I_{b_2}}{R_{th}} =$$

$$\text{از طرفی: } I_{b_2} = -50 I_{b_1} - \frac{h_{ie_2} I_{b_2}}{h_{oe}^{-1}} - \frac{h_{ie_2} I_{b_2}}{15} - \frac{h_{ie_2} I_{b_2}}{R'_{th}}$$

$$\Rightarrow I_{b_2} = -50 I_{b_1} - \frac{0.4 I_{b_2}}{40} - \frac{0.4 I_{b_2}}{15} - \frac{0.4 I_{b_2}}{3/6}$$

$$\Rightarrow -50 I_{b_1} = I_{b_2} + 0.1 I_{b_2} + 0.27 I_{b_2} + 0.11 I_{b_2} = -\frac{1/15}{50} I_{b_2}$$

$$\Rightarrow A_1 = \frac{-45/45 I_{b_2}}{1/16 \times \frac{-1/15}{50} I_{b_2}} = 170.3/5$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_{th} \parallel h_{ie_1} = 9/25 K\Omega \parallel 1/5 K\Omega = \frac{9/52 \times 1/5}{9/52 + 1/5} = 1/3 K\Omega$$

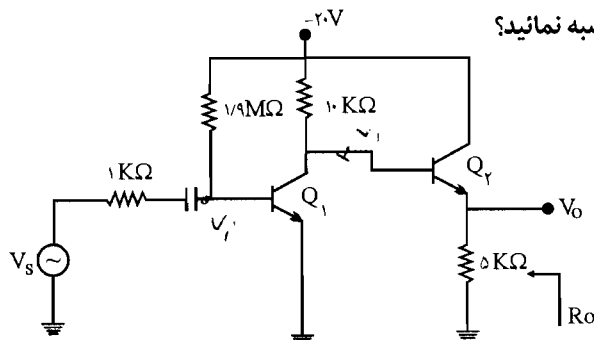
$$A_v = A_1 \times \frac{R_L}{R_i} = 170.3/5 \times \frac{4 K\Omega}{1/3 K\Omega} = 5241/5 K\Omega$$

$$A_{v_s} = A_v \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = 5241/5 \times \frac{1/3}{1/3 + 1} = 296/25$$

$$R_o = 4 K\Omega \parallel h_{oe}^{-1} = 4 K\Omega \parallel 40 K\Omega = \frac{4 \times 40}{4 + 40} = 3/64$$

۲۳- در تقویت کننده در طبقه م-۲۳، $h_{fe_1} = h_{fe_2} = 100$ ، $h_{ie_1} = h_{ie_2} = 40 K\Omega$ و $h_{oe_1}^{-1}$ است. جریان نقطه

کار ترانزیستورها، A_v و R_o را محاسبه نمایید؟



شکل م-۲۳

راه حل:

$$Q_1 \text{ KVL در بیس: } 1/9 \times 10^3 I_{B_1} = -V_{CC} - V_{BE_1} \Rightarrow I_{B_1} = \frac{20 - 0.7}{1/9 \times 10^3} = 0.016 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_{C_1} = \beta_1 I_{B_1} = 1/0.16 \text{ mA} \Rightarrow h_{ic_1} = \frac{h_{fc} V_T}{I_{C_1}} = \frac{100 \times 26}{1/0.16} = 2/56 \text{ K}\Omega$$

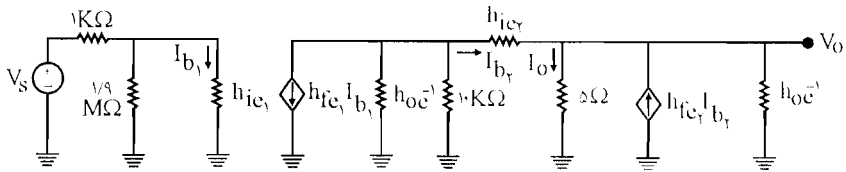
KVL در بیس Q_2 : $10 \text{ K}\Omega (I_{C_1} + I_{B_2}) + 5 \text{ K}\Omega I_{E_2} = 20 - 0/7 = 19/3$

$$\Rightarrow 10 \text{ K}\Omega \times 1/0.16 + 10 \times I_{B_2} + 5 \times (1 + \beta_2) I_{B_2} = 19/3$$

$$\Rightarrow 10/0.16 + 10 I_{B_2} + 5 \times 10 I_{B_2} = 19/3 \Rightarrow I_{B_2} = \frac{9/14}{515}$$

$$I_{C_2} = \beta_2 I_{B_2} = 1/77 \text{ mA} \Rightarrow h_{ic_2} = \frac{h_{fc} V_T}{I_{C_2}} = \frac{100 \times 26}{1/77} = 1/47 \text{ K}\Omega$$

پس مدار معادل به صورت زیر در می آید:



$$h_{oc}^{-1} \parallel 10 \text{ K}\Omega = 8 \text{ K}\Omega$$

با استفاده از تقسیم جریان داریم:

$$I_O = (I_{b_2} + h_{fc} I_{b_2}) \times \frac{h_{oc}^{-1}}{h_{oc}^{-1} + 5 \text{ K}\Omega} = I_{b_2} \times 10 \times \frac{40}{40 + 5} = 89/81 I_{b_2}$$

دو مقاومت $10 \text{ K}\Omega$ و h_{oc}^{-1} موازی هستند پس مقاومت معادل آنها به صورت زیر می شود:

$$h_{oc}^{-1} \parallel 10 \text{ K}\Omega = \frac{10 \times 40}{10 + 40} = 8 \text{ K}\Omega$$

$$\text{KVL: } 8 \text{ K}\Omega (h_{fc} I_{b_1} + I_{b_2}) + 1/47 I_{b_2} + 5 I_O = 0$$

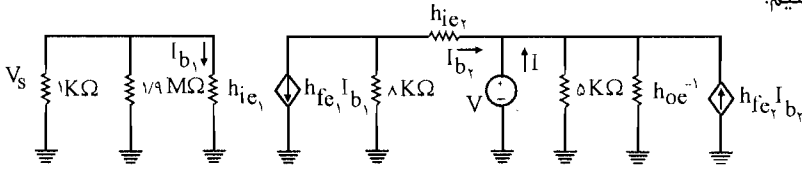
$$\Rightarrow 800 I_{b_1} + 9/47 I_{b_2} + 5 \times 89/81 I_{b_2} = 0$$

$$\Rightarrow I_{b_1} = -0.573 I_{b_2}$$

$$\Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{5 I_O}{h_{ic_1} \times I_{b_1}} = \frac{5 \times 89/81 I_{b_2}}{2/56 \times (-0.573) I_{b_2}} = -3.06/4$$

برای محاسبه R_O یک منبع ولتاژ V را موازی با مقاومت $5 \text{ K}\Omega$ در خروجی قرار می دهیم و منبع ولتاژ

V_s را صفر می‌کنیم:



$$I = \frac{V}{h_{oe}^{-1}} + \frac{V}{5K\Omega} + (-I_{b_r}) - h_{fe} I_{b_r} = V \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{1000} \right) - I_{b_r} - 100 I_{b_r}$$

KVL: $10I_{b_r} + h_{ie_r} I_{b_r} = -V$ در حلقه $10K\Omega$ و h_{ie_r} و یک KVL می‌زنیم:

$$\Rightarrow I_{b_r} = \frac{-V}{10 + 1/4V} = \frac{-V}{9/4V}$$

$$\Rightarrow I = V \left(\frac{45}{40 \times 5} \right) - \left(\frac{-V}{9/4V} \right) - 100 \times \left(\frac{-V}{9/4V} \right) = V (0/225 + 0/106 + 10/56)$$

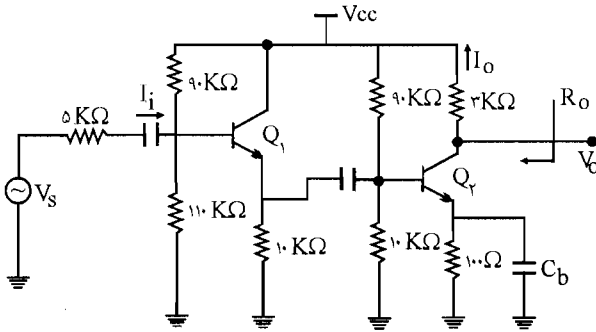
$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{10/891} = 92\Omega$$

۲۴ - در مدار شکل م - ۲۴ برای هر دو ترانزیستور $h_{fe} = 100$ ، $h_{ie} = 3K\Omega$ و $h_{re} = h_{oe} \approx 0$

است. مقاومتهای ورودی و خروجی

و بهره‌های جریان و ولتاژ را محاسبه

کنید؟



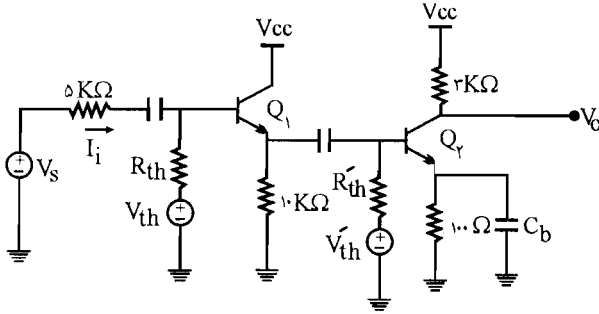
شکل م-۲۴

✓ راه حل:

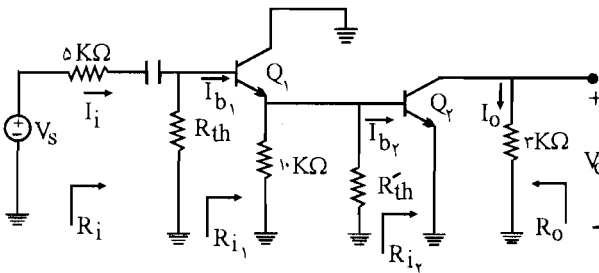
$$Q_1: \begin{cases} R_{th} = 110K\Omega \parallel 90K\Omega = \frac{110 \times 90}{110 + 90} = 49/5K\Omega \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{110K\Omega}{110 + 90} = 0/55 V_{CC} \end{cases}$$

$$Q_2: \begin{cases} R'_{th} = 10K\Omega \parallel 90K\Omega = \frac{10 \times 90}{10 + 90} = 9K\Omega \\ V'_{th} = V_{CC} \times \frac{10}{10 + 90} = 0/1 V_{CC} \end{cases}$$

مدار معادل به صورت زیر درمی آید:



مدار معادل ac به صورت زیر می باشد:



$$R_O = R_{L_2} = 3\text{K}\Omega$$

$$R_i = R_{th} \parallel R_{i_1} \quad (I) \quad R_{i_1} = h_{ie_1} + (1 + h_{fe})R_{L_1} \quad (II)$$

$$R_{L_1} = R'_{th} \parallel 10\text{K}\Omega \parallel R_{i_2}, \quad R_{i_2} = h_{ie_2} = 3\text{K}\Omega$$

$$\Rightarrow R_{L_1} = 9\text{K}\Omega \parallel 10\text{K}\Omega \parallel 3\text{K}\Omega = \left(\frac{9 \times 10}{9 + 10} \right) \parallel 3\text{K}\Omega = \frac{90}{19} \parallel 3 = \frac{90 \times 3}{19 \times 3 + 19} = \frac{270}{147} = 1/84 \text{ K}\Omega$$

$$(II): R_i = h_{ie_1} + (1 + h_{fe})R_{L_1} = 3\text{K}\Omega + (1 + 100) \times 1/84 = 1111/84 \text{ K}\Omega$$

$$(I): R_i = R_{th} \parallel R_{i_1} = 49/5 \text{ K}\Omega \parallel 1111/84 \text{ K}\Omega = 39/22 \text{ K}\Omega$$

$$A_1 = \frac{I_O}{I_i} = \frac{I_o}{I_{b_2}} \times \frac{I_{b_2}}{I_{e_1}} \times \frac{I_{e_1}}{I_{b_1}} \times \frac{I_{b_1}}{I_i} = A_{1_2} \times A_{1_1} \times \frac{I_{b_2}}{I_{e_1}} \times \frac{I_{b_1}}{I_i} \quad (III)$$

$$\left\{ \begin{aligned} A_{I_r} &= \frac{I_O}{I_{b_r}} = -h_{fe} = -100 \\ A_{I_1} &= \frac{I_{c_1}}{I_{b_1}} = 1 + h_{fe} = 1 + 100 = 101 \\ \frac{I_{b_r}}{I_{c_1}} &= \frac{I_{c_1} \times \frac{1}{R_{i_r}}}{\frac{1}{R_{i_r}} + \frac{1}{10\text{K}\Omega} + \frac{1}{90 \parallel 10\text{K}\Omega}} \times \frac{1}{I_{c_1}} = \frac{\frac{1}{R_{i_r}}}{\frac{1}{R_{i_r}} + \frac{1}{10} + \frac{1}{9}} = \frac{30}{49} \\ \frac{I_{b_1}}{I_i} &= \frac{I_i \times (90 \parallel 10\text{K}\Omega)}{(90 \parallel 10\text{K}\Omega) + R_{i_1}} \times \frac{1}{I_i} = \frac{49/5}{49/5 + 188/84} = 0/21 \end{aligned} \right.$$

$$(III) = AI = -100 \times 101 \times \frac{30}{49} \times 0/21 = -1298/57$$

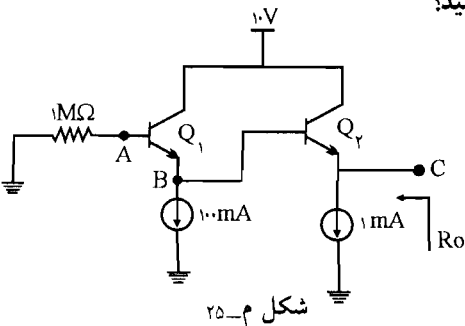
$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{V_O}{V_{b_r}} \times \frac{V_{b_r}}{V_{b_1}} = \frac{V_O}{V_{b_r}} \times \frac{V_{c_1}}{V_{b_1}} = A_{V_r} \times A_{V_1}$$

$$\left\{ \begin{aligned} A_{V_1} &= \frac{V_{c_1}}{V_{b_1}} = A_{I_1} \times \frac{R_{L_1}}{R_{i_1}} = 101 \times \frac{1/84}{1888/84} = 0/98 \\ A_{V_r} &= A_{I_r} \times \frac{R_{L_r}}{R_{i_r}} = -100 \times \frac{30}{3} = -100 \Rightarrow A_V = A_{V_1} \times A_{V_r} = 0/98 \times (-100) = -98 \end{aligned} \right.$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -98 \times \frac{39/22}{39/22 + 5} = -86/9$$

۲۵- در مدار شکل م-۲۵، با فرض $V_{BE} = 0/7V$ و $\beta = 100$ ، ولتاژهای DC نقاط A، B، C و Rابه

دست آورید. مقاومت خروجی R_O را نیز محاسبه کنید؟



شکل م-۲۵

راه حل:

$$I_{E_1} = 100 \mu A + I_{B_r} = 100 \mu A + \frac{I_{E_r}}{1 + \beta_r} = 100 \mu A + \frac{1000 \mu A}{1 + 100} = 110 \mu A$$

$$V_A = -1 M\Omega \times I_{B_1} = -10^3 \times \frac{I_{E_1}}{1 + \beta} = -10^3 \times \frac{110 \mu A}{101} \times 10^{-3} = -1/09 V$$

$$V_B = V_A - V_{BE} = -1/09 - 0/7 = -1/79 V$$

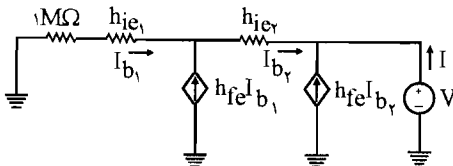
$$V_C = V_B - V_{BE_r} = -1/79 - 0/7 = -2/49 V$$

$$I_{E_1} = 110 \mu A \Rightarrow h_{ie_1} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_1}} = \frac{100 \times 26}{\frac{I_{E_1} (\beta_1)}{(1 + \beta_1)}} = \frac{100 \times 26 \times 101}{110 \times 10^{-3} \times 100} = 23/87 K\Omega$$

$$I_{E_r} = 1 mA \Rightarrow h_{ie_r} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_r}} = \frac{100 \times 26}{\frac{1 mA \times (100)}{101}} = 2/63 K\Omega$$

مدار معادل ac به صورت زیر می شود: برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار

می دهیم:



$$I = -h_{fe} I_{b_r} - I_{b_r} = -(1 + h_{fe}) I_{b_r} = -101 I_{b_r} \quad (I)$$

$$I_{b_r} = I_{b_1} + h_{fe} I_{b_1} = (1 + h_{fe}) I_{b_1}$$

$$KVL: 1 \times 10^3 K\Omega I_{b_1} + h_{ie_1} I_{b_1} + h_{ie_r} I_{b_r} = -V$$

$$\Rightarrow I_{b_1} (10^3 + h_{ie_1}) + h_{ie_r} (1 + h_{fe}) I_{b_1} = -V$$

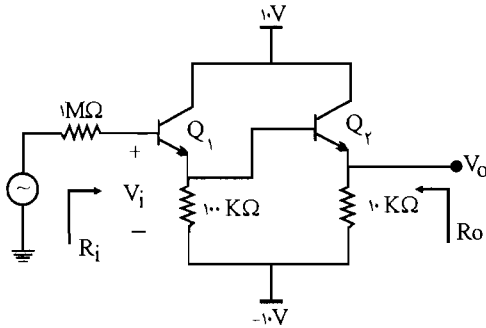
$$\Rightarrow I_{b_1} = \frac{-V}{1289/5}$$

با کمک رابطه (I) داریم:

$$I = -101 I_{b_r} = -101 \times (1 + h_{fe}) I_{b_1} = -101 \times 101 I_{b_1} = -(101)^2 I_{b_1}$$

$$= -(101)^2 \times \frac{-V}{1289/5} \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1289/5}{(101)^2} = 126 \Omega$$

۲۶- در مدار شکل م- ۲۶ با فرض $V_{BE} = 0.7V$ ، $B = 100$ و $V_{CE(sat)} = 0.2V$ ، ولتاژ DC خروجی، حداکثر دامنه بدون اعوجاج خروجی و مقادیر A_V ، R_i و R_o را محاسبه نمایید؟



شکل م- ۲۶

☑ راه حل:

تحلیل dc انجام می دهیم و در تحلیل dc، V_s صفر می شود:

در حلقه $1M\Omega$ و $100K\Omega$ و V_{BE1} و $10V$ - داریم:

$$\begin{aligned} \text{KVL: } 10 &= V_{BE1} + 100(I_{E1} - I_{B1}) \\ \Rightarrow 10 &= 0.7 + 100(\beta + 1)I_{B1} - 100I_{B1} = 0.7 + 9I_{B1} \\ \Rightarrow 11100I_{B1} - 100I_{B1} &= 9/3 \quad (I) \end{aligned}$$

در حلقه $100K\Omega$ و V_{BE2} و $100K\Omega$ داریم:

$$\begin{aligned} \text{KVL: } 100(I_{E2} - I_{B2}) + 10(I_{E2}) &= V_{BE2} = 0.7 \\ \Rightarrow 100(1 + \beta)I_{B2} - 100I_{B2} - 10(1 + \beta)I_{B2} &= 0.7 \\ \Rightarrow 10100I_{B2} - 1110I_{B2} &= 0.7 \quad (II) \end{aligned}$$

با استفاده از حل این دستگاه I_{B1} و I_{B2} محاسبه می شوند:

$$\begin{cases} 11100I_{B1} - 100I_{B2} = 9/3 & (I) \\ 10100I_{B2} - 1110I_{B1} = 0.7 & (II) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{B1} = 0.91 \mu A \\ I_{B2} = 0.76 \mu A \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} I_{C1} = \beta I_{B1} = 0.91 \text{ mA} \\ I_{C2} = \beta I_{B2} = 0.76 \text{ mA} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} h_{ie1} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C1}} = \frac{100 \times 26}{0.91} = 28.6 \text{ K}\Omega \\ h_{ie2} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C2}} = \frac{100 \times 26}{0.76} = 34 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

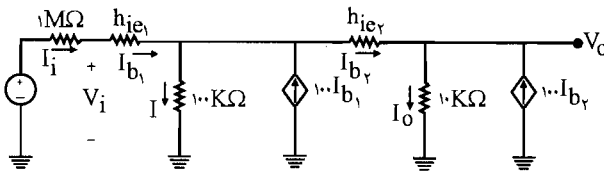
$$V_{O_{dc}} = V_{E_r} = 10 I_{E_r} - 10V = 10(I_{C_r}) - 10V = 10 \times 0.76 - 10 = -2.4V$$

$$V_O(\max) = 10 - 0.2 = 9.8V$$

$$\begin{cases} V_{O_1} = V_O(\max) - V_O = 9.8 - (-2.4) = 12.2 & \text{در حالت اشباع } Q_2 \text{ برابر است با:} \\ V_{O_2} = V_O(\min) - V_O = -10 - (-2.4) = -7.6 & \text{در حالت قطع } Q_2 \text{ برابر } 10V \text{ می باشد} \end{cases}$$

$$V_O(\max) = 7.6 \quad \leftarrow \text{در نظر قدر مطلق می باشد}$$

مدار معادل ac:



$$A_1 = \frac{I_o}{I_i} = \frac{I_{b_2} + 100 b_2}{I_{b_1}} = \frac{101 b_2}{I_{b_1}} \quad (I)$$

$$I_{b_1} = ? \quad \text{KVL: } -100I + 3/4 I_{b_2} + 10I_o = 0 \Rightarrow$$

$$-100(I_{b_1} + 100I_{b_1} - I_{b_2}) + 3/4 I_{b_2} + 101 I_{b_2} \times 10 = 0$$

$$\Rightarrow -10100 I_{b_1} + 100 I_{b_2} + 3/4 I_{b_2} + 1010 I_{b_2} = 0 \Rightarrow I_{b_1} = 0.1102 I_{b_2}$$

$$(I): A_1 = \frac{101 I_{b_2}}{0.1102 I_{b_2}} = 916.5$$

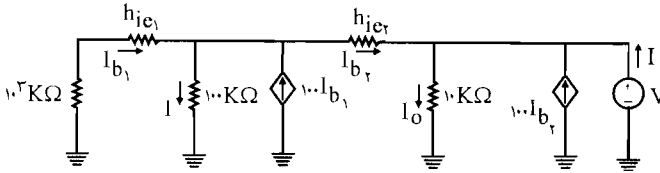
$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie1} I_{b_1} + 3/4 I_{b_2} + 10 I_o}{I_{b_1}} = \frac{28.6 \times 0.1102 I_{b_2} + 3/4 I_{b_2} + 10 \times 101 I_{b_2}}{0.1102 I_{b_2}}$$

$$= 9.224 M\Omega$$

$$A_v = A_1 \times \frac{R_L}{R_i} = 916.5 \times \frac{10 K\Omega}{9.224 \times 10^3} = 0.993$$

$$A_{v_s} = A_v \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = 0.993 \times \frac{9.224 \times 10^3}{9.224 \times 10^3 + 10^3} = 0.89$$

برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را صفر می‌کنیم.



$$R_O = \frac{V}{I} \quad I = -100 I_{b_2} - I_{b_2} + I_O = -101 I_{b_2} + \frac{V}{100} \quad (I)$$

$$\text{KVL: } I_{b_1} - I \cdot 100 \text{ K}\Omega + 100 I_{b_1} = I_{b_2} \Rightarrow I_{b_1} + \frac{(100 + h_{ie1}) I_{b_1}}{100} + 100 I_{b_1} = I_{b_2}$$

$$\Rightarrow I_{b_2} = 111/29 I_{b_1} \quad (II)$$

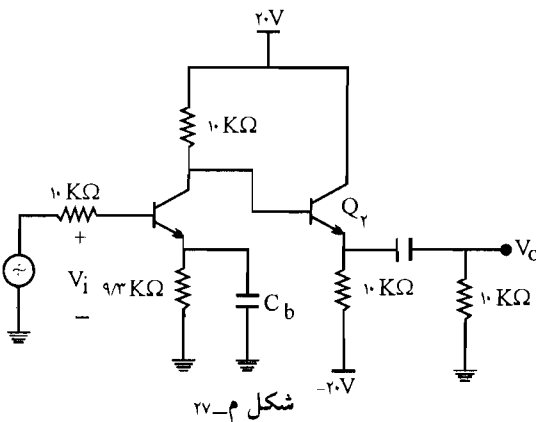
$$\text{KVL: } (h_{ie1} + 100) I_{b_1} + 3/4 I_{b_2} = -V \Rightarrow$$

$$102/6 \times \frac{1}{111/29} I_{b_2} + 3/4 I_{b_2} = -V \Rightarrow I_{b_2} = \frac{-V}{12/6}$$

$$\Rightarrow (I) : I = -101 \times \frac{-V}{12/6} + \frac{V}{100} = V(0/1 + 1/0.1) = 1/11 \text{ V}$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{1/11} = 11 \text{ K}\Omega$$

۲۷- در مدار شکل م-۲۷، $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ و $\beta = 50$ ، مقادیر A_v ، R_i ، R_O و A_1 را به دست آورید؟



شکل م-۲۷

✓ راه حل:

در حلقه Q_1 در $20V$ و V_{BE_1} و $9/3 K\Omega$ و $10 K\Omega$ داریم:

$$KVL: 10 I_{B_1} + 9/3 I_{E_1} = 20 - 0.7 = 19/3 \Rightarrow 10 I_{B_1} + 9/3(1+\beta) I_{B_1} = 19/3$$

$$\Rightarrow 484/3 I_{B_1} = 19/3 \Rightarrow I_{B_1} = 0.039 \Rightarrow I_{C_1} = \beta I_{B_1} = 1/99 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow h_{ie_1} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_1}} = \frac{50 \times 26}{1/99} = 653/3 \Omega = 0.653 \text{ K}\Omega$$

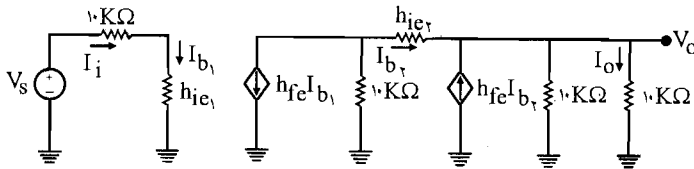
در حلقه Q_2 در $20V$ و $10 K\Omega$ و $20V$ و $10 K\Omega$ داریم:

$$KVL: 10 K\Omega (I_{C_1} + I_{B_2}) + 10 I_{E_2} = 20 - (-20) - 0.7 = 39/3$$

$$\Rightarrow 10(1+\beta) I_{B_1} + 10 I_{B_2} + 10(1+\beta) I_{B_2} = 39/3 \Rightarrow 520 I_{B_2} = 39/3 - 10 \times 1/99$$

$$\Rightarrow I_{B_2} = 0.037 \Rightarrow I_{C_2} = 1/86 \text{ mA} \Rightarrow h_{ie_2} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_2}} = \frac{50 \times 26}{1/86} = 0.699 \text{ K}\Omega$$

مدار معادل ac به صورت زیر می شود:



$$A_T = \frac{I_O}{I_i} = \frac{(h_{fe} I_{b_2} + I_{b_2}) \times \frac{10 K\Omega}{10 K\Omega + 10 K\Omega}}{I_{b_1}} = \frac{51 I_{b_2} \times \frac{1}{2}}{I_{b_1}} \quad (I)$$

$$KVL: 10 K\Omega (50 I_{b_1} + I_{b_2}) + h_{ie_2} I_{b_2} + (10 K\Omega \parallel 10 K\Omega) \times (I_{b_2} + h_{fe} I_{b_2}) = 0$$

$$\Rightarrow 500 I_{b_1} + 10 I_{b_2} + 50 I_{b_2} + (5 \times 51) I_{b_2} = 0$$

$$\Rightarrow I_{b_1} = \frac{-265/699}{500} I_{b_2}$$

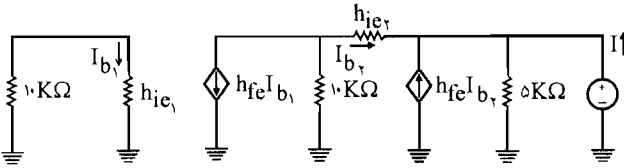
$$(I): A_T = \frac{\frac{51}{2} I_{b_2}}{\frac{-265/699}{599} I_{b_2}} = -47/98$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = h_{ie_1} = 0.653 \text{ K}\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -47/98 \times \frac{10 \text{ K}\Omega}{0.653} = 735$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = 735 \times \frac{0.653}{0.653 + 10} = -45/0.5$$

برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V در خروجی موازی با مقاومت $10 \text{ K}\Omega$ قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را بی‌اثر می‌کنیم:



$$R_O = \frac{V}{I}, \quad I = \frac{V}{\Delta} - h_{fe} I_{b2} - I_{b2} = \frac{V}{\Delta} - I_{b2} \quad (II)$$

در حلقه $10 \text{ K}\Omega$ و h_{ie1} و V داریم:

$$\text{KVL: } (10 + h_{ie1}) I_{b2} = -V$$

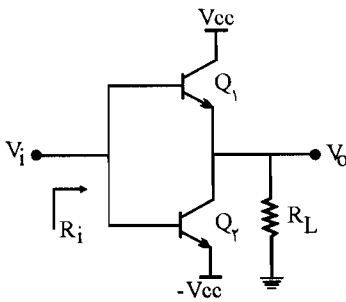
$$\Rightarrow (10 + 0.699) I_{b2} = -V \Rightarrow I_{b2} = \frac{-V}{10.699}$$

$$\Rightarrow (II): I = \frac{V}{\Delta} - 51 \times \frac{-V}{10.699} = V \left(\frac{1}{\Delta} + \frac{51}{10.699} \right) = 4/97$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{4/97} = 24.25 \text{ K}\Omega$$

۲۸- در تقویت کننده شکل م- ۲۸ پارامترهای هر دو ترانزیستور مشابه‌اند. مقادیر A_V و R_i را بر حسب پارامترهای هیبرید h ترانزیستور محاسبه نمایند. ($h_{re} = h_{oe} = 0$)

☑ (۵۱ اه حل)

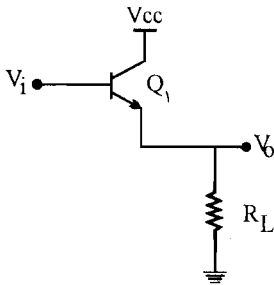


شکل م-۲۸

در این مدار هر دو ترانزیستور با هم نمی‌توانند روشن باشند اگر Q_1 روشن باشد Q_2 خاموش می‌باشد و اگر Q_2 روشن باشد Q_1 خاموش می‌باشد.

$$\begin{cases} Q_1: \text{ON} \\ Q_2: \text{Off} \end{cases}$$

مدار را وقتی که Q_1 روشن و Q_2 خاموش می‌باشد رسم می‌کنیم:



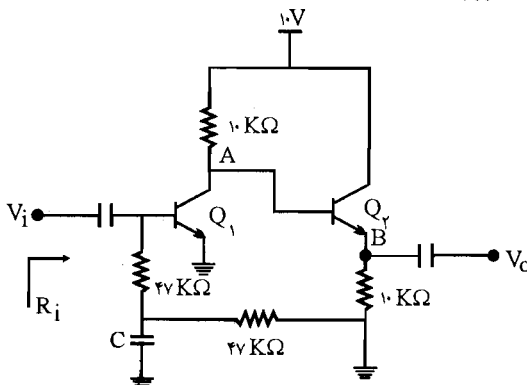
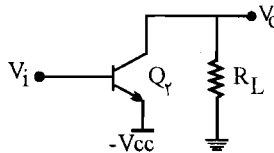
$$A_V = A_T \times \frac{R_L}{R_i} \quad \text{و} \quad \begin{cases} R_i = h_{ie} + (1 + h_{fe})R_L \\ A_T = 1 + h_{fe} \end{cases}$$

$$\Rightarrow A_V = (1 + h_{fe}) \times \frac{R_L}{[h_{ie} + (1 + h_{fe})R_L]} = \frac{(1 + h_{fe})R_L}{[h_{ie} + (1 + h_{fe})R_L]}$$

$$\Rightarrow A_V = (1 + h_{fe}) \times \frac{R_L}{[h_{ie} + (1 + h_{fe})R_L]} = \frac{(1 + h_{fe})R_L}{[h_{ie} + (1 + h_{fe})R_L]}$$

و وقتی که Q_2 روشن باشد و Q_1 خاموش باشد مدار معادل به صورت زیر می‌باشد ولی روابط هیچ فرقی با روابط بالا نمی‌کند.

$$\begin{cases} Q_1: \text{off} \\ Q_2: \text{ON} \end{cases}$$



شکل م-۲۹

۲۹- برای مقادیر بسیار بزرگ β و

$V_{BE} = 0.7V$ ، ولتاژ DC نقاط A و B

شکل م-۲۹ را به دست آورد. بهره ولتاژ

و مقاومت‌های ورودی و خروجی را برای

حالت‌های زیر محاسبه کنید؟

الف) مدار را مطابق شکل م-۲۹ در

نظر بگیرید.

ب) خازن C را حذف کنید.

ج) برای بند الف با فرض $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2V$ ، بزرگترین دامنه موج سینوسی خروجی بدون

برش و اعوجاج چقدر است؟

☑ (۱۰هـ حل)

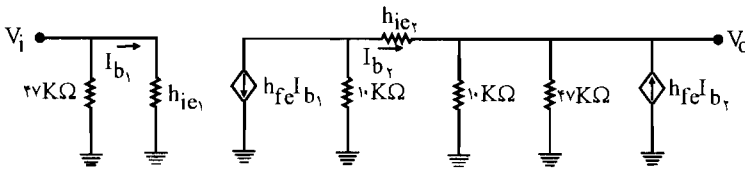
الف) چون طبق صورت مسئله β بسیار بزرگ است پس $I_{B_1} = 0$ می‌باشد
و همچنین $I_{C_1} = I_{E_1} \leftarrow I_{B_2} = 0$ پس ولتاژ نقطه B برابر است با V_{BE_1} .

$$V_B = V_{BE_1} = 0.7V$$

$$V_A = V_B + V_{BE_2} = 0.7V + 0.7V = 1.4V$$

$$\begin{cases} I_{C_1} = I_{E_1} = \frac{10 - V_A}{10 \text{ K}\Omega} = \frac{10 - 1.4}{10} = 0.86 \text{ mA} \Rightarrow h_{ie_1} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_1}} = \frac{h_{fe} \times 26}{0.86} = 0.3 h_{fe} \text{ K}\Omega \\ I_{C_2} = I_{E_2} = \frac{V_B}{10 \text{ K}\Omega} = \frac{0.7}{10} = 0.07 \text{ mA} \Rightarrow h_{ie_2} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_2}} = \frac{h_{fe} \times 26}{0.07} = 0.37 h_{fe} \text{ K}\Omega \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌شود:



$$A_V = \frac{V_O}{V_i} \Rightarrow \begin{cases} V_i = h_{ie_1} \cdot I_{b_1} = 0.3 h_{fe} I_{b_1} \\ V_O = (47 \text{ K}\Omega \parallel 10 \text{ K}\Omega) \times (1 + h_{fe}) I_{b_2} \cong 1.24 h_{fe} I_{b_2} \end{cases}$$

حلقه: $(47 \text{ K}\Omega \parallel 10 \text{ K}\Omega)$ ، h_{ie_2} ، $10 \text{ K}\Omega$

$$\text{KVL: } 10(h_{fe} I_{b_1} + I_{b_2}) + h_{ie_2} I_{b_2} + (47 \text{ K}\Omega \parallel 10 \text{ K}\Omega) \times (1 + h_{fe}) I_{b_2} = 0$$

$$= 10 h_{fe} I_{b_1} + 10 I_{b_2} + 0.37 h_{fe} I_{b_2} + 1.24 h_{fe} I_{b_2} = 0 \Rightarrow$$

چون h_{fe} خیلی بزرگ است از $10 I_{b_2}$ در مقابل $1.24 h_{fe} I_{b_2}$ صرف نظر می‌کنیم.

$$I_{b_1} = \frac{-1.24 I_{b_2} h_{fe}}{10 h_{fe}} = -0.124 I_{b_2} \quad (\text{II})$$

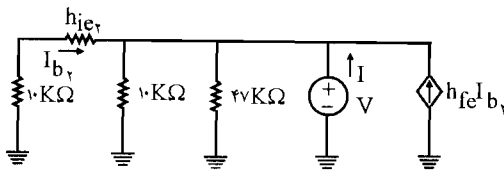
رابطه (II) را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{1.24 h_{fe} I_{b_2}}{0.3 h_{fe} I_{b_1}}$$

$$= \frac{\sqrt{24} I_{b_r}}{0.3 \times (-0.861) I_{b_r}} = -319$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = 47K\Omega \parallel h_{ie_1} = 47K\Omega \parallel 0.3 h_{fe} = 47K\Omega \parallel \infty = 47K\Omega$$

برای محاسبه R_O یک منبع ولتاژ V را در دو سر مقاومت $10K\Omega$ قرار می‌دهیم و منبع V_i را اتصال می‌کنیم. (چون V_i صفر در نظر گرفته می‌شود پس I_{b_1} صفر می‌شود در نتیجه $h_{fe} I_{b_1}$ نیز صفر می‌شود.)



$$R_O = \frac{V}{I}$$

$$I = \frac{V}{47} + \frac{V}{10} - I_{b_r} - h_{fe} I_{b_r} = \frac{V}{\sqrt{24}} - (1 + h_{fe}) I_{b_r} = \frac{V}{\sqrt{24}} - h_{fe} I_{b_r} \quad (III)$$

حلقه $V, h_{ie_r}, 10K\Omega$

$$\text{KVL: } -V = 10 I_{b_r} + h_{ie_r} I_{b_r} = 10 I_{b_r} + 0.37 h_{fe} I_{b_r}$$

از $10 I_{b_r}$ در مقابل $0.37 h_{fe} I_{b_r}$ صرف نظر می‌کنیم (چون h_{fe} بسیار بزرگ می‌باشد)

$$\Rightarrow -V = 0.37 h_{fe} I_{b_r} \Rightarrow I_{b_r} = \frac{-V}{0.37 h_{fe}} \quad (IV)$$

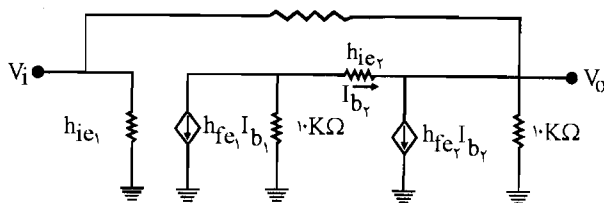
رابطه (IV) را در رابطه (III) قرار می‌دهیم:

$$I = \frac{V}{\sqrt{24}} - h_{fe} \times \frac{-V}{0.37 h_{fe}} = \frac{V}{\sqrt{24}} + \frac{V}{0.37} = V \left(\frac{1}{\sqrt{24}} + \frac{1}{0.37} \right) = 7 \times 2/82$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{2/82} = 0.355 K\Omega$$

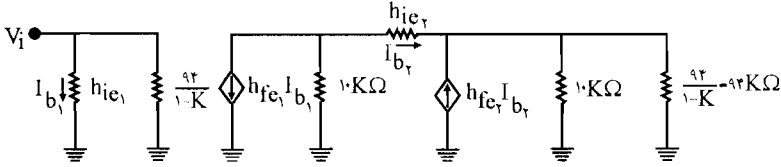
$$47K\Omega + 47K\Omega = 94K\Omega$$

(ب) خازن C را حذف می‌کنیم.



شکل (۱)

حال با استفاده از قضیه میلر مدار به صورت زیر درمی آید:



$$K = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_O}{V_i}$$

K عدد نسبتاً بزرگی می باشد پس $\frac{K}{K-1} \approx 1$ می باشد پس $\frac{94K}{K-1} \approx 94$

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} \Rightarrow \begin{cases} V_O = (1 + h_{fe}) I_{b_2} \times (10 \parallel 94) = h_{fe} I_{b_2} \times 9/0.4 \\ V_i = h_{ie_1} I_{b_1} = 0.3 h_{fe} I_{b_1} \end{cases}$$

حلقه: h_{ie_2} , $10 \text{ K}\Omega$, $(10 \text{ K}\Omega \parallel 94 \text{ K}\Omega)$

$$\text{KVL: } 10 h_{fe} I_{b_1} + 10 I_{b_2} + h_{ie_2} I_{b_2} + h_{fe} I_{b_2} \times 9/0.4 = 0$$

$$\Rightarrow 10 h_{fe} I_{b_1} + 10 I_{b_2} + 0.37 I_{b_2} \times h_{fe} + 9/0.4 h_{fe} I_{b_2} = 0$$

از $10 I_{b_2}$ صرف نظر می کنیم.

$$\Rightarrow 10 h_{fe} I_{b_1} = -0.37 I_{b_2} \times h_{fe} - 9/0.4 I_{b_2} \times h_{fe}$$

$$\Rightarrow I_{b_1} = -\frac{9/41}{10} I_{b_2} = -0.941 I_{b_2}$$

با قرار دادن این مقدار در رابطه A_V داریم:

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{h_{fe} I_{b_2} \times 9/0.4}{0.3 h_{fe} I_{b_1}}$$

$$\Rightarrow A_V = \frac{9/0.4 I_{b_2}}{0.3 \times (-0.941) I_{b_2}} = -320/2 = K$$

$$R_i = h_{ie_1} \parallel \frac{94}{1-K} = 0.3 h_{fe} \parallel \frac{94}{1+320/2} = \frac{94}{321/2} = 0.293 \text{ K}\Omega$$

حال برای محاسبه R_O باید در شکل (۱) یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار داد و منبع ورودی را صفر در نظر گرفت با صفر شدن منبع ورودی I_{b_1} صفر می شود پس $h_{fe} I_{b_1}$ نیز صفر می شود.

$$R_O = \frac{V}{I}$$

$$I = \frac{V}{10} + \frac{V}{94} - (1 + h_{fe}) I_{b_r} \approx \frac{V}{10} + \frac{V}{94} - h_{fe} I_{b_r}$$

KVL: $-V = (10 + h_{ie_r}) I_{b_r}$ در حلقه V و h_{ie_r} و $10K$ داریم:

$$\Rightarrow -V = 10 I_{b_r} + h_{ie_r} I_{b_r} = 10 I_{b_r} + 0.37 h_{fe} I_{b_r} \approx 0.37 h_{fe} I_{b_r}$$

$$\Rightarrow I_{b_r} = \frac{-V}{0.37 h_{fe}}$$

با قرار دادن این مقدار I_{b_r} در رابطه جریان داریم:

$$I = \frac{V}{10} + \frac{V}{94} - h_{fe} I_{b_r}$$

$$= \frac{V}{10} + \frac{V}{94} - h_{fe} \times \frac{-V}{0.37 h_{fe}} = V \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{94} + \frac{1}{0.37} \right)$$

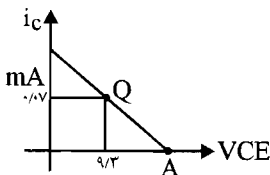
$$\Rightarrow I = V \times 2.81 \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = 0.3555 K\Omega$$

$$I_{C_r Q} = 0.7 mA$$

(ج)

$$V_{CE_r Q} = V_{C_r} - V_{E_r} = 10 - V_B = 10 - 0.7 = 9.3 V$$

با وجود خازن C ، R_L برابر است با:



$$10 K\Omega \parallel 47 K\Omega = 8.24 k\Omega$$

$$\text{معادله خط بار ac: } V_{ce} = -R_{ac} i_c$$

$$\Rightarrow V_{ce} = -8.24 i_c \Rightarrow V_{CE} - V_{CEQ} = -8.24 (i_c - I_{CQ})$$

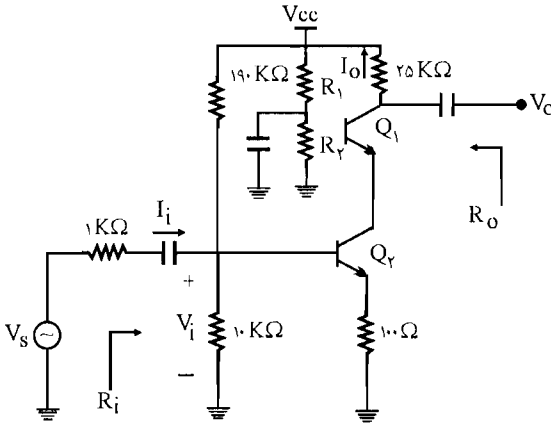
$$V_{CE} (A) = V_{CEQ} + 8.24 I_{CQ} = 9.3 + 8.24 \times 0.7 = 9.88$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_o (\max) = V_{CEQ} - V_{CE} (\text{sat}) = 9.3 - 0.2 = 9.1 & \text{حداکثر دامنه انحراف بدون برش از طرف اشباع} \\ V_o (\max) = V_{CE} (A) - V_{CE} (Q) = 9.88 - 9.3 = 0.58 & \text{حداکثر دامنه انحراف بدون برش از طرف قطع} \end{cases}$$

پس حداکثر انحراف بدون برش $V_o (\max) = 0.58$ خواهد بود. (یعنی کمترین مقدار به دست آمده)

۳۰- در تقویت کننده شکل م- ۳۰ ترانزیستورها مشابه و برای آنها $h_{ie} = 1\text{K}\Omega$ و $h_{fe} = 50$ است.

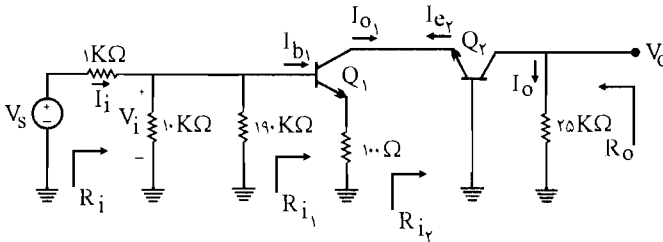
کمیت های A_I ، A_V ، A_{V_s} و R_i و R_o را محاسبه کنید؟



شکل م- ۳۰

راه حل:

مدار معادل ac به صورت زیر می باشد:



$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{I_O}{I_{e_r}} \times \frac{I_{e_r}}{I_{b_1}} \times \frac{I_{b_1}}{I_i} \quad (1)$$

$$\frac{I_O}{I_{e_r}} = \frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} = \frac{50}{51}$$

$$\frac{I_{e_r}}{I_{b_1}} = -h_{fe} = -50$$

$$\frac{I_{b_1}}{I_i} = \frac{I_i \times \frac{1}{R_{i_1}}}{I_i \times \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{190} + \frac{1}{R_{i_1}} \right)}$$



POWEREN.IR

$$R_{i_1} = h_{ie_1} + (1 + h_{fe}) \times 100 = 1\text{K}\Omega + 51 \times 100 = 6/1\text{K}\Omega$$

$$\Rightarrow \frac{I_{b_1}}{I_i} = \frac{\frac{1}{6/1}}{\frac{1}{10} + \frac{1}{190} + \frac{1}{6/1}} = \frac{0/164}{0/269} = 0/61 \quad (I): A_T = \frac{50}{51} \times (-50) \times 0/61 = -29/9$$

$$R_i = R_{i_1} \parallel (10 \text{ K}\Omega \parallel 190 \text{ K}\Omega) = 6/1 \text{ K}\Omega \parallel 9/5 \text{ K}\Omega = 3/7 \text{ K}\Omega$$

$$R_{i_r} = \frac{V_{e_r}}{I_{e_r}} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} = \frac{1}{51} \text{ K}\Omega$$

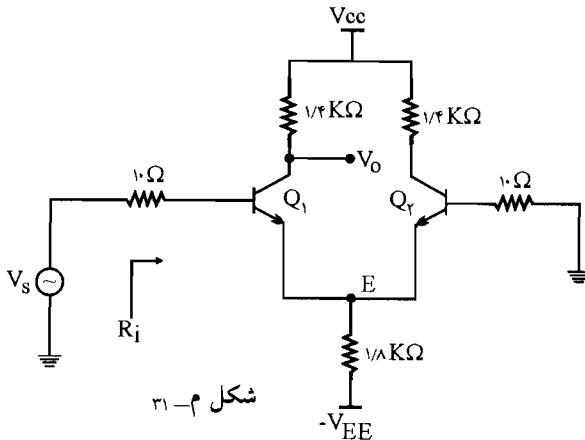
$$R_O = R_L = 25 \text{ K}\Omega$$

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{V_O}{V_{e_r}} \times \frac{V_{e_r}}{V_{b_1}} \quad (II)$$

$$(V_i = V_{b_1}) \Rightarrow \begin{cases} \frac{V_O}{V_{e_r}} = A_{T_r} \times \frac{R_{L_r}}{R_{i_r}} = \frac{50}{51} \times \frac{25}{1/51} = 1250 \\ \frac{V_{e_r}}{V_{b_1}} = A_{T_1} \times \frac{R_{L_1}}{R_{i_1}} = \frac{I_{e_r}}{I_{b_1}} \times \frac{R_{L_1}}{R_{i_1}} \quad (R_{L_1} = R_{i_r}) \\ = -50 \times \frac{1}{6/1} = -0/16 \end{cases}$$

$$(II): A_V = 1250 \times (-0/16) = -200$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -200 \times \frac{3/7}{3/7 + 1} = -200 \times \frac{3/7}{4/7} = -150/4$$



۳۱ - شکل م - ۳۱ یک

تقویت کننده تفاضلی است. در

این تقویت کننده Q_1 و Q_2 کاملاً

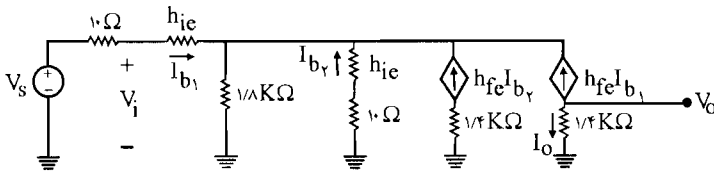
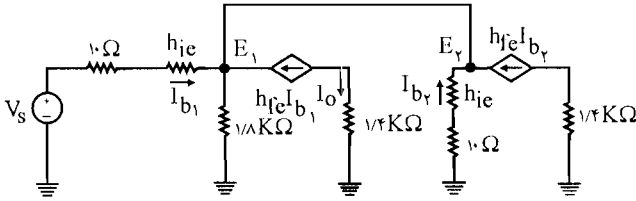
مشابه اند و $h_{ie} = 700 \Omega$ و

$h_{fe} = 200$ است. مطلوب

است محاسبه R_i و

A_{V_s} .

✓ (اه حل: مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



h_{ie} و $10\ \Omega$ و $1/8\ K\Omega$ حلقه:

$$\text{KVL: } 1/8(I_{b_1} + I_{b_2} + h_{fe}I_{b_1} + h_{fe}I_{b_2}) + \left(\frac{10\ \Omega + 10\ \Omega}{10^3}\right) I_{b_2} = 0$$

$$\Rightarrow 1/8(I_{b_1} + 200 I_{b_2}) + 1/8(I_{b_2} + 200 I_{b_2}) + 0.1 I_{b_2} = 0$$

$$\Rightarrow 201 \times 1/8 I_{b_1} = -36/8 I_{b_2} - 0.1 I_{b_2} = -36.1/8 I_{b_2}$$

$$\Rightarrow I_{b_1} = -1/0.2 I_{b_2}$$

$$A_1 = \frac{I_o}{I_i} = \frac{-h_{fe}I_{b_1}}{I_{b_1}} = -h_{fe} = -200$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie}I_{b_1} - 0.1 I_{b_2}}{I_{b_1}} = \frac{0.1 \times (-1/0.2 I_{b_2}) - 0.1 I_{b_2}}{-1/0.2 I_{b_2}}$$

$$\Rightarrow R_i = \frac{-0.1 \times 0.14 I_{b_2} - 0.1 I_{b_2}}{-1/0.2 I_{b_2}} = 1/41\ K\Omega$$

$$A_v = A_1 \times \frac{R_L}{R_i} = -200 \times \frac{1/4}{1/41} = -191/58$$

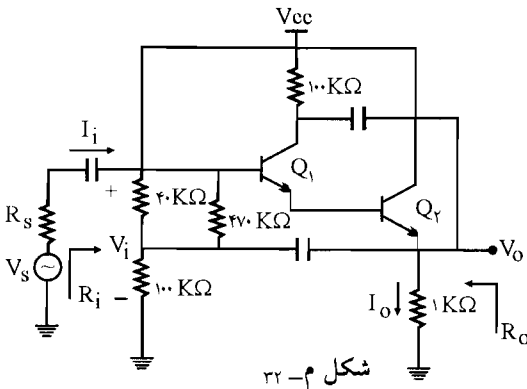
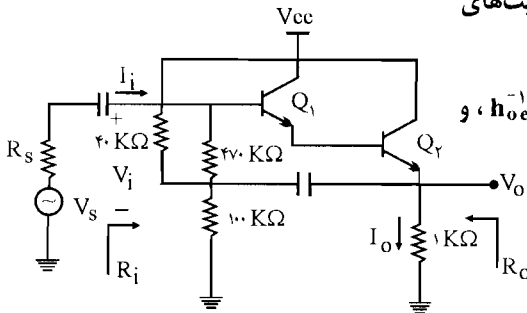
$$A_{v_s} = A_v \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -191/58 \times \frac{1/41}{1/41 + 0.1} = -197/18$$

۳۲ - در تقویت‌کننده‌های شکل م - ۳۲ کمیت‌های

A_v ، A_I و R_O را محاسبه نمایید.

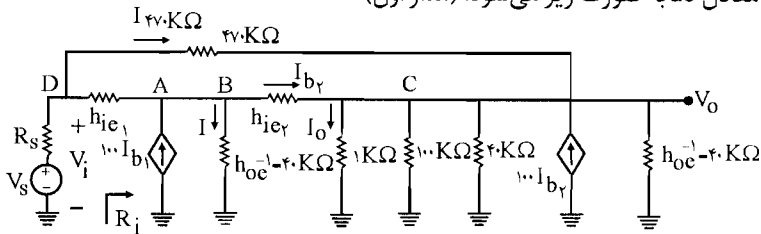
ترانزیستورها مشابه، $h_{oe}^{-1} = 40 \text{ K}\Omega$ و

$h_{fe} = 100$ و $h_{ie_r} = 1 \text{ K}\Omega$ است.



شکل م - ۳۲

☑ (۱۵ هـ): مدار معادل ac به صورت زیر می‌شود: (مدار اول)



$$A_I = \frac{I_O}{I_i} \quad (A)$$

با استفاده از تقسیم جریان

$$I_O = (I_{b_r} + 100 I_{b_r} + I_{r_v \cdot K\Omega}) \times \frac{1}{\frac{1}{1 \text{ K}\Omega} + \frac{1}{40 \text{ K}\Omega} + \frac{1}{40 \text{ K}\Omega} + \frac{1}{1 \text{ K}\Omega}}$$

$$= \frac{50}{53} (101 I_{b_r} + I_{r_v \cdot K\Omega}) \quad (I)$$

$$(A \text{ گره}) \text{ KCL: } I_{b_r} = I_{b_1} + 100 I_{b_1} - I_{r_v \cdot K\Omega} = 101 I_{b_1} - \frac{h_{ie_r} I_{b_r} + I_o}{40 \text{ K}\Omega}$$

$$\Rightarrow 41 I_{b_r} = 40.4 \cdot I_{b_1} - I_O \quad (II)$$

حلقه: $47 \cdot K\Omega$, h_{ie_1} , h_{ie_r}

$$KVL: 47 \cdot I_{r_v} \cdot K\Omega - 1 \times I_{b_1} - 1 \times I_{b_r} = 0$$

$$\Rightarrow I_{r_v} \cdot K\Omega = \frac{I_{b_1} + I_{b_r}}{47} = 2/13 \times 10^{-3} (I_{b_1} + I_{b_r}) \quad (III)$$

رابطه (III) را در رابطه (I) جایگزین می‌کنیم:

$$\Rightarrow I_O = \frac{50}{53} (10.1 I_{b_r} + 2/13 \times 10^{-3} (I_{b_1} + I_{b_r}))$$

با جایگذاری این رابطه به دست آمده در رابطه (II) داریم:

$$41 I_{b_r} = 40.4 \cdot I_{b_1} - \frac{50}{53} (10.1 I_{b_r} + 2/13 \times 10^{-3} (I_{b_1} + I_{b_r}))$$

$$\Rightarrow 41 I_{b_r} = 40.4 \cdot I_{b_1} - \frac{50}{53} \times 2/13 \times 10^{-3} I_{b_1} - \frac{50}{53} \times 10.1 I_{b_r} - \frac{50}{53} \times 2/13 \times 10^{-3} I_{b_r}$$

$$\text{از } \frac{50}{53} \times 2/13 \times 10^{-3} I_{b_1} \text{ و } \frac{50}{53} \times 10.1 I_{b_r} \text{ در مقابل } \frac{50}{53} \times 2/13 \times 10^{-3} I_{b_r} \text{ در}$$

مقابل $40.4 \cdot I_{b_1}$ نیز قابل صرفنظر کردن می‌باشد.

$$\Rightarrow 41 I_{b_r} = 40.4 \cdot I_{b_1} - \frac{50}{53} \times 10.1 I_{b_r} \Rightarrow 136/3 I_{b_r} = 40.4 \cdot I_{b_1}$$

$$\Rightarrow I_{b_r} = 29/6 I_{b_1}$$

با جایگذاری این رابطه در رابطه (III) داریم:

$$I_{r_v} \cdot K\Omega = 2/13 \times 10^{-3} (I_{b_1} + 29/6 I_{b_1}) = 2/13 \times 10^{-3} \times 30/6 I_{b_1}$$

$$= 65 \times 10^{-3} I_{b_1}$$

$$\stackrel{(I)}{\Rightarrow} I_O = \frac{50}{53} (10.1 \times 29/6 I_{b_1} + 65 \times 10^{-3} I_{b_1}) = 282 \cdot I_{b_1}$$

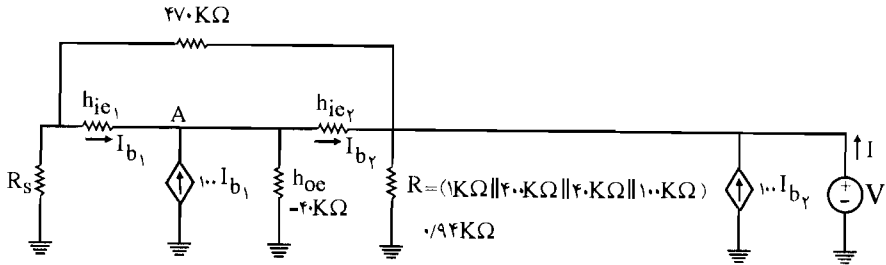
$$\stackrel{(A)}{\Rightarrow} A_I = \frac{I_o}{I_i} = \frac{282 \cdot I_{b_1}}{I_{r_v} \cdot K\Omega + I_{b_1}} = \frac{282 \cdot I_{b_1}}{65 \times 10^{-3} I_{b_1} + I_{b_1}} = 2648$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{47 \cdot I_{r_v} \cdot K + I_O \times 1}{I_i} = 47 \cdot \frac{I_{r_v}}{I_i} + A_I$$

$$\Rightarrow R_i = 47 \cdot \frac{0.65 I_{b_1}}{1.65 I_{b_1}} + 2648 = 2676/7 K\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = 2648 \times \frac{1}{2676/7} = 0.989$$

برای محاسبه R_o یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را بی‌اثر می‌کنیم.



$$R_o = \frac{V}{I}$$

$$I = \frac{V}{94} - I_{b_2} - 100 I_{b_1} - I_{470 \text{ K}\Omega} \quad (I)$$

$$\text{KCL (Node A): } I_{b_2} = 100 I_{b_1} + I_{b_1} - I_{470 \text{ K}\Omega}$$

$$\Rightarrow I_{b_2} = 101 I_{b_1} - \frac{1 \times I_{b_2} + V}{470 \text{ K}\Omega} \quad (II)$$

حلقه: V , $470 \text{ K}\Omega$, R_s

$$\text{KVL: } 470 I_{470 \text{ K}\Omega} + R_s I_{R_s} + V = 0$$

$$\Rightarrow 470 I_{470 \text{ K}\Omega} - R_s (I_{b_1} + I_{470 \text{ K}\Omega}) = -V \Rightarrow -V = I_{470 \text{ K}\Omega} (470 + R_s) + R_s I_{b_1} \quad (III)$$

حلقه: $470 \text{ K}\Omega$, $1 \text{ K}\Omega$, $1 \text{ K}\Omega$

$$\text{KVL: } 470 I_{470 \text{ K}\Omega} - 1 \times I_{b_1} - 1 \times I_{b_2} = 0 \Rightarrow I_{470 \text{ K}\Omega} = \frac{I_{b_1} + I_{b_2}}{470 \text{ K}\Omega}$$

این رابطه را در رابطه (III) قرار می‌دهیم:

$$-V = \left(\frac{I_{b_1} + I_{b_2}}{470 \text{ K}\Omega} \right) (470 + R_s) + R_s I_{b_1}$$

$$\Rightarrow I_{b_1} + I_{b_2} + \frac{R_s}{470} (I_{b_1} + I_{b_2}) + R_s I_{b_1} = -V$$

از $\frac{R_s I_{b_1}}{470}$ در مقابل $R_s I_{b_1}$ صرفنظر می‌کنیم.

$$(1 + R_s) I_{b_1} + \left(1 + \frac{R_s}{470}\right) I_{b_2} = -V$$

طبق رابطه (II) داریم:

$$101 I_{b_1} - 1/0.25 I_{b_2} = 0.25 V$$

با استفاده از دو معادله بالا I_{b_1} و I_{b_2} را به دست می آوریم:

$$\begin{cases} I_{b_1} = -\frac{(1.5 \times 10^{-5} R_s) V}{1.2 + 1/24 R_s} \\ I_{b_2} = -\frac{(1.1 + 25 \times 10^{-7} R_s) V}{1.2 + 1/24 R_s} \end{cases}$$

با جایگذاری این دو مقدار در رابطه (III) داریم:

$$I_{47.0 \text{ K}\Omega} = -\frac{1}{47.0} \left(\frac{1.2 + 25 \times 10^{-7} R_s}{1.2 + 1/24 R_s} \right) V$$

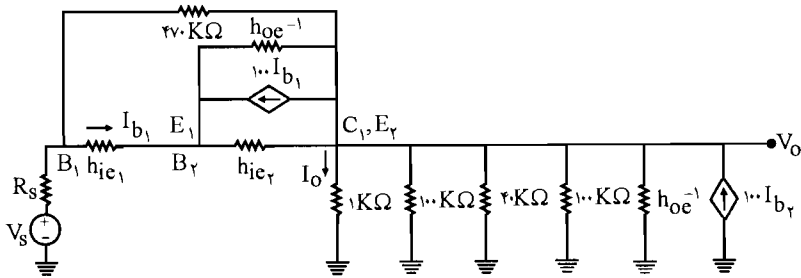
با جایگذاری مقادیر I_{b_1} و $I_{47.0 \text{ K}\Omega}$ در رابطه (I) داریم:

$$I = \frac{V}{0.94} + 1.1 \times \frac{(1.1 + 25 \times 10^{-7} R_s) V}{1.2 + 1/24 R_s} + \frac{1}{47.0} \times \frac{(1.2 + 25 \times 10^{-7} R_s) V}{1.2 + 1/24 R_s}$$

$$\Rightarrow I = \left(\frac{1.2 + 1/24 R_s + 9589 + 2/4 R_s}{0.94(1.2 + 1/24 R_s)} \right) V$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{95/9 + 1/1 R_s}{9691 + 3/64 R_s}$$

مدار دوم، مدار معادل ac این مدار را رسم می کنیم:



$$E_1 \text{ گره KCL: } I_{b_1} + 100 I_{b_1} = I_{b_2} + \frac{1 \times I_{b_2}}{4.0} \Rightarrow I_{b_2} = 98/5 I_{b_1}$$

حلقه $47.0 \text{ k}\Omega$, h_{ie1} , h_{ie2}

$$\text{KVL: } 47.0 \cdot I_{47.0 \text{ K}\Omega} = 1 \times I_{b_1} + 1 \times I_{b_2} \Rightarrow 47.0 \cdot I_{47.0 \text{ K}\Omega} = I_{b_1} + 98/5 I_{b_1}$$

$$\Rightarrow I_{47.0 \text{ K}\Omega} = 0.211 I_{b_1}$$

$$(C_1 \text{ گره}) I_O = (I_{b_2} + 100 I_{b_2} - 100 I_{b_1} + \frac{1 \times I_{b_2}}{4.0} I_{47.0 \text{ K}\Omega}) \times \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{100} + \frac{1}{40} + \frac{1}{40} + \frac{1}{100}}$$

$$\Rightarrow I_O = (1.1/0.25 I_{b_2} - 100 I_{b_1} + 0.211 I_{b_1}) \times \frac{200}{214}$$

$$\Rightarrow I_O = (10 \cdot 1/0.25 \times 98/5 I_{b_1} - 99/79 I_{b_1}) \times \frac{100}{10V} = 92.7 I_{b_1}$$

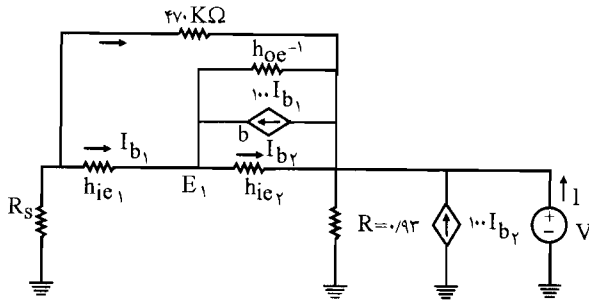
$$A_T = \frac{I_O}{I_i} = \frac{92.7 I_{b_1}}{I_{b_1} + I_{FV} \cdot K \Omega} = \frac{92.7 I_{b_1}}{I_{b_1} + 0.21 I_{b_1}} = 76.9$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{47 \cdot I_{FV} \cdot K \Omega + 1 \times I_O}{I_i} = 47 \cdot \frac{I_{FV} \cdot K \Omega}{I_i} + A_T = 47 \cdot \frac{0.21 I_{b_1}}{1/21 I_{b_1}} + 76.9$$

$$\Rightarrow R_i = 7691 \text{ K}\Omega$$

$$A_V = A_T \times \frac{R_L}{R_i} = 76.9 \times \frac{1}{7691} = 0.989$$

برای محاسبه R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را بی‌اثر می‌کنیم



$$\text{KCL: } I_{b_2} = 98/5 I_{b_1} \text{ (گره } E_1)$$

$$\text{حلقه } V, 47 \cdot K\Omega, R_s$$

$$\text{KVL: } R_s (I_{b_1} + I_{FV} \cdot K\Omega) + 47 \cdot I_{FV} \cdot K\Omega = -V$$

$$\Rightarrow (1/21 R_s + 99/5) I_{b_1} = -V \Rightarrow I_{b_1} = \frac{-V}{99/5 + 1/21 R_s}$$

$$I_{FV} \cdot K\Omega = 0.21 I_{b_1} = \frac{0.21 V}{99/5 + 1/21 R_s}$$

$$I_{b_2} = 98/5 I_{b_1} = -\frac{98/5 V}{99/5 + 1/21 R_s}$$

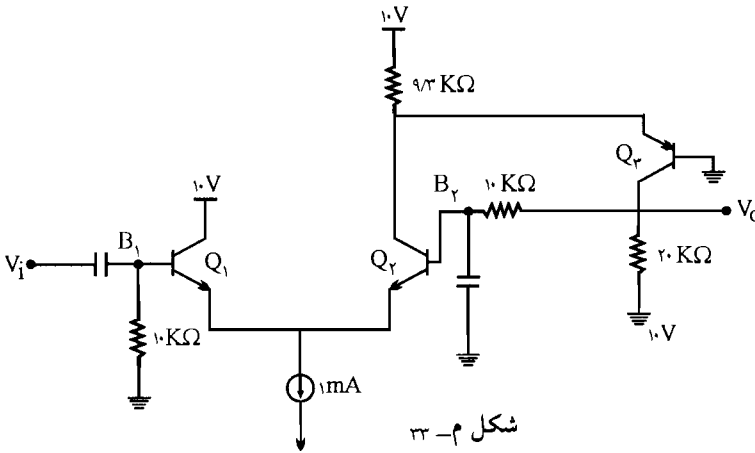
$$\Rightarrow I = \frac{V}{0.93} + 100 \cdot I_{b_1} - \frac{1 \times I_{b_2}}{40} - 10.1 I_{b_2} - I_{FV} \cdot K\Omega$$

$$\Rightarrow I = \frac{V}{\cdot/93} - \frac{100V}{99/5 + 1/21R_s} - 101/25 \left(\frac{-98/5V}{99/5 + 1/21R_s} \right) - \left(\frac{-\cdot/21V}{99/5 + 1/21R_s} \right)$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{92/5 + 1/12R_s}{9261 + 1/21R_s}$$

۳۳- با فرض $V_{BE} = 0/7V$ و $h_{fe} = 100$ برای همه ترانزیستورها، ولتاژهای DC نقاط B_1 ، B_2 را در شکل م- ۳۳ به دست آورید. همچنین ولتاژ DC خروجی و بهره ولتاژ A_V را محاسبه

نمائید؟



☑ راه حل:

$$I_{E_1} + I_{E_2} = 1mA \quad (I)$$

$$KVL: 9/3(I_{C_2} + I_{E_2}) = 10 - V_{BE_2} = 10 - 0/7 = 9/3$$

$$\Rightarrow I_{C_2} + I_{E_2} = \frac{9/3}{9/3} = 1 \Rightarrow \frac{\beta_2}{1+\beta_2} I_{E_2} + I_{E_2} = 1 \Rightarrow \frac{100}{101} I_{E_2} + I_{E_2} = 1$$

$$\Rightarrow 100 I_{E_2} + 101 I_{E_2} = 101 \quad (II)$$

در حلقه $10k\Omega$ و $20k\Omega$ و $10V$ و V_{BE_1} و V_{BE_2} داریم:

$$KVL: 10 I_{B_1} - 10 I_{B_2} + 20(I_{C_2} - I_{B_2}) = 10 - 0/7 + 0/7 = 10$$

$$\Rightarrow 10 I_{B_1} - 20 I_{B_2} + 20 I_{C_2} = 10 \Rightarrow I_{B_1} - 2 I_{B_2} + 2 I_{C_2} = 1 \Rightarrow \frac{I_{E_1}}{1+\beta_1} - \frac{2 I_{E_2}}{1+\beta_2} + 2 \frac{\beta_2}{1+\beta_2} I_{E_2} = 1$$

$$\Rightarrow \frac{I_{E_1}}{101} - \frac{2 I_{E_2}}{101} + \frac{200}{101} I_{E_2} = 1 \Rightarrow I_{E_1} - 2 I_{E_2} + 200 I_{E_2} = 101 \quad (III)$$

$$(I), (II), (III): \begin{cases} I_{E_1} + I_{E_2} = 1mA \\ 100 I_{E_2} + 101 I_{E_2} = 101 \\ I_{E_1} - 2 I_{E_2} + 200 I_{E_2} = 101 \end{cases}$$

در دو رابطه (II) و (III)، I_{E_r} را حذف می‌کنیم.

$$\begin{cases} 100 \times 200 I_{E_r} + 101 \times 200 I_{E_r} = 101 \times 200 \\ -101 I_{E_r} + 3 \times 101 I_{E_r} - 200 \times 101 I_{E_r} = -101 \times 101 \end{cases} \Rightarrow 20303 I_{E_r} - 101 I_{E_r} = 99999 \text{ (IV)}$$

$$(I), (IV): \begin{cases} I_{E_1} + I_{E_r} = 1 \\ 20303 I_{E_r} - 101 I_{E_r} = 99999 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{E_1} = 0.505 \text{ mA} \\ I_{E_r} = 0.499 \text{ mA} \end{cases}$$

$$(III) \Rightarrow I_{E_r} = 0.51 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow V_{B_1} = -10 I_{B_1} = -10 \times \frac{I_{E_1}}{1+\beta} = -10 \times \frac{0.505}{101} = -0.5 \text{ V}$$

$$V_{B_r} = V_{BE_r} - V_{BE_1} + V_{B_1} = 0.7 - 0.7 - 0.5 = -0.5 \text{ V}$$

$$V_o = 20 I_r \cdot K - 10 = 20 (I_{C_r} - I_{B_r}) - 10 = 20 \left(\frac{I_{E_r} \times \beta}{1+\beta} - \frac{I_{E_r}}{1+\beta} \right) - 10$$

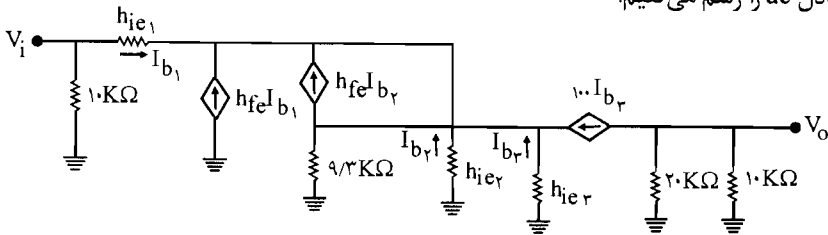
$$= 20 \left(\frac{0.51 \times 100}{101} - \frac{0.499}{101} \right) - 10 \approx 0$$

$$I_{C_1} = \frac{I_{E_1} \times \beta}{1+\beta} = \frac{0.505 \times 100}{101} \Rightarrow h_{ie_1} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_1}} = \frac{100 \times 26}{I_{C_1}} = \frac{2600}{0.5} = 5.2 \text{ K}\Omega$$

$$I_{C_r} = \frac{I_{E_r} \times \beta}{1+\beta} = \frac{0.499 \times 100}{101} \Rightarrow h_{ie_r} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_r}} = \frac{26 \times 100}{I_{C_r}} = 5.7 \text{ K}\Omega$$

$$I_{C_r} = \frac{I_{E_r} \times \beta}{1+\beta} = \frac{0.51 \times 100}{101} \Rightarrow h_{ie_r} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_r}} = \frac{100 \times 26}{I_{C_r}} = 5.15 \text{ K}\Omega$$

حال مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-100 I_{b_r} \times (20 \text{ K}\Omega \parallel 10 \text{ K}\Omega)}{h_{ie_1} I_{b_1} - h_{ie_r} I_{b_r}} = \frac{-100 I_{b_r} \times \frac{20}{3}}{5.2 I_{b_1} - 5.7 I_{b_r}} \quad (I')$$

$$\text{KCL: } I_{b_1} + h_{fe} I_{b_1} + h_{fe} I_{b_r} + I_{b_r} = 0 \Rightarrow (1 + 100) I_{b_1} = -(100 + 1) I_{b_r}$$

$$\Rightarrow I_{b_1} = -I_{b_r} \quad (II')$$

حلقه: $9/3 K\Omega$, h_{ie_r}

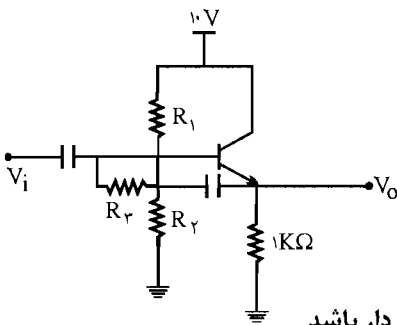
$$KVL: 9/3 I_{9/3 K\Omega} - h_{ie_r} I_{b_r} = 0 \quad (III)' \quad \text{و} \quad I_{9/3 K\Omega} = -100 I_{b_r} - I_{b_r} + 100 I_{b_r} - I_{b_r}$$

$$\Rightarrow I_{9/3 K\Omega} = -101 I_{b_r} + 99 I_{b_r}$$

$$(II)' = 9/3 (-101 I_{b_r} + 99 I_{b_r}) - 5/15 I_{b_r} = 0 \Rightarrow 920/7 I_{b_r} = 944/45 I_{b_r}$$

$$\Rightarrow I_{b_r} = 1/0.26 I_{b_r} \quad (IV)'$$

$$(I)': A_V = \frac{-100 \times \frac{r_o}{r} \times I_{b_r}}{5/2 \times (-1/0.26 I_{b_r}) - 5/7 \times 1/0.26 I_{b_r}} = 59/61$$



۳۴- در مدار شکل م- ۳۴ مقاومت‌های R_1 ، R_2 و R_r را طوری محاسبه کنید که شرایط زیر به‌طور همزمان برقرار باشد.

الف) $V_{CEQ} = 5V$ باشد.

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

ج) مدار از پایداری مطلوبی نسبت به تغییرات β برخوردار باشد.

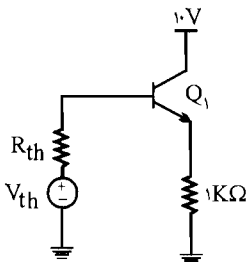
☑ (اه حل:

با اجرای تونن در بیس داریم:

$$\begin{cases} R_{th} = R_r + (R_1 \parallel R_2) = R_r + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

و مدار در حالت dc به صورت مقابل در می‌آید:

$I_C \simeq I_E$ فرض و



$$KVL: R_{th} I_B + 1K\Omega I_E = V_{th} - V_{BE}$$

$$\Rightarrow R_{th} \times \frac{I_C}{\beta} + I_C = V_{th} - V_{BE} \Rightarrow$$

$$I_C \left(\frac{R_{th}}{\beta} + 1 \right) = V_{th} - V_{BE} \quad (I)$$

و با توجه به فرض آخر مسئله یعنی پایداری مطلوب نسبت به تغییرات β داریم:

$$\frac{R_{th}}{\beta} = 0.1 R_E = 0.1 \times 1 K\Omega = 0.1 \Rightarrow R_{th} = 0.1 \beta \quad (II)$$

(II) در (I) جایگزین می‌کنیم:

$$I_C \left(\frac{0.1 \beta}{\beta} + 1 \right) = V_{th} - V_{BE} \Rightarrow I_C (0.1 + 1) = V_{th} - 0.7$$

$$\Rightarrow I_C = \frac{V_{th} - 0.7}{1.1}$$

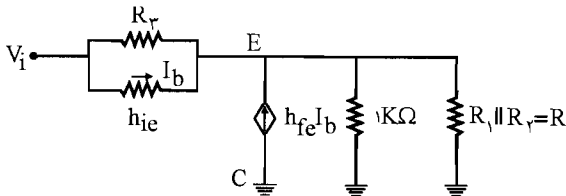
$$KVL: V_{CEQ} = V_{CC} - R_E I_E = 10 - 1 K\Omega \times I_E, \quad I_C \approx I_E$$

$$\Rightarrow V_{CEQ} = 10 - I_C = 10 - \frac{V_{th} - 0.7}{1.1} = 5V \quad (V_{CEQ} \text{ فرض مسئله})$$

$$\Rightarrow V_{th} = -5/5 + 11 + 0.7 = 6.2V \Rightarrow I_{CQ} = \frac{V_{th} - 0.7}{1.1} = \frac{6.2 - 0.7}{1.1} = 5mA$$

$$\Rightarrow h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{CQ}} = \frac{300 \times 26}{5} = 1.56 K\Omega$$

مدار معادل ac به صورت زیر درمی‌آید.



$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie} I_b + (1 + h_{fe}) I_b (1 K\Omega \parallel R) + \frac{h_{ie} I_b}{R_r} \times (R \parallel 1 K\Omega)}{I_b + \frac{h_{ie} I_b}{R_r}}$$

$$= \frac{h_{ie} I_b + (1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_r}) I_b \times \frac{R \times 1}{R + 1} + h_{ie} (1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_r}) \times \frac{R}{R + 1}}{I_b + \frac{h_{ie} I_b}{R_r}} = \frac{h_{ie} + (1 + h_{fe} + \frac{h_{ie}}{R_r}) \times \frac{R}{R + 1}}{1 + \frac{h_{ie}}{R_r}}$$

$$= \frac{R_r (R + 1) h_{ie} + R R_r (1 + h_{fe}) + R h_{ie}}{(R_r + h_{ie}) (1 + R)}$$

$$h_{fe} = 300 \Rightarrow R_{th} = 0.1 \beta \quad (II) \Rightarrow R_{th} = 0.1 \times 300 = 30 K\Omega$$

$$\text{از طرفی: } R_{th} = R_r + \frac{R_1 R_r}{R_1 + R_r} = R_r + R = 30 \Rightarrow R = 30 - R_r$$

با جایگذاری این مقادیر در R_i داریم:

$$R_i = \frac{R_p(30 - R_p + 1) \times 1/6 + (30 - R_p)R_p(1 + 30) + (30 - R_p) \times 1/6}{(R_p + 1/6)(1 + 30 - R_p)}$$

$$\Rightarrow R_i = \frac{30.2/6 R_p^2 - 90.78 R_p - 48}{R_p^2 - 29/4 R_p - 49/6}$$

طبق فرض ب مسئله مقاومت ورودی باید حداکثر شود پس از رابطه R_i نسبت به R_p مشتق می‌گیریم و برابر صفر قرار می‌دهیم:

$$\Rightarrow \frac{dR_i}{dR_p} = \frac{(30.2/6 \times 2R_p - 90.78)(R_p^2 - 29/4 R_p - 49/6) - (2R_p - 29/4)(30.2/6 R_p^2 - 90.78 R_p - 48)}{(R_p^2 - 29/4 R_p - 49/6)^2}$$

$$\frac{dR_i}{dR_p} = 0 \Rightarrow \text{صورت برابر صفر باید باشد} \Rightarrow 181/56 R_p^2 - 29921/92 R_p + 448857/6 = 0$$

$$\Rightarrow R_p^2 - 164/8 R_p + 2472/2 = 0$$

با حل این معادله درجه ۲ مقادیر R_p به دست می‌آید:

$$\begin{cases} R_p = 16/69 K\Omega \\ R_p = 148 K\Omega \end{cases}$$

طبق رابطه R_{th} داریم: $R_{th} = R_p + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 30 K\Omega$

پس $R_p = 148 K\Omega$ قابل قبول نمی‌باشد ولی $R_p = 16/69 K\Omega$ قابل قبول است.

$$\Rightarrow R_{th} = R_p + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 30 K\Omega \Rightarrow \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 30 - 16/69 = 13/31 \quad (A)$$

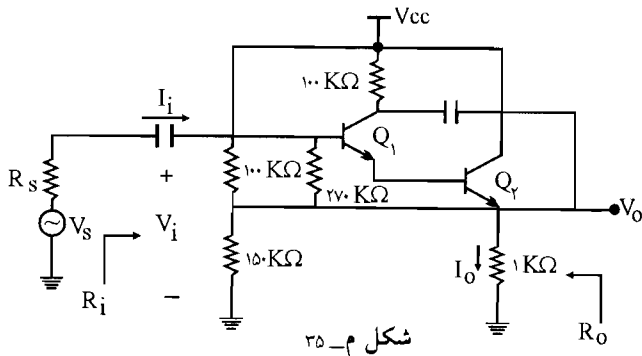
$$\text{از طرفی: } V_{th} = \frac{10 R_2}{R_1 + R_2} = 6/2 V \Rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0/62$$

$$\Rightarrow A: R_1 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 13/31 \Rightarrow R_1 \times 0/62 = 13/31 \Rightarrow R_1 = 21/47 K\Omega$$

$$\Rightarrow \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 13/31 \Rightarrow \frac{21/47 R_2}{21/47 + R_2} = 13/31 \Rightarrow 21/47 R_2 = 285/76 + 13/31 R_2$$

$$\Rightarrow R_2 = 25 K\Omega$$

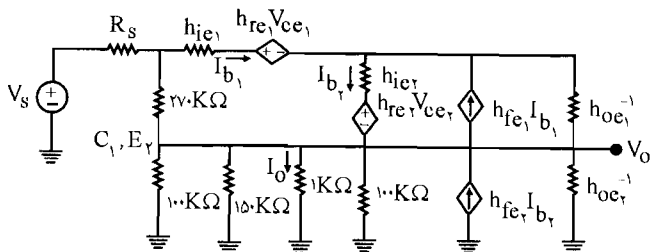
۳۵- در مدار تقویت کننده کلکتور مشترک شکل م- ۳۵ با فرض $h_{ie} = 1\text{ K}\Omega$ ، $h_{oe}^{-1} = 40\text{ K}\Omega$ ،
 $A_{V_r} = \frac{V_{e_r}}{V_{b_r}} = 0.98$ و $A_{V_v} = \frac{V_{e_v}}{V_{b_v}} = 0.96$ ، $h_{fe} = 100$ مقدار دقیق R_i را محاسبه کنید و
 توضیح دهید از چه روشی و چگونه مقاومت ورودی تقویت کننده افزایش یافته است؟



شکل م- ۳۵

☑ راه حل:

مدار معادل ac را رسم می کنیم:

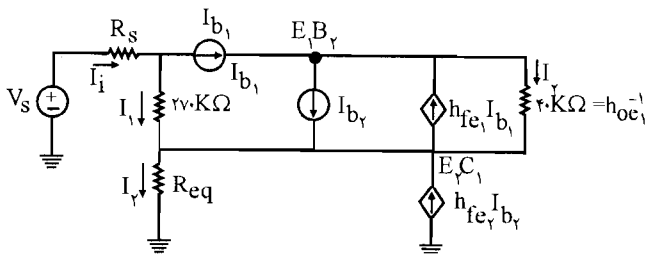


مقاومت معادل مقاومت های موازی $h_{oe_v}^{-1}$ و $100\text{ K}\Omega$ و $150\text{ K}\Omega$ و $100\text{ K}\Omega$ را می یابیم:

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{1}{150} + \frac{1}{1} + \frac{1}{100} + \frac{1}{40}} = 0.95\text{ K}\Omega$$

و به جای شاخه I_{b_1} منبع جریان I_{b_1} و به جای شاخه I_{b_2} منبع جریان I_{b_2} را جایگزین می کنیم و مدار

معادل را رسم می کنیم:



با توجه به فرض مسئله داریم:

$$A_{V_1} = \frac{V_{e_1}}{V_{b_1}} = 0.96$$

با توجه به مدار معادل V_{b_1} و V_{e_1} را می‌یابیم:

$$\begin{cases} V_{e_1} = 4 \cdot I_T + 0.95 I_T \\ V_{b_1} = 270 \cdot I_1 + 0.95 I_T \end{cases}$$

$$\Rightarrow A_{V_1} = \frac{4 \cdot I_T + 0.95 I_T}{270 \cdot I_1 + 0.95 I_T} = 0.96 \Rightarrow 4 \cdot I_T + 0.95 I_T = 259/2 I_1 + 0.912 I_T$$

$$4 \cdot I_T = 0.38 I_T = 259/2 I_1 \quad (I)$$

$$\text{مسئله فرض } A_{V_T} = \frac{V_{e_T}}{V_{b_T}} = 0.98 \Rightarrow \begin{cases} V_{e_T} = 0.95 I_T \\ V_{b_T} = 4 \cdot I_T + 0.95 I_T \end{cases}$$

$$\Rightarrow A_{V_T} = \frac{0.95 I_T}{4 \cdot I_T + 0.95 I_T} = 0.98 \Rightarrow 0.95 I_T = 39/2 I_T + 0.931 I_T$$

$$\Rightarrow 39/2 I_T = 0.19 I_T \Rightarrow I_T = 2.63 I_T \quad (II)$$

با جایگذاری (II) در (I) داریم:

$$4 \cdot I_T + 0.38 \times 2.63 I_T = 259/2 I_1 \Rightarrow I_1 = 0.456 I_T$$

$$E_T \text{ در گره KCL: } 100 \cdot I_{b_T} + I_{b_T} - 100 \cdot I_{b_1} + I_T + I_1 - I_T = 0$$

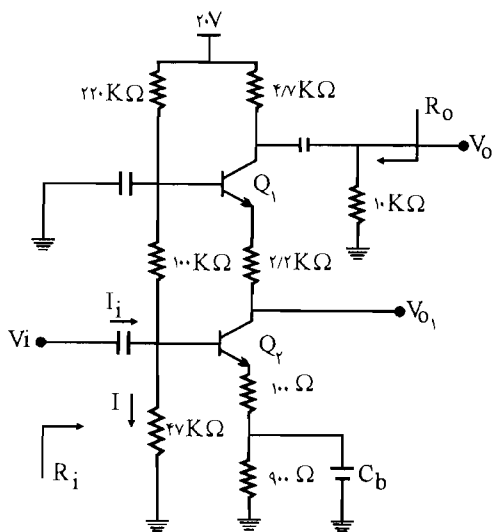
$$\Rightarrow 101 I_{b_T} - 100 I_{b_1} = 2.63 I_T - 0.456 I_T - I_T = 2.61 I_T \quad (A)$$

$$E_1 \text{ در گره KCL: } I_{b_1} + 100 \cdot I_{b_1} = I_T + I_{b_T} \Rightarrow 101 I_{b_1} - I_{b_T} = I_T \quad (B)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 101 I_{b_T} - 100 I_{b_1} = 2.61 I_T \\ -I_{b_T} + 101 I_{b_1} = I_T \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{b_1} = 0.214 I_T \\ I_{b_T} = 2.061 I_T \end{cases}$$

$$\text{از طرفی } R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_{b_1}}{I_1 + I_{b_1}} = \frac{270 \cdot I_1 + 0.95 I_T}{0.456 I_T + 0.214 I_T} = \frac{270 \times 0.456 I_T + 0.95 \times 2.63 I_T}{0.465 I_T + 0.214 I_T}$$

$$R_i = \frac{2082/97}{0.67} = 310.8 \text{ K}\Omega$$



شکل م-۳۶

۳۶ - در مدار تقویت کننده شکل م - ۳۶ ترانزیستورها مشابه و β آنها بزرگ فرض می شود. با فرض $V_{CE(sat)} = 0.2V$ ،

$$h_{re} = h_{oe} \cong 0 \text{ و } V_{BE(ON)} = 0.7V$$

الف) مقادیر جریان I_{CQ} و ولتاژ V_{CEQ} را برای هر یک از ترانزیستورها به دست می آید.

ب) مقادیر کمیت های A_V ، $A_{V_1} = \frac{V_{O_1}}{V_i}$ ،

R_i ، A_1 و R_o را محاسبه کنید؟

☑ (اه حل):

الف) چون β بسیار بزرگ فرض شده است پس جریان بیس ترانزیستورها صفر می شود پس $I_E = I_C$ خواهد شد.

در شاخه مقاومت های $220K\Omega$ و $100K\Omega$ و $47K\Omega$ جریان I را به دست می آوریم:

$$I = \frac{20V}{220 + 100 + 47} = \frac{20}{367} \text{ mA}$$

حلقه $47K\Omega$ ، V_{BE_2} ، 100Ω ، 900Ω

$$\text{KVL: } 47I - (0.1 + 0.9) I_{E_2} = V_{BE_2} \Rightarrow 47I - I_{C_2} = 0.7 \Rightarrow$$

$$I_{C_2} = 47I - 0.7 = 47 \times \frac{20}{367} - 0.7 = 1/86 \text{ mA}$$

از طرفی با توجه به مدار $I_{C_1} = I_{C_2}$

$$\Rightarrow I_{C_2} = I_{C_1} = 1/86 \text{ mA}$$

در حلقه $47K$ و $100K$ و V_{BE} :

$$Q_1: \begin{cases} \text{KVL: } V_{E_1} = (47 + 100)I - V_{BE_1} \\ \Rightarrow 147 \times \frac{20}{367} - 0.7 = V_{E_1} \\ \text{KVL: } V_{C_1} = 20 - 47I_{C_1} = 20 - 47 \times 1/86 = 11/26V \end{cases}$$

$$V_{CE_1} = V_{C_1} - V_{E_1} = 11/26 - 7/3 = 3/96 \text{ V}$$

$$Q_2: \begin{cases} V_{C_2} = V_{E_1} - 2/2 I_{C_1} = 7/3 - 2/2 \times 1/86 = 3/21 \text{ V} \\ V_{E_2} = (100 + 900) \times 10^{-3} I_{C_2} = 1 \times 1/86 = 1/86 \text{ V} \end{cases}$$

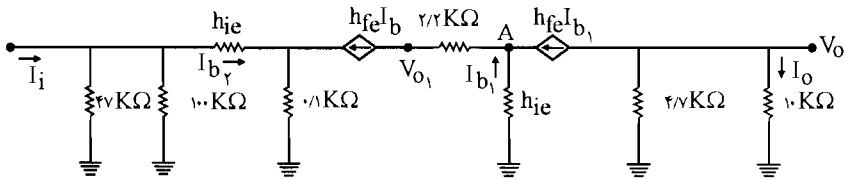
$$\Rightarrow V_{CE_2} = V_{C_2} - V_{E_2} = 3/21 - 1/86 = 1/35 \text{ V}$$

$$I_{C_1} = I_{C_2}$$

(ب)

$$h_{ie_1} = h_{ie_2} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = h_{fe} \times \frac{26}{1/86} = 14 \times 10^{-3} h_{fe} \text{ K}\Omega$$

و چون h_{fe} بسیار بزرگ می باشد پس $h_{ie} \rightarrow \infty$ ، مدار معادل به صورت زیر می باشد:



$$A_1 = \frac{I_O}{I_i} \quad (I) \quad \begin{cases} I_O = -h_{fe} I_{b_1} \frac{4/7}{4/7 + 10} = \frac{-4/7 h_{fe} I_{b_1}}{14/7} \\ I_i = I_{b_2} + \frac{h_{ie} I_{b_2} + (1 + h_{fe}) I_{b_2} \times 0/1}{47 \text{ K} \parallel 100 \text{ K}\Omega} \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_i = I_{b_2} + \frac{(14 \times 10^{-3} h_{fe} + h_{fe} \times 0/1) I_{b_2}}{32 \text{ K}\Omega} \quad \text{به جای } 1 + h_{fe} \text{ مقدار } h_{fe} \text{ را قرار می دهیم.}$$

چون h_{fe} خیلی بزرگ می باشد از I_{b_2} در مقابل کسر بعدی صرف نظر می کنیم \Leftarrow

$$I_i = \frac{0/114 I_{b_2} h_{fe}}{32}$$

$$\text{در گره A: } (1 + h_{fe}) I_{b_1} = h_{fe} I_{b_2} \Rightarrow I_{b_1} \simeq I_{b_2}$$

$$\Rightarrow A_1 = \frac{I_O}{I_i} \quad (I) \Rightarrow A_1 = \frac{\frac{-4/7 h_{fe} I_{b_1}}{14/7}}{\frac{0/114 I_{b_2} h_{fe}}{32}} = \frac{-4/7 I_{b_1} \times h_{fe}}{0/114 I_{b_1} \times h_{fe}} = \frac{14/7}{32}$$

$$\Rightarrow A_T = -19/75$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_{ie} I_{b_T} + (1+h_{fe}) \times 0.1 I_{b_1}}{0.114 I_{b_T} h_{fe}} = \frac{14 \times 10^{-3} h_{fe} + 0.1 h_{fe}}{0.114 h_{fe}} = 32 K\Omega$$

$$A_V = A_T \times \frac{R_L}{R_i} = -19/75 \times \frac{10}{32} = -28/0.5$$

$$V_{O_1} = -2/2 I_{T/2} K\Omega - h_{ie} I_{b_1} = -2/2 \times (1+h_{fe}) I_{b_1} - h_{ie} I_{b_1}$$

$$= -(2/2 h_{fe} + h_{ie}) I_{b_1} = -(2/2 h_{fe} + 14 \times 10^{-3} h_{fe}) I_{b_1}$$

$$= -(2/2 + 14 + 10^{-3}) h_{fe} I_{b_1} = -2/214 h_{fe} I_{b_1}$$

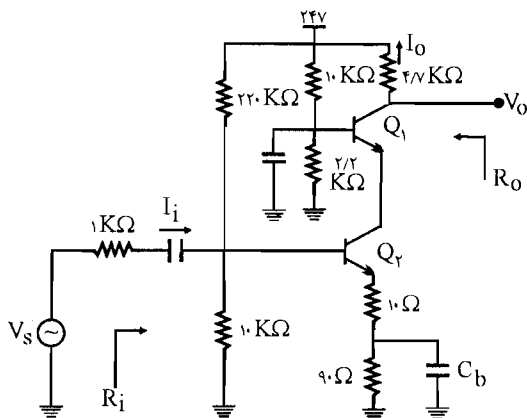
$$A_{V_1} = \frac{V_{O_1}}{V_i} = \frac{-2/214 h_{fe} I_{b_1}}{0.114 h_{fe} I_{b_T}} = -19/42$$

$$R_O = 4/7 \parallel 10 = \frac{4/7 \times 10}{4/7 + 10} = 3/2 K\Omega$$

۳۷- در مدار تقویت کننده شکل م-۳۷، β ترانزیستورها بسیار بزرگ است.

الف) مختصات نقطه کار DC هر یک از ترانزیستورها را به دست آورید.

ب) مقادیر R_i ، A_T ، A_{V_e} ، A_V و R_O را محاسبه کنید؟



شکل م-۳۷

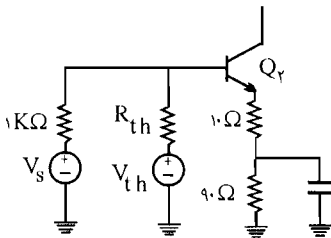
راه حل:

$$Q_2: \begin{cases} R_{th} = 22 \cdot K\Omega \parallel 10 \cdot K\Omega = \frac{22 \cdot 10}{22 + 10} = 9/56 \text{ K}\Omega \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{10 \cdot K\Omega}{22 + 10} = 24 \times \frac{10}{32} = 1/0.43 \text{ V} \end{cases}$$

پس ورودی Q_2 به صورت زیر در می آید:

$$\text{KVL: } V_{th} - V_{BE_1} = R_{th} I_{B_2} + \frac{(10 + 90)}{10^3} I_{E_2} \Rightarrow$$

$I_{C_2} = I_{E_2}$ چون β ترانزیستور بسیار بزرگ است پس $I_{B_2} = 0$ می باشد و



$$\Rightarrow V_{th} - V_{BE_1} = 0/1 I_{C_2} \Rightarrow I_{C_2} = \frac{1/0.43 - 0/1}{0/1} = 3/43 \text{ mA}$$

$$\text{از طرفی: } I_{C_1} = I_{C_2} \Rightarrow I_{C_1} = 3/43 \text{ mA}$$

در حلقه V_{CC} و $10 \cdot K\Omega$ و $2/2 \cdot K\Omega$ داریم:

$$I = \frac{24 \text{ V}}{2/2 + 10} = 1/96 \text{ V mA}$$

در حلقه $4/7 \cdot K\Omega$ و V_{CE_1} و V_{BE_1} و $10 \cdot K\Omega$:

$$\text{KVL: } 10 \cdot I - 4/7 I_{C_1} = V_{CE_1} - V_{BE_1} \Rightarrow 10 \times 1/96 - 4/7 \times 3/43 + 0/1 = V_{CE_1}$$

$$\Rightarrow V_{CE_1} = 4/25 \text{ V}$$

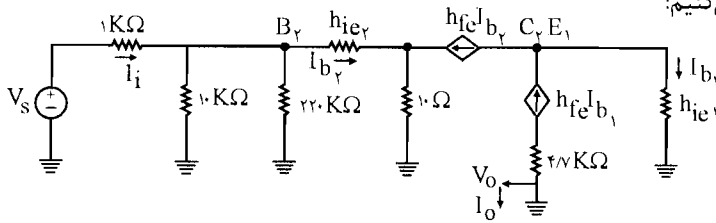
در حلقه V_{CC} و $4/7 \cdot K\Omega$ و V_{CE_2} و V_{CE_1} و $10 \cdot \Omega$ و $90 \cdot \Omega$ داریم:

$$\text{KVL: } 4/7 I_{C_1} + \frac{(10 + 90)}{10^3} I_{C_2} = -V_{CE_1} - V_{CE_2} + 24$$

$$\Rightarrow V_{CE_2} = 24 - 4/25 - 4/7 \times 3/43 - 0/1 \times 3/43 = 3/29 \text{ V}$$

$$\begin{cases} h_{ie_1} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_1}} = \frac{h_{fe} \times 26}{3/43} = 5/58 h_{fe} \Omega = 5/58 \times 10^{-3} h_{fe} \text{ K}\Omega \\ h_{ie_2} = 5/58 h_{fe} \end{cases} \quad (\text{ب})$$

مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-h_{fe} I_{b_1}}{I_{b_T} + \frac{V_{B_T}}{10 \text{ K}\Omega \parallel 220 \text{ K}\Omega}} = \frac{-h_{fe} I_{b_1}}{I_{b_T} + \frac{V_{B_T}}{9/56}} \quad (1)$$

$$V_{B_T} = (1 + h_{fe}) I_{b_T} \times 10 \times 10^{-3} + h_{ie_T} I_{b_T}$$

$$h_{fe} I_{b_T} = (1 + h_{fe}) I_{b_1} \Leftarrow h_{fe} I_{b_1} + I_{b_1} = h_{fe} I_{b_T}$$

در گره C_T و E_T داریم:

$$\Rightarrow h_{fe} I_{b_T} \cong h_{fe} I_{b_1} \Rightarrow I_{b_1} \cong I_{b_T}$$

$$(1): A_I = \frac{-h_{fe} I_{b_1}}{I_{b_1} + \frac{h_{fe} I_{b_1} \times 10^{-2} + h_{fe} \times 7/58 I_{b_1} \times 10^{-2}}{9/56}}$$

و چون h_{fe} بسیار بزرگ است در مخرج A_I از I_{b_1} در مقابل کسر بعدی صرف نظر می‌کنیم:

$$\Rightarrow A_I = \frac{-h_{fe} I_{b_1}}{\frac{h_{fe} I_{b_1} \times 10^{-2} + h_{fe} I_{b_1} \times 7/58 \times 10^{-2}}{9/56}} = \frac{-9/56}{7/58 \times 10^{-2} + 10^{-2}} = -544$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{\frac{V_i}{9/56} + I_{b_T}} = \frac{V_i}{\frac{V_i}{9/56} + I_{b_1}} = \frac{1}{\frac{1}{9/56} + \frac{I_{b_1}}{V_i}}$$

$$\Rightarrow R_i = \frac{1}{\frac{1}{9/56} + \frac{I_{b_1}}{h_{ie_T} I_{b_T} + (1 + h_{fe}) I_{b_T} \times 0/01}} = \frac{1}{\frac{1}{9/56} + \frac{I_{b_1}}{h_{ie_T} I_{b_1} + h_{fe} I_{b_1} \times 0/01}}$$

چون h_{fe} خیلی بزرگ است در مخرج R_i کسر دوم یعنی $\frac{I_{b_1}}{h_{ie_T} I_{b_1} + h_{fe} I_{b_1} \times 0/01}$ برابر صفر

می‌شود

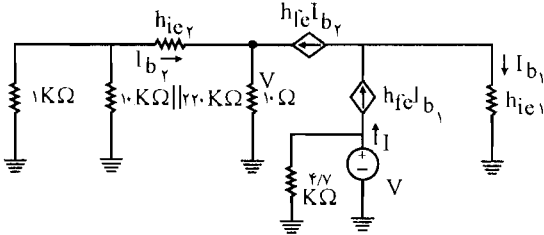
$$\Rightarrow R_i = \frac{1}{\frac{1}{9/56}} = 9/56 \text{ K}\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -544 \times \frac{4/7}{9/56} = -267$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -267 \times \frac{9/56}{9/56 + 1} = -242$$

برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ ورودی را صفر قرار

می‌دهیم.

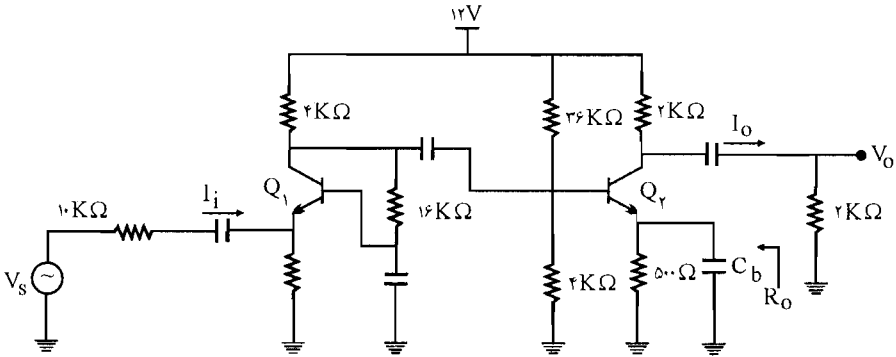


$$R_O = \frac{V}{I} = 4/7 K\Omega$$

۳۸- در مدار تقویت کننده شکل م- ۳۸ با فرض $h_{fe} = 50$ و $h_{oe} = h_{re} \cong 0$ برای هر دو ترانزیستور

(الف) نقطه کار هر یک از ترانزیستورها را تعیین کنید؟

(ب) مقادیر R_i ، A_v ، A_{v_s} ، Δ_1 و R_O را محاسبه کنید؟



شکل م- ۳۸

☑ (ا) حل:

حلقه: V_{CC} ، $4K\Omega$ ، $16K\Omega$ ، V_{BE_1} ، 80Ω

(الف)

$$KVL: 4(I_{C_1} + I_{B_1}) + 16I_{B_1} + 80 \times 10^{-3} I_{E_1} = 12 - V_{BE_1} = 12 - 0.7 = 11/3$$

$$\Rightarrow 4I_{E_1} + \frac{16 \times I_{E_1}}{1 + \beta_1} + 0.08 I_{E_1} = 11/3 \Rightarrow I_{E_1} = \frac{11/3}{4/39}$$

$$\Rightarrow I_{C_1} = \frac{\beta}{1 + \beta} I_{E_1} = \frac{50}{51} \times \frac{11/3}{4/39} = 2/52 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow V_{CE_1, Q} = V_{CC} - (4 + 80 \times 10^{-3}) I_{E_1} = 12 - 4/0.8 \times \frac{11/3}{4/39} = 1/5 V$$

$$Q_2: \begin{cases} R_{th} = 4\text{K}\Omega \parallel 36\text{K}\Omega = 3/6\text{K}\Omega \\ V_{th} = V_{CC} \times \frac{4\text{K}\Omega}{4+36} = 12 \times \frac{4}{40} = 1/2\text{V} \end{cases}$$

$$\text{KVL: } R_{th} I_{B_2} + 500 \times 10^{-3} I_{E_2} = V_{th} - V_{BE_2} = 1/2 - 0.7 = -0.5$$

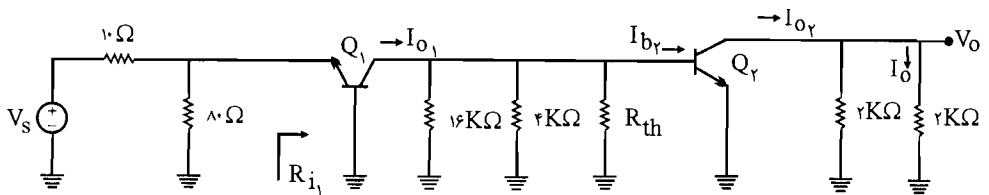
$$\Rightarrow 3/6 I_{B_2} + 0.5 \times 51 I_{B_2} = -0.5 \Rightarrow I_{B_2} = \frac{0.5}{291} \text{ mA} \Rightarrow I_{C_2} = 50 \cdot I_{B_2} = 0.186 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow V_{CE_2 Q} = V_{CC} - 2 I_{C_2} - 0.5 I_{E_2} = 12 - 2/51 I_{C_2} = 12 - 2/51 I_{C_2} = 12 - 2/51 \times 0.186 = 9/85 \text{ V}$$

$$\begin{cases} h_{ie_1} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_1}} = \frac{50 \times 26}{2/52} = 0.52 \text{ K}\Omega \\ h_{ie_2} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_2}} = \frac{50 \times 26}{0.186} = 1/5 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

(ب)

مدار معادل ac به صورت زیر می‌باشد:



$$A_1 = \frac{I_O}{I_i} = \frac{I_O}{I_{O_2}} \times \frac{I_{O_2}}{I_{b_2}} \times \frac{I_{b_2}}{I_{O_1}} \times \frac{I_{O_1}}{I_{e_1}} \times \frac{I_{e_1}}{I_i} \quad (I)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{I_{O_2}}{I_{b_2}} = -h_{fe} = -50, & \frac{I_{O_1}}{I_{e_1}} = \frac{h_{fe}}{1+h_{fe}} = \frac{50}{51} \\ \frac{I_O}{I_{O_2}} = ? & \text{با استفاده از تقسیم جریان } I_O = \frac{I_{O_2} \times 2\text{K}\Omega}{2+2} = \frac{I_{O_2}}{2} \Rightarrow \frac{I_O}{I_{O_2}} = \frac{1}{2} \\ \frac{I_{b_2}}{I_{O_1}} = ? & I_{b_2} = I_{O_1} \times \frac{(16\text{K}\Omega \parallel 4\text{K}\Omega \parallel R_{th})}{(16\text{K}\Omega \parallel 4\text{K}\Omega \parallel R_{th}) + h_{ie_2}} = \frac{I_{O_1} \times 1/69}{1/69 + 1/5} = 0.53 I_{O_1} \\ \Rightarrow \frac{I_{b_2}}{I_{O_1}} = 0.53 \\ \frac{I_{e_1}}{I_i} = ? & \Rightarrow I_{e_1} = \frac{I_i \times (10 \parallel 80)}{(10 \parallel 80) + h_{ie_1}} = I_i \times \frac{9}{9 + 0.52} = 0.94 \end{cases}$$

$$\Rightarrow (I): A_I = \frac{1}{\beta} \times (-\beta) \times 0.53 \times \frac{\beta}{\beta+1} \times 0.94 = -12/2$$

$$R_{i_r} = h_{ie_r} = 1/5 \text{ K}\Omega$$

$$R_{L_r} = 2 \text{ K}\Omega \parallel 2 \text{ K}\Omega = 1 \text{ K}\Omega = R_O$$

$$R_{L_1} = 16 \text{ K}\Omega \parallel 4 \text{ K}\Omega \parallel R_{th} \parallel R_{i_r} = 16 \text{ K}\Omega \parallel 4 \text{ K}\Omega \parallel 3/6 \text{ K}\Omega \parallel 1/5 \text{ K}\Omega = 0.8 \text{ K}\Omega$$

$$R_{i_1} = \frac{h_{ie_1}}{1+h_{fe}} = \frac{0.52}{51} = 10 \Omega$$

$$R_i = 80 \Omega \parallel R_{i_1} = 80 \Omega \parallel 10 \Omega = \frac{80 \times 10}{80 + 10} = 8.89 \text{ K}\Omega$$

$$A_V = \frac{V_O}{V_{e_1}} = \frac{V_O}{V_{b_r}} \times \frac{V_{b_r}}{V_{e_1}} \Rightarrow \begin{cases} \frac{V_O}{V_{b_r}} = \frac{I_{O_r} \times R_{L_r}}{I_{b_r} \times R_{i_r}} = \frac{I_{O_r}}{I_{b_r}} \times \frac{R_{L_r}}{R_{i_r}} = -\beta \times \frac{1 \text{ K}\Omega}{1/5} = -\beta/5 \\ \frac{V_{b_r}}{V_{e_1}} = \frac{I_{O_1} \times (R_{L_1})}{I_{e_1} \times R_{i_1}} = \frac{I_{O_1}}{I_{e_1}} \times \frac{R_{L_1}}{R_{i_1}} = \frac{\beta}{\beta+1} \times \frac{0.8}{10 \times 10^{-3}} = 78/4 \end{cases}$$

$$\Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_{e_1}} = \frac{-\beta}{5} \times 78/4 = -2613$$

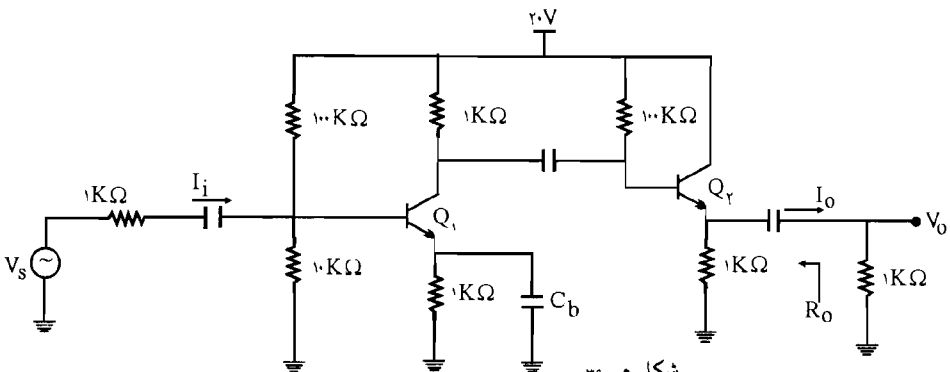
$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -2613 \times \frac{8.89}{8.89 + 10} = -1230$$

۳۹- در تقویت کننده شکل م- ۳۹ ترانزیستورها مشابه اند. با فرض $h_{fe} = 100$

الف) مختصات نقطه کار DC ترانزیستورها را تعیین کنید؟ ب) A_V ، A_I ، R_O و R_i را به دست

آورید؟ ج) حداکثر دامنه نوسان متقارن برای V_{ce_1} و V_{ce_2} را به دست آورده و از آنجا حداکثر دامنه

نوسان متقارن ولتاژ ورودی V_s را محاسبه کنید؟



شکل م-۳۹

راه حل:

الف) در بیس Q_1 تونن را اجرا می‌کنیم:

$$Q_1: \begin{cases} R_{th} = 10 \text{ K}\Omega \parallel 100 \text{ K}\Omega = \frac{10 \times 100}{10 + 100} = 9/1 \text{ K}\Omega \\ V_{th} = 20 \times \frac{10}{10 + 100} = 1/12 \text{ V} \end{cases}$$

حلقه: $R_{th}, V_{BE_1}, 1 \text{ K}\Omega, V_{th}$

$$\text{KVL: } R_{th} I_{B_1} + 1 \text{ K}\Omega \times I_{E_1} = V_{th} - V_{BE_1} \Rightarrow 9/1 I_{B_1} + (1 + \beta) = 1/12 - 0/7 = 1/12$$

$$\Rightarrow I_{B_1} = \frac{1/12}{9/1 + 100} = 0/102 \text{ mA} \Rightarrow I_{C_1} = \beta I_{B_1} = 100 \times 0/102 = 1/02 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow h_{ie_1} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_1}} = \frac{100 \times 26}{1/02} = 2/55 \text{ K}\Omega$$

حلقه: $20 \text{ V}, 1 \text{ K}\Omega, V_{CE_1}, 1 \text{ K}\Omega$

$$\text{KVL: } V_{CE_1} = 20 - 1 \times I_{C_1} - 1 \times I_{E_1} = 20 - 1/02 \times 1 - 1 \times \frac{1 + 100}{100} \times 1/02 = 17/95 \text{ V}$$

$$\Rightarrow Q_1: \begin{cases} I_{C_1} = 1/02 \text{ mA} \\ V_{CE_1} = 17/95 \text{ V} \end{cases}$$

حلقه: $20 \text{ V}, 100 \text{ K}\Omega, V_{BE_2}, 1 \text{ K}\Omega$

$$Q_2: 100 I_{B_2} + 1 \times I_{E_2} = 20 - V_{BE_2} = 20 - 0/7 = 19/3 \Rightarrow$$

$$100 I_{B_2} + (1 + 100) I_{B_2} = 19/3 \Rightarrow I_{B_2} = 0/96 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_{C_2} = \beta I_{B_2} = 100 \times 0/96 = 9/6 \text{ mA}$$

$$h_{ie_2} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_2}} = \frac{100 \times 26}{9/6} = 270/8 \Omega = 0/27 \text{ K}\Omega$$

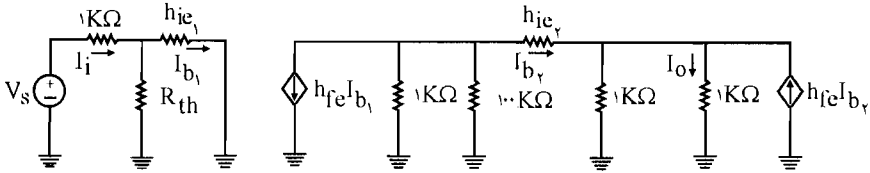
الف)

حلقه: $20 \text{ V}, V_{CE_2}, 1 \text{ K}\Omega$

$$V_{CE_2} = 20 - 1 \times I_{E_2} = 20 - 1 \times \frac{1 + \beta}{\beta} I_{C_2} = 20 - \frac{101}{100} \times 9/6 = 10/304 \text{ V}$$

$$Q_2: \begin{cases} I_{C_2} = 9/6 \text{ mA} \\ V_{CE_2} = 10/304 \text{ V} \end{cases}$$

ب) مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



$$A_1 = \frac{I_O}{I_i} \quad (I) \quad \left\{ \begin{array}{l} I_O = \frac{(h_{fe} I_{b_2} + I_{b_2}) \times 1K\Omega}{1K\Omega + 1K\Omega} \quad \text{با استفاده از تقسیم جریان} \\ = 0.5/0.5 I_{b_2} \\ I_i = I_{b_1} + \frac{h_{ie_1} I_{b_1}}{R_{th}} = I_{b_1} + \frac{2/55 I_{b_1}}{9/1} \end{array} \right.$$

حلقه $(1K\Omega \parallel 100K\Omega)$, $(1K\Omega \parallel 1K\Omega)$, h_{ie_2}

$$KVL: h_{ie_2} I_{b_2} + (I_{b_2} + 100 I_{b_2}) \times (1K\Omega \parallel 100K\Omega) + (I_{b_2} + 100 I_{b_2}) \times (1K\Omega \parallel 1K\Omega) = 0$$

$$\Rightarrow 0.27 I_{b_2} + 0.99 I_{b_2} + 99 I_{b_2} + 0.5/0.5 I_{b_2} = 0 \Rightarrow$$

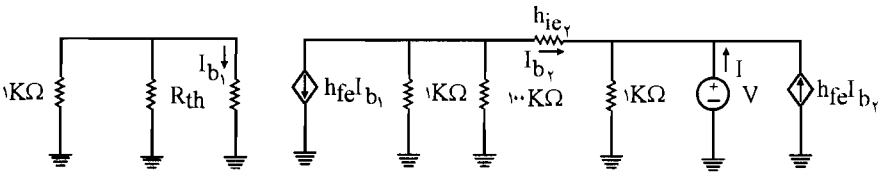
$$99 I_{b_2} + 0.5/0.5 I_{b_2} = 0 \Rightarrow I_{b_2} = -1/99 I_{b_1}$$

$$(I): A_1 = \frac{I_O}{I_i} = \frac{0.5/0.5 I_{b_2}}{I_{b_1} + 0.27 I_{b_1}} = \frac{0.5/0.5 \times (-1/99) I_{b_1}}{1/27 I_{b_1}} = -75/35$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = 9/1 K\Omega \parallel h_{ie_1} = \frac{9/1 \times 2/55}{9/1 + 2/55} = 1/99 K\Omega$$

$$A_V = A_1 \times \frac{R_L}{R_i} = (-75/35) \times \frac{1}{1/99} = -37/86$$

برای محاسبه R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی در دو سر مقاومت $1K\Omega$ قرار می‌دهیم و منبع ورودی را بی‌اثر می‌نماییم. I_{b_1} نیز صفر می‌شود.



$$R_O = \frac{V}{I} \quad , \quad I = \frac{V}{1K\Omega} + \frac{V}{1K\Omega} - (1 + h_{fe}) I_{b_2} = 2V - 101 I_{b_2} \quad (I)$$

حلقه: $(1\text{K}\Omega \parallel 100\text{K}\Omega)$, h_{ic_r} , V

$$\text{KVL: } (1\text{K}\Omega \parallel 100\text{K}\Omega) \times (I_{b_r} + 100 I_{b_r}) + h_{ic_r} I_{b_r} = -V$$

$$\Rightarrow 0.99 I_{b_r} + 0.27 I_{b_r} = -V \Rightarrow I_{b_r} = \frac{-V}{1.26} \quad (\text{II})$$

$$I = 27V - 10.1 \times \frac{-V}{1.26} = 27V + (V \times 80/2)$$

$$= 82/2 V$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{8/22} = 12\Omega$$

(II) رادر (I) جایگذاری می‌کنیم.

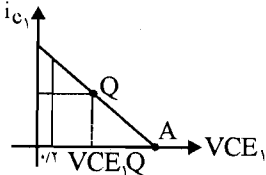
$$Q_1 \text{ ac بار معادله خط بار } V_{ce_1} = -R_{ac} i_{c_1} = -(1\text{K}\Omega \parallel 100\text{K}\Omega \parallel R_{i_r}) i_{c_1} \quad (\text{ج})$$

$$\text{و } R_{i_r} = h_{ic_r} + (1 + h_{fe_r}) R_{L_r} = 0.27 + 10.1 \times (1\text{K}\Omega \parallel 1\text{K}\Omega) = 50.77$$

$$\Rightarrow V_{ce_1} = -(1\text{K}\Omega \parallel 100\text{K}\Omega \parallel 50.77) i_{c_1} = -0.97 i_{c_1}$$

$$\Rightarrow V_{CE_1} - V_{CE_1,Q} = -0.97(i_{C_1} - I_{C_1,Q})$$

$$\text{به دست آوریم } \Rightarrow V_{CE_1} = 17/95V \text{ و } I_{C_1,Q} = 1/0.2$$



$$V_{CE_1}(B) \left| \begin{array}{l} i_{c_1} = 0 \\ i_{c_1} = 0 \end{array} \right. = \begin{array}{l} -0.97(0 - I_{C_1,Q}) + V_{CE_1,Q} \\ = +0.97 \times 1/0.2 + 17/95 = 18/94V \end{array}$$

حداکثر انحراف از سمت ناحیه اشباع

$$V_{ce_1}(\text{max}) = V_{CE_1,Q} - V_{CE}(\text{sat}) = 17/95 - 0.2 = 17/95V$$

حداکثر انحراف از سمت ناحیه قطع

$$V_{ce_1}(\text{max}) = V_{CE_1}(A) - V_{CE_1,Q} = 18/94 - 17/95 = 0.99$$

پس کمترین مقدار مورد قبول می‌باشد یعنی حداکثر انحراف برابر است با: $V_{ce_1}(\text{max}) = 0.99V$

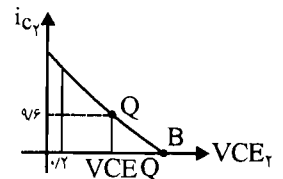
معادله خط بار Q_2

$$V_{ce_r} = -R_{ac} i_{c_r} = -(1\text{K}\Omega \parallel 1\text{K}\Omega) i_{c_r} = -0.5 i_{c_r}$$

$$\Rightarrow V_{CE_r} - V_{CE_r,Q} = -0.5(i_{c_r} - I_{C_r,Q})$$

$$\text{به دست آوریم: } \begin{cases} V_{CE_r,Q} = 10/30.4V \\ I_{C_r,Q} = 9/6V \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{CE_r}(B) \left| \begin{array}{l} i_{c_r} = 0 \\ i_{c_r} = 0 \end{array} \right. = \begin{array}{l} 0.5 \times 9/6 + 10/30.4 = 15/10.4 \end{array}$$



حداکثر انحراف از سمت ناحیه اشباع:

$$V_{ce_1}(\max) = V_{CE_1 Q} - V_{CE}(\text{sat}) = 10/30.4 - 0/2 = 10/10.4 \text{ V}$$

حداکثر انحراف از سمت ناحیه قطع:

$$V_{ce_1}(\max) = V_{CE_1(B)} - V_{CE_1 Q} = 15/10.4 - 10/30.4 = 4/8 \text{ V}$$

پس کمترین مقدار قابل قبول می باشد یعنی حداکثر انحراف Q_1 برابر است با $V_{ce_1}(\max) = 4/8 \text{ V}$

حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ ورودی:

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -37/86 \times \frac{1/99}{1/99 + 1} = -25/2$$

$$\text{از طرفی: } A_{V_s} = A_{V_1} \times A_{V_2}$$

چون Q_2 کلکتور مشترک می باشد پس $A_{V_2} = 1$ می باشد پس $A_{V_s} = A_{V_1}$

$$\Rightarrow A_{V_1} = -25/2 \Rightarrow \text{از طرفی: } A_{V_1} = \frac{V_{ce_1}}{V_s} = -25/2 \Rightarrow$$

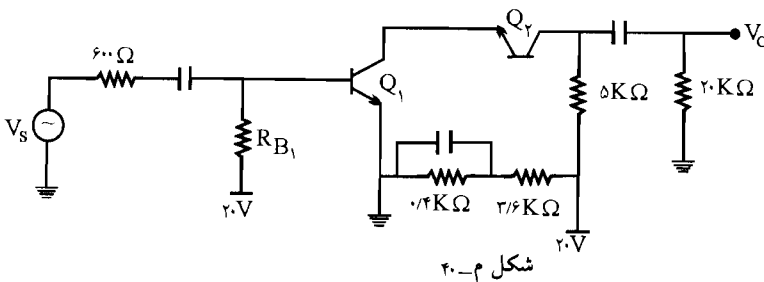
$$-25/2 = \frac{0/99}{V_s} \Rightarrow V_s = -\frac{0/99}{25/2} = -0/0.4 \text{ V}$$

$$\Rightarrow |V_s| = |-0/0.4| = 0/0.4 \text{ V} = 40 \text{ mv}$$

۴۰- در تقویت کننده شکل م- ۴۰ ترانزیستورها مشابه، $h_{re} = 100$ ، $V_{CE}(\text{sat}) = 0/2 \text{ V}$ است.

الف) R_{B_1} را طوری تعیین کنید که دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی Q_2 حداکثر شود.

ب) با فرض $40 \text{ K}\Omega$ h_{oe}^{-1} و $h_{re} = 0$ را محاسبه کنید؟



☑ راه حل:

الف)

V_{BE_1} و 20 V حلقه R_{B_1}

معادله خط بار dc و ac، Q_2 را می یابیم:

$$\text{KVL: } R_{B_1} I_{B_1} = 20 - V_{BE_1} - 20 - 0/7 = 19/3$$

$$\Rightarrow I_{B_1} = \frac{19/3}{R_{B_1}} \Rightarrow I_{C_1} = \frac{19/3}{R_{B_1}} \times \beta = \frac{19/3 \times 100}{R_{B_1}} = \frac{1930}{R_{B_1}}$$

$$Q_2: \begin{cases} R_{th} = 3/6 \text{ K}\Omega \parallel 0/4 \text{ K}\Omega = \frac{3/6 \times 0/4}{3/6 + 0/4} = 0/36 \text{ K}\Omega \\ V_{B_2} = 20 \times \frac{0/4}{0/4 + 3/6} = 2V = V_{th} \end{cases}$$

حلقه: $20V, 5K\Omega, V_{CB_2}, V_{th}, R_{th}$

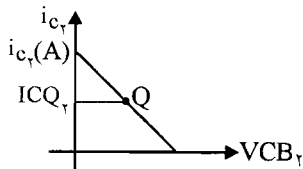
$$\text{KVL: } V_{CB_2} = 20 - V_{th} - 5I_{CQ_2} + R_{th}I_{B_2} \Rightarrow V_{CB_2} = 20 - 2 - 5I_{CQ_2} + R_{th} \times \frac{I_{CQ_2}}{\beta}$$

$$\text{dc بار ac} \Rightarrow V_{CB_2} = 18 - 5I_{CQ_2} + 0/36 \times \frac{I_{CQ_2}}{100} = 18 - 5I_{CQ_2}$$

$$\text{ac بار ac: معادله خط بار ac} \Rightarrow V_{cb_2} = -R_{ac}i_{c_2} = -(5K\Omega \parallel 20K\Omega)i_{c_2} = -4i_{c_2}$$

$$\Rightarrow V_{CB_2} - V_{CB_2} = -4(i_{c_2} - I_{CQ_2})$$

و برای اینکه دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی Q_2 حداکثر شود نقطه کار باید در وسط خط بار ac قرار داشته باشد:



$$i_{c_2}(A) = 2I_{CQ_2}$$

$i_{c_2}(A)$ شدت جریان نقطه تلاقی خط بار ac با محور i_{c_2}

می باشد که با قرار دادن $V_{CB_2} = 0$ در معادله خط بار ac به دست

می آید.

$$0 - V_{CB_2} = -4i_{c_2}(A) + 4I_{CQ_2} \Rightarrow i_{c_2}(A) = \frac{V_{CB_2} + 4I_{CQ_2}}{4}$$

$$\Rightarrow 2I_{CQ_2} = \frac{V_{CB_2} + 4I_{CQ_2}}{4} \Rightarrow V_{CB_2} = 4I_{CQ_2}$$

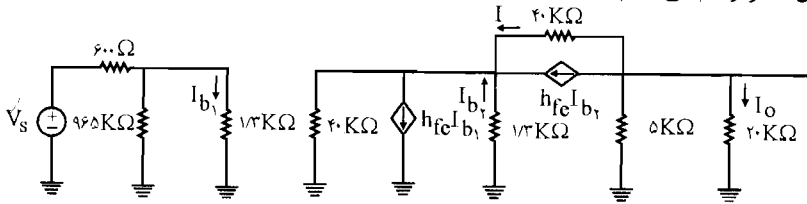
$$\text{dc بار ac: معادله خط بار dc} \Rightarrow V_{CB_2} = 18 - 5I_{CQ_2} \Rightarrow 4I_{CQ_2} = 18 - 5I_{CQ_2} \Rightarrow I_{CQ_2} = 2 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_{CQ_1} \approx I_{CQ_2} = \frac{1930}{R_{B_1}} = 2 \text{ mA} \Rightarrow R_{B_1} = \frac{1930}{2} = 965 \text{ K}\Omega$$

$$h_{ie_1} = h_{ie_2} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{100 \times 26}{2} = 1300 \Omega = 1/3 \text{ K}\Omega$$

(ب)

حال مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



$$A \text{ KCL در نقطه } I: I = -I_{b_1} + h_{fe} I_{b_1} - h_{fe} I_{b_1} - \frac{1/3 I_{b_1}}{40} = -10/0.325 I_{b_1} + 100 I_{b_1} \quad (I)$$

حلقه $40 \text{ K}\Omega$, $1/3 \text{ K}\Omega$, $(20 \text{ K}\Omega \parallel 5 \text{ K}\Omega)$

$$(KVL): 40 I - 1/3 I_{b_1} + (I + 100 I_{b_1}) \times \left(\frac{20 \times 5}{20 + 5} \right) = 0 \Rightarrow 40 I - 1/3 I_{b_1} + 40.4 I_{b_1} = 0$$

$$\Rightarrow 40 I = -39.8/3 I_{b_1} \Rightarrow I = -9/6 I_{b_1}$$

$$(I): -9/6 I_{b_1} = -10/0.325 I_{b_1} + 100 I_{b_1} \Rightarrow I_{b_1} = 0/92 I_{b_1}$$

$$V_O = -(20 \text{ K}\Omega \parallel 5 \text{ K}\Omega) \times (I + 100 I_{b_1}) = -4 \times 9/92 = -363/23 I_{b_1}$$

$$V_s = 0/6 (I_{b_1} + I_{465 \text{ K}\Omega}) + 1/3 I_{b_1} = 0/6 (I_{b_1} + \frac{1/3 I_{b_1}}{465}) + 1/3 I_{b_1}$$

$$= 0/6 I_{b_1} + 1/3 I_{b_1} \cong 1/9 I_{b_1}$$

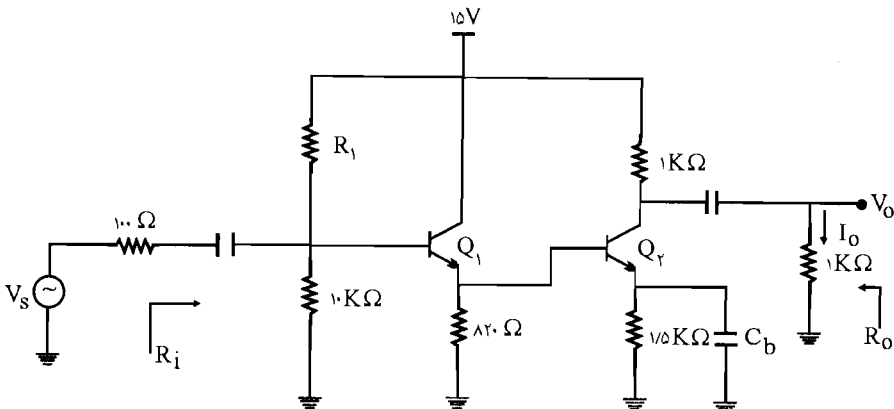
$$\Rightarrow V_s = 1/9 \times 0/92 I_{b_1} = 1/828 I_{b_1}$$

$$\Rightarrow A_{V_s} = \frac{V_O}{V_s} = \frac{-363/23 I_{b_1}}{1/828 I_{b_1}} = -20.8/1$$

۴۱- در مدار شکل م-۴۱ با فرض $40 \text{ K}\Omega = h_{oe}^{-1}$, $h_{re} \cong 0$, $h_{fe} = 50$ و $V_{CE}(\text{sat}) = 0/2 \text{ V}$

الف) مقاومت R_1 را طوری تعیین کنید که دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی حداکثر شود.

ب) با فرض $R_1 = 5/6 \text{ k}\Omega$, مقادیر کمیت‌های A_I , A_V و R_O را به دست آورید؟

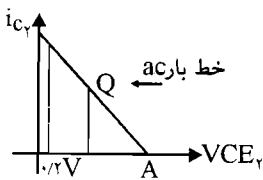


شکل م-۴۱

راه حل: ✓

الف) معادله خط بار ac در Q_1 :

$$\begin{cases} V_{CE_T} = -R_{ac} i_{C_T} = -(1\text{K}\Omega \parallel 1\text{K}\Omega) i_{C_T} = -0.5 i_{C_T} \\ V_{CE_T} - V_{CE_T, Q} = -0.5 (i_{C_T} - I_{C_T, Q}) \end{cases}$$



نقطه A محل تلاقی خط بار ac با محور V_{CE_T} وقتی $i_{C_T} = 0$ است می باشد

$$V_{CE_T}(A) = V_{CE_T, Q} + 0.5 I_{C_T, Q}$$

اگر انحراف متقارن باشد:

$$V_{CE_T, Q} = \frac{V_{CE_T}(A) + V_{CE}(\text{sat})}{2}$$

$$\Rightarrow V_{CE_T, Q} = \frac{V_{CE_T, Q} + 0.5 I_{C_T, Q} + 0.7}{2} \Rightarrow V_{CE_T, Q} = 0.5 I_{C_T, Q} + 0.7 \quad (I)$$

$$\text{KVL: } V_{CE_T, Q} = V_{CC} - 1\text{K}\Omega \times I_{C_T, Q} = 1.5 I_{E_T, Q} \quad (II)$$

(I) را در (II) جایگذاری می کنیم:

$$(II) \Rightarrow 0.5 I_{C_T, Q} + 0.7 = 1.5 - I_{C_T, Q} - 1.5 I_{E_T, Q}$$

$$\Rightarrow 1.4/8 = 1.5 I_{C_T, Q} + 1.5 \times \frac{(1+50)}{50} I_{C_T, Q} \Rightarrow \begin{cases} I_{C_T, Q} = 4/88 \text{ mA} \\ I_{E_T, Q} = -\frac{50}{51} \times 4/88 = 4/98 \text{ mA} \end{cases}$$

حلقه: $820\ \Omega$, V_{BE_T} , $1.5\text{K}\Omega$

$$\text{KVL: } 0.82 (I_{E_1} - I_{B_T}) - 1.5 I_{E_T} = 0.7 \Rightarrow 0.82 I_{E_1} = 1.5 I_{E_T} + 0.82 \frac{I_{C_T}}{\beta} + 0.7$$

$$\Rightarrow 0.82 I_{E_1} = 1.5 \times 4/98 + 0.82 \frac{4/88}{50} + 0.7 = 1.25 \Rightarrow I_{E_1} = 1.0 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_{B_1} = \frac{I_{E_1}}{1+\beta} = \frac{1.0}{51} = 0.196 \text{ mA}, \quad I_{C_1} = 50 I_{B_1} = 9.8 \text{ mA}$$

$$Q_1: \begin{cases} R_{th} = R_1 \parallel 10\text{K}\Omega = \frac{10 R_1}{R_1 + 10} \\ V_{th} = 15 \times \frac{10}{10 + R_1} = \frac{150}{10 + R_1} \end{cases}$$

حلقه: $V_{BE_r}, V_{BE_1}, V_{th}, R_{th}, 1/5 K\Omega$

$$KVL: R_{th} I_{B_1} + 1/5 I_{E_r} = V_{th} - V_{BE_1} - V_{BE_r} = V_{th} - 1/4$$

$$\Rightarrow \frac{10 R_1}{10 + R_1} \times 0.19V + 1/5 \times 4/98 = V_{th} - 1/4 = 15 \times \frac{10}{10 + R_1} - 1/4$$

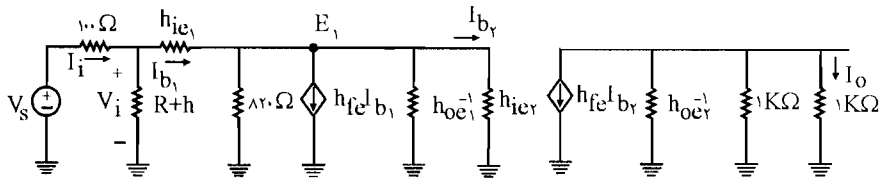
$$\Rightarrow 1/9V R_1 + 74/7 + 1/4 R_1 = 150 - 14 - 1/4 R_1$$

$$\Rightarrow 61/3 = 10/4 R_1 \Rightarrow R_1 = 5/65 K\Omega$$

(ب)

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{ie_1} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_1}} = \frac{50 \times 26}{9/8} = 133 \Omega = 0.133 K\Omega \\ h_{ie_r} = \frac{h_{fe} V_T}{I_{C_r}} = \frac{50 \times 26}{4/88} = 266 \Omega = 0.266 K\Omega \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} R_{th} = \frac{10 \times 5/6}{10 + 5/6} = 3/6 K\Omega \\ V_{th} = \frac{150}{10 + 5/6} = 9/62 V \end{array} \right.$$

مدار معادل ac را با فرض $R_1 = 5/6$ رسم می‌کنیم.



$$I_o = -h_{fe} I_{b_r} \times \frac{1}{\frac{1}{40} + \frac{1}{1} + \frac{1}{1}} = -\frac{2000}{81} I_{b_r}$$

$$\text{از طرفی: } I_i = I_{b_1} + I_{R_{th}} = I_{b_1} + \frac{V_i}{3/6} \quad (I)$$

$$E_1 \text{ گره: } I_{b_r} = (1 + h_{fe}) I_{b_1} \times \frac{1}{\frac{1}{40 \times 10^3} + \frac{1}{820} + \frac{1}{266}}$$

$$V_i = h_{ie_1} I_{b_1} + h_{ie_r} I_{b_r} = 0.133 I_{b_1} + 0.266 \times 38/32 I_{b_1} = 10/33 I_{b_1}$$

$$(I): I_i = I_{b_1} + \frac{V_i}{R_{th}} = I_{b_1} + \frac{10/33 I_{b_1}}{3/6} = 3/87 I_{b_1}$$

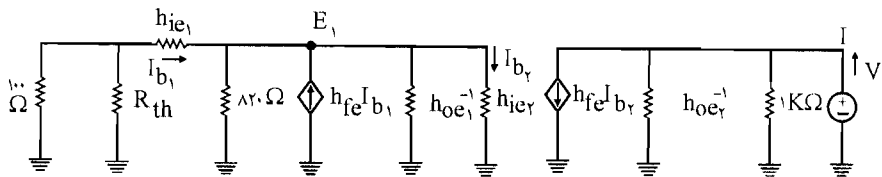
$$\Rightarrow R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{10/33 I_{b1}}{3/87 I_{b1}} = 2/67 K\Omega$$

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-\frac{200}{81} \times 38/32 I_{b1}}{3/87 I_{b1}} = -244/5$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -244/5 \times \frac{1 K\Omega}{2/67} = -91/6$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -91/6 \times \frac{2/67}{2/67 + 0/1} = -88/3$$

برای محاسبه R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ولتاژ V_s را بی‌اثر می‌کنیم.



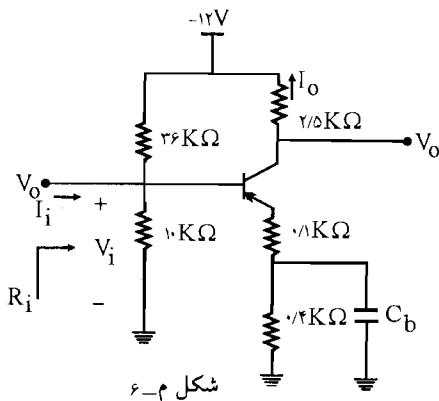
$$R_O = \frac{V}{I} \quad \text{و} \quad I = h_{fe} I_{b2} + \frac{V}{r_o} + \frac{V}{1} + \frac{V}{1} = 50 I_{b2} + \frac{V}{r_o} + 2V$$

$I_{b2} = 0$ چون مدار سمت چپ منبع مستقل نداشته و نیز منبع وابسته به سمت راست ندارد.

$$\Rightarrow I = 50 \times 0 + \frac{V}{r_o} + 2V = V \left(\frac{1}{r_o} + 2 \right) \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{r_o} + 2} = \frac{r_o}{1 + 80}$$

$$\Rightarrow R_O = 0/494 K\Omega$$

۴۲- مسائل ۶ و ۷ را با استفاده از مدل هیبرید π حل کنید؟



شکل ۶-۶

راه حل:

$$R_i, A_i, A_v = ?$$

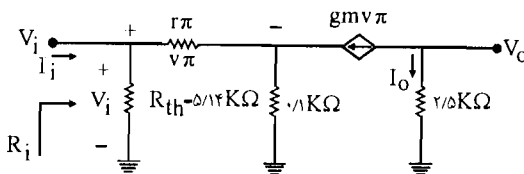
$$\begin{cases} h_{fe} = 100 \\ h_{re} = h_{oc} = 0 \end{cases}$$

در مسئله ۶، IC را به دست آورديم:

$$I_{CQ} = 1/8 \text{ mA}$$

$$\begin{cases} g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1/8}{26} = 69/2 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \\ r_\pi = \frac{h_{fe}}{g_m} = \frac{100}{69/2} = 1/44 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

مدار معادل به صورت زیر می‌شود:



$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{-g_m V_\pi}{I_{R_{th}} + I_{r_\pi}} = \frac{-69/2 V_\pi}{\frac{V_\pi}{1/44} + \frac{V_\pi + 0/1(69/2 V_\pi + \frac{V_\pi}{1/44})}{5/14}} \Rightarrow$$

$$A_i = \frac{-69/2 V_\pi}{0/694 V_\pi + \frac{1/44 V_\pi}{5/14}} = -30/8$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_\pi + 0/1(g_m V_\pi + \frac{V_\pi}{V_\pi})}{I_i}$$

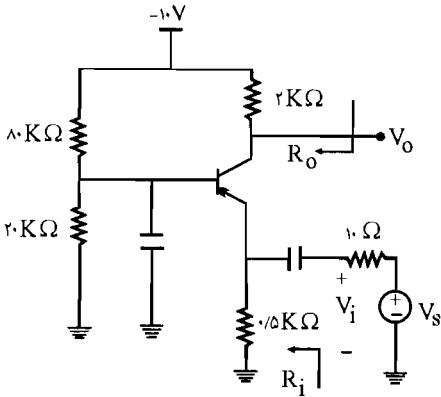
$$\Rightarrow R_i = \frac{V_\pi + 0/1(69/2 V_\pi + \frac{V_\pi}{1/44})}{2/25 V_\pi} = \frac{1/44 V_\pi}{2/25 V_\pi} = 3/55 \text{ K}\Omega$$

$$A_v = A_i \times \frac{R_L}{R_i} = -30/8 \times \frac{2/5}{3/55} = -21/7$$

مسئله (۷)

$$h_{fe} = 100$$

$$A_v, A_{v_s}, R_i, A_i, R_o = ?$$

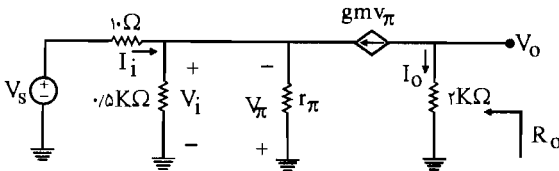


در مسئله (۷)، I_{CQ} را به دست آوردیم: $I_{CQ} = 1/95 \text{ mA}$

$$\begin{cases} R_{th} = \frac{20 \times 20}{20 + 20} = 10 \\ V_{th} = -10 \times \frac{20}{20 + 20} = -5 \text{ V} \end{cases}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1/95}{26} = 3.9 \text{ mA/V}, \quad r_{\pi} = \frac{h_{fe}}{g_m} = \frac{100}{3.9} = 25.6 \text{ k}\Omega$$

مدار معادل به صورت زیر در می آید:



$$A_1 = \frac{I_O}{I_i} = \frac{-g_m V_{\pi}}{\frac{V_i}{50} - \frac{V_{\pi}}{r_{\pi}} - g_m V_{\pi}} = \frac{-3.9 V_{\pi}}{\frac{V_i}{50} - \frac{V_{\pi}}{25.6} - 3.9 V_{\pi}} = \frac{3.9}{\frac{1}{50} + \frac{1}{25.6} + 3.9} = 0.96$$

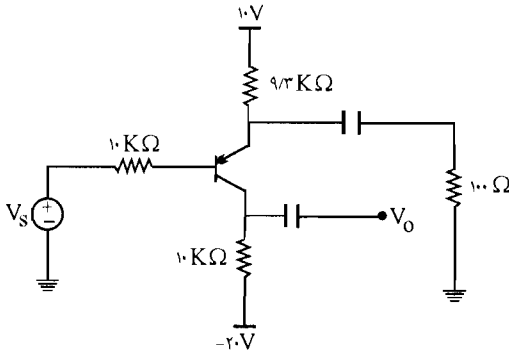
$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{-V_{\pi}}{\frac{V_i}{50} - \frac{V_{\pi}}{r_{\pi}} - g_m V_{\pi}} = \frac{1}{\frac{1}{50} + \frac{1}{25.6} + 3.9} = 13 \Omega$$

$$A_v = A_1 \times \frac{R_L}{R_i} = 0.96 \times \frac{2}{13} = 147/V$$

$$A_{v_s} = A_v \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = 147/V \times \frac{13}{13 + 10} = 83/5$$

$$R_o = R_L = 2 \text{ k}\Omega$$

۴۳- مسأله ۱۹ را با فرض $V_A = 100$ و با استفاده از مدل هیبرید π حل کنید؟



$$h_{fe} = 100 \quad A_{V_s} = ?$$

راه حل:

در مسئله ۱۹، I_{CQ} را به دست آوریم:

$$I_{CQ} = 0.98 \text{ mA}$$

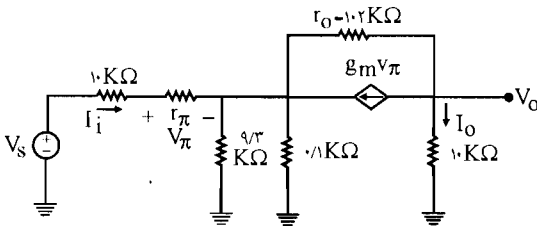
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{0.98}{26} = 3.77 \times 10^{-2} \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

$$r_{\pi} = \frac{h_{fe}}{g_m} = \frac{100 \cdot \Omega}{3.77 \times 10^{-2}} = 2652 \Omega = 2.652 \text{ K}\Omega$$

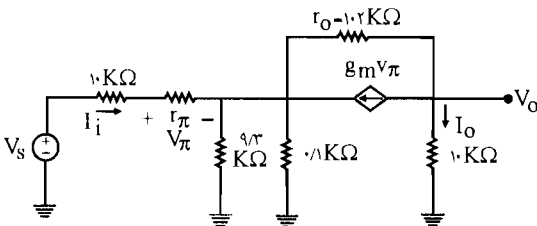
$$r_o = \frac{V_A}{I_C} = \frac{100}{0.98} = 102 \text{ K}\Omega$$

رابطه (۶-۹۹)

مدار معادل ac به صورت زیر می‌باشد:



با تبدیل منبع جریان $g_m v_{\pi}$ به منبع ولتاژ داریم:



$$V_{\pi} = r_{\pi} \times I_i = 2/652 I_i$$

$$A_I = \frac{I_O}{I_i}$$

حلقه: $10 \text{ K}\Omega$, $0.989 \text{ K}\Omega$, r_O , $g_m V_{\pi} r_O$

$$\text{KVL: } 0.98(I_i - I_O) - (10.2 + 10) I_O = g_m V_{\pi} \times r_O$$

$$0.989(I_i - I_O) - 112 I_O = 3/77 \times 10^{-2} \times 10.2 \times 2/652 I_i \times 10^2$$

$$0.989 I_i - 0.989 I_O - 112 I_O = 10/2 \times 10^{-2} I_i$$

$$\Rightarrow 10/2 \times 10^{-2} I_i = 112/0.989 I_O \Rightarrow A_I = \frac{I_O}{I_i} = -91$$

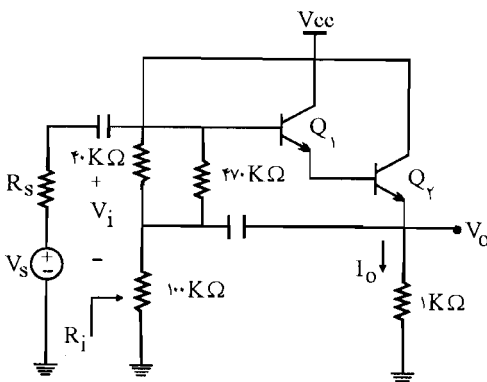
$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{0.989(I_i - I_O)}{I_i} = 0.989 - 0.989 A_I = 0.989 - 0.989 \times (-91)$$

$$= 9/0.99 \text{ K}\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = -91 \times \frac{10 \text{ K}\Omega}{9/0.99 \text{ K}\Omega} = -100$$

$$A_{V_s} = A_V \times \frac{R_i}{R_i + R_s} = -100 \times \frac{9/0.99}{9/0.99 + 10} = -47/6$$

۴۴- مسأله ۳۲ را با فرض $I_{C_1} = I_{C_2} = 7/5 \text{ mA}$ و $\beta = 200$ و با استفاده از مدل هیبرید حل کنید.



$$h_{oe}^{-1} = 40 \text{ K}\Omega$$

$$h_{ie} = 1 \text{ K}\Omega$$

$$h_{fe} = 200$$

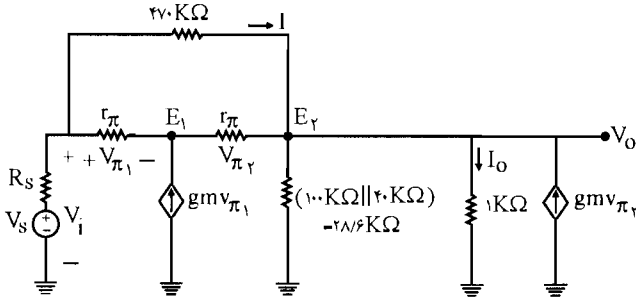
$$A_I, A_V, R_i, R_O$$

راه حل:

$$I_{C_1} = I_{C_2} \Rightarrow g_{m_1} = g_{m_2} = g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{7/5 \text{ mA}}{26} = 288/5 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$r_{\pi_1} = r_{\pi_2} = r_{\pi} = \frac{h_{fe}}{g_m} = \frac{200}{288/5} = 0/69 \text{ K}\Omega$$

مدار معادل را رسم می‌کنیم:



با استفاده از تقسیم جریان

$$A_1 = \frac{I_O}{I_i} \Rightarrow \begin{cases} (I + g_m V_{\pi_2} + \frac{V_{\pi_2}}{r_{\pi_2}}) \times \frac{200/6}{200/6 + 1} = I_O \\ I + \frac{V_{\pi_1}}{r_{\pi_1}} = I_i \end{cases} \quad (I)$$

حلقه: $V_{\pi_1}, V_{\pi_2}, 200 \text{ K}\Omega \Rightarrow \text{KVL}: V_{\pi_1} + V_{\pi_2} = 470 \cdot I \quad (II)$

(E_1 گر): $\text{KCL}: \frac{V_{\pi_1}}{r_{\pi_1}} + g_m V_{\pi_1} = \frac{V_{\pi_2}}{r_{\pi_2}} \Rightarrow \frac{V_{\pi_1}}{0.69} + 288/5 V_{\pi_1} = \frac{V_{\pi_2}}{0.69}$

$$\Rightarrow V_{\pi_2} = 200/1 V_{\pi_1} \quad (III)$$

با جایگذاری (III) در رابطه (II) داریم:

$$V_{\pi_1} + 200/1 V_{\pi_1} = 470 \cdot I \Rightarrow I = \frac{200/1}{470} V_{\pi_1} = 0.43 V_{\pi_1}$$

این رابطه به دست آمده را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

$$(I): A_1 = \frac{(I + 288/5 V_{\pi_2} + \frac{V_{\pi_2}}{0.69}) \times \frac{200/6}{200/6 + 1}}{(I + \frac{V_{\pi_1}}{0.69})}$$

$$A_1 = \frac{(0.43 V_{\pi_1} + 288/5 \times 200/1 V_{\pi_1} + \frac{200/1}{0.69} V_{\pi_1}) \times 0.97}{(0.43 V_{\pi_1} + \frac{V_{\pi_1}}{0.69})} = 1/887 \pi_1$$

$$\Rightarrow A_1 = 29947$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{470 \cdot I + 1 \times I_O}{I_i} = 470 \cdot \frac{I}{I_i} + A_1 = 470 \times \frac{0.43 V_{\pi_1}}{1/887 V_{\pi_1}} = 29947 + 107/5 =$$

$$= 300.54 / 5 \text{ K}\Omega \approx 3 \text{ M}\Omega$$

$$A_V = A_1 \times \frac{R_L}{R_i} = 29947 \times \frac{1}{300.54 / 5} = 0.996$$

برای محاسبه R_O منبع ورودی را صفر می‌کنیم و یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم:

$$R_O = \frac{V}{I}$$

$$I = \frac{V}{1 \text{ K}\Omega} + \frac{V}{211.6 \text{ K}\Omega} - 288 / 5 V_{\pi_2} - I_{270 \text{ K}\Omega} - \frac{V_{\pi_2}}{r_{\pi}}$$

قبلاً به دست آورده بودیم: $I = 0.437 V_{\pi_1}$ و $V_{\pi_2} = 200 / 1 V_{\pi_1}$ با جایگذاری این روابط در رابطه بالا داریم:

$$I = 1 / 0.35 V - 288 / 5 \times 200 / 1 V_{\pi_1} - 0.437 V_{\pi_1} - \frac{200 / 1 V_{\pi_1}}{0.69}$$

$$\Rightarrow I = 1 / 0.35 V - 580.19 / 37 \pi_1 \quad (A)$$

حلقه: $V_{\pi_1}, V_{\pi_2}, R_s, V$

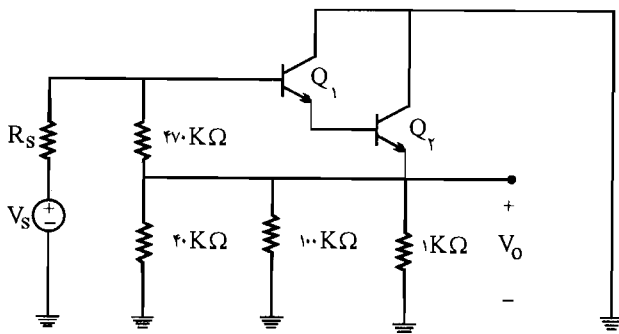
$$\text{KVL: } V = -V_{\pi_1} - V_{\pi_2} - R_s \left(I + \frac{V_{\pi_1}}{0.69} \right) = -V_{\pi_1} - 200 / 1 V_{\pi_1} - R_s \left(0.437 V_{\pi_1} + \frac{V_{\pi_1}}{0.69} \right)$$

$$\Rightarrow V = -V_{\pi_1} (200 / 1 + 1 / 88 R_s) \Rightarrow V_{\pi_1} = \frac{-V}{200 / 1 + 1 / 88 R_s}$$

$$\stackrel{(A)}{\Rightarrow} I = 1 / 0.35 V - 580.19 / 3 \times \frac{-V}{200 / 1 + 1 / 88 R_s}$$

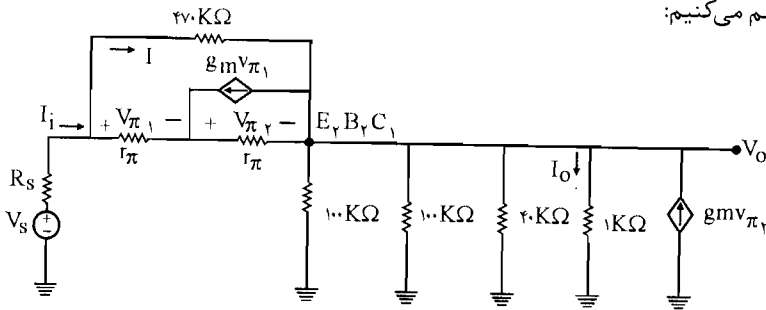
$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{200 / 1 + 1 / 88 R_s}{58229 / 3 + 1 / 94 R_s}$$

مدار دوم:



$$g_m = 288 / 5, \quad r_{\pi} = 0.69 \text{ K}\Omega$$

مدار معادل ac را رسم می‌کنیم:



با استفاده از تقسیم جریان:

$$A_I = \frac{I_O}{I_i} \Rightarrow \begin{cases} I_O = (288/5 V_{\pi_2} - 288/5 V_{\pi_1} + I + \frac{V_{\pi_2}}{1\pi}) \times \frac{100\text{K}\Omega \parallel 100\text{K}\Omega \parallel 40\text{K}\Omega}{(100\text{K}\Omega \parallel 100\text{K}\Omega \parallel 40\text{K}\Omega) + 1} \\ I_i = I + \frac{V_{\pi_1}}{1\pi} \end{cases}$$

حلقه: $V_{\pi_1}, V_{\pi_2}, 470\text{K}\Omega$

$$\text{KVL: } 470 \cdot I = V_{\pi_1} + V_{\pi_2} \quad (\text{I})$$

$$\text{(KCL: } E_1 \text{ گره)} \frac{V_{\pi_1}}{1\pi} + 288/5 V_{\pi_1} = \frac{V_{\pi_2}}{1\pi} \Rightarrow V_{\pi_2} = 200/1 V_{\pi_1} \quad (\text{II})$$

با جایگذاری رابطه (II) در رابطه (I) داریم:

$$470 \cdot I = V_{\pi_1} + 200/1 V_{\pi_1} = 201 V_{\pi_1} \Rightarrow I = 0/43 V_{\pi_1}$$

با جایگذاری در رابطه I_O داریم:

$$I_O = (288/5 \times 100/1 V_{\pi_1} - 288/5 V_{\pi_1} + 0/43 V_{\pi_1} + \frac{200/1 V_{\pi_1}}{0/69}) \times \frac{22/22}{22/22 + 1}$$

$$\Rightarrow I_O = 55244/5 V_{\pi_1}$$

$$I_i = 0/43 V_{\pi_1} + \frac{V_{\pi_1}}{0/69} = 1/88 V_{\pi_1}$$

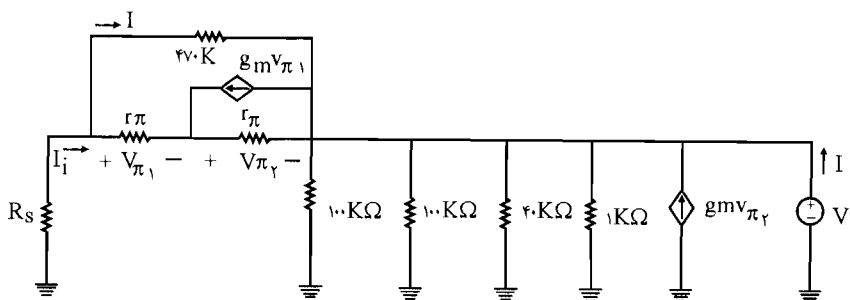
$$\Rightarrow A_I = \frac{I_O}{I_i} = \frac{55244/5 V_{\pi_1}}{1/88 V_{\pi_1}} = 29385/4$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{470 \cdot I + 1 \times I_O}{I_i} = 470 \cdot \frac{I}{I_i} + A_I = 470 \times \frac{0/43 V_{\pi_1}}{1/88 V_{\pi_1}} + 29385/4$$

$$\Rightarrow R_i = 29492/9 \text{ K}\Omega$$

$$A_V = A_I \times \frac{R_L}{R_i} = 29385/4 \times \frac{1}{29492/9} = 0/996$$

برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم و منبع ورودی را بی‌اثر می‌کنیم.



$$R_O = \frac{V}{I}, \quad I = \frac{V}{1} + \frac{V}{40} + \frac{V}{100} + \frac{V}{100} - g_m V_{\pi_1} + g_m V_{\pi_1} - I_{470K\Omega} - \frac{V_{\pi_1}}{r_{\pi}}$$

$$\Rightarrow I = 1/0.45V - 288/5 \times 200/1V_{\pi_1} + 288/5V_{\pi_1} - 0/43V_{\pi_1} - 1/45 \times 200/1 \times V_{\pi_1}$$

$$\Rightarrow I = 1/0.45 - 57731V_{\pi_1}$$

حلقه: V , $470K\Omega$, R_s

$$V = -470I - R_s \left(I_{470} + \frac{V_{\pi_1}}{r_{\pi}} \right) = -470 \times 0/43V_{\pi_1} - R_s \left(0/43V_{\pi_1} + \frac{1}{0.69}V_{\pi_1} \right)$$

$$\Rightarrow V = - \left(202/1 + 1/88R_s \right) V_{\pi_1}$$

$$\Rightarrow V_{\pi_1} = - \frac{V}{202/1 + 1/88R_s}$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{V}{1/0.45V - 57731V_{\pi_1}} = \frac{V}{1/0.45V - 57731 \times \frac{-V}{202/1 + 1/88R_s}}$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{202/1 + 1/88R_s}{57942/2 + 1/96R_s}$$

فصل ۷

ترانزیستورهای اثر میدان

۱- برای یک JFET با $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$ و $V_P = -2 \text{ V}$ که به آن یک V_{DS} کوچک اعمال شده است. مقدار r_{DS} را به ازای مقادیر $V_{GS} = 0$ و $V_{GS} = -1$ ولت را به دست آورید. طبق رابطه (۷-۳) کتاب داریم:

☑ (اه هل):

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

$$V_{GS} = 0 \Rightarrow r_{DS} = \left[\frac{2 \times 10}{-2} \left(\frac{0}{-2} - 1 \right) \right]^{-1} = \frac{1}{10} \text{ K}\Omega \Rightarrow r_{DS} = 100 \Omega$$

$$V_{GS} = -1 \text{ V} \Rightarrow r_{DS} = \left[\frac{2 \times 10}{-2} \left(\frac{-1}{-2} - 1 \right) \right]^{-1} = \frac{1}{5} \text{ K}\Omega \Rightarrow r_{DS} = 200 \Omega$$

۲- یک JFET را با $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$ و $V_P = -2 \text{ V}$ در نظر بگیرید. به ازای $V_{GS} = -1/5 \text{ V}$ حداقل مقدار V_{DS} که به ازای آن JFET در ناحیه اشباع کار می کند چقدر است؟

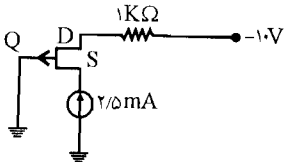
☑ (اه هل):

$$\text{در ناحیه اشباع: } V_{GD} \leq - |V_P| \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \leq - |V_P|$$

$$\Rightarrow -1/5 - V_{DS} \leq -2 \Rightarrow V_{DS} \geq 0/5$$

پس حداقل مقدار V_{DS} برابر $0/5 \text{ V}$ می باشد.

۳- یک JFET کانال P با $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$ و $V_P = -3 \text{ V}$ با گیت زمین شده در حال کار است. درین با یک مقاومت $1 \text{ K}\Omega$ به ولتاژ 10 V - وصل شده و سورس توسط یک منبع جریان ثابت $2/5 \text{ mA}$ تغذیه می شود. ولتاژهای V_{GS} و V_{DS} و V_{GD} را به دست آورید.



☑ (راه حل):

$$I_S = I_D - 2/5 \text{ mA}$$

$$\text{KVL: } -(-10) - 1 \text{ K}\Omega \times I_D - V_{GD} = 0 \rightarrow V_{GD} = 10 - 1 \times 2/5 = 7/5 \text{ V}$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{|V_P|}\right)^2 \Rightarrow 2/5 = 10 \left(1 - \frac{V_{GS}}{3}\right)^2 \Rightarrow \frac{1}{4} = \left(1 - \frac{V_{GS}}{3}\right)^2$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 1 - \frac{V_{GS}}{3} = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{V_{GS}}{3} = \frac{1}{2} \Rightarrow V_{GS} = 1/5 \text{ V} \\ 1 - \frac{V_{GS}}{3} = -\frac{1}{2} \Rightarrow \frac{V_{GS}}{3} = \frac{3}{2} \Rightarrow V_{GS} = 4/5 \text{ V} \end{cases}$$

$V_{GS} = 4/5 \text{ V}$ قابل قبول نمی باشد چون در این صورت $V_{GS} > V_P$ می شود که شرط نادرستی می باشد

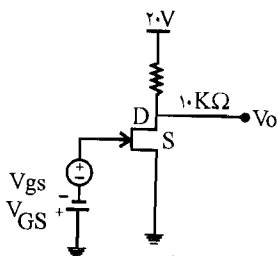
$$V_{GS} = 1/5 \text{ V}$$

ولی V_{GS} برابر $1/5 \text{ V}$ قابل قبول است.

$$V_{GS} = V_{GD} + V_{DS} \Rightarrow$$

$$1/5 \text{ V} = V_{DS} + (+7/5) \Rightarrow V_{DS} = 1/5 - 7/5 = -6 \text{ V}$$

۴- در مدار شکل م- ۴، JFET دارای $I_{DSS} = 16 \text{ mA}$ و $V_P = -4 \text{ V}$ است. برای $V_{GS} = -3 \text{ V}$



شکل م- ۴

مقدار g_m و A_v را به دست آورید. برای یک سیگنال ورودی

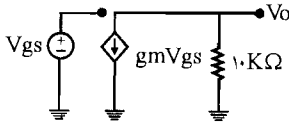
$0/1 \text{ V}$ (موج مربعی) دامنه سیگنال خروجی در درین چقدر

است؟ کمترین ولتاژ درین - سورس ممکن چقدر است؟

راه حل: ✓

$$g_m = \frac{-2 I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) = \frac{-2 \times 16}{-4} \left(1 - \frac{-3}{-4}\right) = 8 \left(\frac{1}{4}\right) = 2 \frac{mA}{V}$$

مدار معادل:



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

$$V_O = -g_m V_{gs} \times 10 \text{ K}\Omega = -2 \times V_{gs} \times 10 = -20 V_{gs}$$

$$V_i = V_{gs}$$

$$\Rightarrow A_V = \frac{-20 V_{gs}}{V_{gs}} = -20$$

$$\text{به ازای } V_{gs} = 0/1 \text{ V} \Rightarrow V_O = -20 V_{gs} = -20 \times 0/1 = -2 \text{ V}$$

کمترین ولتاژ درین - سورس:

$$N\text{-کانال: } V_{GS} < -|V_P| \Rightarrow V_{GD} < -4 \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} < -4 \Rightarrow$$

$$V_{DS} > V_{GS} + 4 \Rightarrow V_{DS} > V_{gs} + V_{GS} + 4 \Rightarrow V_{DS} > V_{gs} + (-3) + 4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{DS} > V_{gs} + 1$$

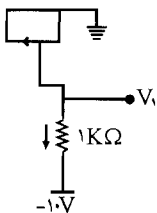
کمترین مقدار ولتاژ V_{DS} به ازای V_{gs} برابر صفر ولت به دست می آید.

$$V_{DS}(\min) = 0 + 1 = 1 \text{ V}$$

۵- در مدارهای شکل م- ۵ مقادیر ولتاژها و جریان های نشان داده شده را به دست آورید. برای کلیه

JFET ها $I_{DSS} = 4 \text{ mA}$ و $|V_P| = 2 \text{ V}$ است.

راه حل: ✓



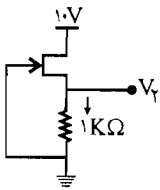
در این مدار گیت و سورس به هم متصل می باشند پس $V_{GS} = 0$

می باشد در نتیجه طبق رابطه I_D داریم:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = I_{DSS} = 4 \text{ mA}$$

و چون JFET از نوع کانال P می باشد پس جهت جریان در جهت نشان داده شده می باشد. (از سورس به سمت درین)

$$\text{KVL: } V_1 - 1 \times I_D - (-10) = 0 \Rightarrow V_1 - 4 + 10 = 0 \Rightarrow V_1 = -6V$$



$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - V_D = -V_D$$

چون JFET از نوع کانال N می باشد پس $V_P < 0$ می باشد یعنی $V_P = -2V$ و جهت جریان در جهت نشان داده شده می باشد.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = 4 \left(1 - \frac{(-V_D)}{-2}\right)^2 \approx 4 \left(1 - \frac{V_D}{2}\right)^2 \quad (I)$$

$$\text{KVL: } V_D = 1 \times I_D = I_D \quad (II)$$

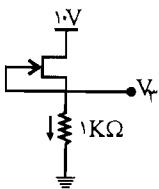
با جایگذاری (I) در (II) داریم:

$$V_D = 4 \left(1 - \frac{V_D}{2}\right)^2 \Rightarrow V_D = (2 - V_D)^2 = 4 + V_D^2 - 4V_D \Rightarrow V_D^2 - 5V_D + 4 = 0$$

با حل این معادله درجه (2) داریم:

$$\begin{cases} V_D = 1V \\ V_D = 4V \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_D = 1V \Rightarrow V_{GS} = -V_D = -1 > V_P \Rightarrow \text{قابل قبول} \\ V_D = 4V \Rightarrow V_{GS} = -V_D = -4 < V_P \Rightarrow \text{قابل قبول نمی باشد} \end{cases} \Rightarrow V_D = 1V$$



$$V_D = 1 \times I_D = I_D$$

از طرفی در این مدار گیت و سورس به هم متصل می باشند \Leftarrow

$$V_{GS} = 0 \Rightarrow$$

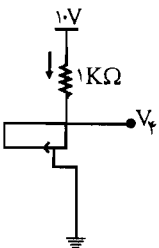
$$I_D = I_{DSS} = 4 \text{ mA} \Rightarrow V_D = I_D = 4V$$

در این مدار نیز گیت و سورس به هم متصل می باشند پس:

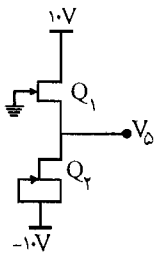
$$V_{GS} = 0$$

$$\Rightarrow I_D = I_{DSS} = 4 \text{ mA}$$

$$\text{از طرفی: } V_D = 10 - 1 \times I_D = 10 - 1 \times 4 = 6V$$



در مدار مقابل: در Q_2 گیت و سورس به هم متصل می باشند پس: $V_{GS_2} = 0$ می باشد پس:



از طرفی این جریان $I_{D_r} = I_{DSS} = 4 \text{ mA}$ همان جریان Q_1 می باشد

یعنی $I_{D_1} = I_{D_r} = I_{DSS}$ پس $V_{GS_1} = 0$ می باشد

$$V_{GS_1} = 0 \Rightarrow V_{G_1} - V_{S_1} = 0 \Rightarrow 0 - V_{S_1} = 0 \Rightarrow$$

$$-V_{S_1} = 0 \Rightarrow V_{S_1} = V_{\delta} = 0 \Rightarrow V_{\delta} = 0 \text{ V}$$

در این مدار: چون از نوع کانال P می باشد پس $V_p > 0$ می باشد یعنی

$$V_p = 2 \text{ V}$$

$$\text{از طرفی: } V_{GS} = 1 \times I_D = I_D$$

در نتیجه در رابطه I_D داریم:

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

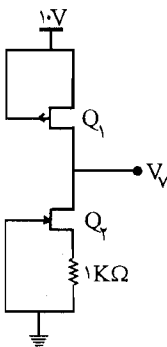
$$\Rightarrow I_D = 4 \left(1 - \frac{I_D}{2}\right)^2 = (2 - I_D)^2 = 4 + I_D^2 - 4 I_D \Rightarrow$$

$$I_D^2 - 4 I_D + 4 = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_D = 4 \\ I_D = 1 \end{cases}$$

$I_D = 4 \text{ mA}$ قابل قبول نمی باشد چون در این صورت $I_D = I_{DSS}$ می شود که در این حالت باید

$V_{GS} = 0$ پس $I_D = 4 \text{ mA}$ قابل قبول نمی باشد پس $I_D = 1 \text{ mA}$ می باشد:

$$V_{\phi} = 1 \times I_D = 1 \times 1 \text{ mA} = 1 \text{ V}$$



در Q_1 داریم: $V_{GS_1} = 0 \Leftarrow I_{D_1} = I_{DSS}$ از طرفی این جریان همان جریان

Q_2 می باشد پس $I_{D_1} = I_{D_r} = I_{DSS}$ پس باید $V_{GS_r} = 0$ شود:

$$V_{GS_r} = 0 \Rightarrow V_{G_r} - V_{S_r} = 0 \Rightarrow 0 - V_{S_r} = 0 \Rightarrow V_{S_r} = 0$$

که این حالت امکان ندارد چون در این صورت $I_{D_r} = 0$ می شود در صورتی که

می دانیم $I_{D_1} = I_{D_r} = 4 \text{ mA}$ پس $V_{GS_r} \neq 0$ می باشد در این صورت در Q_2

خواهیم داشت: (n کانال)

$$I_{D_r} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS_r}}{V_p}\right)^2 = 4 \left(1 - \frac{V_{G_r} - V_{S_r}}{-2}\right)^2$$

$$\Rightarrow I_{D_r} = 4 \left(1 - \frac{0 - 1 \times I_{D_r}}{-2}\right)^2 \Rightarrow \begin{cases} I_{D_r} = 4 \\ I_{D_r} = 1 \end{cases}$$

$I_{D_1} = 4 \text{ mA}$ قابل قبول نمی باشد چون در این صورت $I_{D_1} = I_{DSS}$ یعنی $V_{GS_1} = 0$ می شود که قابل قبول نمی باشد پس $I_{D_1} = 1 \text{ mA} \leftarrow I_{D_1} = 1 \text{ mA}$

KVL: $V_V = 10 + V_{DS_1}$

از طرفی Q_1 در حالت اشباع نمی باشد چون با $V_{GS_1} = 0$ جریان $I_{D_1} = I_{DSS} = 4 \text{ mA}$ می باشد که قابل قبول نیست و $I_{D_1} = 1 \text{ mA}$ می باشد پس Q_1 در حالت تریود کار می کند و در این حالت داریم: رابطه (۲-۷)

کتاب

$$I_{D_1} = I_{DSS} \left[2 \left(\frac{V_{GS_1}}{V_P} - 1 \right) \frac{V_{DS_1}}{V_P} - \left(\frac{V_{DS_1}}{V_P} \right)^2 \right]$$

$$\Rightarrow I_{D_1} = 4 \left[2 \left(\frac{0}{2} - 1 \right) \frac{V_{DS_1}}{2} - \left(\frac{V_{DS_1}}{2} \right)^2 \right] \Rightarrow V_{DS_1}^2 + 4V_{DS_1} + 1 = 0$$

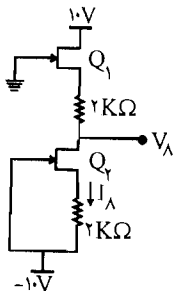
$$\Rightarrow \begin{cases} V_{DS_1} = -0.25 \text{ V} \\ V_{DS_1} = -3.75 \text{ V} \end{cases}$$

در ناحیه تریود باید: $V_{GD_1} < V_P$ یعنی $V_{GS_1} - V_{DS_1} < V_P$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{DS_1} = -3.75 \Rightarrow 0 - (-3.75) < V_P \Rightarrow \text{قابل قبول نمی باشد} \\ V_{DS_1} = -0.25 \Rightarrow 0 - (-0.25) < V_P \Rightarrow \text{قابل قبول می باشد} \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_V = 10 + V_{DS_1} = 10 - 0.25 = 9.75 \text{ V}$$

در Q_2 داریم:



$$V_{GS_2} = -2I_{D_2}$$

$$\Rightarrow I_{D_2} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS_2}}{V_P} \right)^2 = 4 \left(1 - \frac{-2I_{D_2}}{-2} \right)^2 \Rightarrow$$

$$I_{D_2} = 4(1 - I_{D_2})^2 \Rightarrow I_{D_2} = \begin{cases} 1/64 \text{ mA} \\ 0.61 \text{ mA} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{D_2} = 1/64 \Rightarrow V_{GS_2} = -2I_{D_2} = -3/28 < V_P \Rightarrow \text{قابل قبول نمی باشد} \\ I_{D_2} = 0.61 \Rightarrow V_{GS_2} = -2 \times 0.61 = -1.22 > V_P \Rightarrow \text{قابل قبول می باشد} \end{cases}$$

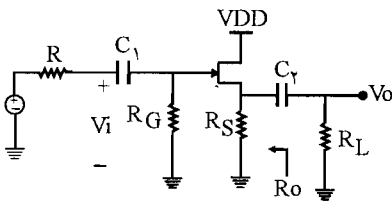
$$\Rightarrow I_A = I_{D_2} = 0.61 \text{ mA} \Rightarrow I_{D_1} = I_{D_2} = 0.61$$

$$\Rightarrow I_{D_1} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS_1}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow 0.61 = 4 \left(1 - \frac{V_{GS_1}}{-2}\right)^2 \Rightarrow \begin{cases} V_{GS_1} = -2/78 \\ V_{GS_1} = -1/22 \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{GS_1} = -2/78 < V_P \Rightarrow \text{قابل قبول نمی باشد} \\ V_{GS_1} = -1/22 > V_P \Rightarrow \text{قابل قبول می باشد} \Rightarrow V_{G_1} - V_{S_1} = -1/22 \Rightarrow 0 - V_{S_1} = -1/22 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{S_1} = 1/22 \Rightarrow V_{\lambda} = V_{S_1} - 2I_{D_1} = 1/22 - 2 \times 0.61 = 0^V \Rightarrow V_{\lambda} = 0^V$$

۶- در یک مدار سورس فالوئر شکل م-۶ به جای مقاومت R_S می توان از یک JFET دیگر (مشابه



شکل م-۶

اولی) استفاده نمود. گیت و سورس این JFET به

$-V_{DD}$ وصل شده و درین آن به سورس JFET اول

متصل می شود. V_S مدار سورس فالوئر چقدر

است؟ مقاومت خروجی سورس فالوئر را به دست

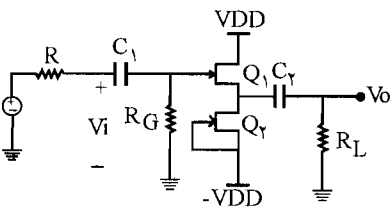
آورید. با توجه به مقدار ولتاژ DC در سورس آیا در

این حالت C_2 مورد نیاز است؟

☑ (راه حل):

وقتی به جای R_S یک JFET با شرایط گفته شده در صورت مسأله قرار گیرد مدار به صورت شکل زیر در

می آید.



$$Q_2: V_{GS_2} = 0 \Rightarrow I_{D_2} = I_{DSS}$$

$$\text{از طرفی: } I_{D_1} = I_{D_2} \Rightarrow I_{D_1} = I_{D_2} = I_{DSS}$$

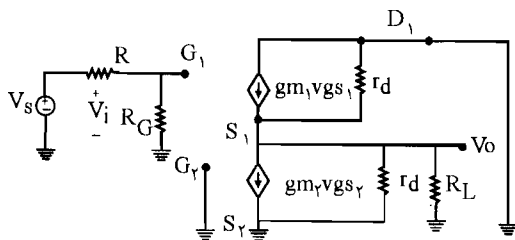
$$\Rightarrow I_{D_1} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS_1}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow I_{DSS} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS_1}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow V_{GS_1} = 0$$

$$\Rightarrow V_{G_1} - V_{S_1} = 0 \quad \text{از طرفی: } V_{G_1} = 0$$

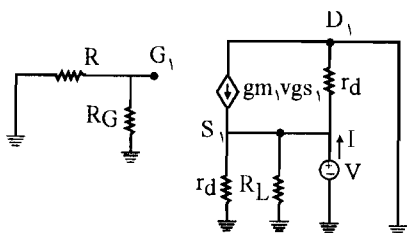
$$\Rightarrow \bullet - V_{S_1} = \bullet \Rightarrow V_{S_1} = V_S = \bullet$$

$$g_{m_1} = g_{m_r} = \frac{-\gamma I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right) \Big|_{V_{GS} = \bullet} \Rightarrow g_{m_1} = g_{m_r} = \frac{-\gamma I_{DSS}}{V_P}$$

مدار معادل به صورت زیر در می آید:



برای اینکه مقاومت خروجی سورس فالوئر را به دست آوریم مدار معادل تون در دو سر R_L اجرامی کنیم.



$$V_{g_1} = \bullet \text{ و } V_{S_1} = V \Rightarrow V_{gs_1} = V_{g_1} - V_{s_1} = \bullet - V = -V$$

$$I = \frac{V}{R_L} + \frac{V}{r_d} - g_m V_{gs_1} + \frac{V}{r_d} = V \left(\frac{1}{R_L} + \frac{\gamma}{r_d} \right) - (g_m V_{gs_1})$$

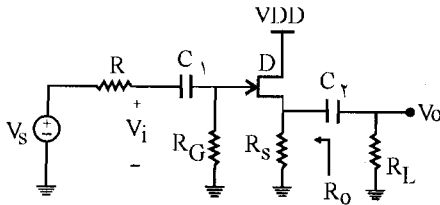
$$= V \left(\frac{1}{R_L} + \frac{\gamma}{r_d} \right) - g_m (-V) = V \left(\frac{1}{R_L} + \frac{\gamma}{r_d} + g_m \right)$$

$$\rightarrow R'_O = R_{th} = \frac{V}{I} = \frac{1}{\frac{1}{R_L} + \frac{\gamma}{r_d} + g_m} = \frac{R_L \times r_d}{r_d + \gamma R_L + g_m r_d R_L}$$

مقداری که برای V_S به دست آمده برابر صفر می باشد که مشخص می شود که وجود خازن C_p دیگر نیاز نمی باشد چرا که خروجی V_O مؤلفه DC ندارد لذا می توانیم کوپلاژ مستقیم داشته باشیم.

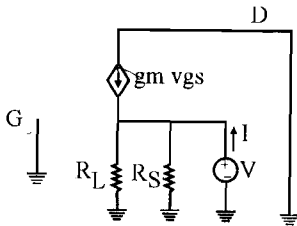
۷- در مدار شکل م-۶ با فرض $g_m = \frac{2 \text{ mA}}{V}$ و $R_S = 10 \text{ K}\Omega$ و $R_L = 10 \text{ K}\Omega$ ، مقاومت R_O و A_V

را به دست آورید.



☑ (اه حل:

برای به دست آوردن R_O ، در دو سر R_L تونن را اجرا می‌کنیم. V_S را برابر صفر قرار می‌دهیم. (از I_d به دلیل بزرگ بودن صرف‌نظر شده است.)



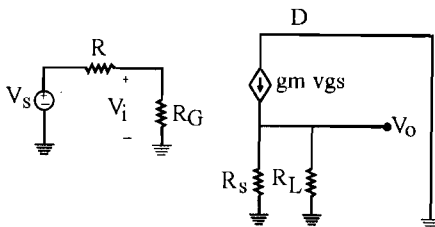
$$\text{KCL: } \frac{V}{R_L} + \frac{V}{R_S} = g_m V_{gs} + I \Rightarrow V \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_S} \right) = g_m V_{gs} + I \quad (I)$$

$$\text{از طرفی داریم: } \begin{cases} V_g = 0 \\ V_s = V \end{cases} \Rightarrow V_{gs} = V_g - V_s = 0 - V = -V$$

$$(I) \Rightarrow V \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{10} \right) = g_m (-V) + I \Rightarrow V (0.2 + 0.2) = I$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{0.4} = 0.25 \text{ K}\Omega = 250 \Omega$$

به دست آوردن A_V :

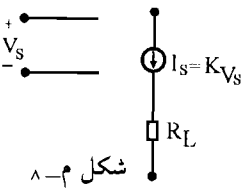


$$\text{KCL: } V_O \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_S} \right) = g_m V_{gs} \Rightarrow V_O = g_m V_{gs} \times \frac{R_L R_S}{R_L + R_S}$$

$$= 2V_{gs} \times \frac{10 \times 10}{10 + 10} = 10V_{gs}$$

$$\text{از طرفی: } V_i = V_O + V_{gs} = 10V_{gs} + V_{gs} = 11V_{gs}$$

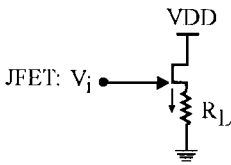
$$\Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{10V_{gs}}{11V_{gs}} = 0.91$$



شکل م-۸

۸- با کمک JFET، $B_j T$ و دیود به تعداد دلخواه یک منبع جریان I_S مطابق شکل م-۸، که تابعی خطی از یک ولتاژ V_S باشد را طوری طراحی کنید که بار متغیر ($0 < R_L < 1K\Omega$) را تغذیه کند. V_S بین صفر تا ۵ ولت تغییر می‌کند (K نباید خیلی کوچک انتخاب شود).

☑ (۱۰ اه حل:



JFET: V_i

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

$$V_P < 0 \Leftrightarrow \text{کانال N}$$

$$\Rightarrow I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 = I_{DSS} \left(\frac{V_P + V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$$V_{GS} < 0 \text{ اگر } V_{GS} = -V_P + K' \sqrt{V_S} \text{ باشد در این صورت داریم:}$$

باید باشد)

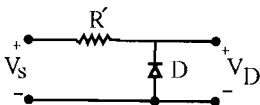
$$I_D = I_{DSS} \left(\frac{K' \sqrt{V_S}}{V_P} \right)^2 \Rightarrow I_D = \frac{I_{DSS}}{(V_P)^2} \times K'^2 \times V_S$$

$$K'^2 \times \frac{I_{DSS}}{(V_P)^2} = K \Rightarrow I_D = K \times V_S \Rightarrow$$

این همان فرم I_S می‌باشد.

بنابراین باید V_{GS} به صورت $V_{GS} = -V_P + K' \sqrt{V_S}$ باشد اگر V_S به دیودی اعمال می‌شود در دو سر

دیود چنین ولتاژی را خواهیم داشت:



$$V_D = V_S - R' I_D \quad (I)$$

رابطه I_D در دیود به صورت مقابل می‌باشد:

$$I_D = I_O (e^{\frac{-V_D}{V_T}} - 1)$$

$$\text{فرض } \eta = 1 \Rightarrow I_D = I_O (e^{\frac{-V_D}{V_T}} - 1)$$

اگر $\frac{V_D}{V_T}$ کوچک باشد با بسط $e^{-\frac{V_D}{V_T}}$ خواهیم داشت:

$$I_D = I_O \left[1 - \frac{V_D}{V_T} + \frac{1}{2} \left(\frac{V_D}{V_T} \right)^2 + \dots - 1 \right] \Rightarrow I_D = -I_O \times \frac{V_D}{V_T} + \frac{1}{2} I_O \left(\frac{V_D}{V_T} \right)^2$$

این رابطه را در رابطه (1) قرار می‌دهیم:

$$V_D = V_S - R' \left[-I_O \times \frac{V_D}{V_T} + \frac{1}{2} I_O \times \left(\frac{V_D}{V_T} \right)^2 \right]$$

$$\Rightarrow V_D = V_S + \frac{R' I_O}{V_T} V_D - \frac{R'}{2} I_O \left(\frac{V_D}{V_T} \right)^2$$

$\frac{R' I_O}{V_T}$ را برابر یک در نظر می‌گیریم یعنی $R' = \frac{V_T}{I_O}$ در نظر گرفته می‌شود در این صورت خواهیم داشت:

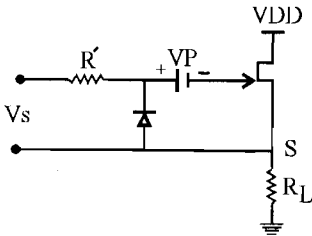
$$V_S = \frac{R'}{2} I_O \left(\frac{V_D}{V_T} \right)^2 \Rightarrow V_D = V_T \times \sqrt{\frac{2}{R' I_O} \times \sqrt{V_S}}$$

رابطه V_{GS} را ملاحظه می‌کنیم $K' \sqrt{V_S}$ نیاز بود که ولتاژ دو سر V_D چنین فرمی داشته باشد بنابراین:

$$K' = V_T \sqrt{\frac{2}{R' I_O}} = \sqrt{2 V_T}$$

خواهد شد و این ولتاژ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

اما در رابطه V_{GS} ، $-V_P$ نیز است که به صورت یک باطری اضافه می‌شود و مدار شکل زیر پاسخگوی منبع جریان I_S خواهد شد.



در این مدار $V_{GS} = -V_P + V_D$ می‌باشد که V_D به صورت $K' \sqrt{V_S}$ می‌باشد بنابراین: $I_D = K \sqrt{V_S}$ شده و K عبارت

است از:

$$K = \frac{I_{DSS}}{V_P^2} \times K'^2$$

$$K = \frac{2 I_{DSS}}{V_P^2} \times V_T$$

و با جایگزینی $K' = \sqrt{2 V_T}$ داریم:

شرط اینکه مدار درست کار کند این است که شرایط ناحیه اشباع برقرار باشد یعنی باید داشته باشیم:

$$-V_P < V_{GS} < 0, \quad V_{GD} < -V_P$$

$$-V_P < -V_P + K' \sqrt{V_S} < 0 \Rightarrow K' \sqrt{V_S} > 0, \quad K' \sqrt{V_S} < V_P \quad \text{با جایگزینی } V_{GS} \text{ داریم:}$$

چون V_S مثبت و K' نیز مثبت است لذا شرط اول همواره برقرار می‌باشد و برای اینکه شرط دوم برقرار باشد باید داشته باشیم:

$$K' \sqrt{V_S} < V_P \Rightarrow \sqrt{2V_T} \times \sqrt{V_S} < V_P$$

چون V_S ماکزیمم ۵ است پس V_S را ۵ در نظر می‌گیریم.

$$\Rightarrow \sqrt{2 \times 26 \times 10^{-3}} \times \sqrt{5} < V_P \Rightarrow \sqrt{26 \times 10^{-2}} < V_P \Rightarrow V_P > 0.51V$$

و همچنین برای اینکه در حالت اشباع باشیم باید $V_{GD} < -V_P$ باشد.

$$V_{GS} - V_{DS} < -V_P \Rightarrow -V_P + K' \sqrt{V_S} - (V_D - V_S) < -V_P \Rightarrow$$

$$K' \sqrt{V_S} < V_D - V_S \Rightarrow K' \sqrt{V_S} < V_{DD} - R_L I_D$$

$$\Rightarrow \sqrt{2V_T} \times \sqrt{V_S} < V_{DD} - K V_S \times R_L \Rightarrow V_{DD} > \sqrt{2V_T} \times \sqrt{V_S} + K V_S \times R_L$$

$$\Rightarrow V_{DD} > \sqrt{2 \times 26 \times 10^{-3} \times V_S} + \frac{2 I_{DSS} \times V_T}{V_P} \times V_S \times R_L$$

کمترین مقدار V_{DD} به ازای R_L و V_S ماکزیمم به دست می‌آید و همچنین باید V_P مینیمم باشد.

$$(V_P \text{ (min)}) = 0.51$$

$$\Rightarrow V_{DD} > 0.51 + \frac{2 I_{DSS} \times 26 \times 10^{-3}}{(0.51)^2} \times 5 \times 1 \Rightarrow V_{DD} > 0.51 + I_{DSS}$$

با این شرط و شرط $V_P > 0.51$ مدار فوق پاسخگوی منبع جریان خواسته شده می‌باشد.

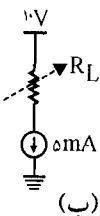
۹- با یک JFET با پارامترهای $V_P = 2/5V$ ، $I_{DSS} = 8mA$ و $r_d = 250 K\Omega$ و یا با یک

BJT با پارامترهای $h_{fe} = 300$ و $h_{oe} = 100 K\Omega$ می‌خواهیم

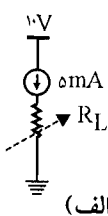
منابع جریان م-۹ را برای $R_L < 1/4 K\Omega$ طراحی کنیم. برای هر یک

از مدارهای شکل م-۹ یک بار با JFET و بار دیگر با BJT مدار

خود را طراحی کنید.

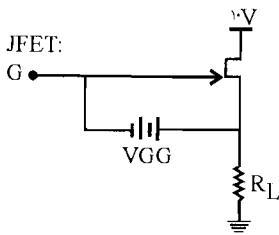


(ب)



(الف)

☑ راه حل:



ابتدا مدار مقابل را در نظر می‌گیریم اگر JFET در ناحیه اشباع کار کند در این صورت $I_D = 5 \text{ mA}$ (JFET) از نوع کانال N انتخاب شده است.)

$$\Rightarrow V_P = -2/5 \text{ V}$$

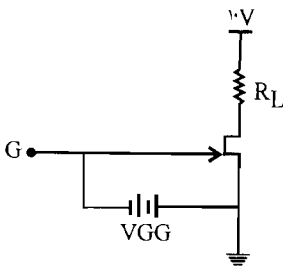
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \Rightarrow 5 = 8 \left(1 - \frac{V_{GS}}{-2/5}\right)^2 \Rightarrow \begin{cases} V_{GS} = -4/475 \\ V_{GS} = -0/525 \end{cases}$$

$V_{GS} = -4/475 < V_P$ می‌باشد در نتیجه قابل قبول نمی‌باشد پس $V_{GS} = -0/525$ چو بزرگتر از V_P می‌باشد پس قابل قبول می‌باشد یعنی $V_{GS} = -0/525 \text{ V}$ می‌باشد. حال باید ببینیم به ازاء مقادیر R_L آیا JFET در ناحیه اشباع کار می‌کند یا خیر؟

$$V_{GD} = V_G - V_D = (V_{GS} + V_S) - V_D = -0/525 + 5R_L - 10$$

رابطه بالا به ازای ماکزیمم مقدار $R_L = 1/4 \text{ K}\Omega$ یعنی R_L کوچکتر از V_P می‌باشد یعنی در این رابطه صدق می‌کند و $V_{GG} = -V_{GS} = 0/525 \text{ V}$ پس مدار فوق با JFET با پارامترهای داده شده پاسخگوی طرح خواسته شده در شکل الف می‌باشد.

شکل (ب) با JFET:



با $V_{GS} = -0/525 \text{ V}$ مانند مدار قبلی $I_D = 5 \text{ mA}$ شده و باید ببینیم به ازای مقادیر داده شده برای R_L ، JFET در ناحیه اشباع می‌باشد یا نه؟

$$V_{GD} = V_G - V_D = -0/525 - (10 - 5R_L) < V_P = -2/5$$

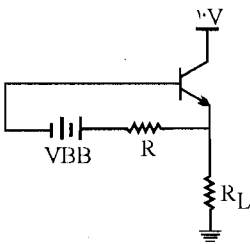
رابطه بالا به ازای ماکزیمم مقدار $R_L = 1/4 \text{ K}\Omega$ یعنی R_L باید

$$V_{GD} = -0/525 - 10 + 5 \times 1/4 = -3/525 < -2/5 \Rightarrow \text{صادق باشد رابطه فوق صادق است.}$$

پس مدار فوق با $V_{GG} = -V_{GS} = 0/525 \text{ V}$ با JFET با پارامترهای داده شده پاسخگوی طرح

خواسته شده در شکل (ب) می‌باشد. (مقاومت r_d برای تعیین مقدار مقاومت خروجی به کار می‌رود.)

مدار شکل الف با BJT :



اگر BJT در ناحیه فعال باشد و $I_C = 5\text{mA}$ در این صورت مدار پاسخگوی طرح خواسته شده در شکل الف خواهد بود (BJT از نوع npn انتخاب شده است).

$$\text{فرض } R = 15\text{K}\Omega : V_{BB} - V_{BE} = R I_B \Rightarrow V_{BB} = V_{BE} + R \times \frac{I_C}{h_{fe}}$$

$$\Rightarrow V_{BB} = 0.7 + 15 \times \frac{5}{300} = 0.95\text{V}$$

حال باید ببینیم BJT به ازای مقادیر داده شده برای R_L در ناحیه فعال می‌باشد یا نه؛ یعنی باید داشته باشیم:

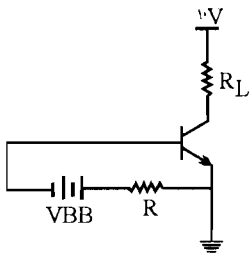
$$V_{CE} = V_C - V_E = 10 - R_L I_C = 10 - 5R_L > 0.2\text{V}$$

این رابطه باید به ازای ماکزیمم مقدار R_L صادق باشد یعنی به ازای $R_L = 1/4\text{K}\Omega$:

$$V_{CE} = 10 - 5 \times 1/4 = 3 > 0.2\text{V}$$

می‌بینیم که رابطه صادق بوده و مدار فوق با $V_{BB} = 0.95\text{V}$ با BJT با پارامترهای داده شده پاسخگوی طرح خواسته شده در شکل (الف) می‌باشد.

مدار شکل (ب) با BJT :



با $V_{BB} = 0.95\text{V}$ مانند مدار قبلی $I_C = 5\text{mA}$ می‌باشد و باید ببینیم به ازای مقادیر داده شده برای R_L در ناحیه فعال می‌باشد یا نه؟ باید داشته باشیم:

$$V_{CE} = V_C - V_E = 10 - I_C \times R_L - 0 = 10 - 5R_L > 0.2\text{V}$$

رابطه بالا به ازای ماکزیمم مقدار R_L در ناحیه فعال می‌باشد یا نه؟ باید داشته باشیم:

$$V_{CE} = V_C - V_E = 10 - I_C \times R_L - 0 = 10 - 5R_L > 0.2\text{V}$$

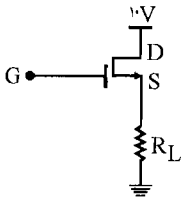
رابطه بالا به ازای ماکزیمم مقدار R_L یعنی $R_L = 1/4\text{K}\Omega$ باید صادق باشد:

$$V_{CE} = 10 - 5 \times 1/4 = 3 > 0.2\text{V}$$

می‌بینیم که رابطه صادق بوده و مدار فوق با $V_{BB} = 0.95\text{V}$ با BJT با پارامترهای داده شده پاسخگوی طرح خواسته شده در شکل ب می‌باشد. (مقاومت h_{oe}^{-1} در تعیین مقدار مقاومت خروجی به کار می‌رود).

۱۰ - مسأله ۹ را با MOSFET های ارتقایی از نوع N و P که دارای پارامترهای $|V_T| = 2V$ و $K = 1 \frac{mA}{V^2}$ هستند، تکرار کنید.

☑ راه حل:



شکل الف: MOS را از نوع N انتخاب می‌کنیم:

$$I_D = I_S = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

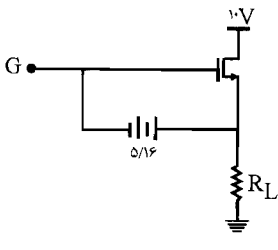
MOS از نوع N می‌باشد در نتیجه $V_T > 0$ می‌باشد.

$$\Rightarrow 5 = \frac{1}{2} (V_{GS} - 2)^2$$

$$\Rightarrow 10 = (V_{GS} - 2)^2 \Rightarrow \begin{cases} V_{GS} = 5/16V \\ V_{GS} = -1/16V \end{cases}$$

در MOSFET نوع ارتقایی از نوع N باید: $V_{GS} > V_T$ باشد پس $V_{GS} = -1/16$ قابل قبول نمی‌باشد ولی $V_{GS} = 5/16V > V_T$ پس قابل قبول می‌باشد:

پس در مدار بالا باید بین G و S یک منبع ولتاژ به اندازه $V_{GS} = 5/16V$ قرار داده شود شرط اینکه مدار در حالت اشباع باشد به صورت زیر است:

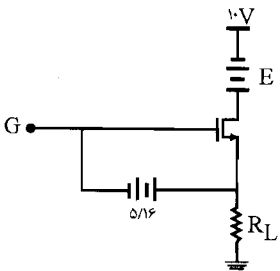


$$V_{GD} < V_T \Rightarrow V_G - V_D < V_T \Rightarrow (V_{GS} + V_S) - V_{DD} < V_T$$

$$\Rightarrow (5/16 + R_L \times I_D) - 10 < 2 \Rightarrow R_L < \frac{2 + 4/84}{I_D}$$

$$\Rightarrow R_L < \frac{6/84}{5} = 1/37K\Omega$$

چون در صورت مسأله $1/4K\Omega < R_L < 0$ می‌باشد پس باید در مدار فوق یک منبع ولتاژی مانند E اضافه شود.



$$V_{GD} < V_T \Rightarrow (V_G - V_D) < V_T$$

شرط اشباع:

$$\Rightarrow (V_{GS} + V_S) - (V_{DD} + E) < V_T$$

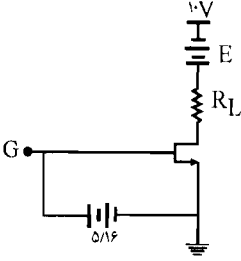
$$\Rightarrow (5/16 + I_D \times R_L) - (10 + E) < 2$$

$$\Rightarrow E > -6/84 + R_L I_D = -6/84 + 5R_L$$

رابطه بالا باید به ازای ماکزیمم مقدار R_L یعنی $R_L = 1/4 K\Omega$ صادق باشد پس:

$$E > -6/84 + 5 \times 1/4 = 0.16 V$$

شکل (ب) با NMOS به صورت زیر می باشد:



شکل (الف) با PMOS:

$$I_D = I_S = \frac{K}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2$$

در PMOS، V_T منفی می باشد یعنی $V_T = -2V$:

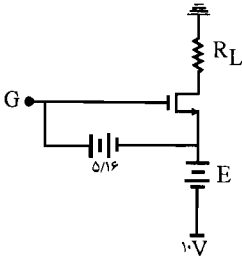
$$\Rightarrow I_D = I_S = \frac{1}{\gamma} (-5/16 + 2)^2 \approx 5 \text{ mA}$$

شرط اینکه مدار در حالت اشباع باشد:

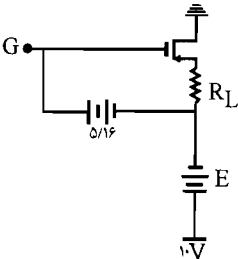
$$V_{GD} > V_T \Rightarrow V_G - V_D > V_T \Rightarrow (V_{GS} + E + 10) - I_D \times R_L > V_T$$

$$\Rightarrow (-5/16 + E + 10) - 5R_L > -2 \Rightarrow E > -6/84 + 5R_L$$

$$= -5/84 + 5 \times 1/4 = 0.16 V$$

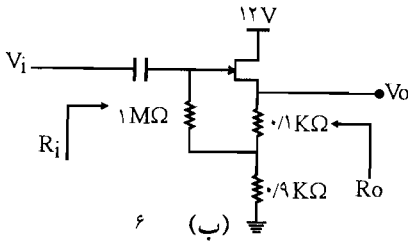


شکل (ب) با PMOS به صورت زیر می باشد:

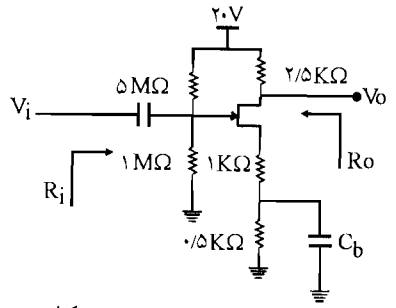


۱۱- در هر یک از تقویت کننده های شکل م- ۱۱ مقادیر A_V ، R_i ، R_o و حداکثر دامنه نوسان متقارن

برای آنکه تقویت‌کننده در ناحیه اشباع باقی بماند را به دست آورید. JFET دارای پارامترهای $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$ و $|V_P| = 2 \text{ V}$ و $r_d = 200 \text{ K}\Omega$ هستند.



(ب) ۶



شکل م-۱۱

(الف)

☑ (راه حل):

$$\begin{cases} V_G = \frac{20 \times 1 \text{ M}\Omega}{1 + 5} = \frac{10}{3} \text{ V} \\ V_S = (1 \text{ K}\Omega + 0/5 \text{ K}\Omega) \times I_D = 1/5 I_D \end{cases} \Rightarrow V_{GS} = \frac{10}{3} - 1/5 I_D \Rightarrow I_D = \frac{20 - 6 V_{GS}}{9} \quad (I)$$

از طرفی طبق رابطه I_D داریم:

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

(JFET ها از نوع کانال n می باشند پس $V_P < 0$ می باشد یعنی $V_P = -2 \text{ V}$)

$$\Rightarrow I_D = 10 \left(1 - \frac{V_{GS}}{-2}\right)^2 \quad (II)$$

به جای I_D در رابطه (II)، I_D به دست آمده از رابطه (I) را قرار می دهیم:

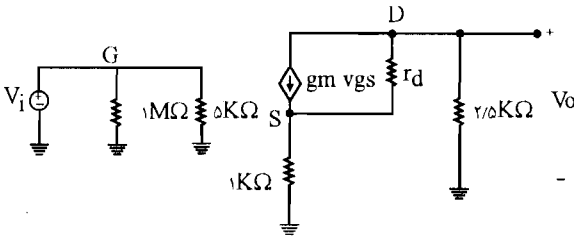
$$\frac{20 - 6 V_{GS}}{9} = 10 \left(1 - \frac{V_{GS}}{-2}\right)^2 \Rightarrow 45 V_{GS}^2 + 192 V_{GS} + 140 = 0$$

با حل این معادله درجه (۲) داریم:

$$\begin{cases} V_{GS} = -0/93 > V_P \Rightarrow \text{قابل قبول می باشد} \\ V_{GS} = -3/13 \Rightarrow V_{GS} < V_P \Rightarrow \text{قابل قبول نمی باشد} \end{cases} \quad V_{GS} = -0/93$$

$$\Rightarrow g_m = \frac{-2 I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) = \frac{-2 \times 10}{-2} \left(1 - \frac{-0/93}{-2}\right) = 0/535 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

حال مدار معادل را رسم می‌کنیم:



حال به جای منبع جریان $g_m V_{gs}$ از منبع ولتاژ $g_m V_{gs} r_d$ استفاده می‌کنیم. (تبدیل منبع جریان به منبع ولتاژ)

$$I = \frac{V}{2/5} + \frac{V - 0/84 V}{2.1} = V \left(\frac{1}{2/5} + \frac{0/16}{2.1} \right) = V \times 0/4008$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{0/4008} = 2/495 K\Omega$$

برای به دست آوردن حداکثر دامنه نوسان متقارن:

با توجه به مدار معادل داریم:

$$V_{ds} = V_d - V_s = V_o - (i_d - \frac{V_{ds}}{r_d}) \times 1 K\Omega$$

$$\Rightarrow V_{ds} = -2/5 i_d - (i_d - \frac{V_{ds}}{r_d}) \times 1 K\Omega \Rightarrow V_{ds} (1 - \frac{1}{2.0}) = -3/5 i_d$$

$$\Rightarrow V_{ds} = \frac{-3/5 i_d}{0/995} = -3/518 i_d \quad \text{معادله خط بار ac}$$

$$\text{DC بار معادله خط بار: } V_{DS} - V_{DSQ} = -3/518 (i_D - i_{DQ}) \quad (1)$$

$$i_{DQ} = \frac{-6 V_{GSQ} + 20}{9} = \frac{-6 \times (-0/93) + 20}{9} = 2/842 \text{ mA}$$

$$V_{DSQ} = 20 - (2/5 + 1 + 0/5) \times I_{DQ} = 20 - 4 \times 2/842 = 8/632 \text{ V}$$

$$V_{ODS} = 20 - 2/5 I_{DQ} = 20 - 2/5 \times 842 = 12/9 \text{ V}$$

در نقطه قطع که $i_D = 0$ می‌باشد خروجی ماکزیمم می‌باشد یعنی $V_O(\text{max}) = 20 \text{ V}$

V_{DS} مرز اشباع و تریود چنین می‌شود:

$$V_{GD} \leq V_P \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \leq V_P \Rightarrow V_{DS} \geq -V_P + V_{GS}$$

رابطه فوق به ازای جمع مقادیر V_{GS} باید صادق باشد تا از ناحیه اشباع خارج نشویم و $V_{GS} = 0$ بزرگترین مقدار ممکن سمت راست رابطه فوق می باشد که باید V_{DS} از این مقدار نیز بزرگتر باشد لذا داریم:

$$V_{DS} \geq -V_P + 0 \Rightarrow V_{DS} \geq -V_P \Rightarrow V_{DS} \geq -(-2) = 2$$

بنابراین $V_{DS} = 2V$ می تواند ماکزیمم مقدار جریان i_D را مشخص کند. با توجه به رابطه (۱) داریم:

$$V_{DS} - V_{DSQ} = -3/518 (i_D - i_{DQ}) \Rightarrow 2 - 1/632 = -3/518 i_D + 3/518 \times 2/842$$

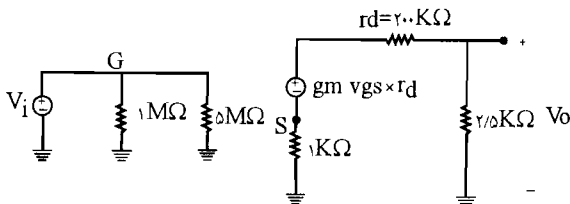
$$\Rightarrow i_D (\max) = 4/73$$

و کمترین مقدار V_O چنین می شود:

$$V_O (\min) = 20 - 2/5 i_D (\max) = 20 - 2/5 \times 4/73 = 17/175 V$$

$$\left\{ \begin{aligned} V_{O1} = V_O (\max) - V_O = 20 - 17/9 = 7/1 \\ V_{O2} = V_O - V_O (\min) = 17/9 - 17/175 = 4/73 \end{aligned} \right.$$

حداکثر انحراف متقارن خروجی بدون اعوجاج $V_O (\max) = 4/73$ حداکثر دامنه نوسان متقارن را کمترین مقدار به دست آمده از دو مقدار بالا مشخص می کند.



$$V_O = - \frac{2/5 \times gm v_{gs} r_d}{2/5 + 200 K\Omega + 1 K\Omega} = - \frac{2/5 \times 5/35 \times 200}{203/5} V_{gs}$$

$$\Rightarrow V_O = -13/1 V_{gs}$$

$$V_S = \frac{1 K\Omega \times gm v_{gs} r_d}{2/5 + 200 + 1 K\Omega} = \frac{5/35 \times 200}{203/5} v_{gs} = 5/26 v_{gs}$$

از طرفی طبق مدار داریم:

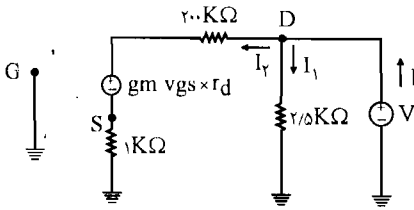
$$V_i = V_g, \quad V_{gs} = V_g - V_s = V_i - V_s$$

$$\Rightarrow V_{gs} + V_s = V_i \Rightarrow V_i = V_{gs} + 5/26 V_{gs} = 6/26 V_{gs}$$

$$A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{-13/1 V_{gs}}{6/26 V_{gs}} = -2/1$$

به دست آوردن مقاومت R_i : $R_i = 1\text{M}\Omega \parallel 5\text{M}\Omega = \frac{5}{6}\text{M}\Omega = 833\text{K}\Omega$

به دست آوردن مقاومت R_o : برای به دست آوردن مقاومت خروجی، یک منبع ولتاژ V را در دو سر مقاومت $2/5\text{K}\Omega$ قرار می‌دهیم و منبع ورودی V_i را صفر در نظر می‌گیریم.



$$\text{طبق مدار: } V_g = 0, \quad I = I_1 + I_2 = \frac{V}{2/5} + \frac{V + g_m v_{gs} r_d}{200 + 1} \quad (A)$$

$$\text{از طرفی: } V_{gs} = V_g - V_s = 0 - 1 \times I_2 = -I_2, \quad I_2 = + \frac{V + g_m V_{gs} r_d}{200 + 1}$$

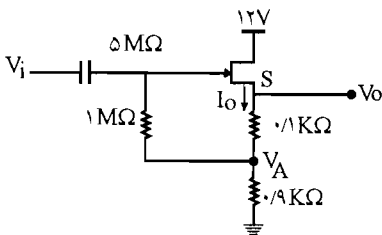
$$\Rightarrow V_{gs} = -I_2 = - \frac{V + g_m V_{gs} r_d}{201} = - \frac{V + 5/35 \times 200 \times V_{gs}}{201} \Rightarrow$$

$$201 V_{gs} + 5/35 \times 200 \times V_{gs} = -V \Rightarrow V_{gs} = \frac{-V}{1271} \quad (B)$$

با جایگذاری (B) در (A) داریم:

$$(A) : I = \frac{V}{2/5} + \left[\frac{5/35 \times 200 \times \frac{-V}{1271}}{201} + \frac{V}{201} \right] \Rightarrow$$

$$V_{GS} = V_{AS} = -0/1 I_D \Rightarrow I_D = -10 V_{GS} \quad (ب)$$



$$\text{در رابطه } I_D \text{ داریم: } I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

$$\Rightarrow -10 V_{GS} = 10 \left(1 - \frac{V_{GS}}{-2}\right)^2$$

$$\Rightarrow V_{GS}^2 + 8 V_{GS} + 4 = 0 \Rightarrow \begin{cases} V_{GS} = -7/46 \\ V_{GS} = -0/54 \end{cases}$$

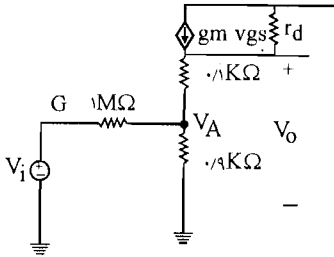
$V_{GS} = -7/46$ قابل قبول نمی‌باشد چون از V_P کوچکتر است ولی $V_{GS} = -0/54$ چون از V_P بزرگتر

$$\Rightarrow V_{GS} = -0/54$$

می‌باشد قابل قبول است.

$$g_m = \frac{-2 I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) = \frac{-2 \times 10}{-2} \left(1 - \frac{-0/54}{-2}\right) = \sqrt{3} \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

مدار معادل به صورت زیر می باشد:



$$\begin{cases} V_g = V_i \\ V_s = V_o \end{cases}$$

تقسیم جریان: $V_A \left(\frac{1}{0.1} + \frac{1}{1000} + \frac{1}{0.1} \right) - \frac{1}{1000} V_i - \frac{1}{0.1} V_o = 0 \quad (I)$

از طرفی: $V_o \left(\frac{1}{200} + \frac{1}{0.1} \right) - V_A \times \frac{1}{0.1} = g_m v_{gs} \quad (II)$, $v_{gs} = v_g - v_s = v_i - v_o$

(I): $V_A (11/112) - 10 V_o = 0.01 V_i$

(II): $V_o (10 + 0.005) - 10 V_A = \sqrt{3} (V_i - V_o) \Rightarrow -10 V_A + 17/305 V_o = \sqrt{3} V_i$

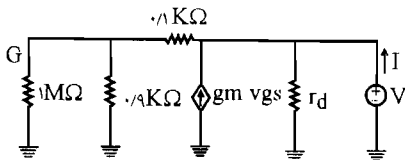
$V_A = 0.79 V_i$, $V_o = 0.88 V_i$

با استفاده از این دو رابطه داریم:

$$\Rightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = 0.88$$

به دست آوردن R_i : $R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{\left(\frac{V_g - V_A}{1000} \right)} = \frac{1000 V_i}{V_i - 0.79 V_i} = \frac{1000}{0.21} = 4.76 \text{ M}\Omega$

برای به دست آوردن R_o یک منبع ولتاژ V در خروجی گذاشته و منبع V_i را صفر می کنیم.



از طرفی: $V_{gs} = V_g - V_s = 0 - V = -V$

$$I = \frac{V}{r_d} - g_m v_{gs} + \frac{V}{0.1 + (0.1 \parallel 1000)}$$

$$\Rightarrow I = \frac{V}{200} - \sqrt{3} \times (-V) + \frac{V}{0.1 + 0.099} \Rightarrow I = 1.306 \Rightarrow R_o = \frac{V}{I} = \frac{1}{1.306} \approx 120 \Omega$$

به دست آوردن حداکثر دامنه نوسان متقارن:

$$I_{DQ} = -10 V_{GSQ} = -10(-0.54) = 0.54 \text{ mA}$$

$$V_{DSQ} = 12 - (0.9 + 0.1) I_{DQ} = 12 - 1 \times 0.54 = 11.46 \text{ V}$$

$$\text{مؤلفه dc خروجی: } V_O = 12 - V_{DSQ} = 12 - 11.46 = 0.54 \text{ V}$$

در نقطه قطع که $I_D = 0$ می باشد خروجی مینیمم مقدار خود یعنی صفر را دارد. $V_O(\min) = 0 \text{ V}$

V_{DS} مرز ناحیه اشباع و تریود به صورت زیر می باشد:

$$V_{GD} \leq V_P \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \leq V_P \Rightarrow V_{DS} \geq -V_P + V_{GS}$$

رابطه بالا به ازای تمام مقادیر V_{GS} باید صادق باشد تا از مرز ناحیه اشباع خارج نشویم و $V_{GS} = 0$ بزرگترین مقدار ممکن سمت راست رابطه فوق را مشخص می کند که باید V_{DS} از این مقدار نیز بزرگتر باشد پس داریم:

$$V_{DS} \geq -V_P + 0 \Rightarrow V_{DS} \geq -V_P \geq -(-2) = 2$$

بنابراین $V_{DS} = 2 \text{ V}$ می تواند ماکزیمم جریان I_D و نیز ماکزیمم مقدار خروجی را مشخص کند.

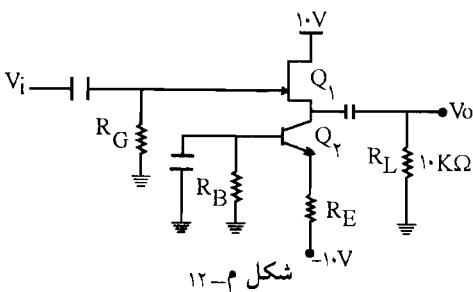
$$V_{DS} = 2 \text{ V} \Rightarrow V_O(\max) = 12 - V_{DS}(\min) = 12 - 2 = 10 \text{ V}$$

$$\begin{cases} V_{O_1} = V_O(\max) - V_O = 10 - 0.54 = 9.46 \\ V_{O_2} = V_O - V_O(\min) = 0.54 - 0 = 0.54 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_O(\max) = 9.46$$

حداکثر انحراف متقارن خروجی بدون اعوجاج برابر کمترین مقدار در رابطه بالا است.

۱۲- در تقویت کننده شکل م- ۱۲ می خواهیم $A_V \geq 0.97$ باشد و برای خروجی یک نوسان متقارن با



شکل م- ۱۲

دامنه ۴ ولت حول صفر ممکن باشد. همه

مقادیر مجهول را محاسبه کنید. با فرض

$V_P = -2/7 \text{ V}$ و $I_{DSS} = 7/6 \text{ mA}$ و

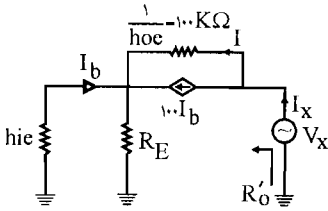
$h_{fe} = 100$ و $r_d = 100 \text{ K}\Omega$ و

$h_{oe}^{-1} = 100 \text{ K}\Omega$ ، اگر در این طرف مقاومت

R_L مستقیماً به S وصل می شود چه می شود؟

☑ راه حل:

مقاومت خروجی دیده شده از کلکتور Q_2 به صورت زیر محاسبه می‌شود.



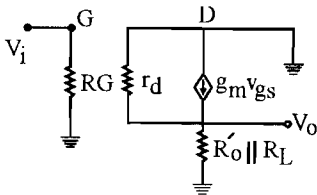
$$I_x = I + 100 I_b$$

$$I_b = -\frac{R_E}{R_E + h_{ie}} I_x \Rightarrow I = I_x - 100 I_b = \frac{h_{ie} + 101 R_E}{R_E + h_{ie}} I_x$$

با اعمال KVL در حلقه بیرونی (شامل V_x ، $\frac{1}{h_{oe}}$ و h_{ie}) خواهیم داشت:

$$V_x = 100 I - h_{ie} I_b \Rightarrow \frac{V_x}{I_x} = R'_O = \frac{100 h_{ie} + 10100 R_E + h_{ie} R_E}{R_E + h_{ie}}$$

اگر به جای طبقه Q_2 ، مقاومت خروجی R'_O را قرار دهیم و مدار معادل Q_1 را بکشیم مدار زیر حاصل می‌شود.



$$R \triangleq R'_O \parallel R_L$$

$$V_O = \frac{g_m V_{gs} \times R \cdot r_d}{R + r_d} \quad (1)$$

$$V_{gs} = V_g - V_s$$

می‌دانیم که:

$$\begin{cases} V_g = V_i \\ V_s = V_o \end{cases} \text{ پس خواهیم داشت:}$$

$$V_{gs} = V_i - V_o \quad (2)$$

با جایگذاری رابطه (2) در (1) خواهیم داشت:

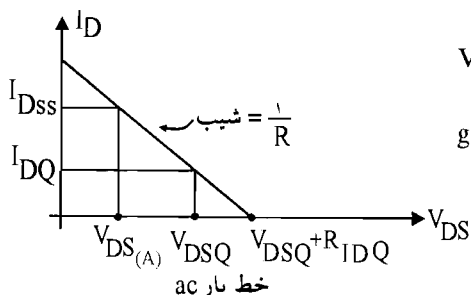
$$V_O = \frac{g_m (V_i - V_O) \cdot R r_d}{R + r_d}$$

$$g_m r_d = \mu \Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{\mu R}{R(1+\mu) + r_d} \geq 0.9V \Rightarrow 3g_m \times 100 R - 9V(R + 100) \geq 0$$

خط بار ac، JFET به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_{ds} = -R \cdot i_d$$

$$V_{DS} - V_{DSQ} = -R(i_{DQ} - I_{DQ})$$



$$V_{DS}(A) = V_{DSQ} - R(I_{DSS} - I_{DQ})$$

$$g_m = \mu I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) \left(-\frac{1}{V_P}\right)$$

$$g_m = \mu I_{DSS} \times \sqrt{\frac{I_{DQ}}{I_{DSS}}} \left(-\frac{1}{V_P}\right) = \mu \cdot 0.4 \sqrt{I_{DQ}} \quad (4)$$

با جایگزینی رابطه (۲) در (۳) خواهیم داشت:

$$3 \times \mu \cdot 0.4 \sqrt{I_{DQ}} \times 100 R - 9V(R + 100) \geq 0 \Rightarrow \sqrt{I_{DQ}} \geq \frac{9V(R + 100)}{612R}$$

اگر $I_{DQ} < \frac{I_{DSS}}{2}$ شود در اینجا $R I_{DQ}$ حداکثر انحراف بوده و باید $4V$ باشد یعنی داریم:

$$R I_{DQ} = 4 \Rightarrow I_{DQ} = \frac{4}{R} \Rightarrow \frac{4}{R} \geq \frac{(9V)^2 (R + 100)^2}{(612R)^2}$$

$$251/26 \times \left(\frac{1}{R}\right)^2 + 1/0.25 \left(\frac{1}{R}\right) + 0/0.25 \leq 0 \quad (5)$$

چند جمله‌ای عبارت (۵) همواره مثبت است و لذا این حالت به جواب نمی‌رسد.

اگر $I_{DQ} > \frac{I_{DSS}}{2} = 3/8$ باشد. داریم:

$$R(I_{DSS} - I_{DQ}) = 4$$

$$I_{DQ} = \frac{V/6R - 4}{R} \quad (6)$$

با جایگزینی (۶) در معادله (۳) خواهیم داشت:

$$\frac{V/6R - 4}{R} \geq \frac{(9V)^2 (R + 100)^2}{(612R)^2}$$

$$251/26 \left(\frac{1}{R}\right)^2 + 6/0.25 \left(\frac{1}{R}\right) - 7/57 \leq 0 \Rightarrow \frac{1}{R} = 0/186, -0/162$$

$$\frac{1}{R} < 0/186 \Rightarrow \boxed{R > 5/38 \text{ K}\Omega}$$

با محاسبه R ، I_{DQ} از رابطه (۶) محاسبه می‌شود با داشتن I_{DQ} ، h_{ie} محاسبه خواهد شد:

$$h_{ie} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{h_{fe} \cdot V_T}{I_{DQ}}$$

با جایگزینی h_{ie} در رابطه R'_O خواهیم داشت:

$$R'_O \parallel 10K = R \Rightarrow R'_O = \frac{10R}{100 - R} \quad (7)$$

از روی معادله (7)، R_E محاسبه خواهد شد. (R_E باید مثبت باشد)

$$R_E \approx 165 \Omega$$

مثلاً اگر $R = 10K$ بگیریم خواهیم داشت:

$$I_{DQ} = \frac{\sqrt{6R - 4}}{R} = \sqrt{2} \text{ mA}$$

$$g_m = \sqrt{I_{DSS} \cdot I_{DQ}} \left(-\frac{1}{V_P}\right) = 5/48 \left(\frac{\text{mA}}{\text{V}}\right) \text{ یا } s$$

$$A_V = \frac{\mu R}{R(1+\mu) + r_d} \cong 1$$

و از حلقه V_{BE} ، R_B ، R_E و -10 ولت خواهیم داشت:

$$R_E I_C + R_B I_B = 10 - V_{BE}$$

$$0/165 \times \sqrt{2} + R_B \times \frac{\sqrt{2}}{100} = 10 - 0/7 \Rightarrow \boxed{R_B = 112/5 \text{ K}\Omega}$$

(ب) اگر R_L مستقیماً به سورس (s) متصل شود. جریان DC مربوط به کلکتور یعنی I_C با جریان I_{DQ} برابر نخواهد شد و بخشی از I_{DQ} از R_L عبور خواهد کرد و در ضمن خروجی دارای مؤلفه dc می‌شود.

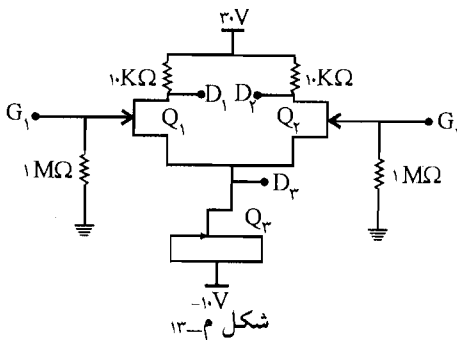
۱۳- در مدار شکل م- ۱۳، همه JFET ها مشابه و برای آنها $I_{DSS} = 4 \text{ mA}$ و $V_P = -2V$ است.

الف) ولتاژهای DC نقاط D_1 و D_2 و D_3 را به

دست آورید.

(ب) در صورتی که یک سیگنال کوچک با کوپلاژ خازنی بین G_1 و G_2 اعمال شده و خروجی از بین نقاط D_1 و D_2 گرفته شود بهره ولتاژ چقدر خواهد بود؟

📖 (ا هذمایی): Q_3 به صورت یک منبع جریان



شکل م- ۱۳

ثابت عمل می‌کند. از دید سیگنال به جای آن مقاومت r_d را جایگزین نمایید.

✓ (۱۵) حل:

الف) در Q_2 چون گیت و سورس به هم متصل می‌باشند پس $V_{GS_2} = 0V$ می‌باشد لذا:
 $I_{D_2} = I_{DSS} = 4mA$ و این جریان بین Q_1 و Q_2 تقسیم می‌شود (چون دو ترانزیستور Q_1 و Q_2 کاملاً مشابه می‌باشند). پس:

$$I_{D_1} = I_{D_2} = \frac{4}{2} = 2mA \Rightarrow V_{D_1} = 30 - 10 \cdot I_{D_1} = 30 - 10 \times 2 = 10V$$

$$\Rightarrow V_{D_2} = 30 - 10 \times I_{D_2} = 10V \Rightarrow V_{D_1} = V_{D_2} = 10V$$

$$\text{داریم } I_{D_1} \text{ از رابطه } I_{D_1} : I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS_1}}{V_{P_1}}\right)^2 \Rightarrow 2 = 4 \left(1 - \frac{V_{GS_1}}{-2}\right)^2 \Rightarrow \begin{cases} V_{GS_1} = -3/41 \\ V_{GS_1} = -0/59 \end{cases}$$

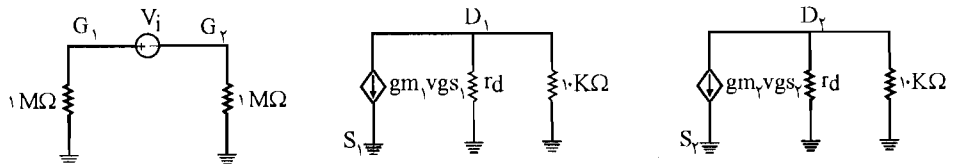
$$\Rightarrow \begin{cases} V_{GS_1} = 3/41 < V_P \Rightarrow \text{قابل قبول نمی‌باشد} \\ V_{GS_1} = -0/59 > V_P \Rightarrow \text{قابل قبول می‌باشد} \end{cases}$$

$0 = V_{G_1} = V_{G_2}$ می‌باشند چون توسط یک مقاومت $1M\Omega$ به زمین وصل شده‌اند.

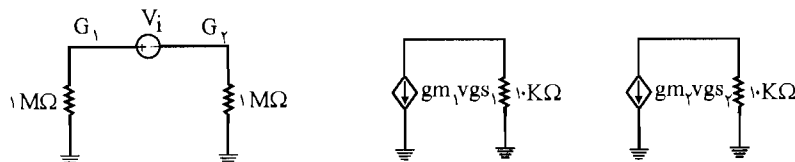
$$\Rightarrow V_{G_1} - V_{S_1} = -0/59$$

$$\Rightarrow 0 - V_{S_1} = -0/59 \Rightarrow V_{G_1} = 0/59 \Rightarrow V_{D_2} = V_{S_1} = 0/59$$

ب) مدار معادل Q_2 یک منبع جریان ثابت با مقدار $4mA$ و یک مقاومت r_d در دو سر آن می‌باشد. مدار معادل کل به صورت شکل صفحه بعد می‌باشد:



اگر r_d را بزرگ در نظر بگیریم در مقابل مقاومت $10K\Omega$ حذف می‌شود:



$$g_m = \frac{-\gamma I_{DSS}}{V_p} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right) = \frac{-2 \times 4}{-2} \left(1 - \frac{-0.59}{-2}\right) = 2/82$$

$$\begin{cases} V_{g_1} = V_i \times \frac{1}{1+1} = \frac{V_i}{2} \\ V_{g_2} = -V_i \times \frac{1}{1+1} = -\frac{V_i}{2} \end{cases}$$

از طرفی: $g_m V_{g_{s_1}} = -g_m V_{g_{s_2}} \Rightarrow (V_{g_1} - V_{s_1}) = -(V_{g_{s_2}} - V_{s_2})$

$$\Rightarrow V_{g_1} = V_{g_2}$$

$$V_{D_2} = -g_{m_2} V_{g_{s_2}} \times 10 = -2/82 \times \left(\frac{V_i}{2}\right) \times 10 = 14/17 V_i$$

$$V_{D_1} = -g_{m_1} V_{g_{s_1}} \times 10 = -2/82 \times \left(\frac{V_i}{2}\right) \times 10 = -14/17 V_i$$

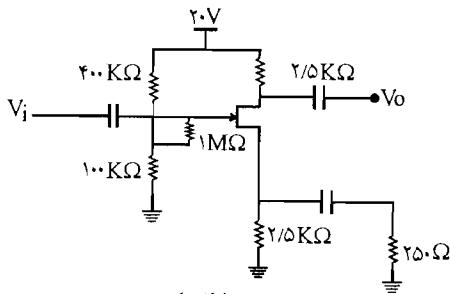
$$V_O = V_{D_1} - V_{D_2} = -14/17 V_i - (+14/17 V_i)$$

$$\Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = -28/17$$

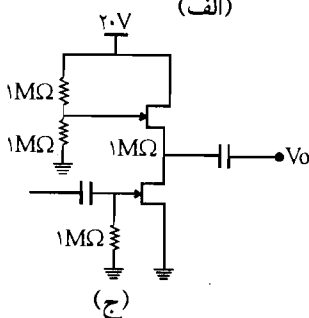
(خروجی از بین نقاط D_1 و D_2 گرفته می‌شود.)

۱۴- در مدارهای شکل م. ۱۴ فرض کنید برای

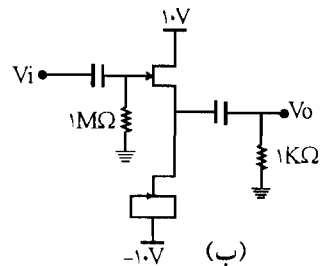
همه JFET ها، $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$ و $|V_p| = 2 \text{ V}$ است. A_V را محاسبه کنید.



(الف)



(ج)



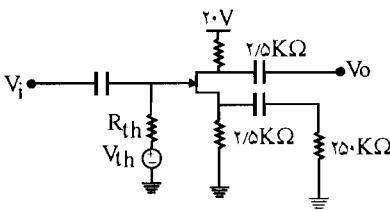
(ب)

راه حل:

الف) مدار معادل تونن را در گیت اجرا می‌کنیم:

$$\begin{cases} R_{th} = 1\text{M}\Omega + \frac{100 \times 400}{100 + 400} = 1080\text{K}\Omega \\ V_{th} = 20 \times \frac{100}{400 + 100} = 4\text{V} \end{cases}$$

پس مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



چون JFET از نوع N کانال می‌باشد V_p منفی می‌باشد.

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_{th} - 2/5 I_D = 4 - 2/5 I_D$$

$$\text{ما داریم } I_D \text{ با توجه به رابطه } I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 = 8 \left(1 - \frac{4 - 2/5 I_D}{-2}\right)^2$$

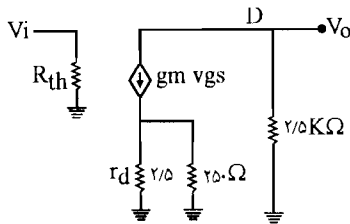
$$\Rightarrow 25 I_D^2 - 122 I_D + 144 = 0$$

با حل این معادله درجه (2) مقادیر زیر برای I_D به دست می‌آید:

$$\Rightarrow \begin{cases} I_D = 2 \Rightarrow V_{GS} = 4 - 2/5 \times 2 = -1 > V_p \Rightarrow \text{قابل قبول می‌باشد} \\ I_D = 2/8 \Rightarrow V_{GS} = 4 - 2/5 \times 2/8 = -3/2 < V_p \Rightarrow \text{قابل قبول نمی‌باشد} \end{cases}$$

$$g_m = \frac{-2 I_{DSS}}{V_p} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right) = \frac{-2 \times 8}{-2} \left(1 - \frac{-1}{-2}\right) = 4 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:



$$V_O = -g_m V_{gs} \times 2/5 = -4 \times 2/5 \times V_{gs} = -10 V_{gs} (I)$$

$$V_{gs} = V_g - V_s = V_i - (2/5 K\Omega \parallel 0/24 K\Omega) \times g_m V_{gs}$$

$$\Rightarrow V_i = V_{gs} + 0/32 \times 4 V_{gs} = V_{gs} (1 + 0/92) = 1/92 V_{gs} \quad (II)$$

رابطه (II) را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

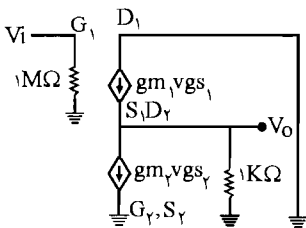
$$(I) \Rightarrow V_O = -10 \times \frac{V_i}{1/92} \Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{-10}{1/92} = -5/2$$

(ب) در مدار شکل ب چون گیت و سورس Q_2 به هم وصل می‌باشند پس $V_{GS_2} = 0$ می‌باشد بنابراین:

$$I_{D_1} = I_{D_2} = I_{DSS}$$

$$g_{m_1} = g_{m_2} = \frac{-2 I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) = \frac{-2 \times 8}{-2} (1 - 0) = 8 \frac{mA}{V}$$

پس مدار معادل مطابق شکل زیر می‌باشد:



$$V_{gs_2} = 0 \Rightarrow g_{m_2} V_{gs_2} = 0 \Rightarrow V_O = g_{m_1} V_{gs_1} \times 1 = 8 V_{gs_1}$$

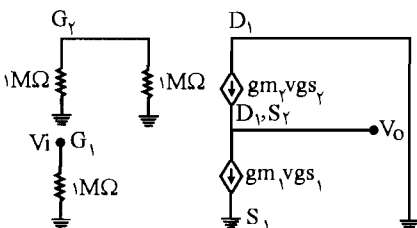
$$V_{gs_1} = V_{g_1} - V_{s_1} = V_i - V_O = V_i - 8 V_{gs_1} \Rightarrow V_i = 9 V_{gs_1}$$

$$\Rightarrow V_{AV} = \frac{V_O}{V_i} = \frac{8 V_{gs_1}}{9 V_{gs_1}} = 0/89$$

(ج) در مدار شکل ج داریم: (در JFET پایینی Q_1):

$$V_{GS_1} = V_{G_1} - V_{S_1} = 0 \dots 0 \Rightarrow I_{D_1} = I_{DSS}$$

$$I_{D_1} = I_{D_2} = I_{DSS} = 8 mA \Rightarrow g_{m_1} = g_{m_2} = \frac{-2 I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) = 8 \frac{mA}{V}$$



مدار معادل به صورت زیر می‌باشد:

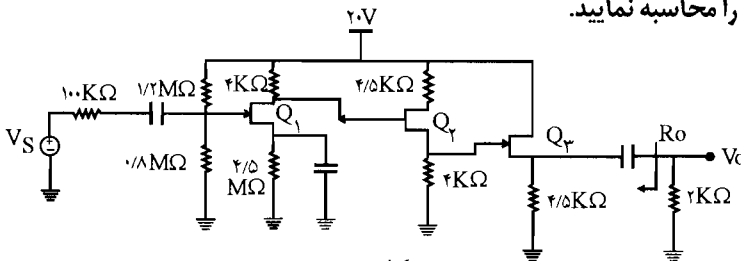
$$g_{m_1} V_{gs_1} = \lambda (V_{g_1} - V_{s_1}) = \lambda (V_i - 0) = \lambda V_i \quad \Leftrightarrow \begin{cases} V_{g_1} = V_i \\ V_{s_1} = 0 \end{cases}$$

$$g_{m_2} V_{gs_2} = \lambda (V_{g_2} - V_{s_2}) = \lambda (0 - V_O) = -\lambda V_O \quad \Leftrightarrow \begin{cases} V_{g_2} = 0 \\ V_{s_2} = V_O \end{cases}$$

از طرفی دو منبع جریان برابر می‌باشند پس:

$$g_{m_1} V_{gs_1} = g_{m_2} V_{gs_2} \Rightarrow \lambda V_i = -\lambda V_O \Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = -1$$

۱۵- برای همه JFET های مدار شکل م- ۱۵، $I_{DSS} = 4 \text{ mA}$ و $|V_P| = 2 \text{ V}$ است. برای این مدار A_{V_S} ، R_i و R_o را محاسبه نمایید.



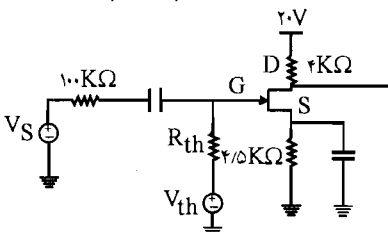
شکل م-۱۵

☑ راه حل:

مدار معادل تونن در ورودی Q_1 (JFET) اول را می‌نویسیم:

$$\begin{cases} R_{th} = 1/2 \text{ M}\Omega \parallel 4/5 \text{ M}\Omega = \frac{1/2 \times 4/5}{1/2 + 4/5} = 0/48 \text{ M}\Omega \\ V_{th} = \frac{20 \times 4/5}{1/2 + 4/5} = 8 \text{ V} \end{cases}$$

پس مدار معادل تا قبل از Q_2 به شکل زیر در می‌آید:



$|V_P| = +2 \text{ V}$ می‌باشد و چون در JFET کانال N، $V_P < 0$ می‌باشد پس $V_P = -2 \text{ V}$ در نظر

گرفته می‌شود.) $V_{GS_1} = V_{G_1} - V_{S_1}$

$$\text{KVL: } V_{GS_1} = 8 - 4/5 I_{D_1}$$

$$\text{از طرفی: } I_{D_1} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS_1}}{V_P}\right)^2 = 4 \left(1 - \frac{8 - 4/5 I_{D_1}}{-2}\right)^2 \Rightarrow$$

$$I_{D_1} = (2 + 8 - 4/5 I_{D_1})^2 = (10 - 4/5 I_{D_1})^2$$

با حل این معادله درجه (۲) مقادیر زیر برای I_{D_1} به دست می‌آید:

$$\Rightarrow \begin{cases} I_{D_1} = 2/58 \text{ mA} \Rightarrow V_{GS_1} = 8 - 4/5 \times 2/58 = -3/61 \text{ V} < V_P \Rightarrow \text{قابل قبول نمی‌باشد} \\ I_{D_1} = 1/915 \text{ mA} \Rightarrow V_{GS_1} = 8 - 4/5 \times 1/915 = -0/62 \text{ V} > V_P \Rightarrow \text{قابل قبول می‌باشد} \end{cases}$$

$$\Rightarrow g_{m_1} = \frac{-2 I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS_1}}{V_P}\right) = \frac{-2 \times 4}{-2} \left(1 - \frac{-0/62}{-2}\right) = 2/76 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

حال در Q_2 داریم:

$$V_{GS_2} = V_{G_2} - V_{S_2}$$

$$\begin{cases} V_{S_2} = 20 - 4/5 I_{D_2} \\ V_{G_2} = 20 - 4 I_{D_1} = 20 - 4/915 = 12/34 \text{ V} \end{cases}$$

$$V_{GS_2} = 12/34 - (20 - 4/5 I_{D_2}) = 4/5 I_{D_2} - 7/66$$

$$\text{از طرفی: } I_{D_2} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS_2}}{V_P}\right)^2 = 4 \left(1 - \frac{4/5 I_{D_2} - 7/66}{+2}\right)^2$$

چون Q_2 از نوع کانال P می‌باشد پس V_P عدد مثبت می‌باشد. ($V_P = 2\text{V}$)

$$\Rightarrow I_{D_2} = (2 + 7/66 - 4/5 I_{D_2})^2 \Rightarrow 20/25 I_{D_2}^2 - 87/94 I_{D_2} + 93/32 = 0$$

با حل این معادله درجه (۲)، مقادیر زیر برای I_{D_2} به دست می‌آید:

$$\Rightarrow \begin{cases} I_{D_2} = 2/497 \text{ mA} \\ I_{D_2} = 1/845 \text{ mA} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{GS_2} = 4/5 \times 2/497 - 7/66 = 3/58 > V_P \Rightarrow \text{قابل قبول نمی‌باشد} \\ V_{GS_2} = 4/5 \times 1/845 - 7/66 = 0/643 < V_P \Rightarrow \text{قابل قبول می‌باشد} \end{cases}$$

$$g_{m_r} = \frac{2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS_r}}{V_P}\right) = \frac{2 \times 4}{2} \left(1 - \frac{0.643}{2}\right) = 2.714 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

در Q_r داریم:

$$V_{GS_r} = V_{G_r} - V_{S_r}$$

$$\begin{cases} V_{G_r} = 4I_{D_r} = 4 \times 1/845 = 7/38 \text{ V} \\ V_{S_r} = 4/5 I_{D_r} \end{cases} \Rightarrow V_{GS_r} = 7/38 - 4/5 I_{D_r}$$

Q_r از نوع کانال N می باشد پس $V_P = -2\text{V}$ می باشد.

$$I_{D_r} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS_r}}{V_P}\right)^2 = 4 \left(1 - \frac{7/38 - 4/5 I_{D_r}}{-2}\right)^2$$

$$\Rightarrow 20/25 I_{D_r}^2 - 85/42 I_{D_r} + 87/98 = 0$$

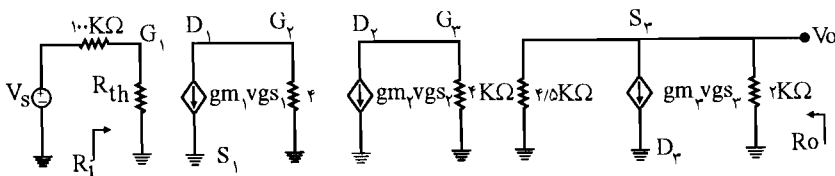
با حل این معادله درجه (2) مقادیر زیر برای I_{D_r} به دست می آید:

قابل قبول نمی باشد

$$\Rightarrow \begin{cases} I_{D_r} = 2/43 \Rightarrow V_{GS_r} = 7/38 - 4/5 I_{D_r} = 7/38 - 4/5 \times 2/43 = -3/555 < V_P \Rightarrow \uparrow \\ I_{D_r} = 1/787 \Rightarrow V_{GS_r} = 7/38 - 4/5 \times 1/787 = -0.66 > V_P \Rightarrow \end{cases} \text{ قابل قبول می باشد}$$

$$\Rightarrow g_{m_r} = \frac{-2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS_r}}{V_P}\right)^2 = \frac{-2 \times 4}{-2} \left(1 - \frac{-0.66}{-2}\right) = 2.68 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

حال مدار معادل شکل م - 15 را رسم می کنیم:



طبق مدار معادل داریم:

$$V_O = V_{S_r} \quad (I)$$

$$V_{S_r} = g_{m_r} V_{g_s_r} \times (2\text{K}\Omega \parallel 4/5\text{K}\Omega) = 2.68 \times (V_{g_r} - V_{S_r}) \times \left(\frac{2 \times 4/5}{2 + 4/5}\right)$$

$$\Rightarrow V_{S_r} = 3/71 (V_{g_r} - V_{S_r}) \Rightarrow 4/71 V_{S_r} = 3/71 V_{g_r} \Rightarrow V_{S_r} = \frac{3/71}{4/71} V_{g_r} \quad (II)$$



POWEREN.IR

از طرفی: $V_{g_r} = -g_{m_r} V_{g_{s_r}} \times 4K\Omega = -2/\sqrt{1} \times 4 \times (V_{g_r} - V_{s_r}) = -10/84 \times V_{g_r}$ (III)

از طرفی: $V_{g_r} = -g_{m_1} V_{g_{s_1}} \times 4K\Omega = -2/\sqrt{6} \times 4 \times (V_{g_1} - V_{s_1}) = -11/0.4 \times V_{g_1}$ (IV)

از طرفی: $V_{g_{s_1}} = V_{g_1} - V_{s_1} = V_{g_1} - 0 = V_{g_1}$

ولتاژ با استفاده از تقسیم ولتاژ $V_{g_1} = V_s \times \frac{R_{th}}{R_{th} + 100} = V_s \times \frac{0.48 \times 10^3}{0.48 \times 10^3 + 100} = 0.83 V_s$ (V)

با جایگذاری روابط (V) و (IV) و (III) و (II) در رابطه (I) داریم:

$$V_O = V_{s_r} = \frac{3/\sqrt{1}}{4/\sqrt{1}} V_{g_r} = \frac{3/\sqrt{1}}{4/\sqrt{1}} \times (-10/84) V_{g_r} = \frac{3/\sqrt{1}}{4/\sqrt{1}} \times (-10/84) \times (-11/0.4) V_{g_1}$$

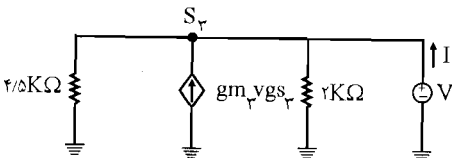
$$= \frac{3/\sqrt{1}}{4/\sqrt{1}} \times (-10/84) \times (-11/0.4) \times 0.83 V_s$$

$$\Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = \frac{V_O}{V_s} = \frac{3/\sqrt{1}}{4/\sqrt{1}} \times 10/84 \times 11/0.4 \times 0.83 = 78/24$$

$$R_i = 0.48 M\Omega = 480 K\Omega$$

با توجه به مدار معادل داریم:

برای به دست آوردن R_O یک منبع ولتاژ V را در خروجی قرار می‌دهیم.



$$V_{s_r} = V$$

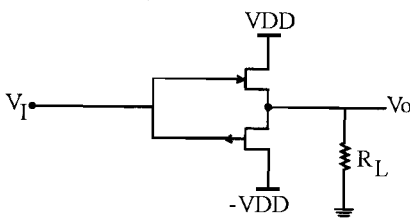
$$g_{m_r} V_{g_{s_r}} = g_{m_r} (V_{g_r} - V_{s_r})$$

$$= g_{m_r} \times (0 - V_{s_r}) = -g_{m_r} V$$

$$I = -g_{m_r} V_{g_{s_r}} + \frac{V}{4/5} + \frac{V}{2} = -(-g_{m_r} V) + V \left(\frac{1}{4/5} + \frac{1}{2} \right)$$

$$= V \left(g_{m_r} + \frac{1}{4/5} + \frac{1}{2} \right) = \left(2/68 + \frac{1}{4/5} + \frac{1}{2} \right) V$$

$$\Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{\left(2/68 + \frac{1}{4/5} + \frac{1}{2} \right)} = 0.294 K\Omega \Rightarrow R_O = 294 \Omega$$



شکل م-۱۶

۱۶- یک سورس فالوئر مکمل از به هم پیوستن

JFET کانال N و یک JFET کانال P مطابق شکل

م-۱۶ حاصل می‌شود (JFET ها مشابه هستند).

به ازای $V_I = 0$ چه جریان ثابتی از JFET ها

عبور می‌کند؟ مقاومت خروجی سورس فالوئر

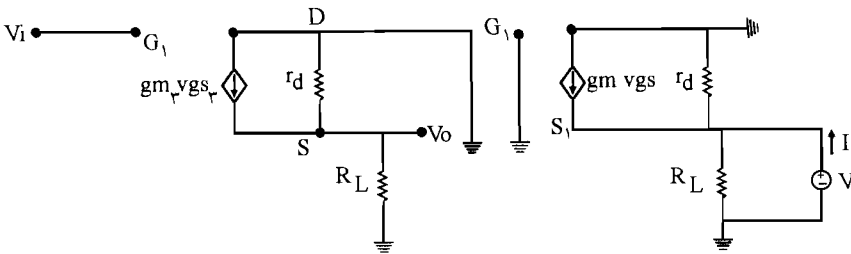
چقدر است؟

☑ (اه هل):

به ازای $V_i = 0$ ، به دلیل متقارن بودن مدار و مشابه بودن JFET ها، V_O برای هر دو ترانزیستور صفر می باشد.

$$V_O = 0 \Rightarrow V_{GS_1} = V_{GS_2} = 0 \Rightarrow I_{D_1} = I_{D_2}$$

مدار معادل:



برای محاسبه مقاومت خروجی یک منبع ولتاژ در خروجی در دو سر R_L قرار می دهیم و V_i را صفر می کنیم.

$$V_{gs_1} = V_{g_1} - V_{s_1} = 0 - V = -V$$

$$\text{فرض } g_{m_1} = g_{m_2} = g_m \Rightarrow I = \frac{V}{R_L} + \frac{V}{r_d} - g_m V_{gs} = \frac{V}{R_L} + \frac{V}{r_d} - g_m (-V)$$

$$= \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{r_d} + g_m \right) \times V \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{r_d} + g_m \right)}$$

۱۷- یک ترانزیستور NMOS نوع تهی با $V_P = -1V$ و $V_{GS} = 1V$ و $I_{DSS} = 1mA$ کار می کند. حداقل مقدار V_{DS} ، برای اینکه این ترانزیستور در ناحیه اشباع کار کند چقدر است؟ مقدار I_D چقدر می شود؟

☑ (اه هل):

$$\text{در ناحیه اشباع: } V_{GD} \leq -|V_P| \Rightarrow V_{GD} \leq -1 \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \leq -1$$

$$\Rightarrow 1 - V_{DS} \leq -1 \Rightarrow V_{DS} \geq 2V$$

حداقل مقدار V_{DS} برابر $2V$ به دست آمد.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 = 1 \times \left(1 - \frac{1}{-1} \right)^2 = 4mA$$

۱۸- یک ترانزیستور PMOS نوع تهی با $V_P = 2V$ و $I_{DSS} = 8mA$ در $V_{GS} = -1V$ کار می کند.

حداقل مقدار V_{DS} برای اینکه ترانزیستور در ناحیه اشباع کار کند چقدر است؟ مقدار I_D چقدر می‌شود؟

$$\text{در ناحیه اشباع (PMOS): } \begin{aligned} &V_{DG} < -|V_P| \\ &V_{GD} \geq V_P \Rightarrow V_{GD} \geq 2 \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \geq 2 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow -1 - V_{DS} \geq 2 \Rightarrow V_{DS} \leq -3V$$

حداقل مقدار $V_{DS} = -3V$ می‌باشد (حداقل قدر مطلق V_{DS})

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = 8 \left(1 - \frac{-1}{-2}\right)^2 = 18 \text{ mA}$$

۱۹- یک ترانزیستور NMOS نوع تهی با $V_P = -0.5V$ و $I_{DSS} = 0.5 \text{ mA}$ در $V_{GS} = 1.0V$ کار می‌کند. جریان درین در ناحیه اشباع چقدر خواهد بود؟ چه ولتاژ درین - سورس مورد نیاز است؟

✓ (۱۹ هـ):

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 = 0.5 \left(1 - \frac{1.0}{-0.5}\right)^2 = 22/0.5 \text{ mA}$$

به دست آوردن ولتاژ V_{DS} :

$$\text{در ناحیه اشباع NOMS } V_{GD} \leq -|V_P| \Rightarrow V_{GD} \leq -0.5 \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \leq -0.5$$

$$\Rightarrow 1.0 - V_{DS} \leq -0.5 \Rightarrow V_{DS} \geq 1.5V$$

۲۰- یک ترانزیستور NMOS نوع ارتقایی با $V_T = 2V$ قرار است با $V_{GS} = 4V$ در ناحیه اشباع کار کند. به ازای چه V_{DS} حداقلی این حالت امکان دارد؟

$$\text{NMOS نوع ارتقایی در ناحیه اشباع: } V_{GD} \leq V_T \Rightarrow V_{GD} \leq 2V \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} \leq 2V$$

$$\Rightarrow 4 - V_{DS} \leq 2V \Rightarrow V_{DS} \geq 2V$$

حداقل مقدار V_{DS} برابر $2V$ می‌باشد.

۲۱- یک ترانزیستور PMOS نوع ارتقایی با $V_T = -1V$ به عنوان یک دیود مورد استفاده قرار می‌گیرد (گیت درین آن به هم وصل شده است). به ازای ولتاژ $2V$ این دیود جریان 10 mA را از خود عبور می‌دهد. افت ولتاژ دیود در جریان‌های 1 mA و 0.1 mA چقدر است؟

✓ (۲۱ هـ):

طبق فرض مسئله گیت و درین به هم متصل می‌باشند پس $V_{GD} = 0$ و در نتیجه $V_{GS} = V_{DS}$

می‌باشد و چون $V_T = -1V$ است و $V_{GD} > V_T$ می‌باشد پس ترانزیستور PMOS در ناحیه اشباع کار می‌کند و در ناحیه اشباع رابطه I_D به صورت زیر می‌باشد:

$$I_D = \frac{K}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$\begin{cases} V_{GS} = V_{DS} = V_D - V_S = V_D = -2V \\ I_D = 10 \text{ mA} \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_D = \frac{K}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow 10 \text{ mA} = \frac{K}{\gamma} (-2 + 1)^2 \Rightarrow K = 20 \frac{\text{mA}}{V^2}$$

افت ولتاژ دیود:

$$V_{GS} = V_{DS}$$

$$I_D = 1 \text{ mA}$$

$$I_D = \frac{K}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow 1 = \frac{20}{\gamma} (V_{DS} - (-1))^2$$

$$\Rightarrow (V_{DS} + 1)^2 = 0.1 \Rightarrow V_{DS} + 1 = \pm 0.32$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{DS} = -1.32 \text{ V} \\ V_{DS} = -0.68 \text{ V} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{GS} = -1.32 \text{ V} \\ V_{GS} = -0.68 \text{ V} \end{cases}$$

به ازای $V_{GS} = -0.68 \text{ V}$ ، $V_{GS} < V_T$ می‌باشد که قابل قبول نمی‌باشد چون در PMOS در حالت اشباع باید $V_{GS} < V_T$ شود. ولی مقدار $V_{GS} = -1.32 \text{ V}$ قابل قبول می‌شود. پس ولتاژ دو سر دیود $V_{GS} = 1.32 \text{ V}$ می‌باشد.

$$I_D = 0.1 \text{ mA} \Rightarrow 0.1 = \frac{20}{\gamma} (V_{DS} + 1)^2 \Rightarrow (V_{DS} + 1)^2 = 0.01 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{DS} = -1.1 \text{ V} \\ V_{DS} = -0.9 \text{ V} \end{cases}$$

مانند دلایل حالت قبل $V_{DS} = -0.9 \text{ V}$ قابل قبول نمی‌باشد و $V_{DS} = -1.1 \text{ V}$ قابل قبول می‌باشد. پس ولتاژ دو سر دیود 1.1 V می‌باشد.

۲۲ - دیود مسأله ۷ - ۲۱ به صورت سری با یک مقاومت $5 \text{ K}\Omega$ به یک منبع ولتاژ 10 V متصل شده

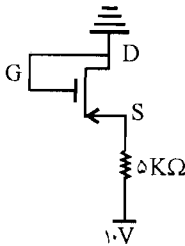
است. ولتاژ دو سر دیود چند ولت است؟

☑ راه حل:

در صورت مسأله ۲۱ داشتیم گیت و درین PMOS به هم وصل شده است و به ازای ولتاژ ۲ ولت دیود شدت جریان ۱۰ mA را از خود عبور می دهد و چون گیت و درین به هم متصل می باشند $V_{GS} = V_{DS}$ می شود پس؛

$$V_{GS} = V_{DS}$$

$$I_D = \frac{k}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow 10 \text{ mA} = \frac{K}{\gamma} (-2 + 1)^2 \Rightarrow K = 20 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$



با توجه به صورت این مسأله شکل مدار به صورت زیر می باشد:

به دست آوردن ولتاژ دو سر دیود: $V_{DS} = ?$

$$I_D = \frac{K}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{20}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2 = 10 (V_{DS} + 1)^2 \quad (I)$$

$$\text{KVL: } V_{DS} = -10 + 5I_D \Rightarrow I_D = \frac{V_{DS} + 10}{5} \quad (II)$$

در رابطه (I) به جای I_D مقدار I_D به دست آمده از رابطه (II) را قرار می دهیم:

$$\frac{V_{DS} + 10}{5} = 10 (V_{DS} + 1)^2 \Rightarrow V_{DS} + 10 = 50 (V_{DS} + 1)^2$$

$$\Rightarrow 50 V_{DS}^2 + 99 V_{DS} + 40 = 0 \Rightarrow$$

$$\begin{cases} V_{DS} = -0.56 \\ V_{DS} = -1.41 \end{cases}$$

با حل این معادله مقادیر زیر برای V_{DS} به دست می آید:

PMOS قابل قبول نمی باشد چون در این صورت $V_{GS} > V_T$ می شود در حالی که در PMOS در حالت اشباع باید $V_{GS} < V_T$ باشد. $V_{DS} = -1.41$ قابل قبول می باشد چون در این صورت

$V_{GS} < V_T$ می باشد پس مقدر ولتاژ دو سر دیود برابر است با: $V_{DS} = 1.41 \text{ V}$

۲۳ - دیود طراحی شده در مسأله ۷ - ۲۱ قرار است به صورت یک تنظیم کننده ولتاژ موازی که توسط یک جریان ۱۰ mA تغذیه می شود به کار رود. ولتاژ خروجی تنظیم کننده چقدر است؟ مقاومت خروجی تنظیم کننده چقدر است در صورتی که یک جریان بار ۱ mA از تنظیم کننده کشیده شود (توسط یک R_L موازی) افت ولتاژ دو سر آن چقدر خواهد بود؟

راه حل:

در مسأله ۲۱ به دست آوردیم:

$$V_{GS} = V_{DS} \quad , \quad I_D = \frac{k}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{\gamma_0}{\gamma} (V_{DS} - V_T)^2$$

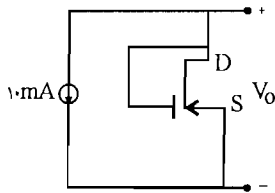
$$I_D = 10 \cdot (1 - V_O)^2 \quad \Leftarrow \quad V_{DS} = -V_D = -V_O \quad , \quad V_T = -1 \quad \text{از طرفی}$$

$$I_D = 10 \text{ mA} \Rightarrow I_D = 10 \cdot (1 - V_O)^2 \Rightarrow 10 = 10 \cdot (1 - V_O)^2$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_O = 0 \text{ V} \\ V_O = 2 \text{ V} \end{cases}$$

$V_O = 0 \text{ V}$ قابل قبول نمی‌باشد چون در این صورت:

$$V_O = -V_{DS} = -V_{GS} = 0 \text{ V} > V_T$$



در حالی که در PMOS در حالت اشباع باید $V_{GS} < V_T$ شود.

ولی $V_O = 2 \text{ V}$ قابل قبول می‌باشد چون:

$$V_O = -V_{DS} = -V_{GS} = +2 \text{ V} \Rightarrow V_{GS} = -2 \text{ V} < V_T$$

برای به دست آوردن مقاومت خروجی:

برای محاسبه مقاومت خروجی یک منبع ولتاژ V در خروجی گذاشته و I آن محاسبه می‌شود:

$$I = 10 \cdot (1 - V)^2$$

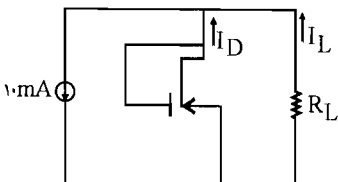
$$R_O = \frac{dV}{dI}$$

چون رابطه بین V و I خطی نمی‌باشد پس داریم:

$$\Rightarrow R_O = \frac{dV}{10 \times 2 \times (1 - V) \times (-dV)} = \frac{1}{-20 \cdot (1 - V)}$$

$$(در حالت قبل به دست آمده) \quad V = 2 \text{ V} \Rightarrow R_O = \frac{1}{-20 \cdot (1 - 2)} = \frac{1}{20} \text{ K}\Omega = 50 \Omega$$

حال اگر یک جریان بار 1 mA از تنظیم کننده توسط یک مقاومت R_L موازی کشیده شود:



$$I = I_D + I_L \Rightarrow 10 \text{ mA} = I_D + 1 \Rightarrow I_D = 9 \text{ mA}$$

$$I_D = 10(1 - V_O)^2 \Rightarrow 9 = 10(1 - V_O)^2 \Rightarrow \begin{cases} V_O = 0.05 \text{ V} \\ V_O = 1/95 \text{ V} \end{cases}$$

$V_O = 0.05 \text{ V}$ قابل قبول نمی باشد چون در این صورت:

$$V_{GS} = -V_O = -0.05 \Rightarrow V_{GS} < V_T$$

در حالی که در PMOS در حالت اشباع باید $V_{GS} < V_T$ شود $V_O = 1/95 \text{ V}$ قابل قبول می باشد چون:

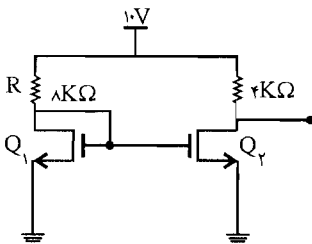
$$V_{GS} = -V_O = -1/95 \text{ V} < V_T = -1 \text{ V}$$

پس $V_O = 1/95 \text{ V}$

$$\Delta V_O = 2 - 1/95 = 0.05 \text{ V} \Rightarrow \Delta V_O = 50 \text{ mV}$$

۲۴- دو NMOS مشابه، با $V_T = 1 \text{ V}$ و $K = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$ به صورت شکل م-۲۴ به هم وصل شده اند. ولتاژ

خروجی V_O چند ولت است؟ اگر مقاومت R به $2 \text{ K}\Omega$ کاهش یابد ولتاژ V_O چقدر خواهد شد؟



شکل م-۲۴

☑ (۱۵ نل):

$$V_O = 10 - 4I_{D_2} \quad (I)$$

$$Q_1: V_{GS_1} = V_{G_1} - V_{S_1} = 10 - 1I_{D_1} - 0 = 10 - 1I_{D_1}$$

$$I_{D_1} = \frac{K}{\gamma} (V_{GS_1} - V_T)^2 = \frac{1}{\gamma} (10 - 1I_{D_1} - 1)^2 \Rightarrow$$

$$2I_{D_1} = (9 - 1I_{D_1})^2 \Rightarrow I_{D_1} = \begin{cases} 1/33 \text{ mA} \\ 0.95 \text{ mA} \end{cases}$$

$I_{D_1} = 0.95 \text{ mA}$ قابل قبول نمی باشد چون در این حالت $V_{GS_1} = 10 - 1I_{D_1} = -0.64 \text{ V}$ می شود که

از V_T کوچکتر می باشد در حالی که در NMOS باید $V_{GS} > V_T$ باشد پس $I_{D_1} = 1/33$ قابل قبول

نمی باشد ولی با $I_{D1} = 0.95 \text{ mA}$ می باشد پس $V_{GS1} > V_{T1}$ قابل قبول می باشد.

$$I_{D1} = I_{D2} = 0.95 \stackrel{(1)}{\Rightarrow} V_O = 10 - 4 \times 0.95 = 6.2 \text{ V}$$

حال اگر $R = 4 \text{ K}\Omega$ باشد:

$$V_{GS1} = V_{G1} - V_{S1} = 10 - 4 I_{D1}$$

$$I_{D1} = \frac{K}{\gamma} (V_{GS1} - V_{T1})^2 = \frac{1}{\gamma} (10 - 4 I_{D1} - 1)^2 \Rightarrow$$

$$2 I_{D1} = (9 - 4 I_{D1})^2 \Rightarrow I_{D1} = \begin{cases} 2/85 \text{ mA} \\ 1/78 \text{ mA} \end{cases}$$

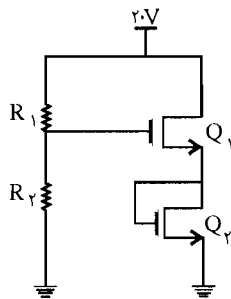
با $I_{D1} = 2/85$ داریم: $V_{GS1} = 10 - 4 I_{D1} = -1/4 \text{ V}$ می بینیم که $V_{GS1} < V_{T1}$ می باشد که از V_{T1}

کوچکتر است پس $I_{D1} = 2/85$ قابل قبول نمی باشد ولی با $I_{D1} = 1/78$ داریم $V_{GS1} = 2/88$ که از V_{T1}

بزرگتر است پس قابل قبول می باشد.

$$I_{D1} = I_{D2} = 1/78 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow V_O = 10 - 4 I_{D2} = 10 - 4 \times 1/78 = 2/88 \text{ V}$$



شکل م-۲۵

۲۵- دو MOS مشابه به صورت شکل م- ۲۵ به هم متصل شده اند. در

صورتی که $V_{T1} = 2 \text{ V}$ و $K = 0.5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$ باشد مقاومت های R_1 و R_2 را

طوری به دست آورید که جریان 1 mA از ترانزیستورها عبور کرده و در

گیت Q_1 حداکثر مقاومت ممکن را داشته باشیم. بزرگترین مقاومت در

دسترس $10 \text{ M}\Omega$ است. در صورتی که در اثر تغییر فرآیند ساخت مقدار

V_{T1} به $1/5 \text{ V}$ کاهش یابد، جریان I_{D1} چه مقدار خواهد شد؟ (در

صورتی که به جای Q_2 از یک مقاومت $(R_S = 1 \text{ K}\Omega)$ استفاده

می کردیم جریان I_{D1} هنگامی که V_{T1} ترانزیستور Q_2 از

به $1/5$ ولت تغییر می کرد چه مقدار می باشد؟

(۱۰) اه حل:

در MOS (Q_2) چون گیت و درین به هم متصل می باشند $V_{GD} = 0 \text{ V}$ می باشد پس $V_{GS} = V_{DS}$

می شود و چون $V_{T1} = 2 \text{ V} < V_{GD} = 0 \text{ V}$ می باشد پس ترانزیستور در ناحیه اشباع می باشد پس داریم:

$$I_{D2} = \frac{K_2}{\gamma} (V_{GS2} - V_{T2})^2 \Rightarrow 1 = \frac{0.5}{\gamma} (V_{GS2} - 2)^2 \Rightarrow \begin{cases} V_{GS2} = 4 \text{ V} \\ V_{GS2} = 0 \text{ V} \end{cases} \text{ قابل قبول نمی باشد}$$

اگر $V_{GS} = 0V$ باشد در این صورت $V_{GS} < V_T$ می‌باشد پس قابل قبول نمی‌باشد چون در NMOS باید $V_{GS} > V_T$ شود پس $V_{GS} = 4V$ قابل قبول می‌باشد.

$$V_{GS_r} = 4V \Rightarrow V_{G_r} - V_{S_r} = 4V \Rightarrow V_{G_r} - 0 = 4 \Rightarrow V_{G_r} = 4V$$

از طرفی داریم: $4V = V_{G_r} = V_{D_r} = V_{S_1}$ ، پس برای MOS (Q_1) داریم:

$$V_{DS_1} = 20 - V_{S_1} = 20 - 4 = 16V$$

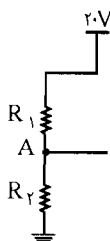
$$I_{D_1} = \frac{k_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 \Rightarrow 1 = \frac{1/5}{\gamma} (V_{GS_1} - 2)^2 \Rightarrow \begin{cases} V_{GS_1} = 4V \\ V_{GS_1} = 0V \end{cases} \quad \text{قابل قبول نمی‌باشد}$$

مثل حالت قبل $V_{GS_1} = 0V$ قابل قبول نمی‌باشد و $V_{GS_1} = 4V$ قابل قبول می‌باشد.

$$V_{GS_1} = 4V \Rightarrow V_{G_1} - V_{S_1} = 4V \Rightarrow V_{G_1} - 4 = 4 \Rightarrow V_{G_1} = 8V$$

$$V_A = 8V$$

با استفاده از قانون تونن در این مدار داریم:



$$\Lambda = \frac{20 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow 8R_1 + 8R_2 = 20 \cdot R_2 \Rightarrow R_1 = 1/5 R_2$$

$$\text{از طرفی: } R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1/5 R_2 \times R_2}{1/5 R_2 + R_2} = \frac{3}{5} R_2$$

چون طبق فرض مسئله می‌خواهیم در گیت Q_1 حداکثر مقاومت ممکن را داشته باشیم پس باید R_1 و یا R_2 ماکزیمم باشند و چون گفته حداکثر مقاومت ممکن $10M\Omega$ باشد پس داریم:

$$R_1 = 20M\Omega \Rightarrow R_1 = 1/5 R_2 \Rightarrow R_2 = 6/67M\Omega$$

$$\begin{cases} I_{D_r} = \frac{k}{\gamma} (V_{GS_r} - V_T)^2 \\ I_{D_1} = \frac{k}{\gamma} (V_{GS_1} - V_T)^2 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{اگر } V_T = 1/5V \text{ باشد:} \\ I_{D_r} = I_{D_1} \text{ از طرفی} \end{array}$$

$$\Rightarrow \frac{K}{\gamma} (V_{GS_r} - V_T)^2 = \frac{K}{\gamma} (V_{G_1} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS_r} = V_{G_1} \Rightarrow$$

$$V_{G_r} - V_{S_r} = V_{G_1} - V_{S_1} \Rightarrow V_{S_1} - 0 = V_{th} - V_{S_1} \Rightarrow V_{S_1} = \frac{V_{th}}{2} = \frac{\Lambda}{2} = 4V$$

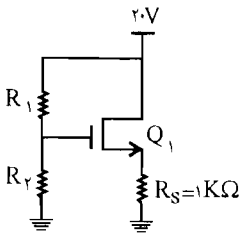


$$\Rightarrow V_{G_r} = V_{S_1} = 4V \Rightarrow V_{GS_r} = 4 - 0 = 4V$$

$$\Rightarrow I_D = \frac{0.5}{2} (4 - 1/5)^2 = 1/56 \text{ mA}$$

$$\Delta I_D = 1/56 - 1 \text{ mA} = 0.56 \text{ mA}$$

حال اگر به جای MOS Q_r مقاومت $1 \text{ K}\Omega$ قرار دهیم طبق شکل مقابل داریم:



$$I_D = \frac{K}{2} (V_{GS_1} - V_{T_r})^2 = \frac{0.5}{2} (V_{GS_1} - 1/5)^2$$

$$= \frac{1}{4} (V_{G_1} - V_{S_1} - 1/5)^2$$

$$\text{از طرفی: } \begin{cases} V_{S_1} = R_S \times I_D \\ V_{G_1} = V_{th} = 8V \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_D = \frac{1}{4} (8 - 1 \times I_D - 1/5)^2 \Rightarrow$$

با حل این معادله مقادیر زیر برای I_D به دست می‌آید:

$$I_D = \begin{cases} 3/0.2 \text{ mA} \\ 13/97 \text{ mA} \end{cases}$$

$$I_D = 13/97 \Rightarrow V_{GS} = 8 - 1 \times 13/97 < 0$$

$I_D = 13/97$ قابل قبول نمی‌باشد.

چون در این حالت V_{GS} یک عدد منفی به دست می‌آید که از V_{T_r} کوچکتر می‌باشد پس این مقدار I_D قابل قبول نمی‌باشد.

$$I_D = 3/0.2 \Rightarrow V_{GS} = 8 - 1 \times 3/0.2$$

با $I_D = 3/0.2$ مقداری که برای V_{GS} به دست می‌آید عددی است که از V_{T_r} بزرگتر است پس این مقدار I_D قابل قبول می‌باشد.

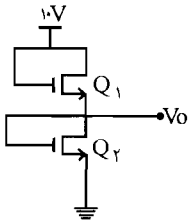
حال اگر $V_{T_r} = 2V$ شود داریم:

$$I_D = \frac{1}{4} (8 - I_D - 2) \Rightarrow I_D = \begin{cases} 2/71 \\ 13/29 \end{cases}$$

مانند دلایل حالت قبل $I_D = 13/29$ قابل قبول نمی‌باشد و $I_D = 2/71$ قابل قبول است پس

$$I_D = 2/71 \Rightarrow \Delta I_D = 3/0.2 - 2/71 = 0.31 \text{ mA}$$

۲۶- در مدار شکل م- ۲۶، در حالت‌های زیر V_O را محاسبه نمایید.



شکل م- ۲۶

الف) $V_{T_1} = V_{T_2}$ و $K_1 = K_2$

ب) $V_{T_1} = V_{T_2}$ و $K_1 = \frac{K_2}{4}$

ج) $V_{T_1} = 4V_{T_2}$ و $K_1 = K_2$

☑ راه حل:

الف) $I_{D_1} = I_{D_2} \Rightarrow \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{\gamma} (V_{GS_2} - V_{T_2})^2$

از طرفی: $\begin{cases} K_1 = K_2 \\ V_{T_1} = V_{T_2} \end{cases} \Rightarrow \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_2} - V_{T_1})^2$

$\Rightarrow (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = (V_{GS_2} - V_{T_1})^2 \Rightarrow V_{GS_1} = V_{GS_2}$

$I_{D_1} = I_{D_2} \Rightarrow \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{\gamma} (V_{GS_2} - V_{T_2})^2$

از طرفی: $\begin{cases} V_{G_1} = 1.0V \\ V_{S_1} = V_O \end{cases}, \begin{cases} V_{G_2} = V_O \\ V_{S_2} = 0V \end{cases} \Rightarrow (1.0 - V_O) = (V_O - 0) \Rightarrow V_O = 0.5V$

ب)

$I_{D_1} = I_{D_2} \Rightarrow \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{\gamma} (V_{GS_2} - V_{T_2})^2$

از طرفی: $\begin{cases} K_1 = \frac{K_2}{4} \\ V_{T_1} = V_{T_2} \end{cases} \Rightarrow \frac{K_2}{4\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{\gamma} (V_{GS_2} - V_{T_1})^2$

$\Rightarrow V_{GS_1} - V_{T_1} = 2(V_{GS_2} - V_{T_1})$, $\begin{cases} V_{G_1} = 1.0 \\ V_{S_1} = V_O \end{cases}, \begin{cases} V_{G_2} = V_O \\ V_{S_2} = 0V \end{cases}$

$\Rightarrow (1.0 - V_O - V_{T_1}) = 2(V_O - 0 - V_{T_1}) \Rightarrow 3V_O = 1.0 + V_{T_1} \Rightarrow V_O = \frac{1.0 + V_{T_1}}{3}$

ج)

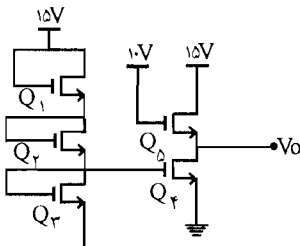
$I_{D_1} = I_{D_2} \Rightarrow \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{\gamma} (V_{GS_2} - V_{T_2})^2$, $\begin{cases} K_1 = K_2 \\ V_{T_1} = 4V_{T_2} \end{cases}$

$$\Rightarrow (V_{GS_1} - V_{T_r})^2 = (V_{GS_r} - V_{T_r})^2 \Rightarrow V_{GS_1} - V_{T_r} = V_{GS_r} - V_{T_r}$$

$$\begin{cases} V_{G_1} = 10 \\ V_{S_1} = V_O \end{cases}, \begin{cases} V_{G_r} = V_O \\ V_{S_r} = 0 \end{cases} \Rightarrow (10 - V_O - V_{T_r}) = (V_O - V_{T_r}) \Rightarrow 2V_O = 10 - 2V_{T_r}$$

$$\Rightarrow V_O = \frac{10 - 2V_{T_r}}{2}$$

۲۷- در مدار شکل م- ۲۷ همه MOS ها مشابه اند. ولتاژ V_O چقدر است؟



شکل م- ۲۷

☑ راه حل:

سه ترانزیستور Q_1 و Q_2 و Q_3 مشابه هستند پس داریم:

$$V_{DS} = \frac{15}{3} = 5V$$

$$V_{DS_r} = V_{D_r} - V_{S_r} = V_{G_r} - 0 = V_{G_r} = 5V$$

$$Q_r: I_{D_r} = \frac{K}{\gamma} (V_{GS_r} - V_{T_r})^2 \Rightarrow I_{D_r} = \frac{K}{\gamma} (V_{G_r} - V_{S_r} - V_{T_r})^2$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{G_r} = V_{G_r} = 5V \\ V_{S_r} = 0V \end{cases} \quad \text{گیت } Q_3 \text{ و } Q_4 \text{ به هم متصل می باشد سورس } Q_4 \text{ زمین شده است.}$$

$$\Rightarrow I_{D_r} = \frac{K}{\gamma} (5 - V_T)^2$$

$$Q_5: V_{GD_5} = -5V < V_T \Rightarrow$$

Q_5 در اشباع است.

$$I_{D_5} = \frac{k}{\gamma} (V_{GS_5} - V_{T_5})^2 = \frac{K}{\gamma} (V_{G_5} - V_{S_5} - V_T)^2$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{G_5} = 10V \\ V_{S_5} = V_O \end{cases} \Rightarrow I_{D_5} = \frac{K}{\gamma} (10 - V_O - V_T)^2$$

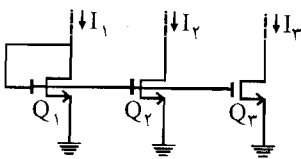
$$\text{از طرفی: } I_{D_r} = I_{D_o} \Rightarrow \frac{K}{\gamma} (\psi - V_T)^2 = \frac{K}{\gamma} (10 - V_O - V_T)^2 \Rightarrow$$

$$(\psi - V_T)^2 = (10 - V_O - V_T)^2 \Rightarrow \psi - V_T = 10 - V_O - V_T \Rightarrow$$

$$V_O = \psi V$$

۲۸- در مدار شکل م-۲۸، با فرض $V_{T_1} = V_{T_r} = V_{T_p}$ و $K_1 = K_r = \frac{K_p}{\gamma}$ و $I_1 = 1 \text{ mA}$ مقادیر I_r

و I_p را محاسبه نمایید.



شکل م-۲۸

$V_{GD_1} = 0$ بوده و چون $V_{GD_1} < V_{T_1}$ می باشد پس Q_1 در حالت اشباع است:

$$Q_1: I_1 = I_{D_1} = \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 \Rightarrow 1 \text{ mA} = \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2$$

$$\Rightarrow K_1 (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \gamma \quad (I)$$

$$Q_r: I_{D_r} = I_r = \frac{K_r}{\gamma} (V_{GS_r} - V_{T_r})^2$$

گیت دو ترانزیستور Q_1 و Q_r به هم وصل و سورس هر دوی آنها زمین می باشد پس $V_{GS_1} = V_{GS_r}$

$$\text{از طرفی: } K_1 = K_r, \quad V_{T_1} = V_{T_r} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_r = \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 \quad (II)$$

رابطه (I) را در رابطه (II) قرار می دهیم:

$$\Rightarrow I_r = \frac{\gamma}{\gamma} = 1 \text{ mA}$$

$$Q_p: I_r = I_{D_r} = \frac{K_p}{\gamma} (V_{G_r} - V_{T_p})^2$$

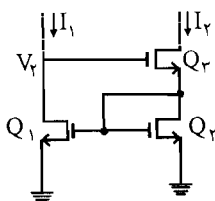
$$K_1 = K_p = \frac{K_r}{\gamma}, \quad V_{T_1} = V_{T_r} = V_{T_p}$$

و چون گیت سه ترانزیستور به هم متصل می باشد و سورس هر سه آنها زمین شده است پس داریم:

$$V_{GS_1} = V_{GS_2} = V_{GS_3}$$

$$\Rightarrow I_2 = \frac{\mu K_1}{2} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{2 \times 2}{2} = 2 \text{ mA}$$

۲۹- مدار شکل م- ۲۹ را در نظر بگیرید. با فرض $V_{T_1} = V_{T_2} = V_{T_3} = 1 \text{ mA}$ و $I_1 = 1 \text{ mA}$ و $K_1 = K_2 = K_3 = 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$ مقادیر V_1 و V_2 را به دست آورید.



شکل م- ۲۹

☑ راه حل:

$$I_1 = \frac{K_1}{2} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 \Rightarrow 1 \text{ mA} = \frac{2}{2} (V_{GS_1} - 1)^2 \Rightarrow 1 = (V_{G_1} - V_{S_1} - 1)^2$$

$$V_{S_1} = 0 \text{ V} \Rightarrow 1 = (V_{G_1} - 1)^2 \Rightarrow \begin{cases} V_{G_1} - 1 = 1 \Rightarrow V_{G_1} = 2 \text{ V} \\ V_{G_1} - 1 = -1 \Rightarrow V_{G_1} = 0 \text{ V} \end{cases}$$

$V_{G_1} = 1 \text{ V}$ قابل قبول نمی باشد چون $V_{GS} = 1 \text{ V} > V_T$ نمی باشد.

$$V_{G_1} = 2 \text{ V} \text{ قابل قبول} \Rightarrow V_1 = V_{G_1} = 2 \text{ V}$$

$$I_2 = I_{D_2} = I_{D_3} = \frac{K_2}{2} (V_{GS_2} - V_{T_2})^2 \Rightarrow \begin{cases} V_{S_2} = 0 \\ V_{G_1} = V_{G_2} = 2 \text{ V} \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_2 = \frac{2}{2} (2 - 1)^2 = 1 \text{ mA}$$

$$I_{D_2} = I_{D_3} = 1 \text{ mA} \Rightarrow 1 \text{ mA} = \frac{K_3}{2} (V_{GS_3} - V_{T_3})^2 \Rightarrow$$

$$1 \text{ mA} = \frac{2}{2} (V_{G_2} - V_{S_3} - 1)^2$$

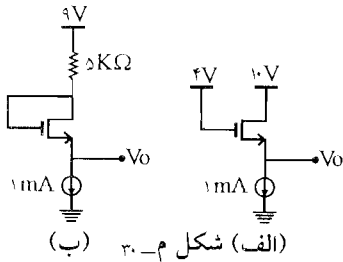
$$\text{از طرفی: } V_{S_3} = V_1 = 2 \text{ V} \Rightarrow 1 = (V_{G_2} - 2 - 1)^2 \Rightarrow$$

$$V_{G_r} - 5 = \pm 1 \Rightarrow \begin{cases} V_{G_r} = 6V \\ V_{G_r} = 4V \end{cases} \Rightarrow \text{قابل قبول نمی باشد}$$

$V_{G_r} = 4V$ باشد در این صورت $V_{GS_r} = 4 - 3 = 1V$ می شود که از V_T کمتر می باشد پس $V_{G_r} = 4V$ قابل قبول نمی باشد پس داریم:

$$V_{G_r} = 6V \Rightarrow V_r = V_{G_r} = 6V$$

۳- در مدارهای شکل م- ۳، $V_T = 2V$ و $K = 0.5 \frac{mA}{V^2}$ است. مقادیر V_O و مقاومت دیده شده از سر سورس را به دست آورید.



☑ راه حل:

شکل (الف)

$$V_{GD} = -10 + 4 = -6V < V_T$$

پس در ناحیه اشباع می باشد.

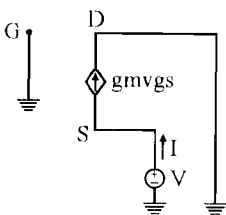
$$I_D = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow 1mA = \frac{0.5}{2} (V_{GS} - 2)^2 \Rightarrow$$

$$(V_{GS} - 2)^2 = 4 \Rightarrow \begin{cases} V_{GS} - 2 = 2 \Rightarrow V_{GS} = 4V \\ V_{GS} - 2 = -2 \Rightarrow V_{GS} = 0V \end{cases}$$

از طرفی برای اینکه ترانزیستور در اشباع باشد باید $V_{GS} > V_T$ باشد پس $V_{GS} = 0V$ قابل قبول نمی باشد.

$$V_{GS} = 4V \Rightarrow V_G - V_S = 4V \Rightarrow 4 - V_O = 4 \Rightarrow V_O = 0V$$

به دست آوردن مقاومت دیده شده از سر سورس:



$$g_m = K (V_{GS} - V_T) = 0.5(4 - 2) = 1 \frac{mA}{V}$$

$$I = -g_m V_{gs} = -1 \times V_{gs} = -V_{gs} = -(0 - V) = V$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{V}{V} = 1K\Omega$$

شکل (ب)

$$I_D = \frac{K}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow 1 = \frac{0.5}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow$$

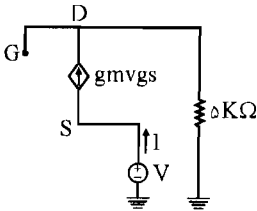
$$\begin{cases} V_{GS} = 4V \\ V_{GS} = 0V \Rightarrow \text{قابل قبول نمی باشد} \end{cases} \Rightarrow V_{GS} = 4V$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = 4V \Rightarrow V_G = 9 - 5I_D$$

$$V_S = V_O, \quad I_D = I_S$$

$$\Rightarrow 9 - 5I_D - V_O = 4 \Rightarrow 9 - 5 \times 1 - V_O = 4 \Rightarrow V_O = 0$$

مقاومت دیده شده از سر سورس

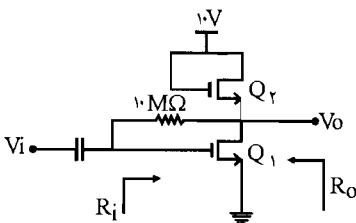


$$g_m = K (V_{GS} - V_T) = 0.5(4 - 2) = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$I = -g_m V_{gs} = -1 \times V_{gs} = -V_{gs}$$

$$\begin{cases} V_g = V_d = 5I_d = 5I \\ V_S = V \end{cases}$$

$$\Rightarrow I = -(\Delta I - V) \Rightarrow 6I = V \rightarrow R = \frac{V}{I} = 6 \text{ K}\Omega$$



شکل م-۳۱

۳۱- در مدار شکل م- ۳۱، $V_{T_1} = V_{T_2} = 2V$ ،

$K_1 = 36 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$ و $K_2 = 0.5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$ است. مقدار ولتاژ

خروجی (V_O) را به دست آورید. A_V و R_i و R_O

را محاسبه نمایید.

راه حل:

در دو MOSFET (Q_2, Q_1)، $V_{GD} = 0$ می باشد پس $V_{GD} < V_T$ است پس دو MOSFET در

ناحیه اشباع می باشد چون شرط اینکه NMOS در ناحیه اشباع باشد $V_{GD} < V_T$ و

$V_{GS} > V_T$ می باشد. و چون جریان مقاومت $10 \text{ M}\Omega$ بسیار کم می باشد پس داریم:

$$I_{D_1} = I_{D_2}$$

$$\Rightarrow \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{\gamma} (V_{GS_2} - V_{T_2})^2 \Rightarrow \frac{36}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{9}{\gamma} (V_{GS_2} - V_{T_2})^2$$

$$\Rightarrow \sqrt{4} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = (V_{GS_2} - V_{T_2})^2 \Rightarrow \pm 2\sqrt{2} (V_{GS_1} - V_{T_1}) = (V_{GS_2} - V_{T_2}) \quad (A)$$

$$\text{از طرفی: } \begin{cases} \text{KVL: } V_{DS_1} + V_{DS_2} = 10 \text{ V} \\ V_{GS_2} = V_{DS_2} \quad (II) \\ V_{GS_1} \approx V_{DS_1} \quad (III) \end{cases} \quad \leftarrow \text{چون } G_2 \text{ مستقیماً به } D_3 \text{ متصل شده است:}$$

$$(II), (III) \Rightarrow (I): V_{GS_1} + V_{GS_2} = 10 \Rightarrow V_{GS_2} = 10 - V_{GS_1} \quad (B)$$

رابطه (B) را در رابطه (A) قرار می‌دهیم:

$$V_{T_1} = V_{T_2} = 2 \text{ V}$$

$$\pm 2\sqrt{2} (V_{GS_1} - 2) = (10 - V_{GS_1} - 2) = 8 - V_{GS_1}$$

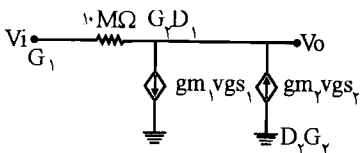
$$\Rightarrow \begin{cases} (2\sqrt{2} + 1) V_{GS_1} = 8 + 4\sqrt{2} \Rightarrow V_{GS_1} = 2/63 \text{ V} \\ (2\sqrt{2} - 1) V_{GS_1} = 8 - 4\sqrt{2} \Rightarrow V_{GS_1} = 1/2 \text{ V} \Rightarrow V_{GS_1} < V_{T_1} \quad \text{قابل قبول نمی‌باشد} \end{cases}$$

$$V_{GS_2} = 10 - V_{GS_1} = 10 - 2/63 = 9/37 \text{ V} \quad \text{پس } V_{GS_1} = 2/63 \text{ V} \text{ قابل قبول می‌باشد:}$$

$$V_O = V_{DS_1} \approx V_{GS_1} = 2/63 \text{ V}$$

$$\begin{cases} g_{m_1} = 2 \times \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1}) = 36 (2/63 - 2) = 22/63 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \\ g_{m_2} = 2 \times \frac{9}{\gamma} (9/37 - 2) = 2/7 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \end{cases}$$

مدار معادل به صورت زیر می‌باشد



$$\begin{cases} V_{gs_1} = V_i \\ V_{gs_2} = -V_o \end{cases}$$

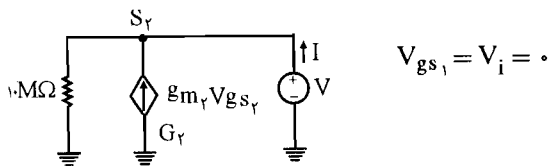
$$\frac{V_o - V_i}{10 \times 10^3} = g_{m_2} V_{gs_2} - g_{m_1} V_{gs_1}$$

$$\frac{V_O - V_i}{10^4} = (2/7 \times (-V_O) - 22/68 \times V_i) \Rightarrow (V_O - V_i) = 10^4 (-2/7 V_O - 22/68 V_i)$$

$$(2700.1) V_O = -226799 V_i \Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = -8/39$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{\frac{V_i - V_O}{10 M\Omega}} = \frac{10 V_i}{V_i - V_O} = \frac{10}{1 - A_V} = \frac{10}{1 + 8/39} = 1/0.6 M\Omega$$

محاسبه R_O : برای محاسبه R_O در خروجی منبع V می‌گذاریم و منبع ورودی را صفر قرار می‌دهیم.



با توجه به مدار مقابل داریم:

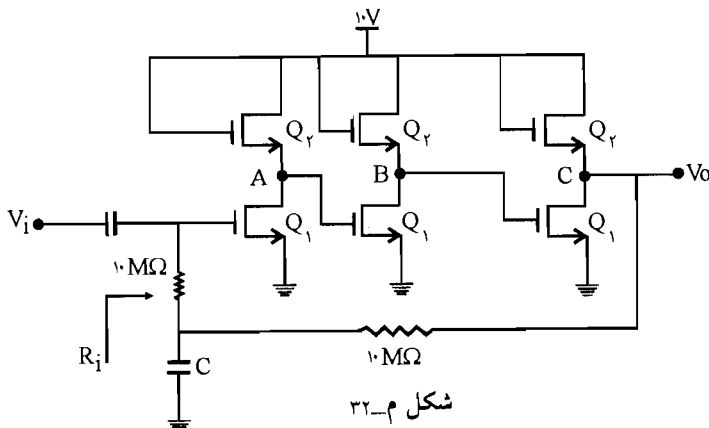
$$V_{gs_r} = -V$$

$$I = -g_{m_r} V_{gs_r} + \frac{V}{10000} \Rightarrow I = -g_{m_r} (-V) + \frac{V}{10000}$$

از $\frac{1}{10000}$ در مقابل g_{m_r} صرف نظر می‌کنیم پس داریم:

$$I \approx 2/7 V \Rightarrow R_O = \frac{V}{I} = \frac{1}{2/7 K\Omega}$$

۳۲- در مدار شکل م-۳۲، با فرض $V_{T_1} = V_{T_2} = 2V$ و $K_1 = 4 \frac{mA}{V^2}$ و $K_2 = 0.5 \frac{mA}{V^2}$ و بزرگی بودن خازن‌ها، ولتاژ DC خروجی و A_V و R_i را محاسبه نمایید. برای $C = 0$ مقاومت ورودی مدار چقدر است؟



شکل م-۳۲

✓ راه حل:

ابتدا و MOSFET (Q_1 و Q_2) سمت چپ را در نظر می‌گیریم. داریم:

$$\begin{cases} I_{D_2} = I_{D_1} \\ I_D = \frac{K}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{\gamma} (V_{GS_2} - V_{T_2})^2 \end{cases} \quad (I)$$

(I_{D_2} و I_{D_1} جریان دو MOSFET سمت چپ می‌باشد).

$$\begin{cases} V_{G_1} = V_O \\ V_{S_1} = 0 \end{cases} \rightarrow V_{GS_1} = V_O \quad (II) \quad , \quad \begin{cases} V_{G_2} = 10V \\ V_{S_2} = V_A \end{cases} \rightarrow V_{GS_2} = 10 - V_A \quad (III)$$

روابط (II) و (III) را در رابطه (I) قرار می‌دهیم:

$$\begin{aligned} \frac{4}{\gamma} (V_O - 2)^2 &= \frac{0.5}{\gamma} (10 - V_A - 2)^2 \Rightarrow 2(V_O - 2)^2 = 0.25(\lambda - V_A)^2 \\ \Rightarrow \lambda(V_O - 2)^2 &= (\lambda - V_A)^2 \quad (x) \end{aligned}$$

حال دو MOSFET ستون وسط را در نظر می‌گیریم. در این دو MOSFET هم داریم:

$$\begin{cases} I_{D_2} = I_{D_1} \\ I_D = \frac{K}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{\gamma} (V_{GS_2} - V_{T_2})^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{G_1} = V_A \\ V_{S_1} = 0 \end{cases} \rightarrow V_{GS_1} = V_A \quad , \quad \begin{cases} V_{G_2} = 10V \\ V_{S_2} = V_B \end{cases} \rightarrow V_{GS_2} = 10 - V_B$$

$$\frac{4}{\gamma} (V_A - 2)^2 = \frac{0.5}{\gamma} (10 - V_B - 2)^2 \Rightarrow$$

$$\lambda(V_A - 2)^2 = (\lambda - V_B)^2 \quad (y)$$

حال دو MOSFET سمت راست را در نظر می‌گیریم:

$$\begin{cases} I_{D_1} = I_{D_2} \\ I_D = \frac{K}{\gamma} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow \frac{K_1}{\gamma} (V_{GS_1} - V_{T_1})^2 = \frac{K_2}{\gamma} (V_{GS_2} - V_{T_2})^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{G_1} = V_B \\ V_{S_1} = 0 \end{cases} \rightarrow V_{GS_1} = V_B, \quad \begin{cases} V_{G_2} = 10V \\ V_{S_2} = V_C = V_O \end{cases} \rightarrow V_{GS_2} = 10 - V_C$$

داریم با جایگذاری: $\frac{4}{\sqrt{2}}(V_B - 2)^{\sqrt{2}} = \frac{5}{\sqrt{2}}(10 - V_O - 2)^{\sqrt{2}} \Rightarrow$

$$8(V_B - 2)^{\sqrt{2}} = (8 - V_O)^{\sqrt{2}} \quad (z)$$

$$(x), (y), (z) \Rightarrow \begin{cases} 8(V_O - 2)^{\sqrt{2}} = (8 - V_A)^{\sqrt{2}} \\ 8(V_A - 2)^{\sqrt{2}} = (8 - V_B)^{\sqrt{2}} \\ 8(V_B - 2)^{\sqrt{2}} = (8 - V_O)^{\sqrt{2}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2\sqrt{2}(V_O - 2) = (8 - V_A) & (A) \\ 2\sqrt{2}(V_A - 2) = (8 - V_B) & (B) \\ 2\sqrt{2}(V_B - 2) = (8 - V_O) & (C) \end{cases}$$

$$(B) \begin{cases} 2\sqrt{2}(V_A - 2) = (8 - V_B) \\ 2\sqrt{2}(V_B - 2) = (8 - V_O) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2\sqrt{2}V_A - 4\sqrt{2} - 8 + V_B = 0 \\ 2\sqrt{2}V_B - 4\sqrt{2} - 8 + V_O = 0 \end{cases}$$

در این دو رابطه V_B را حذف می‌کنیم:

$$\begin{cases} -8V_A + 16 + 16 + 16\sqrt{2} - 2\sqrt{2}V_B = 0 \\ 2\sqrt{2}V_B - 4\sqrt{2} - 8 + V_O = 0 \end{cases} \Rightarrow -8V_A + 16 + 12\sqrt{2} + V_O = 0 \quad (D)$$

$$(D) \begin{cases} -8V_A + 16 + 12\sqrt{2} + V_O = 0 \\ 2\sqrt{2}V_O - 4\sqrt{2} - 8 + V_A = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} -8V_A + 16 + 12\sqrt{2} + V_O = 0 \\ 16\sqrt{2}V_O - 32\sqrt{2} - 64 + 8V_A = 0 \end{cases}$$

داریم با جمع این دو رابطه داریم $(16\sqrt{2} + 1)V_O - 20\sqrt{2} - 56 = 0 \Rightarrow V_O = 3/6 V$

(A); $V_A = 3/6 V$

(B): $2\sqrt{2}(3/6 - 2) = (8 - V_B) \Rightarrow V_B = 3/6 V$

با اعداد به دست آمده مشخص می‌شود که Q_1 و Q_2 ها در حالت اشباع قرار دارند و در همه آنها V_{GS} از V_T بزرگتر می‌باشد.

در دو MOSFET سمت چپ:

$$\begin{cases} g_{m_1} = 2 \times \frac{K_1}{V} (V_{GS_1} - V_{T_1}) \Rightarrow g_{m_1} = 4(V_O - 2) = 4(3/6 - 2) = 6/4 \frac{mA}{V} \\ g_{m_r} = 2 \times \frac{0.5}{V} (10 - V_A - 2) = 0.5(8 - 3/6) = 2/2 \frac{mA}{V} \end{cases}$$

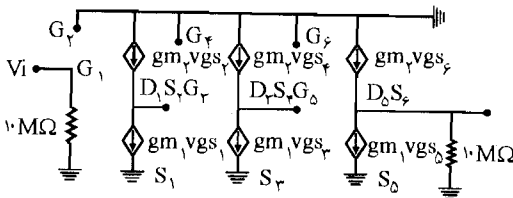
در دو MOSFET ستون وسط:

$$\begin{cases} g_{m_1} = 4(V_A - 2) = 4(3/6 - 2) = 6/4 \frac{mA}{V} \\ g_{m_r} = 0.5(10 - V_B - 2) = 0.5(8 - 3/6) = 2/2 \frac{mA}{V} \end{cases}$$

در دو MOSFET سمت راست:

$$\begin{cases} g_{m_1} = 4(V_B - 2) = 4(3/6 - 2) = 6/4 \frac{mA}{V} \\ g_{m_r} = 0.5(10 - V_C - 2) = 0.5(8 - 3/6) = 2/2 \frac{mA}{V} \end{cases}$$

مدار معادل:



در این مدار داریم:

$$V_O = (g_{m_r} V_{gs_r} - g_{m_1} V_{gs_1}) \times 10 \text{ M}\Omega \times 10^2$$

با توجه به مدار داریم:

$$g_{m_r} V_{gs_r} = g_{m_1} V_{gs_1}$$

$$\Rightarrow 2/2(0 - V_{s_r}) = 6/4(V_i - 0) \Rightarrow V_{s_r} = -\frac{6/4 V_i}{2/2} = -\frac{32}{11} V_i$$

با توجه به مدار داریم:

$$g_{m_r} V_{gs_r} = g_{m_1} V_{gs_r} \Rightarrow 2/2(0 - V_{s_r}) = 6/4(V_{G_r} - 0)$$

$$V_{G_r} = V_{s_r}$$

$$\Rightarrow 2/2(0 - V_{s_r}) = 6/4(V_{s_r} - 0) \Rightarrow V_{s_r} = \frac{-6/4}{2/2} V_{s_r} = \left(\frac{32}{11}\right)^2 V_i$$

در رابطه V_O داریم:

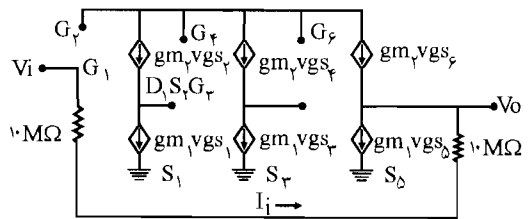
$$V_O = (2/2(0 - V_O) - 6/4(V_{S_r} - 0)) \times 10^4$$

$$\Rightarrow V_O = -2/2 V_O \times 10^4 - 6/4 V_{S_r} \times 10^4 = -2/2 \times 10^4 V_O - 6/4 \times 10^4 \times \left(\frac{32}{11}\right)^2 V_i$$

$$\Rightarrow A_V = \frac{V_O}{V_i} = -24/6$$

$$R_i = 10 \text{ M}\Omega$$

$$C = 0 \Rightarrow$$



در این مدار معادل داریم:

$$I_i = g_{m_1} V_{gs_d} - g_{m_2} V_{gs_r} \quad (1)$$

$$V_{g_d} = V_{s_r} = \left(\frac{32}{11}\right)^2 V_i, \quad V_{s_r} = \frac{-32}{11} V_i$$

$$\text{KVL: } I_i = \frac{V_i - V_{s_r}}{(10 + 10) \times 10^3} \Rightarrow V_{s_r} = -2 \times 10^4 I_i + V_i$$

این رابطه را در رابطه I_i (1) قرار می دهیم:

$$I_i = g_{m_1} V_{gs_d} - g_{m_2} V_{gs_r} = 6/4 (V_{g_d} - V_{s_d}) - 2/2 (V_{g_r} - V_{s_r})$$

$$\Rightarrow I_i = 6/4 \left(\left(\frac{32}{11}\right)^2 V_i - 0 \right) - 2/2 (0 + 2 \times 10^4 I_i - V_i)$$

$$\Rightarrow I_i = 6/4 \times 18/46 V_i - 4/4 \times 10^4 I_i + 2/2 V_i$$

$$\Rightarrow R_i = \frac{V_i}{I_i} = 78.0/9 \text{ K}\Omega$$

