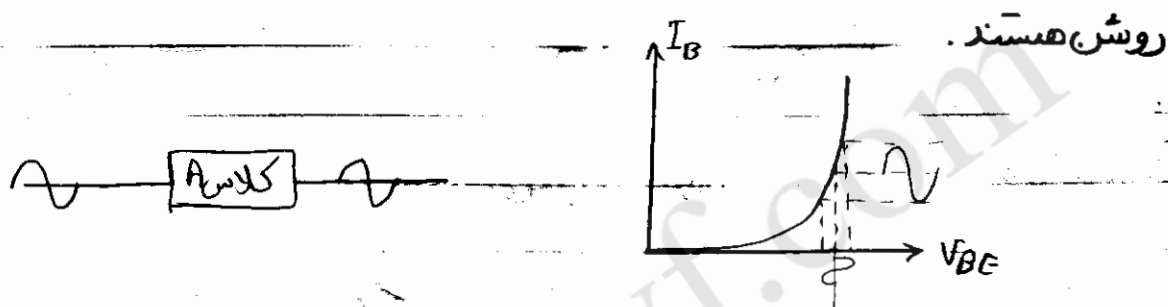
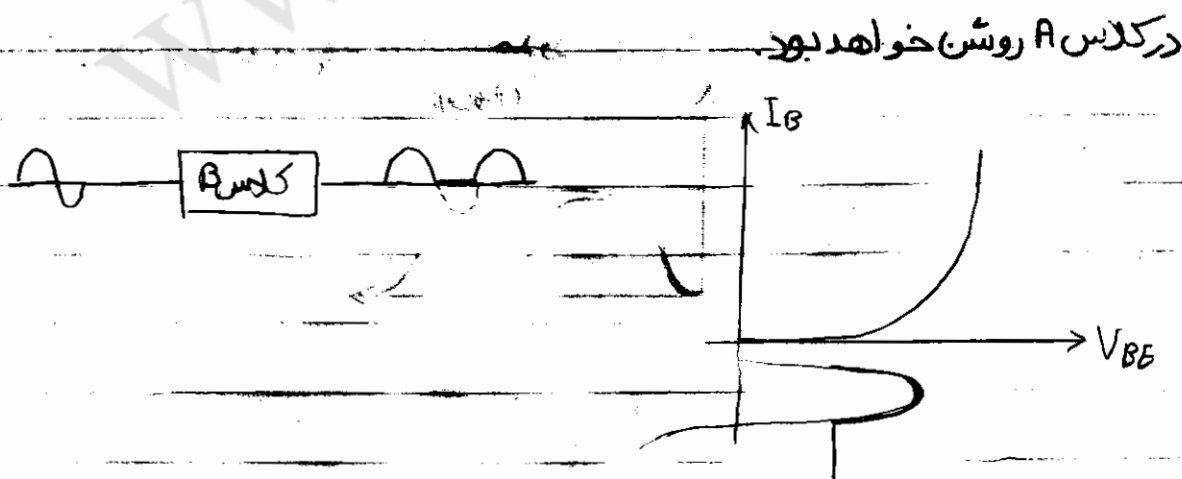


## تقویت کننده قدرت

تقویت کننده کلاس A به تقویت کننده ای گفته می شود که اگر در ورودی سینوس داشته باشیم در خروجی هم یک سیگنال سینوسی داشته باشیم. کلیه تقویت کننده هایی که تا بحال دیدیم از این نوع بوده اند. اشکال این نوع تقویت کننده این است که توان آن بالا است یعنی کلیه المان های مدار همواره



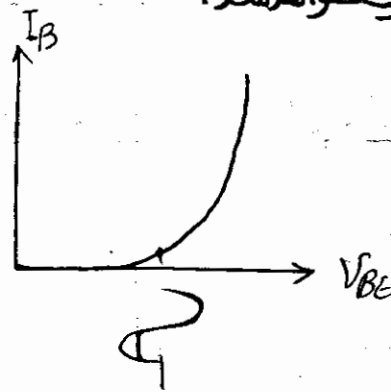
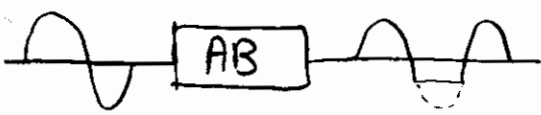
در تقویت کننده کلاس B تقویت کننده فقط یک آلترانساز ورودی را تقویت می کند. حسن این تقویت کننده در این است که وقتی سیگنال نداریم تقویت کننده خاموش است در حالی که



در این حالت فقط کار در صفر است.

در تقویت کننده کلاس AB نقطه کار را کمی جلوتر می بریم در نتیجه مقدار بیشتری از کلاس

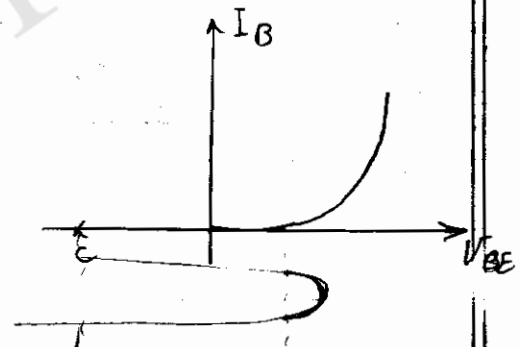
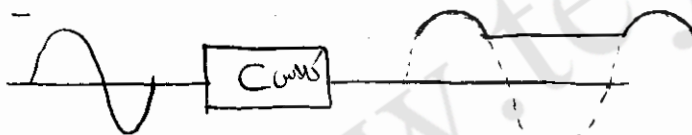
B تقویت خواهد شد.



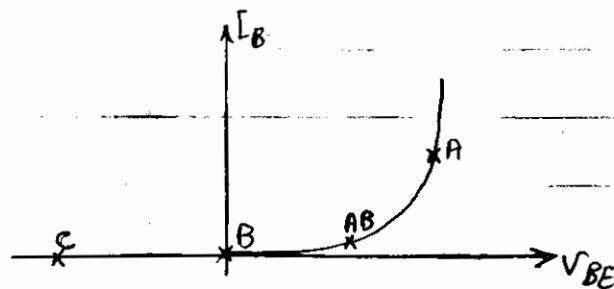
در تقویت کننده کلاس C نه تنها اینکه بایاس مثبت نیست بلکه منفی است و نقطه کار در طرف دیگر

منحنی  $V_{BE}$  خواهد بود. در نتیجه فقط pick سیگنال ورودی تقویت می شود و تلفات در

تقویت کننده از همه کلاس های دیگر کمتر خواهد بود.



نقاط کار کلاس های متفاوت در شکل زیر نمایش داده شده است.



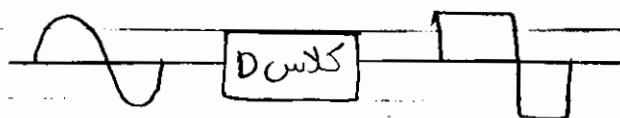
کاربرد کلاس C در تقویت کننده های ~~کلاس~~ مشابهی است که برای کم کردن ~~توان~~ مصرفی

است.

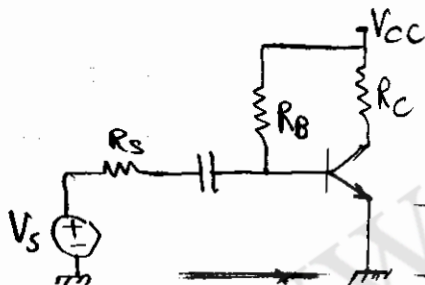
در تقویت کننده کلاس D در ورودی سینوسی و در خروجی مربعی خواهد بود که برای

دیجیتال کردن سیگنال به کار می رود. در این کلاس نقطه کار را تعیین نمی کنیم چون اهمیتی ندارد و دلخواه خواهد بود. آنچه که مهم است این است که سیگنال طوری باشد که تقویت کننده

به طور یابایی به ناحیه قطع و اشباع وارد نشود تا موج مربعی درست شود.



تقویت کننده ترانزیستوری کلاس A:



تمام شرایط را ایده آل می گیریم و راندمان این تقویت کننده را محاسبه می کنیم. بدین معنی که

از  $R_E$  و  $R_1$  و  $R_2$  و  $R_L$  صرف نظر می کنیم و به جای  $R_1$  و  $R_2$  از  $R_B$  و به جای  $R_L$  از  $R_C$  استفاده می کنیم.

شرط یک تقویت کننده توان این است که

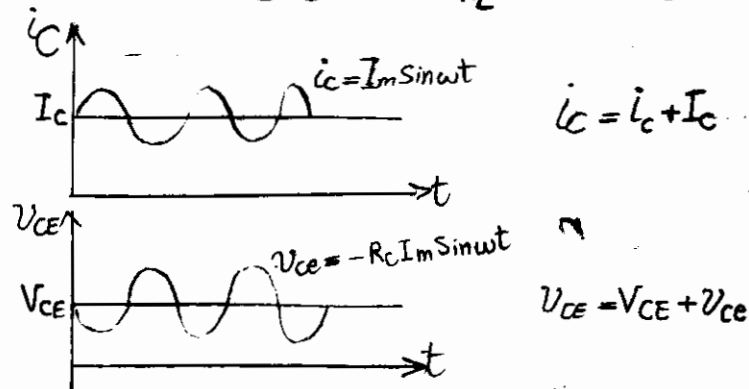
۱- افزایش توان —  $P_o > P_i$  — ۲- توان قابل ملاحظه در خروجی

۳- راندمان بالا باشد.  $\eta = \frac{\text{توان مفید دریافتی}}{\text{توان مصرفی}}$

$P_S =$  توان مصرفی

$P_{R_L} =$  توان دریافتی

$P_D =$  توان تلفاتی



توان تلفاتی لحاظی  $P_d = i_B \times v_{BE} + i_C \times v_{CE}$

$$\rightarrow P_d = (i_c + I_c)(V_{CE} + v_{ce}) = (I_m \sin \omega t + I_c)(V_{CE} - R_c I_m \sin \omega t)$$

$$\rightarrow P_d = I_m V_{CE} \sin \omega t - R_c I_m^2 \sin^2 \omega t + V_{CE} I_c - R_c I_c I_m \sin \omega t$$

متوسط  $P_d = V_{CE} I_c - \frac{R_c I_m^2}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt = V_{CE} I_c - \frac{1}{2} R_c I_m^2$

$$\rightarrow P_d = V_{CE} I_c - \frac{1}{2} R_c I_m^2$$

وقتی که سیگنال ورودی صفر است:  $P_{d_{max}} = V_{CE} \cdot I_c$

$P_{R_L} = R_c i_c^2 = R_c (I_m \sin \omega t + I_c)^2 = R_c I_c^2 + R_c I_m^2 \sin^2 \omega t + 2 R_c I_c I_m \sin \omega t$

توان دریافتی متوسط  $P_{R_L} = R_c I_c^2 + \frac{R_c I_m^2}{2}$  توان مفید دریافتی  $P_{R_L} = \frac{R_c I_m^2}{2}$

$$P_S = i_c \times V_{CC} \xrightarrow{P_S = P_{R_L} + P_d} R_c I_c^2 + \frac{R_c I_m^2}{2} + V_{CE} I_c - \frac{R_c I_m^2}{2}$$

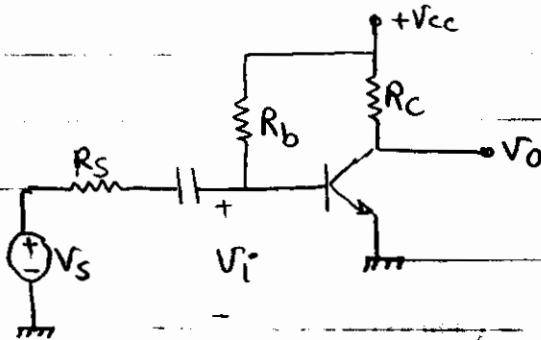
$$P_S = I_c (R_c I_c + V_{CE}) = I_c V_{CC} \rightarrow P_S = I_c \cdot V_{CC}$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_s} = \frac{R_c I_{m/r}}{V_{CC} I_c} \quad \text{راندمان}$$

$$\eta_{max} = \frac{R_c I_{c/r}}{V_{CC} I_c} = \frac{R_c I_{c/r}}{V_{CC}} = \frac{1}{F}$$

$$\eta_{max} = \frac{1}{F}$$

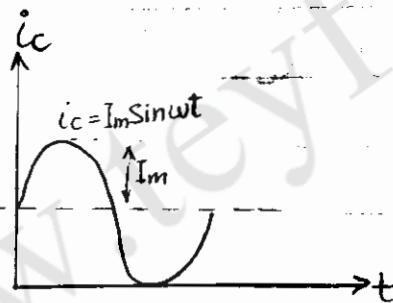
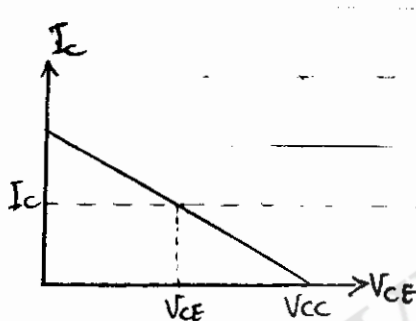
تقویت کننده توان:



کلاس A

$$\eta = \frac{\frac{1}{r} R_c I_{m/r}}{V_{CC} \cdot I_c}$$

۱- نقطه کار وسط خط بار:



$$\begin{cases} V_{CE} = \frac{V_{CC}}{2} \\ I_m = I_c \end{cases}$$

$$P_{dmax} = V_{CE} \cdot I_c = \frac{V_{CC}}{2} \cdot I_c = \frac{P_t}{2} = V_{CE} \times \frac{V_{CE}}{R_c} = \frac{V_{CE}^2}{R_c} = \frac{V_{CC}^2}{4R_c}$$

$$\Rightarrow P_{dmax} = \frac{V_{CC}^2}{4R_c}$$

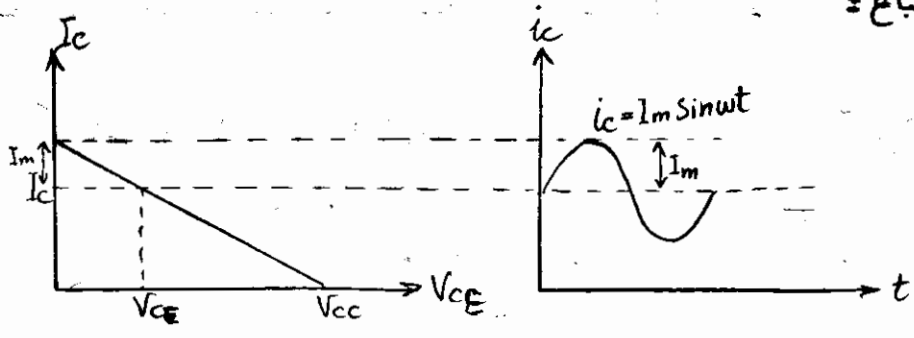
$$P_{ac} = \frac{1}{2} R_c I_{m/r} = \frac{1}{2} R_c I_c = \frac{1}{2} R_c \cdot \left( \frac{V_{CE}}{R_c} \right) = \frac{V_{CE}}{2} = \frac{V_{CC}}{4}$$

$$\Rightarrow P_{ac} = \frac{V_{CC}^2}{16R_c}$$

$$P_t = V_{CC} \cdot I_c = V_{CC} \cdot \frac{V_{CE}}{R_c} = \frac{V_{CC}^2}{4R_c} \quad \Rightarrow \quad P_t = \frac{V_{CC}^2}{4R_c}$$

$$\eta_{max} = \frac{P_{acmax}}{P_t} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{16R_c}}{\frac{V_{CC}^2}{4R_c}} = 0.25$$

۲- نقطه کار نزدیک ناحیه اشباع :



$$V_{CE} < \frac{V_{CC}}{r}$$

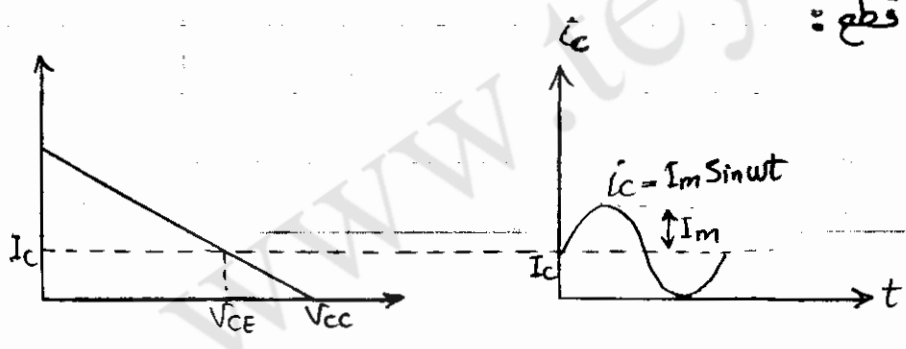
$$P_{dmax} = V_{CE} \cdot I_C < \frac{V_{CC}}{r} \cdot I_C = \frac{P_t}{r}$$

$$P_{ac} = \frac{1}{r} R_C I_m^r = \frac{1}{r} R_C \left( \frac{V_{CE}}{R_C} \right)^r = \frac{V_{CE}^r}{r R_C} < \frac{V_{CC}^r}{r R_C} = \frac{P_t}{r}$$

$$P_t = V_{CC} \cdot I_C = V_{CC} \left( \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \right) > V_{CC} \cdot \frac{V_{CC}}{r R_C} = \frac{V_{CC}^r}{r R_C}$$

$$\eta_{max} = \frac{P_{ac}}{P_t} < \frac{1}{r}$$

۳- نقطه کار نزدیک ناحیه قطع :



$$\begin{cases} V_{CE} > \frac{V_{CC}}{r} \\ I_m = I_C \end{cases}$$

$$P_{dmax} = V_{CE} I_C > \frac{V_{CC}}{r} \cdot I_C = \frac{P_t}{r}$$

$$P_{ac} = \frac{1}{r} R_C I_m^r = \frac{1}{r} R_C I_C^r = \frac{1}{r} R_C \left( \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \right)^r = \frac{(V_{CC} - V_{CE})^r}{r R_C} < \frac{\left( \frac{V_{CC}}{r} \right)^r}{r R_C} = \frac{V_{CC}^r}{r R_C}$$

$$P_t = V_{CC} \cdot I_C = V_{CC} \cdot \left( \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \right) < V_{CC} \cdot \frac{V_{CC}}{r R_C} = \frac{V_{CC}^r}{r R_C}$$

$$\eta_{max} = \frac{P_{ac}}{P_t} = \frac{\frac{(V_{CC} - V_{CE})^r}{r R_C}}{\frac{V_{CC} (V_{CC} - V_{CE})}{R_C}} = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{r V_{CC}} < \frac{V_{CC}}{r \times r V_{CC}} = \frac{1}{r}$$



در محاسبات بالا ناحیه قطع و استیج را برای ترانزیستور در نظر نگرفتیم. اگر ترانزیستور واتنی بوده

و نوای قطع و استیج داشته باشد، بسته به این نوای راندمان از ۵۰٪ نیز کاهش می یابد. همچنین

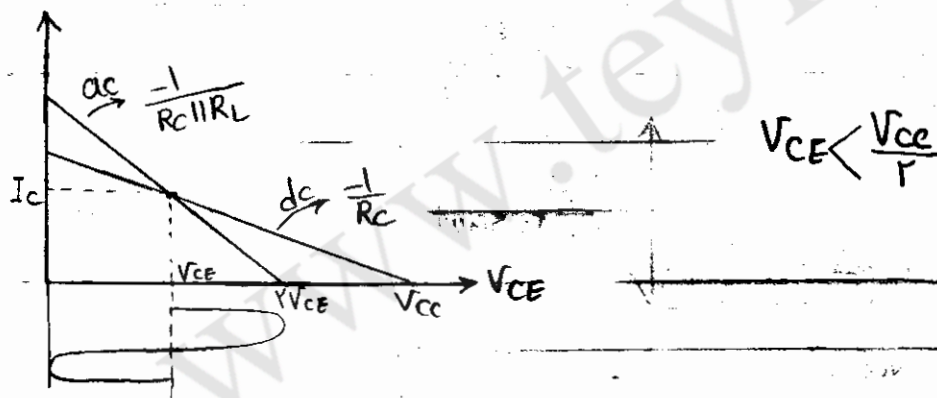
وجود مقاومت  $R_E$  نیز باعث کاهش راندمان خواهد شد.

تأثیر  $R_L$  بر راندمان:

با فرض اینکه نقطه کار وسط خط بار  $a_c$  است محاسبات

را انجام می دهیم:

$$\text{کلاس A} \rightarrow \eta = \frac{\frac{1}{2} R_C I_m^2}{V_{CC} \cdot I_C}$$



$$P_{dmax} = V_{CE} I_C < \frac{P_T}{2} \quad \text{و } V_{CE} < \frac{V_{CC}}{2}$$

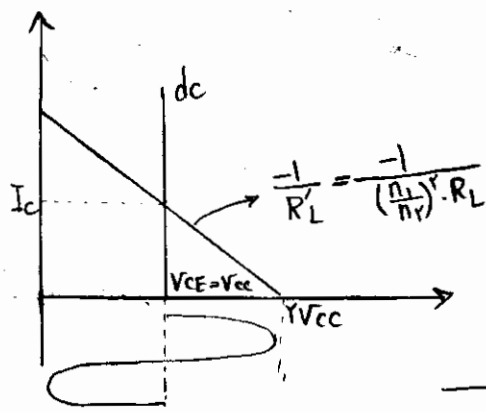
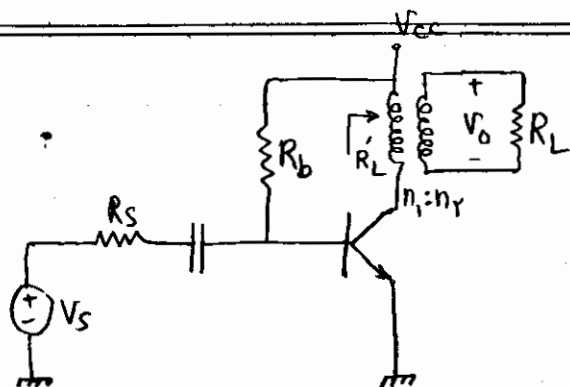
$$P_{ac} = \frac{1}{2} R_C I_m^2 = \frac{V_{CE}^2}{2 R_L} < \frac{V_{CE}^2}{2 (R_C || R_L)}$$

$$P_T = V_{CC} \cdot I_C > 2 V_{CE} \cdot I_C = 2 V_{CE} \cdot \frac{V_{CE}}{R_C || R_L} = \frac{2 V_{CE}^2}{R_C || R_L}$$

ترانزیستور

$$\rightarrow \eta_{max} = \frac{P_{ac}}{P_T} < \frac{1}{2}$$

## بافوض ترانس ایدیه ال



$$P_{dmax} = V_{CE} I_C = V_{CC} I_C = P_t$$

$$P_{ac} = \frac{V_{O_{om}}^2}{2 R_L} = \frac{(\frac{\eta_r}{\eta_i} \cdot V_{CE})^2}{2 R_L} = \frac{V_{CC}^2}{2 (\frac{\eta_i}{\eta_r})^2 R_L}$$

$$P_t = V_{CC} \cdot I_C = V_{CC} \cdot \frac{V_{CC}}{R_L'} = \frac{V_{CC}^2}{(\frac{\eta_i}{\eta_r})^2 R_L}$$

$$\eta_{max} = \frac{1}{2} = 50\%$$

$$\eta_{max} = \eta_T \cdot \eta_C$$

در حالت ترانس واقعی :

در این حالت نیز وجود نولجی قطع و اشباع و یا قراردادن مقاومتهای  $R_T$ ,  $R_i$ ,  $R_E$  باعث کاهش راندمان خواهد شد.

معمولاً محاسبات فوق در دمای ثابت  $T = 25^\circ C$  انجام می گیرد. سه روش برای تبانی حرارتی

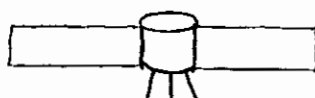
ترانزیستور با محیط وجود دارد :

تلفات حرارتی در ترانزیستور :

1) Conduction

هدایت } از پیوند به بدنه  
از بدنه به پیوند

2) radiation



قراردادن رادیاتور  
heat sink



بین رادیاتور و ترانزیستور از خمیر سلیکون استفاده می کنند که تبادل حرارتی با محیط را تقریباً

۷۰٪ معادل می برد.

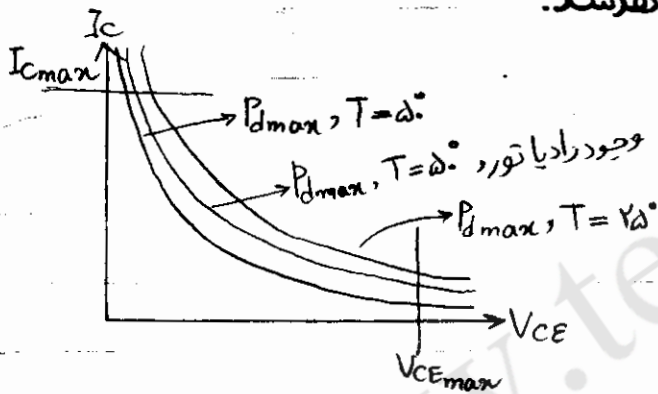
### ۳) Convection استفاده از

ماکزیمم دمای تحملی می شود

$$P_{dmax} = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{T_{jmax} - T_A}{R_{th}}$$

دمای محیط  $T_A$   $\frac{^{\circ}C}{W}$  یا  $\frac{^{\circ}C}{mW}$  مقاومت گرمایی در برابر

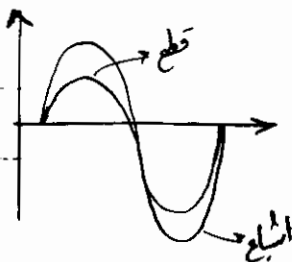
قرار دادن رادیاتور باعث افزایش  $R_{th}$  خواهد شد.



مثال: در ترانزیستور BC107 پارامترهای مقابل را داریم:

$$T_{jmax} = 175^{\circ}C, \quad \begin{cases} R_{thj-c} = 1/2^{\circ}C/mW \\ R_{thj-a} = 1/5^{\circ}C/mW \end{cases}$$

اثر اعوجاج برگاهش را ندان:



$$V_o = V_1 \sin \omega t + V_2 \sin 2\omega t + V_3 \sin 3\omega t + \dots + V_n \sin n\omega t$$

$$P = \frac{V_o^2}{R_L} = \frac{1}{R_L} (V_1 \sin \omega t + V_2 \sin 2\omega t + \dots + V_n \sin n\omega t)^2$$

$$= \frac{1}{R_L} (V_1^2 \sin^2 \omega t + V_2^2 \sin^2 2\omega t + \dots + V_n^2 \sin^2 n\omega t + 2V_1 V_2 \sin \omega t \sin 2\omega t + \dots)$$

$\frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$   $V_1 V_2 \cos \omega t - V_1 V_2 \cos 3\omega t$

$$\begin{aligned} \rightarrow P_{ac} &= \frac{1}{R_L} \left( \frac{V_1^2}{2} + \frac{V_2^2}{2} + \dots + \frac{V_n^2}{2} \right) \\ &= \frac{V_1^2}{2R_L} \left( 1 + \frac{V_2^2}{V_1^2} + \dots + \frac{V_n^2}{V_1^2} \right) \end{aligned}$$

if  $\frac{V_2}{V_1} = D_2$  ,  $\frac{V_3}{V_1} = D_3$  , ...

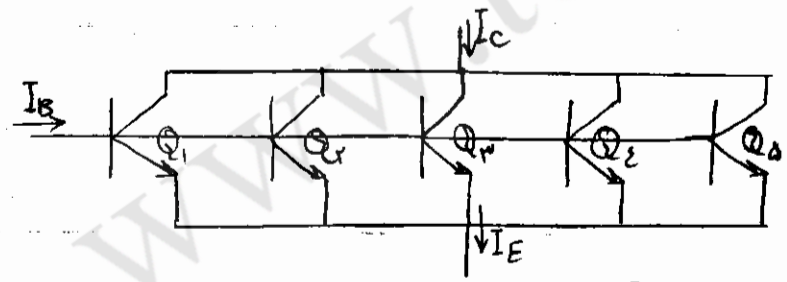
$\left\{ \begin{aligned} \frac{V_1^2}{2R_L} & \text{ توان هارمونیک اول} \\ \frac{V_2^2}{2R_L} & \text{ توان هارمونیک دوم} \end{aligned} \right.$

$$\rightarrow P_{ac} = \frac{V_1^2}{2R_L} (1 + D_2^2 + D_3^2 + \dots + D_n^2) = \frac{V_1^2}{2R_L} (1 + D^2)$$

$\begin{matrix} \text{total} \swarrow & \text{THD} = D = \sqrt{D_2^2 + D_3^2 + \dots + D_n^2} \\ \text{harmonic} \searrow & \downarrow \\ & \text{distortion} \end{matrix}$

,  $P_{ac} = \frac{V_1^2}{2R_L} (1 + D^2)$

تکنیک موازی کردن ترانزیستورهای کم ولت و استفاده کردن مجموعه به جای یک ترانزیستور بولت :



$$\begin{aligned} I_B &= I_{B1} + I_{B2} + I_{B3} + I_{B4} + I_{B5} \\ V_{BE1} &= V_{BE2} = V_{BE3} = V_{BE4} = V_{BE5} \end{aligned}$$

باتوجه به اینکه جریان  $I_C$  مقدار زیادی دلو (به عنوان مثال ۹A) استفاده از تعداد ترانزیستور

بیشتر اطمینان مولد را زیاد می کند و از سوختن ترانزیستور جلوگیری می کند. به عنوان مثال

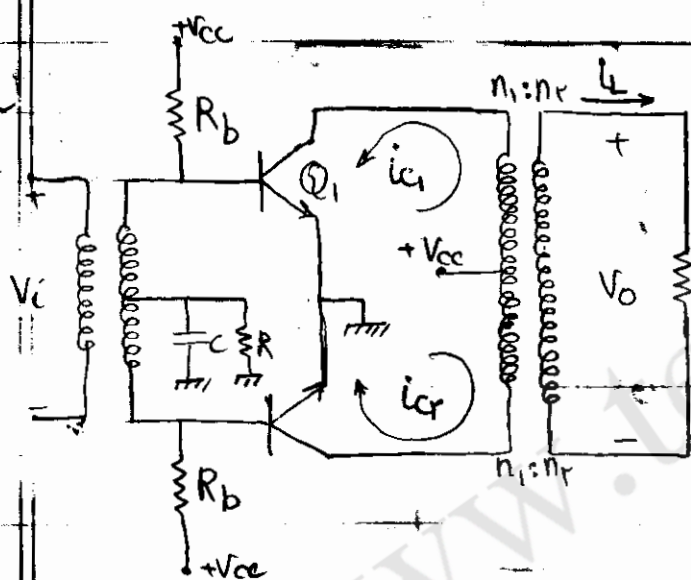
اگر از ۳ ترانزیستور ۳۵ استفاده می کردیم چون یارامتر هر سه ممکن است باهم برابر نباشد

در نتیجه جریان به صورت مساوی تقسیم نمی شود و ممکن است یکی از ترانزیستورها بیشتر

از جریان بکشد و بسوزد ولی استفاده از دو ترانزیستور این اشکال را رفع می کند.

این نوع بسط ترانزیستورها مقرون به صرفه تر از استفاده از یک ترانزیستور پروات است.

تقویت کننده تیوش پول کلاس A (Push Pull A)



$$V_o = I_L \times R_{L_e}$$

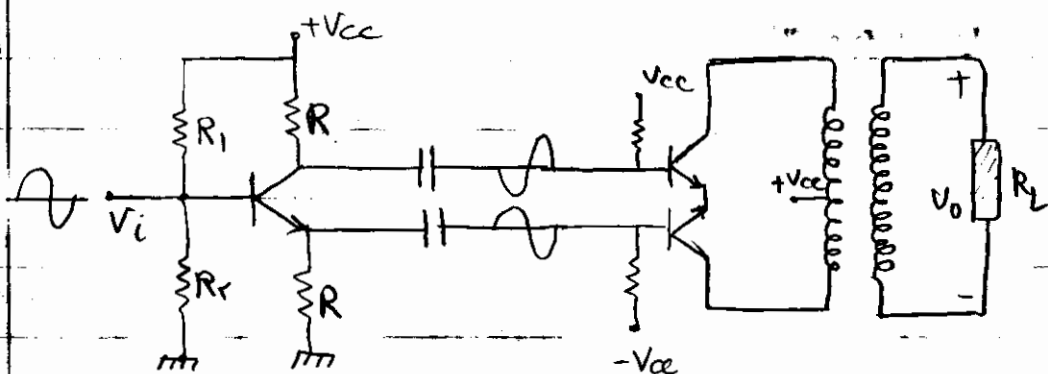
$$V_o = (i_{c1} - i_{c2}) \frac{n_r}{n_p} \times R_L$$

$$V_o = h_{fe} (i_{b1} - i_{b2}) \frac{n_r}{n_i} \times R_L$$

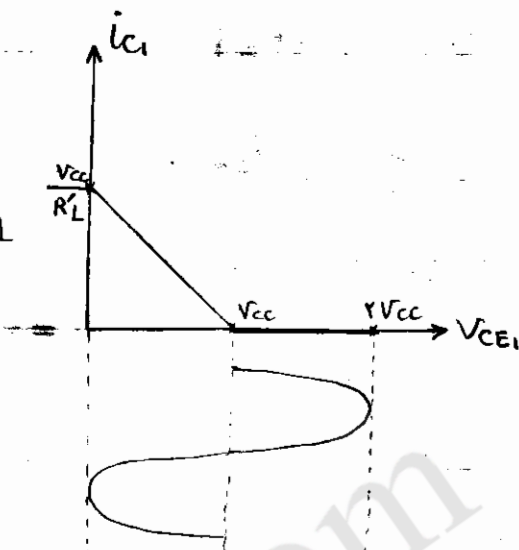
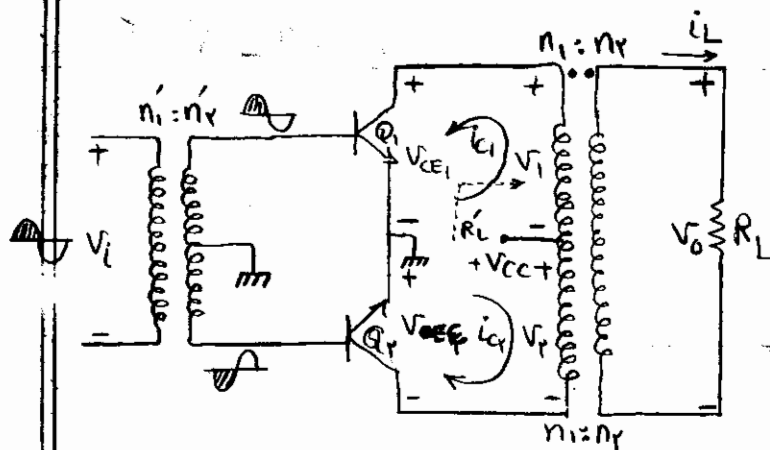
$$V_o = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} (V_{i1} - V_{i2}) \frac{n_r}{n_i} \times R_L$$

در این تکنیک دامنه ولتاژ خروجی افزایش می یابد اما زمان از به تغییر می نوی کند لذا

از این نوع مولزی کردن کمتر استفاده می شود (در مصارف کم وات از این نوع استفاده می کنیم)

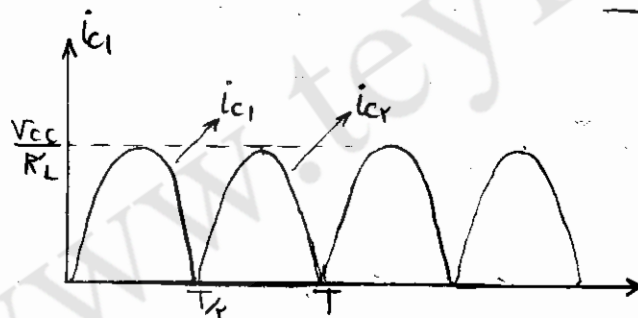


# تقویت کننده پوش پول کلاس B =



$$\begin{cases} V_{CE1} = V_1 + V_{CC} \\ V_{CE2} = V_{CC} - V_2 \end{cases}$$

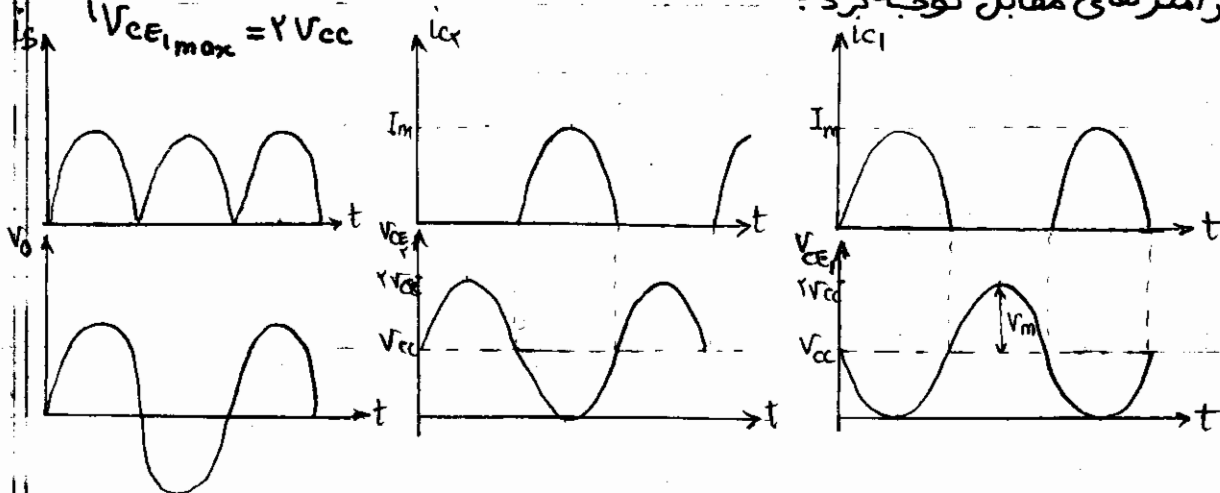
در بیک منفی سگنال ورودی  $V_{CE2} = 0 \rightarrow V_2 = V_{CC} \xrightarrow{\text{القا}} V_1 = V_{CC} \rightarrow V_{CE1} = 2V_{CC}$



$$\begin{cases} I_{C_{av}} = \frac{I_m}{\pi} = \frac{V_{CC}}{R_L' \cdot \pi} \\ I_{C1p} = \frac{V_{CC}}{R_L'} \\ V_{CE1max} = 2V_{CC} \end{cases}$$

توجه به نمودارهای بالا باید در انتخاب ترانزیستور  $Q_1$

به پارامترهای مقابل توجه کرد:



$$P_{Lmax} = V_{L_{eff}} \cdot I_{L_{eff}} = \frac{V_{Lm}}{\sqrt{r}} \cdot \frac{I_{Lm}}{\sqrt{r}} = \frac{V_{Lm} \cdot I_{Lm}}{r} = \frac{V_m \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot I_m \cdot \frac{n_1}{n_2}}{r} = \frac{V_m I_m}{r}$$

$$P_S = \frac{1}{T} \int_0^T i_s \cdot V_{cc} dt = \frac{r V_{cc}}{T} \int_0^T I_m \sin \omega t dt = \frac{r V_{cc} \cdot I_m}{T} \cdot \left. -\frac{1}{\omega} \cos \omega t \right|_0^T = \frac{r V_{cc} \cdot I_m}{\pi}$$

$$\rightarrow \eta_{max} = \frac{P_{Lmax}}{P_{Smax}} = \frac{\frac{V_m I_m}{r}}{\frac{r V_{cc} \cdot I_m}{\pi}} = \frac{\pi}{r} = \frac{1}{V_{A1\omega}} \rightarrow \eta_{max} = \frac{1}{V_{A1\omega}}$$

$$P_Q = \frac{1}{T} \int_0^T i_{C1} \cdot V_{CE1} dt = \frac{1}{T} \int_0^T (I_m \sin \omega t) (V_{cc} - V_m \sin \omega t) dt$$

$$= \frac{I_m}{T} \int_0^T (V_{cc} \sin \omega t - V_m (1 - \cos \omega t)) dt = \frac{V_{cc} \cdot I_m}{\pi} - \frac{V_m I_m}{r}$$

$$\rightarrow P_Q = \frac{V_{cc} I_m}{\pi} - \frac{V_m I_m}{r} \xrightarrow{V_m = V_{cc}} P_Q = \frac{V_{cc} I_m}{\pi} - \frac{V_{cc} I_m}{r} = V_{cc} I_m \left( \frac{1}{\pi} - \frac{1}{r} \right)$$

$$\rightarrow P_Q = \frac{1}{11} P_{Smax} = \frac{1}{11} P_{Lmax}, \quad V_m = V_{cc}$$

$$P_Q = \frac{V_{cc} I_m}{\pi} - \frac{V_m I_m}{r}, \quad I_m = \frac{V_m}{R'_L} = \frac{V_m}{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 R_L}, \quad \frac{\partial P_Q}{\partial V_m} = 0$$

$$\rightarrow P_Q = I_m \left( \frac{V_{cc}}{\pi} - \frac{V_m}{r} \right) = \frac{V_m}{R'_L} \left( \frac{V_{cc}}{\pi} - \frac{V_m}{r} \right)$$

$$\frac{\partial P_Q}{\partial V_m} = \frac{1}{R'_L} \left( \frac{V_{cc}}{\pi} - \frac{V_m}{r} \right) - \frac{1}{r} \frac{V_m}{R'_L} = 0 \rightarrow V_m = \frac{r V_{cc}}{\pi}$$

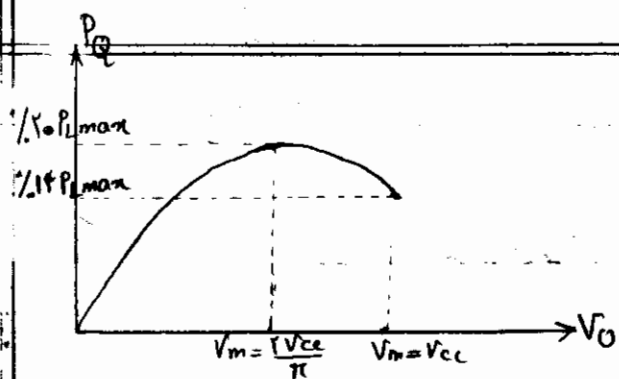
$$\rightarrow P_{Qmax} = \frac{r V_{cc}}{\pi R'_L} \left( \frac{V_{cc}}{\pi} - \frac{V_{cc}}{r\pi} \right) = \frac{V_{cc}^2}{\pi^2 R'_L} \rightarrow P_{Qmax} = \frac{V_{cc}^2}{\pi^2 R'_L}$$

$$V_m = \frac{r V_{cc}}{\pi} \rightarrow \begin{cases} P_{Qmax} = \frac{V_{cc}^2}{\pi^2 R'_L} \\ R_L = \frac{r}{\pi^2} \cdot \frac{V_{cc}^2}{R'_L} \\ P_S = \frac{r}{\pi^2} \cdot \frac{V_{cc}^2}{R'_L} \end{cases}$$

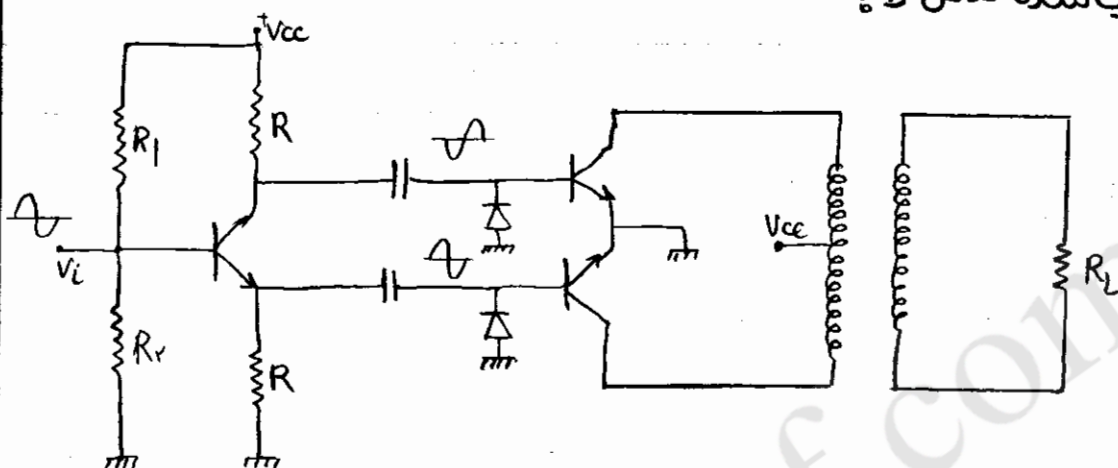
$$\eta = 50\%$$

$$\rightarrow P_{Qmax} = \frac{1}{4} P_{Lmax} = \frac{1}{16} P_{Smax}$$

$$V_m = V_{cc}$$



بایاس تقویت کننده کلاس B :

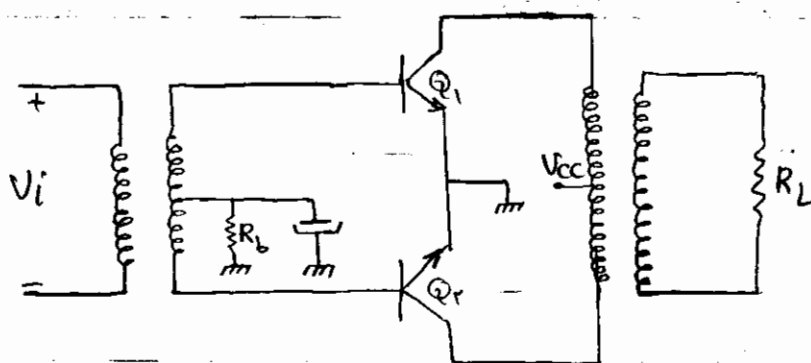


در حالتی که دیودها در مدار بالا وجود ندارند مدار پس از چند آلترنانش خاموش می شود چون

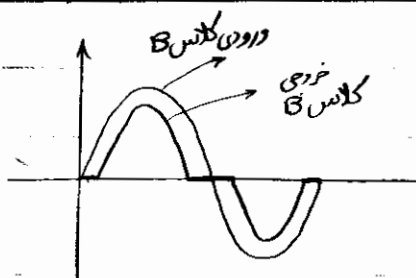
مسیری برای دشارژ شدن خازن ها وجود ندارد. لذا برای رفع این مشکل از دو دیود به شکل بالا

استفاده می شود تا مسیر دشارژ خازن ها فراهم شود.

تقویت کننده پوش بول کلاس AB :



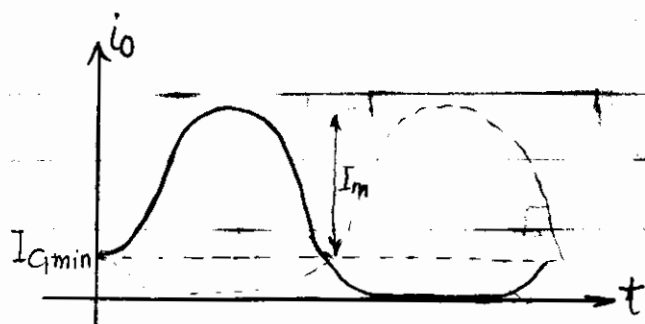




در تقویت کننده کلاس B مقداری از سیگنال ورودی صرف

روشن کردن ترانزیستورها می شود برای رفع این اشکال

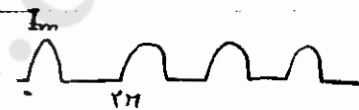
از کلاس AB استفاده می کنیم. در این کلاس ترانزیستورها را کمی بایاس می کنیم و در نتیجه در آستانه



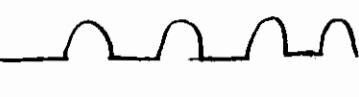
هدایت خواهند بود.

$$V_i = 0 \rightarrow I_s = 2I_{Cmin}$$

$$i_{c1} = I_m \left( \frac{1}{\pi} + \frac{1}{\pi} \sin \omega t + \frac{2}{\pi} \left( \frac{\cos \omega t}{1 \times 3} + \frac{\cos \omega t}{3 \times 5} + \dots \right) \right)$$



$$i_{c2} = I_m \left( \frac{1}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin \omega t - \frac{2}{\pi} \left( \frac{\cos \omega t}{1 \times 3} + \frac{\cos \omega t}{3 \times 5} + \dots \right) \right)$$

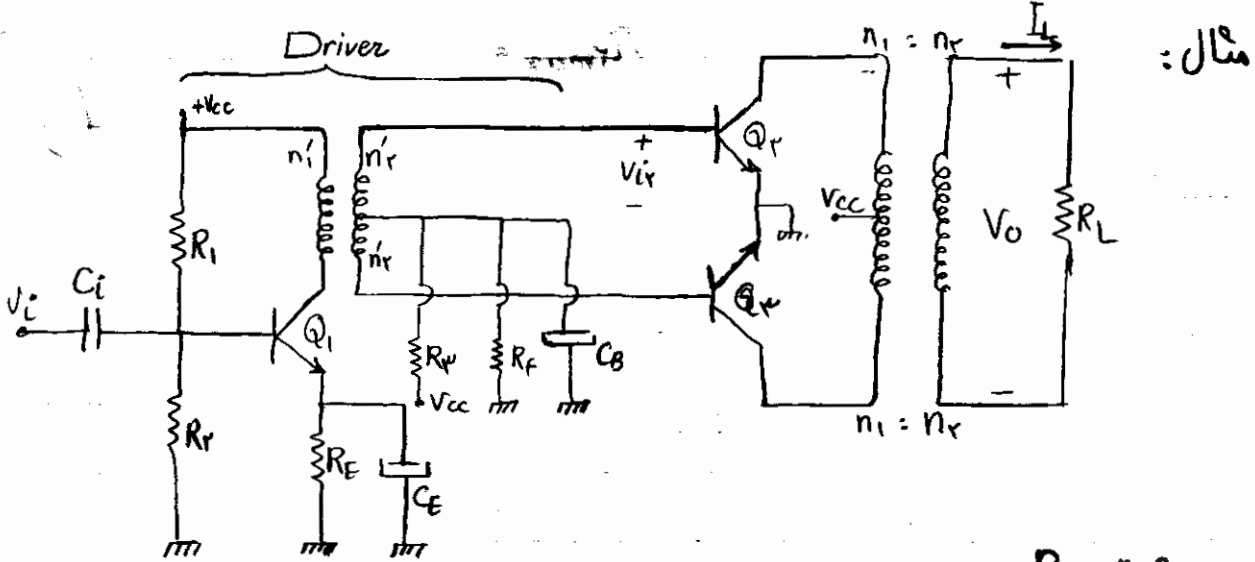


$$\rightarrow i_L = \frac{n_1}{n_2} (i_{c1} - i_{c2}) = \frac{n_1}{n_2} (I_m \sin \omega t)$$

از مزایای کلاس B و AB تقویت کننده پوش پول غیر از بلندمان بالا این است که بوسیله کوپلر

ترانسفورماتوری مانند یک فیلتر عمل می کند و هارمونیک های زوج را در جریان خروجی حذف

می کند.



$$R_L = 8 \Omega$$

$$\beta_1 = h_{fe1} = 100, \quad h_{fe1} = h_{fe2} = \beta_1 = \beta_2 = 50, \quad V_{CC} = 20$$

$$V_{CEsat} = 1V, \quad V_{BE(cut\ in)} = 0.7V, \quad V_{BEmax} = 0.8V$$

Driver طراحی  $\frac{n_1}{n_2} = ? \leftarrow P_{Lmax} = 10W$  (الف)

ب)  $P_{Qmax}, P_{Dmax}, P_{Tmax}$  و  $f_L = 20Hz$  و فرکانس قطع پاسی ترانسفورماتور

10Hz ای باشد (بدین معنی که باید از آنها صرف نظر کنیم)

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{V_m}{V_{om}}, \quad P_{Lmax} = \frac{V_{om}^2}{2R_L} \rightarrow V_{om} = 12.4V$$

$$V_m = V_{CC} - V_{CEsat} = 20 - 1 = 19V \rightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{19}{12.4} = 1.5$$

$$V_{B1} = V_{BE(cutin)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 0.7 \rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{19}{0.7}$$

if  $R_2 = 1k\Omega \rightarrow R_1 = 39k\Omega$

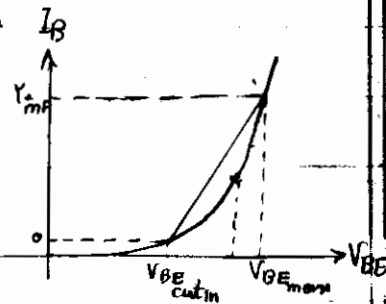
$$I_{Lmax} = \frac{V_{om}}{R_L} = \frac{12.4}{8} = 1.55A, \quad I_{Cmax} = \frac{n_2}{n_1} I_{Lmax} = 1.0A$$

$$I_{B_{max}} = \frac{I_{C_{max}}}{\beta_r} = 2 \text{ mA}$$

$$V_{ir_{max}} = \frac{V'_m}{A_{V_r}}$$

$$|A_{V_r}| = \frac{h_{fe} R'_L}{h_{ie_r}}, \quad h_{ie_{av}} = \frac{V_{BE_{max}} - V_{BE_{cutin}}}{I_{B_{max}} - I_{B_{min}}}$$

$$= \frac{1.1 - 1.0}{2 - 0} = 10 \Omega$$



$$\rightarrow |A_{V_r}| = \frac{h_{fe} \left(\frac{n_L}{n_r}\right)^r R_L}{h_{ie_{av}}} = 10$$

$$\rightarrow V_{ir_{max}} = \frac{V'_m}{A_{V_r}} = \frac{19}{10} = 1.9 \text{ V} = \Delta V_{BE} \quad \frac{n'_i}{n'_r} = 10$$

$$I_{C_{max}} \geq I_{B_{max}} \cdot \frac{n'_r}{n'_i} = 2 \text{ mA} \quad \text{باید}$$

$$V_{CE1} \geq \frac{n_L}{n_r} \cdot V_{ir_{max}} = 1.9 \text{ V}$$

$$\text{if } V_{CE1} = 1.0 \text{ V} \rightarrow R_E I_C = 1.0 \text{ V}, \quad I_C = 2 \text{ mA} \rightarrow R_E = 500 \Omega$$

استاندارد  $R_E = 470 \Omega$

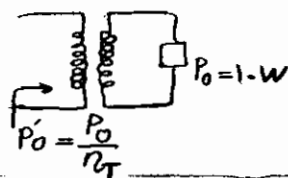
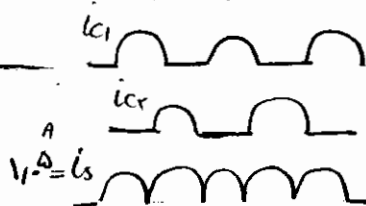
$$V_{B1} = 1.0 \text{ V}, \quad R_1 = R_r = 1 \text{ k} \rightarrow V_E = 9.1 \text{ V} \rightarrow I_C = \frac{9.1}{1.1} = 8.27 \text{ mA}$$

فرض

$$b) \quad I_S = 1.1 \text{ mA}$$

$$P_{t_{max}} = \frac{V_{I_{C_{max}}}}{\pi} \cdot V_{CC} = 13.4 \text{ W}$$

$$\eta_{max} = \frac{P_{O_{max}}}{P_{t_{max}}} = \frac{10}{13.4} = 0.746$$



$$P_{Q_{max}} = 1.20 P_{L_{max}} = 2 \text{ W}$$

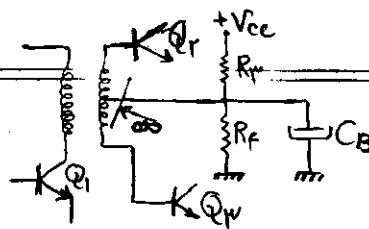
$$\begin{cases} V_{CE_{max}} = V_{CC} = 10 \text{ V} \\ I_{C1_{av}} = \frac{I_{C_{max}}}{\pi} = 3.27 \text{ mA} \\ P_Q = 2 \text{ W} \end{cases}$$

مشخصات ترانزیستور انتخابی:

$$c) \quad R_{G_E} = R_E \parallel \left( \frac{R_1 \parallel R_r \parallel R_S + h_{ie}}{1 + h_{fe}} \right) \approx \frac{h_{ie}}{h_{fe}} = 13 \Omega$$

92

$$R_{CB} = R_r \parallel R_f \approx 1 \text{ K}$$



$$R_{Ci} = (R_i \parallel R_r \parallel h_{ie}) + R_s \approx 101 \text{ K}\Omega$$

$$f_{CE} = 1 \text{ Hz}$$

با استفاده از روش قطب مسط:

$$f_{CB}, f_{Ci} \approx 1 \text{ Hz}$$

$$\rightarrow \frac{1}{2\pi R_{CE} \cdot C_E} = 1 \text{ Hz} \rightarrow C_E = 4 \mu\text{F}$$

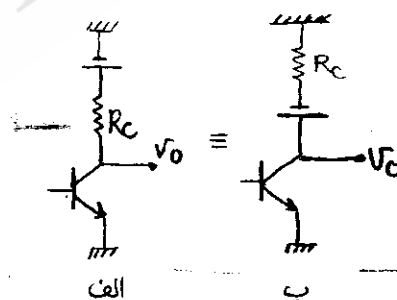
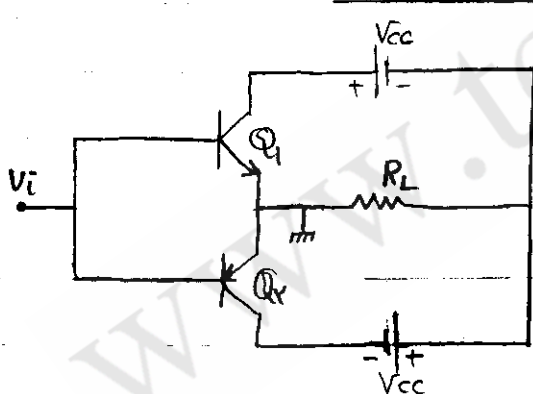
$$1 \text{ Hz} = \frac{f'_L}{\sqrt{2^k - 1}}$$

$$\rightarrow f'_L = 1.74 \text{ Hz}$$

$$C_i = \frac{1}{2\pi R_{Ci} \cdot f'_L} = 224 \text{ nF}$$

$$C_B = \frac{1}{2\pi R_{CB} \cdot f'_L} = 250 \text{ nF}$$

$$\rightarrow C_i = C_B = 220 \text{ nF}$$

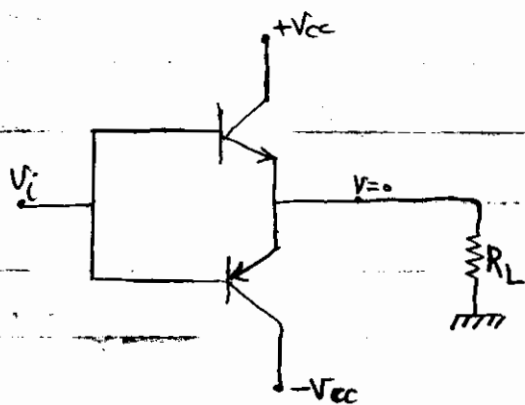


در این حالت چون منبع تغذیه  $V_{CC}$  است اگر نویزی در دوسر آن ظاهر شود از بین نخواهد رفت.

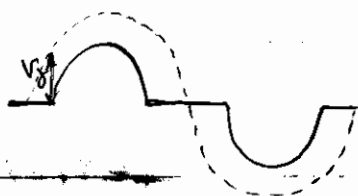
در شکل ب هم منبع تغذیه همین حالت را دارد ولی در حالت الف اگر نویز در دوسر منبع ظاهر شود

چون مقاومت داخلی منبع کم است نویز از بین رفته و به زمین منتقل می شود. لذا حالت بالا برای

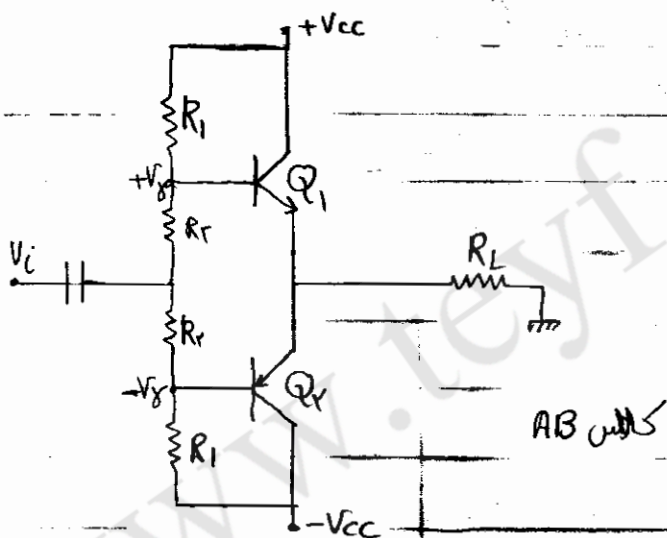
تقویت کننده مناسب نیست و باید آن را اصلاح کنیم.



برای رفع مشکل distortion cross over در تقویت کننده بالا



آن را به شکل زیر می بندیم :

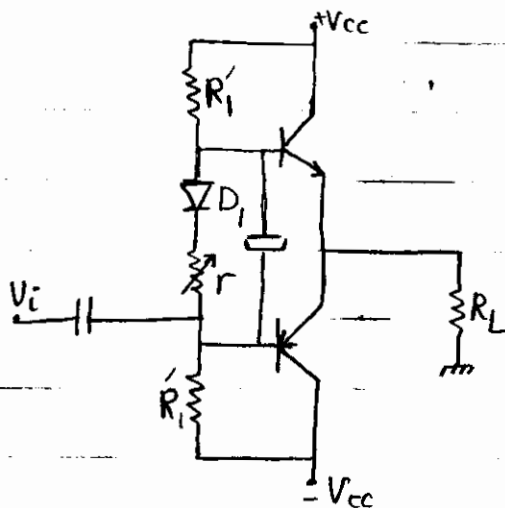


برای رفع مشکل تغییر جریان در مدار بالا (تغییر جریان باعث تغییر ولتاژی شود) می توان به جای

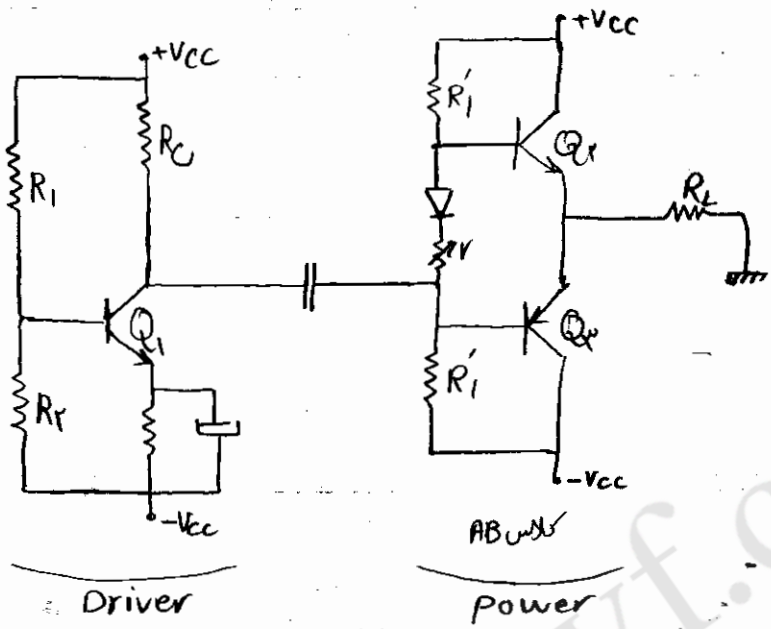
$R_r$  ها از دودئیود استفاده کرد. اما چون  $V_D > V_g$  است لذا تقویت کننده به سمت کلاس A

و روشن بودن بیشتر میلی کند. این مشکل را

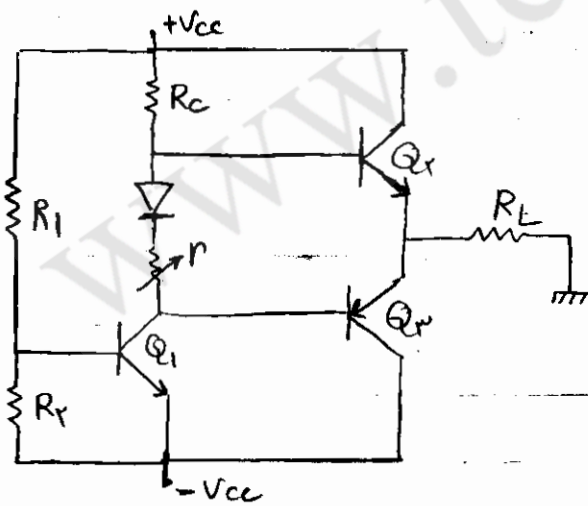
به صورت زیر حل می کنیم :



اگر مجموع مقاومتهای ۲ و دیود باعث تغییر سیگنال در خروجی ترانزیستورها شود از خازنی که در شکل نشان داده شده است استفاده می‌کنیم.

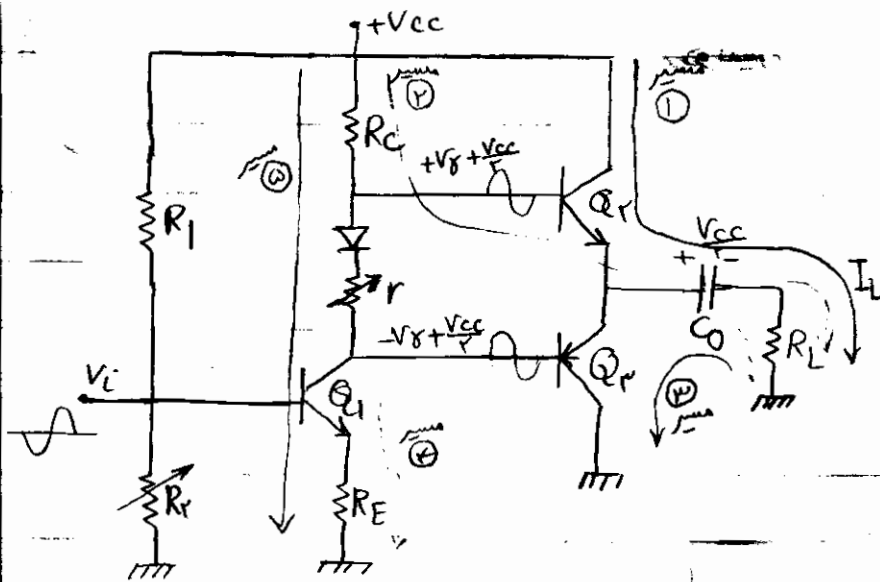


برای جلوگیری از استفاده المان زیاد:



اغلب چون در مدارها از یک منبع تغذیه  $V_{CC}$  استفاده می‌شود برای حذف منبع  $-V_{CC}$  به شکل زیر عمل می‌کنیم:





$$V_{CC} = V_{CE1} + V_{CE2} + R_L I_L$$

$$\frac{V_{CC}}{2} = V_{CE1} + R_L I_L$$

وجود خازن  $C_0$  :

۱- به عنوان کپلاژ در مدار به کار می رود و ۲- مثل منبع تغذیه را برای  $Q_2$  بازی می کند.

مقاومت متغیر  $R_2$  برای بوجود آوردن سوئیچینگ متقارن در خروجی به کار می رود و با تغییر

مقاومت متغیر  $R_2$ ، Crossover را در خروجی تعیین می کنیم. یعنی مثلاً می توانیم کاری کنیم که در

لحظه ۰ ترانزیستورها روشن شوند.

$$V_{B1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad , \quad I_{C1} \approx I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_E} = \frac{V_{B1} - V_{BE1}}{R_E}$$

$$V_{B2} = V_{CC} - R_C I_{C1}$$

$$V_{B3} = V_{CC} - (R_C I_{C1} + V_D + r I_{C1})$$

$$\rightarrow V_{B2} - V_{B3} = V_D + r I_{C1} = 2V_\gamma$$

$$V_{E1} = V_{E2} = V_{B2} - V_\gamma = \frac{V_{CC}}{2} = V_{C0}$$

در بیک مشبّت خروجی  $\rightarrow V_{CC} \stackrel{(2)}{=} R_C (I_{B_{rmax}} + I_{C_{min}}) + V_{BE_{rmax}} + \underbrace{V_{CE}}_{\frac{V_{CC}}{F}} + R_L I_{Lmax}$

$I_{C_{min}}$  را صفر در نظر نمی گیریم تا ترانزیستورها به طور کامل خاموش نشوند.

$$V_{CC} \stackrel{(1)}{=} V_{CE_{rmin}} + \underbrace{V_{CE}}_{\frac{V_{CC}}{F}} + R_L I_{Lmax}$$

در هنگام طراحی  $P_L$  و  $R_L$  را به ما می دهند در نتیجه به صورت زیر عمل می کنیم:

$$P_L = \frac{V_{om}^2}{2R_L} \rightarrow V_{om} \stackrel{\text{معلوم}}{=} R_L I_{Lmax} \rightarrow I_{Lmax} \text{ معلوم}$$

و اگر  $V_{CE_{rmin}}$  معلوم باشد می توان مقدار تغذیه مورد نظر ( $V_{CC}$ ) را تعیین کرد. با معلوم بودن

$V_{CC}$  در رابطه (۱) چون  $V_{BE_{rmax}}$  جزو اطلاعات ورودی است و  $I_{C_{min}}$  را خود طراحی معلوم می کند

لذا فقط  $R_C$  مجهول خواهد بود و به این ترتیب  $R_C$  معلوم می شود. اما چون مقدار مشخص شده

عدد استاندارد نیست (اگر تست کنند کور نبود) در حالت طراحی فرض می کنیم  $I_{C_{min}}$  صفر باشد.

سپس  $R_C$  را تعیین می کنیم. بعد آن را به سمت مقاومت استاندارد کمتری بریم به این ترتیب خود

به خود  $I_{C_{min}}$  در نظر گرفته می شود.

if  $V_i = 0 \rightarrow \begin{cases} V_{R_C} = V_{CC} - (\frac{V_{CC}}{F} + V_{\gamma}) = R_C I_{C_1} \rightarrow I_{C_1} \text{ معلوم} \\ V_{B_r} - V_{B_p} = 2V_{\gamma} = V_{D_1} + r I_{C_1} \rightarrow r \text{ حدود آن را می یابیم} \end{cases}$

در بیک منفی خروجی  $\rightarrow \frac{V_{CC}}{F} \stackrel{(3)}{=} |V_{CE_{pmin}}| + R_L (I_{C_p}) \rightarrow I_{Lmax}$

$I_{C_p}$  خاموش و  $I_{B_p}$  روشن  
و به سمت اشباع  
و  $I_{C_p}$  به سمت اشباع

با دقت در رابطه بالایی بنویسیم که هیچ چیز محاسبه شده است فقط چک می کنیم که  $V_{CE_{min}}$  که از رابطه

بالایی می شود از  $V_{CE_{sat}}$  بزرگتر باشد در غیر این صورت طراحی را از اول تکرار می کنیم.

$$\begin{cases} \frac{V_{CC}}{P} \textcircled{4} = R_L I_{C_{max}} + |V_{BE_{max}}| + V_{CE_{sat}} + R_E [I_{B_{max}} + I_{C_{max}}] \\ V_{CC} \textcircled{5} = R_C I_{C_{max}} + V_D + r I_{C_{max}} + V_{CE_{sat}} + R_E [I_{B_{max}} + I_{C_{max}}] \end{cases}$$

\* در این تقویت کننده ضریب پایداری را خیلی بزرگ (۹-۱۰) انتخاب نمی کنیم چون  $R_1$  و  $R_2$  کوچک

می شوند و ولتاژش ورودی کم می شود و اگر قرار باشد طبقه دیگری قبل از Driver قرار گیرد

طراحی آن مشکل می شود. لذا ضریب پایداری حرارتی را در حدود ۳-۴ انتخاب می کنیم.

اگر مقاومت  $R_E$  را با خازن  $C_E$  جایگزین کنیم:

در رابطه  $\textcircled{4}$  به جای  $[I_{B_{max}} + I_{C_{max}}]$  مقدار  $I_{C_1}$  را قرار می دهیم و احتیاجی به

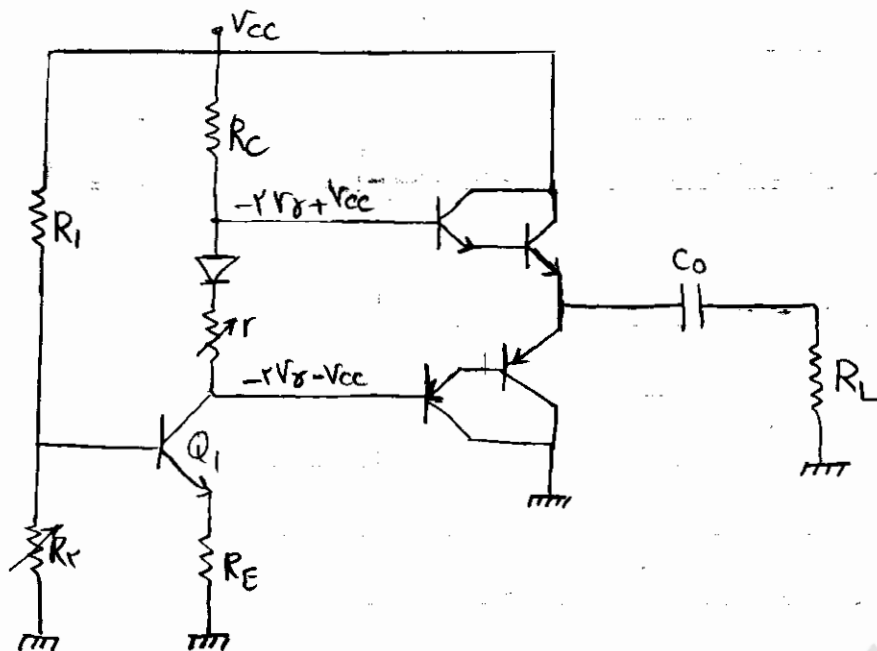
رابطه  $\textcircled{5}$  نخواهیم داشت ولی در صورت نوشتن  $\textcircled{5}$  باید به جای  $I_{C_{max}}$  از  $I_{C_1}$  استفاده

کنیم که در این صورت ترم  $V_D + r I_{C_{max}}$  برابر  $2V_T$  خواهد شد.

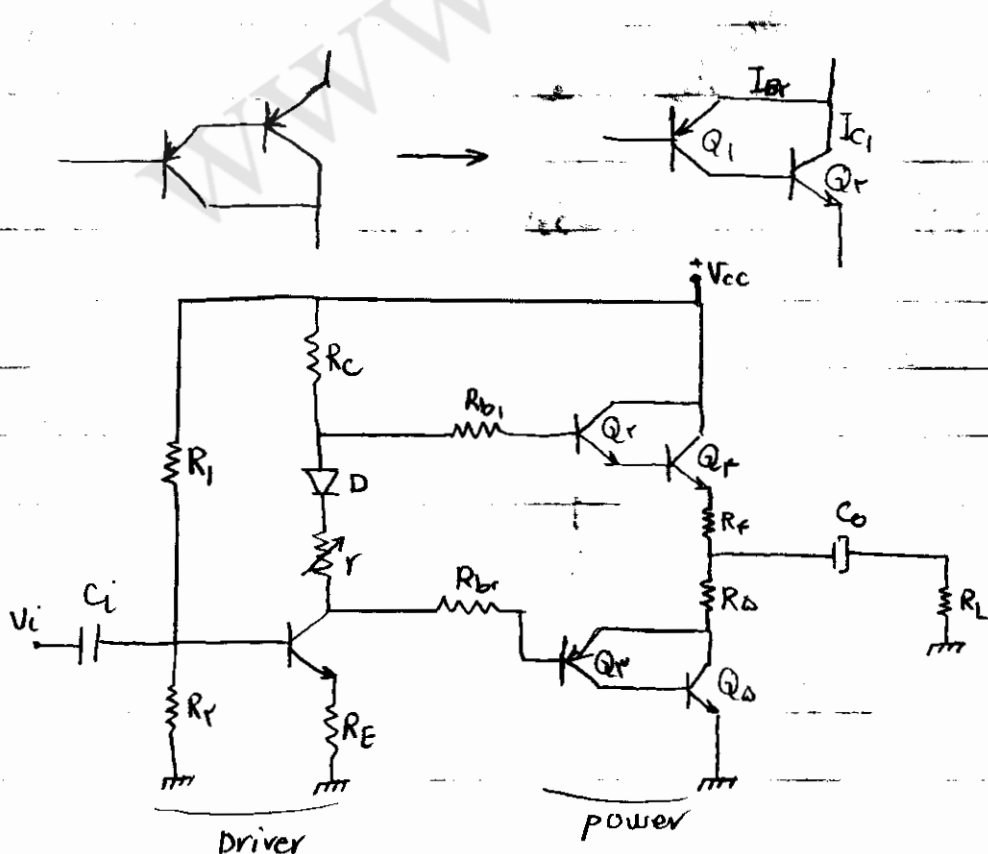
برای اخذ اسیس توان خروجی می توان به جای  $Q_2$  و  $Q_3$  از زوج دیالینگتون

$$2V_T + 2V_T =$$

استفاده می کنیم.



اما چون ضرایب تقویت ترانزیستورهای npn با pnp برابر نیست لذا باعث می شود که تقویت درست انجام نشود و مدار از حالت تقارن خارج شود. لذا به جای یکی از زوج های دارلینگتون از زوج زیر استفاده می کنیم:



در شکل بالا مقاومت‌های  $R_F$  و  $R_E$  مقاومت‌های محافظی هستند که اگر بار  $R_L$  اتصال کوتاه شود

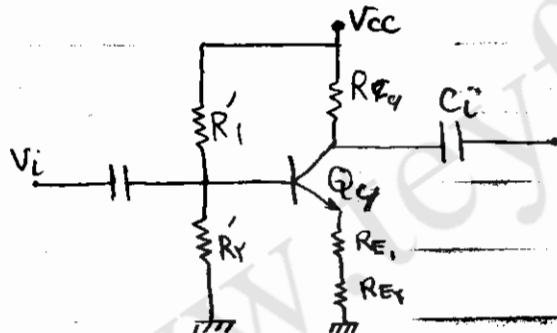
چون جریان زیادی از مداری گذرد و باعث سوختن ترانزیستورها خواهد شد، لذا این مقاومت‌ها

را دارای هیم که مقدار کوچکی دارند تا هم تون تلف نشود و هم به محض عبور جریان زیاد

این مقاومت‌ها بسوزند. (سوختن مقاومت‌ها به صرفه‌تر از سوختن ترانزیستور است).

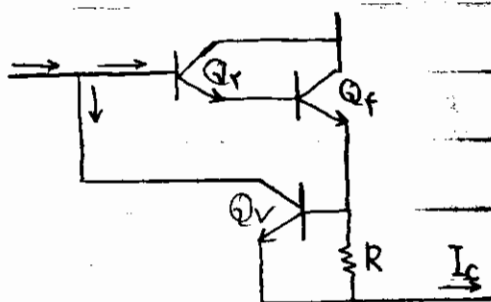
در تقویت کننده فوق چون سیگنال ورودی باید به اندازه کافی بزرگ باشد لذا در ورودی از

یک Pre Amp. استفاده می‌کنیم که به شکل زیر است:



I.C. مجتمع  
در مدارهای معمولاً برای حفاظت جریانی از روشی که در بالا گفته شد استفاده نمی‌کنند بلکه مقدار

مقاومت‌ها را طوری انتخاب می‌کنند که جریان محدود شود. لذا از ترکیبی به فرم زیر استفاده می‌کنند:



طرح یک محدود کننده جریان

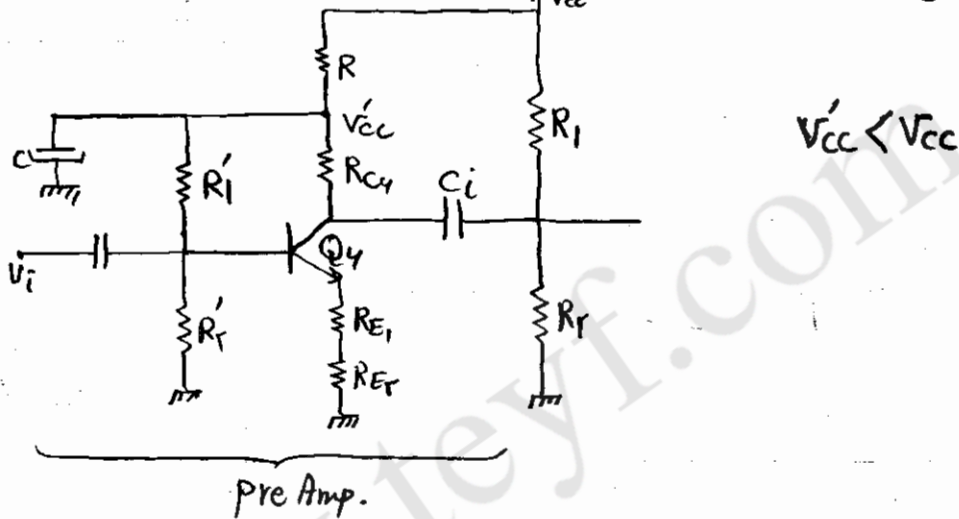
$$V_{BE_{ON}} = R I_{L_{max}} \quad : \quad V_{BE_{ON}} \text{ را طوری انتخاب می‌کنیم که}$$

در مدار محدود کننده فوق به محض اینکه  $I_C$  زیاد شود  $R I_C$  زیاد شده و به  $V_{BE_{on}}$  می رسد و

$R I_C$  روشن شده جریان را از بیس  $Q_2$  کشیده و آن را محدود می کند.

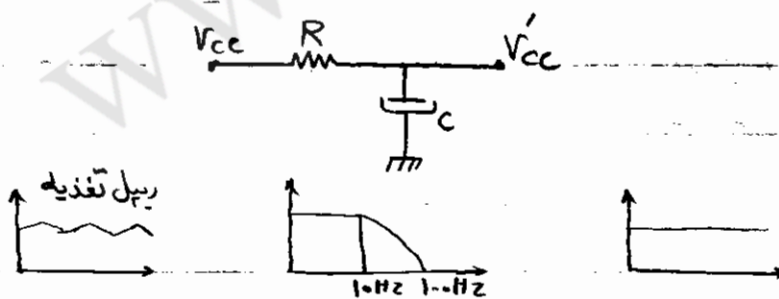
برای اینکه در ترکیب Pre Amp. از منبع تغذیه پائین استفاده کرده و تلفات این ترکیب را پائین

آوریم از ترکیبی به فرم زیر استفاده می کنیم:



حسن دیگر ترکیب بالا فیلتر کردن منبع تغذیه است چون تغییرات منبع تغذیه باعث تغییرات

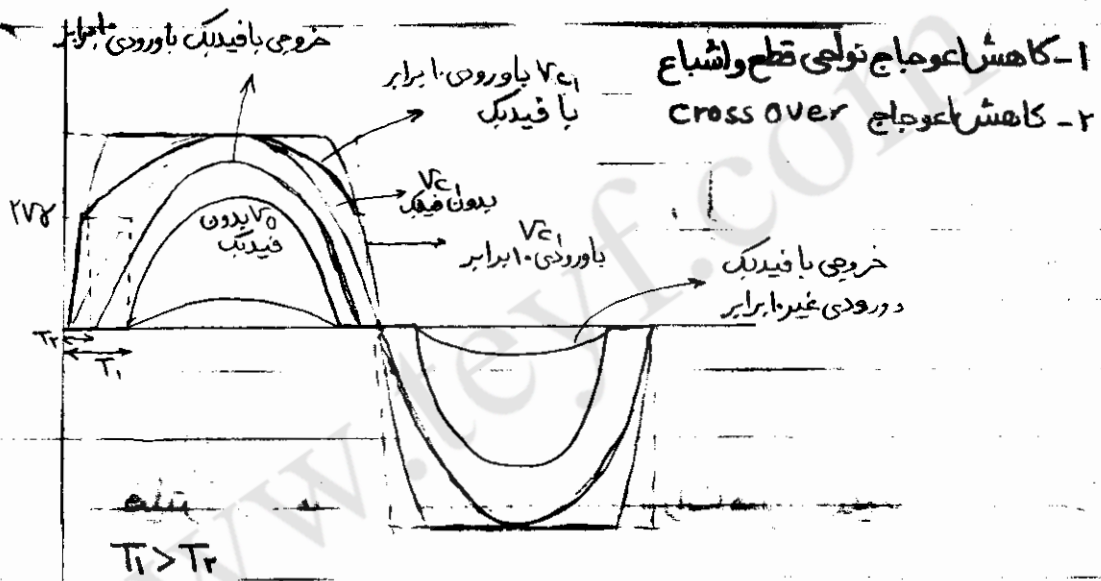
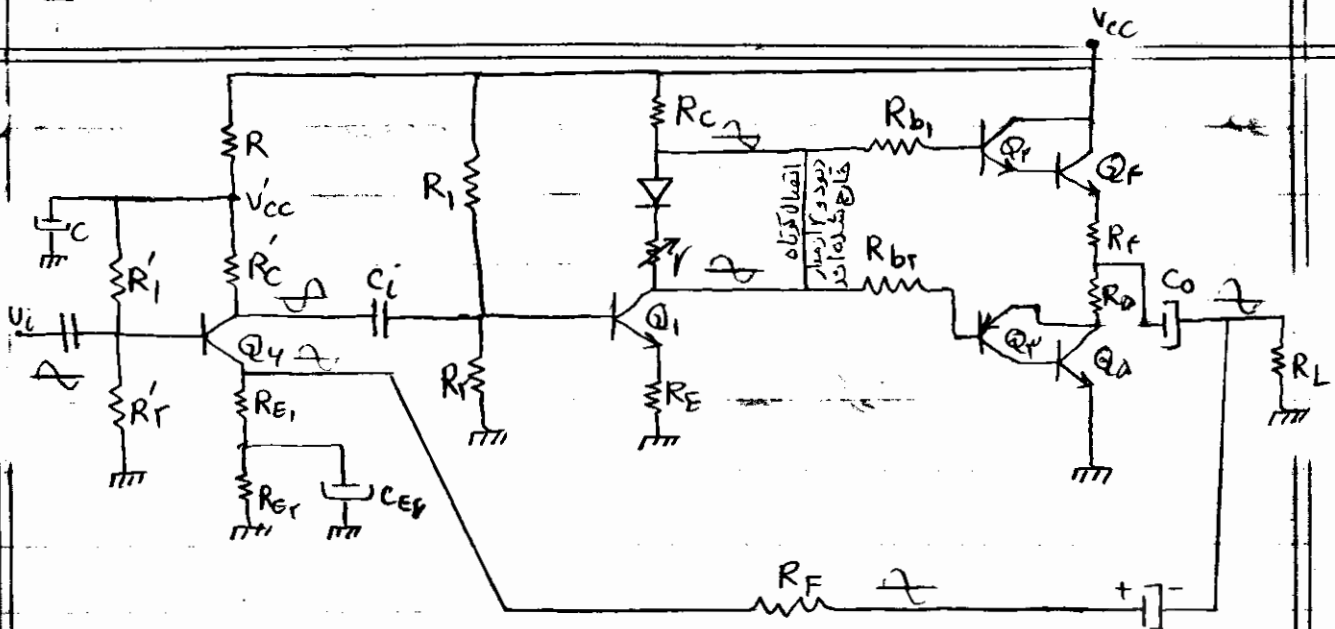
خوبی خواهد شد:



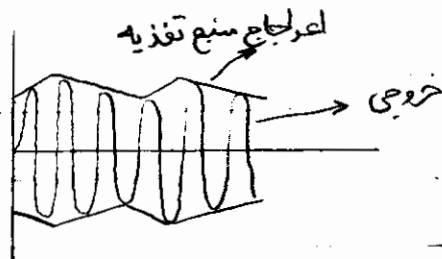
برای اینکه در تقویت کننده فوق هم حسن راندمان بالای کلاس B و هم حذف  $distortion cross over$

را داشته باشیم از یک ترکیب فیدبک استفاده می کنیم:

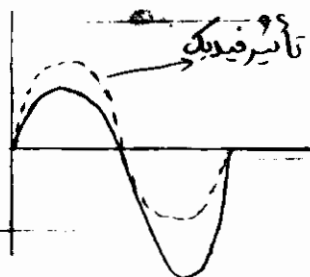


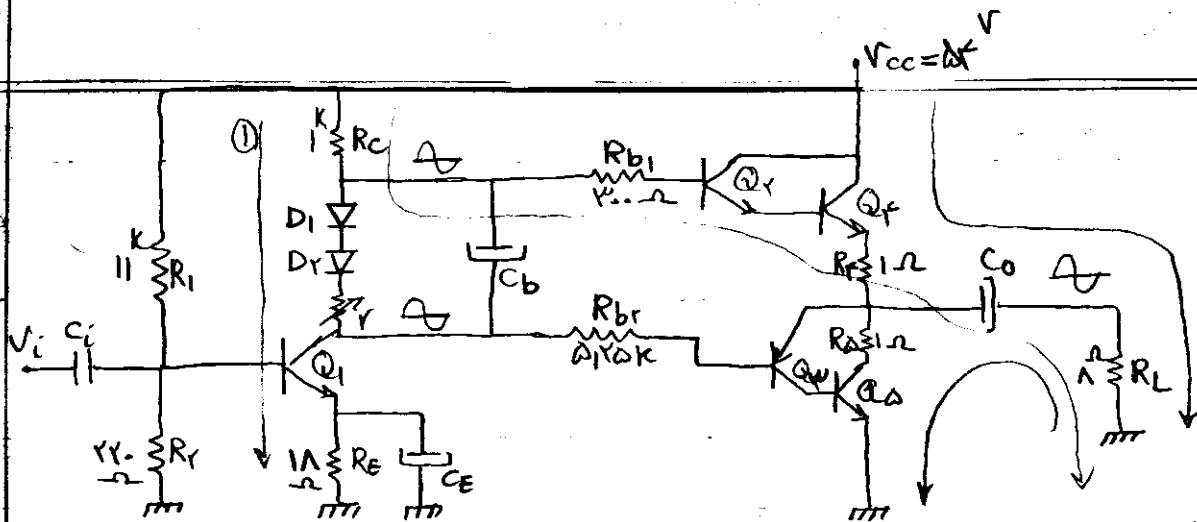


همچنین شبکه فیدبک باعث حذف ریبیل منبع تغذیه شده و از تغییرات خروجی جلوگیری می کند



نحوه کاهش اعوجاج نول و اشباع:





مثال:

$$Q_1: V_{BE} = 0.7, \beta = h_{fe} = 100, V_{CEsat} = 1V$$

$$Q_2, Q_3: |V_{BE_{cut-in}}| = 0.7, |V_{BE_{max}}| = 1V, \beta = h_{fe} = 40$$

$$Q_4, Q_5: V_{BE_{cut-in}} = 0.7, V_{BE_{max}} = 1V, \beta = h_{fe} = 50$$

$$D_1, D_2: V_D = 0.7$$

محاسبه کنید:

$$V_i = 0 \text{ باشط } P_{so} = ?$$

الف) نقطه کار،  $Q_1$

$$P_{R_{F,D}}, I_{Lmax}, A_p = \frac{P_{Omax}}{P_{i,max}}, P_{Lmax}, I_{Cmax}, P_{Qmax} \text{ ب)}$$

$$f_L = 20 \text{ Hz}, C = ? \text{ ت)}$$

$$V_{B1} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 1.04 \text{ : } Q_2, Q_3 \text{ بیس}$$

$$I_{C1} \approx I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_E} = 2.01 \text{ mA}$$

$$V_{CE1} = V_{C1} - V_{E1} = [V_{CC} - (R_C I_{C1} + 2V_D + r I_{C1})] - R_E I_{C1}$$

$$V_{B2} = V_{CC} - R_C I_{C1} = 11.4 \text{ V}$$

$$V_{CE1} = 14.4 \text{ V}$$

$$V_{B3} = V_{B2} - (2V_D + r I_{C1}) = 14.9 \text{ V}$$

$$\rightarrow V_{B2} - V_{B3} = 1.5 \text{ V} \text{ : } \text{پوش پل کلاس AB}$$

پس تقویت کننده پوش پول کلاس AB است و وصل کردن بیس  $Q_2$  و  $Q_3$  تأثیر در نقاط کار نخواهد داشت چون جریان کمی از آنها می‌گذرد. بیس بیس‌ها را وصل می‌کنیم.

$$V_{CO} = V_{B2} - 2V_{BE_{cutin}} = 2V_{14} V$$

$$P_{S_0} = V_{CC} (I_{C1} + I_{R1, R2}) = 1,45 W$$

تلفات درایور بدون ورودی

$$KVL: V_{CC} = R_C (I_{C1, min} + \underbrace{I_{B2, max}}_{\frac{I_{C2, max}}{\beta_2 \beta_4}}) + V_{BE_{max}} + V_{BE_{max}} + R_F I_{C2, max} + V_{CO} + R_L I_{C2, max} + R_{B1} I_{B2, max}$$

برای اینکه  $Q_1$  در ناحیه قطع کاملاً خاموش نشود فرض می‌کنیم که در طراحی  $I_{C1, min}$  برابر ۱mA در نظر گرفته شده است.

$$\rightarrow I_{C2, max} = 2,4 A \quad , \quad I_{C2, max} = \frac{I_{CF}}{\beta_F} = 52 mA$$

$$\rightarrow V_{O, max} = R_L \cdot I_{C2, max} = \boxed{20,8} V$$

در بیک آنترناس مثبت

تحت شرایط بالا  $V_{CE_F}$  را محاسبه می‌کنیم:

$$KVL: V_{CC} = V_{CE_F} + R_F I_{C2, max} + V_{CO} + R_L I_{C2, max} \quad \text{در بیک آنترناس مثبت:}$$

$$\rightarrow V_{CE_F} = 3,2 V$$

پس  $Q_2$  به اشباع نرسیده است و محاسبات درست بود

$$V_{CE2} + V_{BE_{max}} = V_{CE_F} \rightarrow V_{CE2} = 2,4$$

باتوجه به زوج طراحی که معلوم بود که  $Q_2$  به اشباع نمی‌رفت.

$$\text{در بیک آنترناس منفی:} \quad \frac{I_{C2, max}}{\beta_2 \beta_5}$$

در  $I_{C2}$  صرف نظر کردیم:

$$V_{CO} = R_L \cdot I_{C2, max} + |V_{BE_{max}}| + R_{B1} \underbrace{I_{B2, max}}_{\frac{I_{C2, max}}{\beta_2 \beta_5}} + V_{CE_{min}} + R_E I_{C1}$$

$$\rightarrow I_{C2, max} = 2,4 A \quad \rightarrow \quad I_{C2, max} = \frac{I_{C2}}{\beta_5} = 52,4 mA$$

$$\rightarrow V_{O, max} = R_L \cdot I_{C2, max} = \boxed{21,44} V$$

در بیک آنترناس منفی

باتوجه به  $V_{Omax}$  منفی و مثبت

$$\longrightarrow I_{Cmax} = I_{Cfmax} = 2.4 \text{ A}$$

$$\longrightarrow V_{CO} = R_L I_{Lmax} + R_D I_{Lmax} + V_{CE\Delta} \longrightarrow V_{CE\Delta} = 3.2 \text{ V}$$

$$V_{CEp} + V_{BE\Delta} = R_D I_{Lmax} + \frac{1}{2} V_{CE\Delta} \longrightarrow |V_{CEp}| = 5.0 \text{ V}$$

$$P_{Lmax} = \frac{R_L \cdot I_{Lmax}^2}{2} = 2 \text{ W}$$

$$P_{Q_{\frac{1}{2}\Delta}}^{max} = \left( \frac{1}{\Delta} \right) \cdot \left[ \frac{R_L \cdot I_{Lmax}^2}{2} + \frac{R_F \cdot I_{Lmax}^2}{2} \right] = 4.0 \text{ W}$$

$$P_{Q_{r,r}} = \frac{P_{Q_F}}{\beta_F} \approx 122 \text{ mW}$$

یا خفص برابری  $V_{CE}$  برای  $Q_F$  و  $Q_r$

$$P_{Q_{1max}}^{A_{\text{کلاس}} = V_{CE} \cdot I_C = 400 \text{ mW}, \quad I_{C1max} = \frac{1}{2} I_{C1} \quad \text{نقطه کار}$$

① مسیر KVL :  $V_{CC} = R_C I_{C1max} + 3 V_{BEcutin} + V_{CEsat} + R_E I_{C1}$  بیک آلتراضی منفی

$$P_{i,max} = \frac{V_{i,max}^2}{2 R_i}$$

$$A_V = A_{V_{Driver}} \times A_{V_{pushpull}}$$

$$A_{V_{D1}} = A_{V_1} = \frac{-h_{fe} \cdot R'_L}{h_{ie} + r_{e1}}$$

در بیک مثبت :  $R'_L = R_{C1} \parallel [R_{B1} + h_{ier} + (1 + h_{fer}) h_{ief} + (R_F + R_L)(\beta_F \beta_F)] \approx 1 \text{ k}$  یا تقریباً منفی

$$\longrightarrow A_{V_1}^+ = 500$$

در بیک منفی :  $R'_L = R_{C1} \parallel [R_{B1} + h_{ier} + R_L \beta_F \beta_{\Delta} \parallel (R_D + r_{oe\Delta})] = R_{C1}$  یا تقریباً  $\infty$

$$R_0 = R_f + \frac{R_{b1}}{\beta + \beta_r} = 1.1 \Omega \rightarrow A_{V_{pushpull}}^+ = \frac{R_L}{R_L + R_0^+} =$$

$$R_0^- = \frac{R_{br} + h_{ie}^{\circ}}{\beta_r \beta_D} = 1.75 \Omega \rightarrow A_{V_{pushpull}}^- = \frac{R_L}{R_L + R_0^-} =$$

$$\rightarrow |A_V|^+ = A_{V_D}^+ \cdot A_{V_P}^+ = 439$$

$$|A_V|^- = A_{V_D}^- \cdot A_{V_P}^- = 410$$

$$\rightarrow V_{i_{max}} = \frac{V_{o_{max}}}{A_{V_{min}}} = 50 \text{ mV} \rightarrow P_{i_{max}} = 17.5 \mu\text{W}$$

$$\rightarrow A_p = \frac{P_{L_{max}}}{P_{i_{max}}} = 2 \times 10^4 \quad \text{و} \quad 10 \log A_p = 43 \text{ dB}$$



$$P_{R_f} = \left( \frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 1.54 \text{ W}$$

$$R_{Ci} = R_i \parallel R_f \parallel h_{ie1} + R_s^{\circ} = 100 \Omega$$

$$R_{CE} = R_E \parallel \left[ \frac{1}{h_{fe} + 1} (h_{ie}) \right] \approx \frac{h_{ie1}}{h_{fe1}} = 1.8 \Omega$$

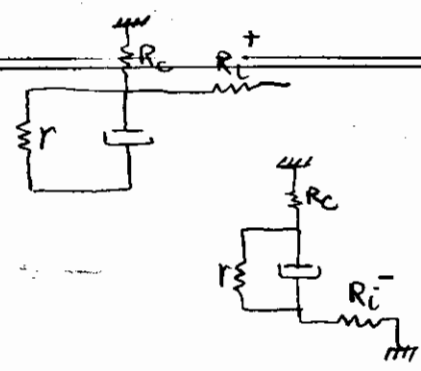
چون C در هر آئرنش یک مقاومت مای بیند لذا در هر آئرنش مقاومت را حساب می کنیم

و مقاومت کمتر را که فرکانس قطع بالاتر تولیدی کند انتخاب می کنیم:

در آئینانس مثبت :  $R_{cb}^+ = r$

در آئینانس منفی :  $R_{cb}^- = r \parallel [R_c + R_i^-] \approx r$

$\rightarrow R_{ci} = r$



مرحل بالا را برای خازن  $C_0$  نیز انجام می دهیم :

$R_{co}^+ = (R_o^+ + \frac{R_c}{\beta_r \beta_f}) + R_L$

$\rightarrow R_{co} \approx 10 \Omega$  با انتخاب مقاومت کمتر

$R_{co}^- = (R_o^- + \frac{R_c}{\beta_r \beta_d}) + R_L$

$f_L = \frac{f'_L}{\sqrt{r^2 k_f - 1}}$

$\rightarrow f'_L = 10 \text{ Hz}$

- $C_E = 4300 \mu F$
- $C_i = 140 \mu F$
- $C_b = 1300 \mu F$
- $C_o = 1400 \mu F$

تقویت کننده اختلاف :



در حالت ایده آل :  $V_o = A_d (V_{i1} - V_{i2})$

در حالت واقعی :  $V_o = A_d (V_{i1} - V_{i2}) + A_c (\frac{V_{i1} + V_{i2}}{2})$

با قرار دادن یک دیود زنر در ورودی که حساس به دما است به فرض باز یاد شدن دما  $V_o$  مثبت شده و با کم شدن آن  $V_o$  منفی است و به عنوان ترموستات می توان از آن استفاده کرد.

با توجه به این که این تقویت کننده باید در فرکانسهای پایین را نیز تقویت کند لذا اغلب باید