



# گروه مهندسی ساخت و اجرا

مرجع تخصصی نقشه، مدل، مقاله و کتاب  
و انواع پروژه‌های مهندسی

[www.Sakhtoejra.com](http://www.Sakhtoejra.com)

 @sakhtoejra

# فصل اول

## معرفی، تحلیل DC و تحلیل سیگنال کوچک

### ترانزیستورهای FET

مقدمه :

بعلت کم بودن مقاومت ورودی در ترانزیستورهای **BJT** و زیاد بودن جریان ورودی آنها ، استفاده از این نوع تقویت کننده های در طبقه ی اول تقویت کننده های چند طبقه ای که دارای منبع سیگنال با مقاومت داخلی زیادی هستند مناسب نمی باشد . به همین دلیل از ترانزیستور های اثر میدان (**FET**) که دارای امپدانس ورودی خیلی زیادی هستند (جریان ورودی کم ) در طبقه اول تقویت کننده های چند طبقه استفاده می کنیم . این نوع ترانزیستور بر خلاف ترانزیستور **BJT** که کنترل شده با جریان است ، یک ترانزیستور کنترل شده با ولتاژ است . به این ترانزیستورها ، ترانزیستور تک قطبی نیز گفته می شود.

### آشنایی با **FET**: **Field Effect Transistor**



یک عنصر سه سر

انواع **FET**:

(۱) فت پیوندی (**JFET** یا **Junction FET**)

(۲) **MOSFET** (**Metal Oxide Semiconductor FET**)

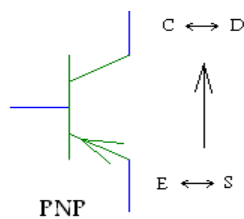
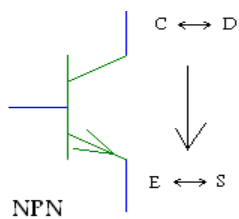
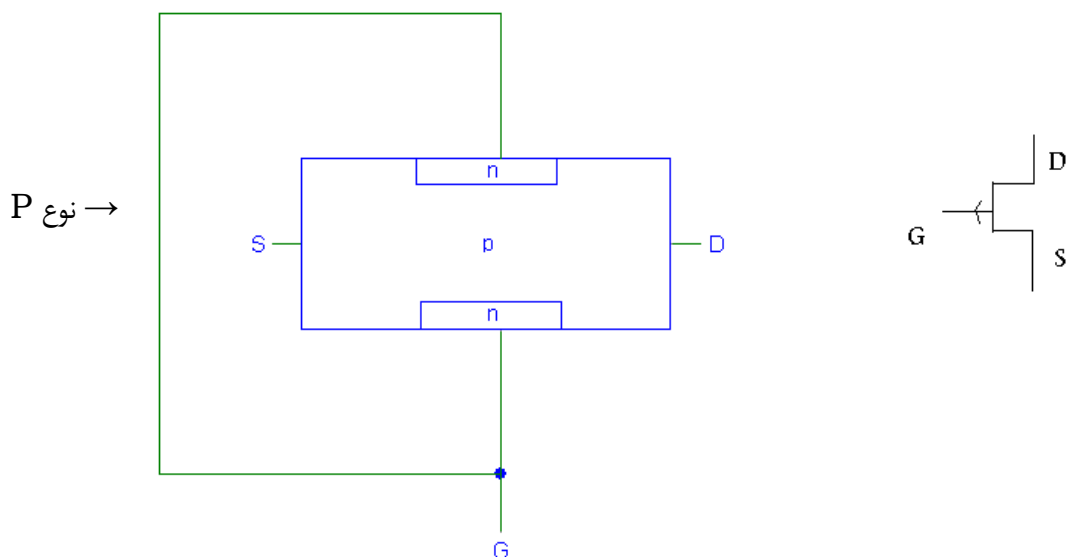
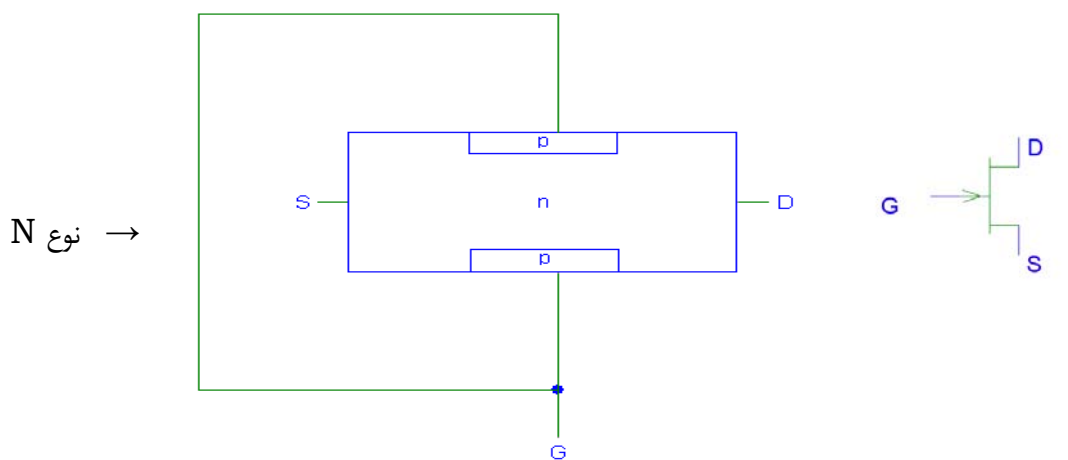
مقایسه کلی **FET** و **BJT**:

- (۱) مقاومت فت در حالت کلی بسیار بیشتر از **BJT** است.
- (۲) در فت تنها حاملهای اکثریت دخالت دارند و در نتیجه مصنویت در مقابل نویز و تداخل های ناخواسته بسیار بهتر است.
- (۳) ساختن فت به مراتب ساده تر از **BJT** بوده و روی **IC** جای کمتری اشغال می کند.
- (۴) پایداری حرارتی فت در حالت کلی بهتر از **BJT** است.
- (۵) سرعت کار فت در حالت کلی کمتر از **BJT** است.
- (۶) حاصلضرب بهره در پهنای باند فت در حالت کلی کمتر از **BJT** است.

## : JFET

این ترانزیستور از سه پایه به نامهای، درین یا **(Drain) D**، سورس یا **(Source) S** و گیت یا **(Gate) G** تشکیل شده است که در این ترانزیستور الکترونها از طریق کانال به طرف درین حرکت می کنند پس جریان از درین وارد شده و از سورس خارج می شود و جریان گیت تقریباً صفر است.

**JFET** هاشامل دو نوع N و P می باشد:



\* نکته:

nJFET یک قطعه نیمه هادی نوع n که دو طرف آن با دو نیمه هادی نوع مختلف رشد داده شده است. هرچه گیت را منفی تر کنیم عرض ناحیه تخلیه بیشتر و مقاومت کانال بیشتر و جریان کمتر خواهد شد.

\* نکته:

چون پیوند pn همیشه معکوس بسته می شود جریان گیت همیشه جریان اشباع معکوس می باشد و FET را طوری می سازند که:

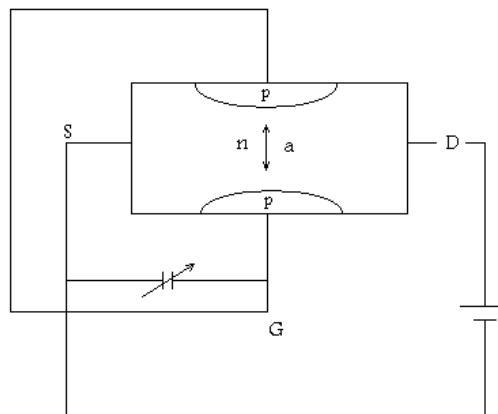
$$i_G = 0$$

\* نکته:

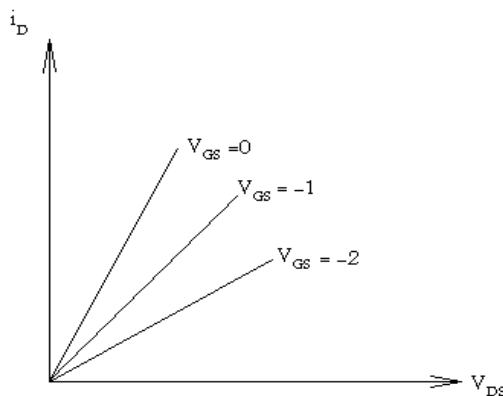
در nJFET Source الکترونهای آزاد n را تحریک کرده و جریان از Drain ، Source جاری است، درحالیکه در PJFET Source حفره هایی را در p منتشر میکند در نتیجه جهت جریان از Source به Drain است.

### بررسی n-JFET

حالت اول:  $V_{DS}$  بسیار کوچک.



ولتاژ بسیار کوچک



الف)  $V_{GS} = 0$

$$|i_D| = \frac{aw N_D q \mu_N}{L} V_{DS} = \alpha V_{DS}$$

a: فاصله انتهای p ها با هم

w: عرض ناحیه

$N_D$ : ناخالصی نوع n

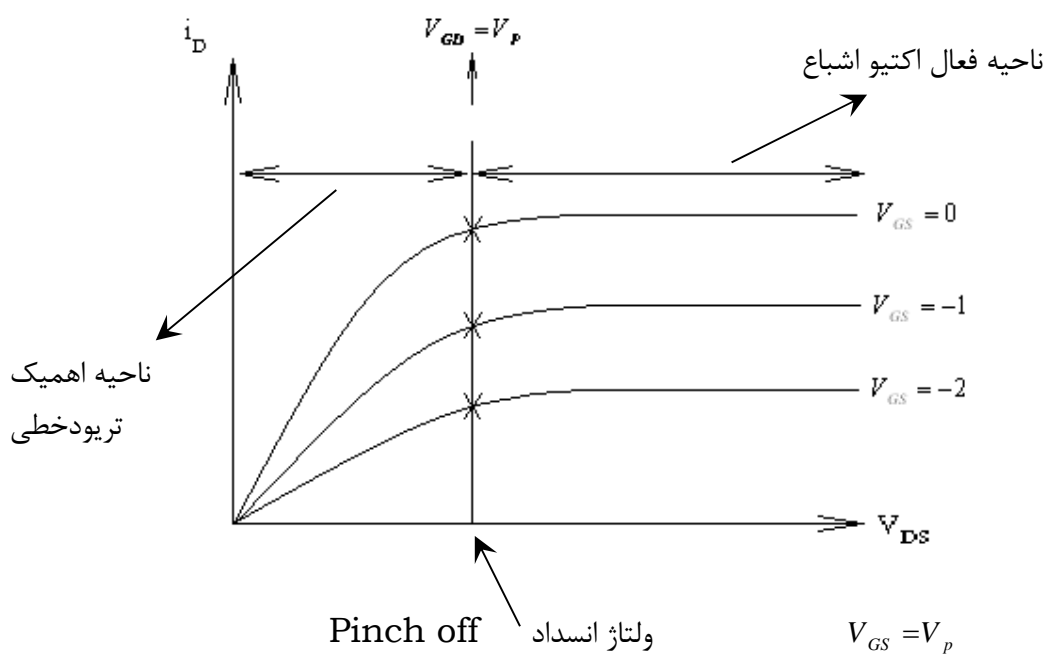
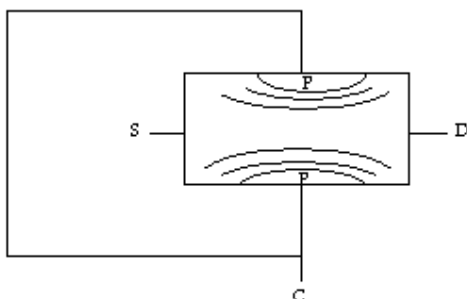
q: بار روی ناحیه

$$(\alpha' = \alpha)$$

ب:  $V_{GS} = -k$  (یک مقدار منفی)

$$i_D = \alpha' V_{DS}$$

حالت دوم:  $V_{DS}$  بسیار بزرگ



### ولتاژ $(V_p)$ Pinch off

اگر ولتاژ  $V_{GS}$  را آنقدر منفی نمائیم که در ناحیه تهی بهم رسیده و عرض کانال صفر شود در نتیجه جریان دیود صفر می گردد، به ولتاژی که چنین اتفاقی در آن می افتد  $V_p$  (ولتاژ pinch off) که این مقدار برای یک JFET نوع n یک عدد منفی می باشد.

### نواحی کاری Nj



## FET

(۱) ناحیه Active:

$$\begin{cases} V_{GS} > V_p \\ V_{GD} < V_p \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{قطع نیست} \\ \text{اکتیو است} \end{array} \quad i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2$$

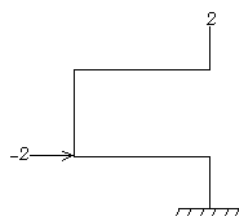
(۲) ناحیه تریود:

$$\begin{cases} V_{GS} > V_p \\ V_{GD} > V_p \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{قطع نیست} \\ \text{تریود است} \end{array} \quad i_D = I_{DSS} \left[ 2 \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right) \times \frac{V_{DS}}{-V_p} - \left( \frac{V_{DS}}{V_p} \right)^2 \right]$$

$$i_D = 0 \quad \text{(۳) ناحیه قطع: } V_{GS} < V_p$$

مثال: برای شکل های زیر  $V_p = -3^v$  می باشد، نواحی کاری ترانزیستورها را تعیین کنید.

(الف)



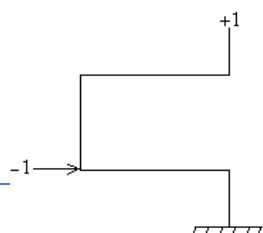
$$V_{GS} = -2 > V_p$$

قطع نیست

$$V_{GD} = -2 - 2 = -4 < V_p$$

اکتیو

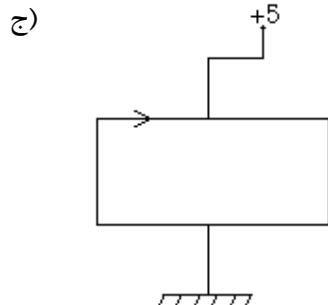
(ب)



$$V_{GS} = -1V_p$$

$$V_{GD} = -1-1V_p$$

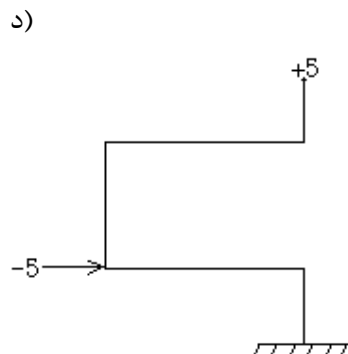
تریود



$$V_{GS} = 0V_p$$

$$V_{GD} = -5V_p$$

اکتیو



$$V_{GS} = -5V_p$$

قطع

## بررسی p-JFET

تفاوت p-JFET با n-JFET در دو نکته می باشد:

اولاً: جهت جریان Drain ( $I_D$ ) از Source به Drain است.

دوماً: اگر تمامی ولتاژها در یک منفی ضرب شوند تمامی بحث های قبلی در مورد n-JFET

برای p-JFET هم به قوت خود باقی است، از جمله خود  $V_p$  که یک عدد مثبت است.

## نواحی کاری FET

(۱) ناحیه Active:

$$\begin{cases} V_{GS} < V_p & \text{قطع نیست} \\ V_{GD} > V_p & \text{اکتیو است} \end{cases}$$

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

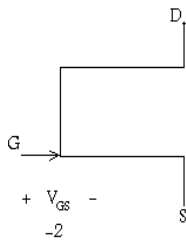


(۲) ناحیه تریود:

$$\begin{cases} V_{GS} < V_p & \text{قطع نیست} \\ V_{GD} < V_p & \text{تریود است} \end{cases} \quad i_D = I_{DSS} \left[ 2 \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right) \times \frac{V_{DS}}{-V_p} - \left( \frac{V_{DS}}{V_p} \right)^2 \right]$$

(۳) ناحیه قطع:  $V_{GS} > V_p$   $i_D = 0$

مثال: برای یک JFET موارد زیر را داریم:  $V_p = -4^{(V)}$   $I_{DSS} = 10mA$   
 الف) اگر  $V_{GS} = -2$  باشد، حداقل مقدار  $V_{DS}$  را که به ازای FET در ناحیه اکتیو قرار دارد را بدست آورید.  
 ب) مقدار  $i_D$  را به ازای  $V_{GS} = -2$  و  $V_{DS} = 3$  را بدست آورید.



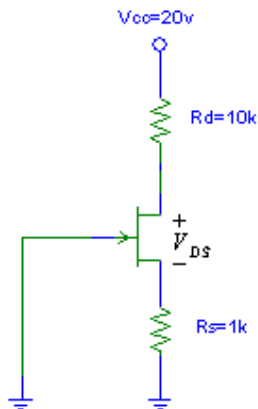
الف) شرایط اکتیو  $\begin{cases} V_{GS} > V_p \Rightarrow -2 > -4 \\ V_{GD} < V_p \end{cases}$

حداقل  $V_{DS} = ?$

$$kvl: V_{GD} + V_{SD} < V_p \implies -2 - V_{DS} < -4 \Rightarrow -V_{DS} < -2 \Rightarrow V_{DS} > 2$$

ب)  $V_{GS} = -2$  و  $V_{DS} = 3$   $V_{GS} > V_p$   $V_{GD} < V_p$  ناحیه اکتیو

$$i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2 = 10^{mA} \times \left( 1 - \frac{-2}{-4} \right)^2 = 2.5^{mA}$$



مثال ۲: در صورتیکه  $I_{DSS} = 4mA$  و  $V_p = -2$  باشد، ناحیه کاری را بدست آورید.

$$\text{فرض اکتیو} \quad i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$$\text{ورودی} \quad \text{KVL: } V_{GS} + R_S i_D = 0 \Rightarrow V_{GS} = -R_S i_D = -i_D$$

$$\xrightarrow{1,2} \quad i_D = 4 \left( 1 - \frac{-i_D}{-2} \right)^2, \quad i_D = 4 \left( 1 - \frac{i_D}{2} \right)^2 = i_D^2 + 4 - 4i_D$$

$$\Rightarrow i_D^2 - 5i_D + 4 = 0 \Rightarrow (i_D - 1)(i_D - 4) = 0 \rightarrow \begin{cases} i_D = 1 \\ i_D = 4 \end{cases}$$

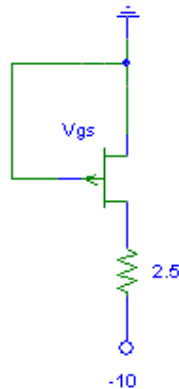
$$\begin{cases} V_{GS} = -i_D = -1 \text{ V}_P \\ V_{GS} = -i_D = -4 \end{cases}$$

$$\rightarrow i_D = 1 \text{ فرض اکتیو}$$

$$\text{خروجی} \quad \text{KVL: } 20 = R_D i_D + V_{DS} + R_S I_D \rightarrow V_{DS} = 20 - 11i_D = 9 \text{ V}$$

$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DS} = -1 - 9 = -10 \text{ V}_P \quad \text{شرط درست}$$

مثال ۳: در صورتیکه  $V_P = 2$  و  $I_{DSS} = 4 \text{ mA}$  باشد، ناحیه کاری و جریان را بدست آورید.



$$V_{GS} = 0$$

$$\text{فرض اکتیو:} \quad i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 = I_{DSS} = 4 \text{ mA}$$

$$V_{GD} = V_{GS} + V_{SD} = V_{SD}$$

$$-(-10) - 2.5i_D + V_{DS} = 0$$

$$V_{DS} = +10 - 2.5i_D = 0 \Rightarrow V_{GD} = V_{DS} = 0 \quad \text{اما } V_{GD} \text{ صفر نیست.}$$

فرض غلط

$$\text{تریود} \quad i_D = I_{DSS} \left[ 2 \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right) \times \frac{V_{DS}}{-V_P} - \left( \frac{V_{DS}}{V_P} \right)^2 \right] = 4 \left[ -V_{DS} - \left( \frac{V_{DS}}{2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\text{خروجی } kvl : V_{DS} = -10 + 2.5i_D \quad (2)$$

$$\begin{cases} i_D = 3.49^{mA} \\ i_D = 2.75^{mA} \end{cases}$$

$$i_D = 3.49^{mA} \rightarrow V_{GS} = 0V_P$$

$$V_{GD} = V_{SD} = -V_{DS} \rightarrow -2.5 \times i_D + 10 = 1.275$$

$$i_D = 2.75^{mA}$$

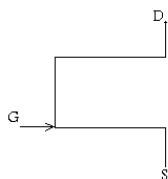
### موارد استفاده از FET

(۱) استفاده به عنوان منبع جریان ثابت

(۲) استفاده به عنوان سوئیچ Switch

(۳) استفاده به عنوان تقویت کننده

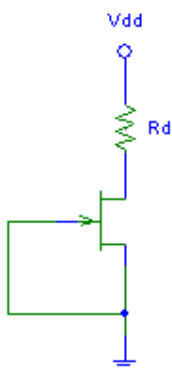
مثال:  $i_D = ?$  ،  $I_{DSS} = 8^{mA}$  منبع جریان



$$i_D = I_{DSS} = 8^{mA}$$

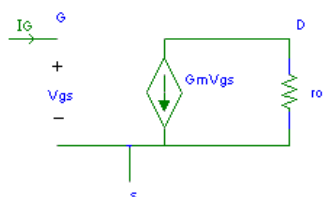
سوئیچ  $\rightarrow V_{GS} > V_P$  On

سوئیچ  $\rightarrow V_{GS} < V_P$  Off

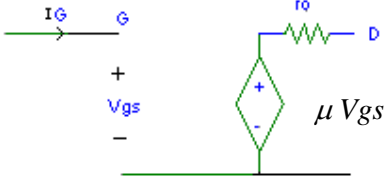


### مدل سیگنال کوچک n-JFET

(الف)



$$r_0 = r_d \parallel \frac{1}{g_d} = \frac{V_A}{I_D}$$



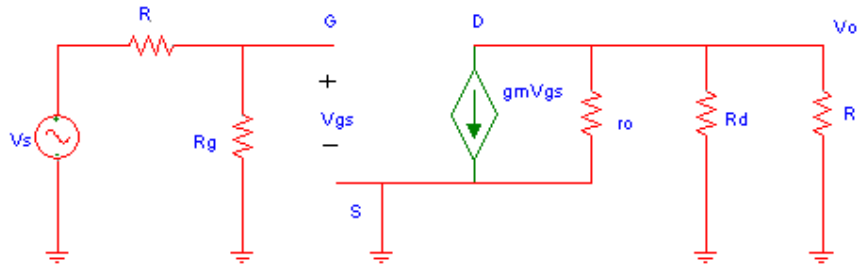
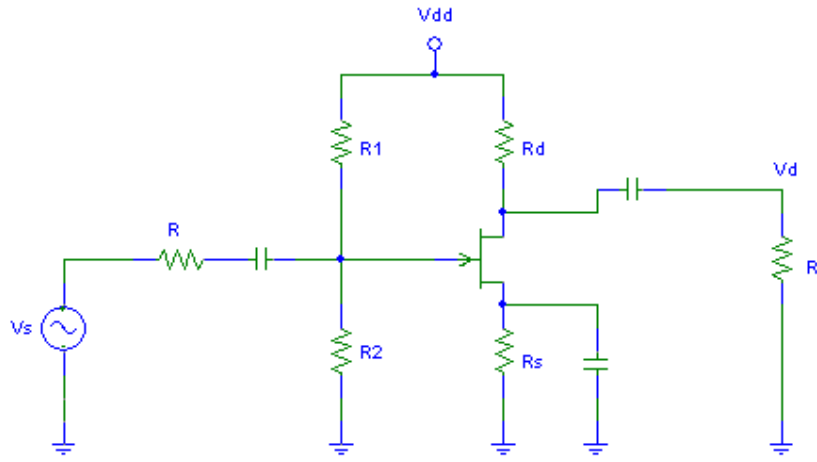
(ب)

$$\mu = g_m r_0 = g_m r_d$$

$$g_m = \frac{2\sqrt{I_{DSS} I_D}}{|V_P|}$$

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

Source مثال: سورس مشترک



$$A_v = \frac{V_0}{V_i}$$

$$V_0 = -g_m V_{GS} (r_0 \parallel R_D \parallel R_L)$$

$$V_{GS} = V_s \times \frac{R_G}{R_G + R}$$

$$A_v = \frac{V_0}{V_i} = -g_m \frac{R_G}{R_G + R} (r_0 \parallel R_D \parallel R_L)$$

$$\text{If } R \parallel R_G \rightarrow A_v = -g_m (R_D \parallel r_0 \parallel R_L)$$

گین یک سورس مشترک برابر است با: (مقاومتهای سورس / مقاومتهای درین)  $\frac{-g_m}{1+g_m}$

$$R_i = R_G = R_1 \parallel R_2$$

$$R_0 = R_D \parallel r_0$$

اگر در مثال قبل و  $R_1 = 100k$  و  $R_2 = 600k$  و  $V_{DD} = 20V$  و  $R_S = R_L = R_D = 2.7k$  و  $V_P = -4V$  و  $I_{DSS} = 12mA$  و  $r_0 = 25(12mA)$

$$r_0 = \frac{V_A}{I_D} \rightarrow 25 = \frac{V_A}{12} \rightarrow V_A = 300V$$

$$\text{فرض فعال} \quad I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \quad (1) \quad \text{تحلیل DC}$$

$$\begin{cases} V_G = V_{DD} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 6V \\ V_S = R_S I_D \end{cases} \rightarrow V_{GS} = V_G - V_S = 6 - 2.7 I_D \quad (2)$$

$$\text{فرض درست} \quad \begin{cases} I_D = 2.96mA \\ I_D = 4.63mA \end{cases} \begin{cases} V_{GS} = -2V_P \\ V_{GD} = -6V_P \end{cases}$$

$$g_m = \frac{\sqrt{2I_{DSS}}}{|V_P|} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right) = 3 \frac{mA}{V}$$

$$A_V = \frac{-g_m (r_0 \parallel R_D \parallel R_L)}{1 + g_m (0)} = -3(100 \parallel 2.7 \parallel 2.7) = -3.99 \parallel 4$$

$$r_0 = \frac{V_A}{I_D} \rightarrow r_0 = \frac{300}{2.9} \parallel 100k$$

$$A_{VS} = \frac{-g_m R_G}{R_G + R_{in}} (100 \parallel 2.7 \parallel 2.7) = 3.23$$

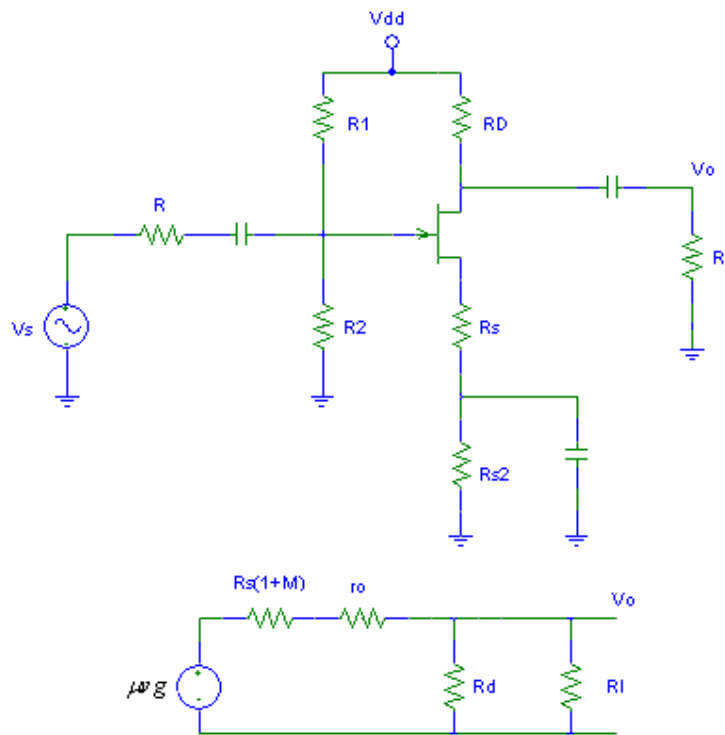
### قضیه انعکاس در FET

نکته ۱: از دید Drain مقاومت‌های Source در  $1 + \mu$  ضرب می‌شوند و منبع گیت در  $\mu$  ضرب می‌شود.

نکته ۲: از دید Source مقاومت‌های Drain بر  $1 + \mu$  تقسیم می‌شوند و منبع گیت در  $\frac{\mu}{1 + \mu}$  ضرب می‌شود.

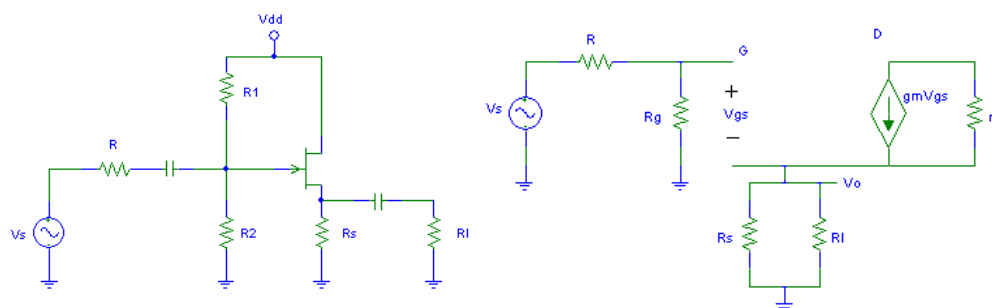
نکته ۳: مقاومت  $r_0$  در FET از مقاومت‌های Drain می‌باشد.

### سورس مشترک

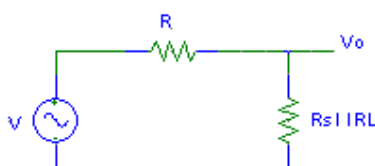


$$\begin{cases} v_0 = \frac{-\mu V_g (R_D \parallel R_L)}{(R_D \parallel R_L) + V_0 + (1 + \mu) R_{S1}} \Rightarrow A_V = 1.7 \\ V_g = V_s \times \frac{R_G}{R_G + R} \\ A_V = -g_m \times \frac{R_G}{R_G + R} (R_D \parallel R_L \parallel r_0) \end{cases}$$

### Drain مشترک



### مدار معادل از دید سورس



اگر در Drain باز هم مقاومت داشته باشیم با  $R_D$  موازی و سپس تقسیم بر  $1 + \mu$  می کردیم و پائین می آوردیم.

$$(1) V_0 = \frac{\mu}{1 + \mu} V_g \times \frac{(R_S \parallel R_L)}{(R_S \parallel R_L) + \frac{r_0}{1 + \mu}}$$

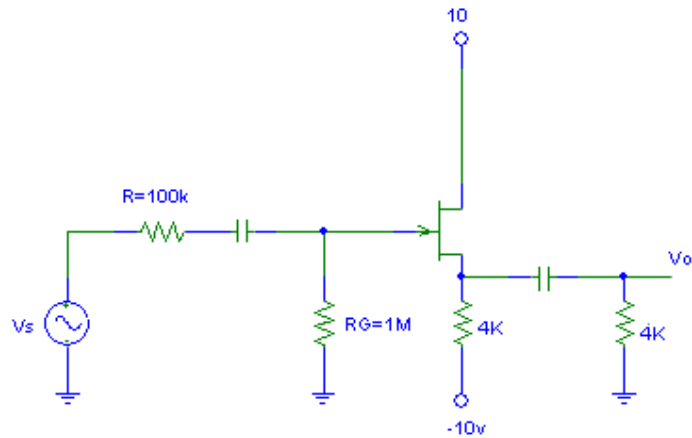
$$(2) \mu = g_m r_0$$

$$\rightarrow A_v = \frac{R_G}{R_G + R} \times \frac{g_m (R_S \parallel R_L)}{1 + g_m (R_S \parallel R_L) + \left( \frac{R_S \parallel R_L}{r_0} \right)}$$

$$V_g = V_s \times \frac{R_G}{R_G + R} \quad (3)$$

$$\text{If } R \parallel R_G \ll (R_S \parallel R_L) \ll r_0 \Rightarrow A_v = \frac{g_m (R_S \parallel R_L)}{1 + g_m (R_S + R_L)}$$

مثال: در مورد شکل زیر  $V_p = -4$  و  $I_{DSS} = 12^{mA}$  ، گین مدار ، مقاومت ورودی و مقاومت خروجی را بدست آورید.



تحلیل DC

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

$$\begin{cases} V_G = 0 \\ V_S = 4I_D - 10 \end{cases} \rightarrow V_{GS} = 10 - 4I_D \quad (2)$$

$$I_D = 3mA, \quad V_{GS} = -2V_P, \quad V_{GD} = -10V_P$$

فرض اکتیو است

$$g_m = \frac{2\sqrt{I_D I_{DSS}}}{|V_P|} = 3 \frac{mA}{V}$$

$$A_v = \frac{+g_m (4 \parallel 4)}{1 + g_m (4 \parallel 4)} \approx 0.7$$

مقاومت Drain از دید سورس

$$R_i = R_G = 1M \quad R_0 = 4 \parallel \frac{r_0}{1 + \mu}$$

$$\frac{r_0}{1 + \mu} \parallel \frac{r_0}{\mu} = \frac{r_0}{g_m r_0} = \frac{1}{g_m} \rightarrow \mu = g_m r_0$$

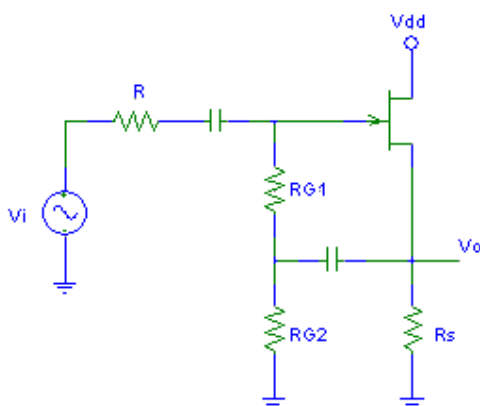
قضیه بوت استرپ و میلر

در یک مدار بافر ایده آل می بایست شرایط زیر حاکم باشد:

$$\begin{cases} A_v = 1 \\ R_i = \infty \\ R_0 = 0 \end{cases}$$

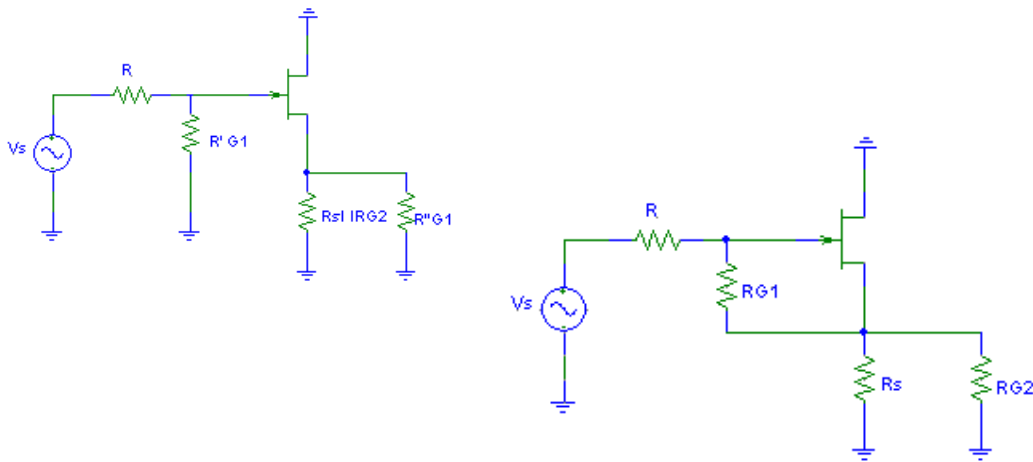
استفاده از تکنیک بوت استرپ برای افزایش

$R_i$





$$\begin{cases} z_1 = \frac{z}{1-A_v} \\ z_2 = \frac{zA_v}{A_v-1} \end{cases}$$

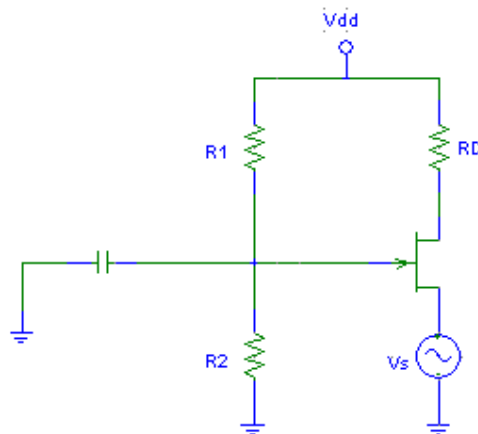


$$A_v = \frac{+g_m}{1+g_m} = \frac{+g_m (R_s \parallel R_{G_1}'' \parallel R_{G_2})}{1+g_m (R_s \parallel R_{G_1}'' \parallel R_{G_2})}$$

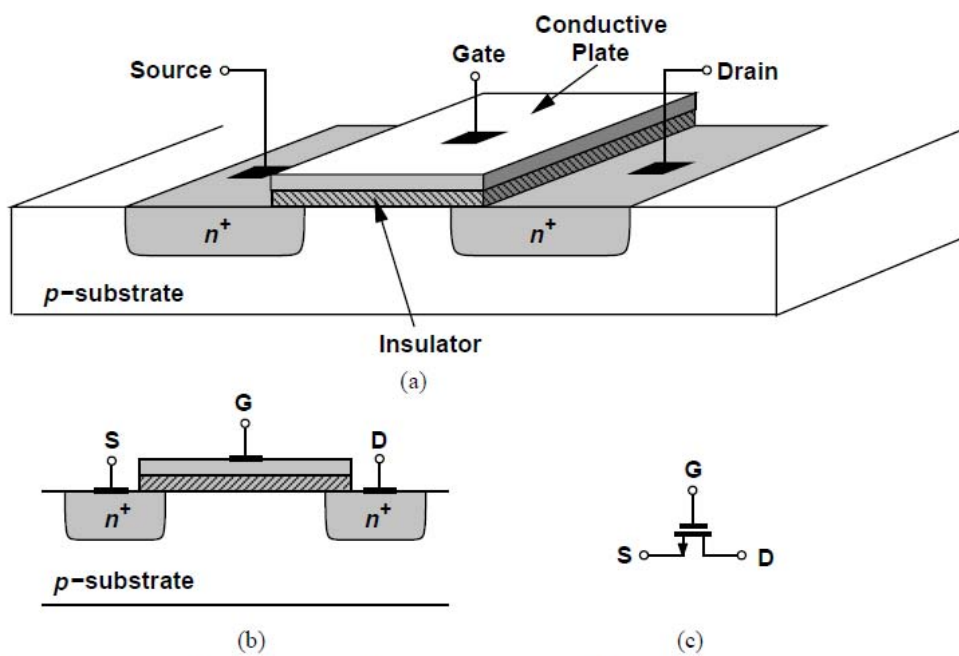
درین مشترک  $|A_v| \approx 1$   $R_1 = \frac{R_{G_1}}{1-A_v}$   $R_2 = R_{G_1} \times \frac{A_v}{A_v-1}$

سورس مشترک  $A_v$  بزرگ  $\frac{R_0 A_v}{A_v-1} = R$

مدار گیت مشترک



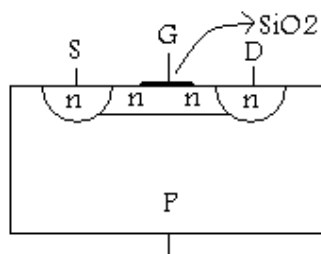
$$A_v = +g_m R_D$$



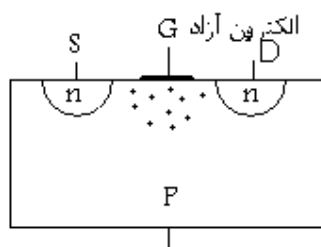
2 (a) Structure of MOSFET, (b) side view, (c) circuit symbol.

## انواع MOSFET

الف) MOSFET نوع تهی (Depletion MOS)



ب) MOSFET نوع افزایشی (ارتقای) (Enhancement MOS)

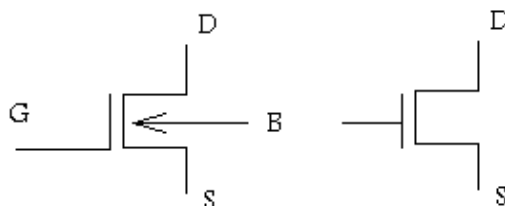


در حالت عادی که ولتاژ گیت سورس مقدار منفی یا صفر دارد هیچ کانال عبور الکترونی وجود ندارد. اما اگر ولتاژ گیت-سورس مثبت شود، الکترونهاى دو ناحیه n زیر گیت جمع می شوند و یک ناحیه تهی مجازى ایجاد می نماید، در اینصورت با اعمال ولتاژ درین - سورس الکترونها از سورس به Drain و جریان از Drain به Source جریان میابد.

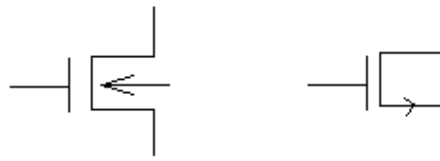
ولتاژ آستانه  $V_t$  threshold voltage  $V_{GS} > V_t$

در نوع تهی از قبل یک کاشت کانال انجام شده است.

نمادهایی که برای نوع تهی (n) بکار میرود:



نمادهایی که برای نوع افزایشی استفاده می شود:



نحوه تحلیل معادلات با MOSFET نوع تهی  
 مشابه JFET بوده و همان روابط در اینجا صادق است ولی برای MOSFET نوع افزایشی با  
 روابط زیر صادق است:  
 MOSFET افزایشی  $V_t$  نوع N  
 الف) ناحیه تریود:

$$\begin{cases} V_{GS} > V_t \\ V_{GD} > V_t \end{cases}$$

ب) ناحیه فعال (اشباع)

$$\begin{cases} V_{GS} > V_t \\ V_{GD} < V_t \end{cases}$$

ج) ناحیه قطع

$$\begin{cases} V_{GS} < V_t \end{cases}$$

تریود  $i_D = k \left[ 2(V_{GS} - V_t)V_{DS} - V_{DS}^2 \right]$

اشباع  $i_D = k (V_{GS} - V_t)^2$

قطع  $i_D = 0$

$$K = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) \left[ \frac{A}{V^2} \right]$$

$L$ : طول  $W$ : ضخامت  $\mu_n$ : ضریب تحریر  $CO_x$ : ظرفیت ناحیه اکسید

که در آن :

$\mu_n$ : قابلیت تحریر الکترونها در کانال القایی بوجود آمده

$CO_x$ : خازن بر واحد سطح گیت-به-کانال (لایه اکسید به عنوان دی الکتریک)

$\left( \frac{W}{L} \right)$ : ابعاد

و معمولاً داریم:  $\mu_n = \frac{1}{2} \mu_p$

برای MOSFET نوع p،  $V_t$  یک عدد منفی می باشد و زمانی در ناحیه قطع است که:

$$V_{GS} > V_t$$

تمام روابط گفته شده در MOSFET نوع n برعکس خواهد شد.

مثالها...

مثال ۱: اگر برای یک ترانزیستور NMOS نواحی زیر را داشته باشیم

$$V_t = 2^v, \quad V_{GS} = V_{DS} = 3, \quad i_D = 1^{mA}$$

الف) مقدار جریان Drain به ازای  $V_{GS} = 4$  و  $V_{DS} = 5$  را بدست آورید.

$$R_{DS} = \frac{V_{DS}}{I_D}$$

در این مسئله مقدار  $\beta$  را نداریم که با استفاده از داده های مسئله بدست می آوریم.

$$\begin{cases} V_{GS} > V_t \\ V_{GD} < V_t \end{cases}$$

فرض اشباع

$$kvl: V_{GD} = V_{GS} + V_{SD} = V_{GS} - V_{DS} = 3 - 3 = 0 < 2 \quad \text{فرض اشباع درست است}$$

$$i_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_t)^2 \Rightarrow 1^m = \frac{\beta}{2} (3 - 2)^2 \Rightarrow \beta = 2 \frac{mA}{V^2}$$

$$\text{الف)} \quad \begin{cases} V_{GS} = 4 > V_t \\ V_{GD} = 4 - 5 = -1 < 2 \end{cases}$$

فرض

اشباع درست است

$$\rightarrow i_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_t)^2 \quad i_D = \frac{2}{2} (4 - 2)^2 = 4^{mA}$$

ب) مقدار مقاومت درین سورس را برای ولتاژ درین سورس های کوچک و  $V_{GS} = 4$  بدست آورید.

$$\text{ب)} \quad \begin{cases} V_{DS} \\ V_{GS} > V_t \end{cases} \quad \text{کوچک}$$

طبق منحنی  $V_{DS} - i_D$  در صفحه ۲ ناحیه تریود است. پس قطع نیست

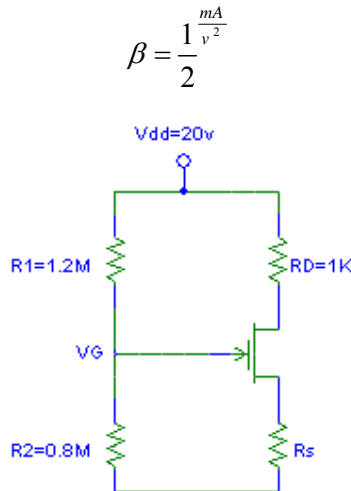
$$i_D = \beta \left[ (V_{GS} - V_t) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$$i_D \approx \beta \left[ (V_{GS} - V_t) V_{DS} \right] \rightarrow \frac{V_{DS}}{i_D} = \frac{1}{\beta(V_{GS} - V_t)} = \frac{1}{4} k \Omega = 250 \Omega$$

مثال ۲: در مدار زیر  $V_t$  را اگر از  $2V$  به  $3V$  تغییر دهیم آنگاه برای دو حالت زیر تغییرات جریان را محاسبه نمایید.

الف)  $R_s = 0$

ب)  $R_s = 4k$



الف)  $R_s = 0$

$$\begin{cases} V_G = 20 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 8V \\ V_{GS} = V_G - V_S = 8 - 0 = 8V \end{cases}$$

$$i_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_t)^2 \begin{cases} i_{D1} = 9^{mA} (V_t = 2V) \\ i_{D2} = 6.25^{mA} (V_t = 3V) \end{cases} \Delta i_D = 2.75^{mA}$$

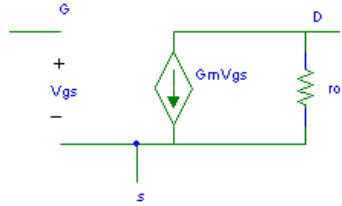
ب)  $R_s = 4k$

$$\begin{cases} V_G = 8V \\ V_{GS} = 8 - R_s I_D = 8 - 4I_D \end{cases} \quad (1)$$

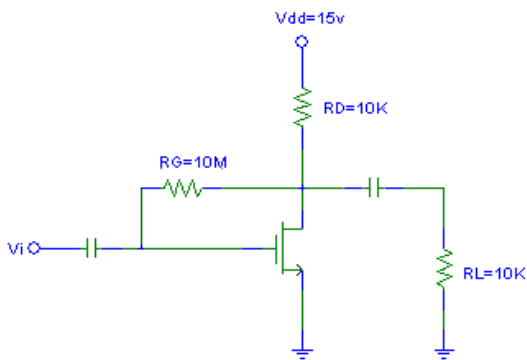
$$i_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_t)^2 \quad (2)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} I_{D_1} = 1^{mA} \\ I_{D_2} = 0.8^{mA} \end{cases} \rightarrow \Delta I_D = 0.2^{mA}$$

مدل سیگنال کوچک **MOSFET** نوع افزایشی

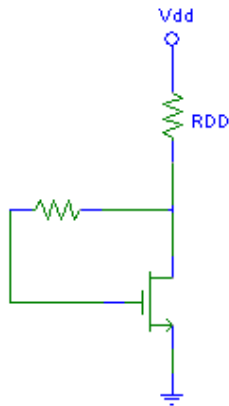


$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{GSQ}} = \beta (V_{GS} - V_t)$$

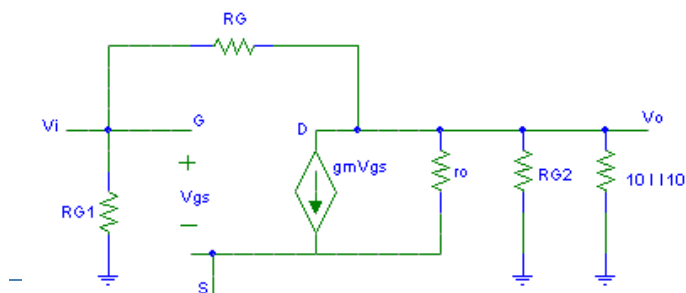


$$\begin{cases} V_t = 1.5^v \\ \beta = 1 / 4 \frac{mA}{v^2} \\ V_A = 50 \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_s = 0 \\ I_G = 0 \rightarrow V_{GD} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{GS} = V_{DS} = 15 - 10I_D \\ I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_t)^2 \\ I_D = \frac{1}{8} (V_{GS} - 1.5_t)^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_D = 1.06^{mA} \\ V_{GS} = 4.4V_t \end{cases}$$



$$g_m = \beta (V_{GS} - V_t) = 0.75 \frac{mA}{v}$$



$$R_{G_1} = \frac{R_G}{1 - A_V}$$

$$R_{G_2} = \frac{R_G A_V}{A_V - 1}$$

$$A_V \uparrow$$

$$R_{G_2} = R_G$$

$$r_0 = \frac{V_A}{I_D} = \frac{50}{1.06} = 47k$$

$$V_0 = -g_m V_{GS} (10 \parallel 10 \parallel R_G \parallel r_0)$$

$$V_i = V_{GS}$$

$$A_V = -g_m (10 \parallel 10 \parallel r_0 \parallel R_G)$$

اصلاً کاری به  $R_{G_1}$  نداریم.

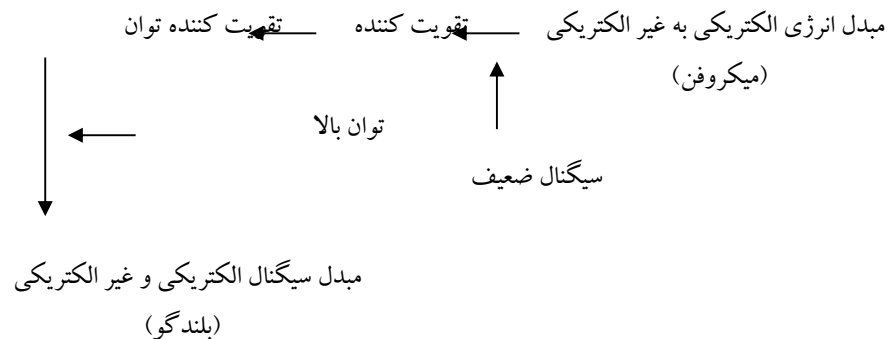


## فصل دوم

### تقویت کننده های قدرت، توان، خروجی یا (power Amp.)

#### مقدمه :

تقویت کننده هایی که بیش از چند میلی وات توان به بار تحویل می دهند، تقویت کننده های توان یا قدرت نامیده می شوند. در تقویت کننده های توان دامنه ی ولتاژ و جریان خروجی حداکثر بوده بنابراین به صورت تقویت کننده ی سیگنال بزرگ عمل می کند و دارای اعوجاج می باشد. معمولاً این تقویت کننده ها در طبقه ی نهایی تقویت کننده های چند طبقه قرار گرفته و بهره ی ولتاژ کمتر از یک و بهره ی جریان زیادی دارند.



مشخصات عمومی تقویت کننده های قدرت :

یک تقویت کننده ی توان خوب باید دارای مشخصات زیر باشد :

- اعوجاج کم
- امپدانس خروجی کم
- بهره ی جریان زیاد
- راندمان بالا
- مشخصه ی فرکانسی خوب

- راندمان تقویت کننده
- عوامل مهم در تقویت کننده های قدرت :
- پخش گرما

در تقویت کننده های توان موارد زیر اهمیت دارد:

- (۱) مسئله توانی که می بایست در خروجی فراهم گردد.
- (۲) بحث حرارتی المانهای مختلف در مدار مثل ترانزیستورها.
- (۳) مقاومت ورودی و خروجی مناسب برای تقویت کننده توان.

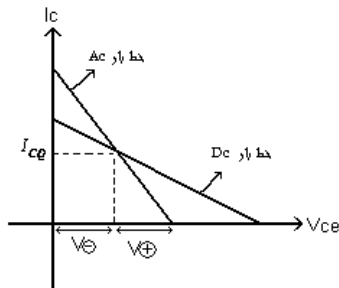
بهترین نقطه کار برای حداکثر نوسان خروجی با حداکثر سوئیچینگ خروجی

≤ یادآوری:

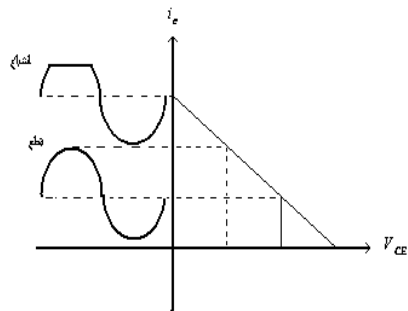
DC: متغیر و اندیس را بزرگ در نظر میگیریم  $I_C$  &  $V_{CE}$

AC: متغیر و اندیس را کوچک در نظر میگیریم  $i_c$  &  $v_{ce}$

AC+DC: متغیر با حروف کوچک و اندیس با حروف بزرگ  $i_C$  &  $V_{CE}$

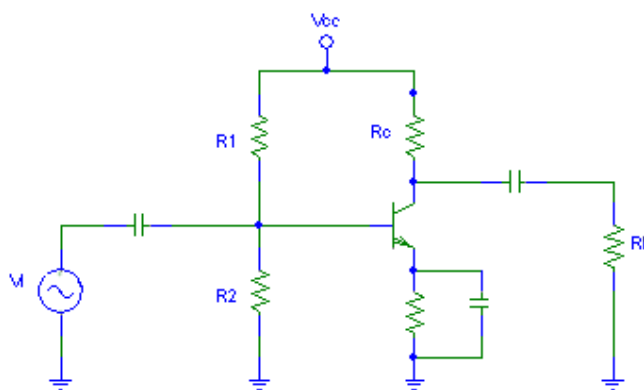


$$\frac{1}{R_E + R_C} \quad \text{شیب خط} \quad \frac{1}{R_{DC}}$$



اگر نقطه کار را وسط انتخاب کنیم نوسان متقارن خواهیم داشت.

اگر  $V_{CE}$  نقطه کار را کمتر انتخاب کنیم (نقطه کار به سمت چپ بیاید) یعنی مدار از بالا پریده می شود (اشباع)  $i_C$  از بالا پریده می شود. اگر  $V_{CE}$  نقطه کار را بیشتر انتخاب کنیم مدار از پایین برش می خورد.



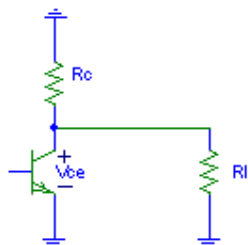
تحلیل DC

$$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} - R_E I_E = 0$$

$$\text{DC} \left\{ \begin{array}{l} V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C \\ I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_E + R_C} \end{array} \right\} \text{خط بار}$$

$$R_C + R_E = R_{DC}$$

تحلیل AC



$$v_{ce} = -(R_C \parallel R_L) i_c \quad (1)$$

AC مقاومت خروجی در حالت  $R_{AC} : R_C \parallel R_L$

تحلیل AC+DC

$$v_{CE} = V_{CE} + v_{ce} \rightarrow v_{ce} = v_{CE} - V_{CE} \quad (2)$$

$$i_C = I_C + i_c \rightarrow i_c = i_C - I_C \quad (3)$$

$$\Rightarrow (1), (2), (3) \quad v_{CE} - V_{CE} = -R_{AC} (i_c - I_C)$$

$$v_{CE \max} \Big|_{i_c = 0} \Rightarrow V_{CE \max} = V_{CE} + R_{AC} I_C$$

$$i_{C \max} \Big|_{V_{CE} = Sat} \Rightarrow i_{C \max} = I_C + \frac{V_{CE} - V_{CESat}}{R_{AC}}$$

نمودار صفحه قبل را نامگذاری می کنیم  $V(+)$  و  $V(-)$  را در نمودار نشان می دهیم:

$$\left\{ \begin{array}{l} V(-) = V_{CEQ} - V_{CEsat} \\ V(+) = R_{AC} I_{CQ} \end{array} \right| \begin{array}{l} V(-) = V(+) \rightarrow \\ V(-) < V(+) \rightarrow \\ V(-) > V(+) \rightarrow \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{ماکزیمم نوسان خروجی} \\ \text{اشباع} \\ \text{قطع} \end{array}$$

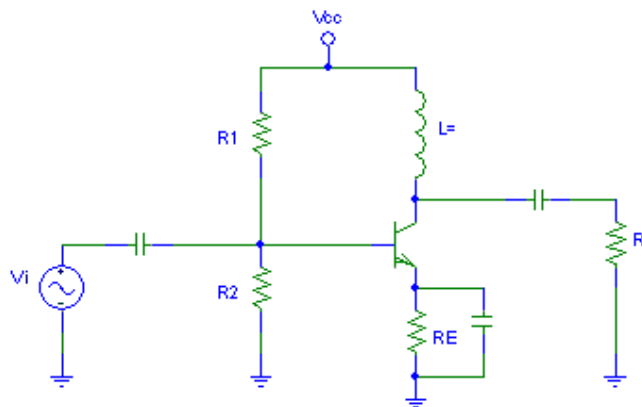
$$V(-) = V(+) \rightarrow \{ V_{CEQ} - V_{CEsat} = R_{AC} I_{CQ} \quad \text{خط بار AC, DC}$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_{AC} + R_{DC}}$$

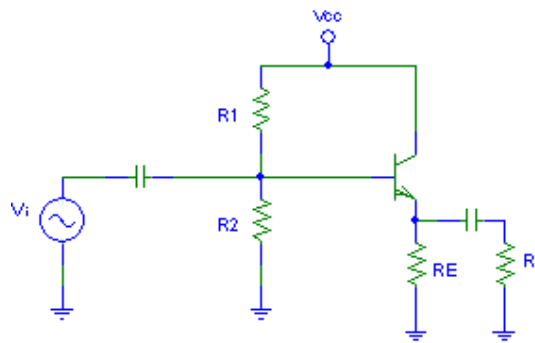
جریان در بهترین نقطه کار یعنی زمانی که ماکزیمم نوسان متقارن در خروجی.

مثال: در مدارهای شکل زیر بهترین نقطه کار را بدست آورید.

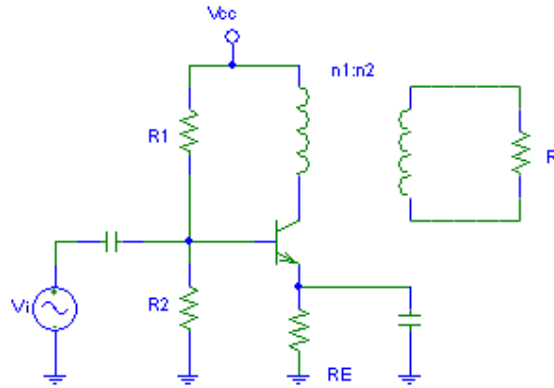
(الف)



$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_{AC} + R_{DC}} \quad R_{AC} = R_L \quad R_{DC} = R_E$$

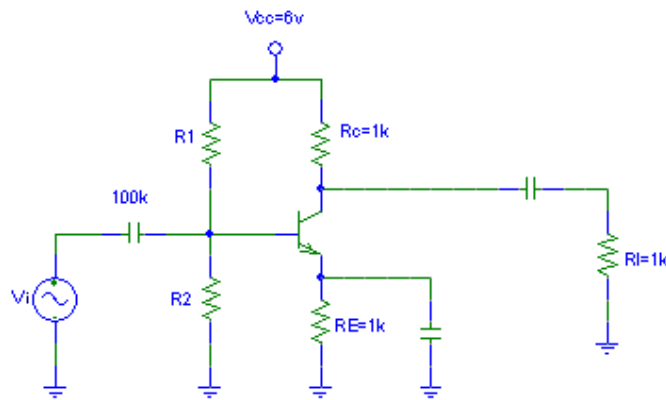


$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_{AC} + R_{DC}} \quad R_{AC} = R_L \parallel R_E \quad R_{DC} = R_E$$



$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_{AC} + R_{DC}} \quad R_{DC} = R_E \quad R_{AC} = R'_L = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 R_L$$

مثال: در مدار شکل زیر با توجه به مقادیر دیده شده حداکثر نوسان خروجی را بدست آورید. آیا این نقطه بهترین نقطه کار برای مدار می باشد؟ اگر نیست با اصلاح  $R_1$  و  $R_2$  ماکزیمم نوسان متقارن را در خروجی فراهم آورید.



$$V_{CEsat} = 0.2$$

$$V_{BE(on)} = 0.7$$

$$\beta = 100$$

$$V(-) = V(+)$$

$$V_B = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 6 \times \frac{50}{50 + 100} = 2V$$

$$V_E = V_B - V_{BE(on)} = 2 - 0.7 = 1.3$$

$$I_{CQ} = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1.3}{1} = 1.3mA$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C$$

$$V_{CEQ} = 6 - 2 \times 1.3 = 3.4$$

$$R_{AC} = R_C \parallel R_L = 0.5k \Omega$$

حال  $V(+)$  و  $V(-)$  را با هم مقایسه می کنیم:

$$V(-) = V_{CEQ} - V_{CEsat} = 3.4 - 0.2 = 3.2$$

$$V(+)=R_{AC} I_{CQ} = 0.5 \times 1.3 = 0.65$$

$V(-) \gg V(+)$

قطع

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_{AC} + R_{DC}}$$

$$R_{AC} = 0.5$$

$$R_{DC} = R_C + R_E = 2k\Omega$$

$$I_{CQ} = \frac{6 - 0.2}{2.5} = 2.32mA$$

بهترین نقطه کار برای حداکثر نوسان

$$\begin{cases} V_{BE} = R_B \times I_B + V_{BE} + R_E \times I_C \\ V_B = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ R_B = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \end{cases} \quad \beta \quad \text{شرط پایداری نقطه کار نسبت به تغییرات } \beta \quad R_B = \frac{\beta}{10} R_E = 10k$$

$$R_1 = R_B \times \frac{V_{CC}}{V_B} \quad (1)$$

$$R_2 = R_B \times \frac{1}{1 - \frac{V_B}{V_{CC}}} \quad (2)$$

$V_B$  را از رابطه  $kVl$  بدست می آوریم، با داشتن  $V_B$  و  $R_B$  (با استفاده از رابطه شرط پایداری)

رابطه ۱ و ۲ نداشته و  $R_1$  و  $R_2$  به آسانی حاصل می شود.

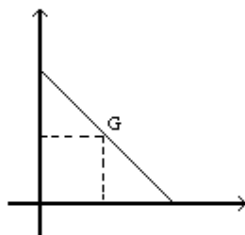
### معرفی انواع تقویت کننده ها

تقویت کننده ها را بر حسب اینکه ترانزیستور های آن در چه کسری از پرلود سیگنال ورودی هدایت می کنند (روشن هستند) به دسته های مختلفی تقسیم می کنند که بر این اساس تقویت کننده ها در چهار کلاس A, B, AB, C قرار می گیرند.

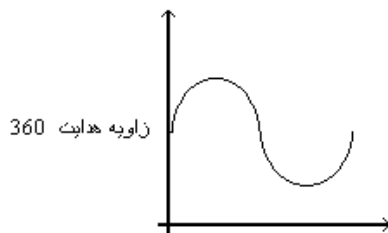
(۱) کلاس A:

تقویت کننده هایی که در آنها ترانزیستور در تمام پرلود سیگنال ورودی هدایت می کنند (زاویه هدایت آنها ۳۶۰ درجه است) و دارای کمترین راندمان می باشند.

مثل یک مدار کلکتور مشترک معمولی



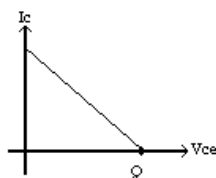
عیب مهم این مدار تلفات توان در حالت عدم حضور سیگنال می باشد.



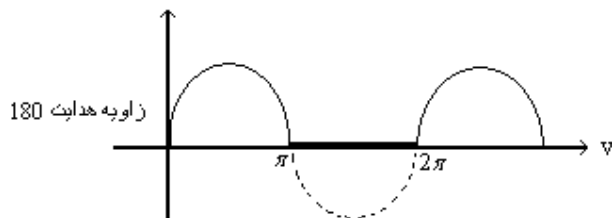
زاویه هدایت 360

(۲) کلاس B:

عیب تقویت کننده ی کلاس A پایین بودن راندمان آن پایین است زیرا حتی در غیاب سیگنال ورودی نیز بعلت بایاس بودن ترانزیستور از منبع تغذیه جریان کشیده شده و باعث افزایش تلفات توان در ترانزیستورها می شود . اگر تقویت کننده ی توان طوری طراحی شود که در غیاب سیگنال ورودی جریانی از منبع کشیده نشود ( ترانزیستورها خاموش باشند ) ، تلفات توان کاهش یافته و راندمان بالا خواهد رفت . در تقویت کننده های کلاس B از دو عدد ترانزیستور استفاده شده بطوریکه هر ترانزیستور فقط تقریباً نصف پریود سیگنال ورودی را هدایت می کند ( زاویه ی هدایت تقریباً ۱۸۰ درجه است ) یعنی در هر نیم سیکل فقط یکی از ترانزیستورها هدایت می کند و دیگری خاموش است .



یعنی جریان در مدار نمی کشیم پس تلفات نداریم. در این حالت سعی می شود نقطه کار در مرز ترانزیستور قرار گیرد و لذا حسن این مدار آن است که در حالت عدم حضور سیگنال تلفات نداریم.

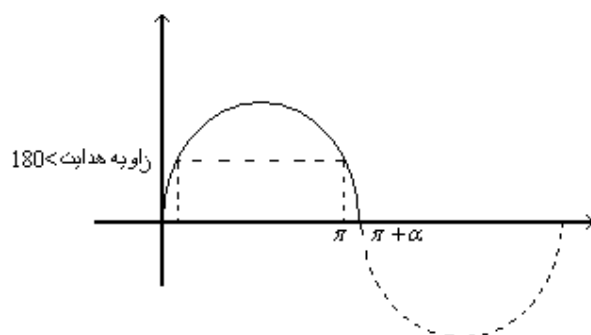
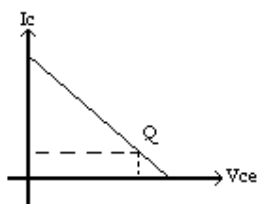


برای رفع اعوجاج بالا از Push-Pull این کلاس استفاده میشود که در آن در نیم پریود یک ترانزیستور و در نیم پریود دیگر ترانزیستور دیگر کار می کند. عیب این مدار این است که تا ولتاژ 0.7 کار نمی کند یعنی ترانزیستور از 0.7 تا 0.7- قطع است. برای رفع این حالت وارد کلاس AB می شویم. (به این ناحیه، ناحیه مرده می گویند)

### ۳) کلاس AB:

تقویت کننده ی کلاس AB تقویت کننده ای است که ترانزیستور های آن درست نصف سیگنال ورودی را هدایت می کنند ( زاویه هدایت ۱۸۰ درجه است ) برای اینکه ترانزیستورها درست در نیم سیکل سیگنال ورودی هدایت کنند لازم است که در تقویت کننده ی کلاس B ترانزیستورها را طوری بایاس کنیم که در آستانه هدایت قرار گیرند یعنی ولتاژ بیس-امیتر تقریباً ۰٫۷ داشته باشند.

در کلاس AB جریان DC غیر صفر ولی کوچک است.

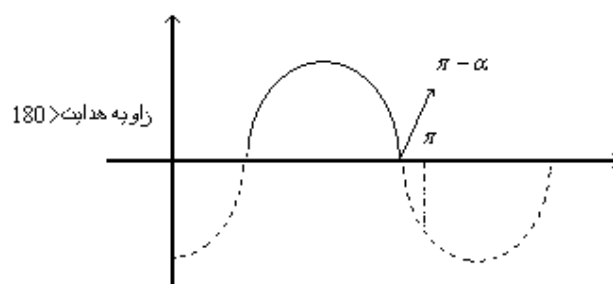
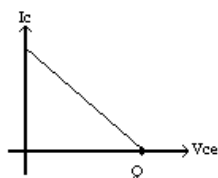


#### ۴) کلاس C:

در تقویت کننده های کلاس C ترانزیستورها در کمتر از نیم پریود سیگنال ورودی هدایت می کنند بنابراین دارای راندمان خیلی بالایی می باشند. از این تقویت کننده ها در مدار های گیرنده و فرستنده ی رادیویی استفاده می شود. در این نوع مدارها چون ترانزیستور قسمت خیلی کمی از سیگنال ورودی را هدایت می کند، یک مدار رزونانس LC با کیفیت بالا سیگنال را بازسازی می کند.

در تقویت کننده های RF (در فرکانسهای بالا) Radio Frequency

کاربرد در گیرنده های رادیو و تلویزیون

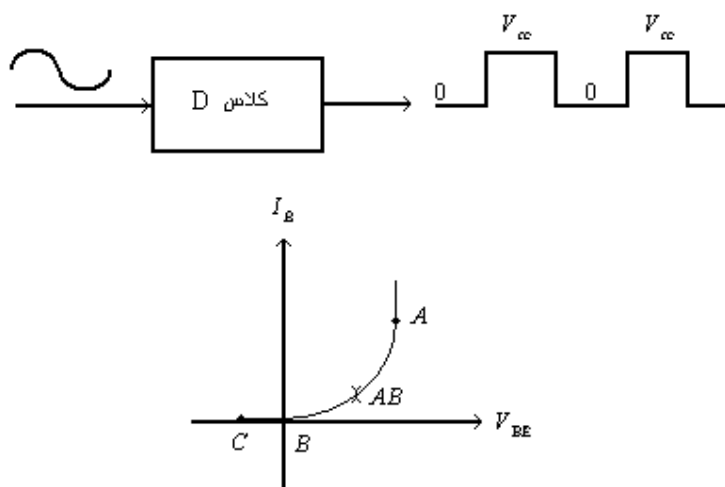


#### ۵) کلاس D:

در این نوع تقویت کننده فقط در حالت قطع و اشباع کار می کند و اگر در ورودی موج سینوسی اعمال شود خروجی مربعی خواهد بود.

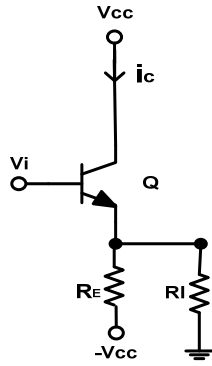


کاربرد برای مدارات دیجیتال



یک کلکتور مشترک معمولی (کلاس A):

محدودیت خروجی: (۱) از نظر قطع (۲) از نظر اشباع



$$\rightarrow \text{از نظر قطع } i_C = 0 \Rightarrow \frac{V_0 - (-V_{CC})}{R_E} + \frac{V_0}{R_L} = 0 \Rightarrow \begin{cases} V_{0\min} = \frac{-V_{CC} \times R_L}{R_L + R_E} \\ I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_L + R_E} \end{cases}$$

$$\frac{V_0}{R_L} + I_Q = 0 \Rightarrow V_0 = -R_L I_Q \Rightarrow V_{0\min} = -R_L I_{CQ}$$

$$\rightarrow \text{از نظر اشباع } V_{0\max} = V_{CC} - V_{CEsat} \approx V_{CC}$$

$$V_{CC} \text{ بر نوسانات متقارن خروجی از بالا تا } V_{CC} \text{ بر نوسانات متقارن باشد، پس } V_{0\min} \text{ حداکثر دامنه خواهد بود.}$$

$$V_{0\max} = \min\{V_{\max}, |V_{0\min}|\} = \frac{V_{CC} \times R_L}{R_L + R_E} = V_{0m} \quad (1)$$

ادامه دارد و از پایین تا  $V_{0\min}$  می خواهیم متقارن باشد، پس  $V_{0\min}$  حداکثر دامنه خواهد بود.

$$P_{out} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt$$

$$\text{توان بار: } P_{RL} = P_L = \frac{1}{T} \int_0^T V_0 \times \frac{V_0}{R_L} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_0^2 \sin^2 \omega t}{R_L} dt$$

$$\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$$

$$\Rightarrow P_L = \frac{\hat{V}_0^2}{T \times R_L \times 2} \int_0^T dt - \int_0^T \cos^2 \omega t dt = \frac{\hat{V}_0^2}{2R_L}$$

$$P_{L\max} = \frac{V_{0m}^2}{2R_L} \xrightarrow{(1)} P_{L\max} = \frac{V_{CC}^2 \times R_L}{2(R_L + R_E)^2}$$

$$P_{RE} = \frac{1}{T} \int_0^T (V_0 - (-V_{CC})) \times \frac{V_0 + V_{CC}}{R_E} dt$$

$$P_{RE} = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{V_0^2}{R_E} + \frac{V_{CC}^2}{R_E} + \frac{2V_0 V_{CC}}{R_E} \right) dt$$

$$V_0 = \hat{V}_0 \sin \omega t$$

$$P_{RE} = \frac{\hat{V}_0^2}{2R_E} + \frac{V_{CC}^2}{R_E} + 0$$

$$P_{RE\max} = \frac{V_{0m}^2}{2R_L} + \frac{V_{CC}^2}{R_E}$$

تلفات توان ترانزیستور

$$P_d = P_c = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CE}(t) i_c(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (V_{CC} - V_0) \left[ \frac{V_0 + V_{CC}}{R_E} + \frac{V_0 + 0}{R_L} \right] dt$$

$$P_d = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{V_{CC}^2}{R_E} + \frac{V_{CC} \times V_0}{R_E} - \frac{V_0^2}{R_E} + \frac{V_0 V_{CC}}{R_L} - \frac{V_0^2}{R_L} \right) dt$$

$$P_d = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{V_{CC}^2}{R_E} - \left( \frac{1}{R_E} + \frac{1}{R_L} \right) V_0^2 + \frac{V_0 V_{CC}}{R_L} \right) dt$$

$$P_C = \frac{V_{CC}^2}{R_E} - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_E} + \frac{1}{R_L} \right) \hat{V}_0^2$$

$$P_S = P_S^- + P_S^+ = 2V_{CC} I_C = \frac{2V_{CC}}{R_E}$$

توان منابع

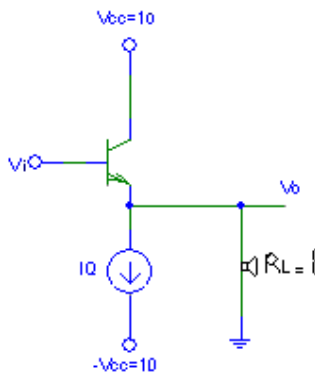
ماکزیمم توان مفید بار / ماکزیمم توان تلفات در ترانزیستور = ضریب شایستگی (F.M)

$\eta = 100 \times (\text{توان تولیدی منابع} / \text{توان مفید تحویلی به بار}) = \text{راندمان}$

$\eta_{\max} = \text{حداکثر توان منابع} / \text{حداکثر توان مفید تحویلی به بار}$

$$\eta_{\max} = \frac{\frac{V_{0m}^2}{2R_L}}{2V_{CC} I_{CQ}} \times 100 = \frac{1}{4} \frac{V_{0m}}{V_{CC}} \times \frac{V_{0m}}{R_L I_{CQ}} = \frac{1}{4} \times 100 = 25\%$$

مثال: در مدار زیر حداکثر راندمان را بدست آورید.

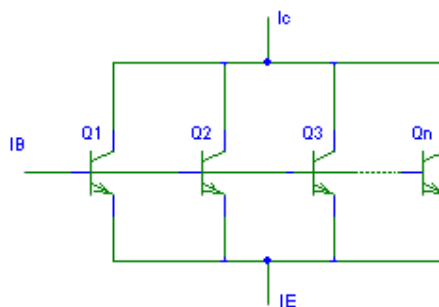


$$P_L = \frac{V_{0m}^2}{2R_L}, \quad V_{0m}^2 = P_L \times 2R_L = 8 \times 2 \times 1 = 16 \rightarrow V_{0m} = 4$$

$$V_{0m} = 4^v = \min \{ V_{CC}, | -R_L I_{CQ} | \} \rightarrow R_L I_{CQ} = 4 \rightarrow I_{CQ} = \frac{4}{8} = 0.5A$$

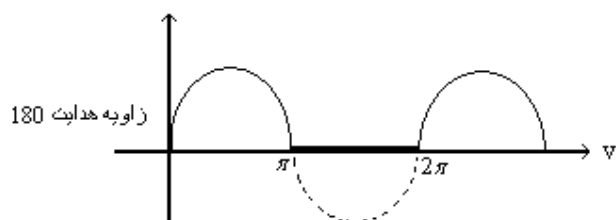
$$\eta = \frac{P_L}{P_S} = \frac{1}{2V_{CC} I_{CQ}} = \frac{1}{2 \times 10 \times 0.5} = 10\%$$

موازی کردن ترانزیستورهای توان پایین به جای ترانزیستورهای توان بالا



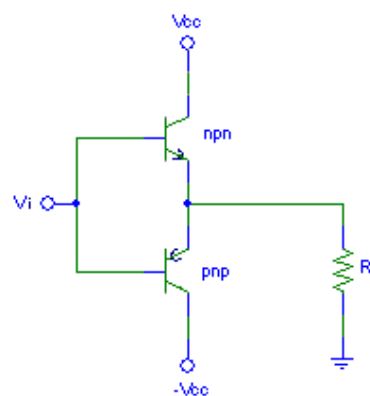
ترانزیستورهای کوچک (توان پایین) هزینه ها را کاهش می دهند.

### تقویت کننده قدرت کلاس B:



غیر عملی

### تقویت کننده Push Pull کلاس B



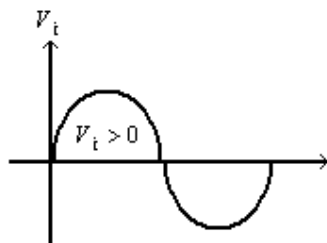
$$\rightarrow V_i > 0$$

$$0 < V_i < V_{BE} (on) \Rightarrow Q_1 : off, Q_2 : off$$

$$V_i > V_{BE} \Rightarrow Q_1 : on, Q_2 : off$$

$$i_{R_L} = i_{e_1} \Rightarrow V_0 = R_L i_{C_1}, V_i \approx V_0$$

پالس مثبت دقیقاً به خروجی آمده



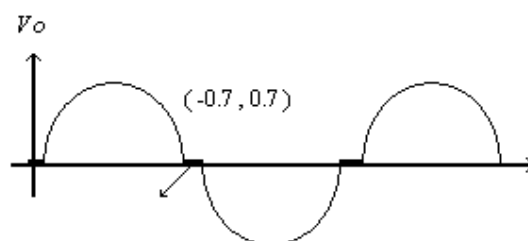
$$\rightarrow V_i < 0$$

$$-V_{EB} < V_i < 0 \Rightarrow Q_1 : off, Q_2 : off$$

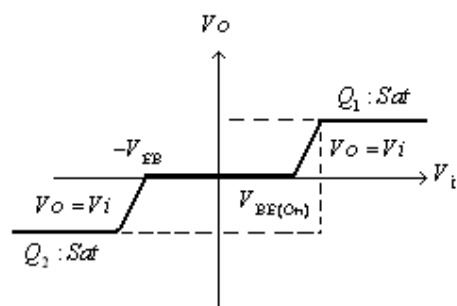


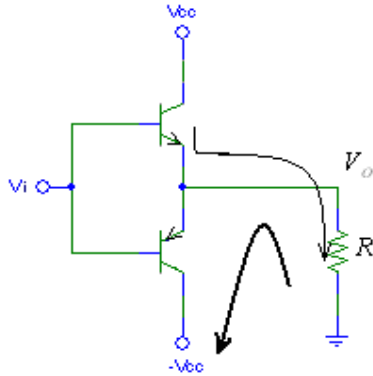
$$V_i < -V_{EB} \Rightarrow Q_1 : off, Q_2 : on$$

$$i_{R_L} = -i_{C_2} \Rightarrow V_0 = -R_L i_{C_2}, V_0 \approx V_i$$



اعوجاج تقاطعی (Cross over Distortion)





$$P_L = \frac{V_{0m}^2}{2R_L}$$

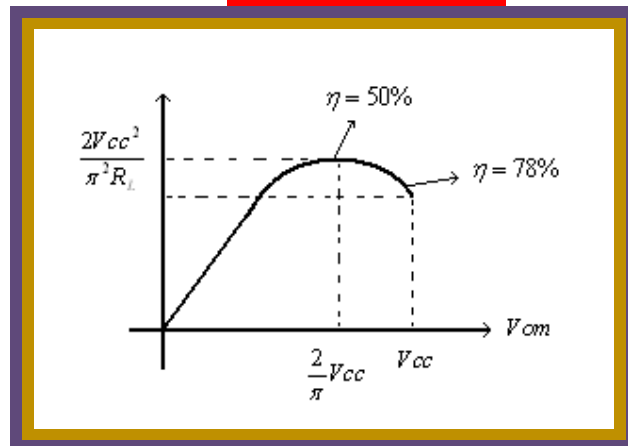
$$P_s^- = P_s^+ = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \cdot i_c dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} i_c dt$$

$$\rightarrow \frac{V_{CC}}{T} \int_0^T \frac{V_0}{R_L} dt \Rightarrow P_s^+ = P_s^- = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{V_{0m}}{R_L} \times V_{CC}$$

$$P_s = +2P_s^+ = \frac{2V_{0m} \times V_{CC}}{\pi R_L}$$

توان کل ترانزیستورها  $P_C = P_s - P_L$

$$P_C = \frac{2V_{0m}V_{CC}}{\pi R_L} - \frac{V_{0m}^2}{2R_L}$$



برای بدست آوردن ماکزیمم توان از رابطه  $P_C$  مشتق می گیریم و مساوی صفر قرار می دهیم.

$$P_{C \max} = \frac{\partial P_C}{\partial V_{0m}} = 0 \rightarrow V_{0m} = \frac{2}{\pi} V_{CC}$$

$$\text{راندمان: } \eta = \frac{P_L}{P_s} = \frac{\frac{V_{0m}^2}{2R_L}}{\frac{2V_{0m} \times V_{CC}}{\pi R_L}} = \frac{\pi}{4} \frac{V_{0m}}{V_{CC}}$$

$$V_{0m} \nearrow V_{CC} \rightarrow \eta_{\max} = \frac{\pi}{4} \times 100\% = 78\%$$

$$P_{C \max} = \frac{2}{\pi^2} \times \frac{V_{CC}^2}{R_L} \quad \text{هر یک از ترانزیستورها} \quad P_{C \max} = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_L} = 0.1 \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

مثال: در یک تقویت کننده Push Pull کلاس B اگر به بار ۸ اهمی توان 10W تحویل داده شود آنگاه مقدار  $V_{CC}$  و حداکثر توان ترانزیستورها را بدست آورید.

$$P_L = \frac{V_{om}^2}{2R_L} \Rightarrow V_{om}^2 = 2R_L P_L \rightarrow V_{om} = 12.65$$

$$V_{om} = V_{CC} - V_{CE(sat)} \Rightarrow V_{CC} = V_{om} + V_{CE(sat)} = 12.65 + 0.2 \approx 13$$

$$P_{C \max} = 0.1 \times \frac{V_{CC}^2}{R_L} = 0.1 \times \frac{13^2}{8} = 2.1 \text{ W}$$

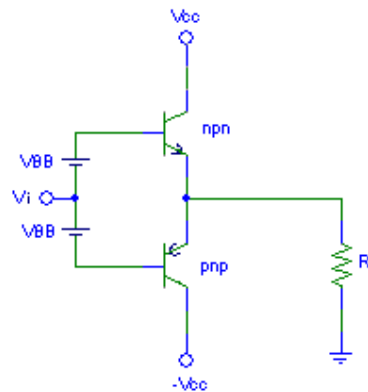
در ناحیه اعوجاج تقاطعی ورودی وجود دارد ولی خروجی صفر است ولی مزیت این مدار نسبت به کلاس A این است که زمانی که ورودی و خروجی صفر است تلفات وجود ندارد.

برای حذف ناحیه مرده ترانزیستورها می بایست در آستانه روشن شدن قرار دهیم، برای این کار روشهای مختلفی وجود دارد مانند قرار دادن یک منبع DC در در بخش Base ترانزیستور.

مثال: تعیین مقدار ولتاژ  $V_{BB}$  ؟

مشکل مدار چیست و راه حل آن چیست؟

پیشنهاد کلاس AB



$$i_{B1} = i_{B2} \quad (1) \quad \rightarrow V_{BE1} = V_{BE2}$$

$$kvl1 \rightarrow V_{BE1} + V_{BE2} = 2V_{BB} \rightarrow V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BB}$$

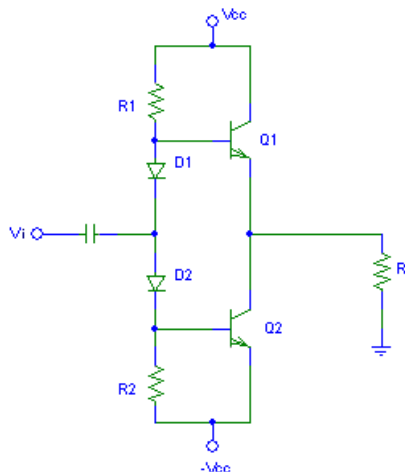
$$(1) \text{ بنابر رابطه } \rightarrow i_{C1} = i_{C2} \leftrightarrow (i_C = \beta i_B)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{C1} = I_S e^{\frac{V_{BE1}}{\eta V_T}} \\ V_{BE1} = V_{BB} \end{array} \right\} \Rightarrow I_{C1} = I_S e^{\frac{V_{BB}}{\eta V_T}} \xrightarrow{\ln} V_{BB} = \eta V_T \ln \left( \frac{I_{C1}}{I_S} \right) \quad \leftarrow \text{جریان اشباع ترانزیستور}$$

نکته: در این مدار مشکل ناحیه مرده با منابع DC،  $V_{BB}$  حل شده است ولی در این مدار نیاز به منابع مستقل بیشتری داریم.

اولین مدار عملی Push Pull کلاس AB:

دیودهای این مدار برای تامین  $V_\gamma$  و حذف اعوجاج انتقالی یا ناحیه مرده استفاده می شود.



در این مدار مقاومت های  $R$  به منظور تامین جریان بایاس ترانزیستورها و دیودها استفاده می گردند.

مثال: در مدار شکل بالا  $V_{CC} = 15V$ ,  $\beta = 50$ ,  $I_{D \min} = 2mA$ ,  $R = 2k\Omega$ ,  $V_{0 \max}$  را بدست آورید.

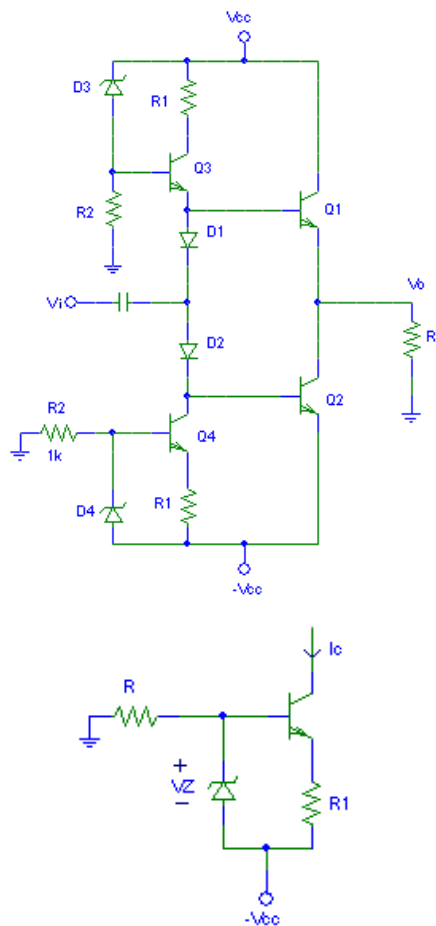
$$I_{1 \min} > I_{B \max} + I_{D \min}, I_1 = \frac{V_{CC} - (V_{0 \max} + V_{BE(on)})}{R}$$

$$\left. \begin{aligned} I_{B \max} &= \frac{I_{C \max}}{\beta} \\ I_{C \max} &= \frac{V_{0m}}{R_L} \end{aligned} \right\} \rightarrow I_{B \max} = \frac{V_{0m}}{500}$$

$$\frac{14.3 - V_{0 \max}}{2} > \frac{V_{0 \max}}{500} + 2 \quad V_{0 \max} \leq 2.09V$$

استفاده از یک منبع جریان جایگزین با مقاومت  $R$  (در حالت قبل)





مثال: در مدار بالا  $V_{CC} = 30V$ ,  $I_{D\min} = 2mA$ ,  $P_L = 5W$ ,  $V_{CE(sat)} = 1$ ,  $\beta = 50$ ,  $R_L = 8\Omega$ ,  $V_Z = 6.2V$  را بیابید.

در بدترین حالت  $I_{R_1} > I_{B\max} + I_{D\min}$

$$P_L = \frac{V_{om}^2}{2R_L} \rightarrow V_{om}^2 = 2 \times 5 \times 8 \rightarrow V_{om} = 8.8V$$

$$I_{C_1\max} = \frac{V_{om}}{R_L} = \frac{8.8}{8} = 1.1A$$

$$I_{B\max} = \frac{I_{C_1\max}}{\beta} = \frac{1.1}{50} = 22.4mA$$

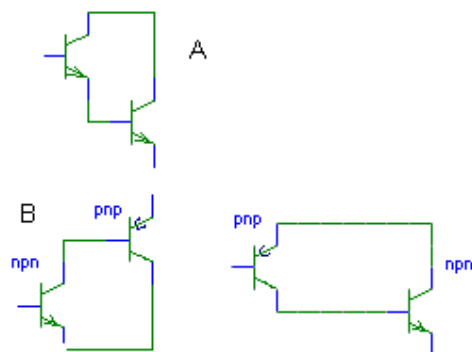
$$V_{B_3} = V_{CC} - V_Z = 30 - 6.2 = 23.8V$$

$$V_{E_3} = 23.8 + 0.7 = 24.5$$

$$I_{R_1} = I_{E_3} = \frac{V_{CC} - V_{E_3}}{R_1} = \frac{30 - 24.5}{R_1} = \frac{5.5}{R_1} > 22.4mA + 2mA \rightarrow R_1 \leq 220\Omega$$

زوج دارلینگتون

# ۱- دارلینگتون معمولی

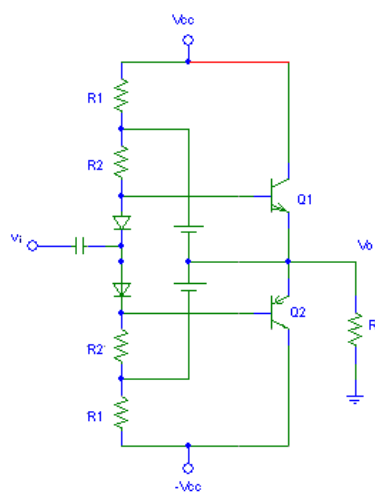


A) زوج دارلینگتون (شکل)

B) زوج زیکولای (شکل)

زوج دارلینگتون برای بایاس شدن نیاز به دو دیود دارد ولی زوجهای زیکولای با یک دیود بایاس می شوند.

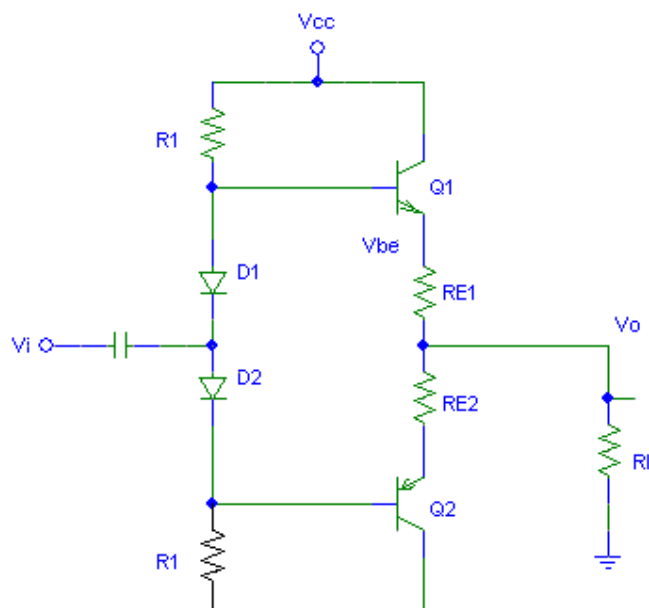
استفاده از تکنیک بوت استرپ در تقویت کننده کلاس AB



$$\left. \begin{matrix} V_0 \uparrow \Rightarrow V_A \uparrow \\ V_0 \uparrow \Rightarrow V_B \uparrow \end{matrix} \right\} i_{R_2} : cte$$

نکته:

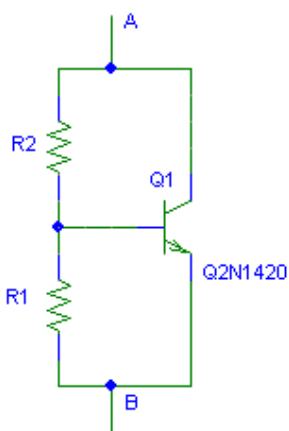
۱- استفاده از مقاومت آمیتر برای مقابله با رانش حرارتی



فیدبک منفی  $T \uparrow \Rightarrow I_C \uparrow \Rightarrow I_E \uparrow \Rightarrow V_E \uparrow \Rightarrow V_{BE} \downarrow \Rightarrow I_C \downarrow$  گرم شدن ترانزیستور

$$\downarrow I_C = I_S e^{\frac{V_{BE} \downarrow}{nV_T}}$$

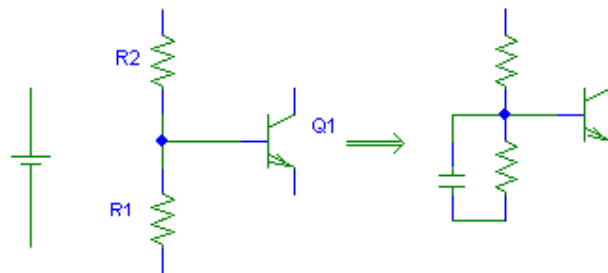
ضرب کننده یا چند برابر کننده ولتاژ  $V_{BE}$



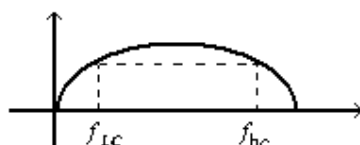
$$I_1 = \frac{V_{BE}}{R_1}, \text{ if } I_B = 0 \rightarrow I_1 = I_2$$

$$V_{AB} = (R_1 + R_2) I_1 \rightarrow V_{AB} = (R_1 + R_2) \times \frac{V_{BE}}{R_1}$$

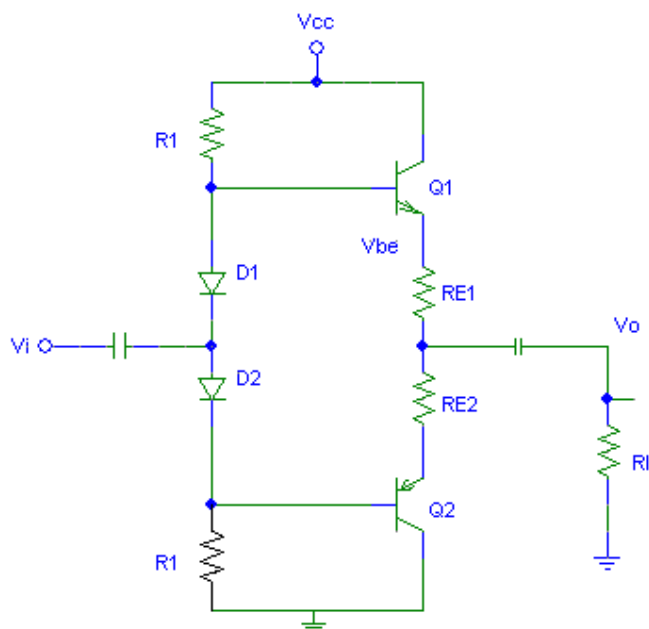
$$V_{AB} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{BE}$$



مقاومتها Gain را تغییر میدهند مشکل گین می شود ولی مشکل پهنای باند خواهد داشت



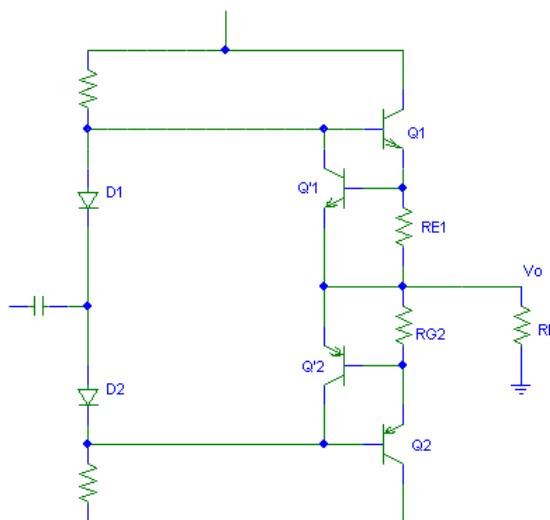
جلوگیری از رانش حرارتی



$$\left. \begin{aligned} I_{E_1} &= I_{E_2} \\ I_{B_1} &= I_{B_2} \\ I_{D_1} &= I_{D_2} \end{aligned} \right\} I_1 = I_2$$

$$kvl \text{ in } 1 \rightarrow \left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{V_{CC} - (V_A + V_{BE(on)})}{R} \\ I_2 &= \frac{V_A - V_{BE(on)}}{R} \end{aligned} \right\} \rightarrow V_A = \frac{V_{CC}}{2}$$

استفاده از ترانزیستورهای برای محافظت در برابر اتصال کوتاه خروجی

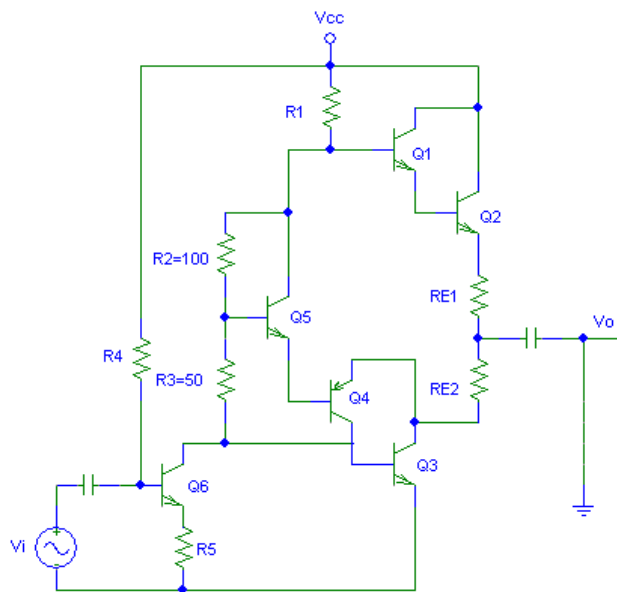


در حالت عادی  $Q'_2, Q'_1$  خاموش هستند.

زمانی که خروجی اتصال کوتاه گردد، جریان زیادی از خروجی کشیده خواهد شد. در اینصورت  $I_{E1}, I_{E2}$  زیاد شده و در صورت عدم وجود ترانزیستور  $Q'_2, Q'_1$  یا  $Q_2$  از کار خواهد افتاد ولی با وجود  $Q'_2, Q'_1$  با افزایش جریانهای  $I_{E1}, I_{E2}$  ولتاژ دو سر مقاومتهای  $R_E$  به حدی خواهد رسید که می تواند  $Q'_2, Q'_1$  را متناظراً روشن نماید. در اینصورت  $Q'_1$  و یا  $Q'_2$  حجم زیادی از جریانهای بین  $Q_2$  و  $Q_1$  را کشیده و مانع از سوختن ترانزیستورهای  $Q_2$  و  $Q_1$  می شود.

$$V_{RE} \uparrow \quad V_{RE} = V_{BE} Q'_1$$

مثال: نحوه کارکرد مدار شکل زیر را توضیح داده و وظیفه هر بخش را مشخص نمایید.



$Q_5$ : چند برابر کننده ولتاژ  $V_{BE}$

$$V_{0_{Q_5}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) V_{BE} = \left(1 + \frac{100}{50}\right) V_{BE} = 3V_{BE}$$

$Q_1$ : به همراه  $Q_2$  همچنین  $Q_3$  تشکیل دهنده زوج دارلینگتون (زیکلای) را می دهند که موجب افزایش  $\beta$  میگردند.

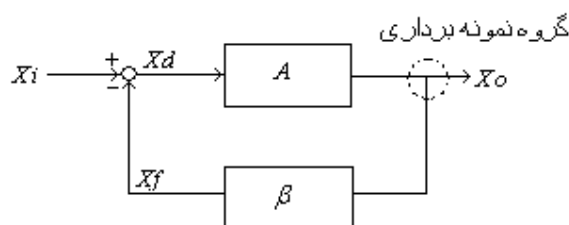
$$\beta'_1 = \beta_1 \times \beta_2 \quad \beta'_3 = \beta_3 \times \beta_4 \quad (\text{شکل}) \quad (\text{شکل})$$

$Q_6$ : به عنوان یک Driver وظیفه افزایش Gain را برعهده دارد. (خروجی امیتر Follower هستند gain آنها کم است در حالیکه  $Q_6$  امیتر مشترک است و Gain آن بالا).

## فصل سوم

### تقویت کننده های فیدبک

فیدبک به مفهوم باز گرداندن بخشی از خروجی یک سیستم و ترکیب آن با ورودی به منظور کنترل خروجی می باشد.



$$\begin{cases} x_0 = x_d \times A & (1) \\ x_d = x_i - x_f & (2) \\ x_f = x_0 \cdot \beta & (3) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_0 = A(x_i - x_f) \rightarrow x_0 = A(x_i - \beta x_0) \\ x_0 + A\beta x_0 = Ax_i \\ \frac{x_0}{x_i} = \frac{A}{1 \pm A\beta} \end{cases}$$

در فیدبک منفی

if ,  $\beta A < -1$  ناپایدار

if ,  $\beta A > -1$  پایدار

if ,  $\beta A = -1$  مرز پایداری

←  $1 + A\beta > 1$  فیدبک منفی باعث پایداری می شود.

←  $1 + A\beta < 1$  فیدبک مثبت باعث ناپایداری می شود. (ایجاد نوسان) کاربرد ← اسیلاتور

**نکته:**

در مدارات فیدبک منفی اگر مقدار  $A\beta \gg 1$  (خیلی خیلی از ۱ بزرگتر است) در این صورت گین کلی مدار تقریباً برابر است با:

$$/ A\beta \gg 1 \rightarrow \frac{X_o}{X_i} \approx \frac{1}{\beta}$$

مزایای فیدبک منفی

۱- کاهش حساسیت گین تقویت کننده و پایداری مدار:

در تقویت کننده های فیدبک دار با تغییر دما و تغییر نقطه کار پارامترهای مداری تغییر کرده و بهره تغییر می کند ولی درصد تغییرات گین همراه با فیدبک کمتر از تغییرات گین بدون فیدبک است.

$$\text{بدون فیدبک: } \frac{dA}{A} \quad A_f = \frac{A}{1+A\beta} \rightarrow dA_f = \frac{dA(1+A\beta) - A\beta dA}{(1+A\beta)^2}$$

$$\text{همراه با فیدبک: } \frac{dA_f}{A_f} \quad dA_f = \frac{dA \times A/A}{(1+A\beta)^2} 0$$

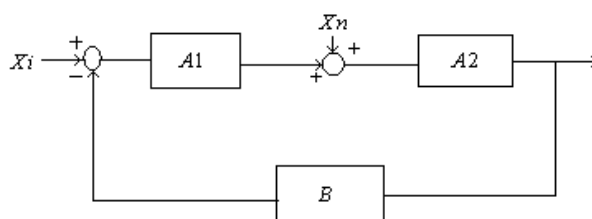
$$dA_f = \frac{dA/A \times A}{(1+A\beta)(1+A\beta)} = \frac{dA/A}{(1+A\beta)} A_f$$

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{dA/A}{(1+A\beta)}$$

همراه با فیدبک تغییرات کمتر می شود.

۲- کاهش اثر نویز طبقاتی:

در مدار همراه با فیدبک نویز هایی که در طبقه میانی وارد سیستم می شوند در خروجی تاثیر کمتری می گذارند نسبت به زمانی که فیدبک نداشته باشیم.



۳- امکان کنترل مقاومت های ورودی و خروجی مدار با استفاده از فیدبک:

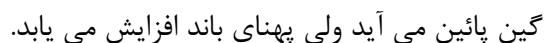
در مدارات عملی خروجی ورودی یکی از انواع ولتاژ یا جریان خواهند بود و با توجه به نوع ولتاژ یا جریان بودن آنها مقاومت های ورودی یا در  $(1+A\beta)$  ضرب و یا تقسیم می شود. (مقاومت های ورودی و خروجی)

۴- تاثیر فیدبک بر اغتشاشات هارمونیک کلی یا همان  $THD \downarrow$   
(Total Harmonic Distortion)  
(کم می شود)

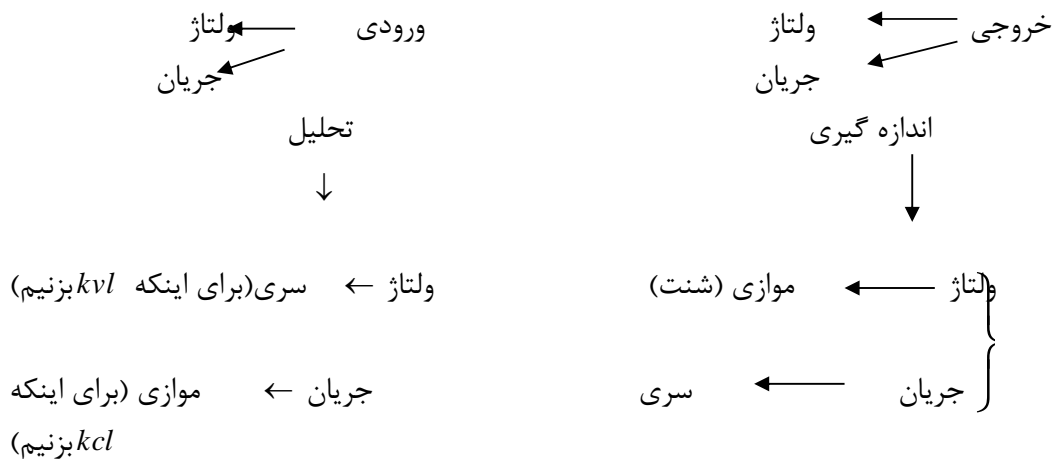
۵- افزایش پهنای باند مدار:



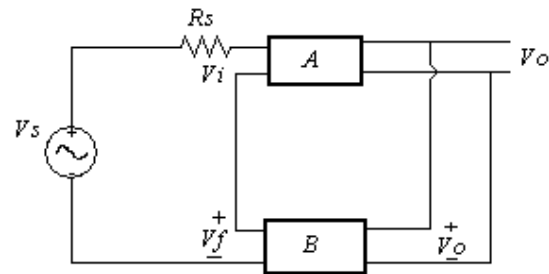
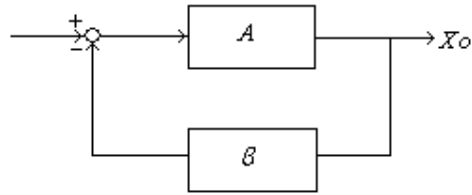
$$f_{hc_f} = f_{hc} (1 + A \beta)$$



در یک تقویت کننده ولتاژ، ورودی ( $X_i$ ) و خروجی ( $X_o$ ) ولتاژ در تقویت کننده جریان هر دو سیگنال جریان هستند.

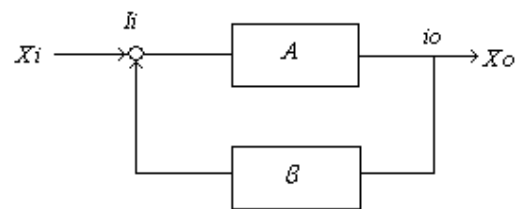


۱- ولتاژ - ولتاژ (خروجی - ورودی) ← موازی - سری  
(تقویت کننده ولتاژ) ولتاژ - سری

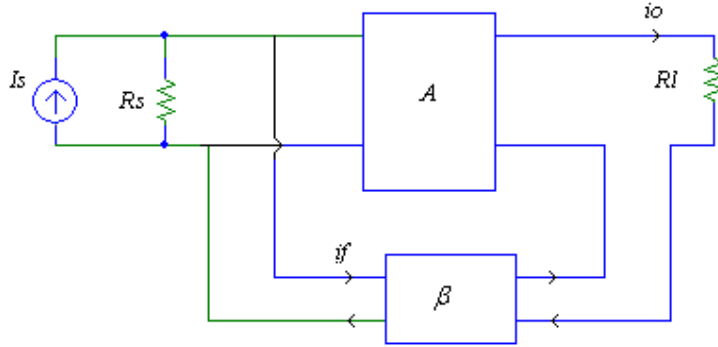


سری - موازی  
جریان - موازی

← ۲- جریان - جریان  
(تقویت کننده جریان)



اگر فیدبک ورودی جریان بود تبدیل تونن به نرتن داریم.



$$\beta = \frac{x_f}{x_o} = \frac{i_f}{i_o}$$

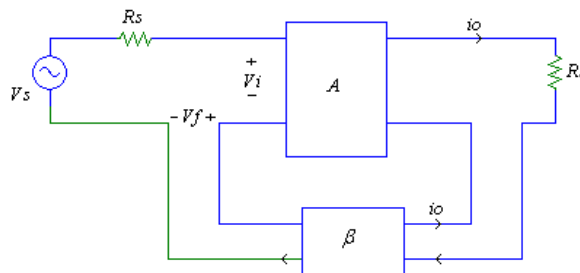
$$A_t = \frac{i_o}{i_s} = \frac{V_o / R_L}{V_s / R_i} = \frac{V_o}{V_s} \times \frac{R_i}{R_L}$$

$$A_f = \frac{A}{1 + AB} = \frac{i_o / i_i}{1 + \frac{i_o}{i_i} \times B}$$

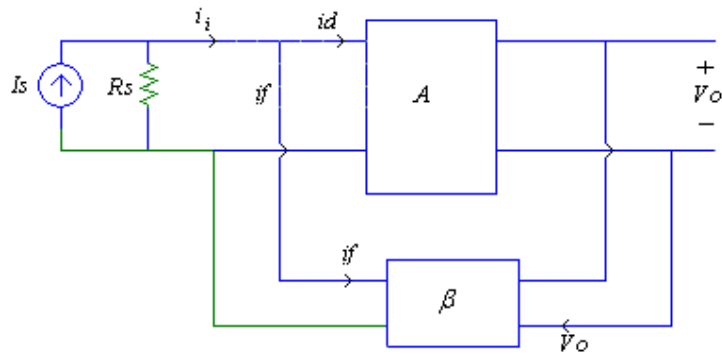
۳- جریان - ولتاژ ← سری - سری  
(تقویت کننده هدایت انتقالی) جریان - سری

$$\beta = \frac{x_f}{x_o} = \frac{V_f}{i_o}$$

$$G_m = \frac{i_o}{v_s} = A = \frac{V_o / R_L}{V_s} = \frac{V_o}{V_s} \times \frac{1}{R_L}$$



۴- ولتاژ - جریان ← موازی - موازی  
(تقویت کننده مقاومت انتقالی) جریان - سری



$$\beta = \frac{x_f}{x_o} = \frac{i_f}{V_o}$$

$$R_m = \frac{V_o}{I_s} = A = \frac{V_o}{V_s / R_i} = \frac{V_o}{V_s} \times R_i \Rightarrow A_f = \frac{A}{1 + A\beta}$$

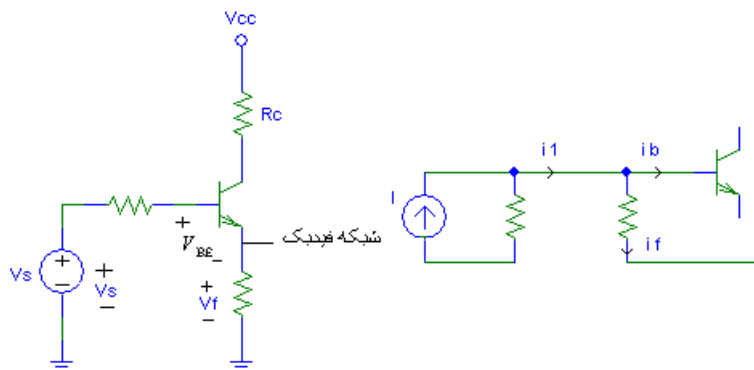
## نکات مهم

(۱) برای تشخیص نوع فیدبک در خروجی:

اگر ولتاژ خروجی را قطع نمائیم و شبکه فیدبک قطع شود خروجی از نوع ولتاژ بوده است و اگر جریان خروجی را قطع کنیم، شبکه فیدبک قطع شود نوع فیدبک در خروجی از نوع جریان بوده است.

(۲) تشخیص نوع فیدبک در ورودی:

اگر بتوانیم بین ولتاژ  $V_s$  و عنصری که با خروجی در ارتباط است که در یک حلقه قرار گرفته اند یک  $kvl$  بنویسیم، ورودی از نوع ولتاژ خواهد بود و اگر جریان عنصری که به خروجی وصل شده است با جریان ورودی در گره ورودی ترکیب شود نوع فیدبک در ورودی از نوع جریان خواهد بود.



$$i_i = i_b + i_f$$

۳) اثر بارگذاری شبکه فیدبک:

نحوه محاسبه گین شبکه فیدبک ( $\beta$ ):

برای محاسبه  $\beta$  در شبکه فیدبک از سمت خروجی به شبکه فیدبک نگاه می کنیم اگر فیدبک در ورودی موازی بود آنرا اتصال کوتاه و اگر فیدبک ورودی سری بود آنرا مدار باز می نمائیم. سپس مقدار  $\beta$  را از رابطه  $\frac{x_f}{x_0}$  حساب می کنیم.

موازی ← اتصال کوتاه  
سری ← مدار باز

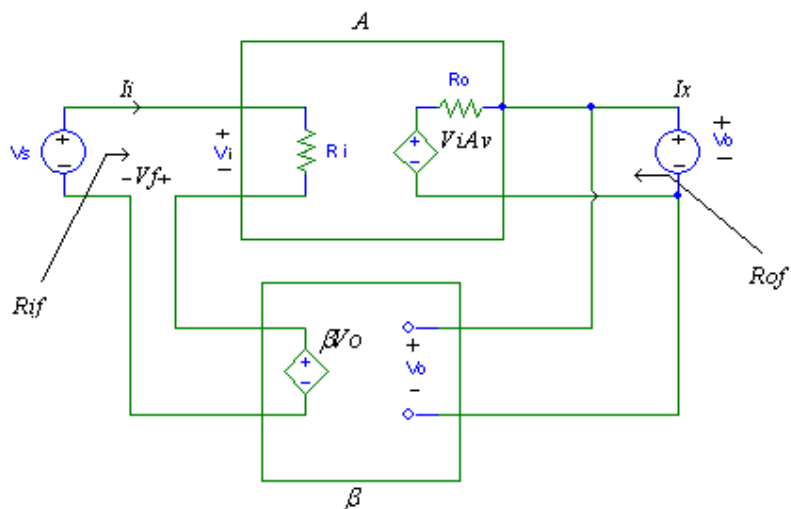
### اثر فیدبک در ورودی ( $R_{Fi}$ )

در سمت ورودی ایستاده به خروجی شبکه فیدبک نگاه می کنیم. اگر فیدبک در خروجی از نوع موازی بود آنرا اتصال کوتاه و اگر فیدبک در خروجی از نوع سری بود آنرا مدار باز می کنیم، سپس مقاومت دیده شده را ( $R_{Fi}$ ) نامیده و جایگزین شبکه فیدبک در ورودی می کنیم.

### اثر فیدبک در خروجی ( $R_{Fo}$ )

از سمت خروجی به شبکه فیدبک نگاه می کنیم، اگر فیدبک در ورودی موازی بود آنرا اتصال کوتاه و اگر فیدبک در ورودی سری بود آنرا مدار باز کرده و مقاومت دیده شده در شبکه فیدبک از خروجی را  $R_{Fo}$  نامیده و جایگزین فیدبک در خروجی می کنیم.

### تحلیل مدار فیدبک ولتاژ - ولتاژ



برای  $r_0$ : منبع  $V_x$  را با جریان  $I_x$  در نظر میگیریم.

$$\Rightarrow A_{Vf} = \frac{A_v}{1 - A_v \beta} \quad A_v = \frac{V_o}{V_i}$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} \quad R_{if} = \frac{V_s}{I_i} = \frac{V_i + V_f}{\frac{V_i}{R_i}} = R_i \left( 1 + \frac{V_f}{V_i} \right)$$

$$R_{if} = R_i \left( 1 + \frac{\beta V_o}{V_i} \right) = R_i (1 + \beta A_v)$$

وقتی  $V_x$  می گذاریم:

$$V_s = 0 \leftarrow R_{of} = \frac{V_x}{I_x} \quad V_o = V_x \quad \begin{cases} I_x = \frac{V_o - A_v V_i}{R_o} \\ V_i = -V_f \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_x = \frac{V_o + A_v V_f}{R_o} \\ V_f = \beta V_o \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_x = \frac{V_o + A_v \beta V_o}{R_o} \\ I_x = \frac{V_o (1 + A_v \beta)}{R_o} \end{cases} \rightarrow R_{of} = \frac{V_x}{I_x} = \frac{V_o}{I_x} = \frac{R_o}{(1 + A_v \beta)}$$

نکته:

$$\begin{cases} R_{0_f} = R_0 (1 + A_v \beta) \\ R_{i_f} = R_i (1 + A_v \beta) \end{cases} \longleftarrow \text{اگر سری بود (خروجی یا ورودی)}$$

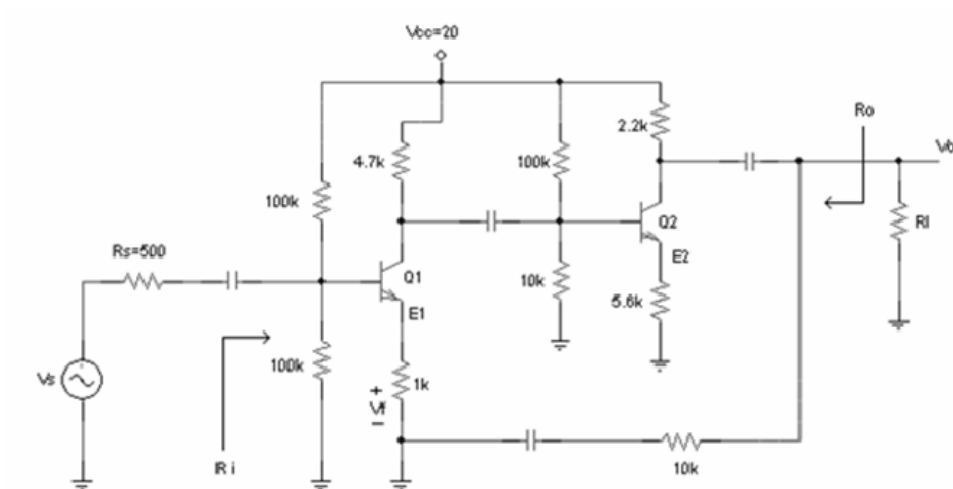
$$\begin{cases} R_{0_f} = \frac{R_0}{(1 + A_v \beta)} \\ R_{i_f} = \frac{R_i}{(1 + A_v \beta)} \end{cases} \text{اگر موازی بود (خروجی یا ورودی)}$$

نکته:

۱- برای استفاده از روابط فیدبک برای مقاومت ورودی می بایست مقاومت ورودی دیده شده قبل از همه مقاومتها باشد.

۲- برای استفاده از روابط فیدبک برای مقاومت خروجی اگر نوع فیدبک در خروجی ولتاژ بود باید مقاومت خروجی بعد از همه مقاومتها دیده شود و اگر نوع فیدبک خروجی از نوع جریان می بایست مقاومت دیده شده قبل از مقاومت بار باشد.

**مثال:** در مدار شکل زیر گین ولتاژ همراه با فیدبک، مقاومت ورودی همراه با فیدبک و مقاومت خروجی همراه با فیدبک؟



تحلیل DC  $V_{B_1} = V_{B_2} = \frac{20 \times 10}{10 + 100} = 1.8V$

$$V_{E_1} = V_{B_1} - V_{B_{E_1}} = 1.8 - 0.7 = 1.1V$$

$$I_{E_1} = \frac{1.1}{1} = 1.1mA$$

$$I_{E_2} = \frac{1.1}{0.56} = 1.96mA$$

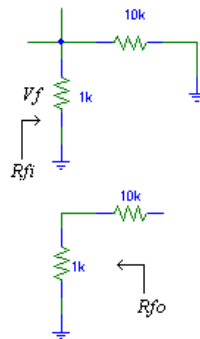
$$h_{i_{e_1}} = \frac{\eta h_f V_T}{h_{i_e}} = 2.73k\Omega$$

$$h_{i_{e_2}} = 777\Omega$$



$$g_{m1} = \frac{hfe}{hie} = \frac{I_{CQ}}{V_T} = 44 \text{ mv/A}$$

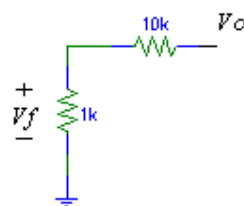
$$g_{m2} = 77 \text{ mv/A}$$



$$R_{Fi} = \text{خروجی را اتصال کوتاه} = 1 \parallel 10 = 0.9 \text{ K}\Omega$$

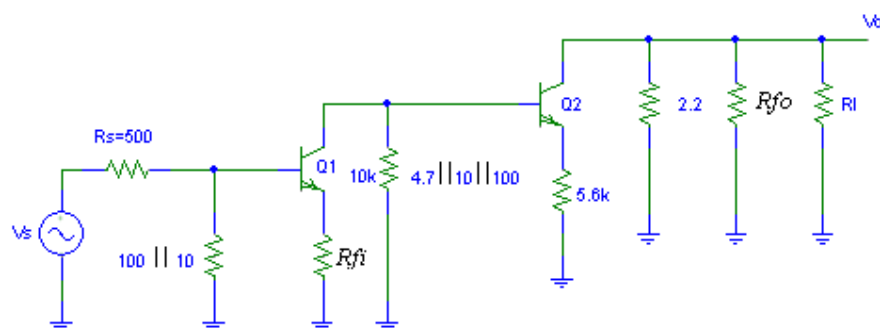
$$R_{Fo} = \text{ورودی را مدار باز} = 1 + 10 = 11 \text{ k}$$

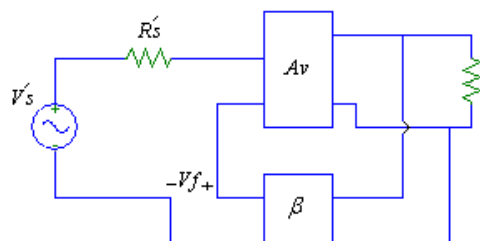
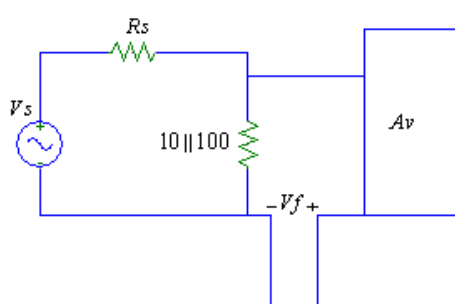
$$\beta = \frac{X_f}{X_o} = \frac{V_f}{V_o} = \frac{1}{1+10} = 0.09 \quad \beta \text{ کوچک است}$$



$$\frac{A_v}{A_v \beta} = \frac{1}{\beta}$$

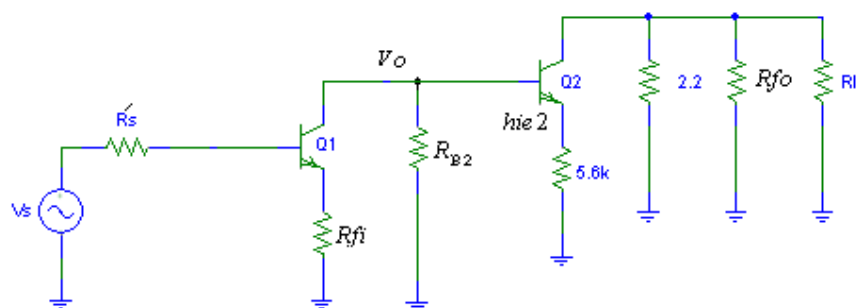
$$A_{v_f} \approx \frac{1}{\beta} \quad \text{اگر } \beta \text{ بزرگ بود}$$





$$V'_s = V_s \times \frac{10 \parallel 100}{(10 \parallel 100) + 500} = 0.948 V_s$$

$$\frac{V'_s}{V_s} = 0.948$$



طبقه اول ← امیتر مشترک

طبقه دوم ← امیتر مشترک

$$R'_s = 10 \parallel 100 \parallel R_s$$

$$A_{V_2} = \frac{-g_m (R_{F_0} \parallel 2.2 \parallel R_L)}{1 + g_m (0.56)}$$

$$A_{V_1} = \frac{-g_m (R_{B_2} \parallel (h_{ie_2} + (1 + \beta_2) 0.56))}{1 + g_m (R_F)}$$

$$A_{V_1} A_{V_2} = \frac{V_0}{V_{b_1}}$$

$$V_{b_1} = V'_s \times \frac{((1 + \beta_1) R_F + h_{ie_1})}{((1 + \beta_1) R_F + h_{ie_1} + R'_s)}$$

$$A_{V_{s_f}} = \frac{A_{V'_s}}{1 + \beta A_{V'_s}} = 4.3$$

$$A'_{V_s} = \frac{V_0}{V'_s} = A_{V_1} A_{V_2} \times \frac{V_{b_1}}{V'_s}$$

$$A_{V'_s} = 7.6$$

$$\beta = 0.09$$

$$A_{V_{s_f}} = A_{V'_s} \times \frac{V'_s}{V_s} = 4.1$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R'_{i_f} = R'_i \times (1 + A'_{V_s} \beta) \\ R'_i = R'_s + (h_{i_{e1}} + (1 + h_{f_e}) R_{F_i}) = 111k \end{array} \right\} \rightarrow R'_{i_f} = 184.5k$$

مقاومت ورودی همراه با فیدبک بیش تر از بدون فیدبک شده است.

$$R' = R'_{i_f} - R'_s$$

$$R_{i_r} = R' \parallel 10 \parallel 100 = 865^k$$

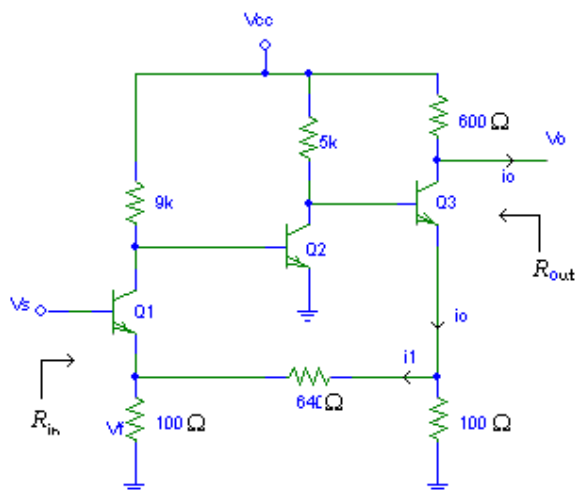
$$R'_0 = R_L \parallel R_{\pi} \parallel 2.2 = 1.3^k$$

$$R'_{0_r} = \frac{R'_0}{1 + A'_{V_s} \beta} = 797 \Omega$$

$$R'_{0_r} = R_{0_r} \parallel R_L \rightarrow R_{0_r}$$

$$R_{of}' = 0.797 K \Omega = R_{of} \parallel 2.2k$$

مثال:



$$r_{\pi_1} = 4.2^k$$

$$r_{\pi_2} = 2.5^k$$

$$r_{\pi_3} = 0.625^k$$

$$h_{f_e} = 100$$

جریان - ولتاژ (سری - سری )

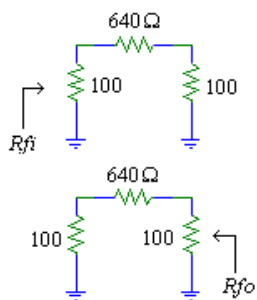
$$R_{i_f} = R_i (1 + \beta A)$$

$$g_m = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} = \frac{\beta}{r_\pi}$$

$$R_{o_f} = R_o (1 + \beta A)$$

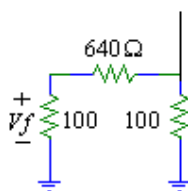
$$g_{m_1} = 23.8 \quad , \quad g_{m_2} = 40 \quad , \quad g_{m_3} = 160$$

$$\beta = \frac{x_f}{x_o} = \frac{V_f}{i_o} = 11.9$$

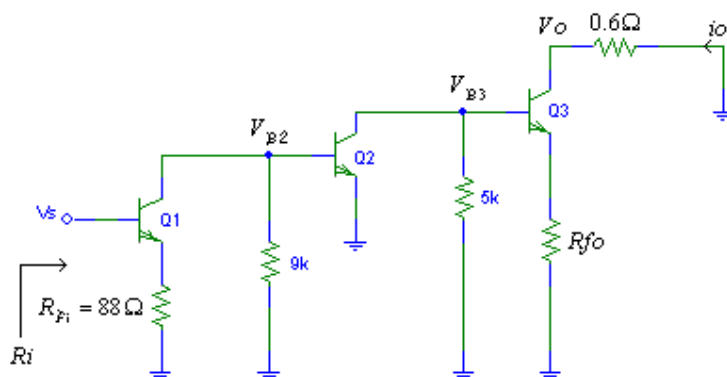


$$R_F = 100 \parallel (100 + 640) = 88\Omega$$

$$R_E = 100 \parallel (100 + 640) = 88\Omega$$



$$\left. \begin{aligned} i_i &= i_o \times \frac{100}{100 + (100 + 640)} \\ V_f &= i_i \times 100 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \beta = \frac{V_f}{i_o} = 100 \times \frac{100}{100 + (640 + 100)} = 11.9 \frac{V}{A}$$



$$A_V = \frac{V_O}{V_{\delta_3}} \times \frac{V_{\delta_3}}{V_{\delta_2}} \times \frac{V_{\delta_2}}{V_S} = (-6.3) \times (-131) \times (-15) = -12570$$

$$\frac{V_O}{V_{\delta_3}} = \frac{-g_{m_3}(0.6)}{1 + g_{m_3}R_{D_3}} = -6.3$$

$$\frac{V_{\delta_3}}{V_{\delta_2}} = \frac{-g_{m_2} \left( 5 \parallel \left( h_{i_{e3}} + (1 + h_{f_e})R_{F_3} \right) \right)}{1 + g_{m_2}R_{D_2}} = -131$$

$$\frac{V_{\delta_2}}{V_S} = \frac{-g_{m_1} \left( 9 \parallel h_{i_{e2}} \right)}{1 + g_{m_1} \left( R_{F_1} \right)} = -15$$

$$A = \frac{i_O}{V_S} = \frac{-\frac{V_O}{0.6}}{V_S} = 20960$$

$$A_f = \frac{A}{1 + \beta A} = 83.7 \quad (1)$$

$$A_f = \frac{i_O}{V_S} \quad \text{همراه با فیدبک}$$

$$A_{V_f} = \frac{V_O}{V_S} = \frac{(-0.6)i_O}{V_S} \quad \text{همراه با فیدبک} \quad = (-0.6)A_f = -50.2$$

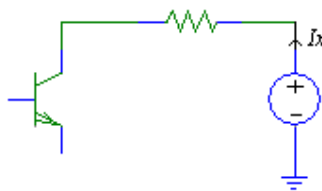
$$\text{اگر } \beta \text{ بزرگ باشد} \Rightarrow A_f = \frac{i_O}{V_S} \approx \frac{1}{\beta} \approx \frac{1}{11.9} \approx 83.7$$

$$R_i = h_{i_{e1}} + (1 + h_{f_e})R_{F_1} = 13^k$$

$$R_{i_f} = R_i (1 + A\beta) = 3.2^M$$

قبل از همه مقاومت می ایستیم

$$R_O = \frac{V_x}{I_x} = \frac{V_x}{0} = \infty$$



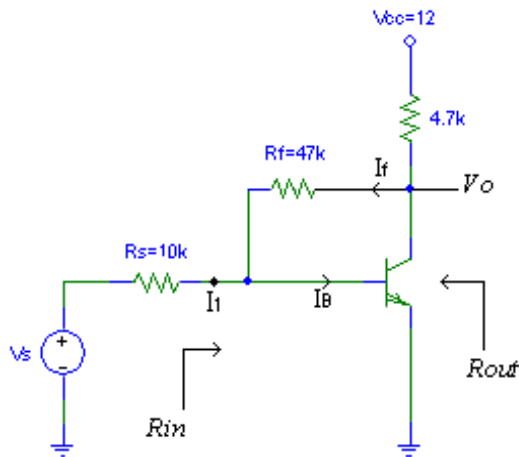
$$R_{O_f} = R_O (1 + A\beta) = \infty$$

$$R'_{O_f} = R_{O_f} - 0.6 = \infty$$

$$R_{Out} = 0.6 \parallel R'_{O_f} = 0.6 \parallel \infty = 0.6$$

بطور کلی همواره  $R_{Out}$  با مقاومت کلکتور برابر خواهد بود ولی باید محاسبه شود.

مثال:  $\beta = 100$



ولتاژ - جریان  
موازی - موازی  
/

تحلیل DC:  $g_m \leftarrow h_{ie}$  بدست می آوریم.

$$R_{i_f} = \frac{R_i}{1 + A\beta}$$

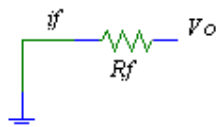
$$R_{o_f} = \frac{R_o}{1 + A\beta}$$

$$I_1 \times R_s = 0.07 \rightarrow I_1 = \frac{0.7}{10} = 0.07^{mA}$$

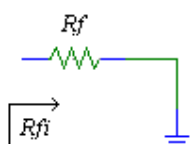
$$kcl \quad \ln 1 \quad \left. \begin{array}{l} \frac{V_{CC} - V_o}{4.7} = I_C + I_f, \quad I_C = \beta I_B \\ I_f = I_1 + I_B \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{V_{CC} - V_o}{4.7} = \beta I_B + I_1 + I_B \quad (1)$$

$$kvl \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{out} = V_{BE(on)} + R_F I_F \rightarrow V_o = 0.7 + R_f (I_1 + I_B) \\ I_f = I_1 + I_B \end{array} \right. \quad (2)$$

با قرار دادن رابطه ۱ فقط  $I_B$  مجهول می شود که

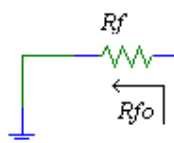


$$\begin{cases} I_B = 0.015^{mA} \\ V_o = 4.7^V \\ I_C = 1.5^{mA} \end{cases}$$



$$h_{ie} = \frac{\beta V_T h_{fe}}{I_C} = 2.3^k\Omega$$

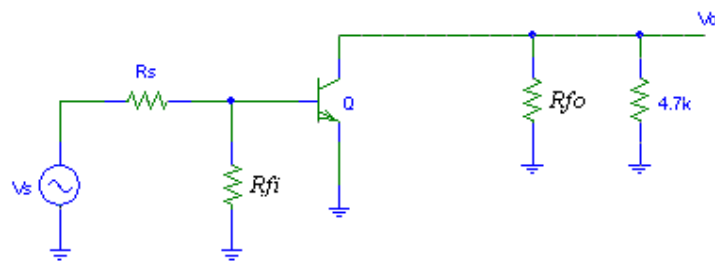
$$g_m = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} = \frac{I_C}{V_T} \approx 44$$



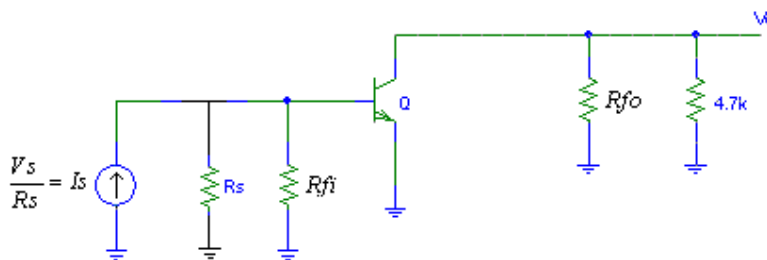
شبکه فیدبک  $\beta = \frac{X_f}{X_o} = \frac{I_f}{V_o} = -\frac{1}{R_f}$

$$R_{F_i} = 47^k\Omega$$

$$R_{F_o} = R_f = 47^k\Omega$$



تبدیل تونن به نرتن



$$A = \frac{V_o}{I_s} \quad A_f = \frac{A}{1 + \beta A} \quad \frac{V_o}{I_s} \text{ را می خواهیم :}$$

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

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-g_m (R_o \parallel 4.7)}{1 + g_m R_o} = -186$$

$$V_i = R_i \times I_i \quad R_i = R_{F_i} \parallel R_s \parallel h_{i_e} = 1.8^k\Omega$$

$$A = \frac{V_o}{V_i} \times \frac{V_i}{I_s} = 1.8 \times (-186) = -334$$

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta} = -41.2$$

$$A_{V_{sf}} = \frac{V_o}{\underbrace{R_s \times I_s}_{V_s}} = A_f \times \frac{1}{R_s} = -4.1$$

چون خروجی ولتاژ است باید بعد از همه مقاومت بایستیم.

$$R_o = 4.7 \parallel R_{F_o} = 4.27^k$$

$$R_{O_f} = \frac{R_o}{1 + \beta A} = 527^\Omega$$

$$R_{out} = R_{O_f} = 527$$

$$R_i = R_s \parallel R_{F_i} \parallel h_{i_e} = 1.8^k \Omega$$

$$R_{i_f} = \frac{R_i}{1 + A \beta} \approx 220^\Omega$$

چونکه در این حالت  $R_s$  با یک مقاومت موازی شده ولی در واقع چون نرتن شده اینگونه شده اگر بعد از  $R_s$ ،  $R'$  را در نظر بگیریم و  $R'$  را محاسبه کنیم.

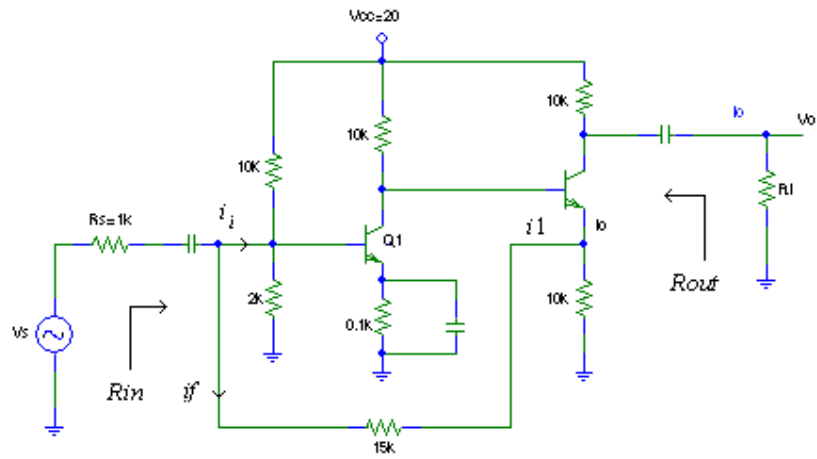
برای بدست آوردن خواسته مساله  $R_{in}$  باید  $R_s + R'$  را محاسبه کنیم.

$$R_{i_f} = R' \parallel R_s \rightarrow R' = 225^\Omega$$

$$R_{in} = R_s + R' = 10^k + 225 \simeq 10.225^k$$

**مثال:** در مدار زیر  $h_{f_e} = 100$ ،  $h_{i_e} = 1^k \Omega$  می باشد، گین جریان و مقاومت ورودی و خروجی را بدست آورید.





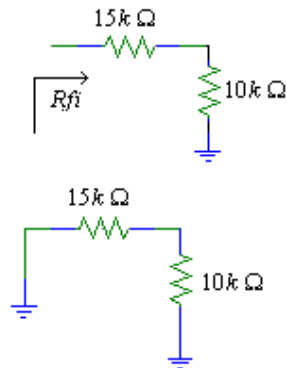
جریان - جریان  
سری - موازی

$$R_{o_f} = R_o (1 + A \beta)$$

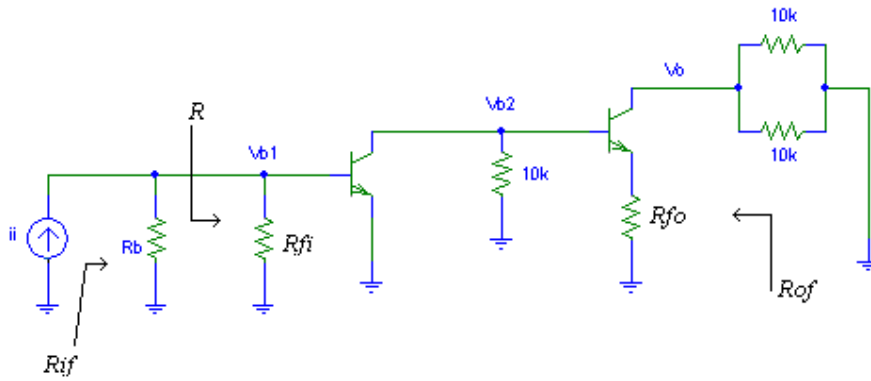
$$R_{i_f} = \frac{R_i}{1 + A \beta}$$

$$R_{\pi} = 15 + 10 = 25 \text{ k}\Omega$$

$$R_{f_o} = 15 \parallel 10 = 6 \text{ k}\Omega$$



$$\beta = \frac{X_f}{X_o} = \frac{i_f}{i_o} = -\frac{10}{10 + 15} = -0.4$$



$$A = \frac{i_o}{i_s}$$

برای راحتی  $\frac{V_o}{V_i}$  را حساب می کنیم ( زیرا با  $g_m$  جواب حاصل می شود)

بعد  $\frac{I_o}{I_s}$  را محاسبه کنیم.

$$\frac{V_o}{V_{b1}} = \frac{V_o}{V_{b2}} \times \frac{V_{b2}}{V_{b1}} = 815.3$$

$$\frac{V_o}{V_{b2}} = \frac{-g_m (10 \parallel 10)}{1 + g_m (R_{fo})} \quad \frac{V_{b2}}{V_{b1}} = \frac{-g_m [10 \parallel (h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_{fo})]}{1}$$

$$A_I = \frac{i_o}{i_i} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_i} \times \frac{R_i}{R_o} = -62$$

$$R_i = R_B \parallel R_{fi} \parallel h_{ie} = 380$$

$$R_o = 10 \parallel 10 = 5^k \quad (R_B = 10 \parallel 2 \parallel 1)$$

$$A_{I_f} = \frac{A_I}{1 + A\beta} = -2.4$$

$$R_{i_f} = \frac{R_i}{1 + A\beta} = 14.8^{\Omega}$$

$$R_{i_f} = R' \parallel R_B \rightarrow R' = 15^{\Omega}$$

$$\text{خواسته مسأله} \quad R_{in} = R' \parallel 10 \parallel 2 \simeq 15^{\Omega}$$

چیزی که ما می خواهیم  $R_s$  باید در پشت سر ما باشد.

$$R_o = \infty \quad R_{of} = R_o (1 + A\beta) = \infty$$

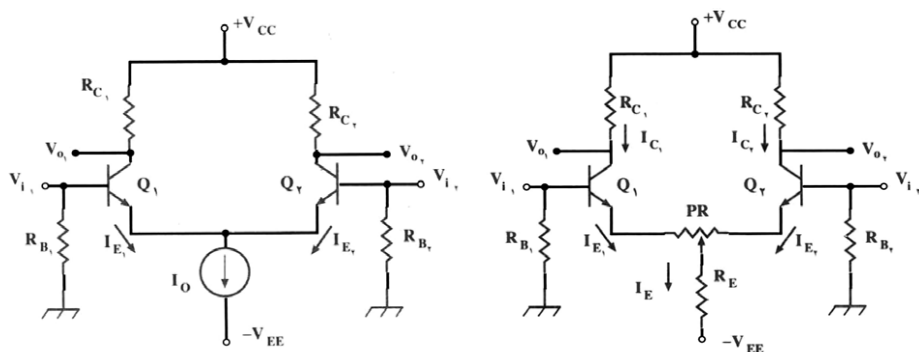
$$R' = \infty - (10 \parallel 10) = \infty$$

$$R_{out} = \infty \parallel 10 = 10^k \Omega$$

## فصل چهارم

### تقویت کننده های تفاضلی

تقویت کننده های تفاضلی تقویت کننده هایی هستند که دارای دو ورودی بوده و می توانند تفاضل دو سیگنال را در خروجی تقویت کنند. بعلاوه تقویت تفاضل دو سیگنال ورودی در این تقویت کننده ها نویز ورودی حذف می شود. همچنین در این تقویت کننده ها به علت استفاده از کوپلاژ مستقیم، سیگنال های با فرکانس پایین یا dc نیز تقویت می شوند.



با توجه به شکل های بالا یک تقویت کننده تفاضلی از دو عدد ترانزیستور مشابه تشکیل می شود و دارای دو ورودی و دو خروجی است. در هر دو مدار اگر مقاومت ها و ترانزیستورها مشابه باشند، جریان امیترها برابر بوده و برابر با نصف جریان  $I_O$  خواهد بود.

$$I_O = I_{E1} + I_{E2}, I_{E1} = I_{E2} \Rightarrow I_O = 2I_{E1} \Rightarrow I_{E1} = I_{E2} = \frac{I_O}{2}$$

در مدار (الف) اگر جریان امیترها برابر نباشند، می توان با استفاده از تنظیم پتانسیومتر PR این دو جریان را برابر کرد. اگر دو جریان  $I_{E1}$  و  $I_{E2}$  برابر نباشند، جریان های ورودی (بیس ها) و ولتاژهای dc خروجی (کلکتورها) نیز باهم برابر نخواهند بود که بر این اساس برای تقویت کننده های تفاضلی دو پارامتر زیر تعریف می شود :

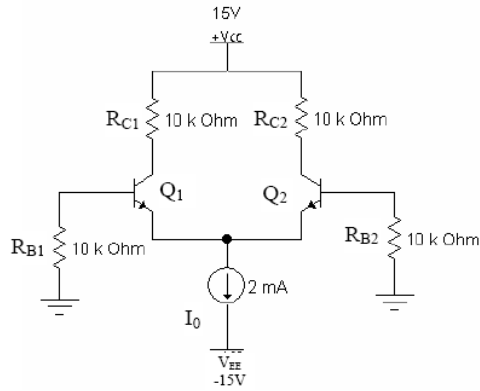
**جریان انحراف از میزان:** به اختلاف جریان های dc ورودی تقویت کننده ی تفاضلی ، جریان انحراف از میزان گفته می شود.

**ولتاژ انحراف از میزان یا آفست (Offset):** اختلاف ولتاژی است که باید به ورودی های تقویت کننده ی تفاضلی داده شود تا اختلاف ولتاژ dc خروجی صفر شود.

### **تحلیل DC تقویت کننده تفاضلی:**

با استفاده از دو مثال صفحه بعد نحوه تحلیل dc تقویت کننده های تفاضلی بیان می شود:

مثال:



$$\begin{cases} \beta_1 = \beta_2 = 200 \\ V_{BE1} = V_{BE2} = 0.7V \end{cases} \quad \begin{cases} I_{C1}, I_{C2} = ? \\ V_{C1}, V_{C2} = ? \\ V_{E1}, V_{E2} = ? \\ V_{CE1} = ? \end{cases}$$

حل:

$$I_{C1} = ?$$

$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{I_0}{2} = 1mA \Rightarrow I_{C1} = I_{C2} = 1mA$$

$$V_{C1} = ?$$

$$V_{CC} - R_{C1}I_{C1} = V_{C1} \Rightarrow V_{C1} = 15 - 10K \times 1m$$

$$\Rightarrow V_{C1} = 5V, V_{C2} = 5V$$

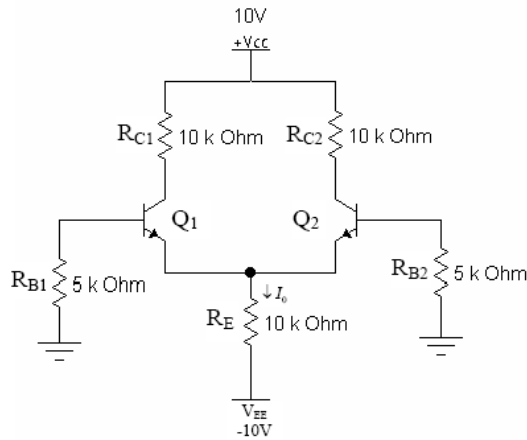
$$V_{E1} = ?$$

$$\text{روش تقریبی } (I_{B1}=0): V_{B1} = V_{B2} = 0 \Rightarrow V_{E1} = V_{B1} - V_{BE1} \Rightarrow V_{E1} = -0.7V, V_{E2} = -0.7V$$

$$V_{CE1} = ?$$

$$KVL: V_{CC} - R_{C1}I_{C1} - V_{CE1} = V_{E1} \Rightarrow 15 - 10K \times 1m - V_{CE1} = -0.7 \Rightarrow V_{CE1} = 5.7V, V_{CE2} = 5.7V$$

مثال:



$$\begin{cases} \beta_1 = \beta_2 = 200 \\ V_{BE1} = V_{BE2} = 0.7V \end{cases}$$

$$I_{C1}, V_{CE2} = ?$$

حل:

$$I_{C1} = ?$$

$$I_{B1} = 0 \Rightarrow V_{B1} = 0 \Rightarrow V_{E1} = 0 - 0.7 = -0.7V$$

$$I_0 = \frac{V_{E1} - V_{EE}}{R_E} = \frac{-0.7 - (-10)}{10K} \Rightarrow I_0 = 0.93mA$$

$$I_{C1} = \frac{I_0}{2} \Rightarrow I_{C1} = 0.46mA$$

$$V_{CE2} = ?$$

$$KVL: V_{CC} - R_{C2}I_{C2} - V_{CE2} = V_{E2} \Rightarrow 10 - 10K \times 0.46m - V_{CE2} = -0.7 \Rightarrow V_{CE2} = 6.1V$$

## بررسی رفتار ac تقویت کننده تفاضلی:

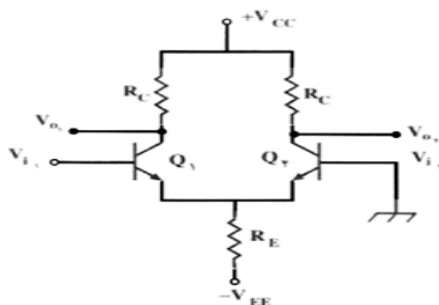
تقویت کننده تفاضلی ممکن است در چهار حالت بکار برده شود:

(a) دو ورودی، یک خروجی

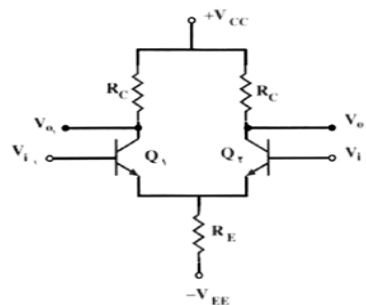
(b) دو ورودی، دو خروجی

(c) یک ورودی، یک خروجی

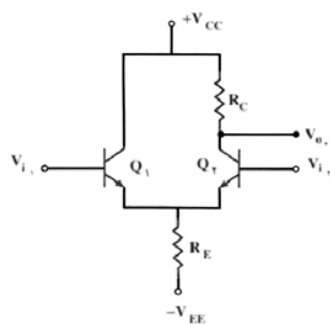
(d) یک ورودی، دو خروجی



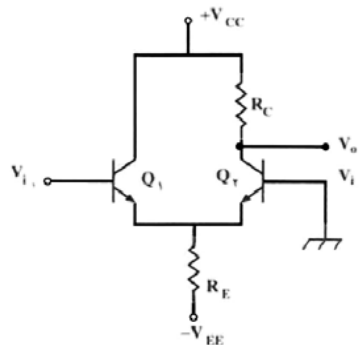
الف



ب



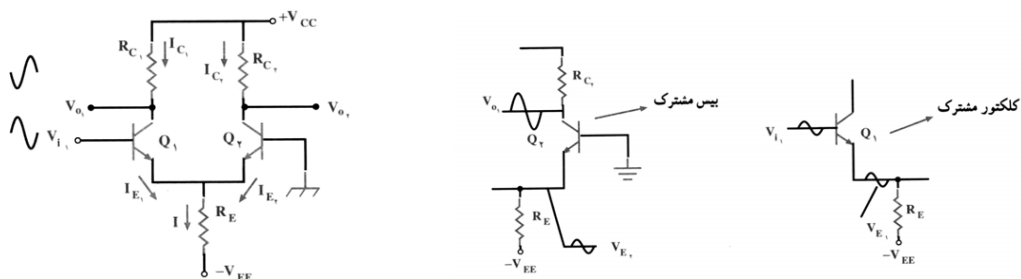
ت



پ

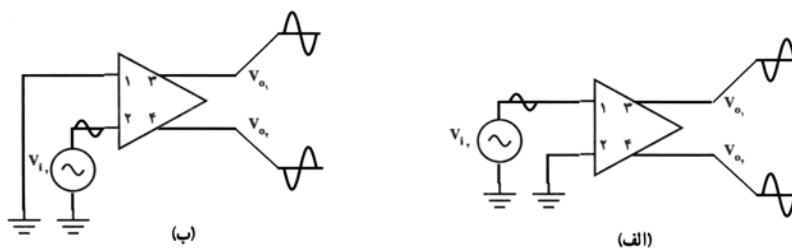
## تقویت کننده تفاضلی با یک ورودی و دو (یک) خروجی:

مدار روبرو یک تقویت کننده ی تفاضلی یک ورودی ، دو خروجی را نشان می دهد. در این مدار برای خروجی  $V_{o1}$  ترانزیستور  $Q_1$  بصورت امیتر مشترک عمل کرده و خروجی  $V_{o1}$  دارای اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه با ورودی است. سیگنال  $V_{E1}$  نیز بعلت کلکتور مشترک عمل کردن  $Q_1$ ، با ورودی هم فاز است. این سیگنال به امیتر  $Q_2$  اعمال شده و چون  $Q_2$  بصورت بیس مشترک عمل می کند، خروجی  $V_{o2}$  با  $V_{E1}$  و در نتیجه با  $V_{i1}$  هم فاز خواهد بود.



**نتیجه:** در تقویت کننده تفاضلی سیگنال خروجی یک ترانزیستور با سیگنال ورودی به خود ترانزیستور دارای اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه است و سیگنال خروجی ترانزیستور دیگر با سیگنال ورودی ترانزیستور اول هم فاز است.

برای سادگی تقویت کننده تفاضلی را با سمبل زیر نمایش می دهند :



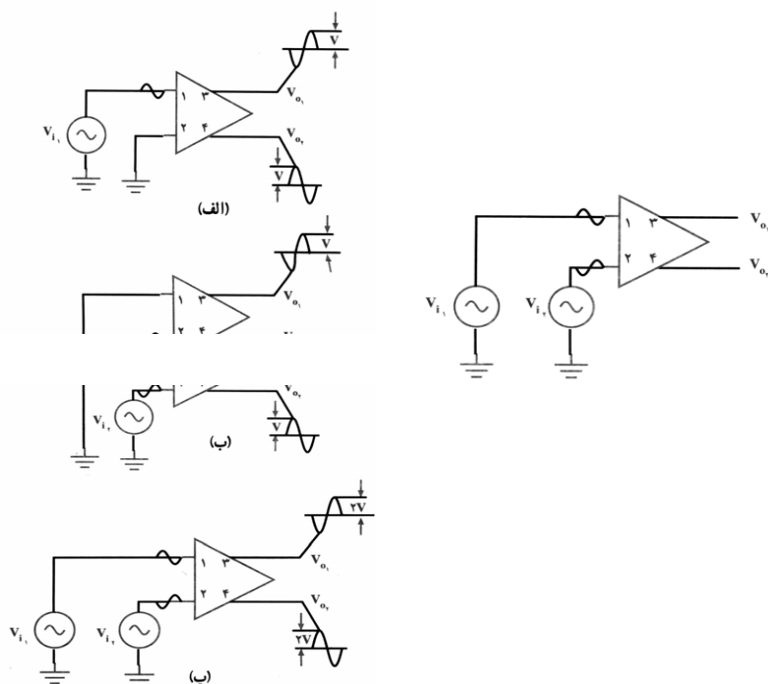
**تقویت کننده تفاضلی با دو ورودی و دو (یک) خروجی:**

برای حالت دو ورودی بسته به اختلاف فاز سیگنال های ورودی دو حالت وجود دارد:

- حالت تفاضلی
- حالت سیگنال مشترک

**- عملکرد تفاضلی تقویت کننده تفاضلی (Differential Mode):**

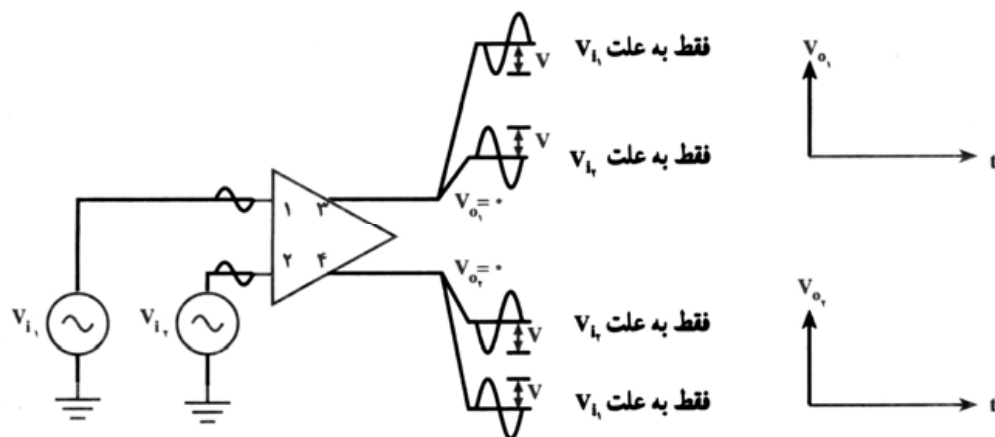
اگر به ورودی های تقویت کننده تفاضلی دو سیگنال با اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه داده شود با استفاده از جمع آثار می توان هریک از خروجی های آنرا تعیین کرد.



پس در حالت تفاضلی دامنه ی سیگنال هر یک از خروجی های تقویت کننده تفاضلی دو برابر حالت تک ورودی است و می توان گفت تقویت کننده اختلاف سیگنال های ورودی را تقویت می کند.

#### - تقویت کننده تفاضلی در حالت سیگنال مشترک (Common Mode):

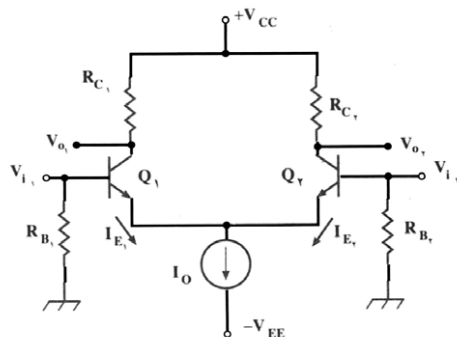
اگر دو سیگنال ورودی به تقویت کننده تفاضلی برابر و هم فاز باشند حالت سیگنال مشترک گفته می شود در این حالت نیز با استفاده از جمع آثار می توان هر یک از خروجی ها را تعیین کرد.





پس در حالت سیگنال مشترک هر دو خروجی تقویت کننده تفاضلی صفر است .  
 به عبارت دیگر چون تقویت کننده ی تفاضلی اختلاف سیگنال های ورودی را تقویت می کند پس  
 برای ورودی های کاملاً برابر و هم فاز دارای خروجی های صفر است.

### تقویت کننده تفاضلی



ولتاژ وجه تفاضلی  $V_d = V_{i2} - V_{i1}$  (Differential Mode):

ولتاژ وجه مشترک  $V_{CM} = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2}$  (Common Mode):

$$V_{i2} = V_{CM} + \frac{1}{2}V_d$$

$$V_{i1} = V_{CM} - \frac{1}{2}V_d$$

در حالت وجود  $V_N$   $V_o = A_v(V_N + V_i) \Leftarrow$

در حالت دوم  $V_{Od} = A_{vd}(V_{i2} - V_{i1}) \Leftarrow$

$$V_{Od} = V_{o2} - V_{o1}$$

$$V_{Ocm} = \frac{V_{o1} + V_{o2}}{2}$$

$$V_o = \frac{A_d}{2}(V_{i2} - V_{i1}) + A_{cm}\left(\frac{V_{i1} + V_{i2}}{2}\right)$$

(بهره ولتاژ مد مشترک:  $A_{cm}$ ) (بهره ولتاژ مد تفاضلی:  $A_d$ )

### اهمیت تقویت کننده های تفاضلی

۱- مصونیت بیشتر در مقابل نویز و تشعشات محیطی

۲- حذف نویز منبع تغذیه

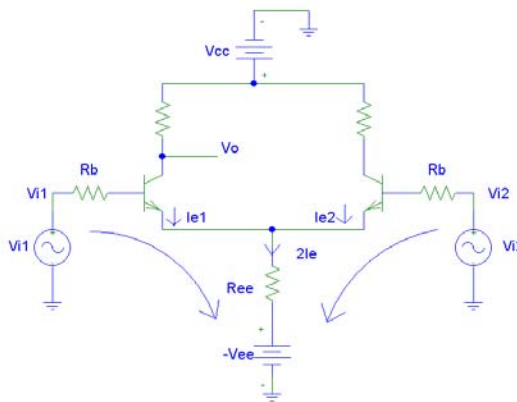
۳- افزایش دامنه نوسان متقارن در ورودی

۴- افزایش بخشی خطی عمل کردن تقویت کننده

این تقویت کننده از پایداری بایاس مطلوبی برخوردار بوده و می تواند بهره ی ولتاژ قابل توجهی را تأمین کند.

یک تقویت کننده تفاضلی فقط تفاضل دو سیگنال ورودی ( $V_d$ ) را تقویت نموده و مقدار متوسط دو سیگنال ورودی ( $V_{cm}$ ) با بهره کوچکی در خروجی ظاهر می شود.

خروجی تک سر:



$$V_O = K_1 V_{i_1} + K_2 V_{i_2}$$

$$V_O = \frac{A_d}{2} (V_{i_2} - V_{i_1}) + A_{cm} \left( \frac{V_{i_1} + V_{i_2}}{2} \right)$$

$$V_O = \underbrace{\left( \frac{A_{cm}}{2} - \frac{A_d}{2} \right)}_{K_1} V_{i_1} + \underbrace{\left( \frac{A_{cm}}{2} + \frac{A_d}{2} \right)}_{K_2} V_{i_2}$$

تحلیل DC

منابع AC خاموش

$$I_{R_{EE}} = 2I_E$$

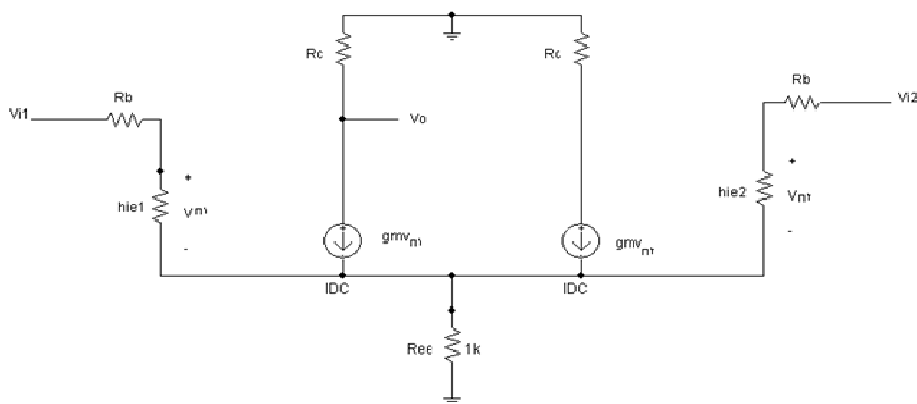
$$I_{E_1} = I_{E_2} = I_E$$

$$g_{m_1} = g_{m_2} = \frac{I_C}{V_T} \text{ \& } g_m = \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$$

$$kvl : \begin{cases} R_B I_B + V_{BE_1} + R_{EE} \times 2I_E - V_{EE} = 0 \\ I_B = \frac{I_E}{1+\beta} \end{cases} \Rightarrow I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{\frac{R_B}{1+\beta} + 2R_{EE}}$$

روش حل شماره ۱:

استفاده از تحلیل سیگنال کوچک



$$\rightarrow i_{b_1} = \frac{V_{\pi_1}}{R_{\pi_1}}$$

$$kvl : -V_{i_1} + R_B \frac{V_{\pi_1}}{R_{\pi_1}} + V_{\pi_1} + R_{EE} \left( \frac{V_{\pi_1}}{R_{\pi_1}} + g_m V_{\pi_1} + g_m V_{\pi_2} + \frac{V_{\pi_2}}{R_{\pi_2}} \right) = 0$$

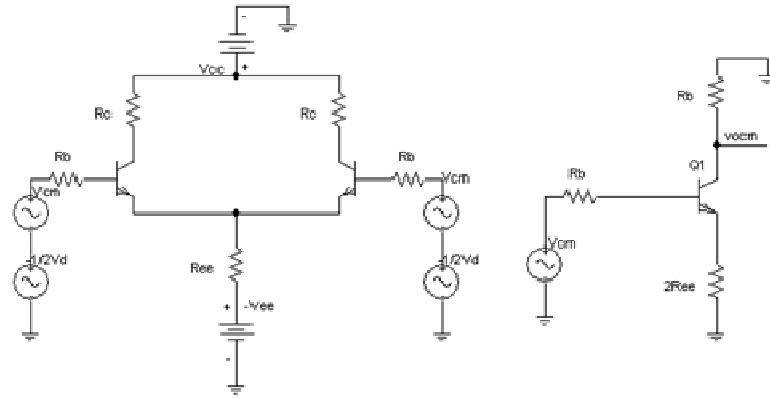
$$V_0 = -g_m V_{\pi_1} \times R_C$$

$$V_0 = -2g_m V_{\pi_1} \times R_C \quad \text{اگر خروجی دو سر باشد آنگاه:}$$

روش حل شماره ۲:

استفاده از مدارات وجه مشترک و وجه تفاضل

مدار در حالت مشترک



$$i_{e_1} = i_{e_2} \rightarrow i_{R_{EE}} = 2i_e$$

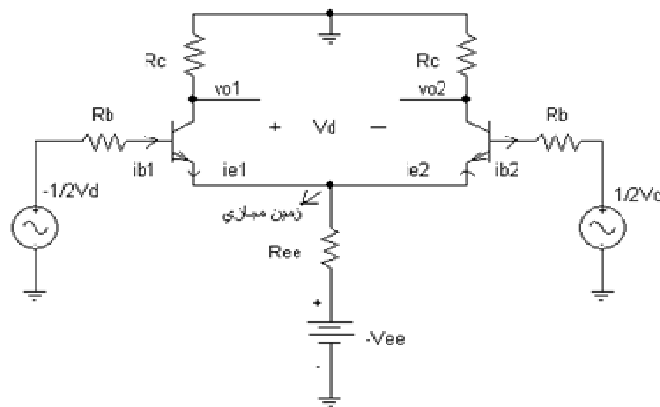
نیم مدار مد مشترک

$$g_m = \frac{\beta}{r_\pi} = \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$$

$$\frac{V_{O_{cm}}}{V_{cm}} = \frac{V_{O_{cm}}}{V_b} \times \frac{V_b}{V_{cm}} = \frac{-g_m \times R_C}{1 + g_m 2R_{EE}} \times \frac{r_\pi + 2R_{EE}(1 + \beta)}{r_\pi + 2R_{EE}(1 + \beta) + R_b}$$

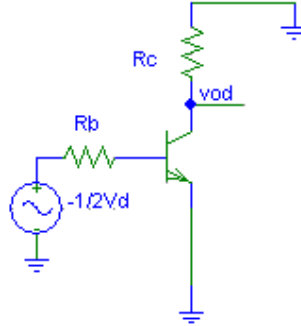
$$\frac{V_{O_{CM}}}{V_{CM}} = \frac{-\beta R_C}{R_b + r_\pi + (1 + \beta) 2R_{EE}} \approx \frac{-\beta R_C}{(1 + \beta) 2R_{EE}} \approx \frac{-R_C}{2R_{EE}}$$

مدار در حالت تفاضلی



$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{2} V_d \\ -\frac{1}{2} V_d \end{array} \right\} \Rightarrow i_{b_2} = -i_{b_1} \Rightarrow i_{C_1} = -i_{C_2} \rightarrow i_{R_{EE}} = 0$$

الف) حالت Single Output (خروجی تک سر)



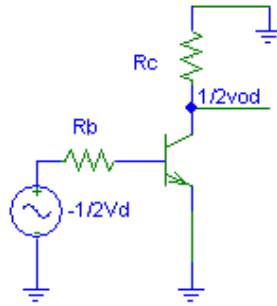
$$V_{od} = \left( -\frac{1}{2}V_d \right) \frac{(-\beta R_C)}{(R_B + r_\pi)}$$

$$\frac{V_{od}}{V_d} = \frac{1}{2} \frac{\beta R_C}{R_b + r_\pi} \rightarrow A_{V_d} = \frac{V_{od}}{-\frac{1}{2}V_d}$$

$$R_b \ll r_\pi \rightarrow \frac{V_{od}}{V_d} \cong \frac{1}{2} \frac{\beta}{r_\pi} R_C = \frac{1}{2} g_m R_C$$

$$A_V = -\frac{1}{2} \frac{-g_m R_C}{1 + g_m(0)} = \frac{1}{2} g_m R_C$$

ب) حالت Differential Output (خروجی تفاضلی)



$$\frac{\frac{1}{2}V_{od}}{-\frac{1}{2}V_d} = \frac{-\beta R_C}{R_b + r_\pi} \Rightarrow \frac{V_{od}}{V_d} = \frac{\beta R_C}{R_b + r_\pi} \approx \frac{\beta R_C}{r_\pi} \approx g_m R_C$$

$$A_d = -\frac{-g_m R_C}{1 + g_m(0)} = g_m R_C$$

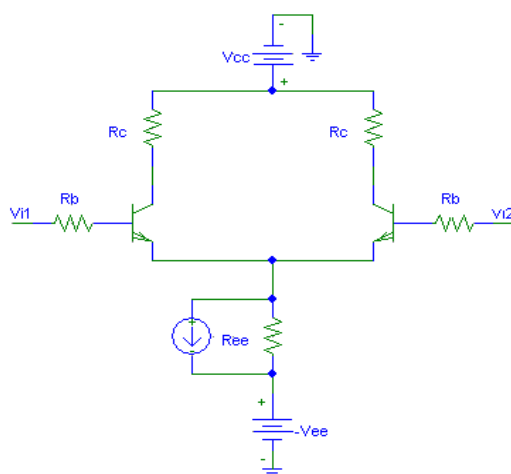
## Common Mode Rejection Ratio

(نسبت حذف مد مشترک)

$$CMRR = \left| \frac{A_{V_d}}{A_{V_{cm}}} \right|$$

$$CMRR = \left| \frac{\frac{1}{2} g_m R_C}{\frac{-R_C}{2R_{EE}}} \right| = g_m R_{EE} \rightarrow \text{خروجی تک سر}$$

$$CMRR = \left| \frac{g_m R_C}{\frac{-R_C}{2R_{EE}}} \right| = 2 g_m R_{EE} \rightarrow \text{خروجی تفاضلی (دو سر)}$$



DC →

$R_{O0}$  وجود ندارد

AC → منبع جریان حذف

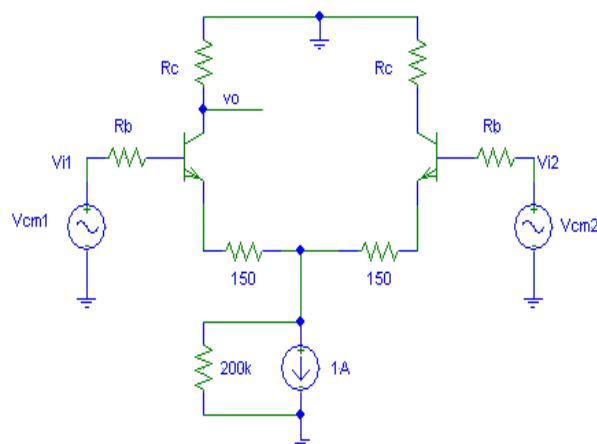
$R_{O0}$  بزرگ

**توضیح :**

با توجه به مقدار  $CMRR$  برای افزایش این مقدار که هدف مدارات تفاضلی است می بایست مقاومت  $R_{EE}$  افزایش یابد ولی افزایش این مقاومت در حالت DC موجب کاهش جریان کلکتور و در پی آن کاهش  $g_m$  می شود، که کاهش  $g_m$  خود موجب کاهش  $CMRR$  می شود بهترین راه حل برای افزایش همزمان  $g_m$  و  $CMRR$  استفاده از یک منبع جریان در امیتر است، این منبع جریان در حالت DC جریان را برای دو ترانزیستور فراهم می کند و در حالت AC این منبع جریان یک مقاومت خروجی بزرگ از خود نشان می دهد که این مقاومت موجب افزایش  $CMRR$  می گردد.

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

**مثال:** در مدار شکل زیر مقاومت منبع جریان  $200k\Omega$  است.  
 الف) گین تفاضلی، گین مد مشترک و CMRR را بدست آورید.  
 ب) اگر  $V_1 = V_s, V_2 = 0$  آنگاه بهره مدار را بدست آورید.



دامنه خطی بودن ولتاژ ورودی را می توان با افزودن دو مقاومت امیتر مطابق شکل بالا افزایش داد.

### الف) تحلیل DC

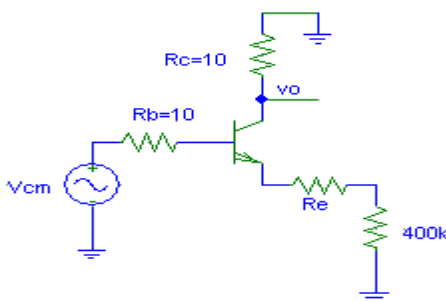
$$I_{E_1} = I_{E_2} = \frac{I}{2} = 0.5mA$$

$$g_{m_1} = g_{m_2} = g_m = \frac{I_C}{V_T} = 20 \frac{mA}{V}$$

### ب) تحلیل AC

۱) مدار مد مشترک

۲) مدار مد تفاضلی



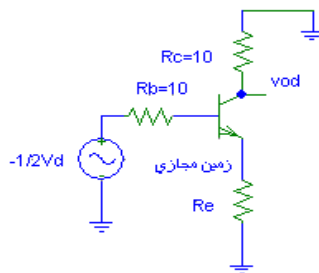
نیم مدار مد مشترک  $\Rightarrow$

$$A_{V_{CM}} = \frac{V_{O_{CM}}}{V_{CM}}$$

$$A_{V_{CM}} = \frac{-\beta \times R_C}{R_b + r_\pi + (1 + \beta)[R_E + 2 \times 200]} = -0.025$$

$$A_{V_{CM}} = \frac{-g_m(10)}{1 + g_m \underbrace{(400 + 150)}_{R_E}} \times \frac{R_i}{R_i + R_b}$$

یا به صورت  $g_m$  حل شود:



⇒ نیم مدار تفاضلی

$$V_{O_d} = \frac{\left(-\frac{1}{2}V_d\right)(-\beta R_C)}{R_b + r_\pi + (1 + h_{fe})R_E}$$

$$V_{O_d} = \frac{1}{2} \frac{\beta R_C}{R_b + r_\pi + (1 + h_{fe})R_E} = 16.6$$

$$CMRR = \left| \frac{A_{V_d}}{A_{V_{CM}}} \right| = \left| \frac{16.6}{-0.025} \right| = 663.25$$

(ب)

$$V_O = A_{d/2} \left( \cancel{V_{i_2}} - V_{i_1} \right) + A_{CM} \left( \frac{\cancel{V_{i_2}} + V_{i_1}}{2} \right)$$

/|

$$A_V = \frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{2} A_{CM} - \frac{1}{2} A_d \approx -8.3$$

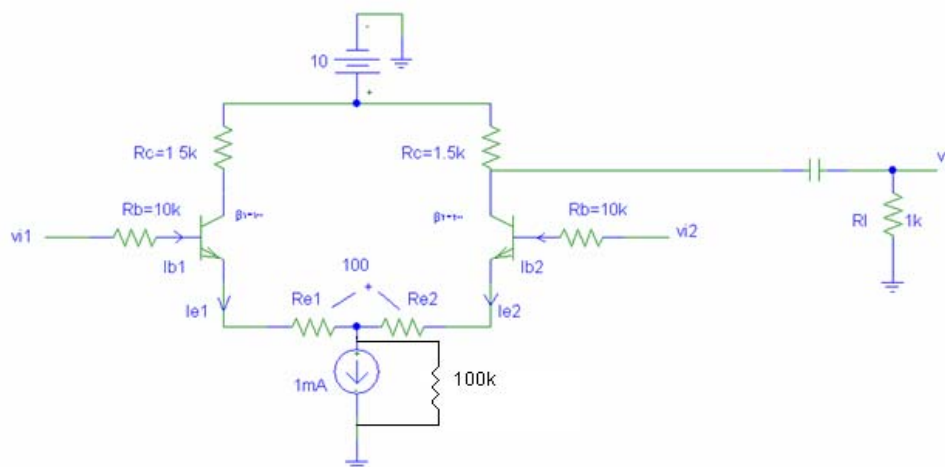
نکته:



در صورتی که به هر دلیلی مدار نامتقارن باشد با استفاده از مقاومت های  $R_{E_1}, R_{E_2}$  سعی می کنیم مدار را متقارن نمائیم. منظور از تقارن مدار برابری جریان امیتر آنها است.

### مثال:

در مدار شکل زیر  $\beta_1 = 100, \beta_2 = 200$  می باشد، مقادیر  $R_{E_1}, R_{E_2}$  به منظور متقارن مدار بدست آورده و گین تفاضلی و گین مشترک را محاسبه نمائید.



### DC تحلیل :

+

برای تقارن  $I_{E_1} = I_{E_2}, I_{B_1} = I_{B_2}, V_{BE_1} = V_{BE_2}$

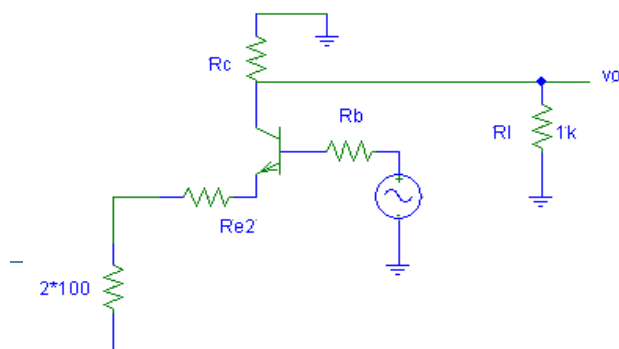
$$kvl : R_b I_{B_1} + V_{BE_1} + R_{E_1} I_{E_1} - R_{E_2} I_{E_2} - V_{BE_2} - R_b I_{B_2} = 0$$

$$I_{EE} = 1^{mA} \Rightarrow I_{E_1} = I_{E_2} = 0.5$$

$$I_{B_1} = \frac{I_E}{1 + \beta_1}, I_{B_2} = \frac{I_E}{1 + \beta_2}$$

$$R_b \frac{I_{E_1}}{1 + \beta_1} + R_{E_1} I_{E_1} - R_{E_2} I_{E_1} - R_b \frac{I_{E_1}}{1 + \beta_2} = 0$$

$$\begin{cases} \frac{10}{1 + \beta_1} + R_{E_1} = R_{E_2} + \frac{10}{1 + \beta_2} \\ R_{E_1} + R_{E_2} = 100 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_1 = 25\Omega \\ R_2 = 75\Omega \end{cases}$$



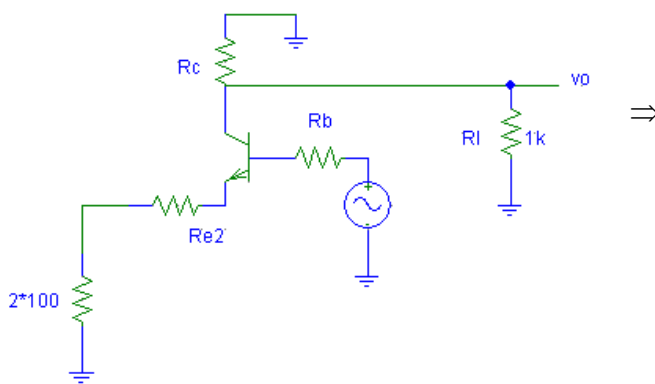
⇒

نیم مدار مشترک

$$A_{CM} = \frac{V_{OCM}}{V_{CM}} = \frac{-\beta(R_C \parallel R_L)}{R_b + r_{\pi} + (1 + hfe_2)(R_{E_2} + 2 \times 100)} = -3 \times 10^{-3}$$

$$A_{CM} = \frac{-g_m(R_C \parallel R_L)}{1 + g_m(200 + R_{E_2})} \times \frac{R_i}{R_i + R_b}$$

یا به صورت  $g_m$



نیم مدار تفاضلی

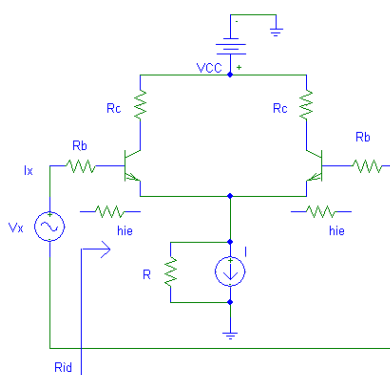
$$A_d = \frac{1}{2} \times \frac{-g_m(R_C \parallel R_L)}{1 + g_m(0.075)} \times \frac{R_i}{R_i + R_b} \quad g_m \text{ روش}$$

$$V_{O_d} = \frac{\left( +\frac{1}{2}V_d \right) \left[ -\beta(R_C \parallel R_L) \right]}{R_b + r_{\pi_2} + (1 + \beta_2)R_{E_2}} = 2.4$$

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_{CM}} \right| = 797.7$$

## محاسبه مقاومت ورودی تقویت کننده های تفاضلی

$$R_{i_d} = \frac{V_x}{I_x} \quad \text{مدار در حالت تفاضلی}$$



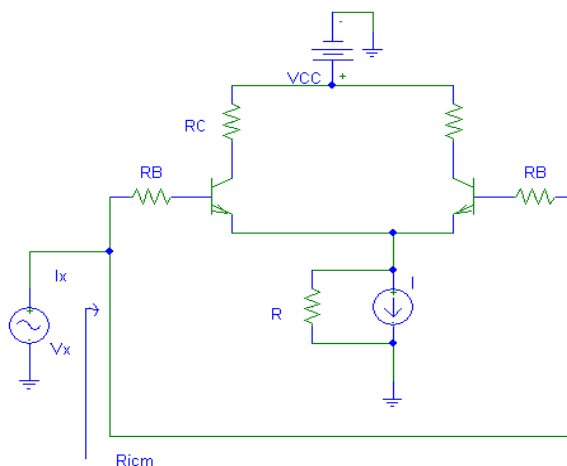
$$R_{i_d} = \frac{V_x}{I_x} = R_b + r_{\pi} + R_b + r_{\pi} = 2(R_b + r_{\pi})$$

→ اگر  $R_{E1}$  و  $R_{E2}$  نیز باشند

$$R_{i_d} = R_b + r_{\pi} + (1 + hfe_1)R_{E1} + R_b + r_{\pi} + (1 + hfe_2)R_{E2}$$

مقاومتهایی که در E باشند بالا می آیند ولی مقاومت R بالا نمی آید زیرا در مد تفاضلی زمین مجازی می شود.

## محاسبه مقاومت ورودی تقویت کننده های مد مشترک



$$R_{i_{CM}} = \frac{V_x}{I_x} = \frac{V_x}{2i_b} = [R_b + r_\pi + (1 + \beta) 2R_E] || [R_b + r_\pi (1 + \beta) 2R_E]$$

$$R_{i_{CM}} = \frac{1}{2} [R_b + r_\pi + (1 + \beta) 2R_E]$$

### طراحی و پیاده سازی تقویت کننده های تفاضلی روی IC

← دو مشکل طراحی مدارهای IC عبارتند از:

(۱) برای بایاس کردن عناصر نیاز به مقاومت داریم که می توانیم به جای آن از منابع جریان استفاده کنیم.

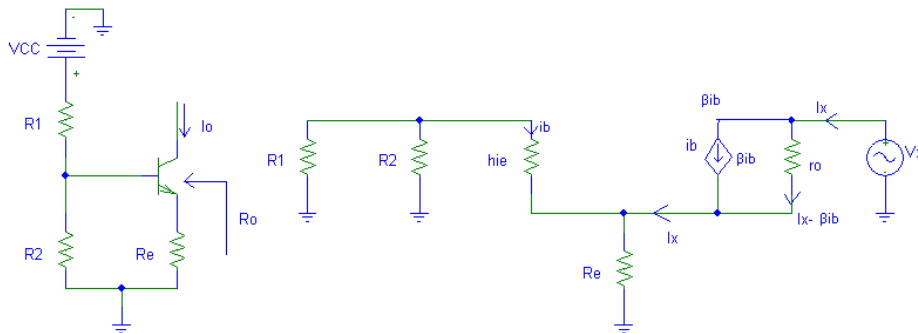
(۲) برای بار تقویت کننده نیاز به مقاومت داریم که سعی می کنیم از بار فعال برای آن استفاده کنیم.

### استفاده از منابع جریان در مدارات تفاضلی فوق

معرفی منابع جریان:

#### ۱- منابع جریان ترانزیستوری

سیگنال کوچک:



$$R_O = \frac{V_x}{I_x}$$

$$V_B = \frac{V_{CC} \times R_2}{R_2 + R_1} \Rightarrow I_E \approx I_C = I_O = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E}$$

$$\begin{cases} V_x = r_o (I_x - \beta i_b) + I_x [R_E || (h_{i_e} + R_B)] \\ i_b = -I_x \times \frac{R_E}{R_E + h_{i_e} + R_B} \end{cases} \quad R_B = R_1 || R_2$$

$$R_O = \frac{V_x}{I_x} = r_o \left( 1 + \frac{\beta R_E}{R_E + R_B + h_{i_e}} \right) + [R_E || (R_B + h_{i_e})]$$

$$R_O \approx r_o \left( 1 + \frac{\beta R_E}{R_E + R_B + h_{i_e}} \right)$$

$$R_E = 0 \rightarrow R_O = r_o$$

$$R_E = \infty \rightarrow R_O = r_o (1 + \beta)$$

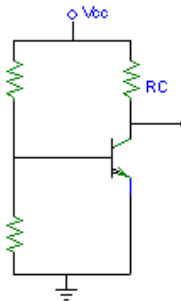
یک منبع جریان ایده آل باید از مقاومت داخلی (خروجی) بسیار بزرگ (بی نهایت) برخوردار باشد.

### طراحی و پیاده سازی تقویت کننده دیفرانسیل روی IC:

دو مشکل طراحی مدارهای روی آی سی :

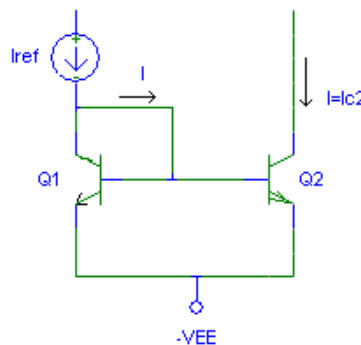
(۱) بایاس کردن عناصر اکتیو (نیاز به مقاومت دارد)

(۲) بار تقویت کننده ها (نیاز به مقاومت دارد)



برای رفع مشکل بایاس، از بایاس با منبع جریان روی آی سی استفاده می شود، اما چون ایجاد تعداد زیادی منبع جریان برای بایاس نقاط مختلف، خود نیاز به تعدادی مقاومت دارد، لذا از روشی به نام آینه جریانی برای این کار استفاده می شود که در آن از یک منبع جریان در تعداد زیادی منبع جریان تکرار می گردد.

### ۲- منبع جریان آینه ای



$$V_{BE1} = V_{BE2} \Rightarrow I_{C1} = I_{C2}$$

$$I = I_{B1} + I_{B2} = 2I_{B1}$$

$$I_{C1} = I_{REF} - I = I_{REF} - 2I_{B1} = I_{REF} - \frac{2I_{C1}}{\beta}$$

$$I_O = I_{C1} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta}} \Rightarrow I_O = I_{REF} \Rightarrow \beta \gg 2$$

$$g_m = \frac{1}{r_\pi}$$

$$I_C \propto I_s \text{ \& } I_s \propto \text{سطح مقطع اميتر} \Rightarrow I_C \propto \text{سطح مقطع اميتر}$$

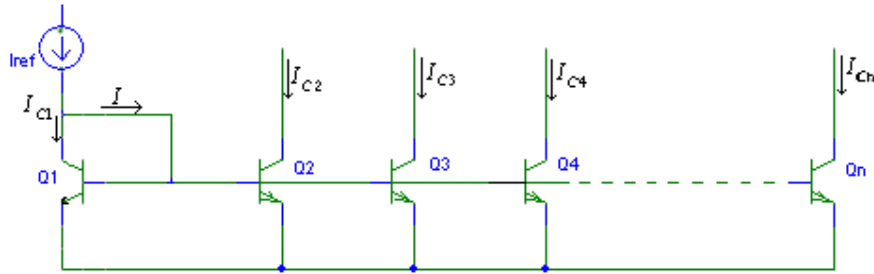
$$I_C = I_s e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{C0}$$

$$(50 < V_A < 100) \quad I_C = I_s e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$

$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{I_{s1}}{I_{s2}} \frac{1 + \frac{V_{CE1}}{V_A}}{1 + \frac{V_{CE2}}{V_A}}$$

$$Q2 \text{ مشابه } Q1 \quad \frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{1 + \frac{V_{CE1}}{V_A}}{1 + \frac{V_{CE2}}{V_A}}$$

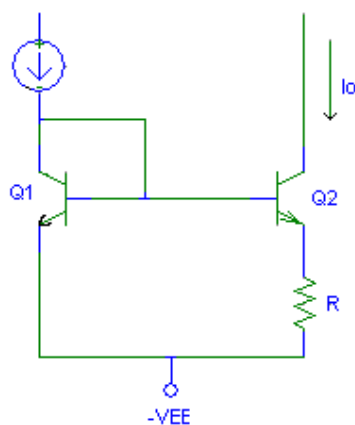


$$I = N I_{B1} = N \frac{I_{C1}}{\beta}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{CN} = I_{REF} - \frac{N I_{C1}}{\beta}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \dots = I_{CN} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{N}{\beta}}$$

### ۳- منبع جریان ویدلر (Widlar)



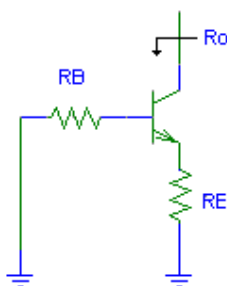
$$\text{kv1: } V_{BE1} - V_{BE2} = RI_O$$

$$V_{BE1} = V_T \ln\left(\frac{I_{REF}}{I_S}\right) \text{ \& } V_{BE2} = V_T \ln\left(\frac{I_O}{I_S}\right)$$

$$V_T \ln\left(\frac{I_{REF}}{I_S}\right) - V_T \ln\left(\frac{I_O}{I_S}\right) = RI_O$$

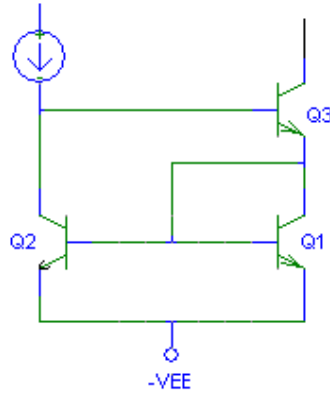
$$V_T \ln\left(\frac{I_{REF}}{I_O}\right) = RI_O$$

رابطه نهایی ویدلر



$$R_O = [R_B || (R_B + r_\pi)] + \left(1 + \frac{g_m R_E}{1 - \frac{R_E + R_S}{r_\pi}}\right) r_O$$

۴- منبع جریان ویلسون :



$$I_{REF} = \frac{V_{CC} - V_{BE3} - V_{BE2} - (-V_{EE})}{R_{REF}}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = I_{REF} - I_{B3}$$

$$= I_{REF} - \frac{I_{E3}}{\beta + 1}$$

$$= I_{REF} - \frac{I + I_{C1}}{\beta + 1}$$

$$= I_{REF} - \frac{2I_{B1} + I_{C1}}{\beta + 1}$$

$$I_{C1} = I_{REF} - \frac{I_{C1} + 2I_{C1}/\beta}{\beta + 1}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{1}{\beta + 1} + \frac{2}{\beta(\beta + 1)}}$$

$$I_O = I_{C3} = \beta I_{B3} = \beta(I_{REF} - I_{C2})$$

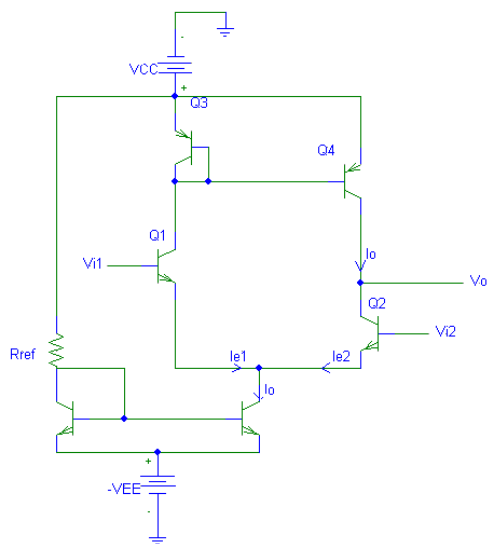
$$I_O = I_{REF} \left( \frac{\beta^2 + 2\beta}{\beta^2 + 2\beta + 2} \right) \cong I_{REF} \Rightarrow \beta^2 + 2\beta \gg 2$$



$$R_0 = \beta \frac{r_0}{2}$$

$$R_o = \frac{1}{g_m + \frac{1}{r_\pi \parallel r_o}} = \frac{1}{g_m + \frac{1}{r_\pi}} = \frac{1}{\frac{g_m r_\pi + 1}{r_\pi}} = \frac{1}{g_m}$$

مثال:

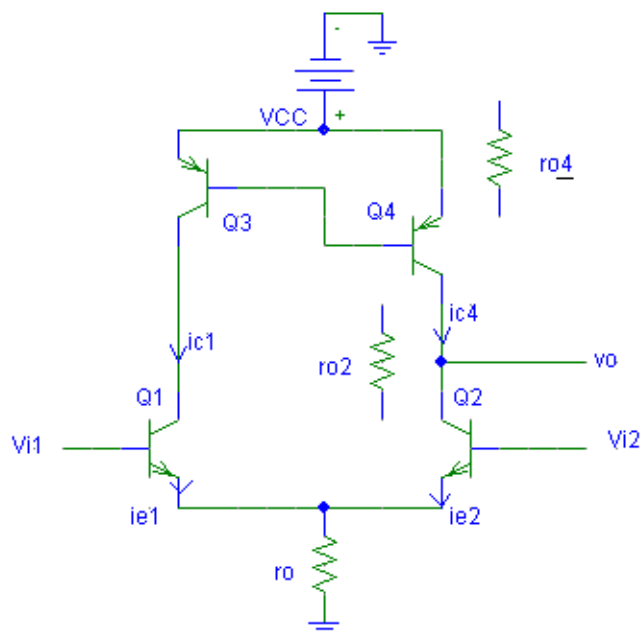


تحلیل  
:DC

$$I_{Ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE(on)} + V_{EE}}{R_{REF}}$$

$$I_O \approx I_{Ref} \rightarrow I_{E_1} = I_{E_2} = \frac{I_O}{2} \rightarrow g_m = \frac{I_C}{V_T} = 40I_e \rightarrow g_m = 40 \frac{I_O}{2}$$

مدار تفاضلی با بار فعال



## تحلیل AC

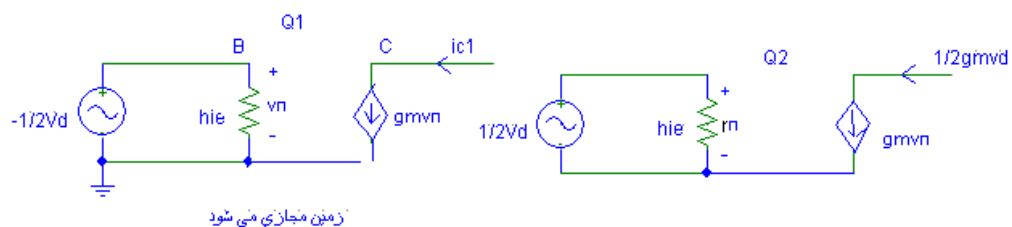
$$V_{b1} = V_{b2} = V_{CM} \rightarrow i_{b1} = i_{b2} \Rightarrow i_{e1} = i_{e2} \Rightarrow i_{C1} = i_{C2}$$

$$Q_4, Q_3 \Rightarrow i_{C3} = i_{C4} \text{ آینه ای } Q_1 \rightarrow i_{C1} = i_{C3} \Rightarrow \text{سری } Q_3$$

$$i_O = i_{C4} - i_{C2} = 0 \rightarrow V_{O_{CM}} = 0$$

$$V_{cm} = V_{i1} = V_{i2}$$

## مد تفاضلی Diff ، تحلیل AC



$$Q_1 \quad i_{C1} = i_{C3} = i_{C4} = -\frac{1}{2} g_m V_d \text{ با } Q_3 \text{ سری}$$

منبع جریان آینه ای  $Q_4, Q_3$

$$I_{C2} = \frac{1}{2} g_m V_d$$

$$V_{\pi} = \frac{-1}{2} V_d$$

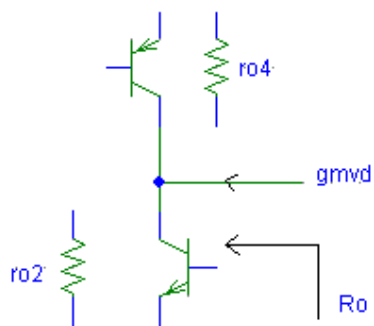
$$i_O = 2 \times \frac{1}{2} g_m V_d$$

$$R_O = r_O \parallel r_o = \frac{r_o}{2}$$

$$V_{Od} = -R_O I_O$$

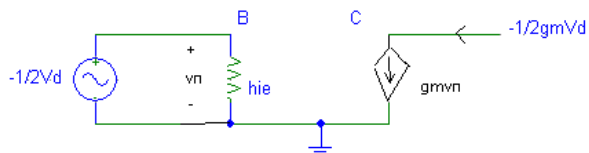
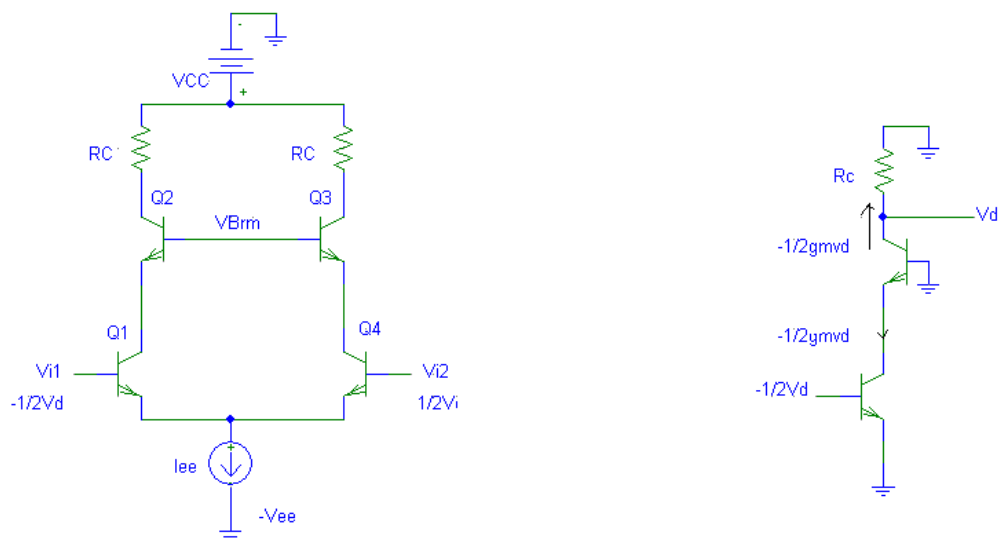
$$V_{Od} = -\frac{r_o}{2} \times g_m V_d$$

$$\frac{V_{Od}}{V_d} = -g_m \frac{r_o}{2} \rightarrow |A_{V_d}| = g_m \frac{r_o}{2}$$



### تقویت کننده تفاضلی (Cascade)

نیم مدار تفاضلی (امیتر زمین مجازی می شود)

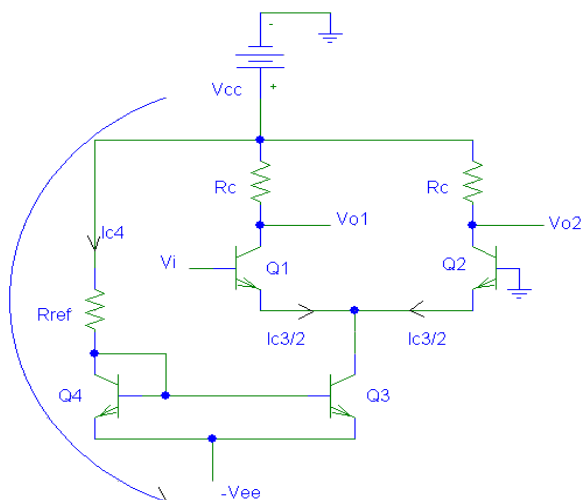


$$V_{O_d} = -\left(-\frac{1}{2}\right) g_m V_d R_c \rightarrow V_{O_d} = \frac{1}{2} g_m V_d R_c$$

$$\text{نیم مدار مد تفاضلی} \quad A_{V_d} = \frac{V_{O_d}}{V_d} = \frac{1}{2} g_m R_c$$

مثال:

در مدار شکل زیر مقادیر  $A_{V_c} = \frac{V_{O_c}}{V_i}$ ,  $A_{V_d} = \frac{V_{O_d}}{V_i}$  را بدست آورید. به ازای  $V_{i2}=0$



## تحلیل DC

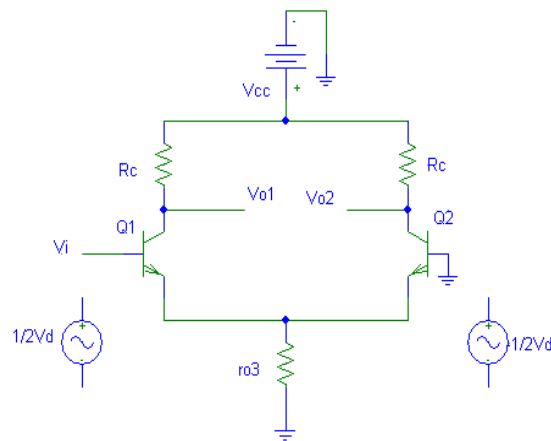
$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE} - (-V_{EE})}{R_{ref}}$$

$$I_{C4} \approx I_{Ref}$$

$$Q_4, Q_3 \quad I_{C3} = I_{C4} \approx I_{ref} \quad I_{E1} = I_{E2} = \frac{I_{C3}}{2} \quad \text{منبع جریان آئینه ای}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad \& \quad h_{i_e} = \frac{\eta h_{f_e} V_T}{I_C}$$

## تحلیل AC



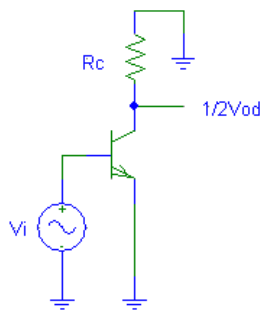
$$V_{i_2} = 0 \quad V_{i_1} = V_i$$

$$\begin{cases} V_{CM} = \frac{V_{i_1} + V_{i_2}}{2} = \frac{V_{i_1}}{2} \\ V_d = V_i - 0 \end{cases}$$

$$V_{i_1} = V_{CM} + \frac{1}{2}V_d$$

$$V_{i_2} = V_{CM} - \frac{1}{2}V_d$$

تحلیل AC : نیم مدار تفاضلی

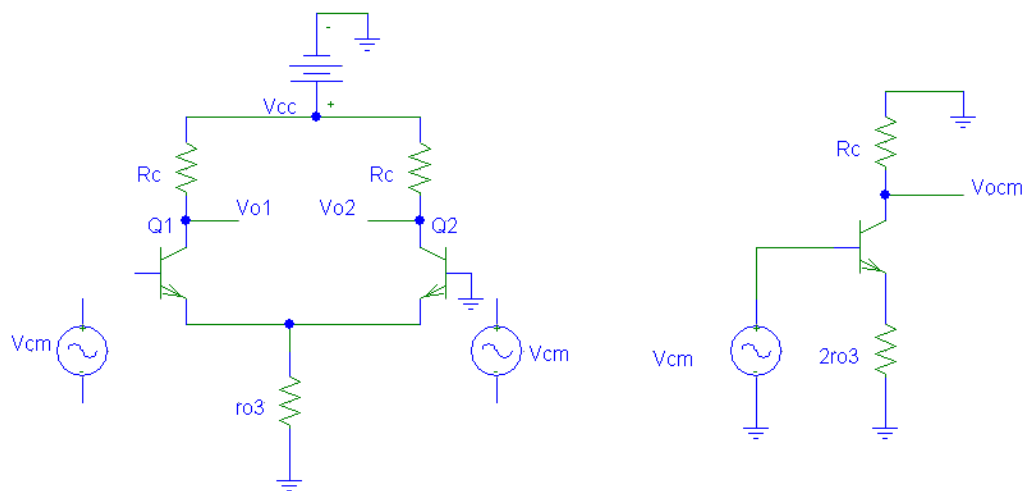


$$\frac{V_{od}/2}{V_{id}/2} = \frac{-\beta R_C}{h_{i_e}} = -g_m R_C$$

$$\frac{V_{id}}{V_d} = g_m R_C$$

$$\frac{V_{od}}{V_{id}} = -g_m R_C \xrightarrow{V_i = V_d} \frac{V_{od}}{V_i} = -g_m R_C$$

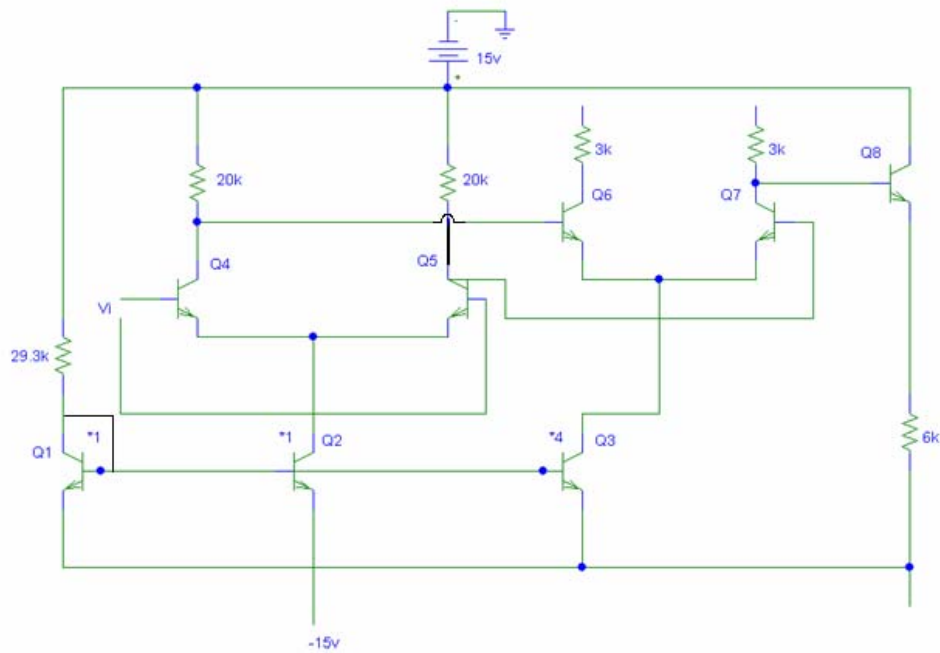
تحلیل AC : نیم مدار مشترک



$$\frac{V_{O_{CM}}}{V_{CM}} = \frac{-g_m R_C}{1 + g_m \times 2r_{O_3}} \approx -\frac{R_C}{2r_{O_3}}$$

$$A_{V_c} = \frac{1}{2} \frac{V_{O_{CM}}}{V_{CM}} = \frac{V_{O_c}}{V_i} = -\frac{R_C}{4r_{O_3}}$$

مثال: در مدار شکل زیر گین مدار را بدست آورید.



## تحلیل DC 1

$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}(on) - (-V_{EE})}{R_{ref}} = \frac{15 - 0.7 + 15}{29.3} = 1mA$$

$$I_{C_2} = I_{C_1} = 1mA \quad \text{منبع جریان آینه ای}$$

$$I_{C_1} \approx I_{Ref} = 1mA$$

$$I_{C_4} = I_{C_5} = \frac{I_{C_2}}{2} = 0.5mA$$

$$I_{C_3} = 4I_{C_1} = 4mA$$

$$I_{C_6} = I_{C_7} = \frac{I_{C_3}}{2} = 2mA$$

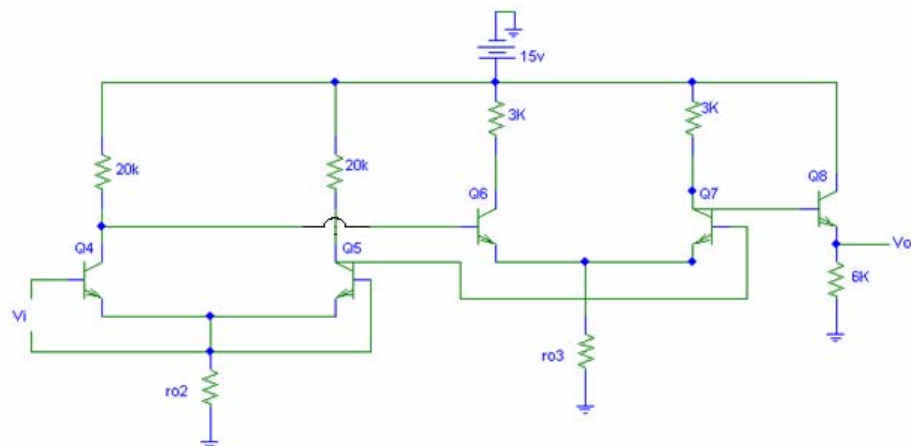
برای بدست آوردن  $I_{C_8}$ ، می زنیم (در قسمت راست مدار)

$$V_{CC} - 3I_{C_7} - V_{BE} - 6I_{C_8} - (-15) = 0 \Rightarrow I_{C_8} \approx 3.9mA \Rightarrow g_{m8} = 155.34 \frac{mv}{A}$$

$$g_{m4} = g_{m5} = 40 \times 0.5 = 20 \frac{mv}{A}$$

$$g_{m6} = g_{m7} = 40 \times 2 = 80 \frac{mv}{A}$$

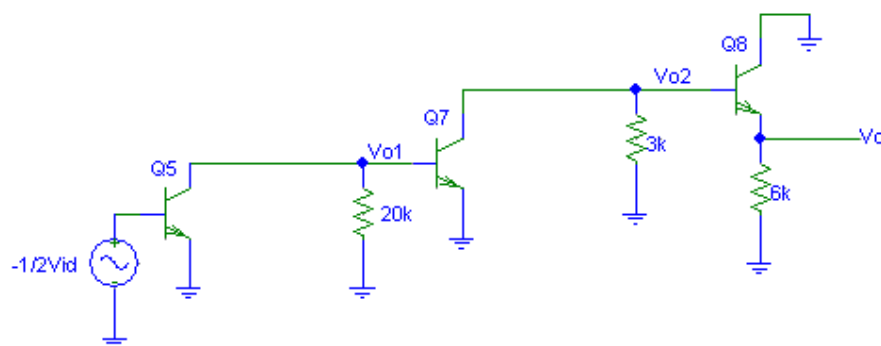
/



$$V_{i_2} = -\frac{1}{2}V_i \quad V_{i_1} = \frac{1}{2}V_i$$

$$V_d = -\frac{1}{2}V_i - \frac{1}{2}V_i = -V_i \xrightarrow{V_{i_1}-V_{i_2}} V_d = V_i$$

$$V_{CM} = \frac{\frac{1}{2}V_i + \left(-\frac{1}{2}V_i\right)}{2} = 0$$



$$A'_{V_d} = \frac{V_o}{-\frac{1}{2}V_{i_d}} = \frac{V_o}{V_{o_2}} \times \frac{V_{o_2}}{V_{o_1}} \times \frac{V_{o_1}}{-\frac{1}{2}V_{i_d}} \rightarrow A_{V_d} = -\frac{1}{2}A'_{V_d}$$

$$A_{V_1} = \frac{V_o}{V_{o_2}} = \frac{g_{m_8} \times 6}{1 + g_{m_8} \times 6} \approx 1 \quad \text{کلکتور مشترک}$$

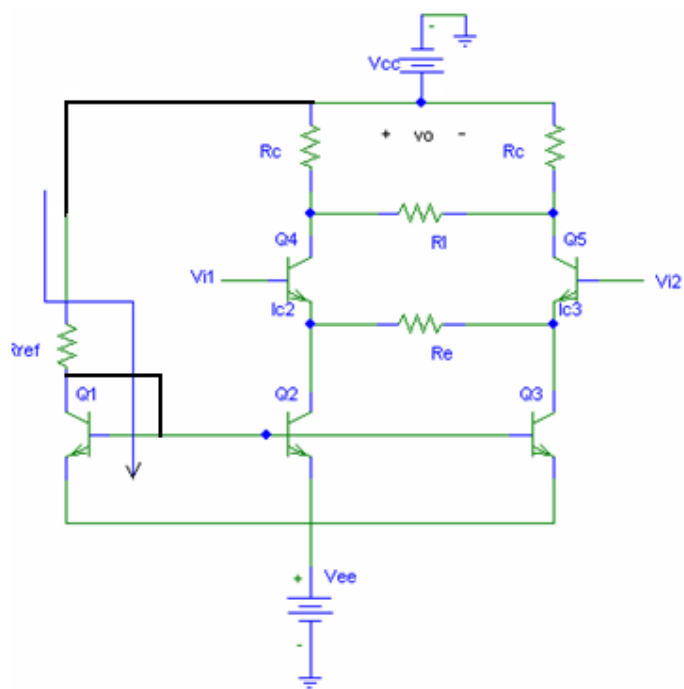
$$A_{V_2} = \frac{V_{o_2}}{V_{o_1}} = \frac{-g_{m_7} \left( 3 \parallel \left[ h_{i_e} + (1 + \beta_8) 6 \right] \right)}{1 + g_{m_7} (0)} \quad \text{امیتر مشترک}$$

$$A_{V_3} = \frac{V_{o_1}}{-\frac{1}{2}V_{i_d}} = \frac{-g_{m_5} \left( 20 \parallel h_{i_{e7}} \right)}{1 + g_{m_5}^{(0)}}$$



**مثال:**

در مدار شکل زیر گین ولتاژ تفاضلی و گین مشترک مدار را بدست آورید.



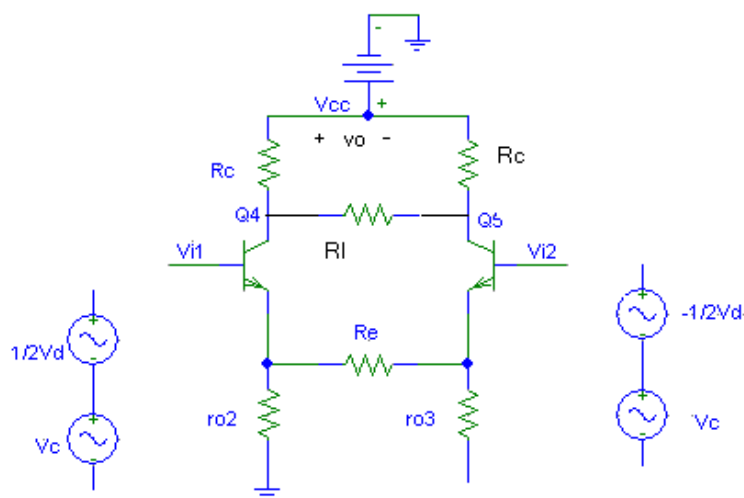
## تحليل DC

$$I_{\text{Ref}} = I_{C_1} I_{\text{Ref}} = \frac{V_{CC} - V_{BE^{(On)}} - (-V_{EE})}{R_{\text{Ref}}}$$

چون مدار متقارن است و جریان دو سر  $R_L, R_E$  برابر است.

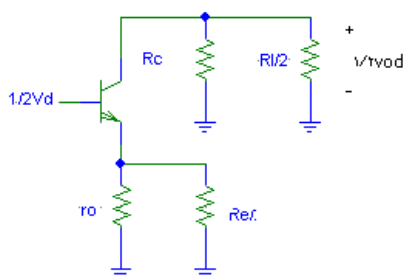
$$I_{C_2} = I_{C_3} = 4I_{Ref} = 4I_{C_1} \rightarrow I_{R_E} = 0, I_{R_L} = 0$$

## تحلیل AC



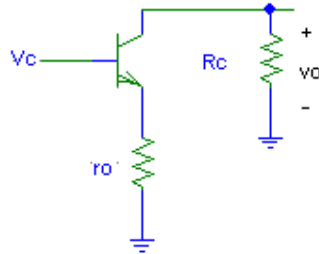
در مد تفاضلی جریان امیتر نصف می شود و مقاومت هم نصف می شود و وسط مقاومت زمین مجازی می شود. در مد مشترک جریان صفر می شود.  
فرض  $r_{o2} = r_{o3} = r_o$  :

## الف) مد تفاضلی



$$A_{v_d} = \frac{\frac{1}{2}V_{o_d}}{\frac{1}{2}V_d} = \frac{-\beta(R_C \parallel R_L/2)}{h_{i_e} + (1+h_{f_e})(r_o \parallel R_E/2)} = \frac{-g_m(R_C \parallel R_L/2)}{1+g_m(r_o \parallel R_E/2)}$$

مد مشترک



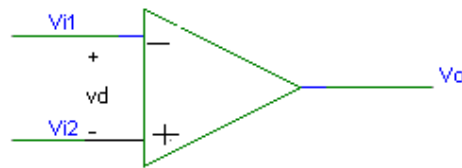
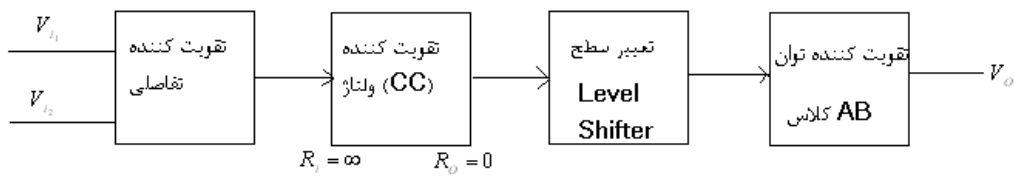
$$\begin{aligned} V_{b_1} &= V_{b_2} = V_{CM} \\ V_{E_1} &= V_{E_2} \Rightarrow I_{R_E} = 0 \\ V_{C_1} &= V_{C_2} \Rightarrow I_{R_E} = 0 \\ &= \frac{-\beta(R_C)}{h_{i_e} + (1+h_{f_e})r_o} = \frac{-g_m R_C}{1+g_m r_o} \end{aligned}$$

نکته مهم:

مقاومت‌های عمود بر راستای تقارن در مد تفاضلی نصف و در مد مشترک حذف می شوند.

## فصل پنجم

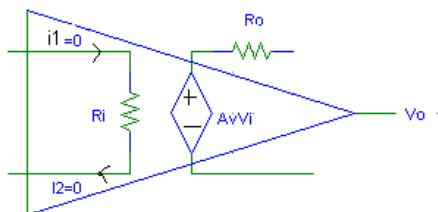
### تقویت کننده های عملیاتی (Op-Amp)



دوست داریم در این تقویت کننده  $\frac{V_o}{V_d}$  بینهایت شود و  $R_i$  و  $R_o$  هم صفر شود.

تقویت کننده عملیاتی ایده آل

$$\begin{cases} R_i = \infty \\ A_{V_d} = \frac{V_o}{V_d} = \infty \\ R_o = 0 \\ A_{V_c} = 0 \end{cases}$$



$$R_i = \infty \rightarrow I_1 = 0 \text{ \& } I_2 = 0$$

$$A_{V_d} = \frac{V_o}{V_d} \rightarrow V_d = 0 \rightarrow V^+ - V^- = 0 \rightarrow V^+ = V^-$$

$V^-$  ولتاژ پایه منفی  $V^+$  ولتاژ پایه مثبت  
در صورتیکه  $R_i$  بینهایت نباشد آنگاه:

$$Op-Amp \begin{cases} R_i \approx 10^5 \\ A_{V_d} = \frac{V_o}{V_d} \approx 10^5 \\ R_o \end{cases}$$

$R_o$  برابر چند ده اهم

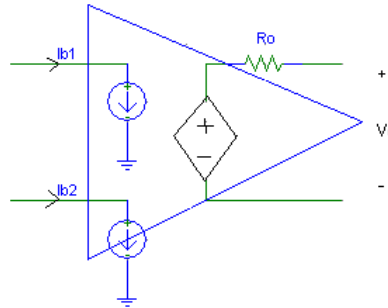
جریان Offset که در رنج نانو آمپر است برابر خواهد بود با:

$$I_{off} = I_{OS} = |I_{B_2} - I_{B_1}|$$

جریان آفست

$$I_B = \left| \frac{I_{B_1} + I_{B_2}}{2} \right|$$

جریان بایاس



← اگر  $\frac{V_o}{V_d}$  بینهایت نباشد ولتاژ offset به وجود می آید:

$$V_{off} = V_{OS} \quad \text{mv}$$

### Op-Amp کاربردهای

- (۱) در الکترونیک: تقویت ولتاژ - تقویت جریان و استفاده به عنوان فیلتر
- (۲) کامپیوتر آنالوگ: استفاده برای جمع - تفریق - تقسیم - انتگرال گیری - مشتق گیری - لگاریتم گیری و نمایی
- (۳) استفاده به عنوان اسیلاتورهای مربعی: سینوسی و مثلثی در تکنیک پالس و الکترونیک ۳ و مدارهای مخبراتی (نوسانگر)

یعنی با ورودی DC خودش نوسان می کند و خروجی سینوسی یا مربعی یا مثلثی می دهند.

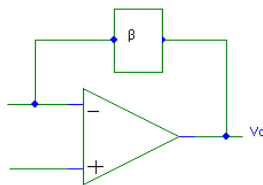
$$V^+ > V^- \rightarrow V_o = +V_{sat} \quad \text{اشباع مثبت}$$

$V_o$  برابر با  $+V$  می شود با اختلاف حداکثر 2V کمتر.

$$V^- > V^+ \rightarrow V_o = -V_{sat} \quad \text{اشباع منفی}$$

فیدبک منفی

همراه با فیدبک منفی

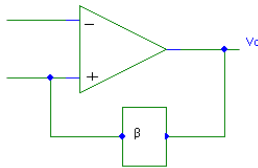


$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1+A\beta}$$

که در کاربرد ۱ و ۲ در این مورد استفاده می شود.

فیدبک مثبت

همراه با فیدبک مثبت



$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1-A\beta}$$

نکات

(۱) به منظور کنترل بهره مدارهای تقویت کننده با آپ امپ باید از فید بک منفی استفاده شود.

(۲) اگر با استفاده از فیدبک  $V_o$  را محدود نمائیم با توجه به رابطه  $A_v = \frac{V_o}{V_d}$  و با توجه به اینکه  $A_v$  برابر

بینهایت است می توان نتیجه گرفت:

$$V_d = 0 \rightarrow V^+ = V^-$$

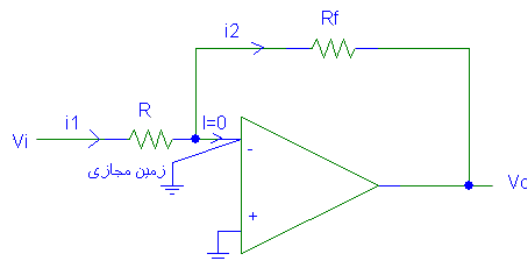
(۳) به دلیل بینهایت بودن مقاومت ورودی پایه های آپ امپ (پایه های ورودی) جریان نمی کشند.

(۴) با توجه به صفر بودن مقاومت خروجی کشیدن هر مقدار جریان خروجی از آپ امپ مجاز است.

(۵) پهنای باند آپ امپ را بینهایت در نظر می گیریم.

## حل انواع مدارها

۱- تقویت کننده Inverting (معکوس کننده):



$$V^+ = V^-$$

$$I^- = I^+ = 0$$

$$i_1 = \frac{V_i - 0}{R}$$

$$V_o = -R_F i_1$$

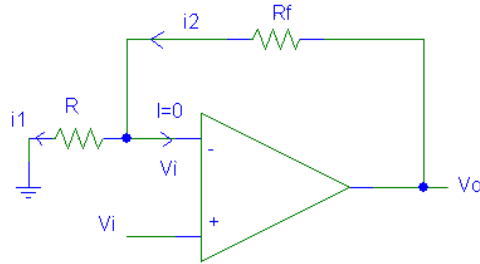
$$\Rightarrow V_o = -R_F \times \frac{V_i}{R}$$

$$\rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_F}{R}$$

همواره برقرار است

اگر بخواهیم ورودی Not شود  $R_F$  را برابر  $R$  قرار می دهیم خروجی Not می شود (فقط)  
اگر بخواهیم تقویت شود  $R_F$  را بیشتر می دهیم و ...

۲- تقویت کننده non Inverting (غیر معکوس کننده):

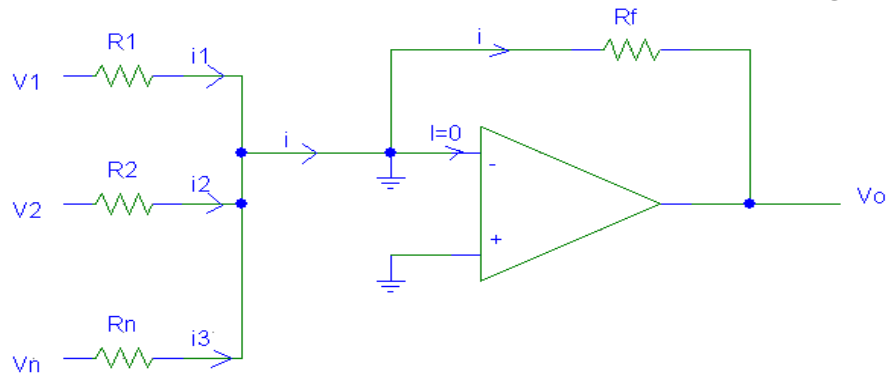


$$\left. \begin{array}{l} V^+ = V_i \\ V^+ = V^- \end{array} \right\} \rightarrow V^+ = V^- = V_i$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 = \frac{V_i - 0}{R} = \frac{V_i}{R} \\ V_o = i_1 R_F + V_i \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_o = \frac{V_i}{R} \times R_F + V_i \\ A_v = \frac{V_o}{V_i} = \left( 1 + \frac{R_F}{R} \right) \end{array} \right.$$

$\frac{R_F}{R}$ : اگر  $R_F$  برابر باشد با  $R$  خروجی با همان ولتاژ ورودی ۲ برابر می شود.

۳- جمع کننده:



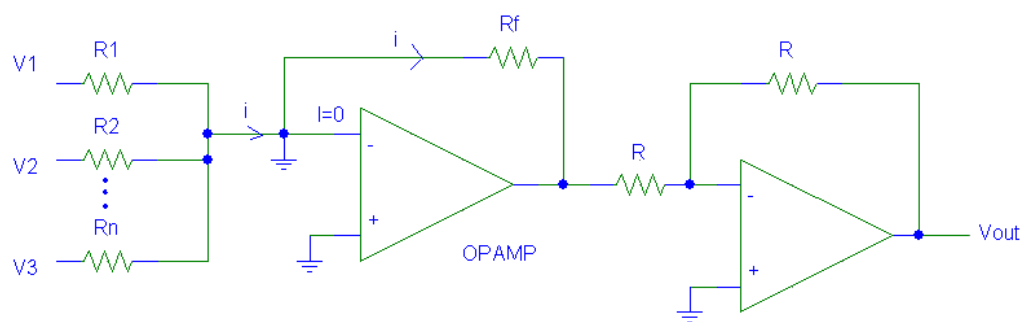
$$i_1 + i_2 + \dots + i_n = \sum_{k=1}^n i_k = i$$

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} = \sum_{k=1}^n \frac{V_k}{R_k} = \frac{V}{R} \quad V_o = -R_F \cdot i$$

$$V_o = -R_F \sum_{k=1}^n \frac{V_k}{R_k} = - \left( \frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2 + \dots + \frac{R_F}{R_n} V_n \right)$$

$$\text{if } R_F = R_1 = R_2 = \dots = R_n \rightarrow V_o = - \sum_{k=1}^n V_k$$

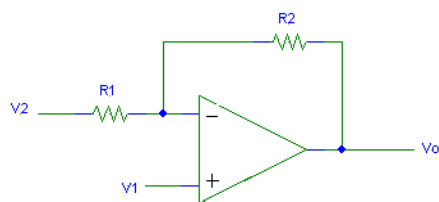
$$V_o = -(V_1 + V_2 + \dots + V_n)$$



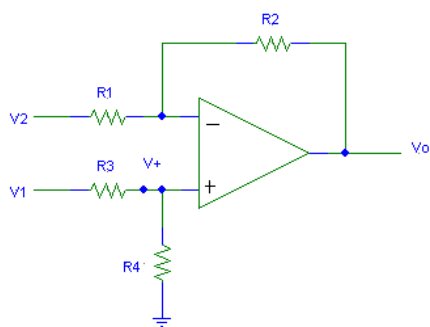
(مثلا برای اینکه مجموع ولتاژها را داشته باشیم یک معکوس کننده در خروجی می گذاریم)

$$\text{در این حالت } V_{Out} = -\left(-\sum_{k=1}^n V_k\right) = \sum_{k=1}^n V_k$$

۴- تفریق کننده ها:



$$\text{جمع: } V_o = -\frac{R_2}{R_1} \times V_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_1$$



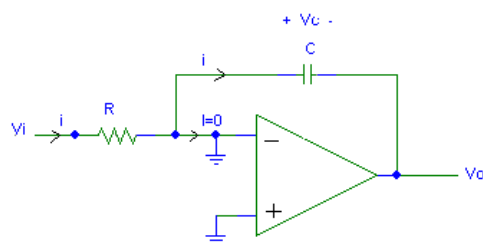
$$\begin{cases} V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V^+ \\ V^+ = V_1 \times \frac{R_4}{R_4 + R_3} \end{cases} \rightarrow V_o = -\frac{R_2}{R_1} \times V_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_4 + R_3} \times V_1$$

$$\text{if } \rightarrow \begin{cases} R_1 = R_3 \\ R_2 = R_4 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_2 + \frac{R_2}{R_1} V_1 \\ V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2) \end{cases}$$

$$\text{if } \rightarrow R_1 = R_2 \rightarrow V_o = V_1 - V_2$$



۵- تقویت کننده انتگرال گیر (یک فیلتر پائین گذار):

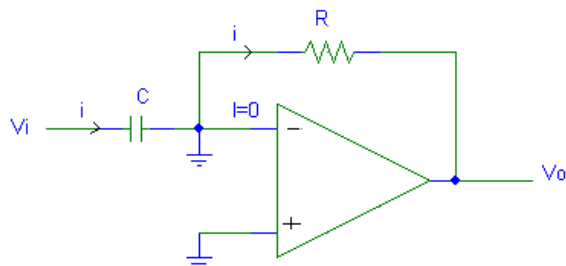


$$i = \frac{V_i}{R} \begin{cases} V_{C^{(+)}} = \frac{1}{C} \int_0^t i(\lambda) d\lambda + V_{e^{(0)}} \\ V_{C^{(-)}} = -V_{C^{(+)}} \end{cases}$$

$$V_o = -\frac{1}{R_C} \int_0^t V_i(\lambda) d\lambda - V_{C^{(0)}}$$

$$\text{در حوزه لاپلاس} \rightarrow \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{\frac{1}{sC}}{R} = -\frac{1}{RCS}$$

۶- تقویت کننده مشتق گیر (فیلتر بالا گذار):

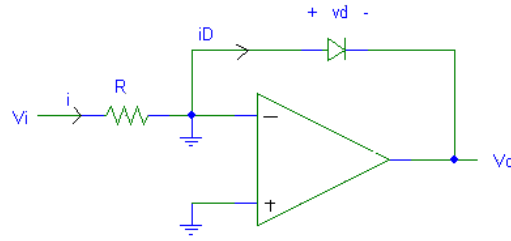


$$\begin{cases} i_{C_1} = i = C \frac{dV_C(t)}{dt} = C \frac{dV_i(t)}{dt} \\ V_o = -R \cdot i \end{cases}$$

$$V_o = -RC \frac{dV_i(t)}{dt}$$

$$\text{در حوزه لاپلاس} \rightarrow \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{R}{\frac{1}{sC}} = -RSC$$

۷- تقویت کننده لگاریتمی:

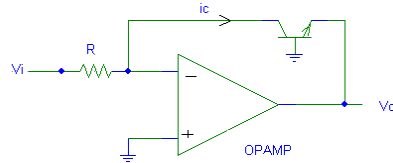


$$i_1 = i_D, i_1 = \frac{V_i - 0}{R}$$

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \approx I_s e^{\frac{V_D}{V_T}}$$

$$\frac{V_i}{R} \approx I_s e^{\frac{V_D}{V_T}} \Rightarrow V_D = V_T \ln \left( \frac{V_i}{R I_s} \right)$$

$$V_o = -V_D \Rightarrow V_o = -V_T \ln \left( \frac{V_i}{R I_s} \right)$$



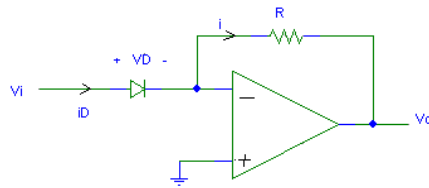
→ نوع دیگر لگاریتمی

$$i = i_C \quad i = \frac{V_i - 0}{R} \quad i_C = I_s e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$\frac{V_i}{R} \approx I_s e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \Rightarrow V_{BE} = V_T \ln \left( \frac{V_i}{R I_s} \right)$$

$$V_o = -V_{BE} \rightarrow V_o = -V_T \ln \left( \frac{V_i}{R I_s} \right)$$

۸- تقویت کننده نمایی:



$$i_D = I_s e^{\frac{V_D}{V_T}}$$

$$V_D = V_i$$

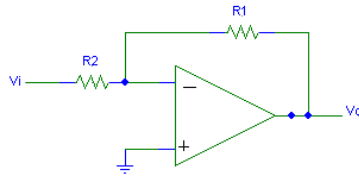
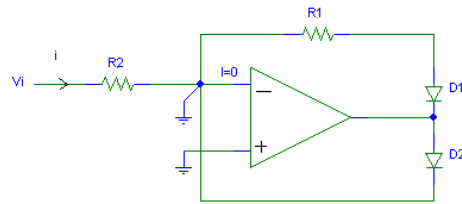
$$\begin{cases} i_D = I_s e^{\frac{V_i}{V_T}} \\ i_D = i \end{cases} \rightarrow V_o = -R I_s e^{\frac{V_i}{V_T}}$$

$$V_o = -R i$$

۹- استفاده از لگاریتم گیر و نمایی برای ساخت ضرب کننده های آنالوگ:

۲

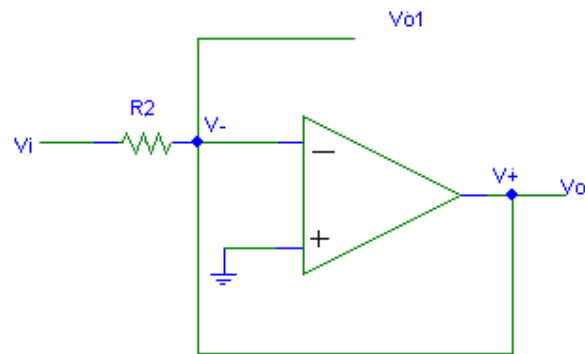
۱۰- استفاده از آپ امپ برای یکسو ساز نیم موج و یک سو ساز تمام موج:

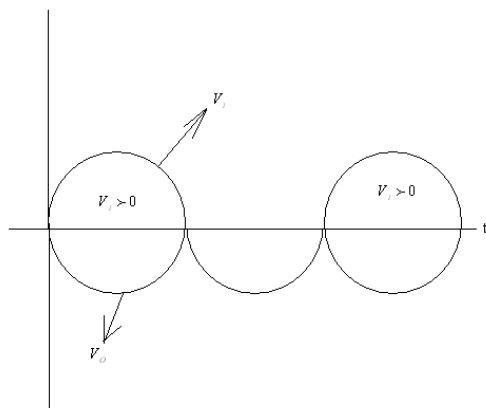
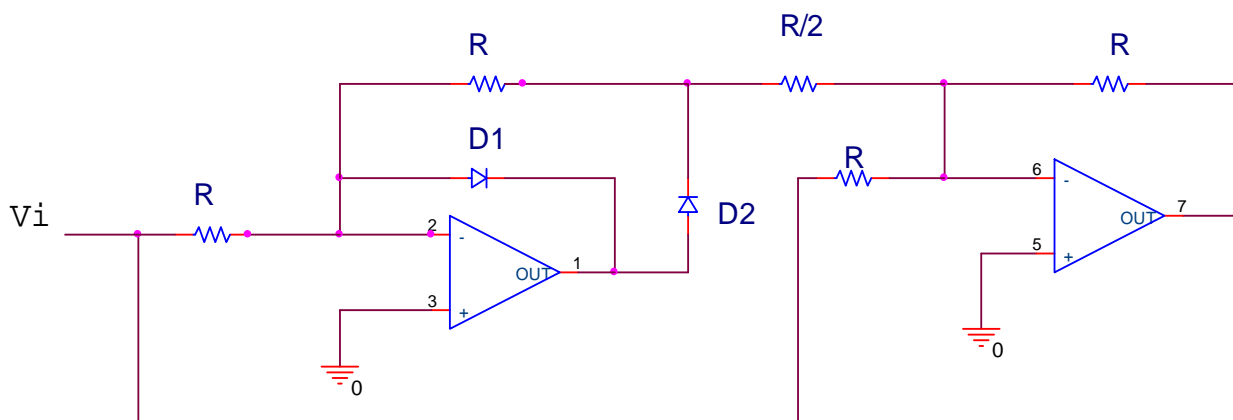


$$\text{if } V_i > 0 \rightarrow i = \frac{V_i}{R} > 0 \rightarrow \begin{cases} D_1 : \text{on} \\ D_2 : \text{off} \end{cases}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_1}{R_2}$$

$$\text{if } V_i < 0 \rightarrow i = \frac{V_i}{R_2} < 0 \rightarrow \begin{cases} D_1 : \text{off} \\ D_2 : \text{on} \end{cases}$$



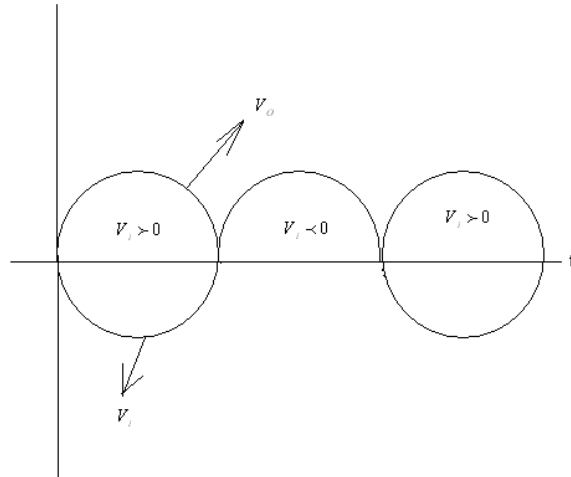


یکسو کننده تمام موج

$$V_o = -\frac{R}{R}V_{o_1} - \frac{R}{R}V_i = -2V_{o_1} - V_i \quad (1)$$

$$V_{o_1} \rightarrow \begin{cases} V_i > 0 \Rightarrow V_{o_1} = -V_i \\ V_i < 0 \Rightarrow V_{o_1} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

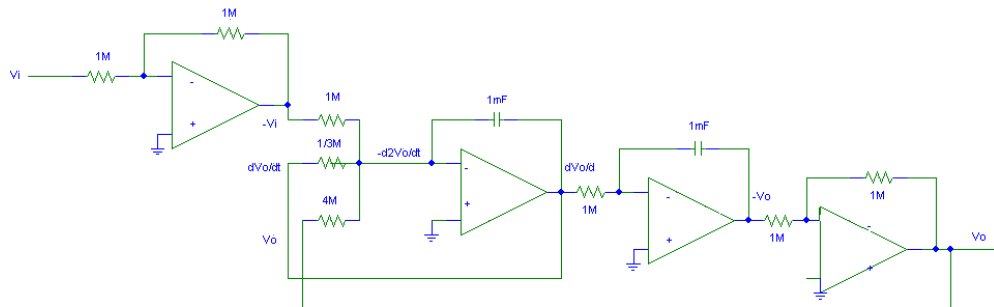
$$\rightarrow \begin{cases} V_i > 0 \Rightarrow V_o = +V_i \\ V_i < 0 \Rightarrow V_o = -V_i \end{cases}$$



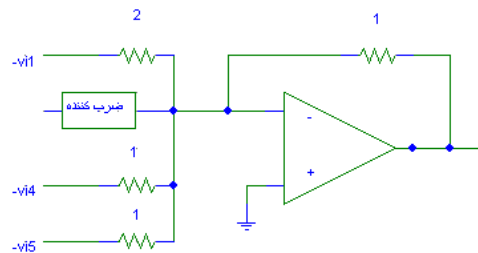
مثال: حل معادله زیر را از طریق Op-Amp پیاده سازی نمائید.

$$\frac{d^2 V_o}{dt^2} + 3 \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{4} = V_i$$

$$\int \frac{d^2 V_o}{dt^2} = \int \left( V_i - 3 \frac{dV_o}{dt} - \frac{V_o}{4} \right)$$

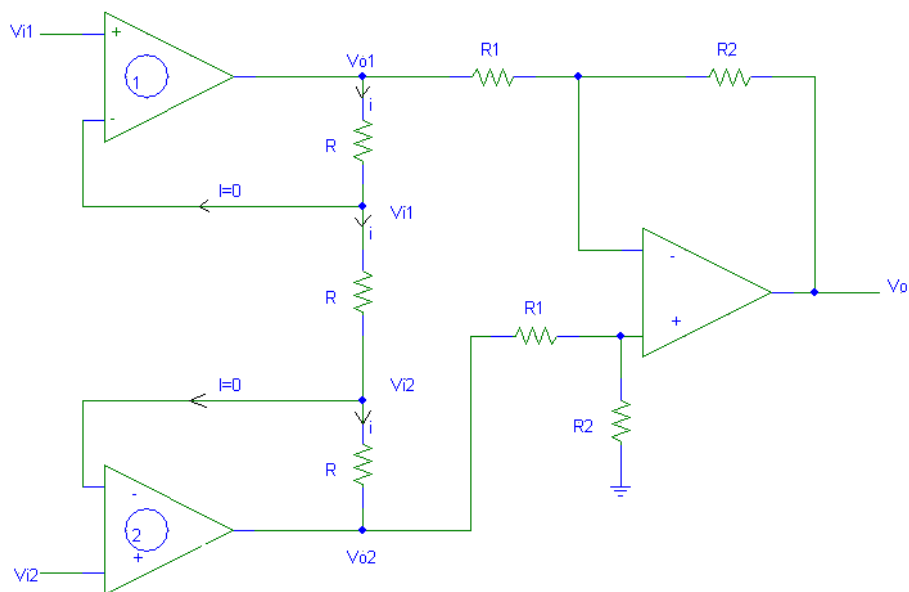


$$\frac{1}{2}V_{i_1} + \frac{2}{3}V_{i_2} \times V_{i_3} + V_{i_4} - V_{i_5}$$



مثال:

در مدار شکل زیر  $V_o$  را بدست آورید.



تفریق کننده

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_{o_2} - V_{o_1}) = \frac{-R_2}{R_1} (V_{o_1} - V_{o_2}) \quad (1)$$

$$\text{Op-Amp 1: } V^+ = V^- = V_{i_1}$$

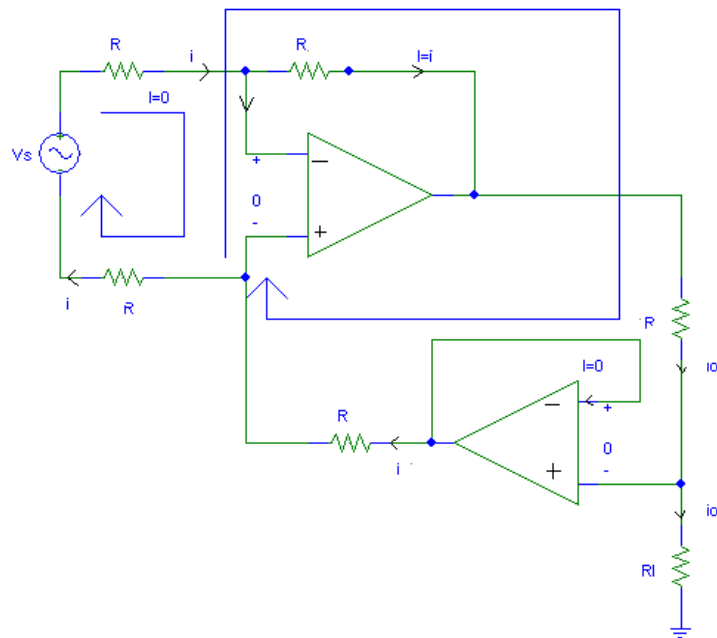
$$\text{Op-Amp 2: } V^+ = V^- = V_{i_2}$$

$$\begin{cases} i = \frac{V_{i_1} - V_{i_2}}{R} \\ V_{o_1} - V_{o_2} = 3R_i \end{cases} \rightarrow V_{o_1} - V_{o_2} = 3(V_{i_1} - V_{i_2}) \quad (2)$$

$$1, 2 \Rightarrow V_o = -\frac{3R_2}{R_1} (V_{i_1} - V_{i_2})$$

مثال:

در مدار شکل زیر نشان دهید  $i_o$  مستقل از بار می باشد؟! (سوال ۱۹ کتاب)



Kvl هایی در نظر می گیریم که  $R_L$  در آنها نباشد تا به درستی رابطه برسیم.

$$\begin{cases} kvl1 \rightarrow R.i + R.i_o + R.i = 0 \rightarrow i_o = -2i \\ kvl2 \rightarrow -V_s + R.i + R.i = 0 \rightarrow i = \frac{V_s}{2R} \Rightarrow i_o = -\frac{V_s}{R} \end{cases}$$

در این رابطه  $i_o$  ربطی به  $R_L$  ندارد، پس  $i_o$  مستقل از بار می باشد.

### تعریف نرخ چرخشی (Slew Rate)

در یک مدار حافظه دار یعنی مدارهایی که دارای سلف و خازن هستند پرش در ورودی پرش در خروجی را به دنبال نخواهد داشت و مدت زمانی طول می کشد تا خروجی به مقدار نهایی برسد.

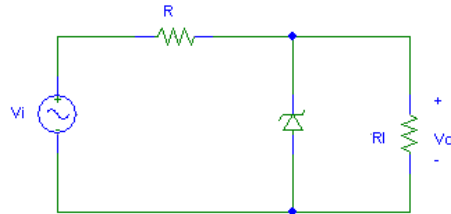
$$S.R = 0.3 \frac{V}{\mu s}$$

Slew Rate یعنی حداکثر میزان تغییرات مجاز در خروجی Op-Amp

بطور مثال اگر  $R.S=0.5$  باشد یعنی خروجی این Op-Amp اگر بخواهد 10V بالا برود  $20\mu s$  طول خواهد کشید.

منابع تغذیه





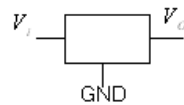
$$\begin{cases} I_k = I_{Z_{min}} < I_Z < I_{Z_{max}} \\ V_i > V_Z \end{cases} \rightarrow V_o = cte = V_Z$$

IC های رگلاتور

(۱) IC های رگلاتورهای با ولتاژ ثابت:

الف) سری 78xx

(1A) 5,6,8,12,15,18,24 ولتاژ مثبت



$$\begin{cases} V_i - V_o \geq 3 & \text{حداقل} \\ V_i < 35 & \text{حداکثر} \end{cases}$$

ولتاژ مثبت تولید می کند.

سری 79xx

(1A) 5,6,8,12,15,18,24 ولتاژ منفی

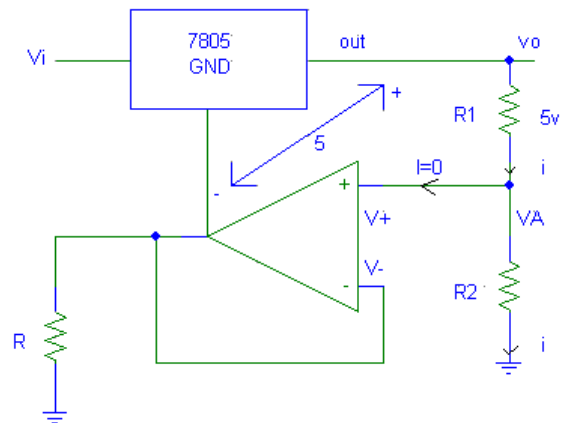
سری LM340

(1.5A) 5,6,8,12,15,18,24

ب) رگلاتورهای با ولتاژ قابل تنظیم مثل سری ۷۲۳

مثال: در مدار شکل زیر  $V_o$  را بدست آورید.





۷۸۰۵ یعنی اختلاف ولتاژ  $V_{out}$  و  $V_x$  برابر ۵V است  $V_x$  همان  $V^-$  و  $V^-$  همان  $V^+$  بوده در نهایت

$$V_o - V_A = 5^V$$

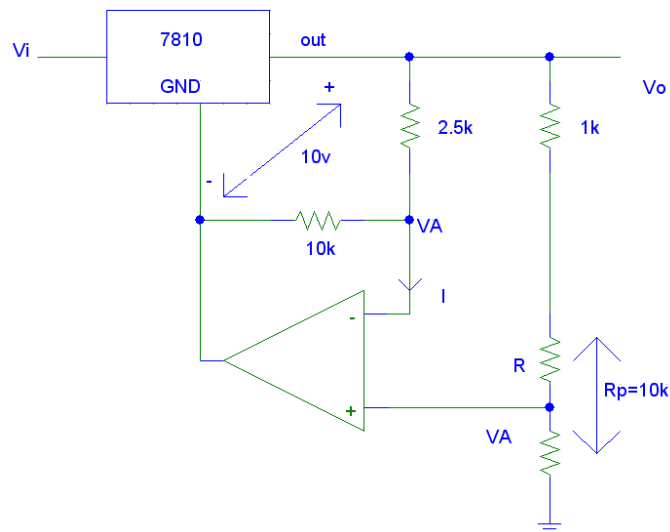
$$V^- = V^+ = V_A$$

$$V_o - V_A = 5$$

بخاطر IC های ۷۸۰۵

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{V_o - V_A}{R_1} = \frac{5}{R_1} \\ V_o &= (R_1 + R_2)i \end{aligned} \right\} \rightarrow V_o = 5 \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 5 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

مثال: در مدار شکل زیر حداکثر  $V_o$  را بدست آورید.



$$V_R = 2.5^k = 10 \times \frac{2.5}{10 + 2.5} = 2^V$$

$$V_A = V_o \times \frac{1 + R}{R_p + 1} \quad \text{تقسیم ولتاژ}$$

$V_A$  قسمتی از مقاومت  $R_p$  است

$$V_o = V_A \times \frac{R_p + 1}{1 + R} \rightarrow V_A = 2^V$$

$$V_o = 2 \times \frac{R_p + 1}{1 + R} = 2 \times \frac{11}{1 + R}$$

$$V_o \Rightarrow \begin{cases} R = 0 \Rightarrow V_o = 22^V, V_{\max} \\ R = 10 \Rightarrow V_o = 2^V, V_{\min} \end{cases}$$