

# الکترونیک ۱

جلسه نهم

مدرس : سجاد قراگوزلو حصاری

دانشکده فنی انقلاب اسلامی

# تقویت کننده های قدرت

تقویت کننده ای است که توان قابل ملاحظه ای را به بار منتقل کند.  
تقویت کننده های قدرت در طبقه ی نهایی یک تقویت کننده قرار می گیرند.

عوامل مهم در تقویت کننده های قدرت :

۱- بازده تقویت کننده

$$\eta = \frac{\text{توان ac منتقل شده به بار}}{\text{توان dc گرفته شده از منبع تغذیه}} \times 100\%$$

۲- پخش گرما

$$P_C = V_{CE} \cdot I_C$$

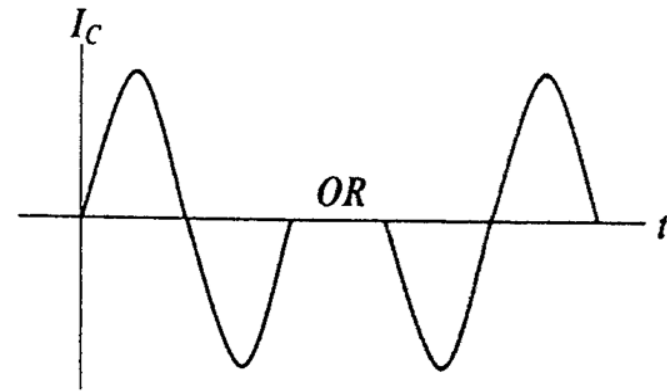
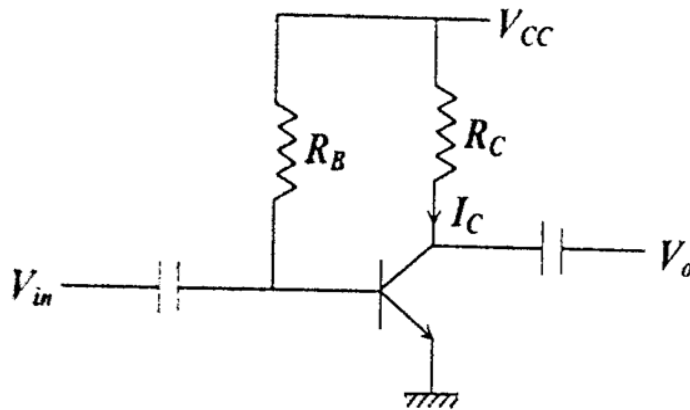
$$V_{CE} \cdot I_C = P_{C_{\max}} = \text{یک مقدار ثابت}$$

اگر  $V_{CE}$  افزایش یابد، حداکثر مقدار  $I_C$  کاهش می یابد و بر عکس، با افزایش  $I_C$  از حداکثر مقدار مجاز  $V_{CE}$  کاسته می شود.

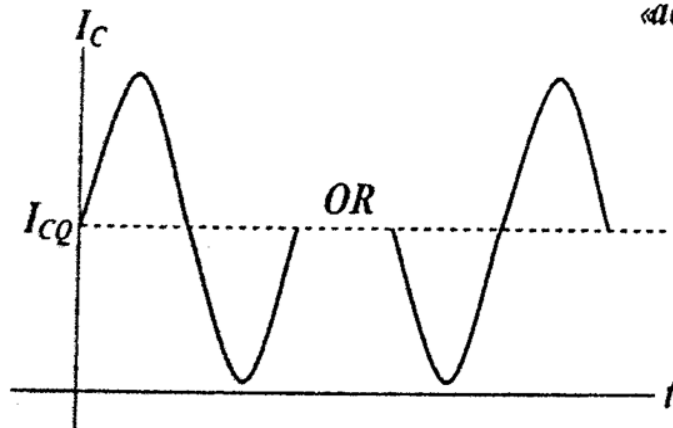
# کلاس های تقویت کنندگی

## الف) کلاس A :

در یک تقویت کننده با کلاس A به ازای اعمال ورودی سینوسی به تقویت کننده عمل تقویت کنندگی در کل یک سیکل یعنی ۳۶۰ درجه به طور کامل انجام می گیرد و شکل موج خروجی از لحاظ ظاهری کاملاً مشابه سیگنال ورودی می باشد. مدار زیر و شکل موج های زیر مربوط به کلاس A می باشد.



«شکل موج جریان  $I_C$  در حالت ac»

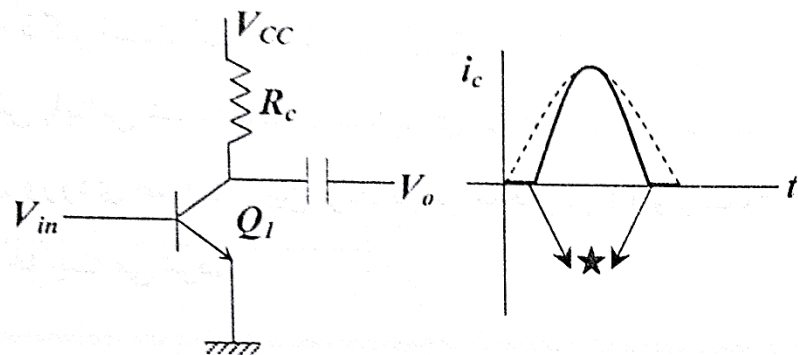


«شکل موج جریان  $I_C$  همراه با مؤلفه های dc و ac»

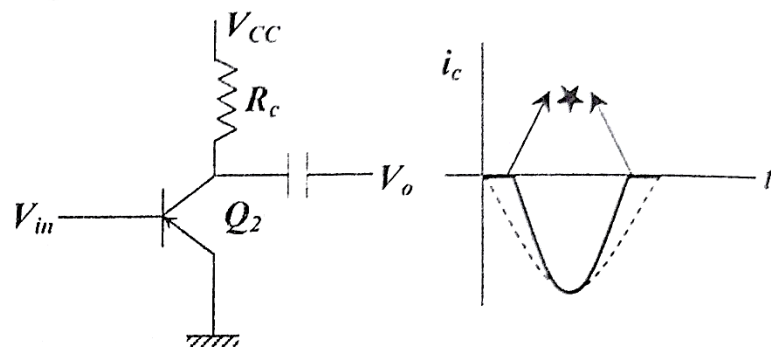
نکته : در تقویت کننده های کلاس A شکل موج ولتاژ یا جریان خروجی در هر دو نیم سیکل به صورت کامل است و بریده نمی شود همچنین کلیه تقویت کننده هایی که بایاس dc ترانزیستورها برای آنها فراهم باشد کلاس A هستند لذا تقویت کننده های آمیتر مشترک و کلکتور مشترک و بیس مشترک هر کدام از نوع کلاس A هستند.

## ب) کلاس B :

در یک تقویت کننده با کلاس B هدایت ترانزیستورها فقط در یک نیم سیکل انجام می گیرد. یا به عبارتی ترانزیستور تقویت کننده فقط در  $180^\circ$  درجه هدایت دارد و در نیم سیکل دیگر خاموش بوده و عملاً خروجی در این نیم سیکل موجود نیست اشکال زیر یک تقویت کننده با کلاس B و شکل موج های مربوط به آن را نمایش می دهد.



«شکل موج جریان خروجی (هدایت در سیکل مثبت)»

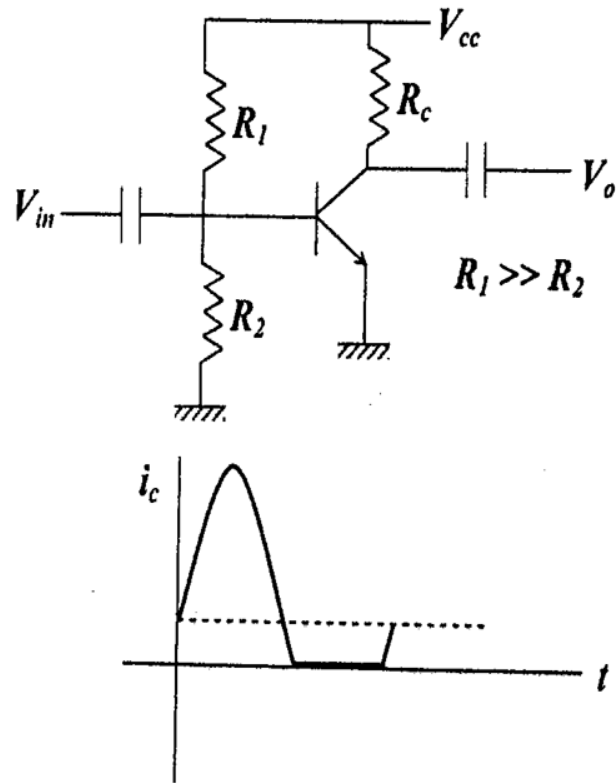


«شکل موج جریان خروجی (هدایت در سیکل منفی)»

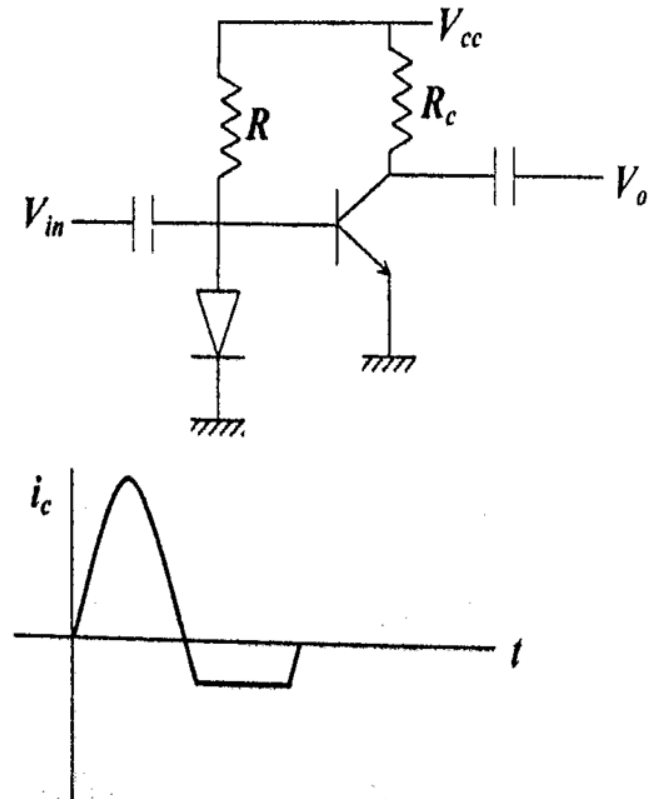
لازم به ذکر است که ترانزیستور  $Q_1$  در سیکل مثبت هدایت می کند و این به این علت است که از نوع NPN می باشد و ترانزیستور  $Q_2$  در سیکل منفی هدایت دارد و این به این علت است که ترانزیستور  $Q_2$  از نوع PNP می باشد همچنین به علت عدم وجود بایاس dc مناسب در حالتی که ورودی موجود نباشد  $Tr$  خاموش است لذا تا زمانی که دامنه ولتاژ ورودی به اندازه  $V_{BE}$  ترانزیستور نرسیده است عملاً هدایتی در  $Tr$  موجود نیست و ترانزیستور خاموش است هرگاه ولتاژ ورودی به حدی رسید که  $Tr$  روشن شود هدایت انجام می گیرد. حال دیده می شود که موج خروجی کمی با موج ورودی تفاوت دارد و این تفاوت میان موج ورودی با موج خروجی که در شکل با علامت \* نمایش داده شده است، اعوجاج تقاطعی یا اعوجاج مقطعی نامیده می شود.

## چ) کلاس AB :

یک تقویت کننده با کلاس AB در ازای دریافت یک ورودی سینوسی در یک نیم سیکل مثلاً نیم سیکل مثبت هدایت را انجام می دهد و در نیم سیکل بعدی یعنی نیم سیکل منفی کمی هدایت می کند به عبارتی می توان گفت زاویه هدایت ترانزیستورها بین  $180^\circ$  تا  $360^\circ$  درجه می باشد. در کلاس AB بایاس لازم برای ترانزیستورها به طور کامل فراهم نیست اما به مقدار کمی برقرار است و ترانزیستورها در آستانه هدایت قرار گرفته اند در شکل زیر یک تقویت کننده با کلاس AB و شکل موج های مربوطه نمایش داده شده است.

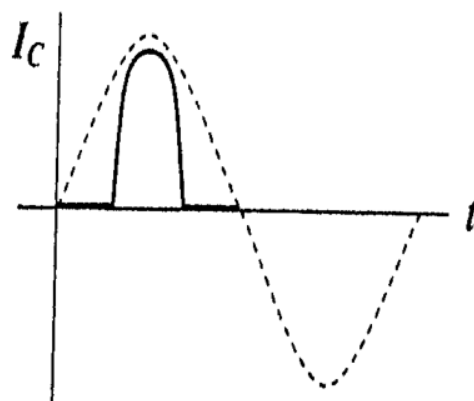
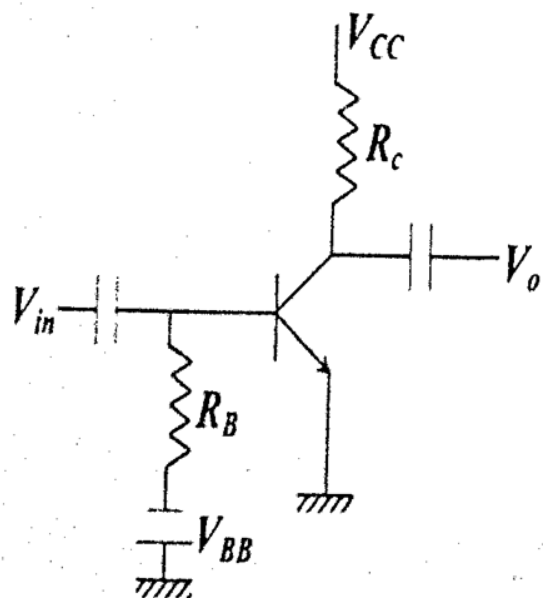


«شکل موج جریان خروجی همراه با مؤلفه های ac و dc»

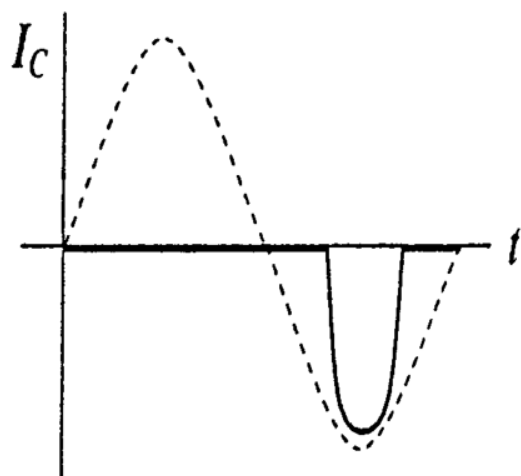


«شکل موج جریان خروجی در حالت ac»

## د) کلاس C :

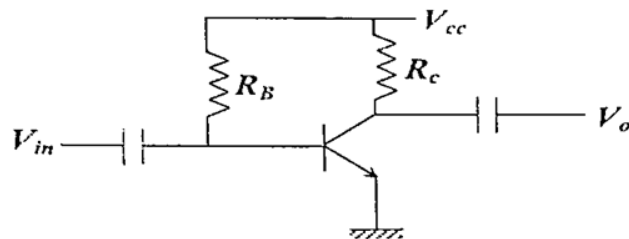
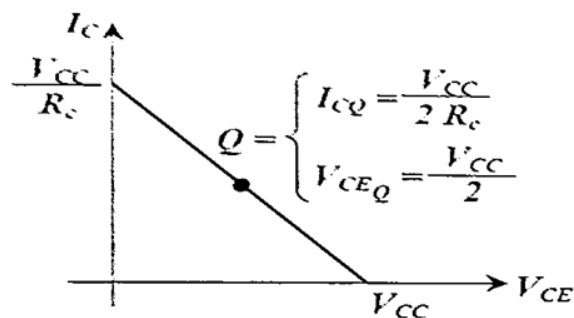


در یک تقویت کننده با کلاس C در ازای یک ورودی سینوسی هدایت در قسمتی از یک نیم سیکل فقط انجام می شود و در نیم سیکل دیگر هدایتی در ترانزیستور وجود ندارد. لذا می توان گفت که زاویه هدایت کمتر از  $180^\circ$  درجه است شکل زیر یک تقویت کننده با کلاس C و شکل موج های مربوطه را نمایش می دهد.



لازم به ذکر است که در کلاس C تقویت کننده کمی به صورت معکوس بایاس شده است و لذا برای هدایت ترانزیستور مقداری از سیگنال ورودی صرف از بین بردن بایاس معکوس  $V_{Tr}$  و رساندن  $V_{Tr}$  به آستانه هدایت می شود.

# کلاس A



در تقویت کننده با کلاس A بهترین نقطه جهت کارکرد و داشتن حداکثر نوسان در خروجی وسط خط بار dc می باشد لذا حداکثر ولتاژ خروجی در بیک مثبت به اندازه  $\frac{V_{CC}}{2}$  می باشد.

$$V_{o(P)} = \frac{V_{CC}}{2}, \quad V_{o(P-P)} = V_{CC}$$

$$P_{o(ac)} = I_{rms}^2 \times R_C = \frac{V_{o(rms)}^2}{R_C}, \quad V_{o(rms)} = \frac{V_{CC}}{2\sqrt{2}} \Rightarrow P_{o(ac)} = \frac{(\frac{V_{CC}}{2\sqrt{2}})^2}{R_C} = \frac{V_{CC}^2}{8R_C} = P_{o(ac)(max)}$$

$$P_{in(dc)} = V_{CC} \times I_{CQ} = V_{CC} \times \frac{V_{CC}}{2R_C} = \frac{V_{CC}^2}{2R_C}, \quad P_{Q(max)} = I_C \cdot V_{CE} = \frac{V_{CC}}{2R_C} \times \frac{V_{CC}}{2} = \frac{V_{CC}^2}{4R_C}$$

$$\eta = \frac{P_{o(ac)}}{P_{in(dc)}} \times 100\%, \quad \eta = 25\% \left( \frac{V_{CE(max)} - V_{CE(min)}}{V_{CC}} \right)^2, \quad \eta_{max} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{8R_C}}{\frac{V_{CC}^2}{2R_C}} \times 100\% = \frac{1}{4} \times 100\% = 25\%$$

$$V_{CE(P-P)} = V_{CE(max)} - V_{CE(min)}, \quad I_{C(P-P)} = I_{C(max)} - I_{C(min)}$$

$$|V_{CE(P)}| + V_{CE(min)} = V_{CEQ}, \quad |I_{C(P)}| + I_{C(min)} = I_{CQ}$$

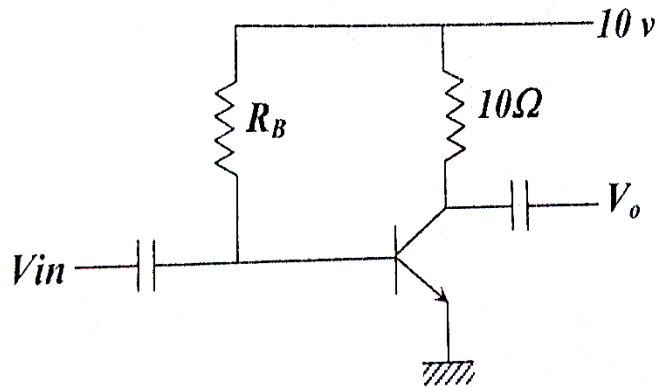
$$\text{ضریب شایستگی} = \frac{P_{Q(max)}}{P_{o(ac)(max)}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{4R_C}}{\frac{V_{CC}^2}{8R_C}} = 2$$

## معایب و محاسن کلاس A

- ۱- راندمان مدار بسیار پایین است.
  - ۲- به ازای هر وات توان انتقالی به بار ۲ برابر توان در ترانزیستور تلف می شود.
  - ۳- حداقل توان انتخابی برای هر ترانزیستور ۲ برابر  $P_{o(ac)}(max)$  است.
  - ۴- در صورتی که ورودی مدار صفر باشد توان تلفاتی در ترانزیستور حداکثر می شود.
  - ۵- کاربرد کلاس A در تقویت امواج فرکانس بالا و امواج رادیویی است.
- نکته: در میان تقویت کننده های کلاس A گرایش کلکتور مشترک دارای اعوجاج کمتری است.



مثال : در تقویت کننده ی زیر مطلوبست:



الف) حداکثر توان ac خروجی

$$P_O(\text{ac})_{\max} = \frac{V_{CC}^2}{8R_L} = \frac{10^2}{8 \times 10} = 1/25 \text{ W}$$

ب) اگر  $I_{cm} = 0/4 \text{ A}$  مقدار توان ac خروجی چقدر است؟

$$P_O(\text{ac}) = \frac{1}{2} R_L I_{cm}^2$$

$$\text{if } I_{cm} = 0/4 \text{ A} \Rightarrow P_O(\text{ac}) = \frac{1}{2} \times 10 \times 0/4^2 = 0/8 \text{ W}$$

ج) اگر  $I_{CQ} = 0/3 \text{ A}$  باشد مقدار توان ورودی dc کدام است؟

$$\left. \begin{array}{l} P_{\text{indc}} = V_{CC} \cdot I_{\text{indc}} \\ I_{\text{indc}} \simeq I_{CQ} = 0/3 \text{ A} \end{array} \right\} P_{\text{indc}} = 10 \times 0/3 = 3 \text{ W}$$

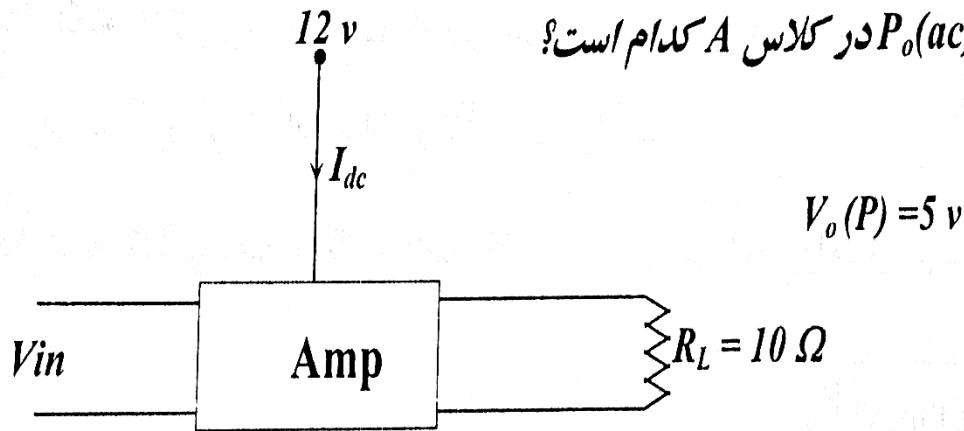
د) توان حداکثر مصرفی توسط ترانزیستور چقدر است؟

$$P_{Tr}(\text{max}) = \frac{V_{CC}^2}{4R_L} \Rightarrow P_{Tr}(\text{max}) = \frac{10^2}{4 \times 10} = 2/5 \text{ W}$$

ه) اگر نقطه ی کار وسط خط بار dc باشد و  $I_{cm} = 0/4 \text{ A}$  مقدار بازده تقویت کننده چقدر است؟

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2R_L} \Rightarrow I_{CQ} = \frac{10}{2 \times 10} = 0/5 \text{ A} \Rightarrow \eta = \frac{\frac{1}{2} \times 10 \times 0/4^2}{10 \times 0/5} = 0/16 \Rightarrow \eta = 16\%$$

مثال: در یک تقویت کننده به صورت زیر مقدار  $P_o(ac)$  در کلاس A کدام است؟

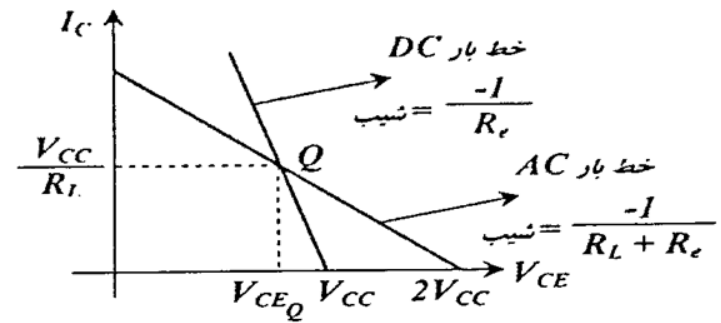
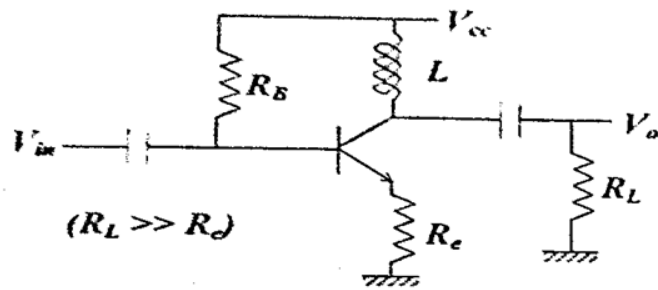


$$P_{o(ac)} = \frac{V_o(rms)^2}{R_L} = \frac{\left(\frac{V_o(P)}{\sqrt{2}}\right)^2}{R_L} = \frac{V_o(P)^2}{2R_L} \Rightarrow P_o(ac) = \frac{5^2}{2 \times 10} = 1.25 \text{ W}$$

مثال: در مثال با فرض راندمان ۱۰٪ مقدار  $I_{dc}$  کدام است؟

$$\eta = \frac{P_o(ac)}{P_{indc}} = \frac{\frac{V_o(P)^2}{2R_L}}{V_{cc} \times I_c} \Rightarrow \frac{10}{100} = \frac{1.25}{12 \times I_c} \Rightarrow I_c = 1.04 \text{ A}$$

## کلاس A با استفاده از سلف



$$Q = \begin{cases} I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{R_L} \\ V_{CEQ} \approx V_{CC} \end{cases} \quad (\text{نقطه کار})$$

$$\begin{cases} I_{Cm} = I_{CQ} , & I_{C(P)} = I_{CQ} \\ I_{C(P-P)} = 2I_{CQ} \\ V_{CE(max)} = 2V_{CC} , & V_{CE(min)} = 0 \end{cases}$$

$$P_{O(ac)} = \frac{1}{2} R_L I_{Cm}^2 , \quad P_{O(ac)(max)} = \frac{1}{2} R_L I_{CQ}^2 = \frac{1}{2} R_L \cdot \frac{V_{CC}^2}{R_L^2} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$$

$$P_{in(dc)} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} I_{CQ} dt = V_{CC} I_{CQ} , \quad P_{in(dc)(max)} = V_{CC} \times \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

$$P_Q = P_{in(dc)} - P_{O(ac)} = \frac{V_{CC}^2}{R_L} - \frac{1}{2} R_L I_{Cm}^2 , \quad \text{if } V_{in} = 0 \text{ or } I_{Cm} = 0 \Rightarrow P_{Q(max)} \approx \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

$$\eta = \frac{P_{O(ac)}}{P_{in(dc)}} \times 100\% \quad \left| \eta_{(max)} \right|_{I_{Cm}=I_{CQ}} = \frac{\frac{1}{2} R_L I_{CQ}^2}{V_{CC} I_{CQ}} \times 100\% = 50\%$$

$$\text{ضریب شایستگی} = \frac{P_{Q(max)}}{P_{O(ac)}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{R_L}}{\frac{1}{2} \frac{V_{CC}^2}{R_L}} = 2$$

نکته: لازم به ذکر است که وارد کردن سلف در این مدار باعث ۲ برابر شدن راندمان می شود اما همچنان به ازای یک وات توان تحویلی در خروجی ۲ وات توان در  $T_r$  تلف می شود.

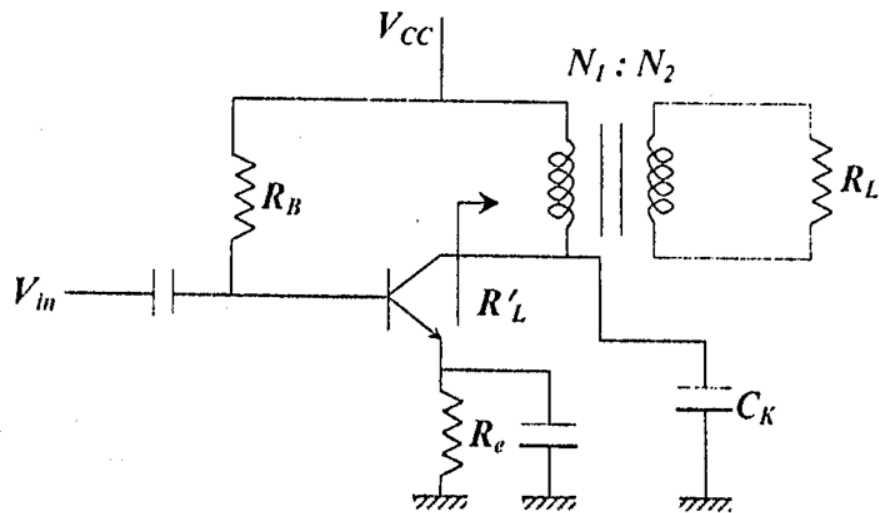
نکته: اگر دامنه جریان و دامنه ولتاژ در بار حداکثر باشد روابط زیر برقرار است:

$$I_{CQ} = \sqrt{\frac{P_{Q(max)}}{R_L}} \quad , \quad V_{CE(Q)} = \sqrt{P_{o(ac)(max)} \cdot R_L}$$

نکته: حداکثر افت ولتاژ بر ترانزیستور یا  $V_{CE(max)}$  برابر  $V_{CC}$  می باشد یا به عبارتی می توان گفت که حداقل  $V_{CE}$  انتخابی برای ترانزیستور برابر  $V_{CC}$  است که دلیل این امر القاء ولتاژ توسط سلف می باشد.

$$V_{CE(max)} = V_{CC}$$

## تقویت کننده کلاس A با کوپلاژ ترانسفورمری



$$R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L$$

$$\frac{N_1}{N_2} = N \Rightarrow R'_L = N^2 R_L$$

جهت تطبیق امپدانس بار با مدار و انتقال توان حداکثر به بار در کلاس A از یک ترانس استفاده شده است تحلیل این مدار نیز شبیه مدار تقویت کننده کلاس A با سلف می باشد با این تفاوت که  $R_L$  به  $N^2 R_L$  تبدیل می شود.

$$P_{O(ac)} = \frac{1}{2} N^2 R_L I_{Cm}^2$$

$$P_{in(dc)} = \frac{V_{CC}}{R_L N^2}, \quad P_{O(ac)}(max) = \frac{V_{CC}^2}{2 N^2 R_L}$$

$$P_{Q(max)} = \frac{V_{CC}}{N^2 R_L}$$

$$\eta = \frac{P_{O(ac)}}{P_{in(dc)}} = \frac{\frac{1}{2} N^2 R_L I_{Cm}^2}{\frac{V_{CC}}{R_L N^2}} = \frac{1}{2} \left(\frac{I_{Cm}}{I_{CQ}}\right)^2$$

$$\eta = \frac{P_{O(ac)}}{P_{in(dc)}} \times 100, \quad \eta_{max} = \frac{\frac{1}{2} V_{CC} I_{CQ}}{V_{CC} I_{CQ}} \times 100 = 50\%$$

$$\text{ضریب شایستگی} = \frac{P_{Q(max)}}{P_{O(ac)}(max)} = 2$$

$$\eta = 50\% \left( \frac{V_{CE(max)} - V_{CE(min)}}{2 V_{CC}} \right)^2$$

$$P_{O(ac)} = \frac{(V_{CE(max)} - V_{CE(min)})(I_{C(max)} - I_{C(min)})}{8}$$

## نکات مهم

۱- در این مدار تطبیق امپدانس کامل بین بار و مدار برقرار است.

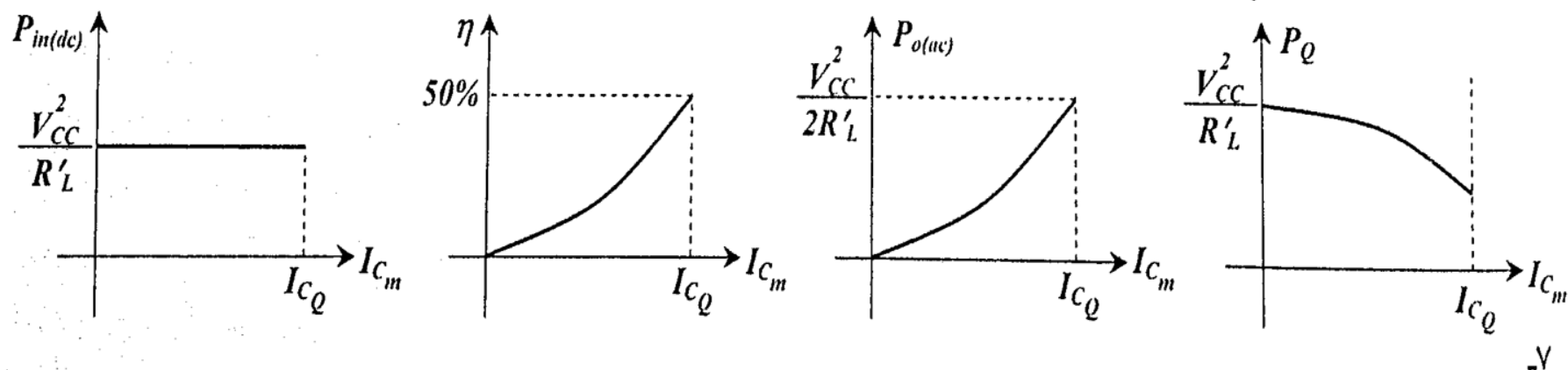
۲- حداقل  $V_{CE}$  مجاز و قابل انتخاب برابر  $2V_{CC}$  است.

۳- به ازای یک وات توان تحویلی به خروجی مقدار ۲ وات توان در  $Tr$  تلف می شود.

۴- پاسخ فرکانس مدار در فرکانس های بالا مناسب نمی باشد.

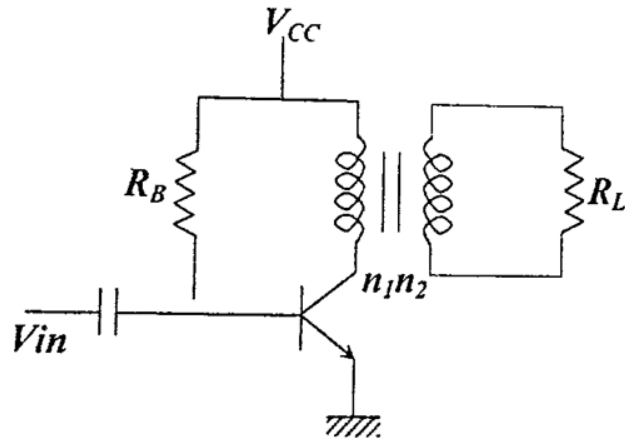
۵- در فرکانس های بالا در صورتی که بار سلفی باشد مقدار  $R'_L$  زیاد می شود لذا با کاهش شیب خط بار  $ac$  مقدار  $V_{CE}(max)$  زیاد می شود و ممکن است که  $Tr$  آسیب ببیند لذا برای جبران سازی امپدانس کلکتور و خشی سازی خاصیت سلفی بار یک خازن ( $C_K$ ) در حدود چند نانوفاراد با کلکتور موازی می شود که خازن جبران ساز نامیده می شود.

۶- تغییرات  $P_{in}(dc)$  ,  $\eta$  ,  $P_Q$  ,  $P_o(ac)$  بر حسب تغییرات  $I_{Cm}$  به صورت زیر است.



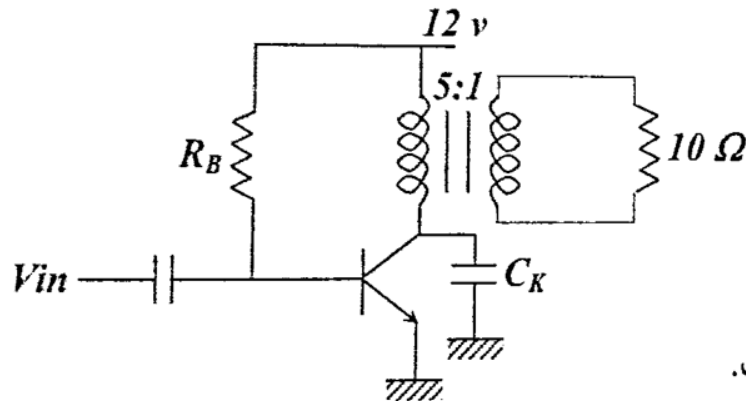
$$\begin{cases} \text{if } V_{in} = 0, I_{Cm} = 0 \Rightarrow P_Q \rightarrow \max \\ \text{if } I_{Cm} = I_{CQ} \Rightarrow P_Q \rightarrow \min \end{cases}$$

مثال: در مدار زیر شیب خط بار dc و ac به ترتیب کدام است؟



$$\text{شیب خط بار dc} = -\frac{1}{\text{مقاومت dc}} = -\frac{1}{0} = -\infty, \quad \text{شیب خط بار ac} = -\frac{1}{\text{مقاومت ac}} = -\frac{1}{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot R_L}$$

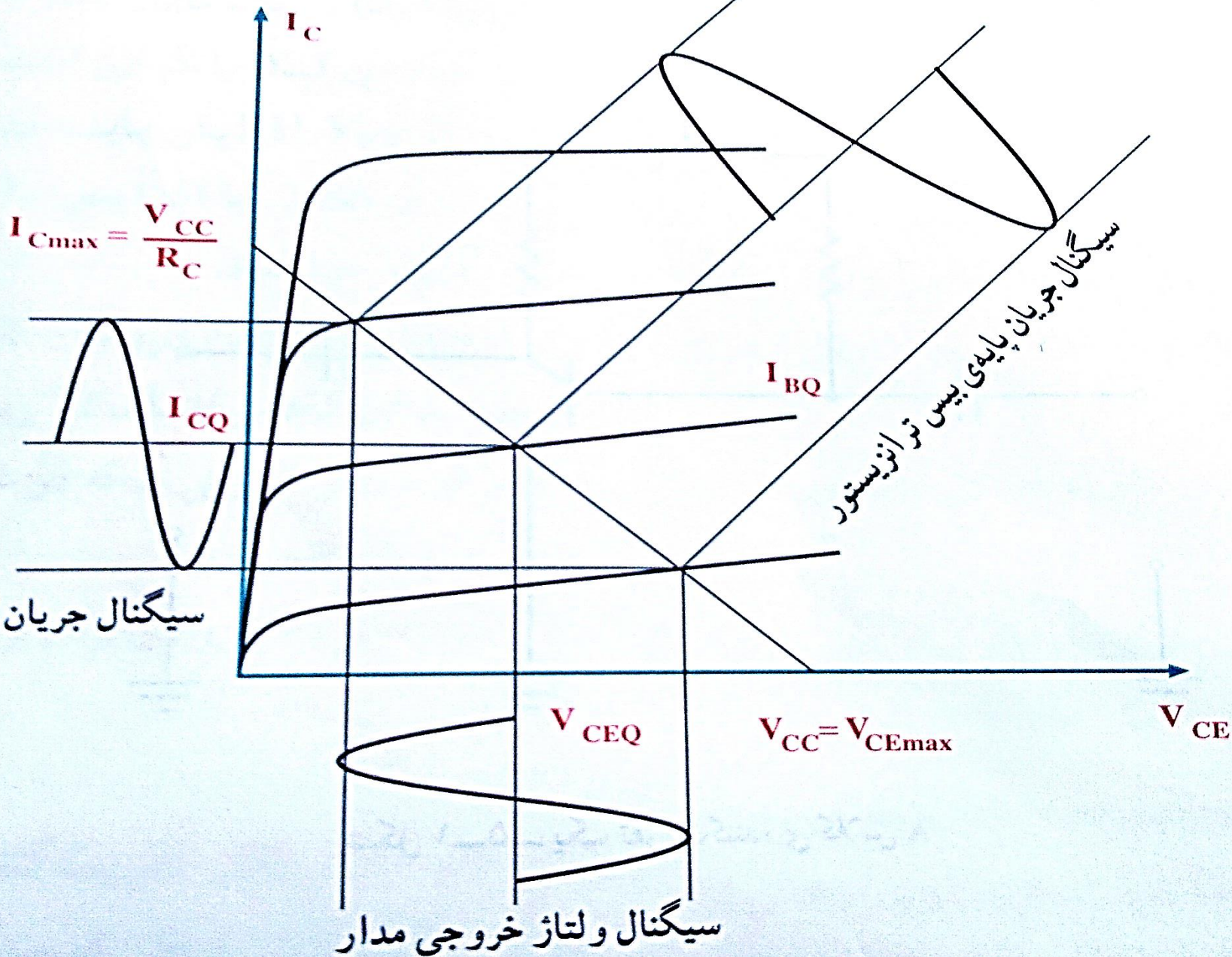
مثال: در مدار زیر حداکثر توان بار و حداکثر  $V_{CE}$  کدام است؟



در کلاس A با ترانس حداکثر  $V_{CE}$  برابر  $2V_{CC}$  است.

$$P_o(ac)(\max) = \frac{V_{CC}^2}{2 \times \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot R_L} = \frac{12^2}{2 \times \left(\frac{5}{1}\right)^2 \times 10} = 0.72 \text{ W}$$

# تقویت کننده کلاس A

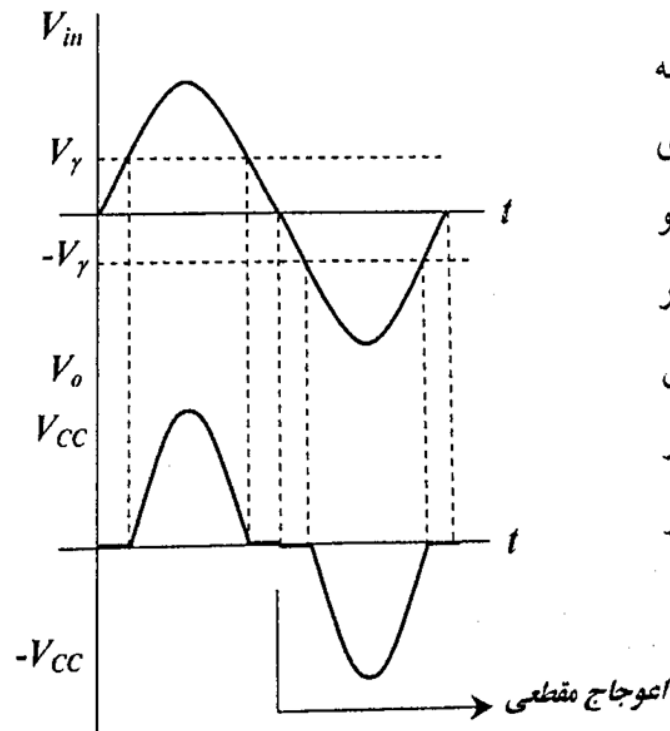
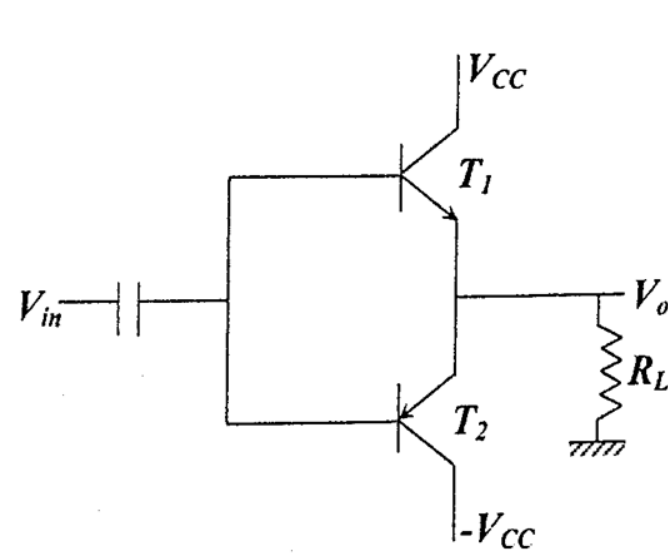




## تقویت کننده کلاس B

همانطور که گفته شد تقویت کننده کلاس B فقط در یک نیم سیکل هدایت داده و خروجی آن به صورت یک نیم موج می باشد با توجه به اینکه برای تقویت سیگنال لازم است که شکل موج خروجی تغییری نداشته باشد و همانند ورودی باشد لذا لازم است که خروجی یک سینوسی کامل باشد یعنی همانند خروجی تقویت کننده کلاس A. اما با توجه به هدایت  $T_1$  ها در یک نیم سیکل در کلاس B با کنار هم قرار دادن دو ترانزیستور NPN و PNP که هر کدام در یک نیم سیکل عمل تقویت را انجام می دهند یک خروجی سینوسی کامل می توان ایجاد نمود به این مدار پوش پول گفته می شود که روند تکمیل آن و انواع مدارات پوش پول به همراه شکل موج های مربوطه را در زیر خواهیم دید.

### پوش پول کلاس B با ترانزیستورهای مکمل



با توجه به اشکال می توان گفت که به ازای وجود نیم سیکل مثبت در ورودی  $T_1$  هدایت کرده و  $T_2$  خاموش است و به ازای وجود نیم سیکل منفی در ورودی  $T_2$  هدایت کرده و  $T_1$  خاموش است بدین ترتیب نیم سیکل مثبت را در خروجی  $T_1$  و نیم سیکل منفی را در خروجی  $T_2$  ایجاد می کند.

## نکات مهم

۱- حداکثر ولتاژ در خروجی برابر  $V_{CC}$  است.

۲- با توجه به عدم وجود بایاس dc برای Tr ها تا قبل از رسیدن  $V_{in}$  به  $V_{\gamma}$  در نیم سیکل مثبت و  $-V_{\gamma}$  در نیم سیکل منفی Tr ها خاموش می باشند که به این بازه ولتاژی باند مرده گفته می شود.

۳- به علت وجود باند مرده خروجی دارای اعوجاج مقطعی می باشد.

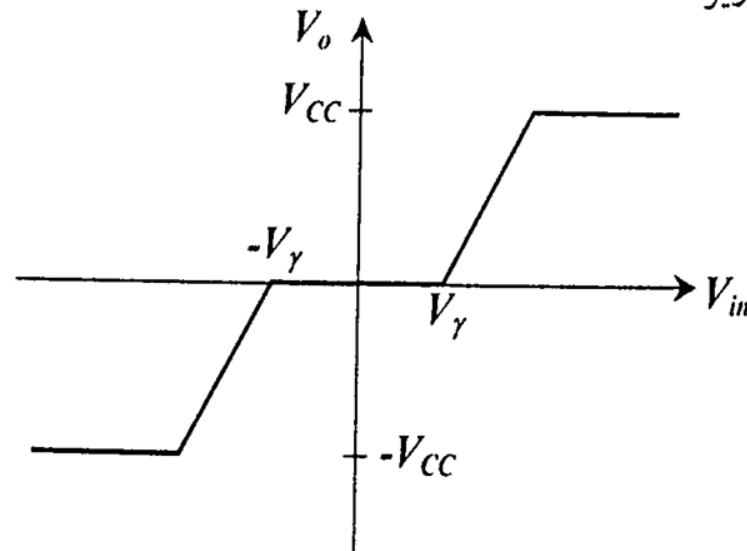
۴- به علت عدم تشابه Tr ها به دلیل مختلف بودن نوع آنها (NPN و PNP) دو نیم سیکل در خروجی کاملاً متقارن نیستند.

۵- استفاده از دو منبع تغذیه موجب بالا رفتن هزینه مدار می شود.

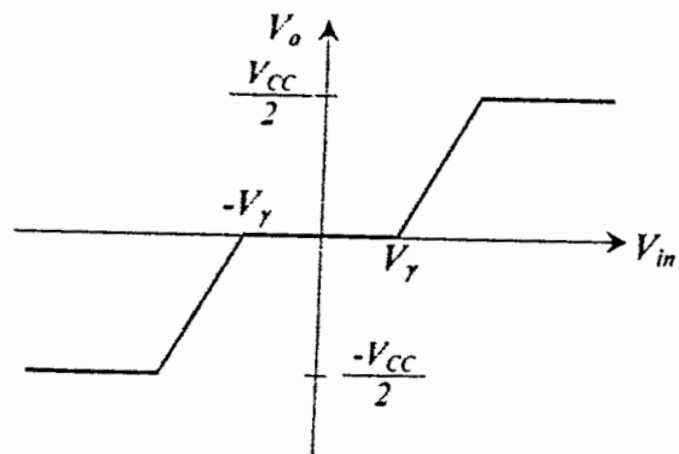
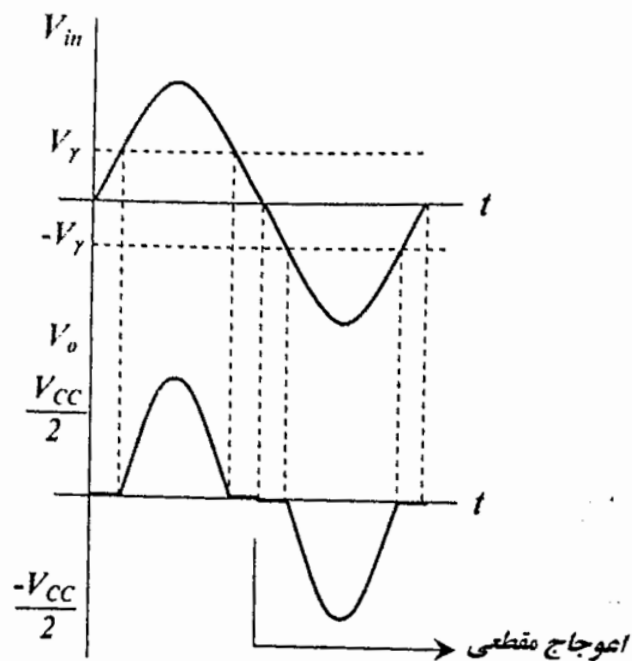
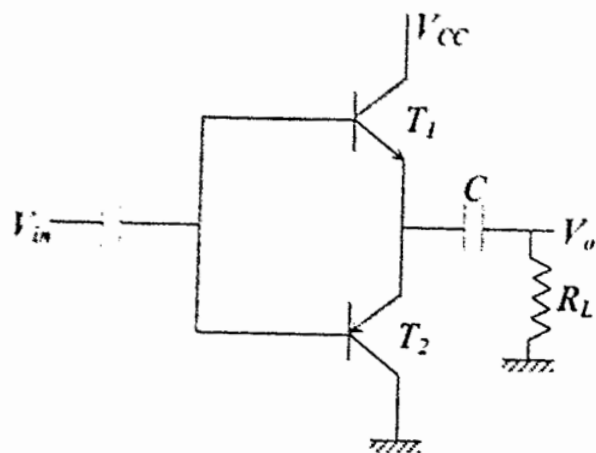
۶- نام دیگر این مدار تقویت کننده کامپلی منتاری است.

۷- گرایش های تقویت کنندگی برای هر دو Tr به صورت کلکتور مشترک است.

۸- مشخصه ورودی - خروجی مدار به صورت زیر است:



## پوش پول کلاس B با ترانزیستورهای مکمل با یک منبع تغذیه



تحلیل مدار مذکور مانند مدار قبل می باشد با این تفاوت که در هنگام هدایت  $T_1$  در نیم سیکل مثبت مقدار خازن طوری انتخاب می شود که به اندازه  $\frac{V_{CC}}{2}$  شارژ شود و این شارژ در نیم سیکل منفی به عنوان منبع تغذیه برای  $T_2$  هنگام هدایت آن استفاده می شود لذا حداکثر  $V_o$  برابر  $\frac{V_{CC}}{2}$  می شود و بقیه ولتاژ منبع روی خازن افت می کند.

## نکات مهم

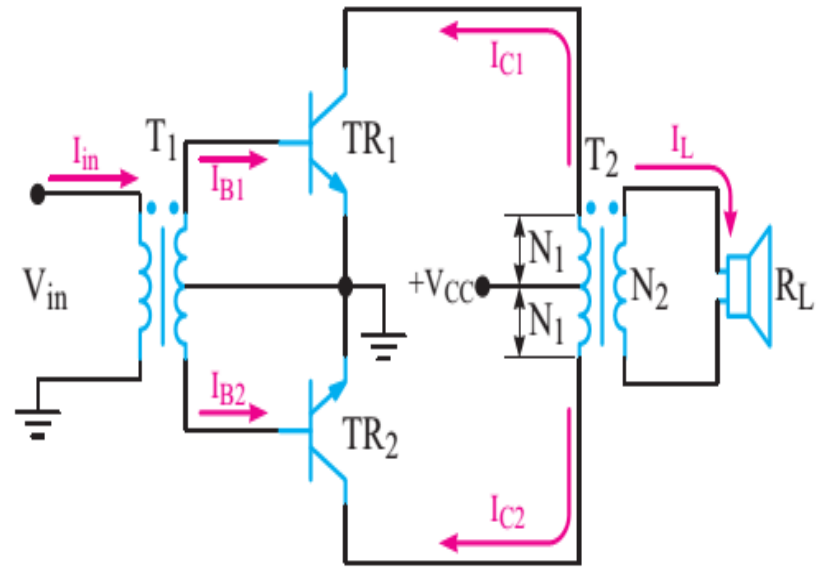
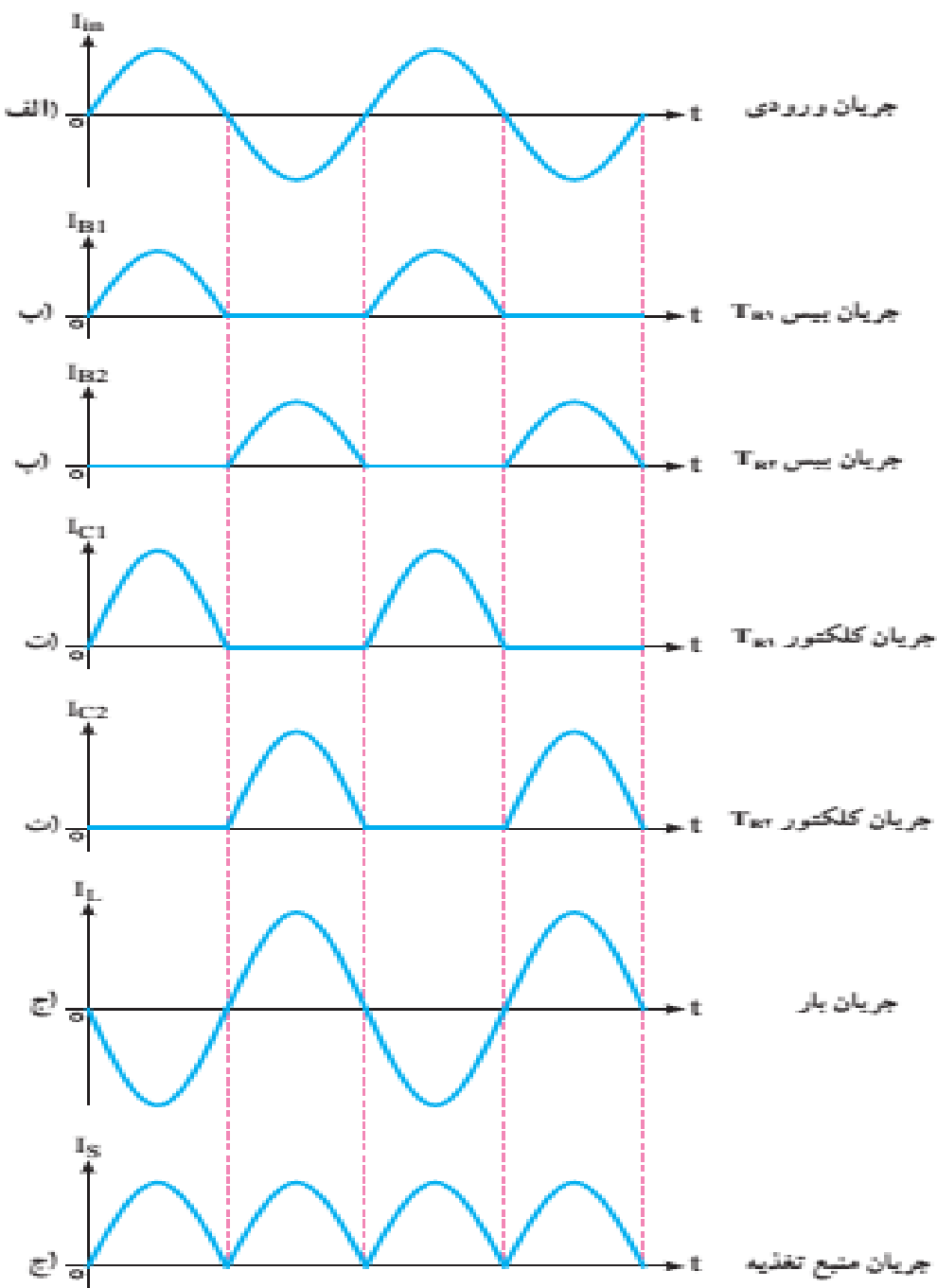
۱- حداکثر  $V_O$  یا  $V_O(P)$  برابر  $\frac{V_{CC}}{2}$  است.

۲- در این نوع پوش پول باند مرده پابرجاست.  $\Rightarrow V_O = 0$  If  $-V_\gamma \leq V_{in} \leq V_\gamma$

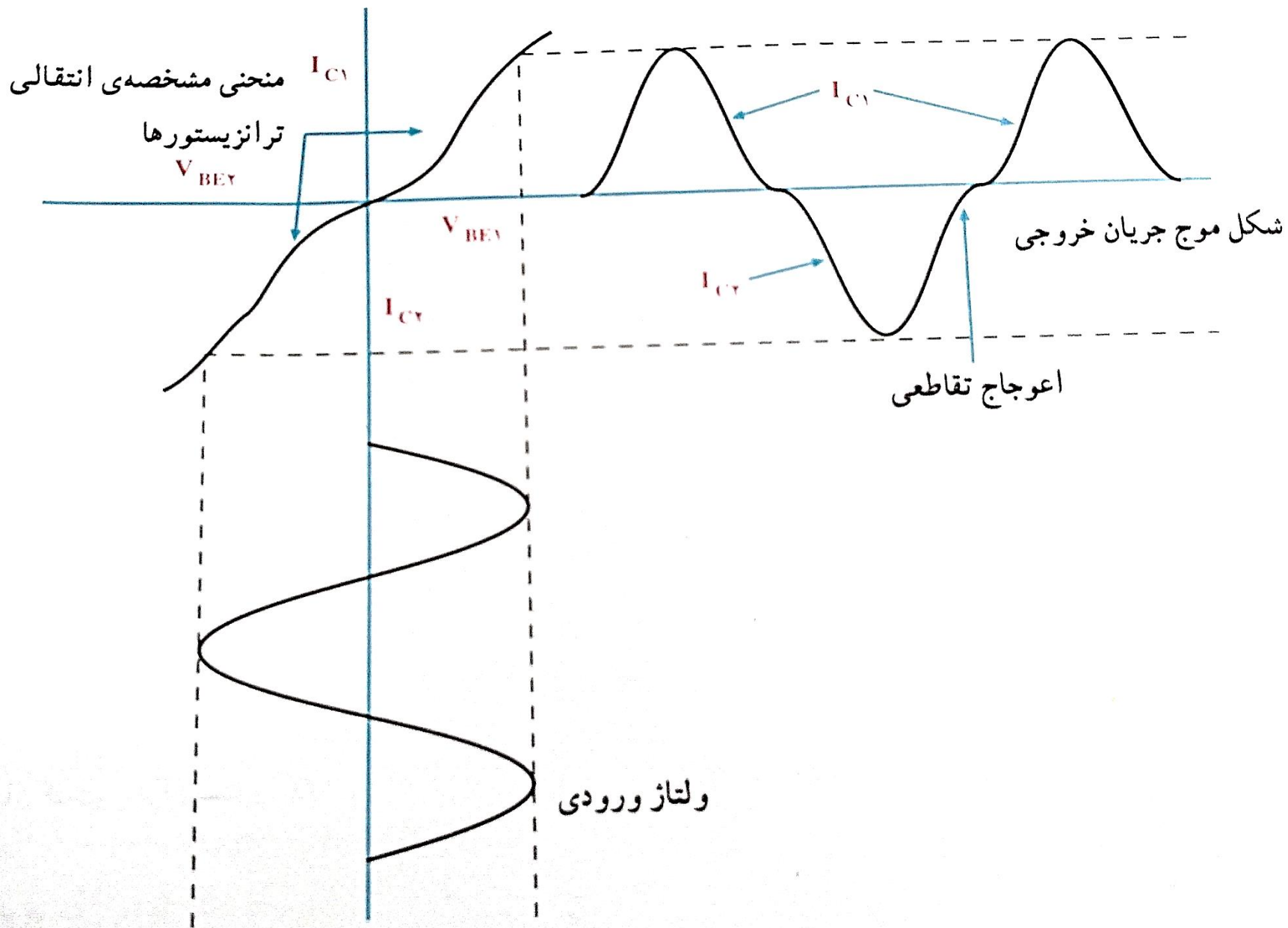
۳- به علت وجود باند مرده اعوجاج تقاطعی موجود است.

۴- مشکل عدم تشابه Tr هنوز پابرجاست.

۵- مشکل استفاده از دو منبع تغذیه حل شده است.



شکل ۱۰-۵- شکل موج جریان نقاط مختلف تقویت کننده پوشی بول



چگونگی به وجود آمدن اعوجاج تقاطعی