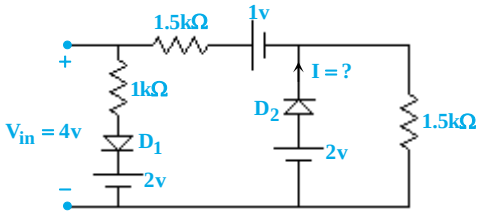
www.modaresanesharif.ac.ir

فصل اول

دیود

تست‌های تألیفی فصل اول

مثال۱: در مدار شکل زیر با فرض ایده‌آل بودن دیودها جریان I چقدر می‌باشد؟



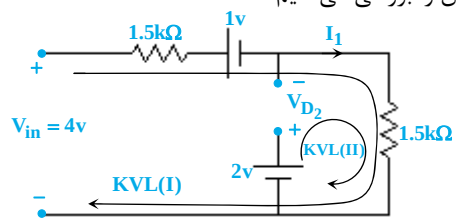
۱) ۰

۲) $\frac{۲}{۳}mA$

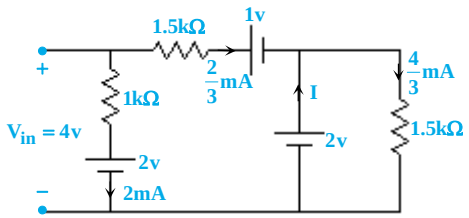
۳) $-\frac{۲}{۳}mA$

۴) $-I_S$

پاسخ: گزینه «۲» با توجه به آنکه $V_{in} > ۲v$ می‌باشد پس حتماً $D_۱$ در ناحیه روشن می‌باشد. در مورد $D_۲$ دو حالت خاموش و یا روشن می‌توانیم داشته باشیم. برای سادگی کار ابتدا فرض می‌کنیم دیود $D_۲$ خاموش باشد و سپس درستی آن را بررسی می‌کنیم:



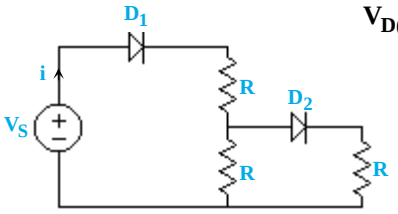
$$KVL(I): V_{in} = (۲ \times I_۱ \times ۱/۵k) + ۱$$
$$\Rightarrow I_۱ = ۱mA$$
$$KVL(II): ۱/۵k \times I_۱ - ۲ + V_{D_۲} = ۰ \Rightarrow V_{D_۲} = ۰/۵ > ۰$$



با توجه به فرض ایده‌آل بودن دیودها، دیود $D_۲$ حتماً روشن می‌باشد، لذا مجدداً با فرض $D_۱, D_۲$:on مدار را تحلیل می‌کنیم:

$$KCL: \frac{۲}{۳} + I = \frac{۴}{۳} \Rightarrow I = \frac{۲}{۳}mA$$

مثال۲: در مدار شکل زیر با فرض $V_S = ۹v$ جریان i کدام گزینه است؟ $R = ۱k\Omega$ و $V_{D(on)} = ۰/۷v$



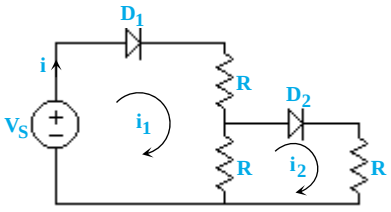
۱) ۵/۳mA

۲) ۳/۳mA

۳) ۲/۹mA

۴) ۱/۳mA

پاسخ: گزینه «۱» آند دیود $D_۱$ به بیشترین سطح ولتاژ مدار وصل شده است در نتیجه دیود $D_۱$ قطعاً روشن است. در مورد دیود $D_۲$ فرض می‌کنیم که در وضعیت روشن باشد. در ادامه با نوشتن قانون KVL برای هر دو حلقه و محاسبه‌ی جریان عبوری دیودها فرض روشن بودن هر دو دیود را بررسی می‌کنیم:



$$KVL(۱): -V_S + V_{D(on)} + Ri_۱ + R(i_۱ - i_۲) = ۰$$
$$KVL(۲): V_{D(on)} + Ri_۲ + R(i_۲ - i_۱) = ۰$$

با حل دو معادله بالا برای جریان $i_۱$ و $i_۲$ روابط مقابل را داریم:

$$i_۱ = \frac{\frac{۲}{۳}V_S - V_{D(on)}}{R} \quad , \quad i_۲ = \frac{\frac{۱}{۳}V_S - V_{D(on)}}{R}$$

V_S برابر ۹v است. پس داریم:

$$i_۱ = ۵/۳mA \quad , \quad i_۲ = ۲/۳mA$$

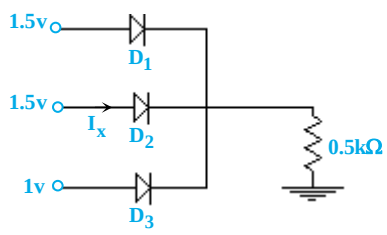
چون هر دو جریان مثبت هستند، فرض روشن بودن هر دو دیود صحیح است:

$$i = i_۱ = ۵/۳mA$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۳: جریان I_x در مدار زیر کدام می‌باشد؟



$$\begin{cases} I_{S_1} = 10\,nA \\ I_{S_2} = 20\,nA \end{cases}$$

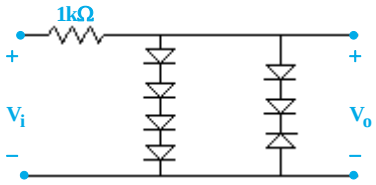
۱) ۰ ۲) ۱mA

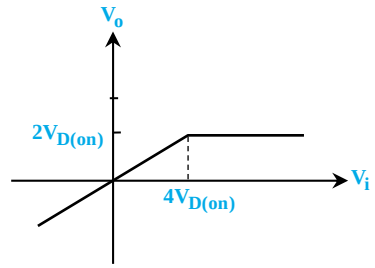
۳) ۲mA ۴) ۳mA

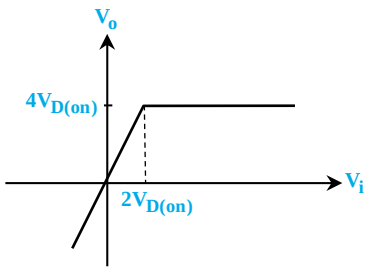
پاسخ: گزینه «۳» با توجه به آنکه دیودهای D_1 و D_2 و D_3 یک ساختار ماکزیمم‌گیر تشکیل می‌دهند، پس دیود D_3 خاموش می‌باشد ولی چون ولتاژ اعمالی به آند دیودهای D_1 و D_2 یکسان می‌باشد، لذا هر دو روشن می‌شوند و جریان مقاومت بار برابر ۳mA می‌شود ولی با توجه به نکته (۱) به علت عدم برابری جریان اشباع معکوس دیودهای D_1 و D_2 داریم:

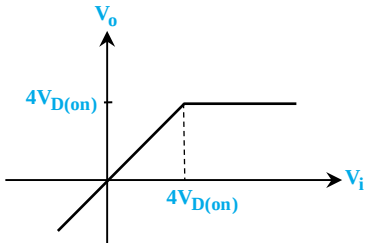
$$\frac{I_{D_1}}{I_{D_2}} = \frac{1}{2} \quad , \quad I_{D_1} + I_{D_2} = 3mA \quad \Rightarrow I_{D_1} = 1mA \quad , \quad I_{D_2} = I = 2mA$$

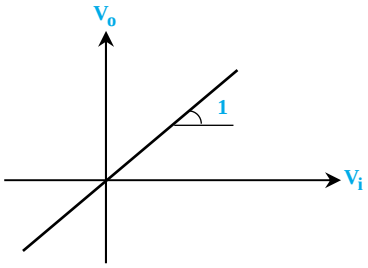
مثال ۴: در مدار شکل زیر $V_{D(on)} = 0/7\,v$ است. مشخصه V_o به V_i کدام گزینه است؟



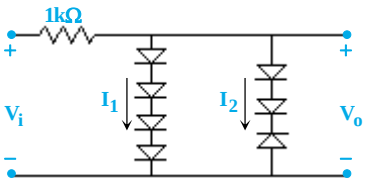
۱)


۲)


۳)


۴)


پاسخ: گزینه «۳» توجه کنید که جریان عبوری از شاخه دو (I_2) همواره صفر است.

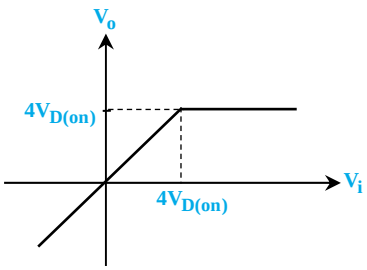


از طرفی دیودهای شاخه یک همگی یا روشن هستند یا خاموش و چون ولتاژ خروجی ولتاژ دو سر این چهار دیود است، در حالت روشن بودن تمامی دیودها برابر با $V_o = 4V_{D(on)}$ است.

اگر $V_i < 4V_{D(on)}$ باشد، دیودها خاموش هستند و جریانی از مقاومت ۱kΩ نمی‌گذرد و $V_o = V_i$ می‌شود.

اگر $V_i \geq 4V_{D(on)}$ باشد، دیودها روشن هستند و $V_o = 4V_{D(on)}$ است.

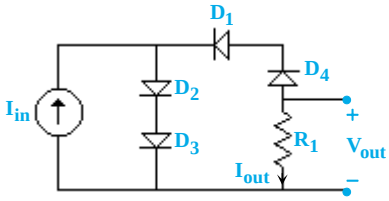
پس مشخصه V_o به V_i به صورت زیر است:

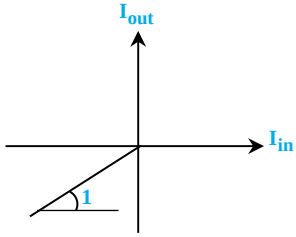


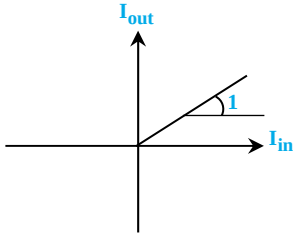
www.modaresanesharif.ac.ir

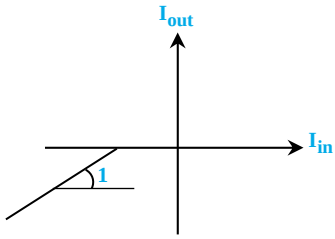
www.modaresanesharif.ac.ir

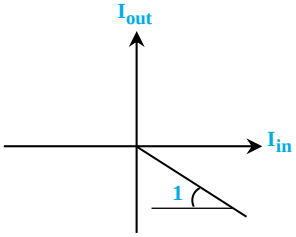
مثال ۵: مشخصه I_{out} به I_{in} مدار شکل زیر کدام گزینه است؟ $(V_{D(on)} = ۰/۷v)$



۱) 

۲) 

۳) 

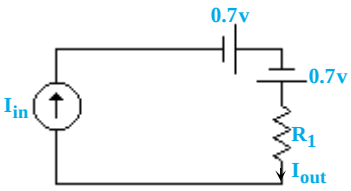
۴) 

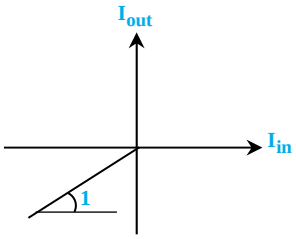
پاسخ: گزینه «۱» در مدار دیود این سؤال مشاهده می‌کنید که اگر جریان I_{in} مثبت باشد دیودهای $D_۲$ و $D_۳$ روشن می‌شود و دیودهای $D_۱$ و $D_۴$ خاموش است. در نتیجه جریانی از خروجی عبور نمی‌کند. پس گزینه ۲ غلط می‌باشد.

برای $I_{in} < ۰$ داریم:

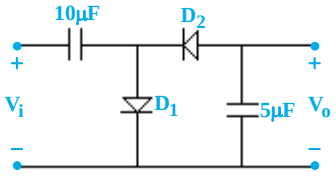
رابطه جریان I_{out} با I_{in}: $I_{out} = -I_{in}$

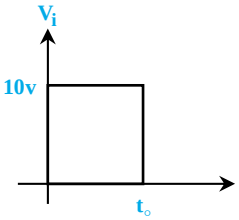
پس مشخصه I_{out} به I_{in} به صورت شکل زیر است:





مثال ۶: در مدار شکل زیر با فرض ایده‌آل بودن دیودها، ولتاژ خروجی را در لحظه $t_۰^+$ به دست آورید.





۱) ۶/۶۷v

۲) ۰/۶۷v

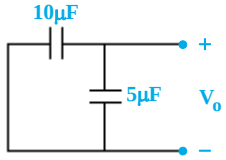
۳) ۳/۳v

۴) ۱۰v

پاسخ: گزینه «۱» زمانی که $V_i = ۱۰v$ است، خازن $۱۰\mu F$ از طریق دیود $D_۱$ تا ولتاژ $۱۰v$ شارژ می‌شود. در لحظه $t = t_۰$ دیود $D_۱$ قطع می‌شود و چون ولتاژ دو سر دیود $D_۲$ مثبت می‌شود، دیود $D_۲$ وصل می‌شود و بار ذخیره شده در خازن $۱۰\mu F$ بین دو خازن تقسیم می‌شود.

$$q = CV = ۱۰ \times ۱۰\mu F = ۱۰۰ \times ۱۰^{-۶} = ۱۰^{-۴}$$

شکل زیر را بعد از لحظه $t = t_۰$ داریم:



بار خازن $۵\mu F$ بعد از موازی شدن با خازن $۱۰\mu F$ برابر است با:

$$q_۲ = \frac{۵}{۱۰+۵} \times ۱۰^{-۴} = \frac{۱}{۳} \times ۱۰^{-۴}$$

ولتاژ خروجی برابر است با:

$$V_o = \frac{q_۲}{C_۲} = \frac{\frac{۱}{۳} \times ۱۰^{-۴}}{۵ \times ۱۰^{-۶}} = \frac{۱۰۰}{۱۵} = ۶/۶۷v$$

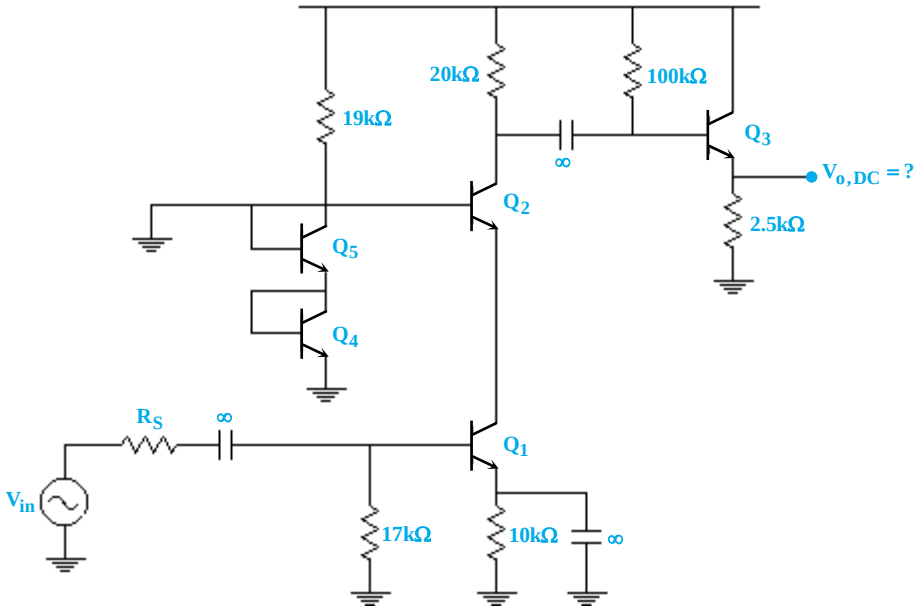
www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

فصل دوم
تحلیل DC مدارهای ترانزیستوری

تست‌های تألیفی فصل دوم

مثال ۱: در مدار شکل زیر ولتاژ خروجی در حالت DC چقدر است؟ فرض کنید همه ترانزیستورها در ناحیه فعال قرار دارند.



$\beta = ۱۰۰$

$V_{BE(on)} = ۰/۵\,v$

$V_{CE,sat} = ۰/۲v$

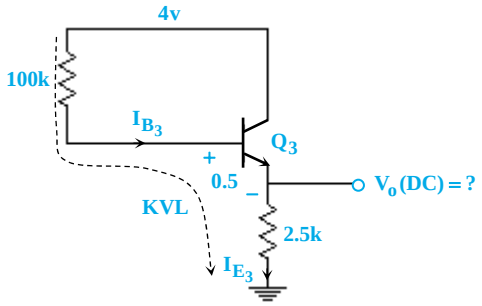
۱) ۰

۲) ۴v

۳) ۱/۵v

۴) ۲/۵v

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» در حالت DC خازن‌ها مدار باز می‌باشند؛ لذا مدار به صورت زیر ساده می‌شود. دقت شود چون مقاومت موجود در بیس بزرگ می‌باشد حتی به ازای جریان‌های کوچک بیس افت ولتاژ قابل ملاحظه‌ای در مقاومت بیس خواهیم داشت؛ لذا نباید از جریان بیس صرف‌نظر کرد:



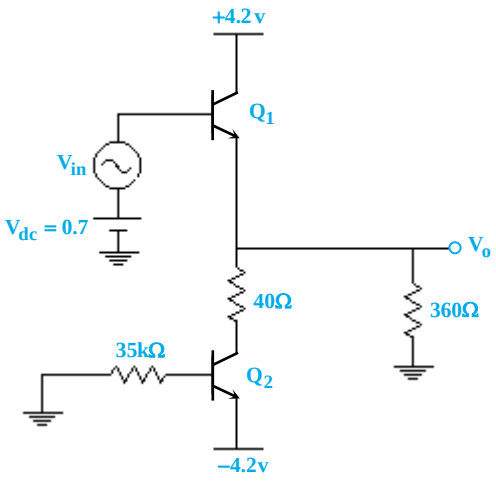
$KVL: ۴ = ۱۰۰k \times I_{B_۳} + ۰/۵ + ۲/۵k \times I_{E_۳}$ $\xrightarrow{I_E=(۱+\beta)I_B}$ $I_{E_۳} = ۱mA$

ولتاژ خروجی در حالت DC برابر است با: $V_{o(DC)} = ۲/۵k \times I_{E_۳} = ۲/۵\,v$

$Q_۳$ شرط فعال بودن ✓: $V_{CE_۳} > V_{CE_۳(sat)} \rightarrow ۴ - ۲/۵ > ۰/۲$

مثال ۲: در مدار شکل مقابل با فرض $\beta = ۱۰۰$ حداکثر دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی کدام است؟

$(V_{CE,sat} = ۰/۲ \;,\; V_{BE(on)} = ۰/۷)$



۱) ۴

۲) ۳/۸

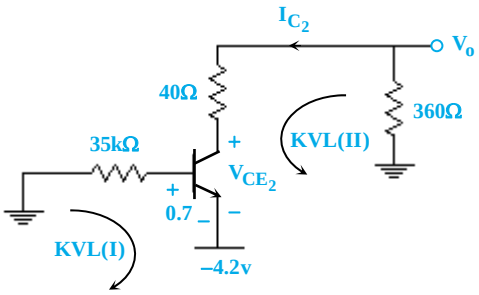
۳) ۳/۶

۴) ۴/۲

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» با توجه به مقدار V_{DC} در بیس Q_1 می‌توان دریافت که مقدار dc ولتاژ خروجی صفر می‌باشد. برای ادامه حل سؤال با ورودی همراه می‌شویم و روند افزایش آن را دنبال می‌کنیم. اگر ورودی به اندازه کافی افزایش پیدا کند Q_1 وارد اشباع می‌شود. در این صورت با در نظر گرفتن $V_{CE,sat}$ برای ترانزیستور Q_1 حداکثر ولتاژ خروجی برابر ۴ ولت می‌شود. حال کافی است تا روند کاهش ورودی را دنبال کنیم تا مقدار $V_{o,min}$ را محاسبه کنیم.



با کاهش ورودی دو اتفاق ممکن است بر رفتار مدار تأثیر بگذارد؛ اولی قطع Q_1 و دومی اشباع Q_2. در ابتدا فرض می‌کنیم که قطع Q_1 زودتر از اشباع Q_2 اتفاق بیفتد؛ سپس شرط فعال بودن Q_2 را بررسی می‌کنیم. در صورتی که شرط فعال بودن Q_2 برقرار باشد، فرض درست می‌باشد. در غیر این صورت اشباع Q_2 زودتر از قطع Q_1 اتفاق می‌افتد.

$$KVL(I): I_{C_2} = \frac{0/7 - (-4/2)}{\frac{35}{100}} = 10\,mA$$

$$KVL(II): V_{CE_2} = -0/4 I_{C_2} + 4/2 \Rightarrow V_{CE_2} = 0/2$$

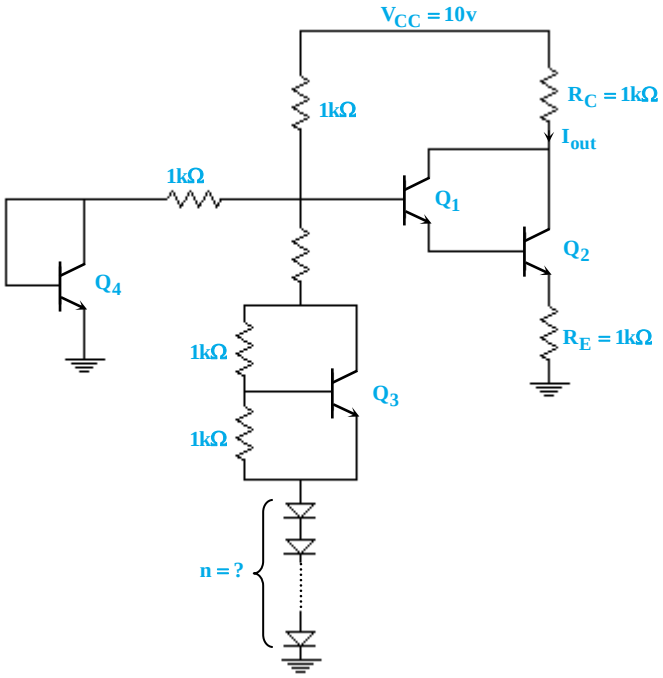
همان‌طور که دیده می‌شود با فرض قطع بودن Q_1، ترانزیستور Q_2 در مرز اشباع قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، قطع Q_1 و اشباع Q_2 همزمان با یکدیگر اتفاق می‌افتند و اصطلاحاً به بار ۳۶۰ اهمی در این حالت بار بهینه گفته می‌شود؛ در نتیجه حداکثر اندازه دامنه نوسان متقارن ولتاژ خروجی برابر می‌شود با:

$$V_{om} = \min(4, 3/6) = 3/6\,v$$

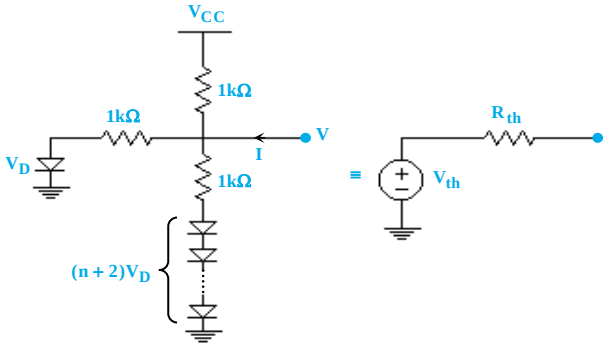
مثال ۳: برای مدار شکل مقابل مقدار n چقدر باشد تا تغییرات دمایی جریان خروجی I_{out} صفر شود؟

$$\frac{\partial V_{CC}}{\partial T} = 0 \quad , \beta >> 1 \qquad \frac{\partial V_D}{\partial T} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T}$$

۱) $n = 6$
۲) $n = 7$
۳) $n = 5$
۴) $n = 3$



☑ **پاسخ:** گزینه «۴» ترانزیستور Q_4 تشکیل یک دیود می‌دهد و ساختار ضرب‌کننده‌ی V_{BE} متشکل از ترانزیستور Q_3 افت ولتاژی به اندازه دو دیود ایجاد می‌کند؛ در نتیجه مدار دیده شده از بیس Q_1 و معادل تونن آن به صورت زیر می‌باشد:



$$KCL: I = \frac{V - V_{CC}}{1} + \frac{V - V_D}{1} + \frac{V - (n+2)V_D}{1}$$

$$\Rightarrow I = 3V - V_{CC} - (n+3)V_D$$

$$\Rightarrow V = \frac{I}{3} + \frac{V_{CC} + (n+3)V_D}{3}$$

$$\Rightarrow R_{th} = \frac{1}{3}k\Omega \ , \ V_{th} = \frac{V_{CC} + (n+3)V_D}{3}$$

در نتیجه مقدار جریان I_{out} به صورت مقابل محاسبه می‌شود:

$$I_{out} = \frac{V_{th} - 2V_{BE}}{R_E + \frac{R_{th}}{(1+\beta)^2}} \xrightarrow{\beta >> 1} I_{out} \simeq \frac{V_{th} - 2V_{BE}}{R_E}$$

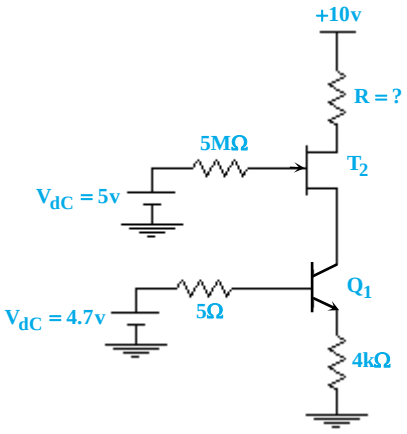
پس برای اینکه داشته باشیم $\frac{\partial I_{out}}{\partial T} = 0$ باید:

$$\frac{\partial V_{th}}{\partial T} = 2\frac{\partial V_{BE}}{\partial T} \Rightarrow \frac{(n+3)}{3}.\frac{\partial V_D}{\partial T} = 2\frac{\partial V_{BE}}{\partial T} \rightarrow \boxed{n = 3}$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۴: برای مدار شکل زیر محدوده مقاومت R کدام باشد تا مدار فعال باشد؟



$(|V_P| = ۲v \quad , \quad I_{DSS} = ۴mA) \qquad (\beta >> ۱ \ , \ V_{BE(on)} = ۰/۷)$

۱) $R > ۳k\Omega$

۲) $R > ۵k\Omega$

۳) $R < ۳k\Omega$

۴) $R < ۵k\Omega$

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» با توجه به فرض $\beta >> ۱$ می‌توان برای ترانزیستور $Q_۱$ از جریان بیس صرف‌نظر کرد. بدین ترتیب جریان امیتر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_{E_۱} = \frac{۴/۷ - ۰/۷}{۴} = ۱mA$$

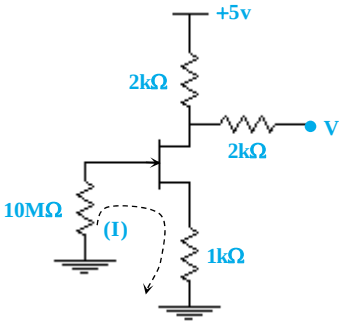
در نتیجه جریان $T_۲$ نیز برابر $۱mA$ خواهد بود و ولتاژ درین و به دنبال آن V_{GD} برای $T_۲$ عبارتند از:

$$V_{D_۲} = ۱۰ - R(۱) \ \rightarrow V_{GD} = V_G - V_D = ۵ - (۱۰ - R) = R - ۵$$

شرط اشباع برای NJFET به صورت $V_{GD} < V_P$ می‌باشد. در نتیجه داریم:

$$(R - ۵) < -۲ \Rightarrow \boxed{R < ۳k\Omega}$$

مثال ۵: در مدار داده شده زیر محدوده‌ی ولتاژ V برحسب ولت چقدر باشد تا ترانزیستور همواره در ناحیه اشباع بایاس شود؟



$(I_{DSS} = ۴mA \ , \ |V_P| = ۲v)$

۱) $V > -۳$

۲) $V < -۳$

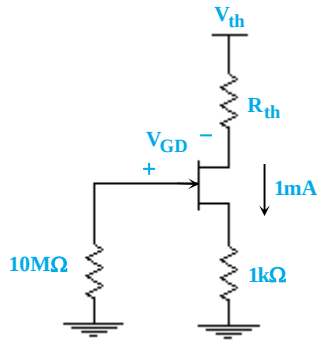
۳) $V < ۱$

۴) $V > ۱$

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» با توجه به اینکه جریان گیت صفر می‌باشد، داریم:

$$KVL(I): V_{GS} = -I_D \rightarrow I_D = \frac{I_{DSS}}{V_P^۲}(V_{GS} - V_P)^۲ \rightarrow I_D = \frac{۴}{۴}(-I_D - (-۲))^۲$$

$$\rightarrow I_D = (۲ - I_D)^۲ \Rightarrow \begin{cases} I_D = ۴mA \rightarrow V_{GS} = -۴v \\ I_D = ۱mA \rightarrow V_{GS} = -۱v \end{cases}$$



مقدار $V_{GS} = -۴v$ با فرض روشن بودن ترانزیستور در تناقض می‌باشد. پس مقدار $V_{GS} = -۱v$ و $I_D = ۱mA$ قابل قبول می‌باشد. از طرف دیگر، برای فعال بودن ترانزیستور باید شرط $V_{GD} < V_P$ برقرار باشد؛ لذا برای سادگی تحلیل معادل تونن از دید درین را حساب می‌کنیم.

$$R_{th} = ۲^k \| ۲^k = ۱k\Omega$$

$$V_{th} = \frac{۵ \times ۲ + V \times ۲}{۲ \times ۲} = \frac{۵ \times V}{۲}$$

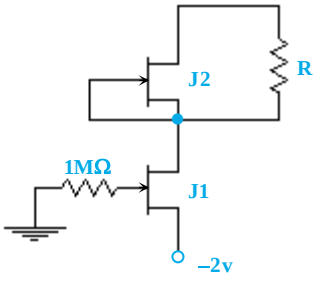
شرط اشباع $V_{GD} < V_P \Rightarrow ۰ - [V_{th} - R_{th} + ۱] < V_P \rightarrow ۱ - (\frac{۵ + V}{۲}) < -۲ \rightarrow \boxed{V > ۱}$

---

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۶: در مدار شکل زیر برای آنکه مدار در ناحیه اشباع کار کند، محدوده R برحسب کیلواهم باید کدام گزینه باشد؟



$J_1: I_{DSS_1} = 4mA \quad , \quad |V_{P_1}| = 2v$

$J_2: I_{DSS_2} = 8mA \quad , \quad |V_{P_2}| = 4v$

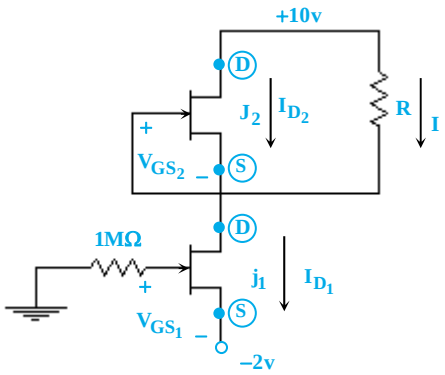
۱) $R < 1$

۲) $R > 1$

۳) $R < 0/5$

۴) $0/5 < R < 1$

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» در ابتدا با کمک مقادیر ولتاژهای گیت ـ سورس هر یک از ترانزیستورها جریان ترانزیستورها را حساب می‌کنیم:



$$V_{GS_1} = 2v \rightarrow I_{D_1} = \frac{I_{DSS_1}}{V_{P_1}^2}(V_{GS_1} - V_{P_1})^2 = \frac{4}{4}(2+2)^2 = 16mA$$

$$V_{GS_2} = 0 \rightarrow I_{D_2} = I_{DSS_2} = 8mA$$

مقدار جریان مقاومت R را با کمک قانون KCL می‌توان محاسبه کرد:

$$I_{D_2} + I = I_{D_1} \rightarrow I = 16 - 8 = 8mA$$

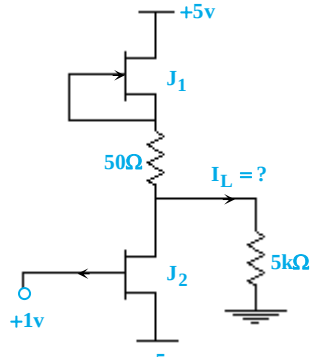
حال شرط اشباع را برای هر دو ترانزیستور بررسی می‌کنیم:

$$J_1: V_{DS_1} > V_{GS_1} - V_{P_1} \rightarrow (10 - 8R) - (-2) > 2 - (-2) \rightarrow R < 1k\Omega$$

$$J_2: V_{DS_2} > V_{GS_2} - V_{P_2} \rightarrow 8R > 0 - (-4) \rightarrow R > 0/5k\Omega$$

لذا محدوده‌ی R برای اشباع بودن هر دو ترانزیستور برابر $0/5k\Omega < R < 1k\Omega$ می‌باشد.

مثال ۷: برای مدار شکل مقابل با توجه به اطلاعات داده شده مقدار جریان I_L کدام است؟



$$J_1: \begin{cases} |V_P| = 2 \\ I_{DSS} = 1mA \end{cases} \qquad J_2: \begin{cases} |V_P| = 2 \\ I_{DSS} = 4mA \end{cases}$$

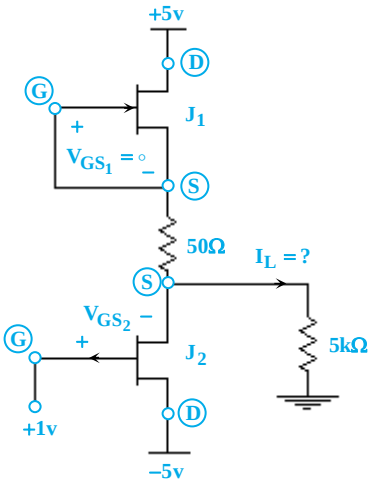
۱) ۰

۲) ۱mA

۳) −۱mA

۴) ۲mA

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» به شکل مقابل و انتخاب پایه‌های سورس و درین هر یک از ترانزیستورها دقت کنید. رابطه جریان JFET برای هر دو حالت کانال N و P به صورت کلی زیر می‌باشد:



$$I_D = \frac{I_{DSS}}{V_P^2}(V_{GS} - V_P)^2$$

که V_P برای کانال N منفی و برای کانال P مثبت می‌باشد.

چون ترانزیستور J_1 پایه‌های گیت و سورس آن به هم وصل شده‌اند، جریان آن برابر 1mA می‌باشد.

$$V_{GS_1} = 0 \Rightarrow I_{D_1} = I_{DSS_1} = 1mA$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

در مورد ترانزیستور $J_۲$ چون شرط $V_{GD} > V_P$ $(۶ > ۲)$ برقرار می‌باشد لذا در ناحیه اشباع می‌باشد و جریان آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{GS_۲} = V_{G_۲} - V_{S_۲} = (+۱) - (۵I_L) = ۱ - ۵(۱ - I_{D_۲}) = ۵I_{D_۲} - ۴$$

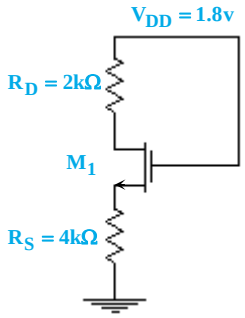
$$I_{D_۲} = \frac{I_{DSS_۲}}{V_P^۲}(V_{GS_۲} - V_P)^۲ \Rightarrow I_{D_۲} = \frac{۴}{۴}(V_{GS_۲} - ۲)^۲ \Rightarrow I_{D_۲} = (۵I_{D_۲} - ۶)^۲$$

$$\rightarrow ۲۵I_{D_۲}^۲ - ۳۹I_{D_۲} + ۱۴ = ۰ \Rightarrow \begin{cases} I_{D_۲} = ۱mA & \checkmark \\ I_{D_۲} = ۰/۵۶mA & \text{.※} \end{cases}$$

در صورتی که $I_{D_۲} = ۰/۵۶mA$ را انتخاب کنیم، $V_{GS_۲} = -۱/۲v$ می‌شود که با شرط روشن بودن ترانزیستور $(V_P > V_{GS} > ۰)$ در تناقض می‌باشد؛

در نتیجه جریان I_L برابر می‌شود با: $I_L = I_{D_۱} - I_{D_۲} = ۰$

مثال۸: در مدار شکل زیر نسبت $(\frac{W}{L})$ ترانزیستور $M_۱$ چقدر باشد تا ترانزیستور $M_۱$ در مرز ناحیه خطی و اشباع بایاس گردد؟

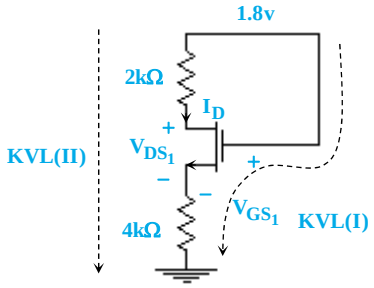


$$V_{TH} = ۰/۴v \quad , \quad \mu_n C_{ox} = ۴۰۰\frac{\mu A}{v^۲}$$

۱) $\frac{۱}{۰/۷۲}$ ۲) $\frac{۱}{۱/۸}$

۳) $\frac{۱}{۰/۳۶}$ ۴) $\frac{۱}{۰/۱۸}$

پاسخ: گزینه «۳» برای آنکه ترانزیستور در مرز ناحیه اشباع و خطی باشد، باید $V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$ باشد. با نوشتن قانون KVL در حلقه‌های نشان داده شده داریم:



$$KVL(I): V_{GS_۱} = ۱/۸ - ۴I_D$$

$$KVL(II): V_{DS_۱} = ۱/۸ - (۴ + ۲)I_D$$

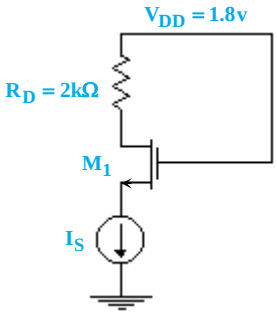
با اعمال شرط مرز اشباع و خطی بودن داریم:

$$۱/۸ - ۶I_D = ۱/۸ - ۴I_D - ۰/۴ \rightarrow I_D = ۰/۲mA$$

حال برای به دست آوردن نسبت $(\frac{W}{L})$ از رابطه‌ی V_{GS} استفاده می‌کنیم، دقت شود در مرز ناحیه اشباع همچنان روابط ناحیه اشباع معتبر می‌باشند.

$$V_{GS} = V_{TH} + \sqrt{\frac{۲I_D}{\mu_n C_{ox}(\frac{W}{L})}} \quad , \quad V_{GS} = ۱/۸ - ۴ \times ۰/۲ = ۱v \rightarrow ۱ = ۰/۴ + \sqrt{\frac{۲ \times ۰/۲}{۰/۴ \times (\frac{W}{L})}} \rightarrow \sqrt{\frac{۱}{(\frac{W}{L})}} = ۰/۶ \rightarrow (\frac{W}{L}) = \frac{۱}{۰/۳۶}$$

مثال۹: در مدار شکل مقابل محدوده جریان I_S چقدر باشد تا ترانزیستور $M_۱$ همواره در ناحیه اشباع باشد؟



$$V_{TH} = ۰/۶v \quad , \quad k = \frac{۲mA}{v^۲}$$

۱) $I_S < ۰/۳mA$

۲) $I_S > ۰/۳mA$

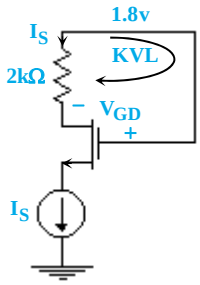
۳) $I_S < ۰/۶mA$

۴) $I_S > ۰/۶mA$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

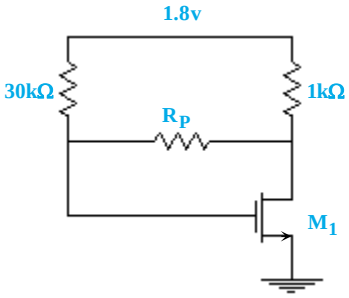
پاسخ: گزینه «۱» برای آنکه ترانزیستور در ناحیه‌ی اشباع باشد، باید شرط $V_{GD} < V_{TH}$ برقرار باشد:



$$KVL: V_{GD} = +۲ \times I_S$$

$$\text{شرط اشباع}: V_{GD} < ۰/۶ \rightarrow ۲I_S < ۰/۶ \rightarrow I_S < ۰/۳\,mA$$

مثال ۱۰: در مدار شکل زیر حداکثر مقدار مقاومت R_P چقدر باشد تا مدار در ناحیه‌ی فعال کار کند؟



$$V_{TH} = ۵۰mv\ ,\ I_D = ۱mA\ ,\ k = \frac{۱}{۲}\mu_n C_{ox}(\frac{w}{L}) = ۴\frac{mA}{V^۲}$$

۱) $۱/۲\,k\Omega$

۲) $۱\,k\Omega$

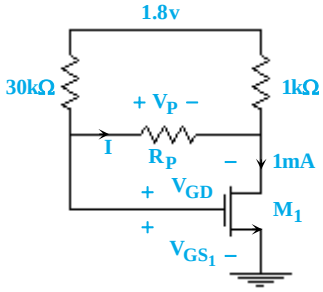
۳) $۱/۵\,k\Omega$

۴) $۳\,k\Omega$

پاسخ: گزینه «۱» برای آن که ترانزیستور در ناحیه‌ی اشباع باشد باید شرط $V_{GD} < V_{TH}$ برقرار باشد.

$$\text{شرط اشباع}: V_P < ۰/۰۵$$

با توجه به مقدار جریان داده شده مقدار $V_{GS_۱}$ برابر می‌شود با:



$$V_{GS_۱} = V_{TH} + \sqrt{\frac{I_D}{k}} = ۰/۰۵ + \sqrt{\frac{۱}{۴}} = ۰/۵۵v$$

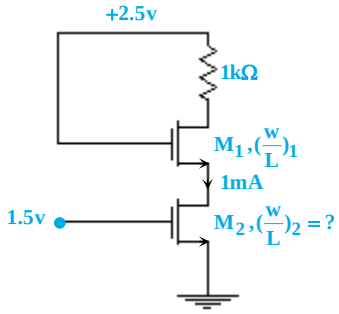
برای جریان I داریم:

$$I = \frac{۱/۸ - V_{GS_۱}}{۳۰} = \frac{۱/۲۵}{۳۰}$$

پس برای اشباع بودن ترانزیستور داریم:

$$R_P.I < ۰/۰۵ \rightarrow R < \frac{۱}{۲۰} \times \frac{۳۰}{۱/۲۵} \rightarrow R < ۱/۲\,k\Omega$$

مثال ۱۱: در مدار شکل زیر جریان عبوری از ترانزیستورهای $M_۱$ و $M_۲$ برابر $۱mA$ است. نسبت $(\frac{w}{L})$ ترانزیستور $M_۲$ کدام گزینه است؟



(هر دو ترانزیستور در ناحیه اشباع هستند) $\mu_n C_{ox} = ۱۰۰\frac{\mu A}{v^۲}$ $|V_{TH}| = ۰/۵$

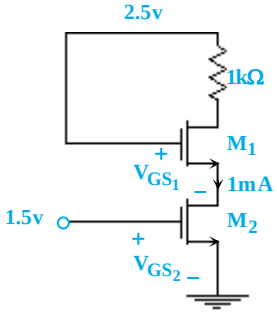
۱) ۱۰

۲) ۲۰

۳) ۳۰

۴) ۴۰

پاسخ: گزینه «۲» با توجه به سری بودن دو ترانزیستور و شرط تساوی جریان آنها داریم:



$$I_{D_۱} = I_{D_۲} \rightarrow k_۱(V_{GS_۱} - V_{TH})^۲ = k_۲(V_{GS_۲} - V_{TH})^۲ \rightarrow \frac{V_{GS_۱} - ۰/۵}{۱/۵ - ۰/۵} = \sqrt{\frac{k_۲}{k_۱}} \qquad (*)$$

در رابطه فوق به مقدار $V_{GS_۱}$ نیاز داریم که با توجه به فرض فعال بودن ترانزیستورها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{GS_۱} = V_{th} + \sqrt{\frac{I_D}{k_۱}} \rightarrow V_{GS_۱} = ۰/۵ + \sqrt{\frac{۱۰^{-۳}}{k_۱}}$$

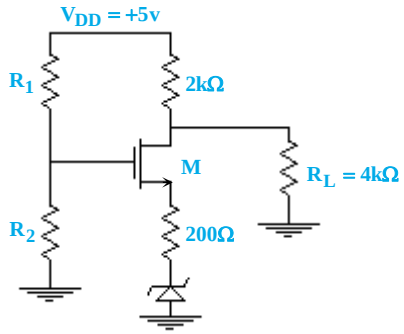
با جایگذاری مقدار $V_{GS_۱}$ محاسبه شده در رابطه $(*)$ داریم:

$$\frac{۰/۵ + \sqrt{\frac{۱۰^{-۳}}{k_۱}} - ۰/۵}{۱} = \sqrt{\frac{k_۲}{k_۱}} \rightarrow \sqrt{\frac{۱۰^{-۳}}{\frac{۱}{۲}\mu_n C_{ox}(\frac{w}{L})_۱}} = \sqrt{\frac{(\frac{w}{L})_۲}{(\frac{w}{L})_۱}} \rightarrow (\frac{w}{L})_۲ = \frac{۲ \times ۱۰^{-۳}}{\mu_n C_{ox}} \rightarrow (\frac{w}{L})_۲ = ۲۰$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۱۲: برای مدار شکل مقابل نسبت $\frac{R_1}{R_2}$ چقدر باشد تا جریان بار به مقدار $0/5mA$ برسد؟

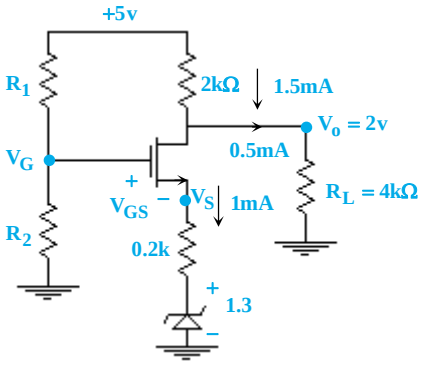


$V_{TH} = 0/5\,v \qquad V_z = 1/3\,v \qquad \mu_n C_{ox}(\frac{w}{L}) = 8\frac{mA}{v^2}$

۱) ۱ ۲) $\frac{2}{3}$

۳) $\frac{3}{2}$ ۴) $\frac{1}{3}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» در صورتی که جریان بار $0/5mA$ باشد، میزان ولتاژ خروجی برابر دو ولت می‌شود. با استفاده از پخش جریان‌ها در شکل مقابل متوجه می‌شویم که جریان ترانزیستور باید برابر $1mA$ باشد. برای آنکه جریان ترانزیستور $1mA$ باشد، با فرض فعال بودن از رابطه جریان در ناحیه فعال داریم:



$$I_D = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}(\frac{w}{L})(V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$\Rightarrow V_{GS} = V_{TH} + \sqrt{\frac{2I_D}{\mu_n C_{ox}(\frac{w}{L})}} = 0/5 + \sqrt{\frac{2\times 1}{8}} = 1V$$

از طرفی ولتاژهای سورس و گیت به ترتیب زیر هستند:

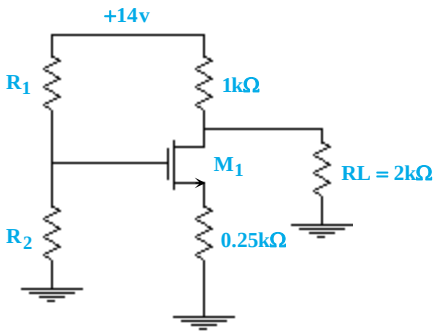
$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2}\times 5 \qquad V_S = 1/3 + 0/2(1) = 1/5$$

$$V_{GS} = \frac{5R_2}{R_1 + R_2} - 1/5 = 1 \Rightarrow \frac{5R_2}{R_1 + R_2} = 2/5 \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = 1$$

و چون شرط اشباع یعنی $V_{GD} \le V_{TH}$ برقرار می‌باشد، فرض فعال بودن درست است.

$V_{GD} \le V_{TH} \rightarrow 2/5 - 2 \le V_{TH} \rightarrow 0/5 \le 0/5$ مرز اشباع

مثال ۱۳: در مدار شکل مقابل نسبت $\frac{R_1}{R_2}$ چقدر باشد تا جریان بار R_L به $4mA$ برسد؟



$V_{th} = 2v \quad , \quad k = \frac{8mA}{v^2}$

۱) ۸/۸

۲) ۴/۴

۳) ۳

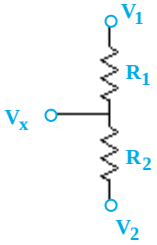
۴) ۱

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» قبل از حل مسئله به بیان دو نکته می‌پردازیم:

یادآوری ۱: رابطه V_{GS} برای ترانزیستورهای نوع N و P به صورت زیر می‌باشد: (دقت شود برای NMOS ولتاژ آستانه بزرگتر از صفر و برای PMOS ولتاژ آستانه کوچکتر از صفر می‌باشد.)

$$NMOS: V_{GS} = V_{th} + \sqrt{\frac{I_D}{k}} \qquad PMOS: V_{GS} = V_{TH} - \sqrt{\frac{I_D}{k}}$$

یادآوری ۲: با استفاده از قضیه‌ی جمع آثار می‌توان ولتاژ نقطه‌ی X را در مدار مقابل به صورت زیر نوشت:

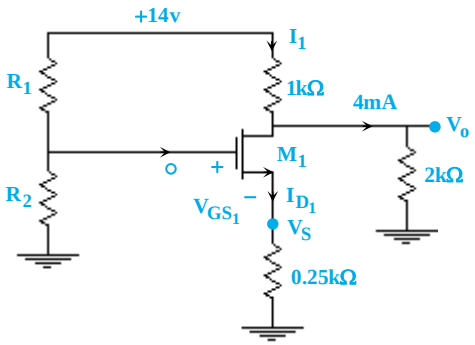


$$V_X = \frac{V_1 . R_2 + V_2 . R_1}{R_1 + R_2}$$

برای حل مسئله در ابتدا فرض می‌کنیم ترانزیستور M_1 درناحیه‌ی فعال باشد. در این صورت با پخش جریان‌های DC مطابق شکل زیر می‌توان جریان درین ترانزیستور را به دست آورد:

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir



$$V_O = ۴mA \times R_L = ۸v$$

$$I_۱ = \frac{V_{DD} - V_O}{۱k\Omega} = ۱۴ - ۸ = ۶mA$$

$$KCL: I_۱ = I_{D_۱} + ۴mA \rightarrow I_{D_۱} = ۲mA$$

با کمک نکته اول می‌توانیم ولتاژ V_{GS} ترانزیستور را محاسبه کنیم:

$$V_{GS_۱} = V_{th_۱} + \sqrt{\frac{I_{D_۱}}{k_۱}} = ۲ + \sqrt{\frac{۲}{۸}} = ۲/۵v$$

از طرفی ولتاژ سورس برابر است با:

$$V_S = ۰/۲۵ \times I_{D_۱} = ۰/۵v$$

حال شرط فعال بودن ترانزیستور را بررسی می‌کنیم:

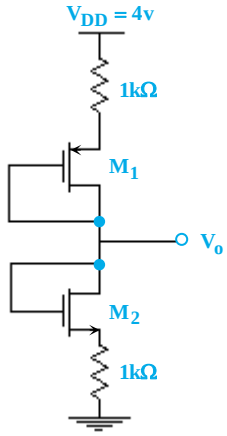
$$V_{DS} > V_{GS} - V_{th} \rightarrow ۸ - ۰/۵ > ۲/۵ - ۰/۵ \rightarrow ۷/۵ > ۲$$ ✓ شرط فعال برقرار می‌باشد

پس برای ولتاژ گیت ترانزیستور داریم:

$$V_{G_۱} = V_{GS_۱} + V_{S_۱} = ۲/۵ + ۰/۵ = ۳v$$

با کمک نکته دوم نیز داریم:

$$V_{G_۱} = \frac{۱۴ \times R_۲ + ۰ \times R_۱}{R_۱ + R_۲} \rightarrow ۳ = \frac{۱۴R_۲}{R_۱ + R_۲} \rightarrow \frac{R_۱}{R_۲} = ۴/۴$$



مثال ۱۴: در مدار شکل مقابل مقدار ولتاژ خروجی چقدر است؟

$$|V_{TH}| = ۰/۵v \qquad k_۱ = k_۲ = ۴\frac{mA}{v^۲}$$

۱) ۰

۲) ۱/۵

۳) ۲

۴) ۲/۷۵

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» چون در هر دو ترانزیستور پایه‌های گیت و درین به یکدیگر وصل شده‌اند پس هر دو قطعاً در ناحیه اشباع هستند. از طرفی طبق قانون KCL باید جریان هر دو ترانزیستور نیز با یکدیگر برابر باشند:

$$I_{D_۱} = I_{D_۲} \rightarrow k_۱(V_{GS_۱} - V_{TH_۱})^۲ = k_۲(V_{GS_۲} - V_{TH_۲})^۲$$

$$\rightarrow \frac{V_{GS_۱} + ۰/۵}{V_{GS_۲} - ۰/۵} = \pm\sqrt{\frac{k_۲}{k_۱}} = \pm ۱ \xrightarrow[V_{GS_۲} > V_{TH_۲}]{V_{GS_۱} < V_{TH_۱}} \frac{V_{GS_۱} + ۰/۵}{V_{GS_۲} - ۰/۵} = -۱ \rightarrow V_{GS_۱} = -V_{GS_۲}$$

با استفاده از قانون KVL در حلقه تغذیه تا زمین داریم:

$$۴ = I_D - V_{GS_۱} + V_{GS_۲} + I_D \rightarrow V_{GS_۲} = -V_{GS_۱} = V_{GS} = ۲ - I_D$$

با استفاده از رابطه جریان در ناحیه اشباع داریم:

$$I_D = k(V_{GS_۲} - V_{TH})^۲ \xrightarrow{V_{GS} = ۲ - I_D} I_D = ۴(۲ - I_D - ۰/۵)^۲ \rightarrow I_D = ۴(۱/۵ - I_D)^۲ \rightarrow I_D = ۱mA$$

در نتیجه ولتاژ خروجی برابر می‌شود با:

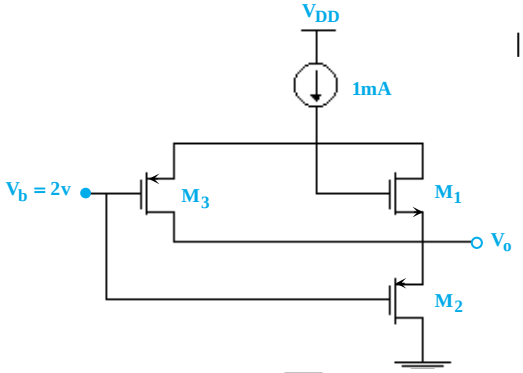
$$V_o = I_D + V_{GS_۲} = ۱ + ۱ = ۲v$$

---

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

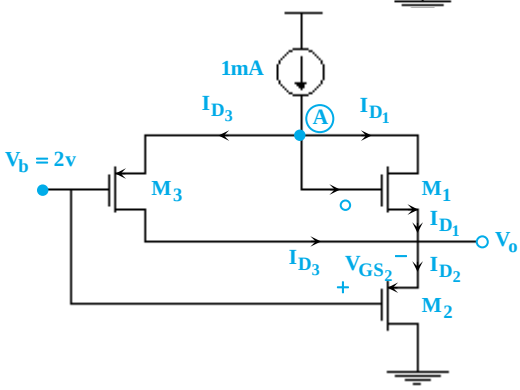
مثال ۱۵: در مدار شکل زیر مقدار ولتاژ خروجی V_O کدام گزینه است؟ (ترانزیستورها در ناحیه اشباع قرار دارند)



$|V_{TH}| = ۱v \quad , \quad k_n = \frac{۱mA}{v^۲} \quad , \quad k_p = \frac{۴mA}{v^۲}$

۱) ۳v
۲) ۰
۳) ۱/۵v
۴) ۳/۵v

پاسخ: گزینه «۴» در ابتدا جریان‌های DC را مطابق شکل مقابل پخش می‌کنیم و جریان ترانزیستور $M_۲$ را حساب می‌کنیم.



$KCL@A: I_{D_۱} + I_{D_۳} = ۱mA$

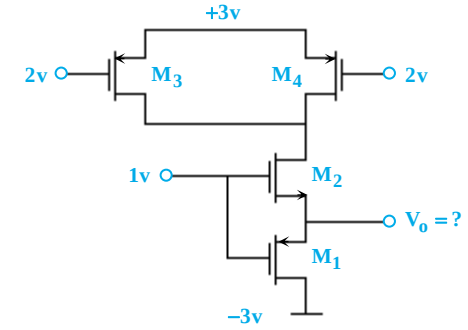
$KCL@V_O: I_{D_۱} + I_{D_۳} = I_{D_۲} \rightarrow I_{D_۲} = ۱mA$

البته با کمک قانون KCL در کات‌ست هم می‌توانستیم به جریان $I_{D_۲}$ برسیم. حال با فرض $I_{D_۲} = ۱mA$ و فعال بودن ترانزیستورها مقدار $V_{GS_۲}$ را حساب می‌کنیم:

$V_{GS_۲} = V_{TH} - \sqrt{\frac{I_{D_۲}}{k_P}} = -۱ - \sqrt{\frac{۱}{۴}} = -۱/۵\,v$

از طرفی می‌دانیم خروجی برابر است با: $V_O = V_b - V_{GS_۲} = ۲ + ۱/۵ = ۳/۵v$

مثال ۱۶: در مدار شکل مقابل V_O چند ولت است؟

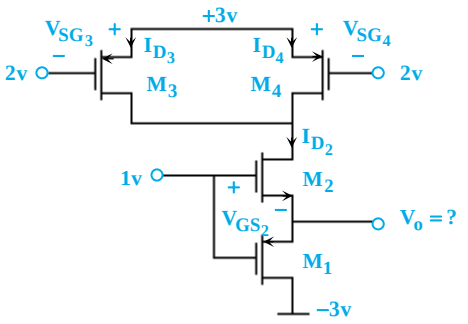


$|V_{TH}| = ۰/۵\ v \quad , \quad (\frac{W}{L})_۳ = ۲(\frac{W}{L})_۴$

$(\frac{W}{L})_۱ = (\frac{W}{L})_۲ = ۴(\frac{W}{L})_۴ \quad , \quad \mu_n C_{ox}(\frac{W}{L})_۳ = \frac{۲mA}{v^۲}$

۱) ۰/۱v
۲) ۰/۹v
۳) ۱/۱v
۴) ۰

پاسخ: گزینه «۱» در ابتدا با توجه به نسبت‌های بین $(\frac{W}{L})$ های ترانزیستورها و مقدار $k_۳$ مقدار $k_۱$، $k_۲$ و $k_۴$ را محاسبه می‌کنیم:



$k_۱ = k_۲ = \frac{۲mA}{v^۲} \quad , \quad k_۳ = \frac{۱mA}{v^۲} \quad , \quad k_۴ = \frac{۰/۵mA}{v^۲}$

با توجه به شکل مقابل می‌توانیم با روابط ناحیه فعال، جریان ترانزیستورها را محاسبه کنیم:

$V_{GS_۳} = V_{GS_۴} = -۱v$

$I_{D_۳} = k_۳(V_{GS_۳} - V_{TH})^۲ = ۱ \times (-۱ + ۰/۵)^۲ = \frac{۱}{۴}mA$

$I_{D_۴} = k_۴(V_{GS_۴} - V_{TH})^۲ = ۰/۵ \times (-۱ + ۰/۵)^۲ = \frac{۱}{۸}mA$

در نتیجه جریان ترانزیستورهای $M_۱$ و $M_۲$ برابر می‌شود با:

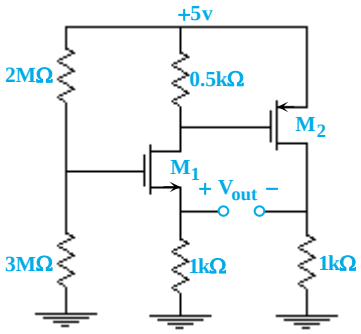
$I_{D_۲} = I_{D_۱} = I_{D_۴} + I_{D_۳} = \frac{۳}{۸}mA$

حال برای به دست آوردن مقدار V_O کافی است تا مقدار $V_{GS_۲}$ را حساب کنیم.

$V_{GS_۲} = V_{TH} + \sqrt{\frac{I_{D_۲}}{k_۲}} = ۰/۵ + \sqrt{\frac{\frac{۳}{۸}}{۲}} = ۰/۵ + \frac{\sqrt{۳}}{۴} \simeq ۰/۹v \quad , \quad V_O = ۱ - V_{GS_۲} \simeq ۰/۱v$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir



مثال ۱۷: در مدار شکل مقابل ولتاژ خروجی چقدر می‌باشد؟ $k_1 = k_2 = 1\frac{mA}{V^2}$ ، $V_{TH_1} = |V_{TH_2}| = 1v$

۱) $+1$

۲) -1

۳) 0

۴) 2

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» با توجه به آنکه جریان گیت ترانزیستور ماسفت صفر می‌باشد ولتاژ گیت M_1 برابر می‌شود با:

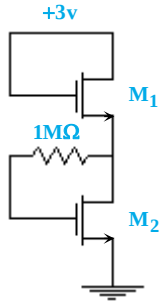
$$V_{G_1} = \frac{3M\Omega}{2M\Omega + 3M\Omega} \times 5 = 3v \Rightarrow V_{GS_1} = V_{G_1} - V_{S_1} = 3 - I_{D_1}$$

با استفاده از رابطه‌ی جریان ترانزیستور در حالت اشباع داریم:

$$I_{D_1} = k_1(V_{GS_1} - V_{TH_1})^2 \Rightarrow I_{D_1} = 1 \times ((3 - I_{D_1}) - 1)^2 \Rightarrow \boxed{I_{D_1} = 1mA}$$

با توجه به آنکه جریان M_1 برابر $1mA$ می‌باشد؛ ولتاژ سورس ـ گیت ترانزیستور M_2 برابر $0/5$ ولت می‌شود پس شرط روشن شدن M_2 برقرار نمی‌باشد و لذا جریان M_2 برابر صفر می‌باشد؛ پس ولتاژ خروجی برابر می‌شود با:

$$V_{out} = 1 \times I_{D_1} - 1 \times I_{D_2} = 1v$$



مثال ۱۸: در مدار شکل مقابل ترانزیستورها مشابه هستند. جریان I_D کدام گزینه است؟

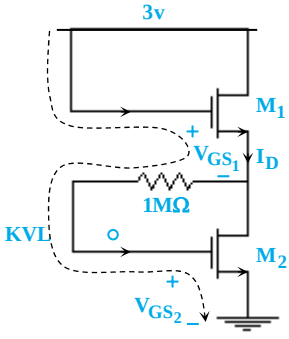
$$k_1 = k_2 = 2\frac{mA}{v^2} \quad , \quad V_{TH} = 0/5v$$

۱) $1mA$

۲) $2mA$

۳) $3mA$

۴) $4mA$



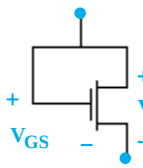
☑ **پاسخ:** گزینه «۲» چون ترانزیستورها مشابه و به صورت سری با یکدیگر هستند، پس حتماً ولتاژهای V_{GS_1} و V_{GS_2} برابر هستند. با نوشتن KVL در مسیر تغذیه تا زمین مطابق شکل بعد داریم:

$$KVL: V_{GS_1} + V_{GS_2} = 3 \xrightarrow{V_{GS_1} = V_{GS_2}} V_{GS_1} = V_{GS_2} = 1/5v$$

حال با فرض اشباع ترانزیستورها با استفاده از رابطه جریان در ناحیه اشباع داریم:

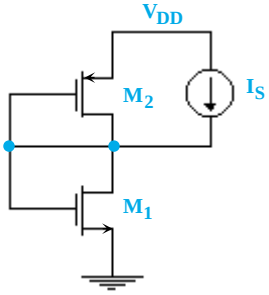
$$I_D = k_n(V_{GS} - V_{th})^2 \rightarrow I_{D_1} = I_{D_2} = 2(1/5 - 0/5)^2 = 2mA$$

یادآوری: هرگاه پایه‌های گیت و درین ترانزیستوری به هم متصل شوند، حتماً در ناحیه اشباع خواهد بود:



شرط اشباع: $V_{DS} > V_{GS} - V_{th} \rightarrow V_{GS} > V_{GS} - V_{th}$ ✓

مثال ۱۹: در مدار شکل مقابل $I_S = 0/75 I_{D_1}$ می‌باشد. اندازه ولتاژ مؤثر ترانزیستور M_2 چند برابر ترانزیستور M_1 است؟ $(k_1 = k_2 = \frac{3mA}{v^2})$



۱) $\frac{1}{4}$

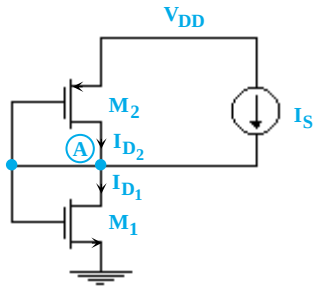
۲) $\frac{1}{2}$

۳) 2

۴) 4

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir



☑ **پاسخ:** گزینه «۲» ولتاژ مؤثر یا همان ولتاژ Overdrive به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_{eff} = V_{GS} - V_{th}$$

لذا جریان ترانزیستور در ناحیه اشباع را برحسب V_{eff} می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

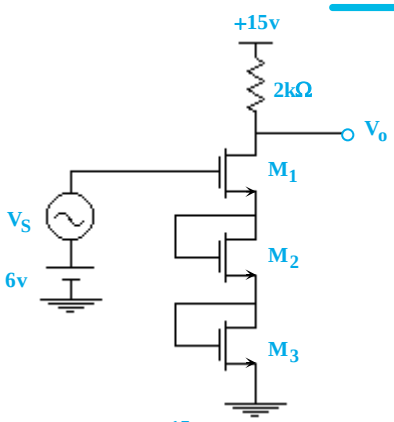
$$I_D = k.V_{eff}^{۲}$$

از طرفی با توجه به $I_S = ۰/۷۵ I_{D۱}$ و قانون KCL در نقطه A داریم:

$$KCL@A: I_{D_۱} = I_{D_۲} + I_S \rightarrow I_{D_۱} = ۴ I_{D_۲}$$

با استفاده از رابطه جریان در ناحیه اشباع (دقت شود هر دو در ناحیه اشباع هستند) داریم:

$$I_{D_۱} = ۴I_{D_۲} \rightarrow k_۱ V_{eff_۱}^{۲} = ۴k_۲ . V_{eff_۲}^{۲} \rightarrow \frac{V_{eff_۲}^{۲}}{V_{eff_۱}^{۲}} = \frac{۱}{۴} \rightarrow \left|\frac{V_{eff_۲}}{V_{eff_۱}}\right| = \frac{۱}{۲}$$



مثال ۲۰: در مدار شکل مقابل حداکثر دامنه نوسان مثبت خروجی چند ولت است؟

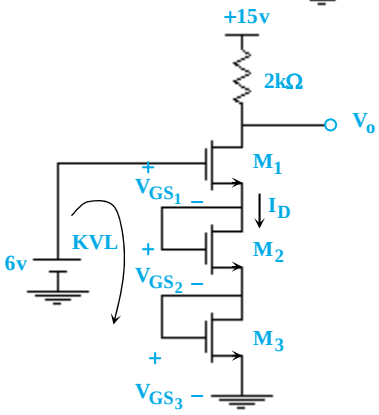
(برای همه ترانزیستورها: $V_{TH} = ۱v,\ k = \frac{۲mA}{v^{۲}}$)

۱) ۲

۲) ۶

۳) ۴

۴) ۳



☑ **پاسخ:** گزینه «۳» برای تعیین حداکثر دامنه نوسان در ابتدا باید ولتاژ خروجی را در حالت DC به دست آوریم. چون ترانزیستورها با یکدیگر سری هستند و به دلیل مشابه بودن، رابطه زیر برقرار است:

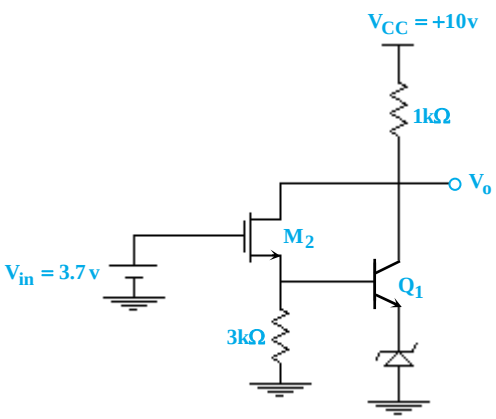
$$I_{D_۱} = I_{D_۲} = I_{D_۳} \quad , \quad V_{GS_۱} = V_{GS_۲} = V_{GS_۳}$$

$$KVL: ۶ = V_{GS_۱} + V_{GS_۲} + V_{GS_۳} \rightarrow V_{GS_۱} = V_{GS_۲} = V_{GS_۳} = ۲$$

لذا جریان I_D به صورت مقابل محاسبه می‌شود: $I_D = k(V_{GS} - V_{th})^{۲} = ۲mA$

ولتاژ خروجی در حالت DC برابر است با: $V_{O,DC} = ۱۵ - ۲I_D = ۱۱v$

با کم شدن مقدار منبع V_S، ترانزیستور $M_۱$ در آستانه خاموشی قرار می‌گیرد. در نهایت با خاموش شدن ترانزیستور ولتاژ خروجی به مقدار حداکثری ۱۵+ ولت می‌رسد؛ لذا دامنه نوسان مثبت خروجی برابر می‌شود با: $V_{om}^{+} = V_{o,max} - V_{o,DC} = ۱۵ - ۱۱ = ۴v$



مثال ۲۱: در مدار شکل مقابل مقدار خروجی برحسب ولت چقدر می‌باشد؟

$$Q_۱ : \beta = ۲۰ \quad , \quad V_{BE(on)} = ۰/۷v$$

$$V_{CE,sat} = ۰/۲v \quad , \quad V_Z = ۲v$$

$$M_۲ : \mu_n C_{ox}\left(\frac{w}{L}\right) = ۸\frac{mA}{v^{۲}} \quad , \quad V_{TH} = ۰/۵v$$

۱) ۶

۲) ۷

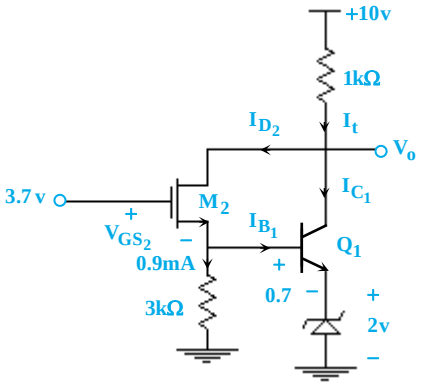
۳) ۸

۴) ۹

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» با فرض فعال بودن هر دو ترانزیستور جریان‌ها را مطابق شکل روبه‌رو پخش می‌کنیم. جریان مقاومت $۳k\Omega$ برابر می‌باشد با:



$$I_{۳k\Omega}=\frac{V_Z+V_{BE(on)}}{۳}=\frac{۲/۷}{۳}=۰/۹\,mA$$

با استفاده از رابطه جریان MOSFET در ناحیه‌ی فعال داریم:

$$I_{D_۲}=\frac{۱}{۲}\mu_n C_{ox}(\frac{w}{L})(V_{GS}-V_{TH})^۲ \rightarrow I_D=۴((۳/۷-۲/۷)-۰/۵)^۲=۱mA$$

در نتیجه طبق قانون KCL جریان بیس ترانزیستور $Q_۱$ برابر می‌شود با:

$$I_{B_۱}=۱-۰/۹=۰/۱mA$$

و با توجه به مقدار $\beta=۲۰$ داریم:

$$I_{C_۱}=\beta.I_{B_۱}=۲۰(۰/۱)=۲mA$$

لذا جریان کل I_t برابر می‌شود با:

$$I_t=I_{C_۱}+I_{D_۲}=۳\,mA$$

و مقدار ولتاژ خروجی برابر می‌شود با:

$$V_O=۱۰-۱(I_t)=۷\,v$$

با توجه به مقدار ۷ ولت در خروجی شرط فعال بودن هر دو ترانزیستور نیز برقرار می‌باشد:

$V_{GD_۲}=۳/۷-۷=-۳/۳ \rightarrow V_{GD_۲}<V_{TH}$ ✓

$V_{CE_۱}=V_O-V_Z=۷-۲=۵ \rightarrow V_{CE}>V_{CE,sat}$ ✓

www.modaresanesharif.ac.ir

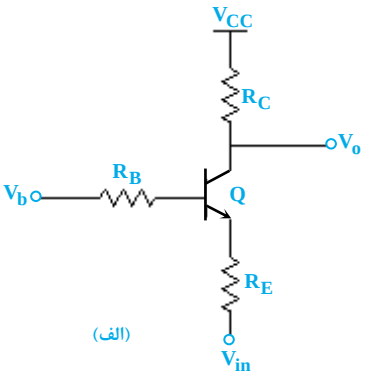
www.modaresanesharif.ac.ir

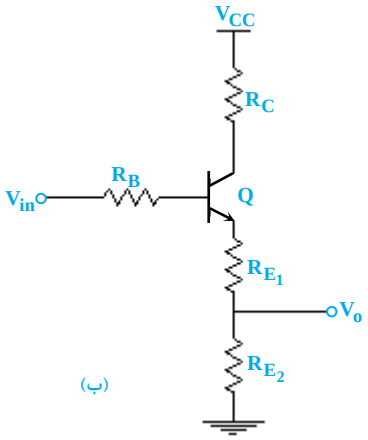
فصل سوم

تحلیل ac مدارهای ترانزیستوری

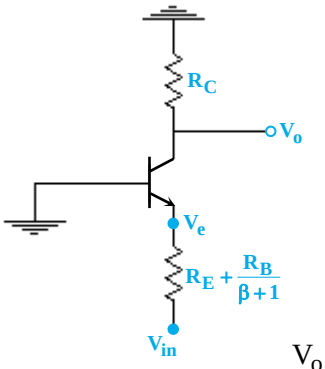
تست‌های تألیفی فصل سوم

مثال۱: بهره ولتاژ هر یک از مدارات زیر را حساب کنید.





پاسخ: الف) مدار را با انتقال مقاومت بیس به امیتر (طبق قاعده انعکاس امپدانس) ساده‌تر می‌کنیم.

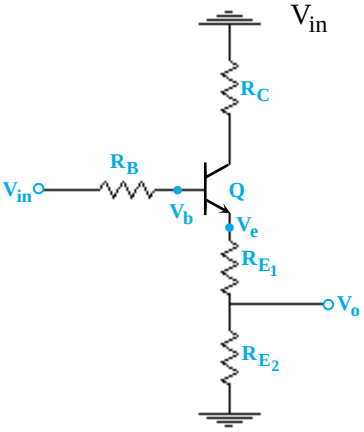


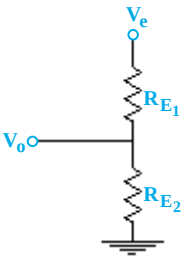
با انتخاب ولتاژ میانی (V_e) رابطه گین را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم:

$$\frac{V_o}{V_{in}}=\frac{V_o}{V_e}\times\frac{V_e}{V_{in}}$$

$$\frac{V_o}{V_e}=+g_mR_C \quad , \quad \frac{V_e}{V_{in}}=\frac{\frac{1}{g_m}}{\frac{1}{g_m}+R_E+\frac{R_B}{1+\beta}} \Rightarrow A_V=\frac{V_o}{V_{in}}=\frac{+R_C}{\frac{1}{g_m}+R_E+\frac{R_B}{1+\beta}}$$

ب) با انتخاب دو گره میانی، رابطه گین را طبق قاعده زنجیره‌ای به صورت مقابل بیان می‌کنیم: $\frac{V_o}{V_{in}}=\frac{V_o}{V_e}\times\frac{V_e}{V_b}\times\frac{V_b}{V_{in}}$





در ادامه به محاسبه هر یک از ترم‌های عبارت فوق می‌پردازیم.

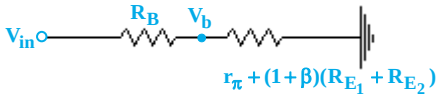
۱) $\frac{V_o}{V_e}$: با استفاده از یک تقسیم مقاومتی طبق شکل مقابل می‌توانیم نسبت خواسته شده را محاسبه کنیم:

$$\frac{V_o}{V_e}=\frac{R_{E_2}}{R_{E_1}+R_{E_2}}$$

۲) $\frac{V_e}{V_b}$: با استفاده از رابطه گین یک تقویت‌کننده کلکتور مشترک می‌توانیم حاصل $\frac{V_e}{V_b}$ را حساب کنیم:

$$\frac{V_e}{V_b}=\frac{R_{E_1}+R_{E_2}}{R_{E_1}+R_{E_2}+\frac{1}{g_m}}=\frac{(\beta+1).(R_{E_1}+R_{E_2})}{(\beta+1).(R_{E_1}+R_{E_2})+r_\pi}$$

۳) $\frac{V_b}{V_{in}}$: با استفاده از یک تقسیم مقاومتی طبق شکل زیر می‌توانیم نسبت خواسته شده را حساب کنیم:



$$\Rightarrow \frac{V_b}{V_{in}}=\frac{r_\pi+(1+\beta).(R_{E_1}+R_{E_2})}{R_B+r_\pi+(1+\beta).(R_{E_1}+R_{E_2})}$$

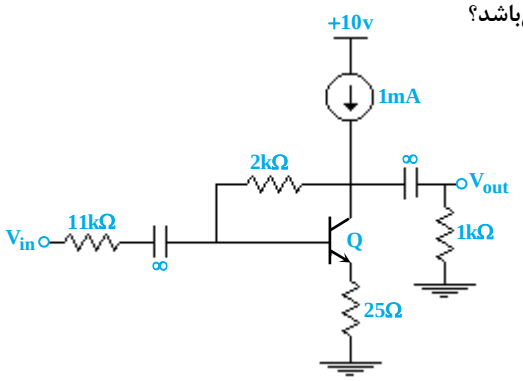
حال گین کلی $A_V=\frac{V_o}{V_{in}}$ را می‌توانیم به صورت مقابل حساب کنیم:

$$A_V=\frac{V_o}{V_{in}}=\frac{(\beta+1).R_{E_2}}{R_B+r_\pi+(\beta+1).(R_{E_1}+R_{E_2})}$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۲: با فرض $\beta >> ۱$، $V_{BE} = ۰/۷v$ و $V_A = \infty$ مقدار تقریبی بهره ولتاژ چقدر می‌باشد؟



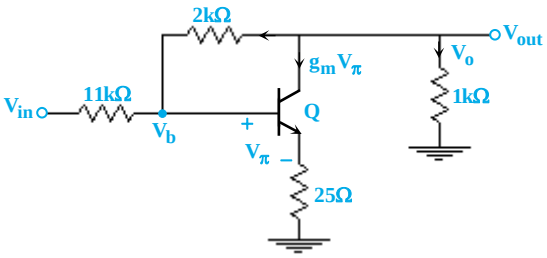
۱) $-\frac{۱}{۱۳}$

۲) $-\frac{۱}{۱۲}$

۳) $-\frac{۱}{۱۴}$

۴) $-\frac{۱}{۶}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» با توجه به جریان $۱mA$ مقدار ترارسانایی ترانزیستور $g_m = ۴۰ ms$ می‌باشد، حال به کمک مدار معادل ac زیر داریم:

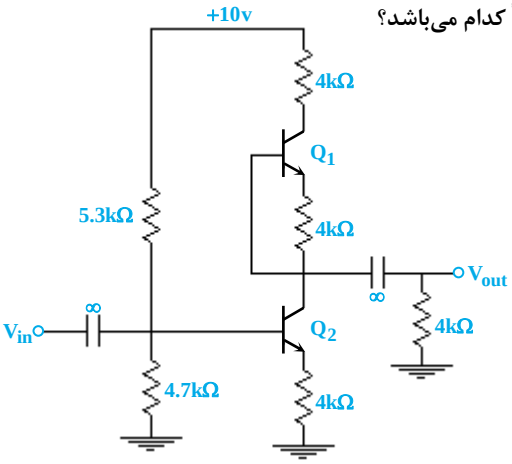


$$V_b = V_\pi + \frac{۲۵}{۱۰۰۰} \times g_m V_\pi = ۲V_\pi$$

$$KCL\ @\ V_{out}: \frac{V_o}{۱} + ۴۰V_\pi + \frac{V_o - ۲V_\pi}{۲} = ۰ \Rightarrow V_o = -۲۶V_\pi$$

$$KCL @ V_b: \frac{V_{in} - ۲V_\pi}{۱۱} = \frac{۲V_\pi - V_o}{۲} \Rightarrow V_{in} = -۶V_o \Rightarrow A_V = -\frac{۱}{۶}$$

مثال ۳: در شکل زیر $\beta >> ۱$ ، $r_o = \infty$ و $V_{BE} = ۰/۷v$ می‌باشد. بهره ولتاژ مدار تقریباً کدام می‌باشد؟



۱) $+۱$

۲) -۱

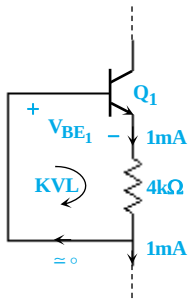
۳) صفر

۴) نمی‌توان تعیین کرد.

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» در مرحله اول با کمک تحلیل DC سعی می‌کنیم پارامترهای سیگنال کوچک ترانزیستورها را محاسبه کنیم.

$$V_{B_۲} = \frac{۴/۷}{۴/۷ + ۵/۳} \times ۱۰ = ۴/۷v \Rightarrow V_{E_۲} = ۴v \quad ; \quad I_{CQ_۲} = \frac{V_{B_۲} - V_{BE(on)}}{۴} = ۱mA$$

با توجه به آرایش ترانزیستورها می‌توان گفت جریان ترانزیستور $Q_۱$ نیز باید برابر $۱mA$ باشد، اما اگر چنین اتفاقی بیفتد ولتاژ بیس ـ امیتر ترانزیستور $Q_۱$ با نوشتن KVL در حلقه نشان داده شده برابر می‌شود با:



$$KVL: V_{BE_۱} + ۴ \times ۱ = ۰ \Rightarrow V_{BE_۱} = -۴v$$

لذا شرط روشن بودن ترانزیستور $Q_۱$ برقرار نمی‌باشد و چون مسیر دیگری برای عبور جریان ترانزیستور $Q_۲$ وجود ندارد، می‌توان گفت هر دو ترانزیستور خاموش خواهند بود و ولتاژ خروجی صفر می‌شود، پس گین کلی مدار نیز صفر می‌باشد.

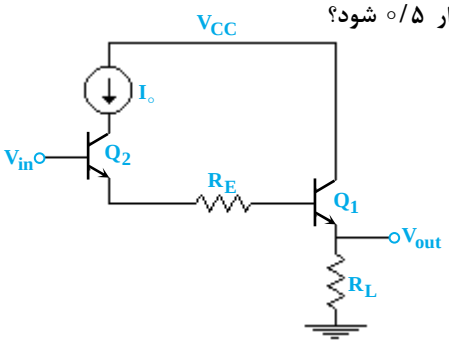
---

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۴: در مدار زیر چه رابطه‌ای بین R_E و R_L (برحسب کیلواهم) برقرار باشد تا بهره ولتاژ مدار ۰/۵ شود؟

$(I_\circ = \circ/۱mA \ , \beta = ۱\circ \ , r_o = \infty)$



۱) $R_L = \frac{R_E}{۱۱} + ۲/۵$

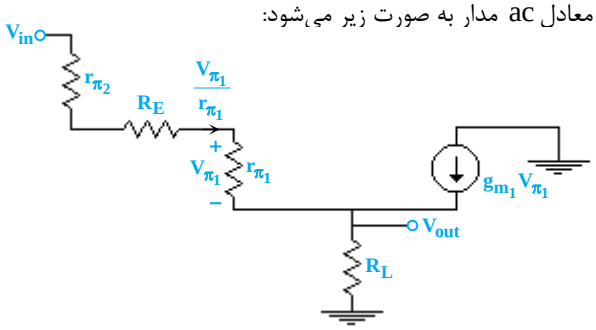
۲) $R_L = \frac{R_E}{۱\circ} + \circ/۲۵$

۳) $R_L = \frac{R_E}{۱۱} + ۲۵$

۴) $R_L = \frac{R_E}{۱۱} + \circ/۲۵$

پاسخ: گزینه «۱» با توجه به مقدار منبع جریان DC مقدار ترارسانایی ترانزیستورها برابر است با: $g_{m_۱} = ۴\circ ms \ , \ g_{m_۲} = ۴ ms$

با قرار دادن مدل π برای ترانزیستورها مدار معادل ac مدار به صورت زیر می‌شود:



با توجه به خواسته سؤال می‌خواهیم $V_{in} = ۲V_o$ شود. با نوشتن ولتاژهای ورودی و خروجی طبق مدار معادل داریم:

$$V_o = R_L[\frac{V_{\pi_۱}}{r_{\pi_۱}} + g_{m_۱} V_{\pi_۱}] = \frac{V_{\pi_۱}}{r_{\pi_۱}}[R_L + g_{m_۱} R_L . r_{\pi_۱}] \qquad (I)$$

$$V_{in} = \frac{V_{\pi_۱}}{r_{\pi_۱}}[r_{\pi_۲} + R_E + r_{\pi_۱}] + V_o \xrightarrow{V_{in} = ۲V_o} V_o = \frac{V_{\pi_۱}}{r_{\pi_۱}}[r_{\pi_۲} + R_E + r_{\pi_۱}] \qquad (II)$$

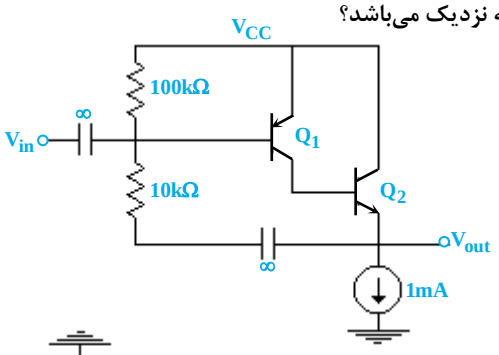
از برابر قرار دادن رابطه‌های (I) و (II) داریم:

$$R_L(۱ + g_{m_۱} r_{\pi_۱}) = R_E + r_{\pi_۱} + r_{\pi_۲} \Rightarrow R_L = \frac{R_E}{۱+\beta} + \frac{r_{\pi_۱} + r_{\pi_۲}}{۱+\beta}$$

از طرفی جریان ترانزیستور $Q_۱$، β برابر جریان ترانزیستور $Q_۲$ می‌باشد، لذا:

$$I_{C_۱} = \beta I_{C_۲} \Rightarrow r_{\pi_۱} = \frac{r_{\pi_۲}}{\beta} \Rightarrow R_L = \frac{R_E}{۱+\beta} + \frac{r_{\pi_۱}(۱+\beta)}{۱+\beta} = \frac{R_E}{۱+\beta} + r_{\pi_۱} \Rightarrow R_L k\Omega = \frac{R_E k\Omega}{۱۱} + ۲/۵ k\Omega$$

مثال ۵: با فرض $V_T = ۲۵mv$ ، $\beta = ۱\circ\circ$ و $V_A = \infty$ بهره ولتاژ مدار زیر به کدام گزینه نزدیک می‌باشد؟



۱) $-۱\circ\circ$

۲) $-۴\circ\circ\circ$

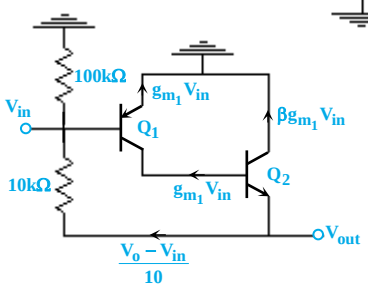
۳) $-۲\circ\circ$

۴) $-۴\circ\circ$

پاسخ: گزینه «۴» جریان ترانزیستورهای $Q_۱$ و $Q_۲$ به صورت تقریبی برابر است با:

$$I_{C_۱} \simeq \circ/\circ۱mA \Rightarrow g_{m_۱} = \circ/۴ ms \quad , \quad I_{C_۲} = ۱mA \Rightarrow g_{m_۲} = ۴\circ ms$$

در مدار معادل ac مقابل با پخش جریان شاخه‌ها داریم:



با نوشتن KCL در گره خروجی می‌توانیم گین را حساب کنیم:

$$-\beta g_{m_۱} V_{in} = \frac{V_o - V_{in}}{۱\circ} \Rightarrow V_o - V_{in} = -۱\circ\circ\circ \times \circ/۴ V_{in}$$

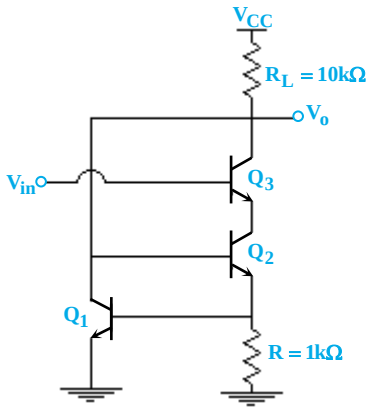
$$\Rightarrow A_V \simeq -۴\circ\circ$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۶: بهره ولتاژ مدار شکل مقابل چقدر می‌باشد؟

$(g_{m_1} = g_{m_2} = g_{m_3} = ۱۰ ms\ ,\ \beta = ۱۰۰\ ,\ r_o = \infty)$



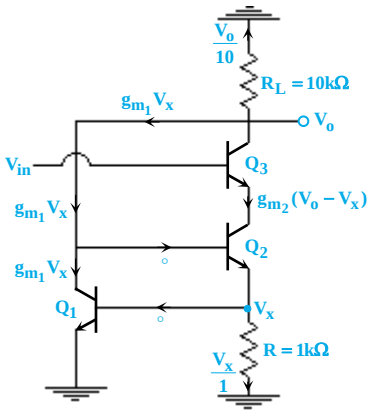
۱) ۰

۲) بی‌نهایت

۳) نمی‌توان تعیین کرد.

۴) اطلاعات مسئله کافی نیست.

پاسخ: گزینه «۱» با رسم مدار معادل ac و پخش جریان‌های مربوطه داریم:



$$g_{m_2}(V_o - V_x) = V_x \Rightarrow V_x = \frac{V_o}{۱۱}$$

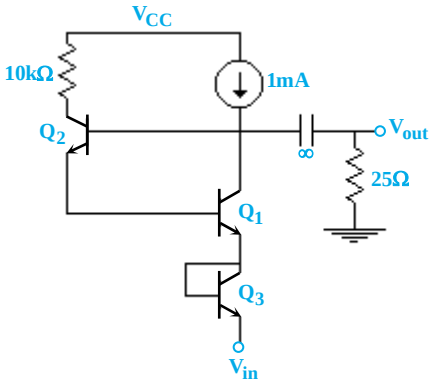
با نوشتن KCL در گره خروجی داریم:

$$KCL@V_o : \frac{-V_o}{۱۰} = ۱۰V_x + V_x = ۱۱V_x$$

$$\Rightarrow \frac{-V_o}{۱۰} = ۱۱(\frac{V_o}{۱۱}) \Rightarrow V_o = ۰ \Rightarrow A_V = \frac{V_o}{V_{in}} = ۰$$

مثال ۷: در مدار مقابل ترانزیستورها در ناحیه فعال می‌باشند، مقدار بهره ولتاژ کدام گزینه می‌باشد؟

$(V_A = \infty\ ,\ \beta = ۱۰۰\ ,\ V_T = ۲۵mv)$



۱) $+\frac{۱}{۴}$

۲) $+\frac{۱}{۵}$

۳) $+\frac{۱}{۳}$

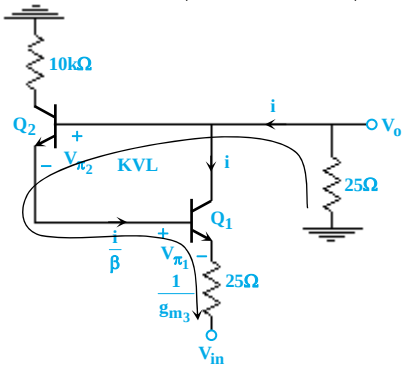
۴) $+\frac{۱}{۲}$

پاسخ: گزینه «۱» پارامترهای سیگنال کوچک هر یک از ترانزیستورها به صورت زیر می‌باشد:

$$I_{C_1} = I_{C_3} = ۱mA \Rightarrow g_{m_1} = g_{m_3} = ۴۰ ms\ ,\ \frac{۱}{g_{m_1}} = \frac{۱}{g_{m_3}} = ۲۵\Omega$$

$$I_{C_2} = ۰/۰۱mA \Rightarrow g_{m_2} = ۰/۴ ms\ ,\ r_{e_2} = ۲۵۰۰\Omega$$

با جایگذاری ترانزیستور Q_3 با مقاومت معادل آن، مدار معادل ac به صورت مقابل ساده می‌شود. در اینجا فرض می‌کنیم جریان خروجی برابر i باشد، سپس سعی می‌کنیم ولتاژهای خروجی و ورودی را برحسب i بیان کنیم. دقت شود جریان‌ها به علت صرف‌نظر کردن از جریان بیس Q_2 تقریبی می‌باشند:



$$V_o = -۲۵i \qquad (I)$$

$$KVL: -۲۵i = V_{\pi_2} + V_{\pi_1} + ۲۵i + V_{in} \qquad (II)$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

برای مقادیر V_{π_1} و V_{π_2} داریم:

$$V_{\pi_1}=\frac{i}{\beta}\cdot r_{\pi_1}=\frac{i}{\beta}\times\frac{\beta}{g_{m_1}}=i\times\frac{1}{g_{m_1}}=i\times r_{e_1}=25i \quad , \quad V_{\pi_2}=\frac{i}{\beta^2}\cdot r_{\pi_2}=\frac{i}{\beta^2}\times\frac{\beta}{g_{m_2}}=\frac{i}{\beta}\cdot\frac{1}{g_{m_2}}=\frac{i}{\beta}\times r_{e_2}=25i$$

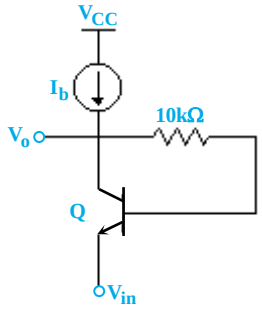
در نتیجه برای رابطه (II) داریم:

$$-25i=25i+25i+25i+V_{in} \Rightarrow V_{in}=-100i$$

حال گین را می‌توان به راحتی به صورت مقابل محاسبه کرد:

$$A_V=\frac{V_o}{V_{in}}=\frac{-25i}{-100i}=+\frac{1}{4}$$

مثال ۸: **با فرض اینکه ترانزیستور در ناحیه فعال می‌باشد، بهره ولتاژ مدار چقدر می‌باشد؟** $(\beta=50 \ , \ r_o=10k\Omega \ , \ g_m=10ms)$



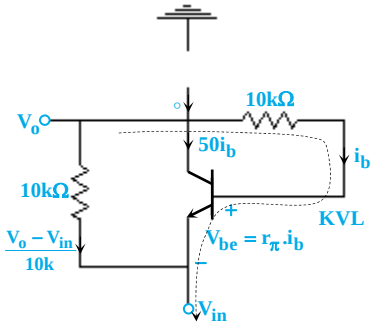
۱) -1

۲) $+1$

۳) $+\frac{2}{3}$

۴) $-\frac{2}{3}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» به کمک روش پخش جریان‌ها مطابق شکل زیر و استفاده از قاعده KVL در حلقه شامل خروجی و پیوند بیس ـ امیتر و قاعده KCL در پایه کلکتور ترانزیستور داریم:



$$KVL: V_o=10i_b+V_{be}+V_{in}=V_{in}+(10+r_\pi)i_b$$

$$\Rightarrow V_o=V_{in}+15i_b \qquad (I)$$

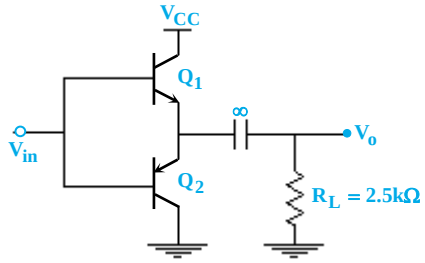
$$KCL: i_b+50i_b+\frac{V_o-V_{in}}{10k}=0$$

$$\Rightarrow i_b=\frac{V_{in}-V_o}{510k} \qquad (II)$$

با جایگذاری رابطه (II) در (I) داریم:

$$(I),(II) \Rightarrow V_o=V_{in}+15\left(\frac{V_{in}-V_o}{510}\right) \Rightarrow V_o\left(1+\frac{15}{510}\right)=V_{in}\left(1+\frac{15}{510}\right) \Rightarrow \frac{V_o}{V_{in}}=+1$$

مثال ۹: **در مدار شکل زیر با فرض** $r_{o_1}=r_{o_2}=20k\Omega$ **و** $g_{m_1}=g_{m_2}=2ms$ **بهره ولتاژ چقدر می‌باشد؟**



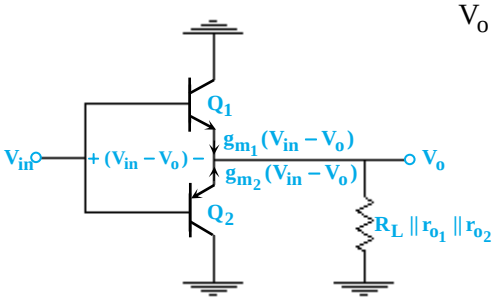
۱) $-\frac{8}{9}$

۲) $+\frac{9}{8}$

۳) $+\frac{8}{9}$

۴) $-\frac{9}{8}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» **روش اول:** با کمک روش پخش جریان‌ها و مدار معادل ac زیر داریم:



$$V_o=[(g_{m_1}+g_{m_2})(V_{in}-V_o)]\times(R_L \| r_{o_1} \| r_{o_2})$$

با ساده‌سازی رابطه فوق داریم:

$$\frac{V_o}{V_{in}}=\frac{(g_{m_1}+g_{m_2}).(R_L \| r_{o_1} \| r_{o_2})}{1+(g_{m_1}+g_{m_2}).(R_L \| r_{o_1} \| r_{o_2})}$$

با عددگذاری در رابطه فوق داریم:

$$A_V=\frac{(4ms)\times(2/5k \| 20k \| 20k)}{1+(4ms)\times(2/5k \| 20k \| 20k)}=\frac{8}{1+8}=\frac{8}{9}$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

روش دوم ($r_o \neq \infty$) : در صورتی که یک شبکه پیچیده به همراه سیگنال ورودی و سیگنال خروجی به صورت زیر باشد، می‌توان نشان داد که بهره این شبکه از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -G_m . R_{out}$$

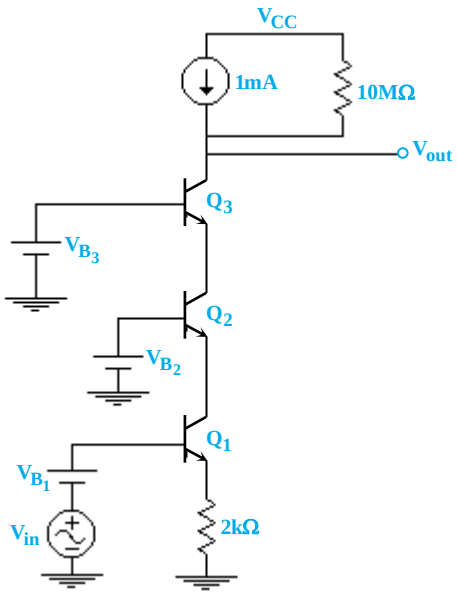
در رابطه فوق R_{out} مقاومت خروجی شبکه با در نظر گرفتن اثر مقاومت خروجی ترانزیستورها (r_o) می‌باشد و G_m ترارسانایی معادل کل شبکه بدون در نظر گرفتن اثر مقاومت خروجی ترانزیستورها (r_o) می‌باشد. دقت شود روش محاسبه‌ی G_m برای یک شبکه به صورت زیر می‌باشد:

$$G_m = \left.\frac{I_{out}}{V_{in}}\right|_{V_o = 0}$$

در واقع G_m برابر نسبت جریان اتصال کوتاه خروجی به ولتاژ ورودی می‌باشد. برای فهم بهتر این روش به حل مثال با این روش می‌پردازیم.

مثال ۱۰: مدار زیر در ناحیه فعال بایاس شده است. بهره ولتاژ مدار چقدر می‌باشد؟

($V_A = 100v$, $\beta = 100$)



۱) -10000

۲) -5000

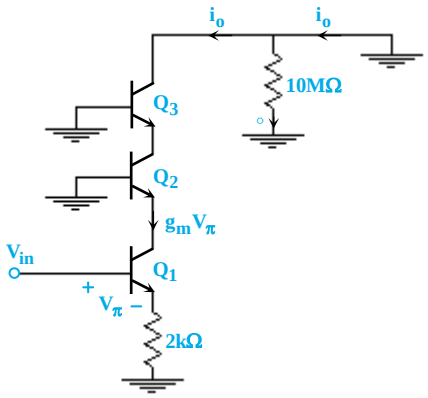
۳) -2500

۴) -20000

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» با توجه به آرایش ترانزیستورها مقدار جریان DC و پارامترهای سیگنال کوچک آنها برابر است با:

$$I_{CQ_1} = I_{CQ_2} = I_{CQ_3} = 1mA \Rightarrow g_{m_1} = g_{m_2} = g_{m_3} = 40ms \ , \ r_{o_1} = r_{o_2} = r_{o_3} = 100k\Omega$$

برای محاسبه گین ابتدا بدون در نظر گرفتن اثر r_o ترانزیستورها با اتصال کوتاه کردن خروجی و محاسبه جریان خروجی، مقدار ترارسانایی معادل تقویت‌کننده را حساب می‌کنیم:



$$i_o = g_m V_\pi$$

$$KVL: V_{in} = V_\pi + 2k \times g_m V_\pi$$

$$\Rightarrow V_\pi = \frac{V_{in}}{1+80} \simeq \frac{V_{in}}{80}$$

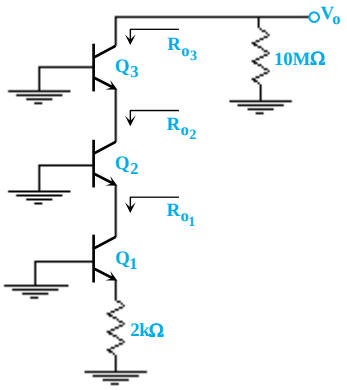
لذا برای ترارسانایی معادل داریم:

$$G_m = \left.\frac{i_o}{V_{in}}\right|_{V_o = 0} = \frac{g_m(\frac{V_{in}}{80})}{V_{in}} = \frac{1}{2} ms$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

در مورد یک ترانزیستور BJT می‌دانیم که مقاومت دیده شده از کلکتور از رابطه $R_{out} = r_o(1+g_m(r_\pi \| R_E))$ به دست می‌آید. لذا برای محاسبه مقاومت خروجی کل طبق مدار معادل ac زیر به صورت مرحله به مرحله مقاومت‌ها را محاسبه می‌کنیم:



$$R_{o_1} = r_o(1+g_m(r_\pi \| 2k)) \simeq 4544k\Omega$$

$$R_{o_2} = r_o(1+g_m(r_\pi \| R_{o_1})) \simeq 10M\Omega$$

$$R_{o_3} = r_o(1+g_m(r_\pi \| R_{o_2})) \simeq 10M\Omega$$

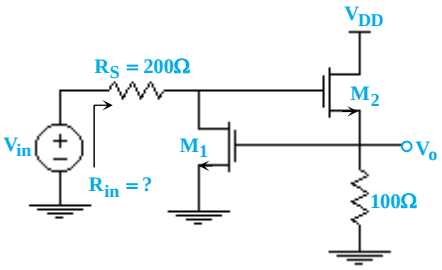
لذا مقاومت خروجی کل تقویت‌کننده برابر است با:

$$R_{out} = 10M \| R_{o_3} = 5M\Omega$$

گین تقویت‌کننده برابر می‌شود با:

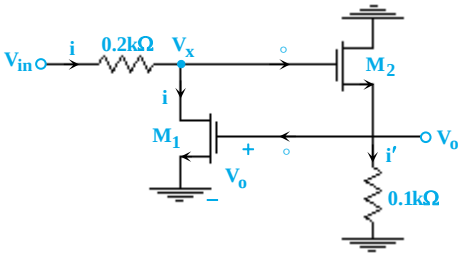
$$A_V = -G_m.R_{out} = -\frac{1}{2}\times 5000 = -2500$$

مثال ۱۱: در مدار شکل زیر با فرض $r_{o_{1,2}} = \infty$ و $g_{m_{1,2}} = 10ms$ و فعال بودن ترانزیستورها مقدار مقاومت ورودی کدام گزینه می‌باشد؟



۱) ۱۰۰Ω
۲) ۱۵۰Ω
۳) ۴۰۰Ω
۴) ۲۰۰Ω

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» مطابق مدار معادل ac مقابل سعی می‌کنیم نسبت $\frac{V_{in}}{i}$ را به دست آوریم:



$$\begin{cases} i = g_{m_1}V_o = 10V_o \\ i' = g_{m_2}(V_x - V_o) = 10(V_x - V_o) \\ V_o = 0/1i' \Rightarrow i' = 10V_o \end{cases}$$

با جایگذاری $i' = 10V_o$ در رابطه دوم داریم:

$$10V_o = 10(V_x - V_o) \Rightarrow 2V_o = V_x$$

با جایگذاری $i = 10V_o$ در رابطه فوق داریم:

$$V_x = 2(\frac{i}{10}) = \frac{i}{5}$$

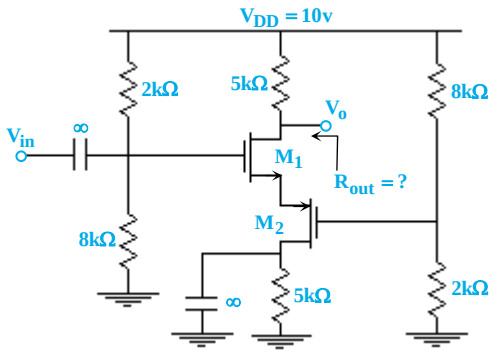
حال با داشتن ولتاژ V_x می‌توان نسبت $\frac{V_{in}}{i}$ را به دست آورد.

$$i = \frac{V_{in} - V_x}{0/2} \xrightarrow{V_x = \frac{i}{5}} 0/2i = V_{in} - 0/2i \Rightarrow 0/4i = V_{in}$$

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{i} = 0/4k\Omega \Rightarrow R_{in} = 400\Omega$$

مثال ۱۲: در مدار شکل زیر مقاومت خروجی R_{out} کدام گزینه می‌باشد؟

(برای همه ترانزیستورها $V_A = 10v$, $|V_{th}| = 2v$, $k = \frac{1mA}{V^2}$)



۱) ۲kΩ
۲) ۴kΩ
۳) ۱kΩ
۴) ۲/۵kΩ

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» با استفاده از تقسیم ولتاژ، ولتاژ گیت ترانزیستورهای M_1 و M_2 را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$V_{G_1}=\frac{8\times 10}{8+2}=8\,v \quad , \quad V_{G_2}=\frac{2\times 10}{8+2}=2\,v$$

با توجه به آنکه ترانزیستورهای M_1 و M_2 مشابه هستند و جریان یکسانی دارند، ولتاژ گیت ـ سورس آنها نیز باید یکسان باشد؛ لذا داریم:

$$|V_{GS_1}|=|V_{GS_2}|=\frac{8-2}{2}=3\,v$$

$$I_{D_1}=I_{D_2}=k(|V_{gs}|-|V_{th}|)^2=1mA$$

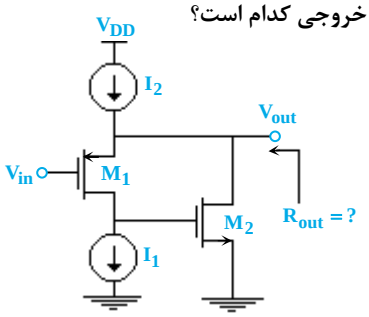
پارامترهای سیگنال کوچک به صورت مقابل محاسبه می‌شوند:

$$g_m=2\sqrt{kI_D}=2\frac{mA}{V} \quad , \quad r_o=\frac{V_A}{I_D}=10k\Omega$$

رابطه مقاومت خروجی را می‌توان به صورت مقابل بیان کرد:

$$R_{out}=5k\Omega\,\|\,(r_{o_1}+(r_{o_2}\,\|\,\frac{1}{g_{m_2}}).(g_{m_1}.r_{o_1}))\simeq 5k\Omega\,\|\,20k\Omega=4k\Omega$$

مثال ۱۳: در مدار شکل زیر با فرض $r_{o_1}\neq r_{o_2}\neq\infty$ و $g_{m_1}\neq g_{m_2}$ و $g_{m_1}r_{o_1}>>1$ و $g_{m_2}r_{o_2}$ مقاومت خروجی کدام است؟



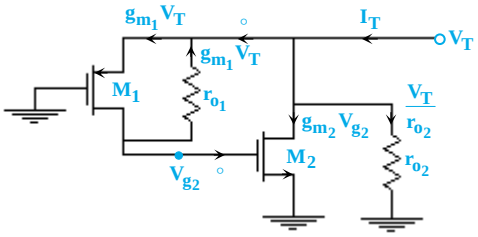
۱) $\frac{1}{g_{m_1}g_{m_2}r_{o_1}}$

۲) $\frac{1}{g_{m_1}g_{m_2}r_{o_2}}$

۳) $\frac{1}{g_{m_1}r_{o_2}}$

۴) $\frac{1}{g_{m_2}r_{o_1}}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» برای محاسبه‌ی مقاومت خروجی پس از رسم مدار معادل ac و اتصال کوتاه کردن منبع ورودی داریم:

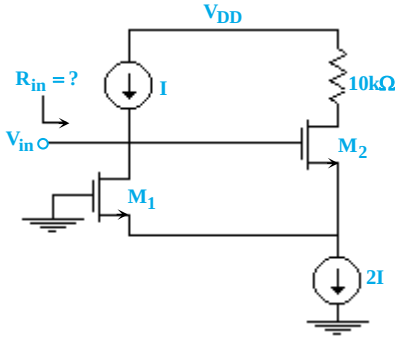


$$V_{g_2}=V_T+r_{o_1}(g_{m_1}V_T)=V_T(1+g_{m_1}r_{o_1})$$

$$KCL: I_T=\frac{V_T}{r_{o_2}}+g_{m_2}V_{g_2} \xrightarrow{V_{g_2}=V_T(1+g_{m_1}r_{o_1})} I_T=\frac{V_T}{r_{o_2}}+g_{m_2}V_T(1+g_{m_1}r_{o_1})$$

$$R_{out}=\frac{V_T}{I_T}=\frac{r_{o_2}}{1+g_{m_2}r_{o_2}(1+g_{m_1}r_{o_1})}\simeq\frac{r_{o_2}}{g_{m_2}r_{o_2}(g_{m_1}r_{o_1})}\Rightarrow R_{out}\simeq\frac{1}{g_{m_1}g_{m_2}r_{o_1}}$$

مثال ۱۴: در شکل زیر ترانزیستورها همگی مشابه و در ناحیه فعال خود می‌باشند. با فرض $r_{o_{1,2}}=\infty$ و $g_{m_1}=g_{m_2}=g_m$ مقاومت ورودی R_{in} کدام گزینه می‌باشد؟



۱) $-\frac{1}{g_m}$

۲) $\frac{1}{g_m}$

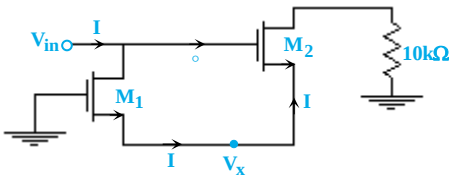
۳) $-\frac{2}{g_m}$

۴) $\frac{2}{g_m}$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» با رسم مدار معادل ac داریم:

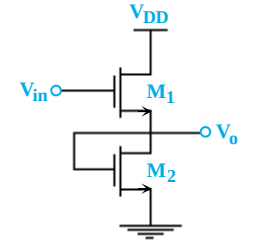


$$I=-g_{m_1}.V_x$$
$$I=g_{m_2}(V_x-V_{in})$$
$$\Rightarrow -g_m.V_x=g_m(V_x-V_{in})\Rightarrow V_x=\frac{V_{in}}{2}$$

حال می‌توان نسبت $\frac{V_{in}}{I}$ را محاسبه کرد:

$$I=-g_{m_1}.V_x \xrightarrow{V_x=\frac{V_{in}}{2}} I=-g_m(\frac{V_{in}}{2})\Rightarrow \frac{V_{in}}{I}=\frac{-2}{g_m}$$

مثال ۱۵: **مقاومت خروجی مدار شکل مقابل کدام می‌باشد؟ $(r_{o_{1,2}}=\infty)$**



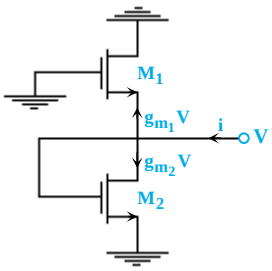
۱) $g_{m_1}+g_{m_2}$

۲) $\frac{g_{m_1}g_{m_2}}{g_{m_1}+g_{m_2}}$

۳) $\frac{1}{g_{m_1}+g_{m_2}}$

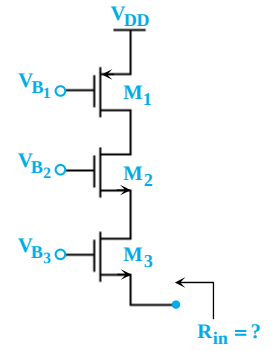
۴) $\frac{1}{g_{m_1}}+\frac{1}{g_{m_2}}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» با خاموش کردن منبع ولتاژ ورودی و قرار دادن منبع ولتاژ تست در خروجی داریم:



$$KCL: i=g_{m_1}V+g_{m_2}V$$
$$\Rightarrow R_{out}=\frac{V}{i}=\frac{1}{g_{m_1}+g_{m_2}}$$

مثال ۱۶: **در مدار شکل زیر تمام ترانزیستورها در ناحیه اشباع خود هستند و دارای g_m و r_o یکسانی می‌باشند. با صرفنظر کردن از اثر بدنه مقدار مقاومت ورودی کدام می‌باشد؟**



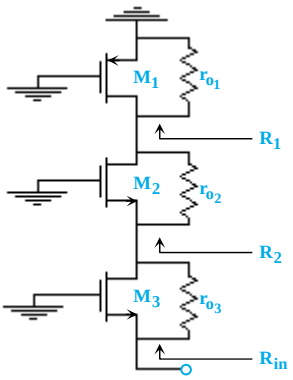
۱) $\frac{2}{g_m}$

۲) $\frac{1}{g_m}(1+\frac{2}{g_m r_o})$

۳) $\frac{1}{g_m}$

۴) $\frac{2}{g_m^2.r_o}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» برای محاسبه مقاومت ورودی در ابتدا مقاومت‌های R_1 و R_2 را به دست می‌آوریم.



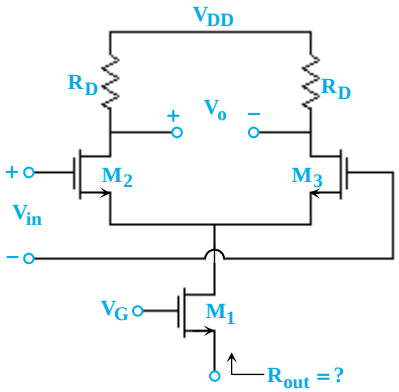
$$R_1=r_{o_1}=r_o$$
$$R_2=\frac{r_{o_2}}{\mu_2}+\frac{r_{o_1}}{\mu_2}=\frac{1}{g_{m_2}}+\frac{r_{o_1}}{g_{m_2}r_{o_2}}=\frac{2}{g_m}$$
$$R_{in}=\frac{r_{o_3}}{\mu_3}+\frac{R_2}{\mu_3}=\frac{1}{g_m}(1+\frac{2}{g_m r_o})$$

---

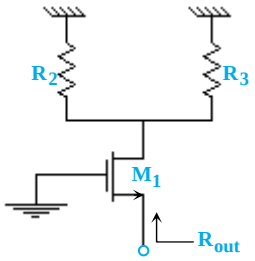
www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۱۷: با فرض $r_o \neq \infty$ مقاومت R_{out} را برای مدار شکل زیر حساب کنید.



☑ **پاسخ:** اگر فرض کنیم مقاومت دیده شده از سورس M_2 برابر R_2 و مقاومت دیده شده از سورس M_3 برابر R_3 باشد، مدار معادل زیر را می‌توان رسم کرد. طبق قواعد انعکاس امپدانس (نکته (۱)) این مقاومت‌ها را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:



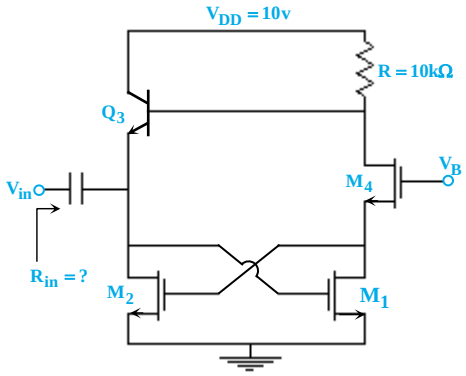
$$R_2 = (r_{o_2} \parallel \frac{1}{g_{m_2}}) + \frac{R_D}{1 + g_{m_2}.r_{o_2}}$$

$$R_3 = (r_{o_3} \parallel \frac{1}{g_{m_3}}) + \frac{R_D}{1 + g_{m_3}.r_{o_3}}$$

در مرحله بعد باز هم به کمک قواعد انعکاس امپدانس مقاومت R_{out} را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$R_{out} = (r_{o_1} \parallel \frac{1}{g_{m_1}}) + \frac{(R_2 \parallel R_3)}{1 + g_{m_1}.r_{o_1}}$$

مثال ۱۸: برای مدار شکل زیر مقاومت ورودی چقدر می‌باشد؟



$$(r_{o_{1-4}} = \infty \ , \ g_{m_{1-4}} = 2\frac{mA}{V})$$

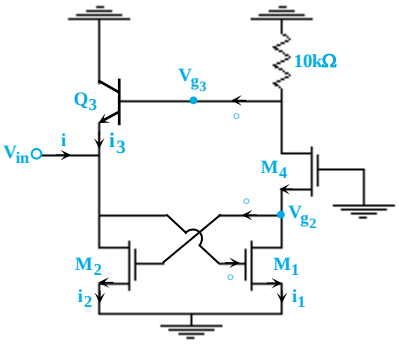
۱) 50Ω

۲) 20Ω

۳) -25Ω

۴) 25Ω

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» با رسم مدار معادل ac در شکل مقابل و پخش جریان سعی می‌کنیم نسبت $\frac{V_{in}}{i}$ را حساب کنیم.



$$i_1 = g_{m_1}.V_{in} = 2V_{in}$$

$$i_1 = g_{m_4}(0 - V_{g_2}) \Rightarrow V_{g_2} = \frac{-i_1}{g_{m_4}}$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

با استفاده از دو رابطه‌ی فوق می‌توان گفت:

$$-g_{m_۴}.V_{g_۲}=g_{m_۱}.V_{in}\Rightarrow V_{g_۲}=-V_{in}$$

با داشتن ولتاژ $V_{g_۲}$ جریان ترانزیستور $M_۲$ را نیز می‌توان به دست آورد:

$$i_۲=g_{m_۲}.V_{g_۲}=-۲V_{in}$$

پس از بیان جریان‌های $i_۱$ و $i_۲$ برحسب V_{in} سعی می‌کنیم جریان $i_۳$ را نیز برحسب V_{in} بیان کنیم:

$$V_{b_۳}=-۱۰\,i_۱\xrightarrow{i_۱=۲V_{in}}V_{b_۳}=-۲۰\,V_{in}$$

$$i_۳=g_{m_۳}(-۲۰\,V_{in}-V_{in})\Rightarrow i_۳=-۴۲\,V_{in}$$

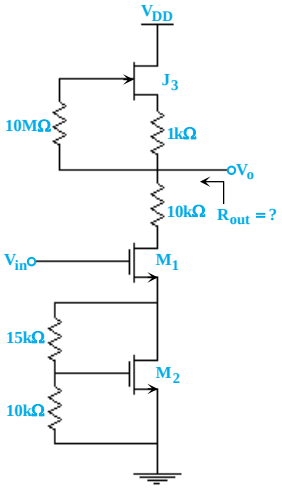
با نوشتن KCL در گره ورودی داریم:

$$i=i_۲-i_۳\xrightarrow[i_۲=-۲V_{in}]{i_۳=-۴۲V_{in}}i=-۲V_{in}+۴۲V_{in}=۴۰\,V_{in}\Rightarrow R_{in}=\frac{V_{in}}{i}=\frac{۱}{۴۰}\,k\Omega\Rightarrow R_{in}=۲۵\Omega$$

مثال ۱۹: با مفروضات زیر مقدار مقاومت خروجی در مدار زیر کدام گزینه می‌باشد؟

$$g_{m_۱}=۴ms\ ,\ g_{m_۲}=۱ms\ ,\ g_{m_۳}=۱/۵ms$$

$$r_{o_۱}=r_{o_۲}=r_{o_۳}=۱۰k\Omega$$



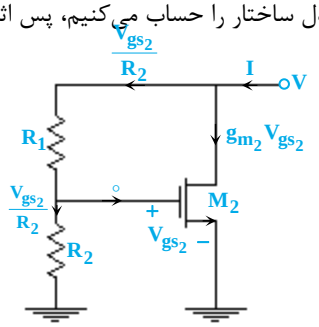
۱) $۲۵\,k\Omega$

۲) $۲۰\,k\Omega$

۳) $۵۰\,k\Omega$

۴) $\frac{۵۰}{۳}\,k\Omega$

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» برای محاسبه مقاومت خروجی باید ابتدا مقاومت دو ساختار را در شکل فوق حساب کنیم. ابتدا به محاسبه ساختار مشابه ضرب‌کننده V_{BE} می‌پردازیم. در مورد این ساختار در ابتدا فرض می‌کنیم مقاومت r_o بی‌نهایت باشد و مقاومت معادل ساختار را حساب می‌کنیم، پس اثر آن را به صورت یک مقاومت موازی اضافه می‌کنیم.



طبق قاعده‌ی تقسیم مقاومتی رابطه بین V و $V_{gs_۲}$ به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{V\times R_۲}{R_۱+R_۲}=V_{gs_۲}$$

و براساس قاعده KCL درین ترانزیستور داریم:

$$I=g_{m_۲}V_{gs_۲}+\frac{V_{gs_۲}}{R_۲}$$

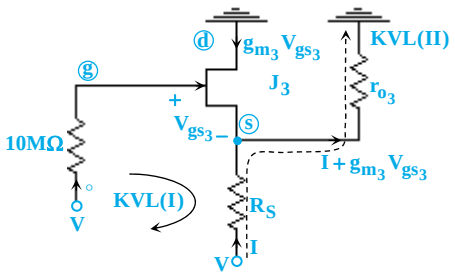
با جایگذاری $V_{gs_۲}$ در رابطه فوق داریم:

$$I=(g_{m_۲}+\frac{۱}{R_۲}).\frac{V\times R_۲}{R_۱+R_۲}\Rightarrow R_{out}=\frac{V}{I}=\frac{R_۱+R_۲}{۱+g_{m_۲}R_۲}=\frac{۱}{g_{m_۲}}.\frac{R_۱+R_۲}{\frac{۱}{g_{m_۲}}+R_۲}\simeq\frac{۱}{g_{m_۲}}.(۱+\frac{R_۱}{R_۲})$$

و اگر اثر مقاومت $r_{o_۲}$ را هم اضافه کنیم، در این مثال مقاومت ساختار برابر می‌شود با:

$$R_{o_۱}=r_{o_۲}\,||\,[\frac{۱}{g_{m_۲}}.(۱+\frac{۱۵}{۱۰})]=۱۰k\,||\,[۱k.(۱+۱/۵)]=۱۰k\,||\,۲/۵k=۲k\Omega$$

در مورد ساختار دوم موجود در سؤال هم داریم:



$$KVL\,(I):V_{gs_۳}=R_S.I\qquad(I)$$

$$KVL\,(II):V=R_S.I+r_{o_۳}(I+g_{m_۳}V_{gs_۳})\qquad(II)$$

www.modaresanesharif.ac.ir

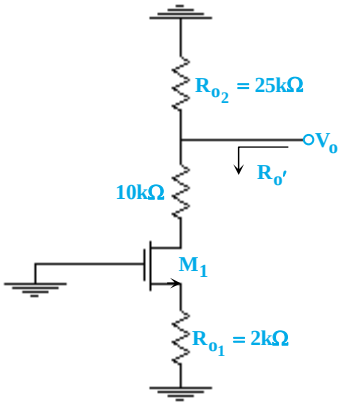
www.modaresanesharif.ac.ir

با جایگذاری رابطه (I) در (II) خواهیم داشت: $R_{o_2} = r_{o_3} + R_s(1+g_{m_3}r_{o_3})$

با عددگذاری مقدار مقاومت ساختار نشان داده شده برابر است با:

$R_{o_2} = 10\,k + 1k \times (1+15) \simeq 25\,k\Omega$

در نتیجه می‌توان با جایگذاری ساختارهای محاسبه شده در شکل اصلی به مدار معادل ساده شده زیر رسید. در ابتدا مقاومت R'_o را با کمک قواعد انعکاس امپدانس به دست می‌آوریم.

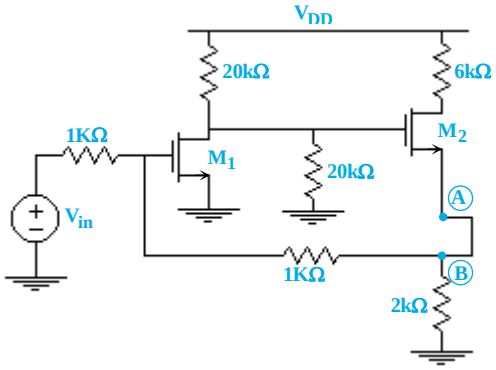


$R'_o = 10\,k + r_{o_1} + 2k.(1+g_{m_1}r_{o_1})$

$R'_o \simeq 10\,k + 10\,k + 2k.(40) = 100\,k\Omega$

لذا مقاومت کل خروجی برابر می‌شود با: $R_{out} = 100\,k\Omega \,||\, 25k\Omega = 20\,k\Omega$

مثال ۲۰: در مدار شکل زیر $g_{m_1} = 1ms$ و $g_{m_2} = 10ms$ و $r_o = \infty$ است. مقاومت سیگنال کوچک دیده شده بین نقاط **A** و **B** کدام است؟



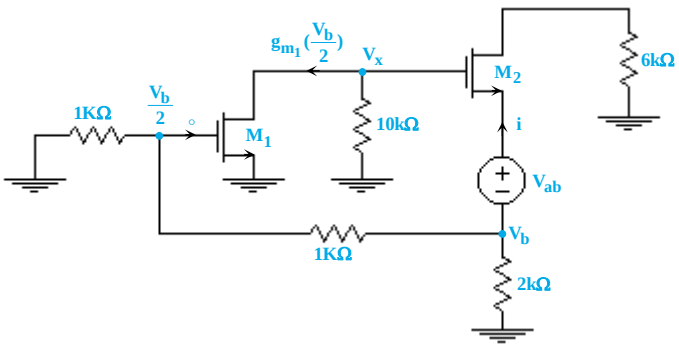
۱) ۶kΩ

۲) ۱kΩ

۳) ۹kΩ

۴) $\frac{۶}{۵}$kΩ

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» پس از خاموش کردن منبع ولتاژ ورودی مدار معادل ac برای محاسبه مقاومت R_{AB} به صورت مقابل می‌شود، از طرف دیگر ولتاژ V_x برابر است با:



$V_x = -(10\,k\Omega) \times (\frac{g_{m_1}V_b}{2}) = -5V_b$

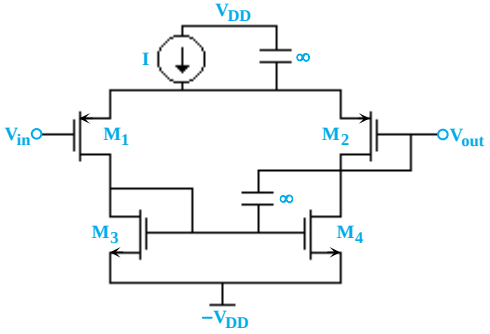
جریان i برابر است با: $i = \frac{-V_b}{(2\,||\,2)} = -V_b$

$i = g_{m_2}(V_a - V_x) = 10(V_a + 5V_b)$

با برابر قرار دادن دو رابطه فوق داریم: $10(V_a + 5V_b) = -V_b \Rightarrow V_a \simeq -5V_b$

در نتیجه مقاومت R_{ab} برابر است با: $R_{ab} = \frac{V_{ab}}{i} = \frac{V_a - V_b}{i} = \frac{-5V_b - V_b}{-V_b} = 6\,k\Omega$

مثال ۲۱: در مدار شکل زیر با فرض $g_m = 5ms$ و $r_o = \infty$ بهره ولتاژ مدار چقدر می‌باشد؟



۱) $-\frac{۱}{۳}$

۲) $+\frac{۱}{۳}$

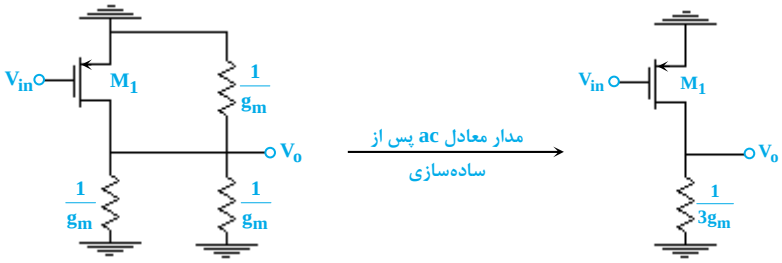
۳) $-\frac{۱}{۵}$

۴) $+\frac{۱}{۵}$

www.modaresanesharif.ac.ir

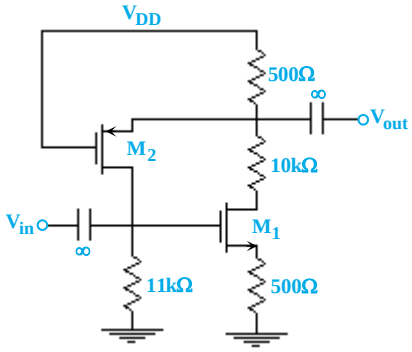
www.modaresanesharif.ac.ir

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» در حالت ac خازن‌ها اتصال کوتاه می‌شوند و مدار معادل ac به صورت زیر خواهد بود:



$$V_o = (-g_m V_{in}) \times (\frac{1}{3g_m}) \Rightarrow \frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{1}{3}$$

مثال ۲۲: مقدار بهره ولتاژ در مدار شکل زیر کدام می‌باشد؟ $(g_{m_1} = 2ms \ , \ g_{m_2} = 3ms \ , \ r_o = \infty)$



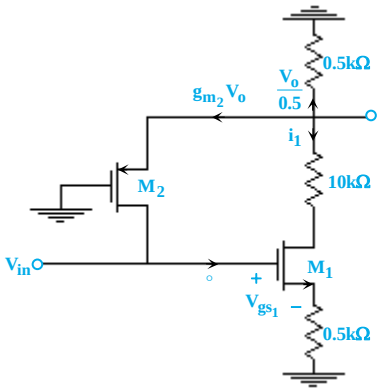
۱) $-\frac{1}{4}$

۲) $-\frac{1}{5}$

۳) $+\frac{1}{5}$

۴) -5

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» مدار معادل ac برای محاسبه گین به صورت زیر می‌باشد.



جریان ترانزیستور M_1 برابر است با:

$$i_1 = g_{m_1} . V_{gs_1}$$

$$V_{gs_1} = V_{in} - 0/5(g_{m_1} . V_{gs_1})$$

$$\Rightarrow V_{gs_1} = \frac{V_{in}}{1+1} = \frac{V_{in}}{2} \Rightarrow i_1 = g_{m_1} V_{gs_1} = V_{in} \Rightarrow i_1 = V_{in}$$

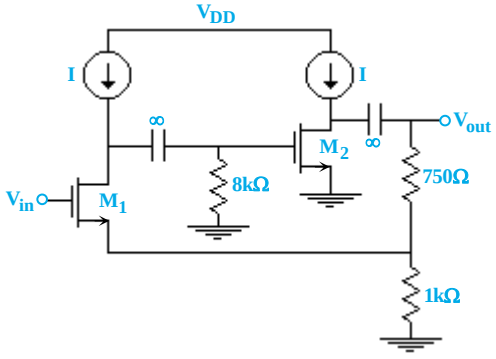
با نوشتن KCL در گره خروجی داریم:

$$\frac{V_o}{0/5} + g_{m_2} V_o + i_1 = 0 \Rightarrow 2V_o + 3V_o + V_{in} = 0$$

$$\Rightarrow V_{in} = -5V_o \Rightarrow \frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{1}{5}$$

مثال ۲۳: بهره ولتاژ مدار شکل زیر کدام می‌باشد؟

$(g_{m_{1,2}} = 1ms \quad , r_{o_{1,2}} = \infty)$



۱) ۰/۵

۲) ۱/۵

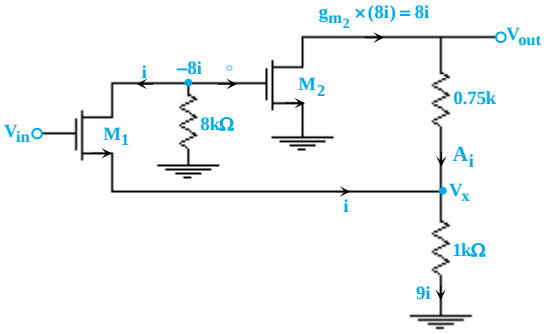
۳) ۱

۴) ۲/۵

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» در صورتی که فرض کنیم جریان ترانزیستور M_1 برابر i باشد، سعی می‌کنیم ولتاژ ورودی و همچنین ولتاژ خروجی را برحسب جریان i بیان کنیم:



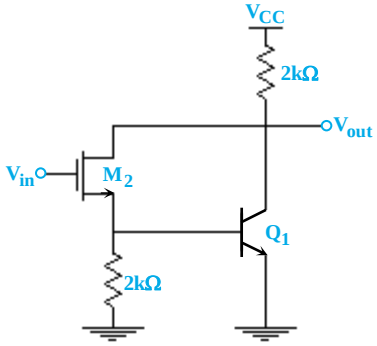
$$V_{out}=0/75(8i)+1(9i)=15i$$

$$g_{m_1}(V_{in}-V_x)=i \Rightarrow i=V_{in}-9i \Rightarrow V_{in}=10i$$

حال می‌توان گین ولتاژ را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$A_V=\frac{V_o}{V_{in}}=\frac{15i}{10i}=1/5$$

مثال ۲۴: در مدار شکل زیر بهره ولتاژ $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ تقریباً چقدر می‌باشد؟ $(\beta=80,\ V_T=25mv,\ V_A=\infty,\ g_{m_1}=40ms,\ g_{m_2}=4ms)$



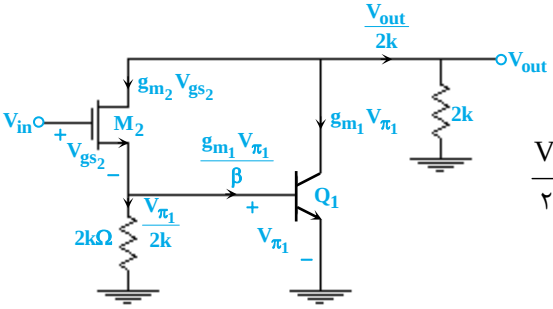
۱) −۳۳

۲) −۶۶

۳) −۲۲

۴) −۱۱

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» با توجه به ولتاژ ارلی ترانزیستورها مقاومت r_o هر دو ترانزیستور بی‌نهایت می‌باشد، لذا مدار معادل ac پس از پخش جریان‌ها در شاخه‌ها به صورت زیر می‌باشد. در شکل مقابل $V_{gs_2}=V_{in}-V_{\pi_1}$ می‌باشد؛ پس از نوشتن قانون KCL در بیس ترانزیستور Q_1 داریم:



$$\frac{V_{\pi_1}}{2k}+\frac{g_{m_1}V_{\pi_1}}{\beta}=g_{m_2}(V_{in}-V_{\pi_1}) \quad , \quad V_{\pi_1}=\frac{g_{m_2}}{\frac{1}{2}+\frac{g_{m_1}}{\beta}+g_{m_2}}\cdot V_{in} \qquad (I)$$

در مرحله بعد قانون KCL در گره خروجی را می‌نویسیم:

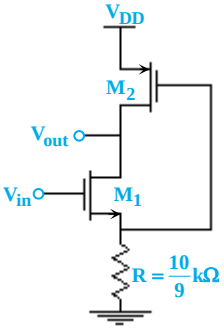
$$KCL\ @\ V_{out}:\frac{V_{out}}{2k}+g_{m_1}V_{\pi_1}+g_{m_2}(V_{in}-V_{\pi_1})=0$$

با جایگذاری رابطه (I) در رابطه فوق رابطه بین ولتاژ خروجی و ورودی را به دست می‌آوریم:

$$V_{out}=2k\times\left[-g_{m_2}V_{in}+(g_{m_2}-g_{m_1}).\frac{g_{m_2}.V_{in}}{\frac{1}{2}+\frac{g_{m_1}}{\beta}+g_{m_2}}\right]$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}=-2\times\left(4+(40-4)\times\frac{4}{\frac{1}{2}+4+\frac{40}{80}}\right)=-2\times(32/8)\simeq-66$$

مثال ۲۵: در شکل زیر با فرض $g_m=1ms$ و $r_o=10k\Omega$ بهره ولتاژ مدار کدام است؟



۱) −۴/۸۷

۲) +۴/۸۷

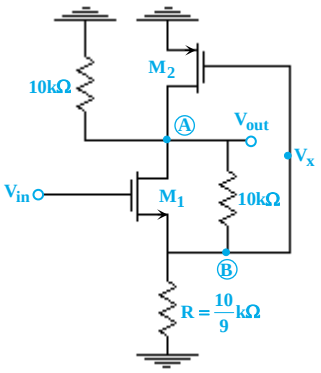
۳) −۰/۲

۴) +۰/۲

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

پاسخ: گزینه «۱» پس از رسم مدار معادل ac و نوشتن KCL در گره‌های A و B داریم:



$$KCL\ @\ A: \frac{V_o}{10} + \frac{V_o - V_x}{10} + g_m V_x + g_m(V_i - V_x) = 0$$

$$\Rightarrow 0/2V_o + V_i - 0/1V_x = 0 \qquad (I)$$

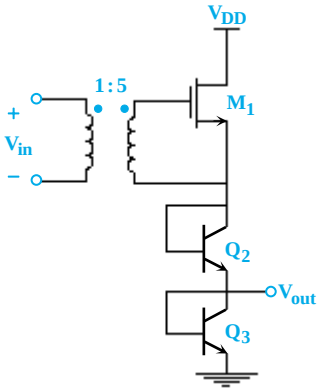
$$KCL\ @\ B: \frac{V_x}{\frac{10}{9}} = g_m(V_i - V_x) + \frac{V_o - V_x}{10}$$

$$2V_x = 0/1V_o + V_i \qquad (II)$$

با جایگذاری رابطه (II) در رابطه (I) داریم:

$$0/2V_o + V_i = \frac{0/1}{2} \times (0/1V_o + V_i) \Rightarrow V_o(0/195) = V_i(-0/95) \Rightarrow A_V = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{0/95}{0/195} = -4/87$$

مثال ۲۶: بهره ولتاژ مدار شکل مقابل کدام است؟ $\left(A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = ?\right)$



$$Q_2, Q_3: \begin{cases} \beta >> 1,\ V_{BE} = 0/7v \\ g_m = 40ms \end{cases} \quad , \quad M_1: \begin{cases} r_o = 40k\Omega \\ g_{m_1} = 20ms \end{cases}$$

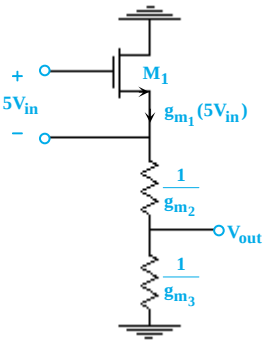
۱) $-2/5$

۲) -2

۳) $+2/5$

۴) $+2$

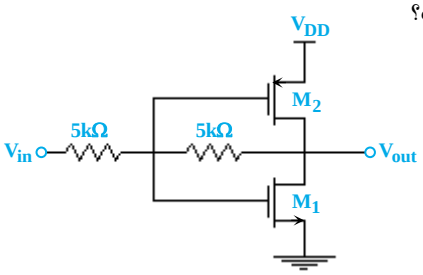
پاسخ: گزینه «۳» مدار معادل ac ساده شده در شکل مقابل نشان داده شده است:



$$V_{out} = (5V_{in}) \times g_{m_1} \times \frac{1}{g_{m_3}}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{5g_{m_1}}{g_{m_3}} = \frac{5 \times 20}{40} = +2/5$$

مثال ۲۷: در شکل زیر $g_m = 0/5ms$ و $r_o = 10k\Omega$ است. بهره ولتاژ $A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ کدام است؟



۱) $-\frac{1}{3}$

۲) $+\frac{1}{3}$

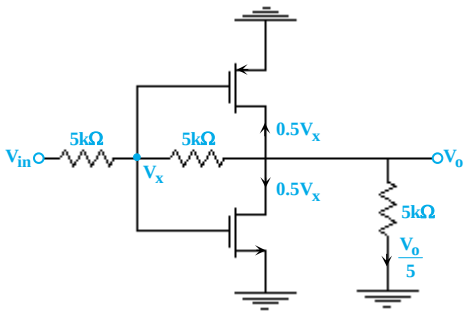
۳) $+\frac{1}{2}$

۴) $-\frac{1}{2}$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

پاسخ: گزینه «۴» مدار معادل ac با در نظر گرفتن مقاومت خروجی ترانزیستورها به صورت مقابل می‌باشد؛ با نوشتن KCL در گره خروجی سعی می‌کنیم ولتاژ V_x را برحسب V_o بیان کنیم:



$$KCL@V_o: \frac{V_x - V_o}{5} = 0/5V_x + 0/5V_x + \frac{V_o}{5}$$

$$\Rightarrow -0/8V_x = 0/4V_o \Rightarrow V_x = \frac{-V_o}{2}$$

سپس با نوشتن KCL در گره V_x داریم:

$$KCL@V_x: \frac{V_{in} - V_x}{5} = \frac{V_x - V_o}{5} \Rightarrow V_{in} = -V_o + 2V_x \xrightarrow{2V_x = -V_o} V_{in} = -V_o - V_o \Rightarrow V_o = -\frac{V_{in}}{2} \Rightarrow A_V = -\frac{1}{2}$$

مثال ۲۸: در مدار شکل زیر مقدار تقریبی بهره ولتاژ کدام است؟

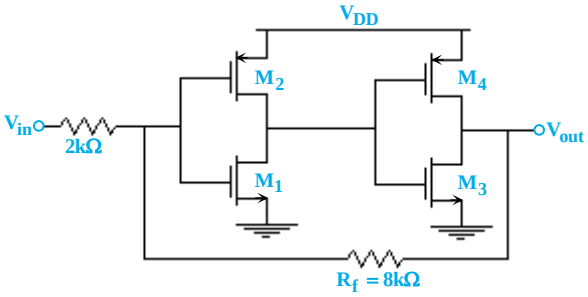
$$g_{m_{1-4}} = 0/5ms \ , \ r_{o_{1-4}} = 20k\Omega$$

۱) -3

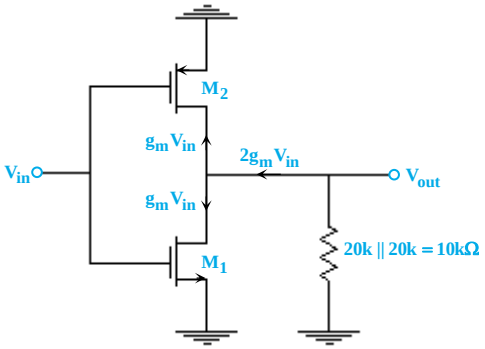
۲) -4

۳) $-\frac{1}{3}$

۴) $-\frac{1}{4}$



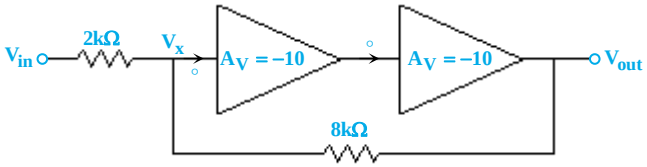
پاسخ: گزینه «۲» با توجه به یکسان بودن ترانزیستورها در ابتدا گین هر یک از بلوک‌های وارونگر شامل ترانزیستورهای M_{1-2} و M_{3-4} را به دست می‌آوریم.



$$V_{out} = -(10k) \times (2g_m V_{in})$$

$$\Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = -20g_m = -10$$

در نتیجه مدار معادل ac را می‌توان به صورت شکل زیر ساده کرد، همچنین ولتاژ V_x را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:



جمع آثار: $V_x = \frac{8V_{in} + 2V_o}{10}$

$$V_o = (-10) \times (-10) \times (\frac{8V_{in} + 2V_o}{10}) \Rightarrow +V_o = 80V_{in} + 20V_o \Rightarrow \frac{V_o}{V_{in}} \simeq -4$$

---

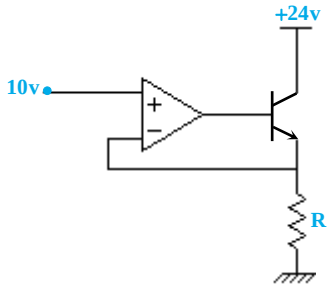
www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

فصل چهارم
تقویت‌کننده عملیاتی

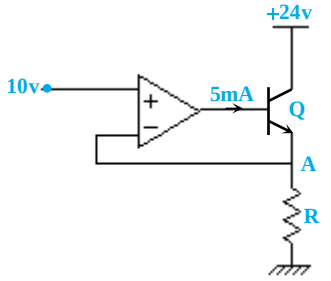
تست‌های تألیفی فصل چهارم

مثال۱: در مدار شکل زیر آپامپ ایده‌آل است و جریان خروجی آن برابر با ۵mA می‌باشد ($I_o = 5mA$). مقاومت R کدام گزینه است؟ ($\beta = 100$)



۱) ۲۰Ω
۲) ۱۹/۸Ω
۳) ۱۰Ω
۴) ۹/۹Ω

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» آپامپ ایده‌آل است و فیدبک منفی برقرار است. بنابراین ولتاژ نقطه A برابر با ۱۰v می‌باشد. ترانزیستور Q در ناحیه فعال است (زیرا $V_{CE} = 24 - 10 = 14\,v$).



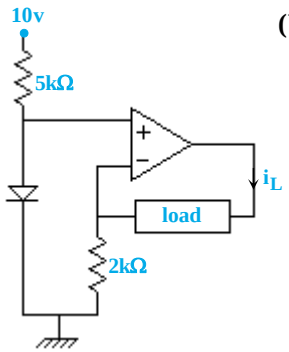
جریان I_E امیتر برابر است با:

$$I_E = (1+\beta)I_B = 101 \times 5 = 505\,mA$$

مقاومت R به‌دست می‌آید:

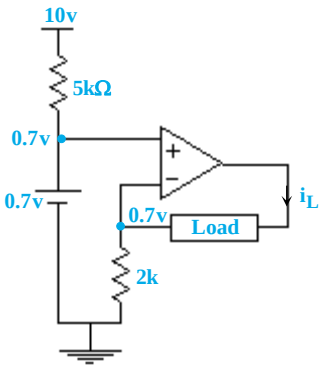
$$R = \frac{V_A}{I_E} = \frac{10}{505 \times 10^{-3}} = 19/8\,\Omega$$

مثال۲: در مدار شکل زیر با فرض ایده‌آل بودن آپامپ جریان بار i_L کدام گزینه است؟ ($V_{D(on)} = 0/7\,v$)



۱) ۰/۷mA
۲) ۱/۴mA
۳) ۰/۳۵mA
۴) صفر

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» ابتدا دیود را روشن در نظر می‌گیریم و ولتاژ دو سر آن را ۰/۷ ولت قرار می‌دهیم. آپامپ جریان نمی‌کشد و جریان i_L از مقاومت ۲kΩ عبور می‌کند. با توجه به ایده‌آل بودن آپامپ و برقراری فیدبک منفی، ولتاژ پایه‌های مثبت و منفی آپامپ برابر است.



جریان i_L برابر است با:

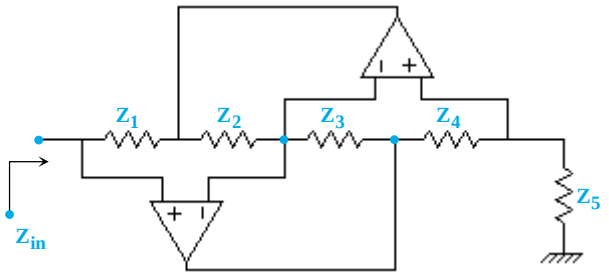
$$i_L = \frac{0/7}{2} = 0/35\,mA$$

جریان دیود نیز مثبت است $\left(i_o = \frac{10 - 0/7}{5\,k\Omega}\right)$ و فرض روشن بودن دیود صحیح می‌باشد.

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۳: امپدانس ورودی مدار شکل زیر کدام گزینه است؟ (آپ‌امپ‌ها ایده‌آل هستند.)



۱) $\frac{Z_1Z_2}{Z_3Z_4Z_5}$

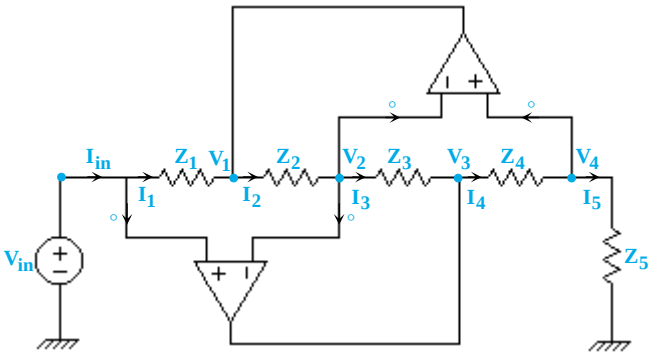
۲) $\frac{Z_3Z_2}{Z_1Z_4Z_5}$

۳) $\frac{Z_1Z_3Z_5}{Z_2Z_4}$

۴) $\frac{Z_2Z_3Z_4}{Z_1Z_5}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» برای محاسبه امپدانس ورودی، منبع ولتاژ تست V_{in} را به ورودی اضافه می‌کنیم. امپدانس ورودی برابر است با:

$$Z_{in}=\frac{V_{in}}{I_{in}}$$



آپ‌امپ‌ها ایده‌آل هستند و جریان نمی‌کشند. فیدبک منفی نیز برقرار است و ولتاژ پایه‌های مثبت و منفی برابر است. بنابراین داریم:

$$\left.\begin{matrix}V_2=V_4\\ V_2=V_{in}\end{matrix}\right\}\Rightarrow V_2=V_4=V_{in}$$

برای جریان‌ها روابط زیر را داریم:

$$I_{in}=I_1\ ,\ I_2=I_3\ ,\ I_4=I_5$$

جریان‌های I_1، I_2، I_3، I_4 و I_5 را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$I_1=\frac{V_{in}-V_1}{Z_1}\Rightarrow \boxed{I_{in}=\frac{V_{in}-V_1}{Z_1}} \quad (1)$$

$$I_2=\frac{V_1-V_2}{Z_2}\xrightarrow{V_2=V_{in}}\boxed{V_1-V_{in}=Z_2I_2} \quad (2)$$

$$I_3=\frac{V_2-V_3}{Z_3}\xrightarrow{V_2=V_{in}\ ,\ I_2=I_3}\boxed{V_{in}-V_3=Z_3I_2} \quad (3)$$

$$I_4=\frac{V_3-V_4}{Z_4}\xrightarrow{V_4=V_{in}}\boxed{V_3-V_{in}=Z_4I_4} \quad (4)$$

$$I_5=\frac{V_4}{Z_5}\xrightarrow{V_4=V_{in}\ ,\ I_4=I_5}\boxed{V_{in}=Z_5I_4} \quad (5)$$

از روابط (۴) و (۵) داریم:

$$V_3-V_{in}=\boxed{Z_4.\frac{V_{in}}{Z_5}} \quad (6)$$

از روابط (۳) و (۶) داریم:

$$-Z_3I_2=\frac{Z_4}{Z_5}V_{in}\Rightarrow\boxed{I_2=\frac{-Z_4}{Z_3Z_5}V_{in}} \quad (7)$$

از روابط (۲) و (۷) داریم:

$$V_1-V_{in}=\boxed{\frac{-Z_2Z_4}{Z_3Z_5}V_{in}} \quad (8)$$

از روابط (۱) و (۸) داریم:

$$I_{in}=\boxed{\frac{Z_2Z_4}{Z_1Z_3Z_5}V_{in}}$$

بنابراین امپدانس ورودی برابر است با:

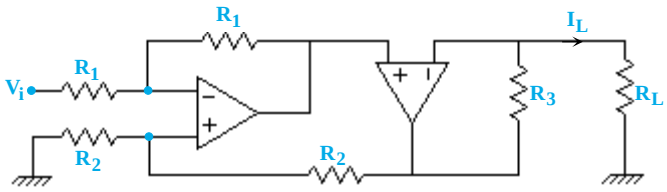
$$Z_{in}=\frac{Z_1Z_3Z_5}{Z_2Z_3}$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۴: مدار شکل زیر یک مبدل ولتاژ به جریان است. نسبت جریان خروجی I_L به ولتاژ ورودی V_i کدام گزینه است؟

(با فرض ایده‌آل بودن آپ‌امپ‌ها)



۱) $\frac{۱}{R_۳}$

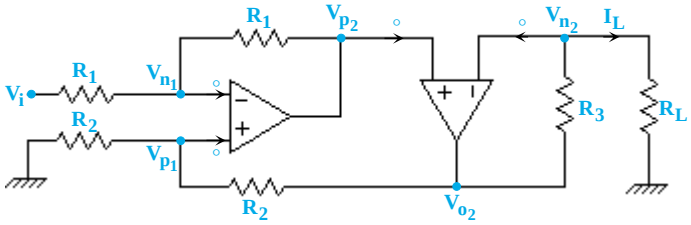
۲) $\frac{۱}{R_۱R_۲}$

۳) $\frac{R_۲}{R_۱}$

۴) $\frac{R_۳}{R_۴}$

پاسخ: گزینه «۱» هر دو آپ‌امپ ایده‌آل هستند و فیدبک منفی برقرار است. ولتاژ پایه‌های مثبت و منفی برابر است با:

$$V_{n_۱} = V_{p_۱}$$
$$V_{n_۲} = V_{p_۲}$$



در گره‌های $n_۱$، $p_۱$ و $n_۲$، KCL می‌نویسیم:

$$n_۱ \Rightarrow \frac{V_{n_۱} - V_{in}}{R_۱} + \frac{V_{n_۱} - V_{p_۲}}{R_۱} = ۰ \Rightarrow ۲V_{n_۱} = V_{in} + V_{p_۲} = V_{in} + V_{n_۲} \qquad (۱)$$

$$p_۱ \Rightarrow \frac{V_{p_۱}}{R_۲} + \frac{V_{p_۱} - V_{o_۲}}{R_۲} = ۰ \Rightarrow ۲V_{p_۱} = V_{o_۲} \Rightarrow V_{o_۲} = ۲V_{n_۱} \qquad (۲)$$

$$n_۲ \Rightarrow \frac{V_{n_۲} - ۰}{R_L} + \frac{V_{n_۲} - V_{o_۲}}{R_۳} = ۰ \Rightarrow I_L = \frac{V_{n_۲}}{R_L} = -\frac{V_{n_۲} - V_{o_۲}}{R_۳} \qquad (۳)$$

از روابط (۱) و (۲) داریم:

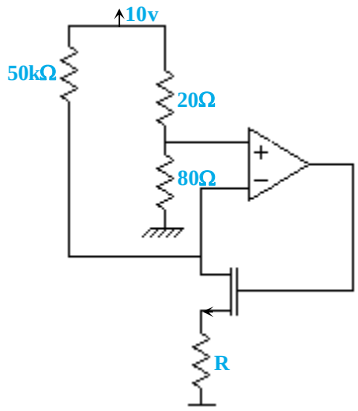
$$V_{in} + V_{n_۲} = V_{o_۲} \qquad (۴)$$

رابطه (۴) را در رابطه (۳) جایگذاری می‌کنیم:

$$I_L = -\frac{V_{n_۲} - V_{in} - V_{n_۲}}{R_۳} = \frac{V_{in}}{R_۳}$$

توجه کنید که جریان I_L به بار R_L وابسته نیست.

مثال ۵: در شکل زیر، اگر $V_{th} = ۱v$ و $k = ۴\frac{mA}{V^۲}$ باشد، مقدار R چقدر باشد تا ترانزیستور MOS در ناحیه pinch – off بایاس گردد؟



۱) $R > ۲۰۰\ k\Omega$

۲) $R < ۲۰۰ k\Omega$

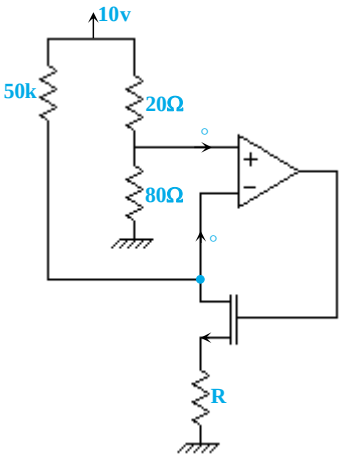
۳) $R > ۱۰۰ k\Omega$

۴) $R < ۱۰۰ k\Omega$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

پاسخ: گزینه «۲» فیدبک منفی برقرار است و ولتاژ پایه‌های مثبت و منفی برابر است با:



$$V_+ = V_- = ۱۰ \times \frac{۸۰}{۲۰+۸۰} = ۸\,v$$

برای آن‌که ترانزیستور MOS در ناحیه pinch – off (اشباع) بایاس شود، باید رابطه زیر برقرار باشد:

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{th} \qquad (۱)$$

ولتاژ V_{GS} از رابطه مقابل به‌دست می‌آید:

$$V_{GS} = V_{th} + \sqrt{\frac{I_D}{k}} \Rightarrow V_{GS} - V_{th} = \sqrt{\frac{I_D}{k}}$$

جریان I_D برابر است با:

$$I_D = \frac{۱۰ - V_-}{۵۰\,k\Omega} = ۰/۰۴\,mA$$

(آپ‌امپ جریان نمی‌کشد.)

رابطه (۱) را می‌نویسیم:

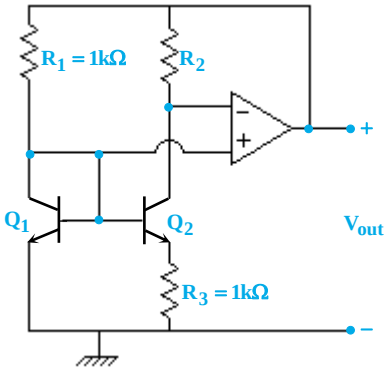
$$V_D - V_S > \sqrt{\frac{I_D}{k}} \Rightarrow ۸ - ۰/۰۴R > \sqrt{\frac{۰/۰۴}{۴}} = ۰/۱$$

مقاومت R به‌دست می‌آید:

$$۰/۰۴R < ۷/۹ \Rightarrow R < \frac{۷/۹}{۰/۰۴} \simeq ۲۰۰\,k\Omega$$

مثال ۶: در مدار شکل مقابل، آپ‌امپ ایده‌آل است. $R_۲$ کدام گزینه باشد تا $\frac{dV_{out}}{dT} = ۰$ شود؟

$$\left(\frac{dV_{BE_۱}}{dT} = -۱\frac{mv}{C^\circ}\ ,\ \frac{dV_{BE_۲}}{dT} = -۳\frac{mv}{C^\circ}\right)$$



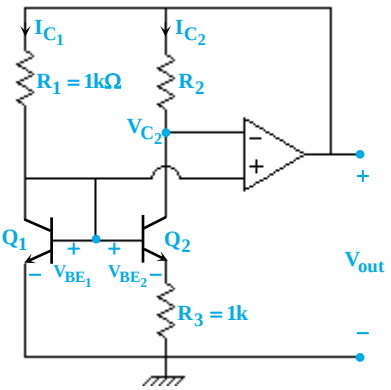
۱) $۲\,k\Omega$

۲) $۱\,k\Omega$

۳) صفر

۴) $۰/۵\,k\Omega$

پاسخ: گزینه «۴» با نوشتن KVL حول حلقه $Q_۱$ و $Q_۲$ داریم:



$$-V_{BE_۱} + V_{BE_۲} + R_۳ I_{C_۲} = ۰$$

$$I_{C_۲} = \frac{V_{BE_۱} - V_{BE_۲}}{R_۳} \qquad (۱)$$

آپ‌امپ ایده‌آل است و ولتاژ پایه‌های مثبت و منفی آپ‌امپ به دلیل وجود فیدبک منفی برابر است با:

$$V_{C_۲} = V_{BE_۱} \qquad (۲)$$

با نوشتن KVL در طرف خروجی آپ‌امپ داریم:

$$-V_{out} + R_۲ I_{C_۲} + V_{C_۲} = ۰$$

$$V_{out} = V_{C_۲} + R_۲ I_{C_۲} \qquad (۳)$$

با جایگذاری روابط (۱) و (۲) در رابطه (۳) داریم:

$$V_{out} = V_{BE_۱} + \frac{R_۲}{R_۳}(V_{BE_۱} - V_{BE_۲}) \qquad (۴)$$

از طرفین رابطه (۴) مشتق می‌گیریم:

$$\frac{dV_{out}}{dT} = (۱ + \frac{R_۲}{R_۳})\frac{dV_{BE_۱}}{dT} - (\frac{R_۲}{R_۳})\frac{dV_{BE_۲}}{dT}$$

با جایگذاری $R_۳ = ۱\,k\Omega$، $\frac{dV_{BE_۱}}{dT} = -۱\frac{mv}{^\circ C}$، $\frac{dV_{BE_۲}}{dT} = -۳\frac{mv}{^\circ C}$ و $\frac{dV_{out}}{dT} = ۰$ مقاومت $R_۲$ به‌دست می‌آید:

$$(۱ + \frac{R_۲}{۱}) \times -۱ = \frac{R_۲}{۱} \times -۳ \Rightarrow R_۲ = ۰/۵\,k\Omega$$

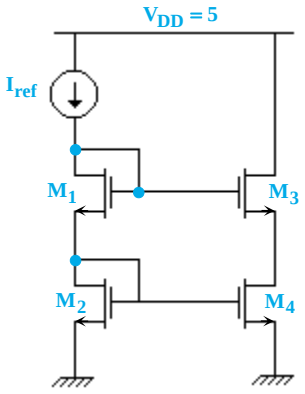
www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

فصل پنجم
آینه جریان و تقویت‌کننده‌های تفاضلی

تست‌های تألیفی فصل پنجم

مثال۱: در مدار شکل زیر اگر I_{ref} به $0/5V$ ولتاژ برای کار کردن به صورت منبع جریان نیاز داشته باشد، حداکثر مقدار آن چند میلی‌آمپر است؟



$V_{th} = 0/5$

$\mu_n c_{ox} = 50\mu\frac{A}{V^2}$

$(\frac{w}{L})_{1,2} = 4$

$(\frac{w}{L})_{3,4} = 9$

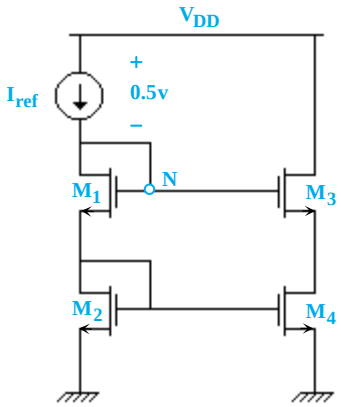
۱) ۳۰۶

۲) ۶۱۲

۳) ۲۰۲

۴) ۱۰۱

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» برای یافتن حداکثر I_{ref} می‌نویسیم:



$$V_N = V_{GS_1} + V_{GS_2} \Rightarrow V_N = V_{th_1} + \sqrt{\frac{I_{ref}}{k_1}} + V_{th_2} + \sqrt{\frac{I_{ref}}{k_2}}$$

بنابراین داریم:

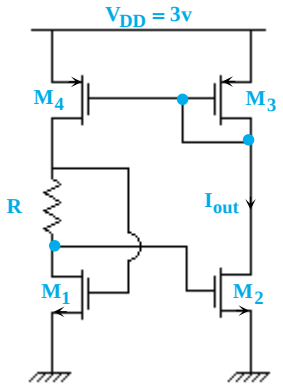
$$V_{DD} - \sqrt{\frac{2I_{ref}}{\mu_n c_{ox}}}\left(\sqrt{(\frac{L}{w})_1} + \sqrt{(\frac{L}{w})_2}\right) - 2V_{th} = 0/5$$

$(I_{ref})_{max}$ به دست می‌آید:

$$(I_{ref})_{max} = \frac{\mu_n c_{ox}}{2}\ \frac{(V_{DD} - 0/5 - 2V_{th})^2}{(\sqrt{(\frac{L}{w})_1} + \sqrt{(\frac{L}{w})_2})^2} = \frac{50\times10^{-3}}{2} \times \frac{(3/5)^2}{(\frac{1}{2}+\frac{1}{2})^2}$$

$$(I_{ref})_{max} = 306\,mA$$

مثال۲: در مدار شکل زیر I_{out} کدام گزینه است؟ تمامی ترانزیستورها در ناحیه اشباع هستند.



$\lambda = 0$

$(\frac{w}{L})_3 = (\frac{w}{L})_4$

۱) ۰

۲) $\frac{1}{\mu_n c_{ox} R^2}\left(\sqrt{(\frac{L}{w})_1} - \sqrt{(\frac{L}{w})_2}\right)^2$

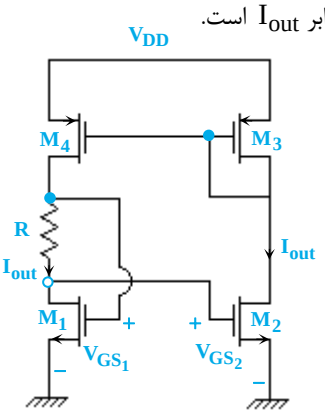
۳) $\frac{1}{\mu_n c_{ox} R}\left(\sqrt{(\frac{L}{w})_1} - \sqrt{(\frac{L}{w})_2}\right)^2$

۴) $\frac{2}{\mu_n c_{ox} R^2}\left(\sqrt{(\frac{L}{w})_1} - \sqrt{(\frac{L}{w})_2}\right)^2$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» با فرض اشباع تمامی ترانزیستورها، چون منبع جریان داریم، جریان عبوری از R نیز برابر I_{out} است.



در مسیر R ، KVL می‌نویسیم: $KVL: -V_{GS_2} - RI_{out} + V_{GS_1} = 0$

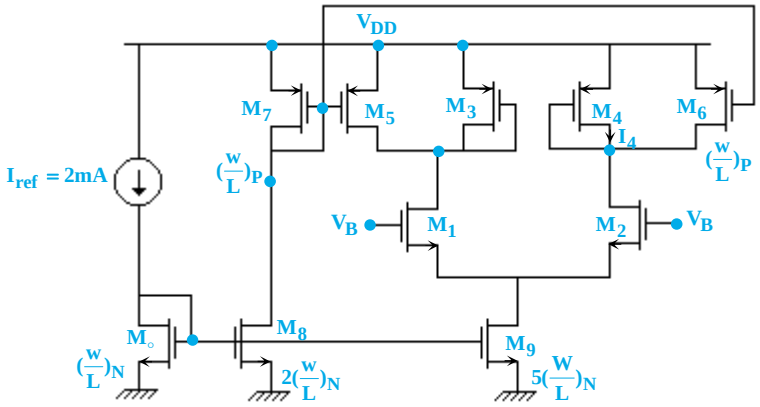
با جایگذاری فرمول V_{GS} در رابطه بالا داریم:

$$-\cancel{V_{th}} - \sqrt{\frac{2I_{out}}{\mu_n c_{ox}(\frac{W}{L})_2}} - RI_{out} + \cancel{V_{th}} + \sqrt{\frac{2I_{out}}{\mu_n c_{ox}(\frac{W}{L})_1}} = 0$$

بنابراین I_{out} برابر است با:

$$I_{out} = \frac{2}{\mu_n c_{ox} R^2}\left(\sqrt{(\frac{L}{W})_1} - \sqrt{(\frac{L}{W})_2}\right)^2$$

مثال ۳: در مدار شکل مقابل ترانزیستورهای M_5 و M_6 دارای $(\frac{W}{L})$ برابری هستند. جریان عبوری از ترانزیستور M_4 چند میلی‌آمپر است؟



۱) ۱

۲) ۲

۳) ۴

۴) ۶

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» جریان عبوری از ترانزیستور M_9، ۵ برابر جریان عبوری از ترانزیستور M_0 است. یعنی داریم: $I_9 = 5I_{ref}$

دو ترانزیستور M_1 و M_2 مشابه هستند و جریان عبوری از آن‌ها برابر است و داریم: $I_1 = I_2 = \frac{I_9}{2} = \frac{5}{2}I_{ref}$

از طرفی جریان عبوری از ترانزیستورهای M_6 و M_7 برابر است و همچنین جریان ترانزیستور M_8 از M_7 عبور می‌کند. بنابراین:

$$I_6 = I_7 = I_8 = 2I_{ref}$$

حال اگر در درین ترانزیستورهای M_4 و M_6، KCL بنویسیم، جریان عبوری از از ترانزیستور M_4 به دست می‌آید:

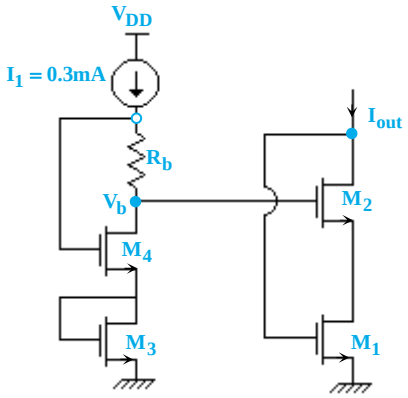
$$KCL: I_4 + I_6 = I_2 \Rightarrow I_4 = I_2 - I_6 = \frac{5}{2}I_{ref} - 2I_{ref} = \frac{I_{ref}}{2}$$

بنابراین جریان عبوری از ترانزیستور M_4 برابر با ۱mA است.

مثال ۴: در مدار شکل زیر، ولتاژ نقطه b برابر است با $V_{GS_1} + V_{GS_2} - V_{TH}$. مقدار مقاومت R_b برابر کدام گزینه است؟

(همه ترانزیستورها مشابهند و جریان I_{out} با جریان I_1 برابر است.)

$V_{TH} = 0/5v$



۱) $\frac{10}{3}$

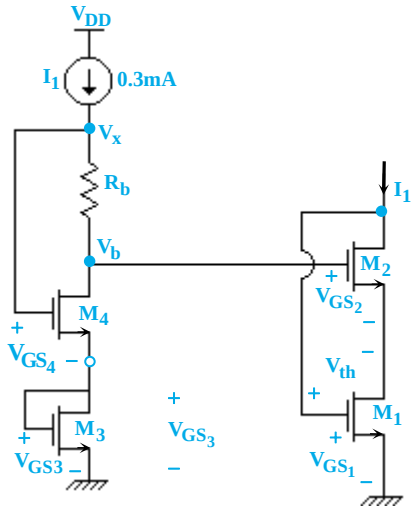
۲) $\frac{5}{6}$

۳) $\frac{5}{3}$

۴) $\frac{20}{3}$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir



☑ **پاسخ:** گزینه «۳» همه ترانزیستورها مشابهند و جریان یکسانی نیز از آن‌ها عبور می‌کند بنابراین ولتاژ گیت ـ سورس یکسانی دارند که آن را V_{GS} در نظر می‌گیریم.

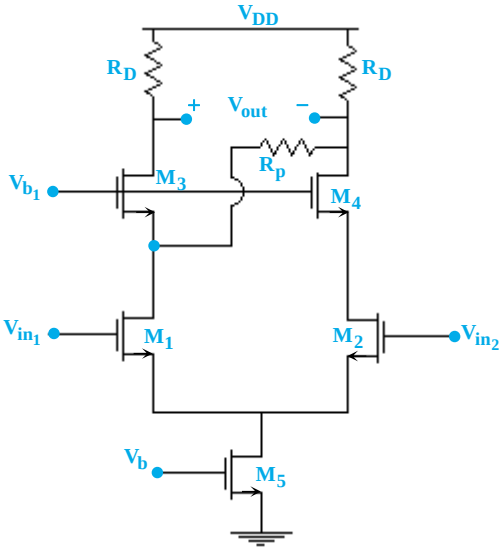
ولتاژ V_x از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_x = V_{GS_3} + V_{GS_4} \xrightarrow{V_{GS_3}=V_{GS_4}=V_{GS}} V_x = 2V_{GS}$$

از طرفی ولتاژ V_b نیز برابر $2V_{GS} - V_{TH}$ است. پس مقاومت R_b برابر است با:

$$R_b = \frac{V_x - V_b}{I_1} \Rightarrow R_b = \frac{V_{TH}}{I_1} = \frac{5}{3}k\Omega$$

مثال ۵: به دلیل خطای ساخت، یک مقاومت بین درین‌های M_1 و M_4 پدید آمده است. با فرض اینکه $\lambda = 0$ باشد، بهره $\frac{V_{out}}{V_{in_1} - V_{in_2}}$ کدام گزینه است؟



$g_{m_1} = g_{m_2} = 2ms$

$g_{m_3} = g_{m_4} = 1ms$

$R_D = 1k\Omega$

$R_P = 10k\Omega$

$g_{m_5} = 3ms$

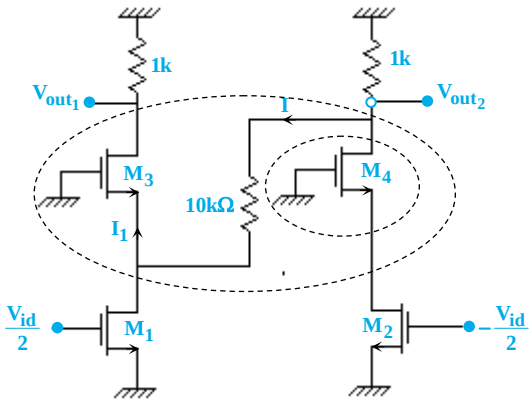
۱) $\frac{5}{6}$

۲) $\frac{5}{3}$

۳) $\frac{4}{3}$

۴) $\frac{4}{6}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» در مد تفاضلی، از ترانزیستور M_5 جریانی عبور نمی‌کند و ولتاژ V_{D_5} را می‌توانیم زمین کنیم. مدار را به‌صورت مقابل می‌کنیم و ورودی V_{in_1}, V_{in_2} را به صورت تفاضلی می‌دهیم:



$$V_{id} = V_{in_1} - V_{in_2}$$

$$V_{in_1} = \frac{V_{id}}{2} \quad , \quad V_{in_2} = -\frac{V_{id}}{2}$$

برای کات‌ست خارجی نشان داده شده در شکل، KCL می‌نویسم:

$$\frac{V_{out_1}}{1k} + \frac{V_{out_2}}{1k} + g_{m_1}\frac{V_{id}}{2} + g_{m_2}(-\frac{V_{id}}{2}) = 0$$

نتیجه می‌گیریم:

$$V_{out_1} + V_{out_2} = 0 \Rightarrow V_{out_1} = -V_{out_2} \quad (1)$$

برای کاتست داخلی نشان داده در شکل، KCL می‌نویسیم:

$$I + \frac{V_{out_2}}{1k} + g_{m_2}(-\frac{V_{id}}{2}) = 0$$

جریان I به‌دست می‌آید:

$$I = g_{m_2}\frac{V_{id}}{2} - V_{out_2} \quad (2)$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

از طرفی با نوشتن KVL در مسیر مقاومت R_P و ترانزیستور M_3 داریم:

$$-V_{out_2}+I\times 10k+\frac{I_1}{g_{m_3}}=0\ ,\ I_1=\frac{V_{out_1}}{1k}$$

با استفاده از رابطه (۱)، V_{out_2} به دست می‌آید:

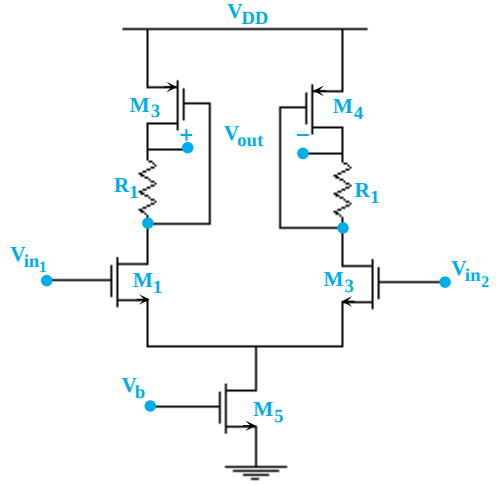
$$V_{out_2}=10I+\frac{V_{out_1}}{1}\Rightarrow 2V_{out_2}=10I\Rightarrow V_{out_2}=5I \quad (3)$$

از روابط (۲) و (۳) بهره به دست می‌آید:

$$\frac{V_{out_2}}{5}=V_{id}-V_{out_2}\Rightarrow V_{out_2}=\frac{5}{6}V_{id}$$

$$V_{out_2}=\frac{V_{out}}{2}\Rightarrow \frac{V_{out}}{2}=\frac{5}{6}V_{id}\Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{id}}=\frac{5}{3}$$

مثال ۶: در مدار شکل زیر، ترانزیستورها در اشباع هستند. بهره ولتاژ دیفرانسیل سیگنال کوچک مدار کدام گزینه است؟ (تقریب بزنید)



$\lambda\neq 0$

۱) $\frac{g_{m_3}}{2R_1}$

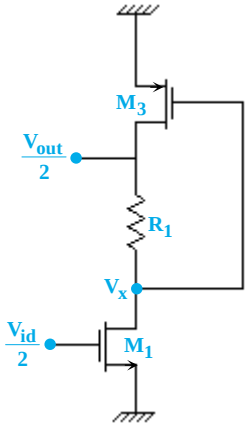
۲) $\frac{g_{m_1}}{2}(-\frac{1}{R_1})$

۳) $\frac{-g_{m_1}}{g_{m_2}}$

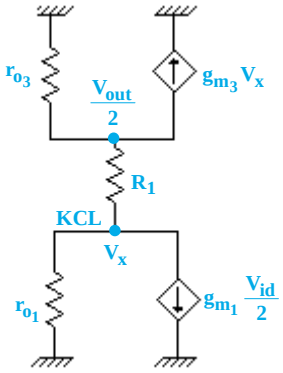
۴) $\frac{-g_{m_1}}{g_{m_2}}(1-g_{m_3}R_1)$

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» در مد دیفرانسیل به روش نیم‌مدار، مدار زیر را داریم:

می‌توانیم مدل π را برای ترانزیستورهای M_3 و M_1 بکشیم. بنابراین مدار (الف) به صورت مدار شکل (ب) در می‌آید. در گره V_x ،KCL می‌نویسیم:



(الف)



(ب)

$$\frac{V_x}{r_{o_1}}+\frac{V_x-\frac{V_{out}}{2}}{R_1}+g_{m_1}\frac{V_{id}}{2}=0$$

ولتاژ V_x به دست می‌آید:

$$V_x(\frac{1}{r_{o_1}}+\frac{1}{R_1})=\frac{V_{out}}{2R_1}-\frac{g_{m_1}}{2}V_{id}$$

$$V_x=\frac{\frac{V_{out}}{2R_1}-\frac{g_{m_1}}{2}V_{id}}{\frac{1}{r_{o_1}}+\frac{1}{R_1}} \quad (1)$$

در گره $\frac{V_{out}}{2}$، KCL می‌نویسیم:

$$\frac{\frac{V_{out}}{2}}{r_{o_3}}=g_{m_3}V_x+\frac{\frac{V_{out}}{2}-V_x}{R_1}=0$$

$$V_x(g_{m_3}-\frac{1}{R_1})=V_{out}(\frac{-1}{2r_{o_3}}-\frac{1}{2R_1})\Rightarrow V_x=\frac{V_{out}(-\frac{1}{2r_{o_3}}-\frac{1}{2R_1})}{g_{m_3}-\frac{1}{R_1}} \quad (2)$$

معادلات (۱) و (۲) را برابر قرار می‌دهیم:

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

$$\frac{\frac{V_{out}}{2R_1}-\frac{g_{m_1}}{2}V_{id}}{\frac{1}{r_{o_1}}+\frac{1}{R_1}}=\frac{V_{out}(-\frac{1}{2r_{o_3}}-\frac{1}{2R_1})}{g_{m_3}-\frac{1}{R_1}}$$

$$(g_{m_3}-\frac{1}{R_1})\frac{1}{2R_1}V_{out}-\frac{g_{m_1}}{2}(g_{m_3}-\frac{1}{R_1})V_{id}=V_{out}(-\frac{1}{2r_{o_3}}-\frac{1}{2R_1})(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{r_{o_1}})$$

$$V_{out}[g_{m_3}\frac{1}{2R_1}-\frac{1}{2R_1^2}+\frac{1}{2r_{o_3}R_1}+\frac{1}{2r_{o_3}r_{o_1}}+\frac{1}{2R_1^2}+\frac{1}{2r_{o_1}R_1}]=\frac{g_{m_1}}{2}(g_{m_3}-\frac{1}{R_1})V_{id}$$

با ساده‌سازی داریم:

$$V_{out}[\frac{g_{m_3}}{2R_1}]=V_{id}[\frac{g_{m_1}}{2}(g_{m_3}-\frac{1}{R_1}]$$

$$A_v=\frac{V_{out}}{V_{id}}=\frac{\frac{g_{m_1}}{2}(g_{m_3}-\frac{1}{R_1})}{\frac{g_{m_2}}{2}(\frac{1}{R_1})}=\frac{g_{m_1}}{g_{m_2}}\frac{g_{m_3}.R_1-1}{1}\Rightarrow A_v=-\frac{g_{m_1}}{g_{m_2}}(1-g_{m_3}R_1)$$

مثال ۷: در مدار شکل مقابل $\frac{V_{out}}{V_{in_1}-V_{in_2}}$ کدام گزینه است؟

g_mها $= 2ms$

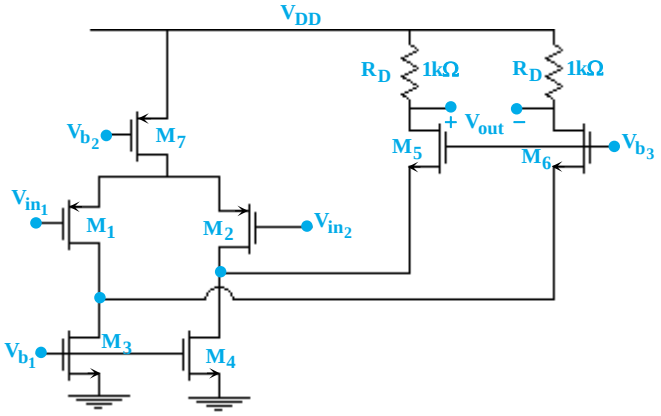
r_oها $= 2k\Omega$

۱) $\frac{5}{6}$

۲) $\frac{8}{7}$

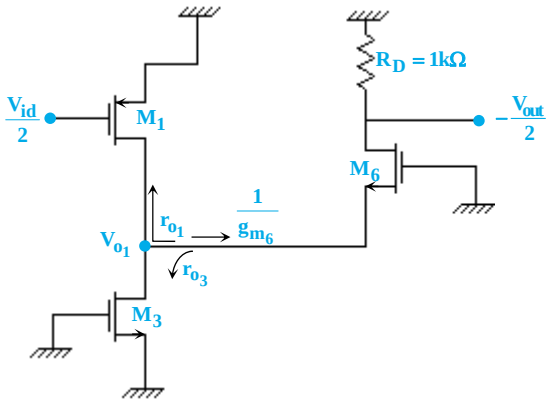
۳) $\frac{4}{3}$

۴) $\frac{3}{4}$



پاسخ: گزینه «۲» به روش نیم‌مدار داریم:

با استفاده از قانون زنجیره‌ای بهره ولتاژ می‌آید.



$$\frac{\frac{-V_{out}}{2}}{\frac{V_{id}}{2}}=\frac{\frac{-V_{out}}{2}}{V_{o_1}}\times\frac{V_{o_1}}{\frac{V_{id}}{2}}$$

کسر دوم به صورت مقابل به دست می‌آید: $\frac{V_{o_1}}{\frac{V_{id}}{2}}=-g_{m_1}(r_{o_1}\,\|\,r_{o_3}\,\|\,\frac{1}{g_{m_6}})$

کسر اول برابر است با: $\frac{\frac{-V_{out}}{2}}{V_{o_1}}=+g_{m_6}(R_D\,\|[r_{o_6}+r_{o_6}g_{m_6}(r_{o_1}\,\|\,r_{o_3})])$

بنابراین بهره به دست می‌آید:

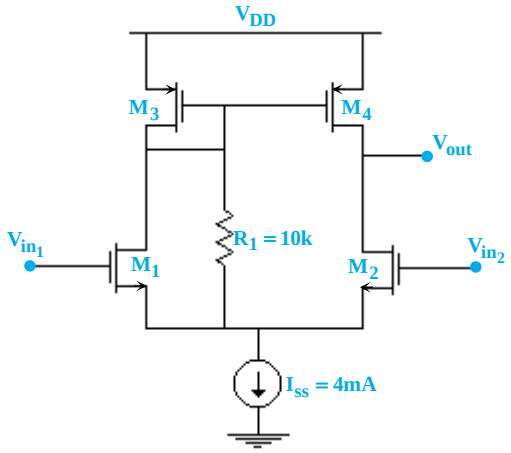
$$\frac{V_{out}}{V_{id}}=+g_{m_6}(R_D\,\|[r_{o_6}+r_{o_6}g_{m_6}(r_{o_1}\,\|\,r_{o_3})])\times g_{m_1}(r_{o_1}\,\|\,r_{o_3}\,\|\,\frac{1}{g_{m_6}})=2\times(1\|6)\times 2\times(2\|2\|\frac{1}{2})=4\times\frac{6}{7}\times\frac{1}{3}=\frac{8}{7}$$

---

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۸: در مدار شکل زیر، بهره مدار چقدر است؟



$\lambda = ۲v^{-۱}$

$g_m = ۲ms$

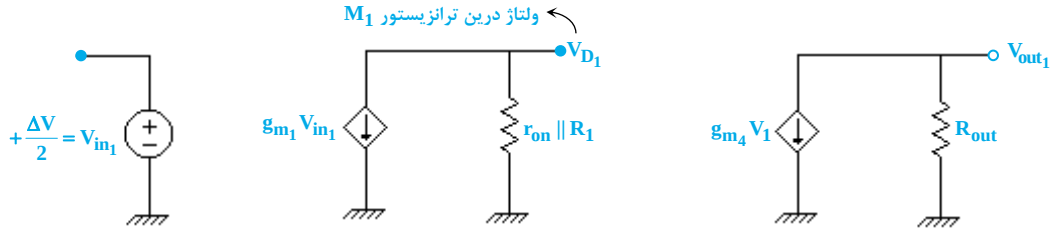
۱) $\frac{۱}{۱۲}$

۲) $\frac{۱}{۶}$

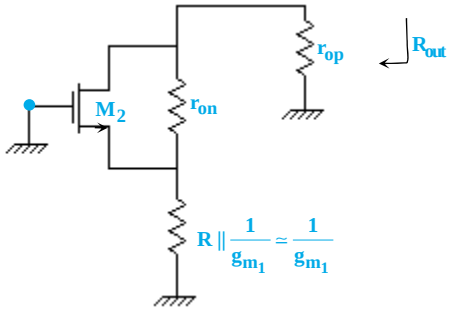
۳) $\frac{۱}{۳}$

۴) $\frac{۱}{۴}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» برای محاسبه بهره در این مدار، از جمع آثار استفاده می‌کنیم. ابتدا گیت ترانزیستور $M_۲$ را زمین می‌کنیم و $V_{out_۱}$ را برحسب $V_{in_۱}$ به دست می‌آوریم:



مقاومت R_{out} از مدار زیر به دست می‌آید:



$$R_{out} = r_{op} \| (\frac{۱}{g_{m_۱}} + r_{on} + \frac{g_{m_۲}}{g_{m_۱}} r_{on})$$

$$R_{out} = r_{op} \| ۲r_{on} \simeq \frac{۲}{۳} r_{on} = \frac{۴}{۳} \frac{۱}{\lambda I_{SS}}$$

$$R_{out} \simeq \frac{۴}{۳} \times \frac{۱}{۲ \times ۴} = \frac{۱}{۶} k\Omega$$

ولتاژ خروجی $V_{out_۱}$ برابر است با:

$$V_{out_۱} = -g_{m_۴} V_۱ \times R_{out} \quad (۱)$$

ولتاژ $V_۱$ برابر است با:

$$V_۱ = -(r_{on} \| R_۱) \times g_{m_۱} V_{in_۱}$$

با استفاده از اصل جمع آثار $V_{in_۱} = \frac{\Delta V}{۲}$ و $V_{in_۲} = ۰$ قرار می‌دهیم:

$$V_۱ = -(\frac{۲}{\lambda I_{SS}} \| R_۱) + g_{m_۱} \times \frac{\Delta V}{۲} \Rightarrow V_۱ \simeq -\frac{۱}{۴} \times ۲ \times \frac{\Delta V}{۲} = -\frac{۱}{۴} \Delta V \quad (۲)$$

با قرار دادن رابطه (۲) در معادله (۱) مقدار بهره به دست می‌آید:

$$V_{out_۱} = -۲ \times -\frac{۱}{۴} \Delta V \times \frac{۱}{۶} \quad , \quad \frac{V_{out_۱}}{\Delta V} = +\frac{۱}{۱۲}$$

در مرحله بعد به ازای $-\frac{\Delta V}{۲} = V_{in_۲}$ و $V_{in_۱} = ۰$ داریم:

$$V_{out_۲} = -g_{m_۲} V_{in_۲} . R_{out} = -۲ \times -\frac{\Delta V}{۲} \times \frac{۱}{۶} = +\frac{۱}{۶} \Delta V$$

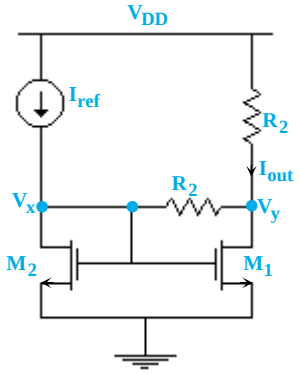
بهره به دست می‌آید:

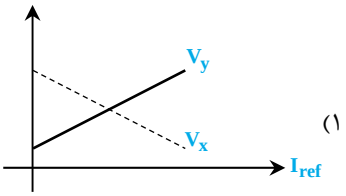
$$A_v = \frac{V_{out_۱} + V_{out_۲}}{\Delta V} = \frac{۱}{۱۲} + \frac{۱}{۶} = \frac{۱۳}{۲} = \frac{۱}{۴}$$

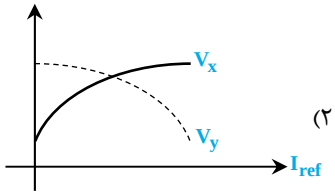
www.modaresanesharif.ac.ir

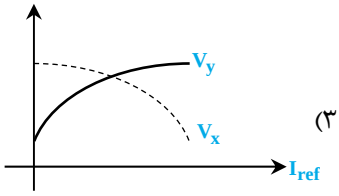
www.modaresanesharif.ac.ir

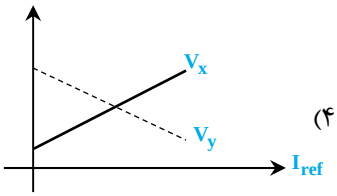
مثال۹: در مدار شکل زیر V_x و V_y به عنوان تابعی از I_{ref} کدام گزینه است؟



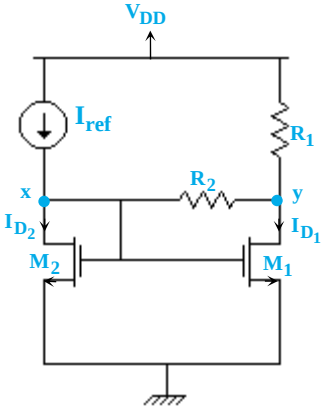
(۱)


(۲)


(۳)


(۴)


☑ **پاسخ:** گزینه «۴» هنگامی که $I_{ref}=0$ است، جریان I_{D_1} و I_{D_2} از طریق V_{DD} و R_1 تأمین می‌شود. بنابراین ولتاژهای اولیه V_x و V_y از روابط زیر به دست می‌آید:



$$I_{D_{1,2}} = k(V_{GS_{1,2}} - V_{TH})^2 \quad (۱)$$

$$V_{GS_{1,2}} = V_{DD} - (2R_1 + R_2)I_{D_{1,2}} \quad (۲)$$

$$V_x = V_{GS_{1,2}} \quad (۳)$$

$$V_y = V_x + \frac{V_{DD} - V_x}{2R_1 + R_2} R_2 \quad (۴)$$

از روابط (۳) و (۴) مشخص است که در $I_{ref}=0$، V_x از V_y کوچک‌تر است و گزینه (۲) و(۴) می‌تواند صحیح باشد.

هنگامی که I_{ref} افزایش می‌یابد، I_{D_2} افزایش می‌یابد و از آنجایی که $V_{GS_{1,2}} = V_x$ است، V_x نیز افزایش می‌یابد. با نوشتن KCL در گره‌های x و y، رابطه V_y برحسب I_{ref} و V_x به دست می‌آید:

$$KCL(۱): I_{ref} = I_{D_2} + \frac{V_x - V_y}{R_2} \Rightarrow I_{D_2} = I_{ref} - \frac{V_x - V_y}{R_2} \quad (۵)$$

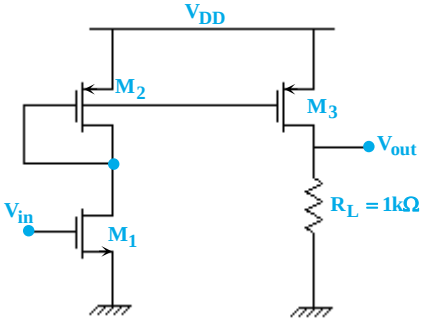
$$KCL(۲): \frac{V_y - V_x}{R_2} + I_{D_1} + \frac{V_y - V_{DD}}{R_1} = 0 \quad (۶)$$

با جایگذاری رابطه (۵) در (۶) داریم:

$$V_y = \frac{R_2}{2R_1 + R_2} V_{DD} - \frac{R_1 R_2}{2R_1 + R_2} I_{ref} + \frac{2R_1}{2R_1 + R_2} V_x \quad (۷)$$

با توجه به رابطه(۷)، V_y با افزایش I_{ref} به صورت خطی کاهش می‌یابد. پس گزینه (۴) صحیح است.

مثال۱۰: بهره ولتاژ سیگنال کوچک مدار شکل زیر کدام گزینه است؟



$$(\frac{W}{L})_3 = 4(\frac{W}{L})_1$$

$$(\frac{W}{L})_1 = (\frac{W}{L})_2$$

$$g_m = 3ms$$

۱) ۴
۲) ۳
۳) ۱۲
۴) ۶

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

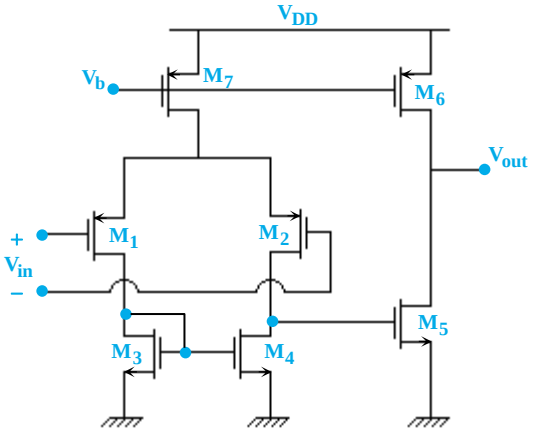
☑ **پاسخ:** گزینه «۳» جریان درین سیگنال کوچک ترانزیستور M_1 برابر است با $g_{m_1}V_{in}$. چون $I_{D_1}=I_{D_2}$ است و $I_{D_3}=\dfrac{I_{D_2}(\frac{W}{L})_3}{(\frac{W}{L})_2}$، جریان درین سیگنال کوچک ترانزیستور M_3 برابر است با:

$$I_{D_3}=\frac{g_{m_1}V_{in}(\frac{W}{L})_3}{(\frac{W}{L})_2}=3\times 4V_{in}=12V_{in}$$

بهره ولتاژ برابر است با:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}=R_L\times 12=12$$

مثال ۱۱: بهره سیگنال کوچک طبقه خروجی کدام گزینه است؟



$g_{m_{1,2}}=4ms$

$g_{m_{3-7}}=2ms$

$r_{o_{1-4}}=2k\Omega$

$r_{o_{5-7}}=1k\Omega$

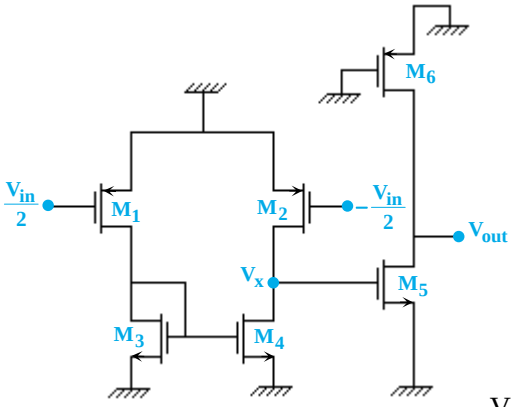
۱) -1

۲) -2

۳) $+1$

۴) $+2$

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» بهره طبقه خروجی $\dfrac{V_{out}}{V_{in}}$ به صورت زیر به دست می‌آید:



$$\frac{V_{out}}{V_{in}}=\frac{-1}{2}\times\frac{V_o}{V_x}\times\frac{V_x}{\frac{-V_{in}}{2}}$$

بهره طبقه اول برابر است با:

$$\frac{V_x}{\frac{-V_{in}}{2}}=-g_{m_2}(r_{o_2}\parallel r_{o_4})$$

بهره طبقه دوم برابر است با:

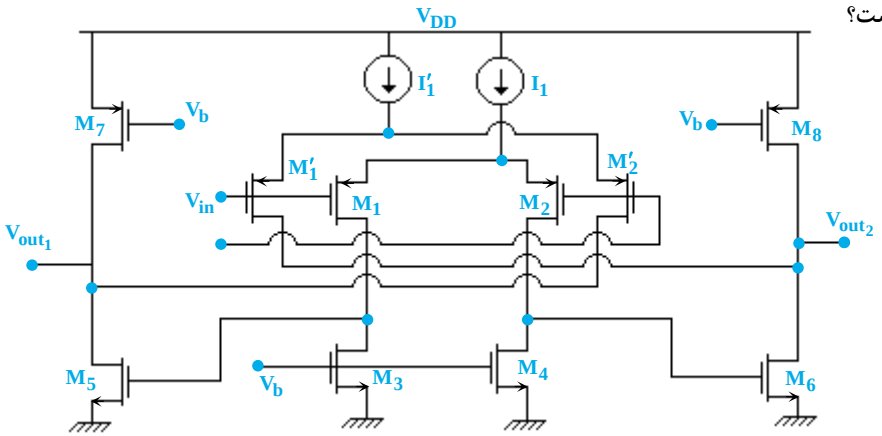
$$\frac{V_{out}}{V_x}=-g_{m_5}(r_{o_5}\parallel r_{o_6})$$

بنابراین بهره $\dfrac{V_{out}}{V_{in}}$ به دست می‌آید:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}}=\frac{-1}{2}\times g_{m_2}\times(r_{o_2}\parallel r_{o_4})\times -g_{m_5}\times(r_{o_5}\parallel r_{o_6})=\frac{-1}{2}\times -4\times 1\times -2\times 0/5=-2$$

مثال ۱۲: بهره ولتاژ دیفرانسیل مدار کدام گزینه است؟

$(g_{m_{1-8}}=g_m\ ,\ g'_{m_{1,2}}=g'_m\ ,\ r'_{o_{1,2}}=\infty)$



۱) $\frac{1}{4}(g'_m r_o+g_m^2\frac{r_o^2}{2})$

۲) $\frac{1}{4}(g'_m+g_m^2\frac{r_o}{2})$

۳) $\frac{1}{2}(g'_m+g_m^2\frac{r_o^2}{2})$

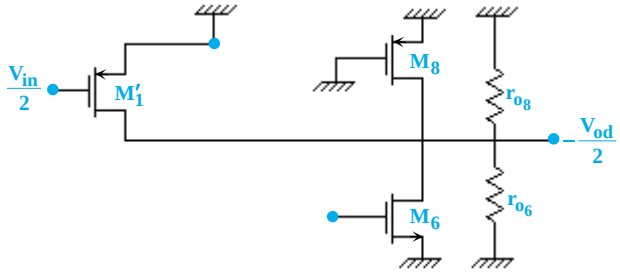
۴) $\frac{1}{2}(g'_m r_o+g_m^2 r_o)$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» مدار متقارن است. بهره ولتاژ دیفرانسیل از میانگین بهره مسیر آهسته و بهره مسیر سریع به دست می‌آید.

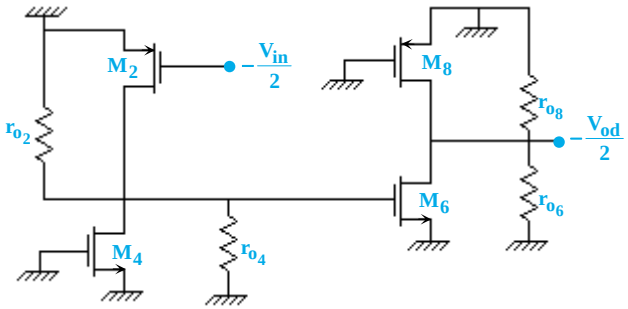
برای مسیر سریع داریم:



بهره مسیر سریع برابر است با:

$$A_{vf} = g'_{m_1}(r_{o_6} \parallel r_{o_8})$$

برای مسیر آهسته داریم:



بهره مسیر آهسته برابر است با:

$$A_{vs} = g_{m_2}(r_{o_2} \parallel r_{o_4}) \times g_{m_6}(r_{o_6} \parallel r_{o_8})$$

بهره موازی دیفرانسیلی برابر است با:

$$A_{v_{total}} = \frac{A_{vf} + A_{vs}}{2} \Rightarrow A_{v_{total}} = [\frac{g'_{m_1} + g_{m_2} g_{m_6}(r_{o_2} \parallel r_{o_4})}{2}] \times (r_{o_6} \parallel r_{o_8})$$

بنابراین داریم:

$$A_{v_{total}} = \frac{g'_m + g_m^2 \frac{r_o}{2}}{2} \times \frac{r_o}{2} = \frac{1}{4}(g'_m r_o + g_m^2 \frac{r_o^2}{2})$$

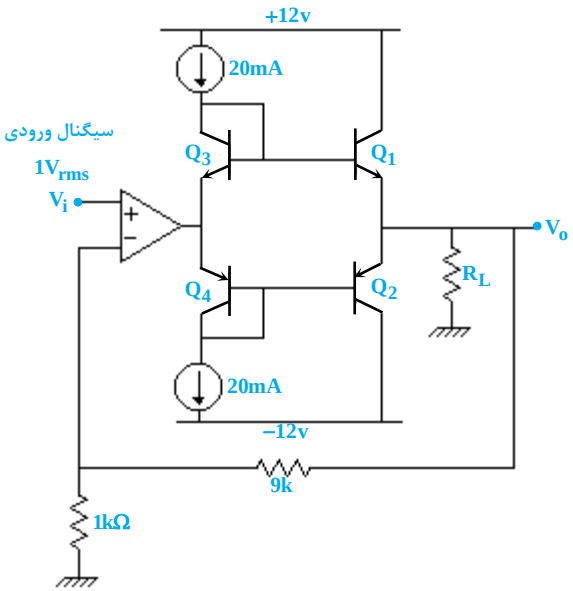
www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

فصل ششم
تقویت‌کننده‌های توان

تست‌های تألیفی فصل ششم

مثال۱: در مدار شکل مقابل حداکثر جریانی کـه از آپ امـپ کشـیده می‌شود کدام گزینه است؟



$\beta = ۱۰۰$

$R_L = ۷۰\Omega$

۱) ۱mA

۲) ۲mA

۳) ۳mA

۴) ۴mA

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» در تقویت‌کننده توان این سؤال از فیدبک استفاده شده است که باعث کاهش اعوجاج در خروجی می‌شود. حداکثر جریـان خروجـی آپ امپ با نوشتن KCL در خروجی آپ امپ به دست می‌آید:

$$i_{op} = I_{E_۴} - I_{E_۳}$$

جریان امیتر ترانزیستور $Q_۴$ برابر با ۲۰mA است، ولی جریان امیتر ترانزیستور $Q_۳$ به صورت مقابل به دست می‌آید:

$$I_{E_۳} = ۲۰\,mA - \frac{I^+_{Lm}}{\beta_۱}$$

جریان بار در نیم‌سیکل مثبت خروجی برابر است با:

$$I^+_{Lm} = \frac{V^+_{om}}{R_L}$$

V^+_{om} (ولتاژ خروجی ماکزیمم در نیم‌سیکل مثبت) از رابطه زیر به دست می‌آید:

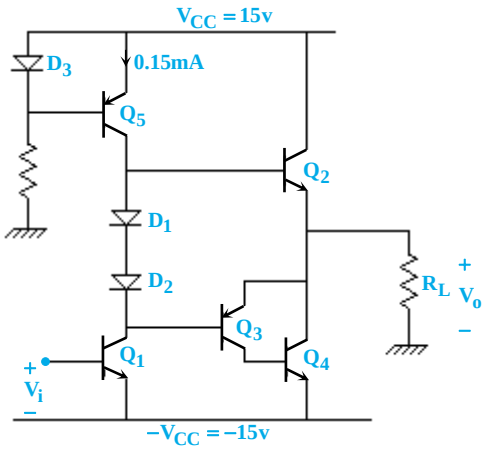
$$V^+_{om} = (۱ + \frac{۹k\Omega}{۱k\Omega}) \times v^+_{im} = ۱۰ \times \sqrt{۲} = ۱۴\,v \quad , \quad V^+_{im} = \sqrt{۲} V_{irms} = \sqrt{۲}$$

$$i_{op} = ۲۰\,mA - (۲۰\,mA - \frac{\frac{۱۴v}{۷۰\Omega}}{۱۰۰}) = ۲mA$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۲: در مدار تقویت‌کننده توان شکل زیر، حداکثر توان لحظه‌ای مجاز ترانزیستورها ۱۰۰mw است. حداکثر توان متوسطی که می‌توان به بار R_L اعمال کرد، کدام گزینه است؟



$V_{om} = ۱۴/۱v$

$\beta = ۱۵۰$

$I_{C_۵} = ۰/۱۵mA$

۱) ۸۰mw

۲) ۱۶۰mw

۳) ۶۰mw

۴) ۱۲۰mw

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» ماکزیمم توان لحظه‌ای مصرفی مجاز ترانزیستورها $P_c\big|_{max} = ۱۰۰mw$ است. از طرفی می‌دانیم که ماکزیمم توان لحظه‌ای مصرفی در هر یک از ترانزیستورهای خروجی برابر است با:

$$P_c\Big|_{max} = \frac{V_{CC}^۲}{۴R_L} \Rightarrow \frac{V_{CC}^۲}{۴R_L} = ۱۰۰\times۱۰^{-۳} \Rightarrow R_L = ۵۶۳\Omega$$

با توجه به V_{om} داده شده داریم:

$$I_{C_۲}(peak) = \frac{V_{om}}{R_L} = \frac{۱۴/۱}{۵۶۳\Omega} = ۲۵mA$$

اما داریم:

$$I_{C_۲} = \beta \times I_{C_۵} = ۱۵۰\times۰/۱۵\times۱۰^{-۳} = ۲۲/۵mA$$

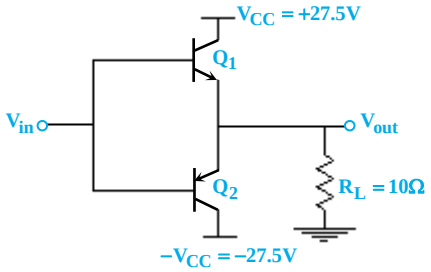
بنابراین ترانزیستور $Q_۲$ نمی‌تواند جریان $I_{C_۲(peak)}$ را تأمین کند و ماکزیمم توان لحظه‌ای ترانزیستور زمانی رخ می‌دهد که:

$$I_{C_۲} = \frac{V_{om}}{R_L} \Rightarrow ۲۲/۵\times۱۰^{-۳} = \frac{۱۴/۱}{R_L} \Rightarrow R_L = ۶۲۷\Omega$$

ماکزیمم توان متوسط خروجی که به بار R_L تحویل داده می‌شود برابر است با:

$$P_L\big|_{max} = \frac{۱}{۲}\frac{V_{om}^۲}{R_L} = \frac{۱}{۲}\times\frac{(۱۴/۱)^۲}{۶۲۷} = ۱۵۹mw \simeq ۱۶۰mw$$

مثال ۳: در صورتی‌که در تقویت‌کننده پوش پول کلاس B شکل زیر ۲۰W توان را به بار منتقل کنیم؛ بازده تقویت‌کننده چقدر خواهد بود؟



۱) ۳۷

۲) ۵۷

۳) ۶۷

۴) ۷۷

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» چنانچه ۲۰ وات توان را به بار ۱۰ اهمی منتقل کنیم حداکثر دامنه‌ی ولتاژ خروجی برابر می‌شود با:

$$P_L = \frac{۱}{۲}\cdot\frac{V_m^۲}{R_L} \xrightarrow{P_L = ۲۰W} V_m = ۲۰V$$

در نتیجه حداکثر دامنه‌ی جریان خروجی نیز برابر است با:

$$I_m = \frac{V_m}{R_L} = \frac{۲۰}{۱۰} = ۲A$$

می‌دانیم که در تقویت‌کننده پوش پول کلاس B متوسط توان کشیده از منابع تغذیه‌ی $\pm V_{CC}$ برابر است با:

$$\overline{P}_S = \frac{۲}{\pi}\times\frac{V_m}{R_L}\times V_{CC} = \frac{۲}{\pi}\times\frac{۲۰}{۱۰}\times(۲۷/۵) \simeq ۳۵W$$

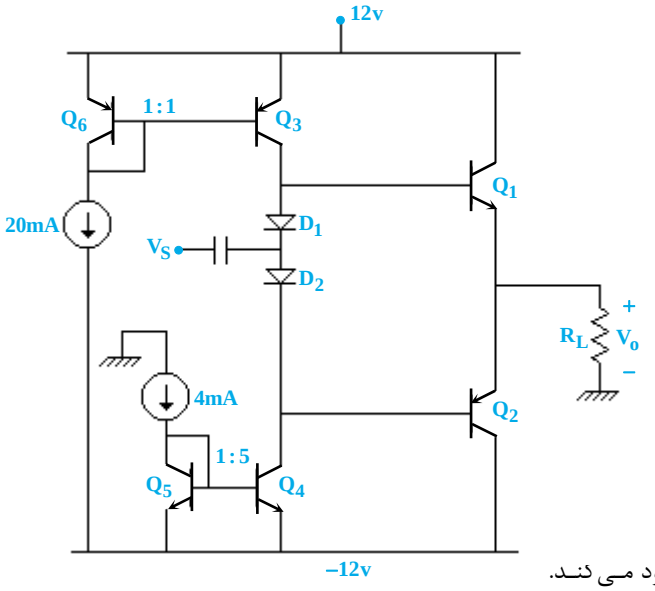
لذا بازده تقویت‌کننده برابر می‌شود با:

$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{۲۰}{۳۵}\times۱۰۰ \simeq \%۵۷$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۴: در مدار شکل زیر بار R_L برای به‌دست آوردن راندمان بیشینه تنظیم شده است. ماکزیمم توان بار چند وات است؟



$V_{D(on)} = |V_{BE(on)}| = ۰/۷\,v$

$|V_{CE(sat)}| = ۰/۳\,v$

$\beta_۱ , \beta_۱ = ۳۹$

$\beta_{۳-۶} = ۱۹۹$

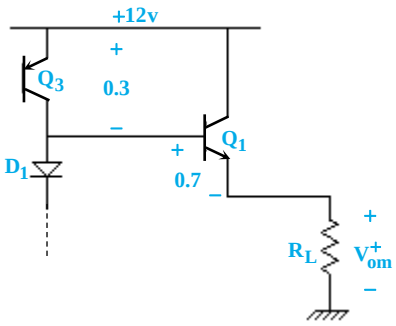
۱) ۴۵/۵

۲) ۶۰/۲

۳) ۲۳/۲

۴) ۷۹/۶

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» در نیم‌سیکل مثبت خروجی، دو عامل خروجی را محدود می‌کند. یکی اشباع ترانزیستور $Q_۳$ و دیگری در آستانه روشن قرار گرفتن دیود $D_۱$ و اتمام عبور جریان از آن. اگر ترانزیستور $Q_۱$ به اشباع برود، ولتاژ ماکزیمم مثبت برابر است با:



$$V_{om}^{+} = V_{CC} - V_{EC_۳}(sat) - V_{BE}(on)$$
$$= ۱۲ - ۰/۳ - ۰/۷ = ۱۱v$$

اگر جریان $D_۱$ به سمت صفر برود، جریان ترانزیستور $Q_۳$ به طور کامل از بیس ترانزیستور $Q_۱$ عبور می‌کند و داریم:

$$I_{B_۱} = I_{C_۳} = I_{C_۶} = ۲۰mA \Rightarrow I_{E_۱} = I_{Lm} = (۱+\beta)I_{B_۱} = ۴۰\times۲۰ = ۸۰۰mA$$

در این حالت V_{om}^{+} برابر است با:

$$V_{om}^{+} = R_L I_{Lm} = ۰/۸R_L$$

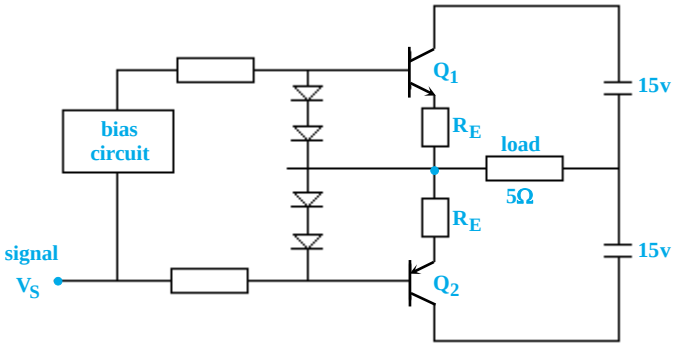
اگر این دو حالت همزمان اتفاق بیفتد، راندمان بیشینه می‌شود و داریم:

$$۰/۸R_L = ۱۱ \Rightarrow R_L = \frac{۱۱}{۰/۸} = ۱۳/۷۵\Omega$$

ماکزیمم توان بار برابر است با:

$$P_L|_{max} = \frac{۱}{۲}\frac{V_{om}^{۲}}{R_L} = \frac{۱}{۲}\times\frac{(۱۱)^{۲}}{۰/۸} = ۷۵/۶w$$

مثال ۵: در تقویت‌کننده توان شکل زیر راندمان مدار چند درصد است؟
(جریان مصرفی DC از هر منبع ۱A است.)



۱) ٪۸۲

۲) ٪۴۱

۳) ٪۳۲

۴) ٪۶۴

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» راندمان این مدار از رابطه مقابل به دست می‌آید:

$$L = \frac{\pi}{۴}\left(\frac{V_{om}}{V_{CC}}\right)$$

برای محاسبه V_{om} ابتدا جریان I_{om} (ماکزیمم جریان در خروجی) را محاسبه می‌کنیم:

$$I_{om} = \pi I_{DC} = ۳/۱۴\times۱ = ۳/۱۴A$$

بنابراین V_{om} برابر است با:

$$V_{om} = R_L . I_{om} = ۵\times۳/۱۴ = ۱۵/۷v$$

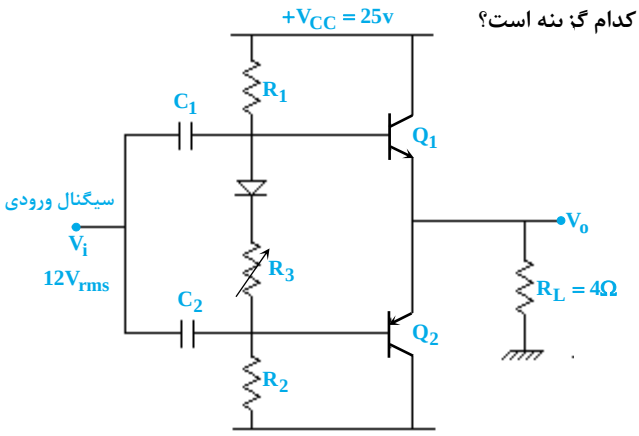
راندمان مدار برابر است با:

$$L = \frac{\pi}{۴}\times\frac{۱۵/۷}{۱۵} = ۰/۸۲۱ = ٪۸۲/۱$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۶: در مدار تقویت‌کننده شکل مقابل، توان تلف شده در هر ترانزیستور کدام گزینه است؟ (فرض کنید تقویت‌کننده ایده‌آل با بهره‌ی واحد باشد.)



۱) ۱۵/۷w
۲) ۳۶w
۳) ۳۱/۳۸w
۴) ۶۷/۵w

پاسخ: گزینه «۱» توان تلف شده در ترانزیستورها تقریباً برابر است با:

$$P_{2Q} = P_i(dc) - P_o(ac)$$

ولتاژ ورودی v_i برابر با ۱۲vrms است. بنابراین دامنه ولتاژ ورودی برابر است با:

$$v_{im} = \sqrt{2}v_{irms} = \sqrt{2}\times 12 = 17v$$

با فرض اینکه تقویت‌کننده ایده‌آل با بهره واحد داریم:

$$v_{om} = v_{im} = 17v$$

پس توان ارسالی به بار برابر است با:

$$P_o(ac) = \frac{1}{2}\frac{V_{om}^2}{R_L} = \frac{(17)^2}{2\times 4} = 36/12w$$

جریان عبوری از بار به صورت مقابل به دست می‌آید:

$$I_{Lm} = \frac{V_{om}}{R_L} = \frac{17}{4} = 4/25A$$

این جریان در هر نیم‌سیکل از طریق یکی از ترانزیستورها تأمین می‌شود.

$$I_{DC} = \frac{2}{\pi}I_{Lm} = \frac{2}{\pi}\times 4/25 = 2/7A$$

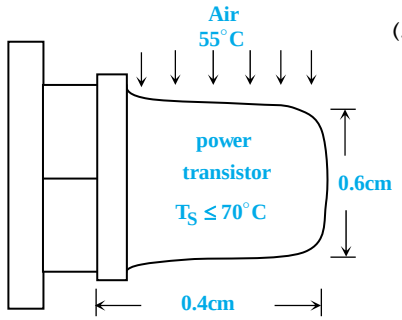
پس داریم:

$$Pi(dc) = V_{CC}.I_{DC} = 25\times 2/7 = 67/5w$$

در نتیجه توان تلف شده در هر ترانزیستور به دست می‌آید:

$$P_Q = \frac{P_{2Q}}{2} = \frac{67/5 - 36/12}{2} = 15/7w$$

مثال ۷: یک ترانزیستور با ارتفاع ۰/۴cm و قطر ۰/۶cm بر روی یک بُرد مداری قرار گرفته است. ترانزیستور به‌وسیله جریان هوا با ضریب انتقال حرارتی حدود $30\frac{w}{m^2.°C}$ خنک می‌شود. اگر دمای هوا ۵۵°C باشد و ترانزیستور بیش از دمای ۷۰°C را تحمل نکند، میزان توان ترانزیستور که می‌تواند به راحتی هدر رود، چقدر است؟ (از هر گونه انتقال حرارتی در بیس ترانزیستور صرف‌نظر کنید.)



۱) ۰/۰۲۳w
۲) ۳w
۳) ۰/۰۴۷w
۴) ۴۷w

پاسخ: گزینه «۳» ترانزیستور روی یک برد مداری نصب شده است و به وسیله جریان هوای روی آن خنک می‌شود. دمای ترانزیستور نباید از ۷۰°C تجاوز کند. با توجه به فرضیات: ۱) وجود شرایط عملیاتی یکسان، ۲) نادیده گرفته شدن انتقال حرارتی از طریق تشعشع، ۳) ضریب انتقال حرارتی ثابت و یکنواخت روی سطح ترانزیستور و ۴) ناچیز بودن انتقال حرارتی از بیس ترانزیستور داریم:

$$A_s = \pi DL + \frac{\pi D^2}{4} = \pi(0/6cm)\times(0/4cm) + \frac{\pi\times(0/6cm)^2}{4} = 1/037cm^2$$

میزان انتقال حرارت از ترانزیستور قدرت در شرایط مشخص برابر است با:

$$Q = hA_s(T_s - T_\infty) = (30\frac{w}{m^2.°C})\times(1/037\times 10^{-4}\ m^2)\times(70-55)°C$$

$$Q = 0/047w$$

بنابراین مقدار توانی که از این ترانزیستور هدر می‌رود برابر است با ۰/۰۴۷w.

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

فصل هفتم

فیدبک منفی در تقویت‌کننده‌ها

تست‌های تألیفی فصل هفتم

مثال ۱: در مدار شکل مقابل بهره $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ برابر با کدام گزینه است؟

$r_{o_1} = r_{o_4} = 20\,k\Omega$ $\quad g_{m_1} = g_{m_4} = 3m\mho$

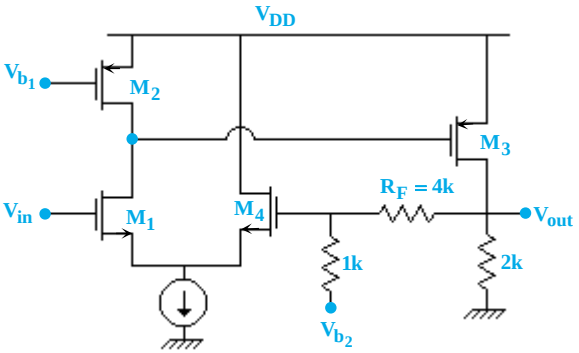
$r_{o_2} = r_{o_3} = 10\,k\Omega$ $\quad g_{m_2} = g_{m_3} = 2m\mho$

۱) ۷/۱۴

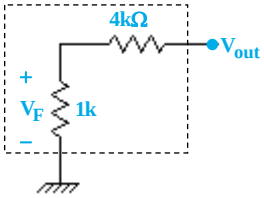
۲) ۴/۱۶

۳) ۱/۷۸

۴) ۳/۲۵



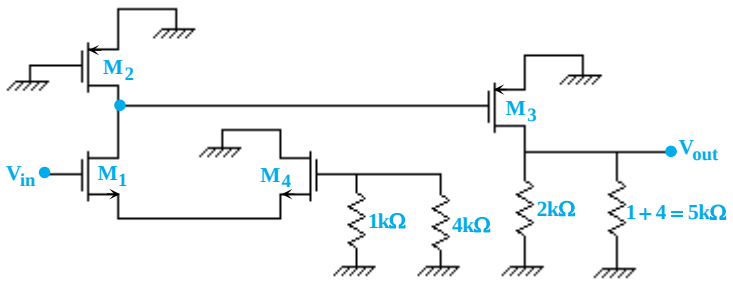
☑ **پاسخ:** گزینه «۲» شبکه فیدبک شامل مقاومت‌های $4\,k\Omega$ و $1\,k\Omega$ می‌باشد و چون نمونه‌برداری در خروجی از نوع ولتاژ است و در ورودی به صورت سری مقایسه صورت می‌گیرد (انشعاب جریان نداریم)، فیدبک از نوع ولتاژ ـ سری است و بهره فیدبک $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ می‌باشد.



ابتدا ضریب فیدبک را با توجه به شکل مقابل به دست می‌آوریم:

$$k = \frac{V_F}{V_{out}} = \frac{1}{1+4} = 0/2$$

با اعمال اثر بارگذاری شبکه فیدبک را می‌توان را به صورت زیر باز کرد:



بهره حلقه باز به صورت مقابل به دست می‌آید:

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} \simeq \frac{1}{2} g_{m_1}(r_{o_1} \| r_{o_2}) g_{m_3}(r_{o_3} \| 2k \| (1k + 4k)) = 25$$

در نتیجه بهره ولتاژ حلقه بسته که همان بهره فیدبک نیز می‌باشد برابر است با:

$$A_{Vf} = \frac{A_V}{1 + kA_V} = \frac{25}{1 + (0/2 \times 25)} = 4/16$$

مثال ۲: در مدار شکل مقابل تمام مقاومت‌ها برابر $2\,k\Omega$ می‌باشند و $g_{m_1} = g_{m_2} = \frac{1}{200\,\Omega}$ است.

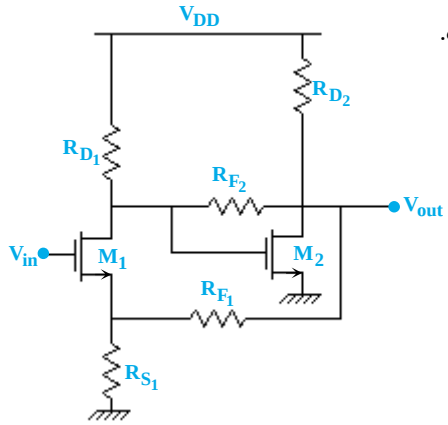
همچنین فرض کنید مقاومت خروجی ترانزیستورها بزرگ است. بهره $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ کدام گزینه است؟

۱) ۰/۷

۲) ۰/۴

۳) ۱

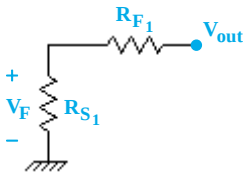
۴) ۰/۳



www.modaresanesharif.ac.ir

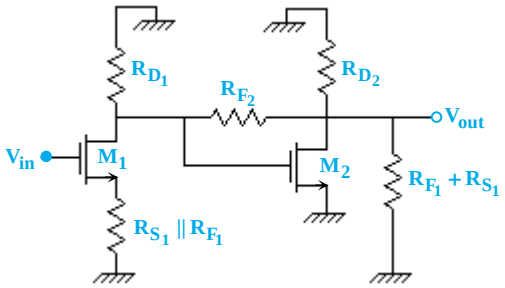
www.modaresanesharif.ac.ir

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» در این مدار شبکه فیدبک شامل مقاومت‌های R_{F_1} و R_{S_1} می‌باشد (مقاومت R_{F_2} به روش قضیه میلر قابل حل است). فیدبک از نوع ولتاژ ـ سری است و بهره فیدبک $\frac{\text{ولتاژ}}{\text{ولتاژ}} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ می‌باشد. ضریب فیدبک با توجه به شکل زیر برابر است با:

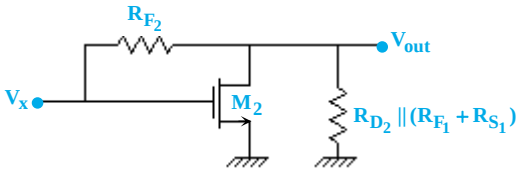


$$K = \frac{V_F}{V_{out}} = \frac{R_{S_1}}{R_{F_1} + R_{S_1}} = \frac{۲}{۲+۲} = ۰/۵$$

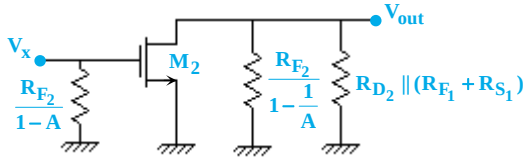
شبکه فیدبک را به صورت شکل زیر باز می‌کنیم و اثر فیدبک را اعمال می‌کنیم:



طبقه دوم مدار به صورت زیر است:



با فرض بزرگ بودن بهره $\frac{V_{out}}{V_x}$ (بهره میلر) داریم:



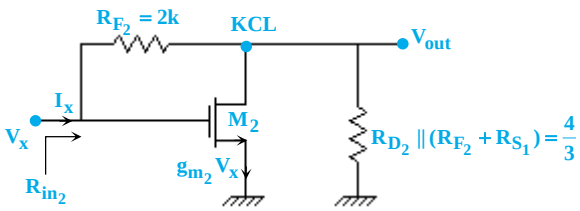
$$\frac{۱}{A} \to ۰$$

$$\frac{R_{F_۲}}{۱-\frac{۱}{A}} = R_{F_۲}$$

بهره طبقه دوم به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$A_{V_۲} = A = \frac{V_{out}}{V_x} = -g_{m_۲}\left[\left(\frac{R_{F_۲}}{۱-\frac{۱}{A}}\right) \| \left(R_{D_۲} \| (R_{F_۱} + R_{S_۱})\right)\right] \Rightarrow A = -۵\left(۲ \| \frac{۴}{۳}\right) = -۴$$

فرض بزرگ بودن A غلط است و بنابراین به روش میلر نمی‌توان مسأله را حل کرد. از روش پخش جریان استفاده می‌کنیم:



$$KCL: \frac{V_{out}}{\frac{۴}{۳}} + \frac{V_{out} - V_x}{۲} + g_{m_۲} V_x = ۰$$

بهره طبقه دوم برابر است با: $A_{V_۲} = \frac{V_{out}}{V_x} = -۳/۶$

برای به دست آوردن بهره طبقه اول، به مقاومت دیده شده از دید گیت ترانزیستور $M_۲$ نیاز داریم. مقاومت $R_{in_۲}$ برابر است با:

جریان I_x با جریان عبوری از مقاومت $R_{F_۲}$ برابر است (گیت جریان نمی‌کشد).

$$R_{in_۲} = \frac{V_x}{I_x}$$

$$I_x = \frac{V_x - V_{out}}{۲} = \frac{V_x + ۳/۶V_x}{۲} = ۲/۳V_x$$

بنابراین $R_{in_۲}$ به دست می‌آید:

$$R_{in_۲} = \frac{۱}{۲/۳} = ۰/۴۳\,k\Omega$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

بنابراین بهره طبقه اول برابر است با:

$$A_{V_1} = -\frac{R_{D_1} \| R_{in_2}}{R_{s_1} \| R_{f_1} + \frac{1}{g_{m_1}}} = -0/3$$

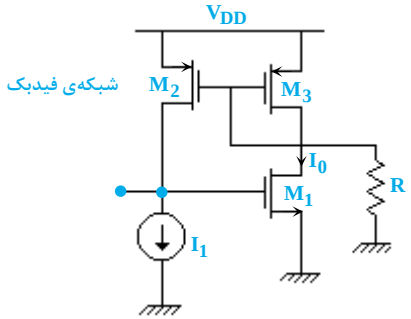
در نتیجه بهره حلقه باز به دست می‌آید:

$$A_V = A_{V_1} \times A_{V_2} = -0/3 \times -3/6 = 1/08$$

بهره فیدبک از رابطه مقابل به دست می‌آید:

$$A_{Vf} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_V}{1+KA_V} = \frac{1/08}{1+(0/5 \times 1/08)} = 0/7$$

مثال ۳: در مدار زیر بهره حلقه کدام گزینه است؟ ($\lambda = 0$)



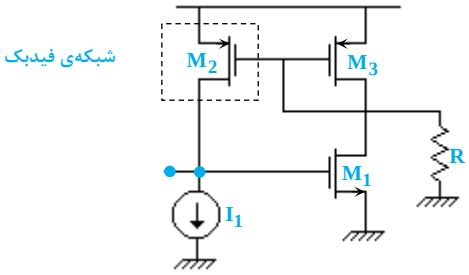
۱) ۰

۲) $\frac{g_{m_2} g_{m_3} R}{1+g_{m_3} R}$

۳) $\frac{g_{m_2} r_{o_2}}{g_{m_3} R}$

۴) $\frac{g_{m_1} g_{m_2} r_{o_2} R}{1+g_{m_3} R}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» شبکه فیدبک در این مدار تنها شامل ترانزیستور M_2 می‌باشد. فیدبک از نوع جریان ـ موازی است، زیرا ترانزیستورهای M_2 و M_3 منبع جریان آینه‌ای هستند و در خروجی از جریان نمونه‌برداری می‌کنیم. در ورودی انشعاب جریان داریم و بنابراین نوع فیدبک، جریان ـ موازی می‌باشد.



ابتدا ضریب فیدبک را به دست می‌آوریم:

$$k = \frac{I_F}{I_o}$$

جریان I_F برابر است با:

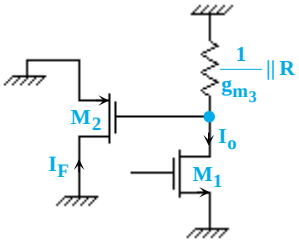
$$I_F = g_{m_2} \times V_{gs_2}$$

ولتاژ V_{gs_2} به صورت زیر به دست می‌آید:

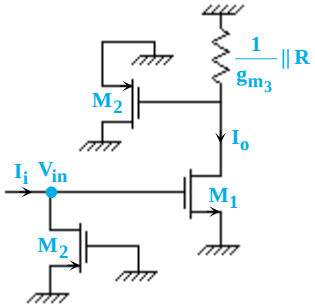
$$V_{gs_2} = (\frac{1}{g_{m_3}} \| R) I_o$$

بنابراین داریم:

$$k = g_{m_2} (\frac{1}{g_{m_3}} \| R)$$



برای به دست آوردن بهره حلقه باز مدار زیر را با بارگذاری اثر فیدبک رسم می‌کنیم:



ولتاژ V_{in} به‌صورت مقابل است:

$$V_{in} = r_{o_2} I_i$$

جریان خروجی I_o برابر است با:

$$I_o = g_{m_1} V_{in}$$

در نتیجه بهره حلقه باز برابر است با:

$$A_I = \frac{I_o}{I_i} = g_{m_1} r_{o_2}$$

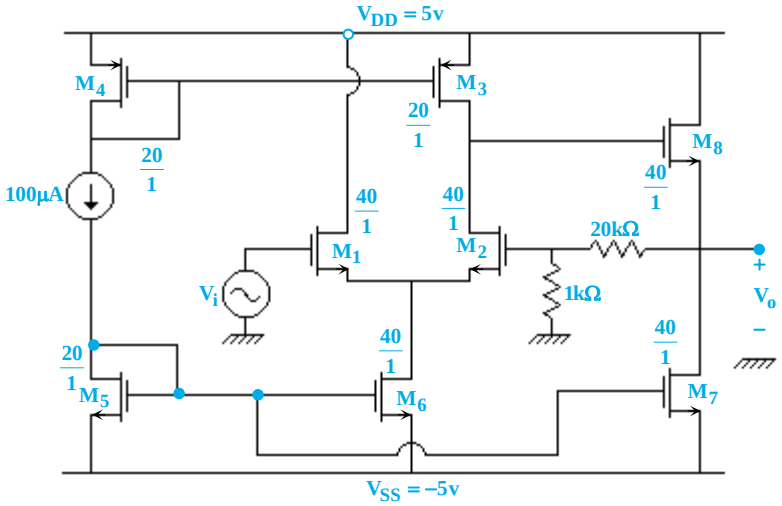
بهره حلقه از حاصل‌ضرب بهره حلقه باز و ضریب فیدبک به دست می‌آید:

$$A_I \times k = g_{m_1} r_{o_2} \times g_{m_2} \left(\frac{1}{g_{m_3}} \| R \right) = \frac{g_{m_1} g_{m_2} r_{o_2} R}{1+g_{m_3} R}$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۴: شکل زیر یک تقویت‌کننده CMOS را مشخص کرده است. ولتاژ DC ورودی برابر صفر است. بهره کل $\frac{V_o}{V_i}$ کدام گزینه است؟



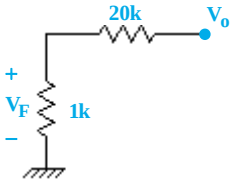
$k_{۱-۴} = ۰/۱\frac{mA}{V^۲}$ $\quad \lambda = ۰/۰۲V^{-۱}$

$k_{۵-۸} = ۰/۲\frac{mA}{V^۲}$

۱) ۱۵/۵۴ ۲) ۶/۲۳ ۳) ۷/۴۲ ۴) ۱۲/۳۵

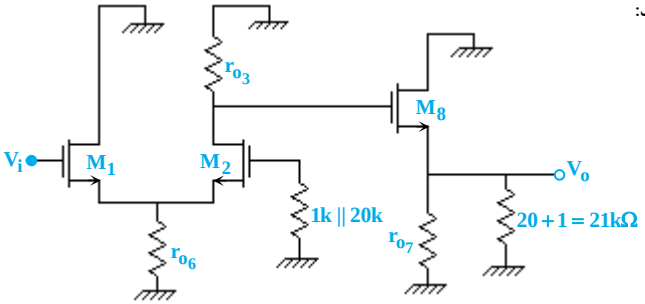
پاسخ: گزینه «۴» شبکه فیدبک شامل مقاومت‌های ۲۰kΩ و ۱kΩ می‌باشد.

فیدبک از نوع ولتاژ ـ سری است و بهره فیدبک $\frac{\text{ولتاژ}}{\text{ولتاژ}}$ می‌باشد. ضریب فیدبک را از مدار شکل مقابل به دست می‌آوریم:



$$k = \frac{V_F}{V_o} = \frac{۱}{۱+۲۰} = \frac{۱}{۲۱}$$

بهره تقویت‌کننده بدون فیدبک (با بارگذاری اثر فیدبک) از مدار زیر به دست می‌آید:



$$A_V = \frac{۱}{۲}g_{m_۱}(۲r_{o_۲} \parallel r_{o_۴})\frac{g_{m_۸}\left[(۲۰+۱) \parallel r_{o_۷}\right]}{۱+g_{m_۸}\left[(۲۰+۱) \parallel r_{o_۷}\right]} \qquad (۱)$$

هدایت انتقالی ترانزیستور $M_۱$ برابر است با:

$$g_{m_۱} = ۲\sqrt{k_۱ I_{D_۱}} = ۲\sqrt{۰/۱\times ۰/۱} = ۰/۲\,m\mho$$

از آن‌جا که داریم:

$$I_{D_۲} = I_{D_۴} \Rightarrow r_{o_۲} = r_{o_۴} = \frac{۱}{\lambda I_{D_۲}} = \frac{۱}{۰/۰۲\times ۰/۱} = ۵۰۰k\Omega$$

$$r_{o_۷} = \frac{۱}{\lambda I_{D_۲}} = \frac{۱}{۰/۰۲\times ۰/۲} = ۲۵۰k\Omega$$

هدایت انتقالی ترانزیستور $M_۸$ برابر است با:

$$g_{m_۸} = ۲\sqrt{k_۲ I_{D_۸}} = ۲\sqrt{۰/۲\times ۰/۲} = ۰/۴\,m\mho$$

با جایگذاری $r_{o_۷}, g_{m_۸}, g_{m_۱}, r_{o_۲}, r_{o_۴}$ در معادله (۱) داریم:

$$A_V = \frac{۱}{۲}\times ۰/۲\times(۵۰۰\times\frac{۲}{۳})\times\frac{۰/۴\times ۲۱}{۱+۰/۴\times ۲۱} \simeq ۳۰$$

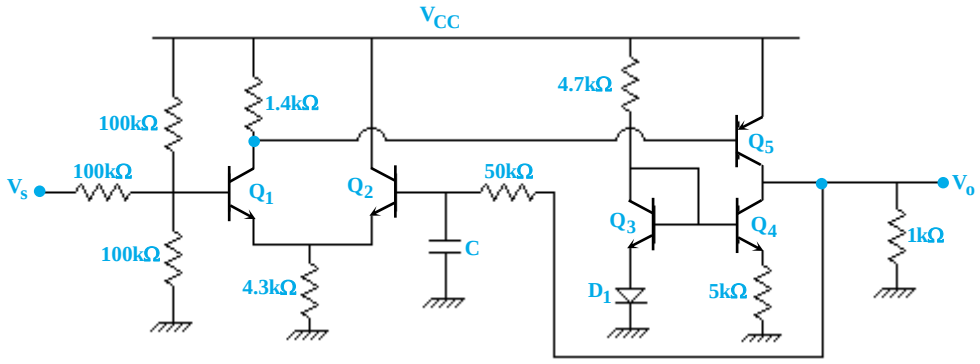
بهره حلقه بسته برابر است با:

$$A_{V_F} = \frac{Vo}{V_i} = \frac{A_V}{۱+kA_V} = \frac{۳۰}{۱+(\frac{۱}{۲۱}\times ۳۰)} = ۱۲/۳۵$$

www.modaresanesharif.ac.ir

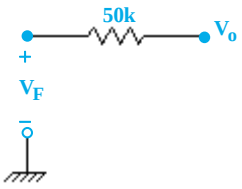
www.modaresanesharif.ac.ir

مثال۵: در مدار شکل زیر، برای حالت فرکانس پایین، بهره $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ را تعیین کنید؟ $\beta = ۱۰۰$ ، $V_T = ۲۵mv$ ، $V_A = ۱۰۰v$



۱) ۲۳/۴ ۲) ۱۵۹ ۳) ۱ ۴) ۴۷/۲

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» در فرکانس پایین خازن C تقریباً مدار باز بوده و مطابق شکل زیر فیدبک داریم:



فیدبک از نوع ولتاژ ـ سری است. ضریب فیدبک از مدار روبه‌رو به دست می‌آید:

$$K = \frac{V_F}{V_o} = ۱$$

با فرض بهره‌ی زیاد حلقه باز به رابطه مقابل داریم:

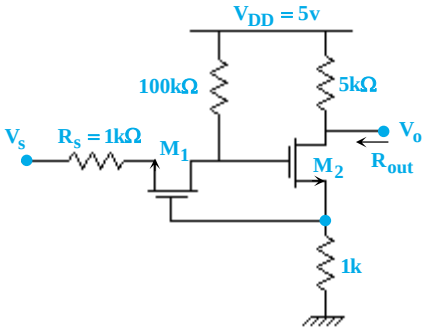
$$A_{Vf} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{A_V}{۱ + KA_V} = \frac{A_V}{۱ + A_V} \simeq ۱$$

در واقع مدار در فرکانس پایین مانند بافر عمل می‌کند.

مثال۶: در مدار شکل زیر، مقاومت خروجی R_{out} کدام گزینه است؟

$g_m = ۱m℧$

$r_{ds} = ۱۰۰k\Omega$



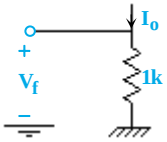
۱) ۲۶MΩ

۲) ۲MΩ

۳) ۵۲MΩ

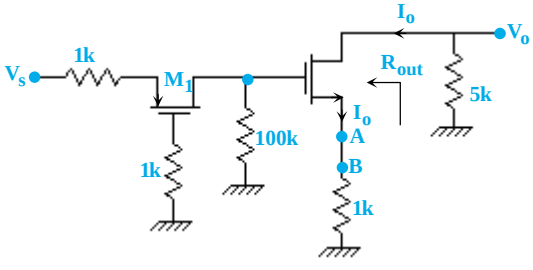
۴) ۵/۲MΩ

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» در این شکل مدار دارای فیدبک از نوع جریان ـ سری می‌باشد. شبکه فیدبک به صورت مقابل است:



ضریب فیدبک: $k = \frac{V_f}{I_o} = ۱k$

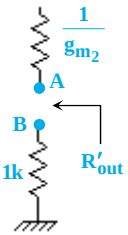
برای به دست آوردن بهره حلقه باز مدار زیر را با بارگذاری اثر فیدبک می‌کشیم:



بهره حلقه باز به صورت مقابل است:

$$A = \frac{I_o}{V_s} = \frac{\frac{۱}{g_{m_۱}}}{\frac{۱}{g_{m_۱}} + ۱k} \times g_{m_۱}(۱۰۰k) \times \frac{۱}{g_{m_۲} + ۵k} = ۲۵m℧$$

برای به دست آوردن مقاومت خروجی، باید ابتدا در مدار شکل بالا از دید دو نقطه A و B، مقاومت R'_{out} را به دست آوریم:



$$R'_{out} = ۱k + \frac{۱}{g_{m_۲}} = ۲k\Omega$$

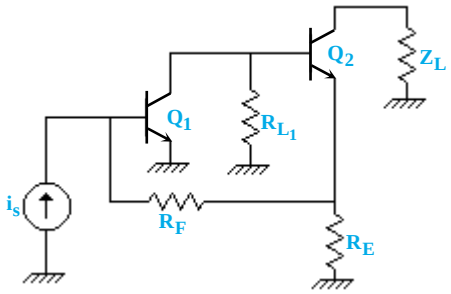
مقاومت خروجی از دید دو نقطه A و B بعد از اعمال فیدبک برابر است با: $R''_{out} = (۱ + kA)R'_{out} = ۵۲k\Omega$

بنابراین مقاومت خروجی از دید ولتاژ خروجی به دست می‌آید: $R_{out} = r_{ds_۲}(۱ + g_{m_۲}R''_{out}) = ۵/۲M\Omega$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۷: در مدار شکل زیر اگر جریان کلکتور ترانزیستور Q_1 به میزان ۲۰ درصد افزایش یابد، امپدانس خروجی تقریباً چند درصد تغییر خواهد کرد؟ $(R_F + R_E = r_{\pi_1})$



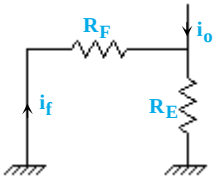
۱) ۱۰٪ کاهش

۲) ۱۰٪ افزایش

۳) ۲۰٪ افزایش

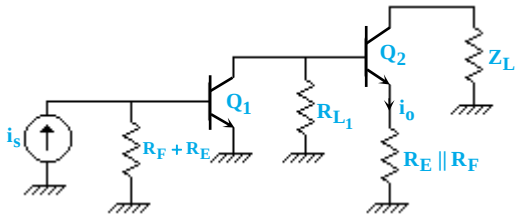
۴) ۲۰٪ کاهش

پاسخ: گزینه «۲» در این مدار فیدبک از نوع جریان ـ موازی است. شبکه فیدبک شامل مقاومت‌های R_E و R_f است. ضریب فیدبک از مدار شکل زیر به دست می‌آید:



$$K = \frac{i_f}{i_o} = \frac{-R_E}{R_E + R_F}$$

بهره حلقه باز با بارگذاری اثر فیدبک از مدار مقابل به دست می‌آید:



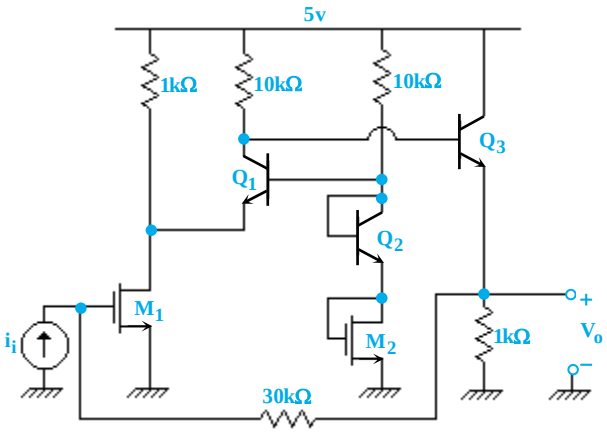
$$A_I = \frac{i_o}{i_s} = -[(R_F + R_E) \,||\, r_{\pi_1}] g_{m_1} R_{L_1} \frac{g_{m_2}}{1 + g_{m_2}(R_E \,||\, R_F)}$$

مقاومت خروجی برابر است با:

$$R_{out_f} = (1 + KA_I) \times R_{out}$$

اگر I_{C_1} و در نتیجه g_{m_1} ۲۰٪ افزایش یابد، r_{π_1} حدود ۲۰٪ کاهش می‌یابد. لذا بهره A_I حدود ۱۰٪ افزایش می‌یابد. اما چون $R_F + R_E = r_{\pi_1}$ است، K بدون تغییر می‌ماند. درنتیجه R_{out_f} حدود ۱۰٪ افزایش می‌یابد.

مثال ۸: تقویت‌کننده مدار شکل زیر را در نظر بگیرید. بهره حلقه کدام گزینه است؟



$g_{m_Q} = 10\,m\mho$

$g_{m_m} = 2\,m\mho$

$\beta = 100$

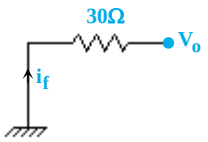
۱) ۴

۲) ۱۶

۳) ۳۲

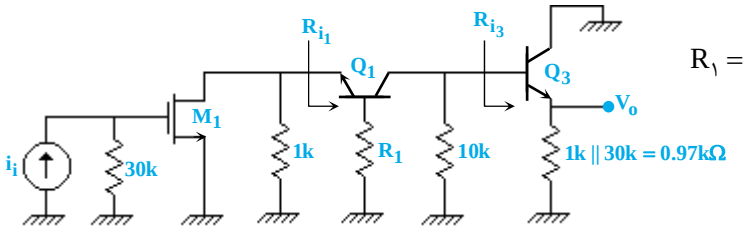
۴) ۶۴

پاسخ: گزینه «۲» فیدبک در این مدار از نوع ولتاژ ـ موازی است. شبکه فیدبک شامل مقاومت ۳۰ کیلو اهمی می‌باشد. ضریب فیدبک از مدار مقابل قابل محاسبه است:



$$K = \frac{i_f}{V_o} = -\frac{1}{30}$$

با بارگذاری اثر فیدبک مدار شکل زیر را داریم:



$$R_1 = 10^k \,||\, \left(\frac{1}{g_{m_{Q_2}}} + \frac{1}{g_{m_{M_2}}}\right) \simeq 0/6\,k\Omega$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

بهره حلقه باز را محاسبه می‌کنیم:

$$A=\frac{V_o}{i_i}=\overbrace{-(۳۰k)g_{m_{M_۱}}}^{\text{جریان } i_{D_۱}}\times\overbrace{\frac{۱k}{۱k+R_{i_۱}}}^{\text{تقسیم جریان}}\times\overbrace{(۱۰k\,||\,R_{i_۳})}^{\text{مقاومت کلکتور}}\times\overbrace{\frac{g_{m_{Q_۳}}(۰/۹۷)}{۱+g_{m_{Q_۳}}(۰/۹۷)}}^{\text{تقسیم ولتاژ}}$$

در این رابطه $R_{i_۱}$ و $R_{i_۳}$ از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$R_{i_۱}=\frac{۱}{g_{m_{Q_۳}}}+\frac{R_۱}{۱+\beta}\simeq\frac{۱}{۱۰}+\frac{۰/۶}{۱۰۰}=۰/۱۰۶k\Omega\quad,\quad R_{i_۳}=r_{\pi_{Q_۳}}+۰/۹۷(۱+\beta)=\frac{\beta}{g_{m_{Q_۳}}}+۹۷\simeq۱۰۷k\Omega$$

با جایگذاری $R_{i_۱}$ و $R_{i_۳}$ در رابطه بهره حلقه باز خواهیم داشت:

$$A=-۳۰\times۲\times\frac{۱}{۱/۱۰۶}\times۱۰\times\frac{۹/۷}{۱۰/۷}=-۴۹۱/۸k\Omega$$

گین حلقه به دست می‌آید:

$$T=kA=-\frac{۱}{۳۰}\times-۴۹۱/۸=۱۶/۴\simeq۱۶$$

www.modaresanesharif.ac.ir

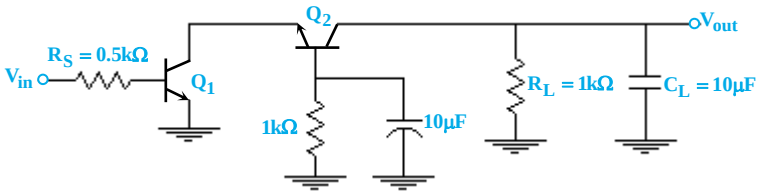
www.modaresanesharif.ac.ir

فصل هشتم

پاسخ فرکانسی

تست‌های تألیفی فصل هشتم

مثال ۱: فرکانس قطع پایین مدار زیر به کدام گزینه نزدیک‌تر است؟ $(r_o = \infty\ ,\ r_\pi = 1k\Omega\ ,\ \beta = 100)$



۱) ۱۶Hz

۲) ۳۲Hz

۳) ۸Hz

۴) ۰

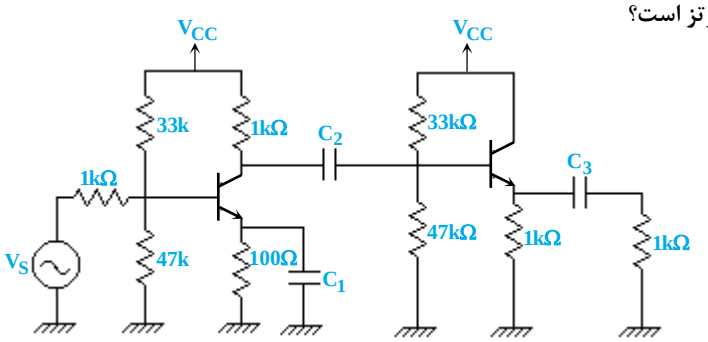
☑ **پاسخ:** گزینه «۱» خازن بیس ترانزیستور Q_2 یک صفر و قطب هم‌اندازه در تابع تبدیل کلی ایجاد می‌کند که از صورت و مخرج تابع تبدیل حذف می‌شوند؛ لذا خازن بیس Q_2 نقشی در پاسخ فرکانسی سیستم ندارد؛ حال قطب ناشی از خازن C_L را حساب می‌کنیم:

$$R_{C_L} = R_L \,||\, r_o = 1k\Omega$$

$$\omega_{P_{CL}} = \frac{1}{R_{C_L}.C_L} = \frac{1}{10^3 \times 10 \times 10^{-6}} = 100\frac{rad}{s} \quad , \quad f_{3dB,C_L} = \frac{\omega_{PC_L}}{2\pi} = \frac{100}{2\pi} \simeq 16Hz$$

مثال ۲: در مدار تقویت‌کننده چندطبقه شکل زیر، $f_{-3dB.L}$ چند هرتز است؟

$$C_1 = 47\mu F \ , \ C_2 = 47\mu F \ , \ C_3 = 47\mu F$$
$$g_{m_1} = 40ms \ , \ g_{m_2} = 10ms \ , \ \beta = 100$$



۱) ۸۴۰Hz

۲) ۱۳۴Hz

۳) ۱۸۹Hz

۴) ۵۲۳Hz

☑ **پاسخ:** گزینه «۲»

نکته: منظور از فرکانس قطع f_{-3dB} همان f_L می‌باشد. در واقع در فرکانسی که توان سیگنال به نصف مقدار اولیه آن می‌رسد f_{-3dB} گفته می‌شود.

توان سیگنال در باند عبور: $P_{signal} \xrightarrow{\text{برحسب دسی‌بل}} P_{dB}$

توان سیگنال در f_{-3dB}: $(\frac{P_{signal}}{2}) \xrightarrow{\text{برحسب دسی‌بل}} P_{dB} - 10\log 2 \Rightarrow P_{dB} - 3dB$

تقویت‌کننده دو طبقه است؛ طبقه اول امیتر مشترک و طبقه دوم بافر است. ابتدا مقاومتی را که از دو سر خازن C_1 دیده می‌شود، وقتی که بقیه خازن‌ها اتصال کوتاه هستند، به‌دست می‌آوریم. مقاومت R_1 برابر است با:

$$R_1 = 100\Omega \,||\, (r_{e_1} + \frac{1k \,||\, 33k \,||\, 47k}{\beta + 1}) \simeq 25\Omega \quad , \quad r_{e_1} = \frac{1}{g_{m_1}}$$

مقاومت R_2، دیده شده از دو سر خازن C_2، با فرض اتصال کوتاه بودن خازن‌های C_3 و C_1 برابر است با:

$$R_2 = 1k + 33k \,||\, 47k \,||\, [r_{\pi_2} + (1+\beta)(1k \,||\, 1k)] \simeq 15/5 k\Omega \quad , \quad r_{\pi_2} = \frac{\beta}{g_{m_2}}$$

مقاومت R_3 از دو سر خازن C_3 نیز برابر است با:

$$R_3 = 1^k + 1^k \,||\, (r_{e_2} + \frac{33k \,||\, 47k \,||\, 1k}{1+\beta}) = 1/5 k\Omega$$

قطب هر خازن برابر است با:

$$\omega_{P_1} = \frac{1}{R_1 C_1} \Rightarrow \omega_{P_1} = \frac{1}{25 \times 47 \times 10^{-6}} = 851\frac{rad}{s}$$

$$\omega_{P_2} = \frac{1}{R_2 C_2} \Rightarrow \omega_{P_2} = \frac{1}{15/5 \times 10^3 \times 47 \times 10^{-6}} = 1/372\frac{rad}{s} \ , \ \omega_{P_3} = \frac{1}{R_3 C_3} = \frac{1}{1/5 \times 10^3 \times 47 \times 10^{-6}} = 14/2\frac{rad}{s}$$

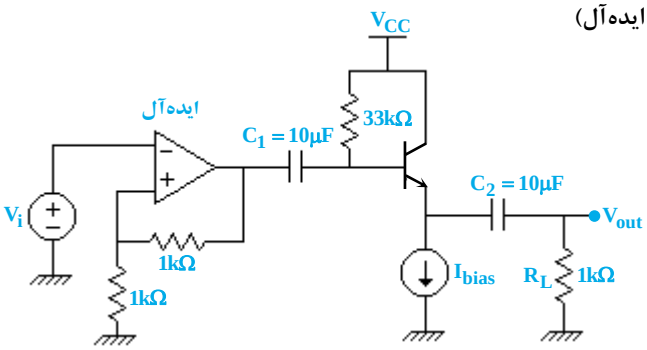
خازنی که قطب فرکانس بالاتری دارد تعیین‌کننده‌تر می‌باشد؛ بنابراین فرکانس قطع پایین $851\frac{rad}{s}$ می‌باشد.

$$f_L = \frac{851}{2\pi} \simeq 134Hz$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۳: در مدار شکل زیر فرکانس قطع پایین کدام گزینه است؟ (آپ امپ ایده‌آل)



$g_m = ۲۰ms$

$\beta = ۱۰۰$

۱) $۱\frac{rad}{s}$

۲) $۱۰/۵\frac{rad}{s}$

۳) $۱۰۰\frac{rad}{s}$

۴) $۱۰۰۰\frac{rad}{s}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» ابتدا مقاومت دیده شده از دو سر خازن $C_۱$ را به‌دست می‌آوریم. (مقاومت خروجی آپ امپ ناچیز است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد)

$$R_۱ = ۳۳k \,||\, (r_\pi + (۱+\beta)R_L) = ۲۵\,k\Omega \quad , \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

مقاومت دیده شده از دو سر خازن $C_۲$ برابر است با:

$$R_۲ = R_L + \frac{۱}{g_m} \simeq ۱۰۵۰\Omega$$

قطب هر خازن برابر است با:

$$\omega_{P_۱} = \frac{۱}{R_۱C_۱} \Rightarrow \omega_{P_۱} = \frac{۱}{۲۵\times۱۰^{۳}\times۱۰\times۱۰^{-۶}} = ۴\frac{rad}{s}$$

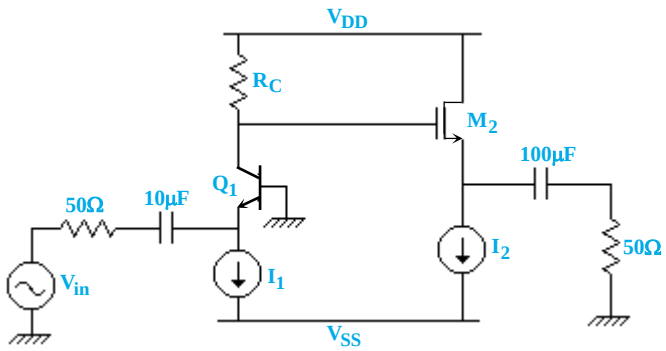
$$\omega_{P_۲} = \frac{۱}{R_۲C_۲} \Rightarrow \omega_{P_۲} = \frac{۱}{۱۰۵۰\times۱۰\times۱۰^{-۶}} = ۹۵/۲۳\frac{rad}{s}$$

بنابراین فرکانس قطع پایین برابر است با:

$$\omega_{P_L} = \sqrt{\omega_{P_۱}^۲ + \omega_{P_۲}^۲} \Rightarrow \omega_{P_L} = ۹۵/۳۱ \simeq ۱۰۰\frac{rad}{s}$$

لازم به ذکر است با توجه به غالب بودن قطب $P_۲$، نیازی به استفاده از نکته (۱) نیست.

مثال ۴: در مدار شکل زیر f_L چند هرتز است؟



$g_{m_۱} = ۲۰ms \;,\; g_{m_۲} = ۲ms \;,\; \beta = ۱۰۰$

۱) ۱۰۲Hz

۲) ۲۳۲Hz

۳) ۲۴۰Hz

۴) ۱۵۹Hz

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» مقاومت دیده شده از دو سر خازن $۱۰\mu F$ برابر است با:

$$R_۱ = ۵۰\Omega + r_{e_۱} = ۱۰۰\Omega \quad , \quad r_{e_۱} = \frac{۱}{g_{m_۱}} = ۵۰\Omega$$

مقاومت دیده شده از دو سر خازن $۱۰۰\mu F$ برابر است با:

$$R_۲ = ۵۰\Omega + r_{e_۲} = ۵۵۰\Omega \quad , \quad r_{e_۲} = \frac{۱}{g_{m_۲}} = \frac{۱}{۲}k\Omega$$

فرکانس قطع پایین از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$f_L = \frac{۱}{۲\pi}\sqrt{(\frac{۱}{R_۱C_۱})^۲ + (\frac{۱}{R_۲C_۲})^۲} = \frac{۱}{۲\pi}\sqrt{(\frac{۱}{۱۰۰\times۱۰\times۱۰^{-۶}})^۲ + (\frac{۱}{۵۵۰\times۱۰۰\times۱۰^{-۶}})^۲} \simeq ۱۵۹Hz$$

---

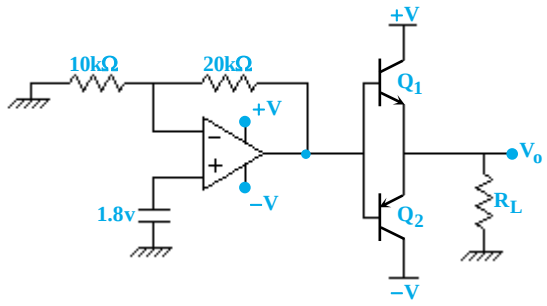
www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

فصل نهم
رگولاتورهای خطی ولتاژ

تست‌های تألیفی فصل نهم

مثال۱: در شکل زیر V_o (ولتاژ خروجی) در حالت تنظیم چند ولت است؟



$V_{BE_{1,2}} = 0/7v$

۱) ۶/۱v

۲) ۱/۸v

۳) ۵/۴v

۴) صفر

پاسخ: گزینه «۳» در این مدار چون مسیر فیدبک منفی برقرار است، ولتاژهای ورودی آپامپ برابر هستند و داریم:

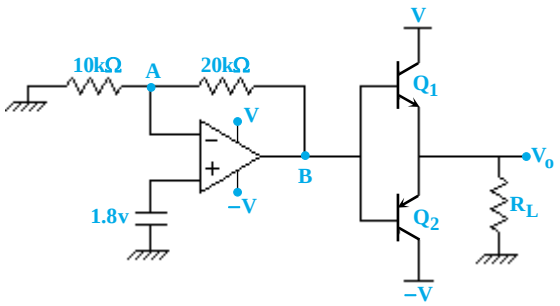
$V_A = 1/8v$

با تقسیم ولتاژ داریم:

$V_A = V_B \times \frac{10}{10+20}$

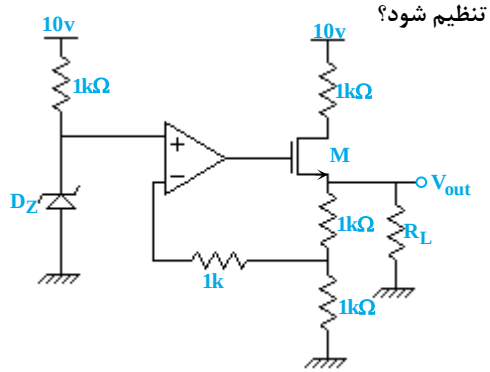
توجه کنید که ورودی‌های آپامپ جریان نمی‌کشد. ولتاژ نقطه B برابر است با:

$V_B = 1/8 \times \frac{30}{10} = 5/4v$



ترانزیستورهای Q_1 و Q_2 به صورت پوش پول قرار گرفته‌اند و تنها یکی از ترانزیستورها روشن است. با توجه به شکل و مثبت بودن ولتاژ نقطه B، ترانزیستور Q_1 روشن است. پس V_o برابر است با: $V_o = V_B - V_{BE(on)} = 5/4 - 0/7 = 4/7v$

مثال۲: در مدار شکل زیر حداقل مقاومت بار چقدر باشد تا ولتاژ دو سر آن در مقدار مشخصی تنظیم شود؟



$V_Z = 2/5v \qquad \mu_n C_{ox} \frac{\omega}{L} = 20 \frac{mA}{V^2}$

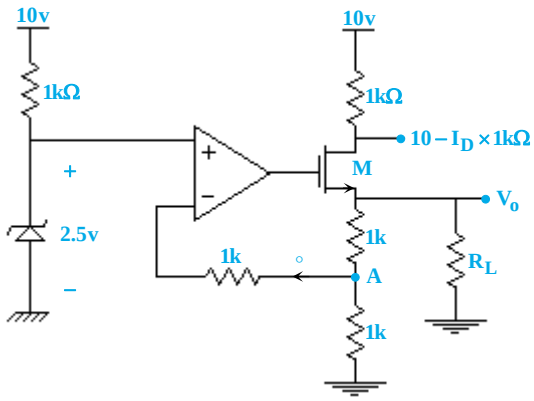
۱) صفر

۲) ۱/۵kΩ

۳) ۶/۲۵kΩ

۴) ۳/۱۲۵kΩ

پاسخ: گزینه «۴» ولتاژ دو سر دیود زنر برابر با ۲/۵v است. مسیر فیدبک منفی آپامپ برقرار است و ولتاژ سر منفی آپامپ نیز ۲/۵v می‌شود. از آنجا که ورودی‌های آپامپ جریان نمی‌کشند، ولتاژ نقطه A با V_o برابر می‌شود:



$V_A = V_o = 2/5v$

بنابراین ولتاژ خروجی به دست می‌آید:

$V_o = V_A \times \frac{1+1}{1} = 5v$

جریان درین ترانزیستور M به صورت زیر است:

$I_D = \frac{2/5}{1k} + \frac{V_o}{R_L}$

برای آنکه مدار به درستی عمل کند، باید شرط اشباع بودن ترانزیستور M برقرار باشد:

$V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

ولتاژ V_{GS} نیز برابر است با $V_{GS}=V_{th}+\sqrt{\frac{I_D}{k}}$. پس داریم:

$$V_D-V_S>V_{GS}-V_{th}\Rightarrow ۱۰-I_D-۵>\sqrt{\frac{I_D}{۱۰}}$$

با جایگذاری I_D داریم:

$$۵-۲/۵-\frac{۵}{R_L}>\sqrt{\frac{۲/۵}{۱۰}+\frac{۵}{۱۰R_L}}\Rightarrow ۲/۵-\frac{۵}{R_L}>۰/۵+\sqrt{\frac{۱}{۲R_L}}\Rightarrow \sqrt{\frac{۱}{۲R_L}}+\frac{۵}{R_L}-۲<۰$$

با در نظر گرفتن $x=\sqrt{\frac{۱}{۲R_L}}$ معادله درجه دو به این صورت می‌شود:

$$x+۱۰x^۲-۲<۰\Rightarrow x^۲+۰/۱x-۰/۲<۰$$

با حل این معادله به جواب‌های زیر می‌رسیم:

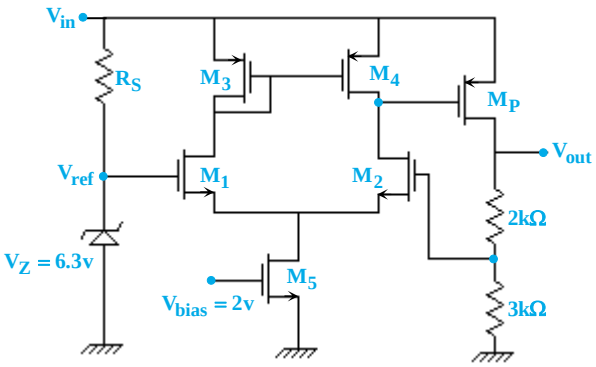
$$x_۱=۰/۴\qquad x_۲=-۰/۵$$

$x_۲$ قابل قبول نیست. پس داریم:

$$x_۱=\frac{۱}{\sqrt{۲R_{L_{min}}}}=۰/۴\Rightarrow\frac{۱}{۲R_{L_{min}}}=\frac{۱۶}{۱۰۰}\Rightarrow\boxed{R_{L_{min}}=۳/۱۲۵k\Omega}$$

مثال ۳: در تنظیم‌کننده شکل زیر، ولتاژ خروجی V_{out} چند ولت است؟ حداقل مقدار R_L برای آنکه مدار به درستی کار کند کدام گزینه است؟

$$k_{۵,p}=۲\frac{mA}{V^۲}\ ,\ k_{۱,۲,۳,۴}=۱\frac{mA}{V^۲}\ ,\ |V_T|=۱v\ ,\ V_{in}>۱۳v$$

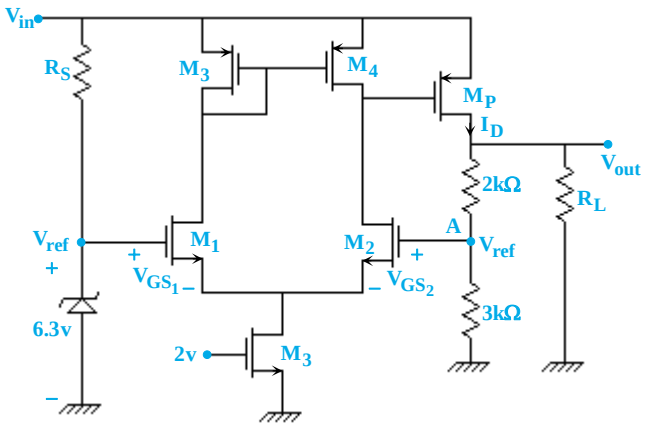


۱) $۲/۳۳k\Omega, ۱۰/۵v$

۲) $۰/۴۳k\Omega, ۱۰/۵v$

۳) $۲/۳۳k\Omega\ ,۶/۳v$

۴) $۴/۶k\Omega, ۱۰/۵v$



☑ **پاسخ:** گزینه «۱» ولتاژ دیود زنر، ولتاژ گیت ترانزیستور $M_۱$ است. از طرفی چون ترانزیستورهای $M_۱$ و $M_۲$ مشابه هستند و جریان هر دو با هم برابر است $V_{GS_۱}=V_{GS_۲}$ می‌شود. در نتیجه ولتاژ نقطه A با ولتاژ V_{ref} برابر می‌شود. ولتاژ خروجی برابر است با:

$$V_{out}=\frac{۲+۳}{۳}\times V_{ref}=\frac{۵}{۳}\times ۶/۳=۱۰/۵v$$

برای به دست آوردن محدوده R_L باید شرط اشباع ترانزیستور M_P را بنویسیم:

$$V_{SD_P}>|V_{GS_P}-V_{T_P}|\Rightarrow V_{SD_P}>V_{T_P}-V_{GS_P}\qquad (۱)$$

برای V_{GS} رابطه زیر را داریم:

$$-V_{GS_P}=|V_{T_P}|+\sqrt{\frac{I_D}{k_p}}=۱+\sqrt{\frac{I_D}{۲}}\qquad (۲)$$

برای I_D رابطه مقابل را داریم:

$$I_D=\frac{V_{ref}}{۳}+\frac{V_{out}}{R_L}=\frac{۶/۳}{۳}+\frac{۱۰/۵}{R_L}=۲/۱+\frac{۱۰/۵}{R_L}\qquad (۳)$$

رابطه (۳) را در رابطه (۲) جایگذاری می‌کنیم:

$$-V_{GS_P}=۱+\sqrt{۱/۰۵+\frac{۵/۲۵}{R_L}}$$

با جایگذاری V_{GS_P} در رابطه (۱) داریم:

$$V_{in}-V_{out}>-۱+۱+\sqrt{۱۰/۵+\frac{۵/۲۵}{R_L}}\Rightarrow V_{in}-۱۰/۵>۱+\sqrt{\frac{۵/۲۵}{R_L}}\Rightarrow\sqrt{\frac{۵/۲۵}{R_L}}<V_{in}-۱۱/۵$$

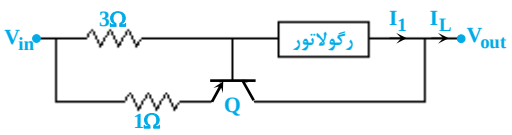
اگر مقدار V_{in} در حالت مینیمم را قرار دهیم، محدوده R_L به دست می‌آید:

$$\sqrt{\frac{۵/۲۵}{R_L}}<۱/۵\Rightarrow\sqrt{R_L}>\frac{\sqrt{۵/۲۵}}{۱/۵}\Rightarrow\boxed{R_L>۲/۳۳k\Omega}$$

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir

مثال ۴: در مدار شکل زیر رگولاتور ولتاژ سری دارای جریان $I_1 = 1mA$ است. ماکزیمم جریان I_L برابر با کدام گزینه است؟

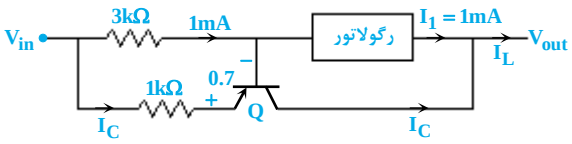


$\beta = 100$, $V_{EB(on)} = 0/7v$

۱) $1/15mA$ ۲) $1mA$

۳) $2/15mA$ ۴) $0/15mA$

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» در این مدار ترانزیستور Q برای افزایش جریان رگولاتور می‌باشد. یعنی اگر جریان خروجی بیشتر از I_1 نیاز داشتیم، Q روشن می‌شود. پس جریان ماکزیمم خروجی را با فرض روشن بودن ترانزیستور Q به دست می‌آوریم.



$$I_L = I_1 + I_C$$

I_C از رابطه مقابل به دست می‌آید:

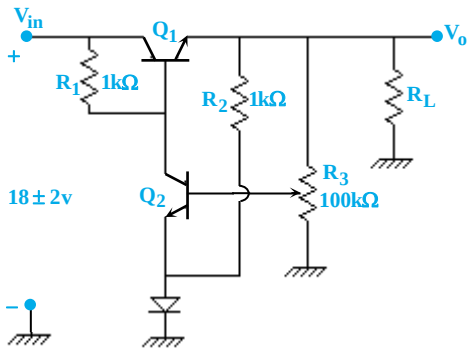
$$3k\Omega \times 1mA = 2I_C + 0/7 \Rightarrow I_C = \frac{2/3}{2} = 1/15mA$$

پس داریم:

$$I_L = 1 + 1/15 = 2/15\,mA$$

مثال ۵: در مدار تنظیم‌کننده ولتاژ شکل زیر، اگر مقاومت بار R_L مدار بـازگردد، حداکثر توان تلفاتی ترانزیستور Q_1 چند وات می‌شود؟ (بدون آنکه تنظیم از بین برود)

$V_D(on) = V_{BE}(on) = 0/7v$, $\beta = 50$, V_o (در حالت تنظیم) $= 24v$



۱) $0/05$ ۲) $0/14$

۳) $0/2$ ۴) 1

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» اگر مقاومت R_L مدار باز شود جریان I_{C_1} ترانزیستور Q_1 باید از R_2 عبور کند. مقاومت R_2 را (minimum load) می‌گویند. پس I_{C_1} برابر است با: (با توجه به آن که مقاومت R_3 بزرگ می‌باشد از جریان آن صرف‌نظر می‌کنیم)

$$I_{C_1} = I_{R_2} = \frac{V_o - V_D(on)}{R_2} = \frac{24 - 0/7}{1} = 23/3\,mA$$

توان تلفاتی ترانزیستور Q_1 از رابطه مقابل به دست می‌آید:

$$P_{C_1} = V_{CE_1} \times I_{C_1} = (V_i - V_o) \times I_{C_1}$$

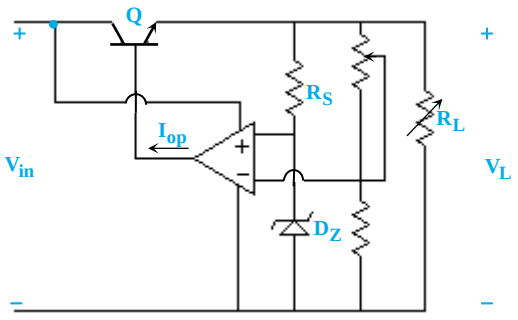
برای حداکثر توان تلفاتی در این شرایط باید $V_{i_{max}}$ را قرار دهیم. پس:

$$P_{C_1} = (30 - 24) \times 23/3\,mA = 139/3\,mw \simeq 0/14w$$

مثال ۶: رگولاتور شکل زیر برای ولتاژ خروجی $V_L = 6v$ طراحی شده است. جریان حداقل آپامپ در خروجی معادل $100\mu A$ است. حداکثر مقاومت بار چقدر می‌تواند باشد تا تنظیم به هم نخورد؟

$V_Z = 4/3v$, $I_{Z\,max} = 10mA$, $I_{Z\,min} = 1mA$

$R_S = 1k\Omega$, $\beta = 100$



۱) 360Ω

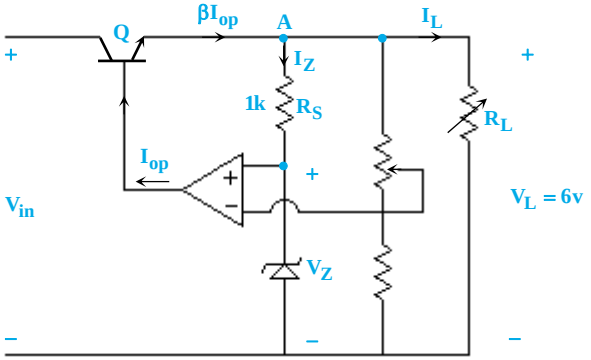
۲) 354Ω

۳) $1k\Omega$

۴) 722Ω

www.modaresanesharif.ac.ir

www.modaresanesharif.ac.ir



☑ **پاسخ:** گزینه «۴» ابتدا در نقطه A، KCL را می‌نویسیم:

$$\beta I_{op} = I_Z + I_L \qquad (۱)$$

جریان دیود زنر با مقاومت R_S در مقدار زیر تثبیت می‌شود:

$$I_Z = I_{R_S} = \frac{V_L - V_Z}{R_S} = \frac{۶ - ۴/۳}{۱k\Omega} = ۱/۷mA$$

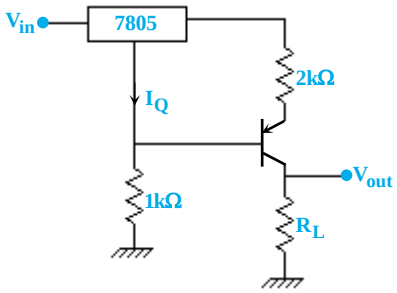
با قرار دادن I_Z در معادله (۱) داریم:

$$۱۰۰I_{op} = ۱/۷ + \frac{V_L}{R_L}$$

در این معادله، اگر مقاومت R_L حداکثر شود، جریان I_L حداقل می‌شود و در نتیجه I_{op} نیز حداقل می‌شود:

$$۱۰۰ \times \frac{۱۰۰}{۱۰۰۰} = ۱/۷ + \frac{۶}{R_{L_{max}}} \Rightarrow R_{L_{max}} = ۰/۷۲۲k\Omega = ۷۲۲\Omega$$

مثال ۷: در مدار شکل زیر ولتاژ رگولاتور و جریان بایاس داده شده است. مقدار جریان بار R_L کدام گزینه است؟



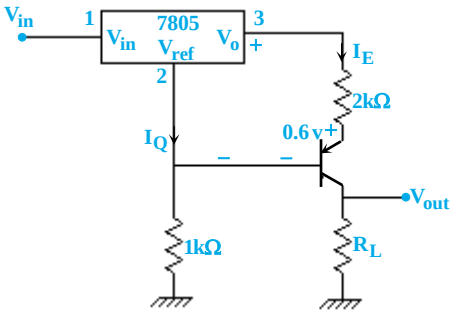
$V_{in} > ۵v$ $\quad I_Q = ۲mA$ $\quad V_{EB(on)} = ۰/۶v$ $\quad \beta >> ۱$

۱) ۲/۲mA

۲) ۱/۲mA

۳) صفر

۴) ۴/۴mA



☑ **پاسخ:** گزینه «۱» رگولاتور ۷۸۰۵ از رگولاتورهای سری ۷۸xx است که به اندازه xx ولتاژ بین پایه خروجی و سر وسط تولید می‌کند. پس مطابق شکل، ولتاژ بین پایه‌های ۲ و ۳ برابر ۵v است. جریان I_E برابر است با:

$$I_E = \frac{۵ - ۰/۶}{۲} = ۲/۲mA$$

چون $\beta >> ۱$ است، جریان بار با جریان I_E برابر است:

$$I_{R_L} = ۲/۲mA$$

---

www.modaresanesharif.ac.ir