وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

الکترونیک ۲

۵- طبقه خروجی تقویت کننده‌ها

مدرس: دکتر محمد هاشمی‌نژاد

تقویت کننده‌های قدرت

- تقویت کننده‌هایی که تا به حال بررسی کردیم توان را تقویت می‌کنند.
- چنانچه قدرت خروجی تقویت‌کننده‌های بیشتر از چند ده میلی وات باشد،آن را تقویت کننده‌ی توان می‌نامند.
- در این حالت تغییرات جریان کلکتور نسبت به نقطه کار زیاد است در نتیجه β و g_m با جریان خروجی تغییر می‌کند و سیگنال حین تقویت دچار اعوجاج می‌شود. باید این را به حداقل برسانیم.
-

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

مشخصات عمومی تقویت‌کننده‌های قدرت

الف) تغییر شکل موج یا اعوجاج کم

ب) امپدانس خروجی کم

پ) بهره‌ی جریان زیاد

ت) راندمان بالا

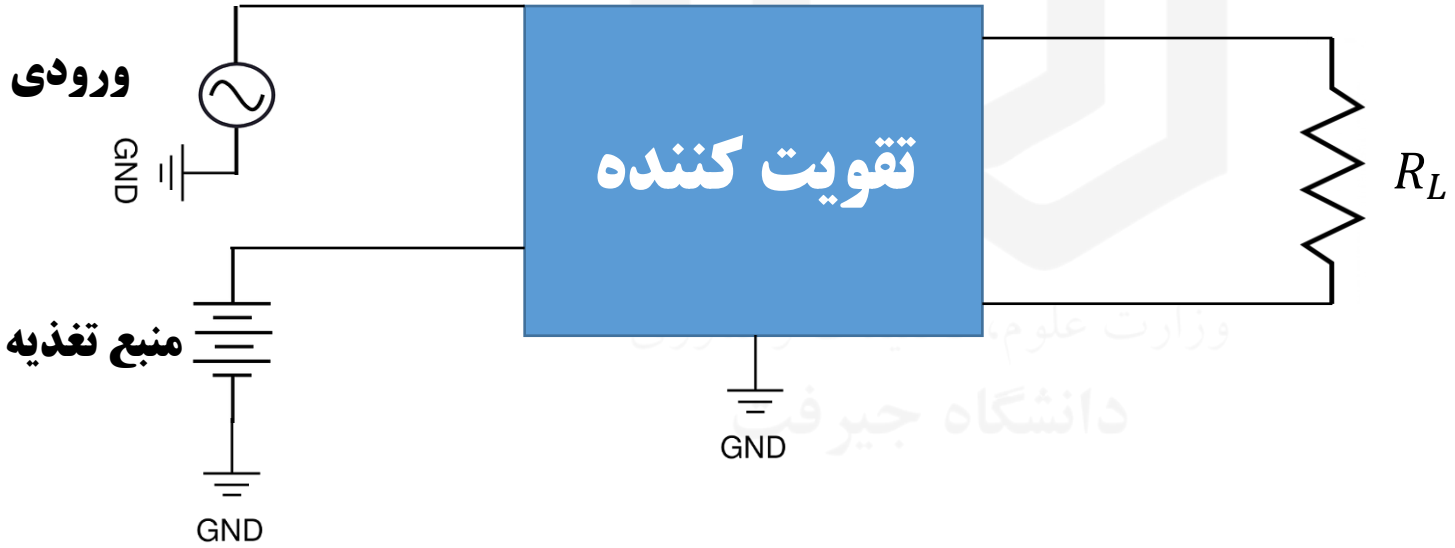
ث) مشخصه‌ی فرکانسی خوب

- دو مسئله مهم در تقویت کننده‌های قدرت:
  - بازده
  - گرمای ایجاد شده، متناسب با توان تلف شده در ترانزیستور $P_C = V_{CE}.I_C$

بازده تقویت کننده Efficiency

- نسبت توان ac منتقل شده به بار به کل توان dc گرفته شده از منبع تغذیه

$$\eta = \frac{\text{توان منتقل شده به بار ac}}{\text{توان } DC \text{ گرفته شده از منبع تغذیه}} \times ۱۰۰٪$$



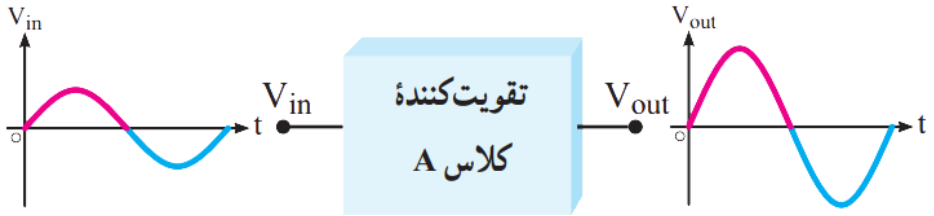
https://skills.study

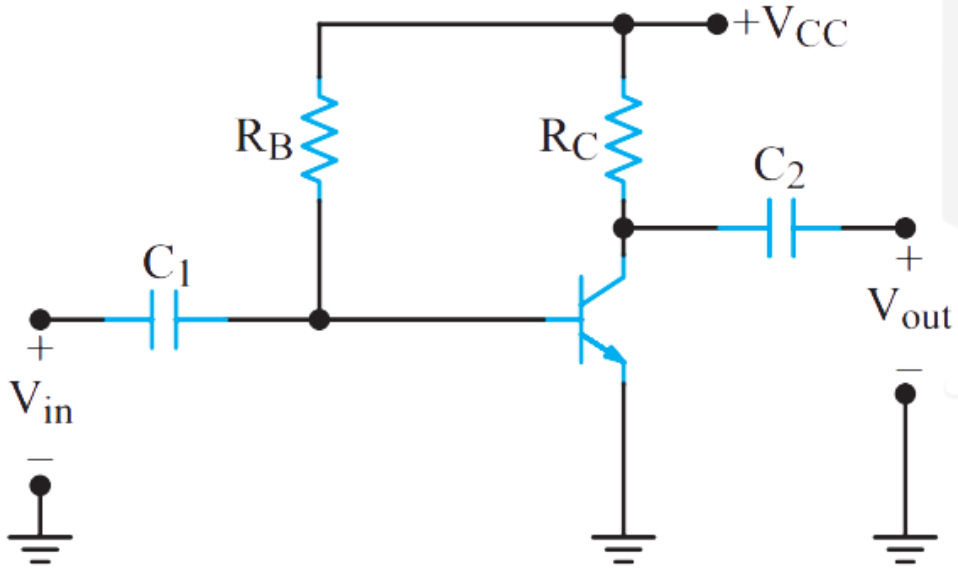
تقویت کننده‌های قدرت

- برحسب این که یک تقویت‌کننده در چه کسری از یک پریود کامل (T) سیگنال ac ورودی فعال باشد:
  - تقویت کننده کلاس A: عبور موج ورودی به طور کامل
  - تقویت کننده کلاس B: فقط برای نیمی از یک سیکل سیگنال ورودی هدایت می‌کند.
  - تقویت کننده کلاس AB: ترانزیستورها در آستانه هدایت قرار می‌گیرند. جریان کلکتور حداقل، هدایت در بیش از ۱۸۰ درجه
  - تقویت کننده کلاس C: عملا در ناحیه قطع بایاس شده، ترانزیستور در کمتر از نیم تناوب هدایت می‌کنند.

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

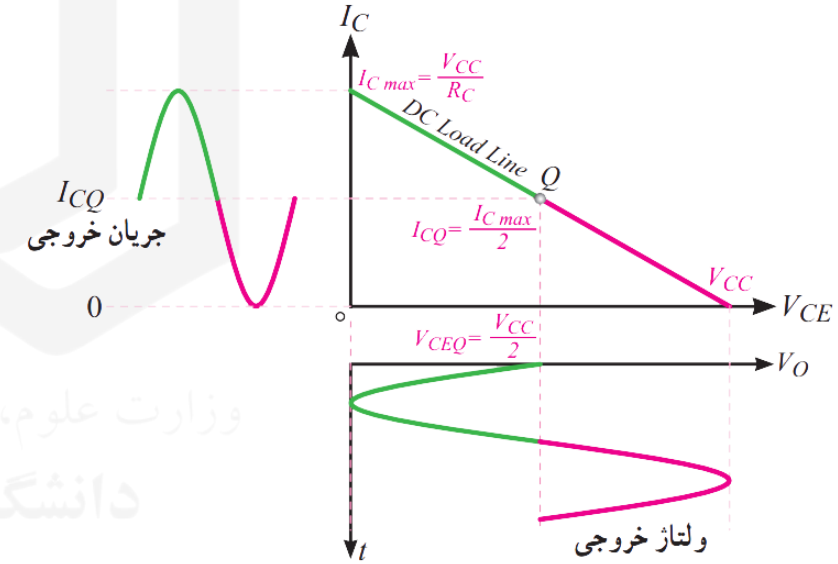
تقویت کننده کلاس A





مدار تقویت‌کنندهٔ کلاس A

- جریان حالت سکون نصف جریان حداکثر $\left(I_{CQ} = \frac{1}{2} I_{Cmax}\right)$
  و ولتاژ کار نصف ولتاژ حداکثر $\left(V_{CEQ} = \frac{1}{2} V_{CC}\right)$
- با صرف نظر از $V_{CE}(sat)$ این وضعیت را داریم:

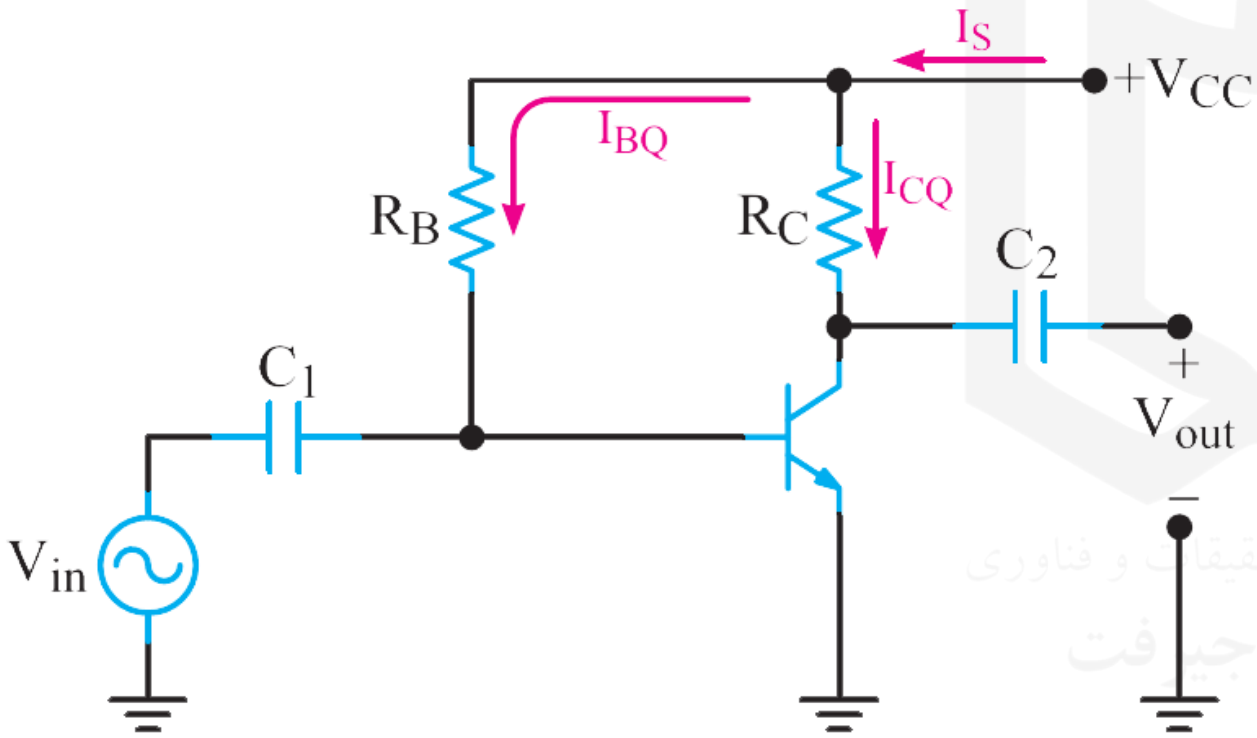


مختصات نقطه کار DC در کلاس A و چگونگی تغییرات I_C و V_{CE} روی خط بار

https://skills.study

راندمان تقویت کننده کلاس A

- توان گرفته شده از منبع تغذیه: $P_{dc} = V_{cc} I_s$



$$P_{dc} = V_{cc} I_{CQ}, I_s = I_{bQ} + I_{cQ} \Rightarrow P_{dc} = V_{cc}\left(I_{BQ} + I_{CQ}\right)$$

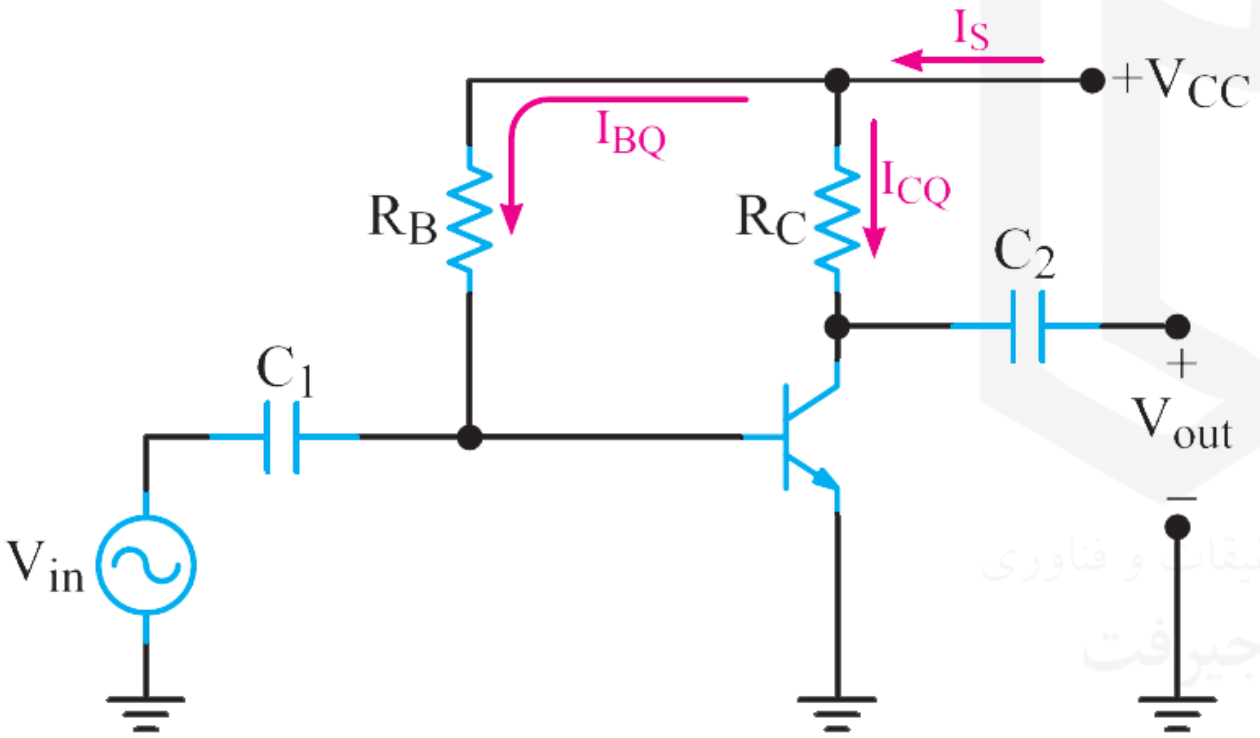
$$I_{CQ} = \frac{I_{Cmax}}{2} = \frac{\frac{V_{cc}}{R_C}}{2} = \frac{V_{cc}}{2R_C} \Rightarrow$$

$$P_{dc} = \frac{V_{cc}^2}{2R_C}$$

https://skills.study

راندمان تقویت کننده کلاس A

- توان گرفته شده از منبع تغذیه: $P_{dc} = \frac{V_{cc}^2}{2R_C}$ توان داده داده شده به بار $P_L = I_{Lrms}V_{Lrms}$



$$P_L = I_{Lrms}V_{Lrms}, V_m = \frac{V_{cc}}{2}, I_m = \frac{I_{Cmax}}{2} = \frac{V_{cc}}{2R_C}, I_{rms}$$

$$= \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{V_{cc}}{2\sqrt{2}R_c}, V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{V_{cc}}{2\sqrt{2}},$$

$$P_L = I_{Lrms}V_{Lrms} \Rightarrow P_L = \frac{V_{cc}^2}{8R_c}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{P_L}{P_{dc}} \times ۱۰۰٪ = \frac{\frac{V_{cc}^2}{8R_c}}{\frac{V_{cc}^2}{2R_c}} \Rightarrow \eta = ۲۵٪ \Rightarrow$$

Figure of merit ضریب شایستگی

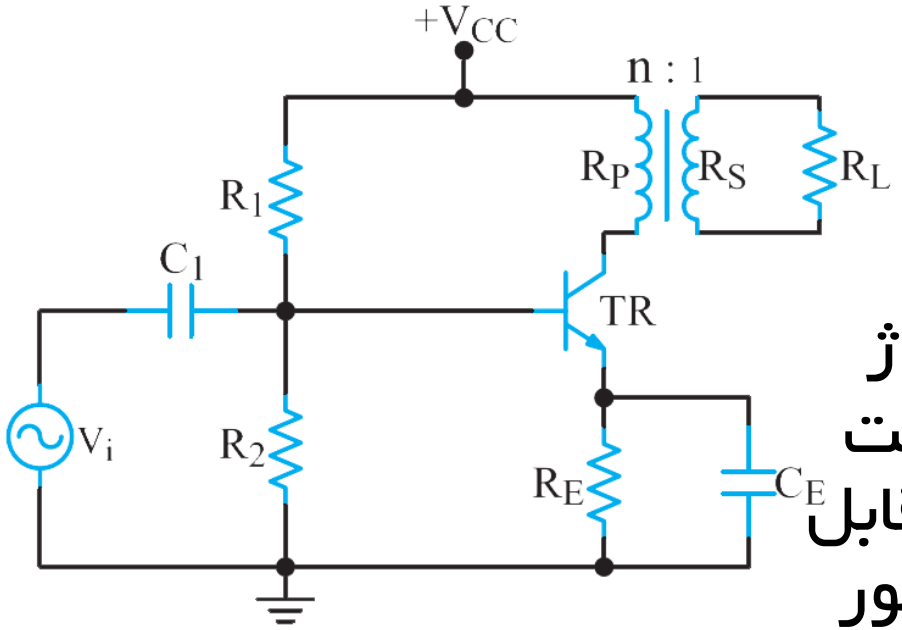
- نسبت حداکثر توان تلف شده به حداکثر توان ac انتقالی به بار

- $P_{Cmax} = V_{CEQ} I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2} . \frac{V_{CC}}{2R} = \frac{V_{cc}^2}{4R_c}, P_{L(ac)max} = \frac{V_{cc}^2}{8R_c}$

- $\frac{P_{Cmax}}{(P_{Lac})_{max}} = \frac{\frac{V_{cc}^2}{4R_c}}{\frac{V_{cc}^2}{8R_c}} = 2$

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

تقویت کننده A با کوپلاژ

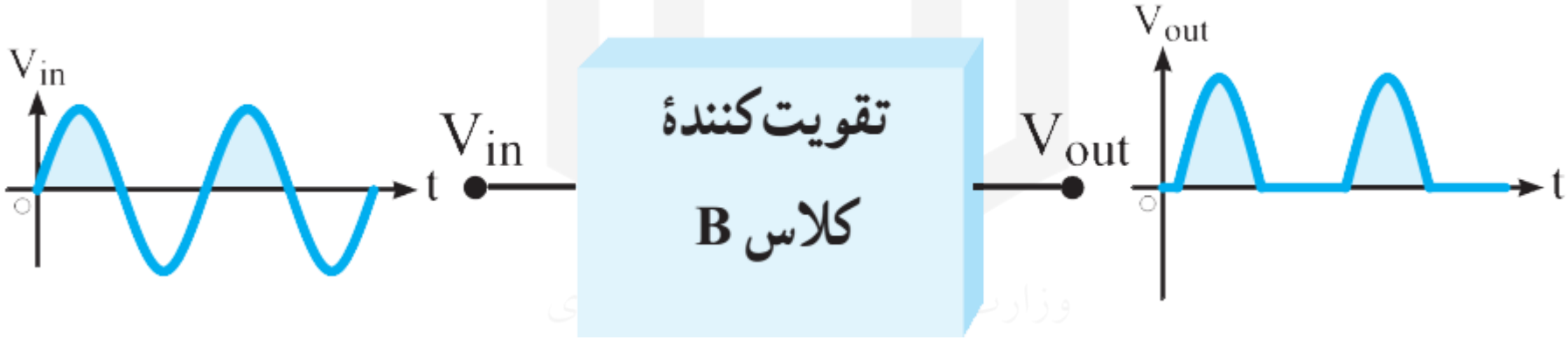


تقویت‌کنندهٔ کلاس A با کوپلاژ ترانسفورماتوری

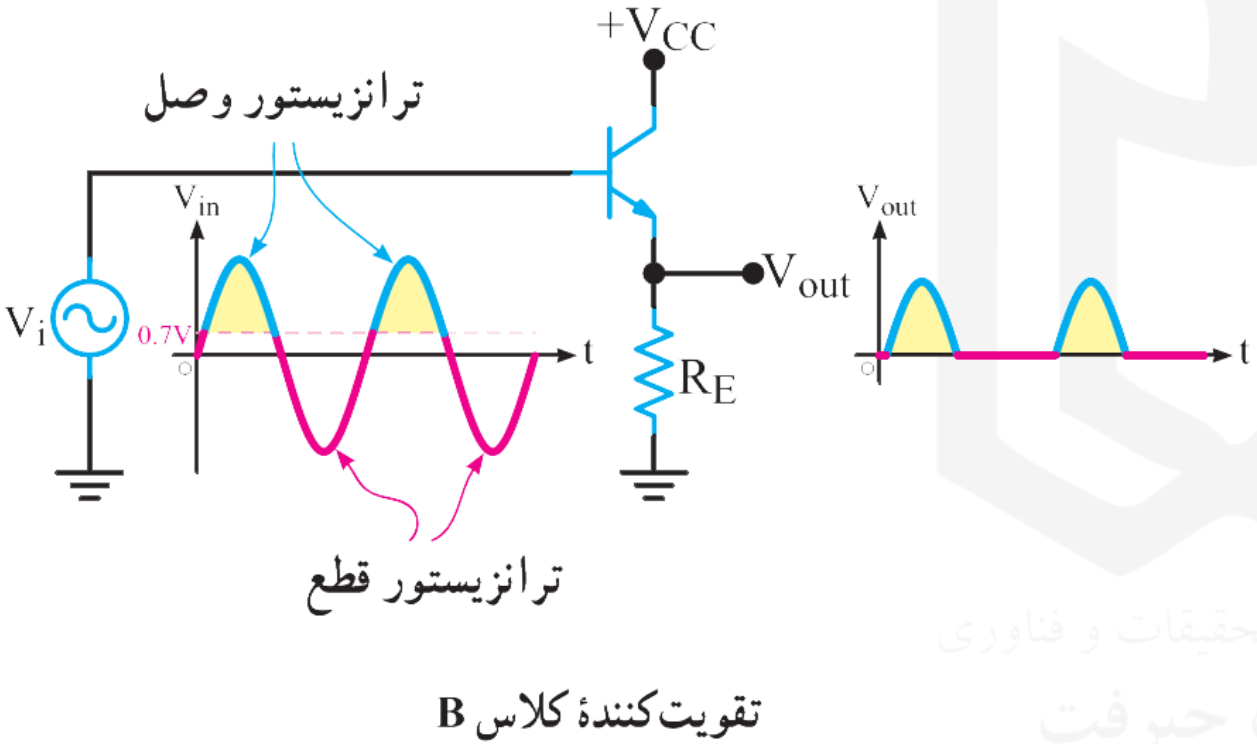
- برای افزایش راندمان از ترانسفورماتور استفاده می‌کنیم.
- $P_{dc} = V_{cc} I_{CQ}$
- در محاسبات از تلفات مقاومتهای تقسیم کننده‌ی ولتاژ R_1، R_2 و بیس ترانزیستور صرفنظر میکنیم. مقاومت سیم‌پیچ اولیه و امیتر هم کوچک است و تلفات آن قابل صرفنظر. پس تلفات فقط مربوط به تلفات پیوند کلکتور است: $P_{dc} = P_L + P_c$
- بازده این: در حالت ایده‌آل ۵۰٪ و در حالت واقعی ۴۰٪

تقویت کننده کلاس B

- اگر ترانزیستور را در ناحیه قطع بایاس کنیم هنگامی که سیگنال ورودی صفر است، از کلکتور جریانی نمی‌گذرد $(I_Q = 0)$ پس در حالت سکون تلفات نداریم.
- می‌توان بازده را به 78.5% افزایش داد.



تقویت کننده کلاس B

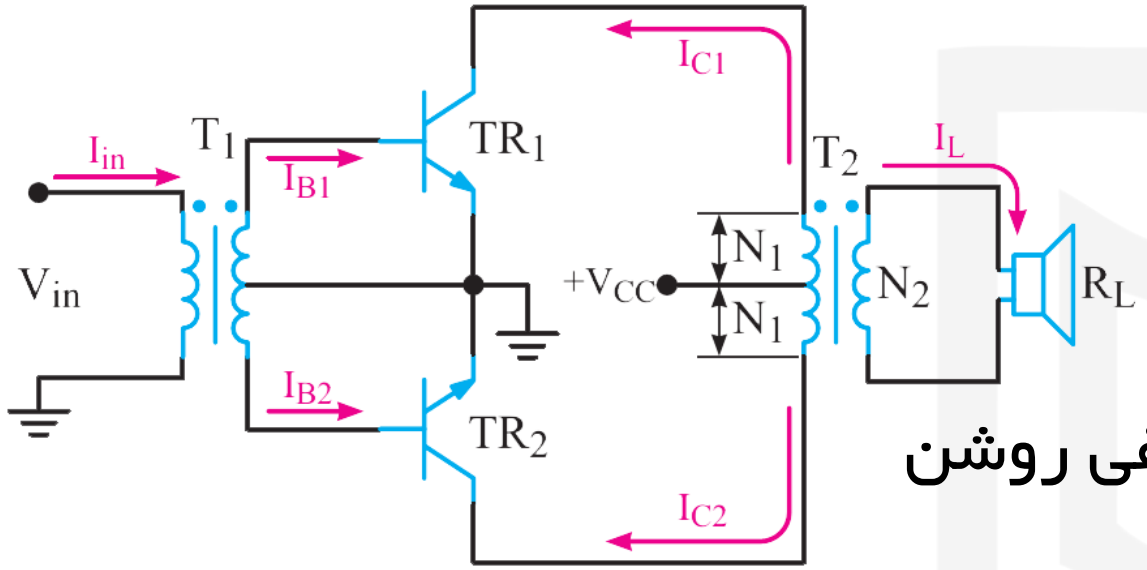


تقویت‌کنندهٔ کلاس B

- کلاس B کلکتور مشترک
- برای داشتن شکل موج کامل باید از دو تقویت کننده استفاده کنیم که اسم آن پوش–پول(Push-pull) است.

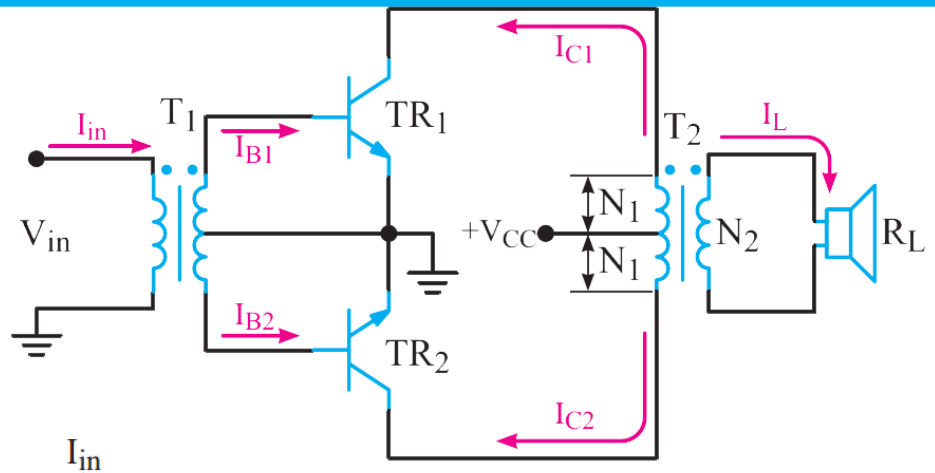
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

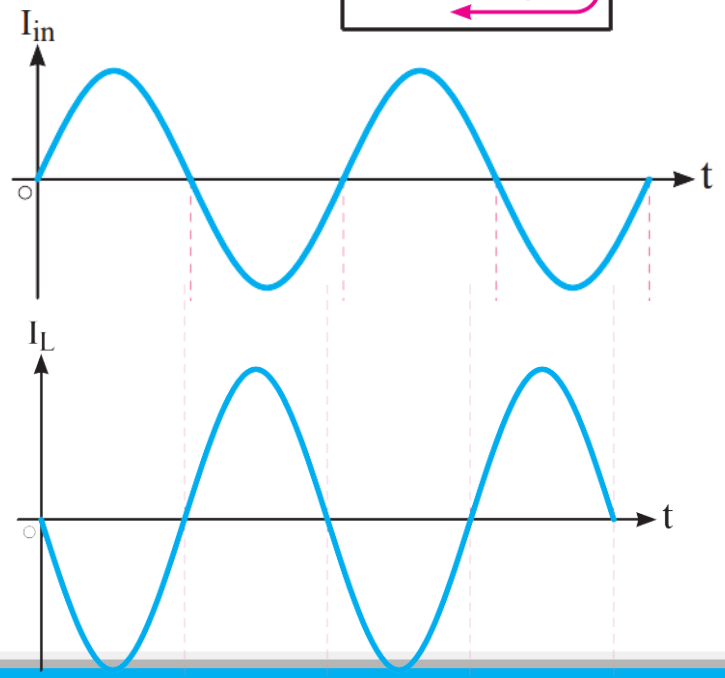
تقویت کننده Push-Pull

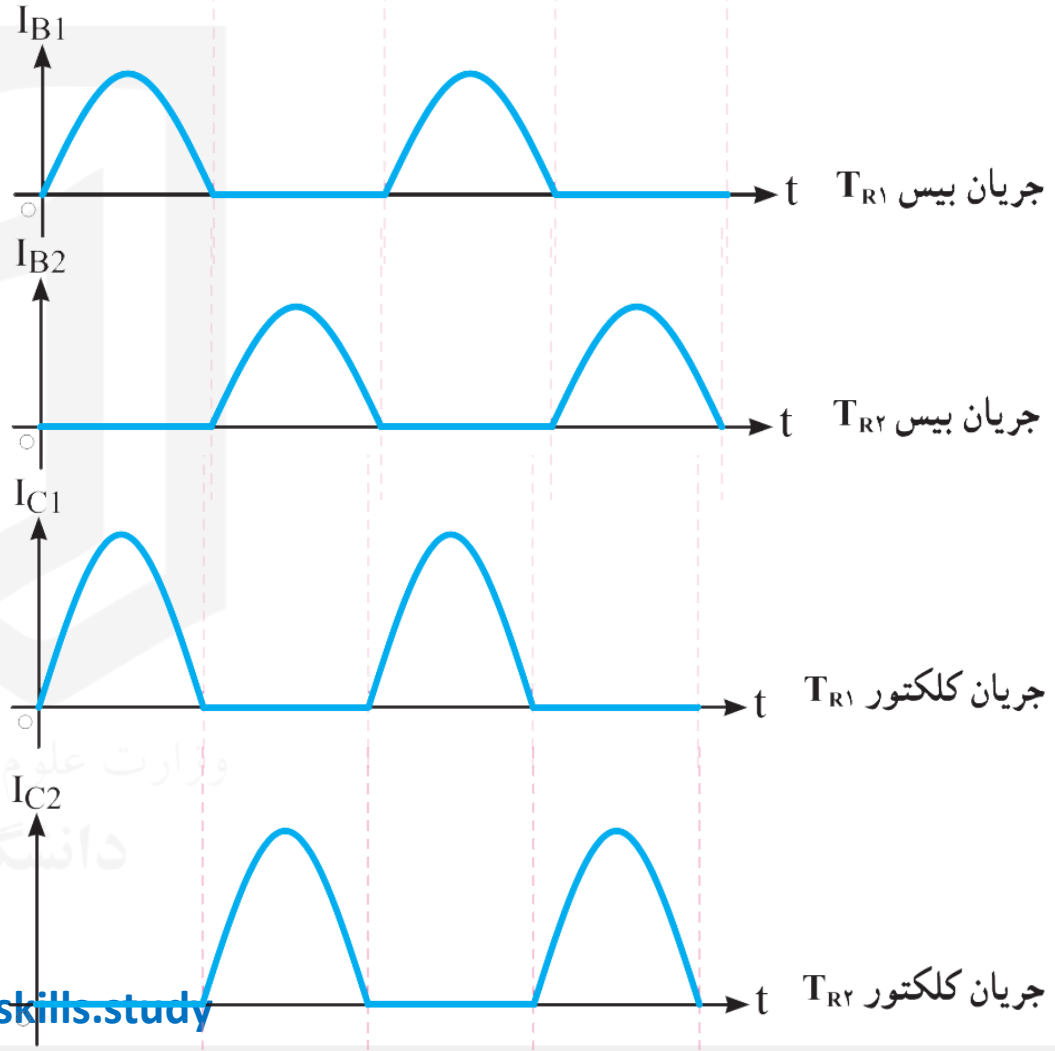


- با کوپلاژ ترانسفورماتوری
- ورودی ۰، دو ترانزیستور خاموش
- ورودی ولتاژ متناوب، انتقال به ثانویه T1
- TR1 در سیکل مثبت و TR2 در سیکل منفی روشن است.
- TR1 سیکل مثبت را به صورت مثبت به بار می‌رساند.
- TR2 سیکل منفی را به صورت منفی به بار می‌رساند.

تقویت کننده Push-Pull



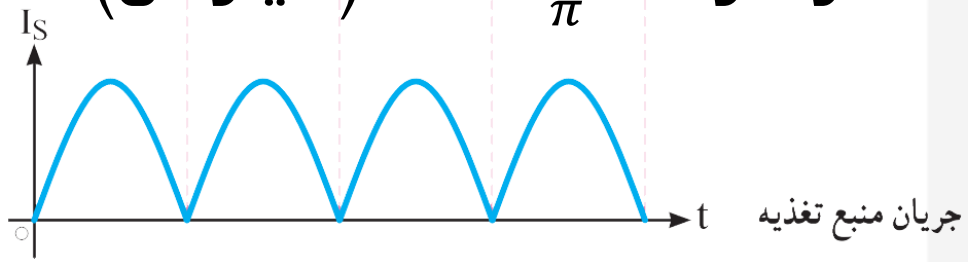




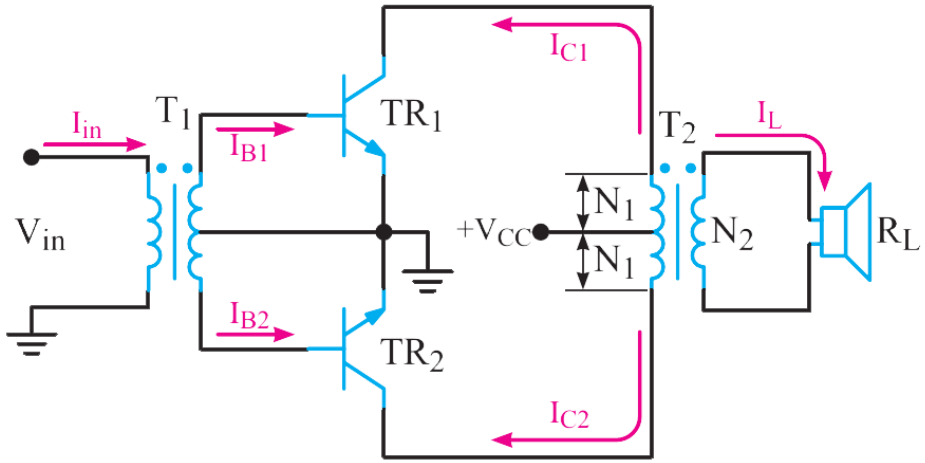
https://skills.study

محاسبه راندمان

- جریان کشیده شده از منبع تغذیه برابر $I_{C1} + I_{C2}$ با مقدار متوسط $\frac{2I_m}{\pi}$ است (سینوسی).



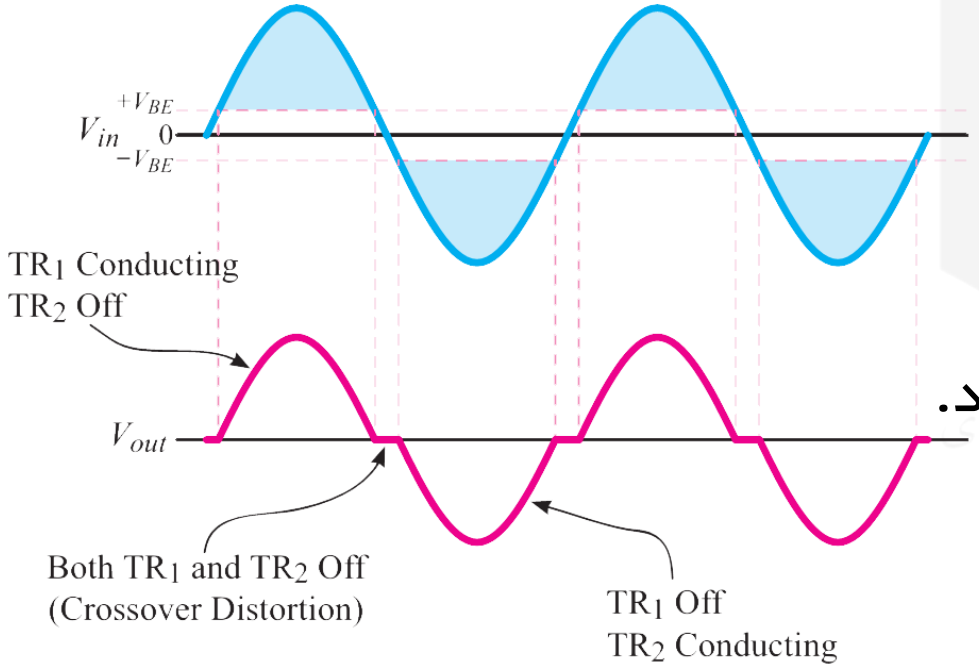
- توان داده شده توسط منبع تغذیه:
- $P_{dc} = V_{cc} \times \frac{2I_m}{\pi}$
- توان منتقل شده به بار:
- $P_L = V_{L(rms)} \times I_{L(rms)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \times \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} I_m V_m$
- $\eta = \frac{P_L}{P_{dc}} = \frac{\frac{1}{2} I_m V_m}{V_{cc} \times \frac{2I_m}{\pi}} \times 100 = \frac{\pi}{4} \times \frac{V_m}{V_{cc}}$



https://skills.study

محاسبه راندمان

- حداکثر راندمان جایی است که $V_m = V_{cc}$ باشد. $\eta_{max} = \frac{\pi}{4} \times 100 = 78.5\%$
- ایراد این تقویت کننده این است که در سیگنال خروجی اعوجاج ایجاد می‌شود.
- این اعوجاج مربوط به ولتاژ بیس–امیتر است.
- مشکل دیگر:
  - موقع فعال بودن ترانزیستورها جریان زیاد میکشد
  - ولتاژ تغذیه افت می‌کند
- راه حل: ترانزیستورها در آستانه هدایت بایاس شوند.



https://skills.study

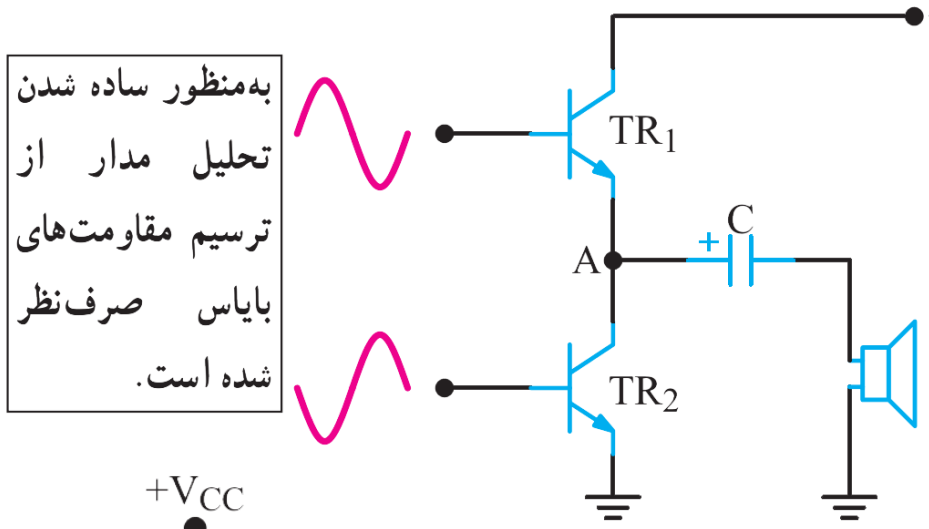
معایب پوش پول ترانسفورمری

- جاگیر و سنگین
- اثر بر پاسخ فرکانسی تقویت کننده
- اگر در حال کار بلندگو قطع شود ولتاژ القایی زیادی روی کلکتور ترانزیستورها می‌افتد و به ترانزیستورهای خروجی آسیب می‌رساند.
- قبل از قطع بلندگو باید ولوم آن تا حداکثر کم شود.
- منسوخ شده است.

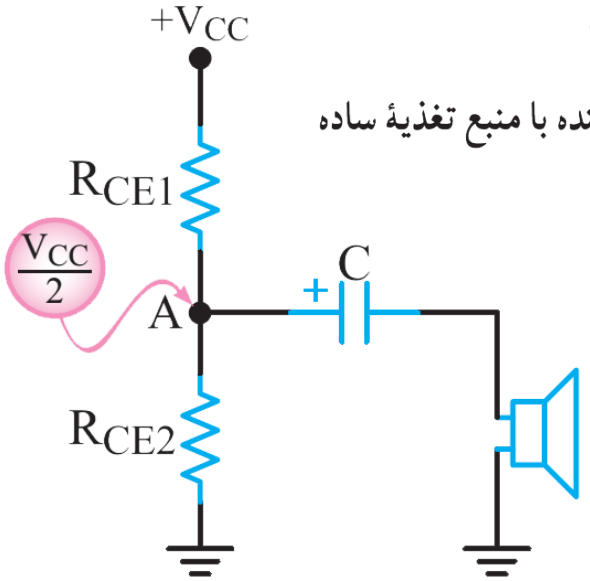
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

پوش پول بدون ترانسفورماتور



به‌منظور ساده شدن تحلیل مدار از ترسیم مقاومت‌های بایاس صرف‌نظر شده است.

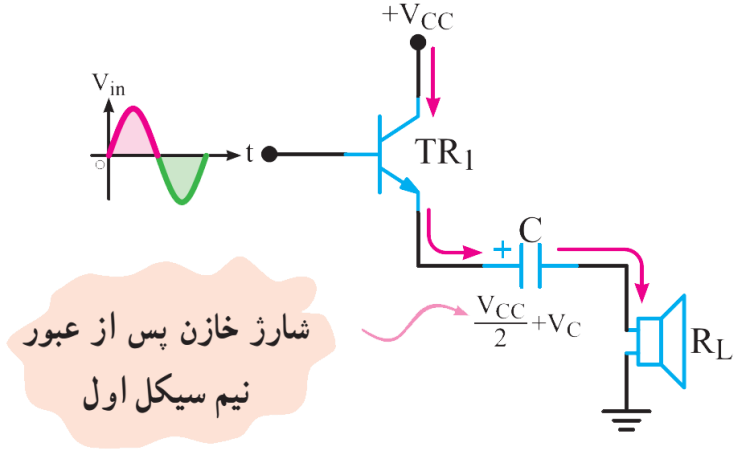


تقویت‌کننده با منبع تغذیهٔ ساده

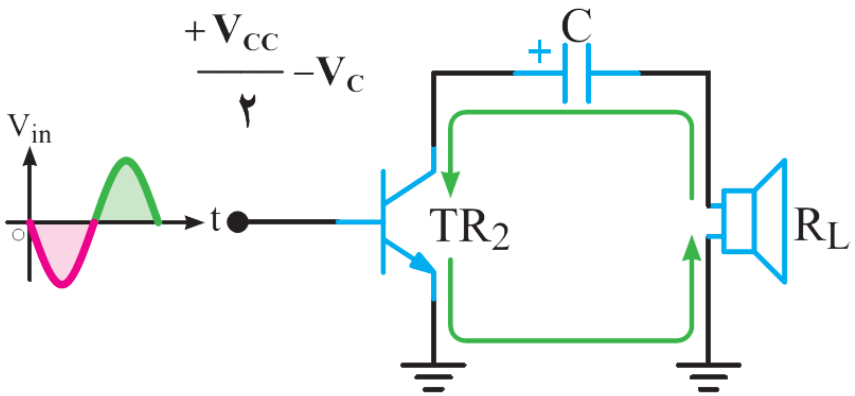
- خازن جایگزین چوک
- در لحظه روشن شدن بلندگو ولتاژ خازن:
- $V_A = \frac{V_{CC}}{2}$
- نیم سیکل اول $V_A = \frac{V_{CC}}{2} + V_c$
- در نیم سیکل دوم از خازن جریان می‌کشد

https://skills.study

پوش پول بدون ترانسفورماتور



مسیر عبور جریان وقتی TR_1 هادی است.



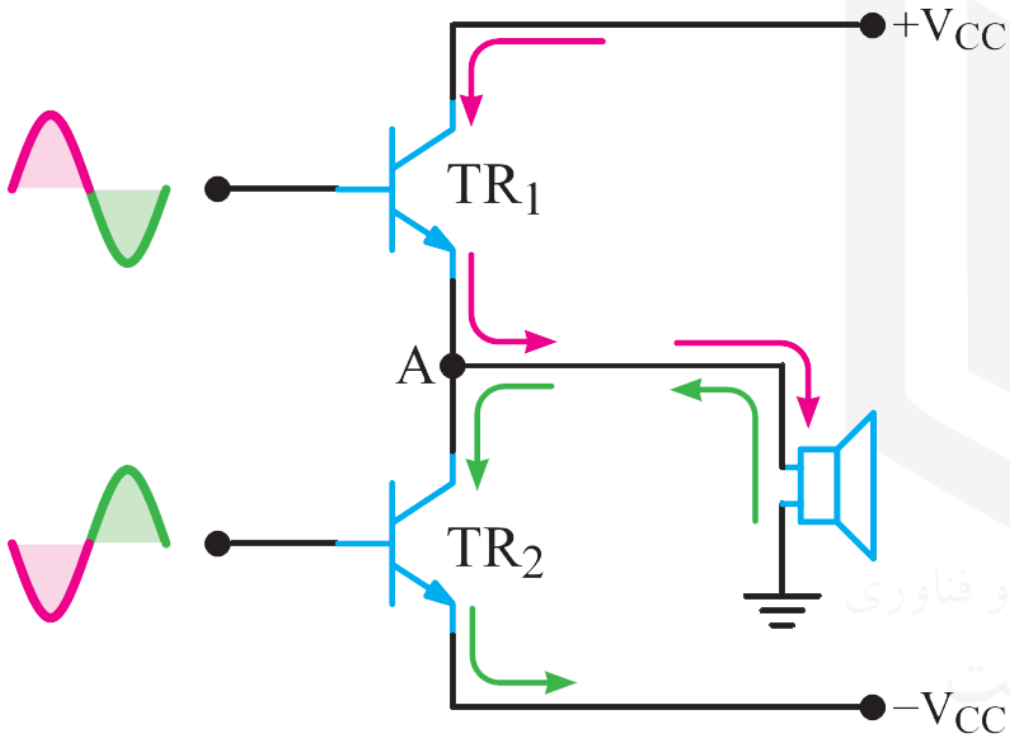
مسیر عبور جریان در نیم سیکلی که TR_2 هادی است.

- خازن جایگزین چوک
- در لحظه روشن شدن بلندگو ولتاژ خازن:
- $V_A = \frac{V_{CC}}{2}$
- نیم سیکل اول $V_A = \frac{V_{CC}}{2} + V_c$
- در نیم سیکل دوم از خازن جریان می‌کشد

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

پوش پول بدون ترانسفورماتور

- اگر از منبع تغذیه متقارن استفاده کنیم نیاز به خازن حذف می‌شود

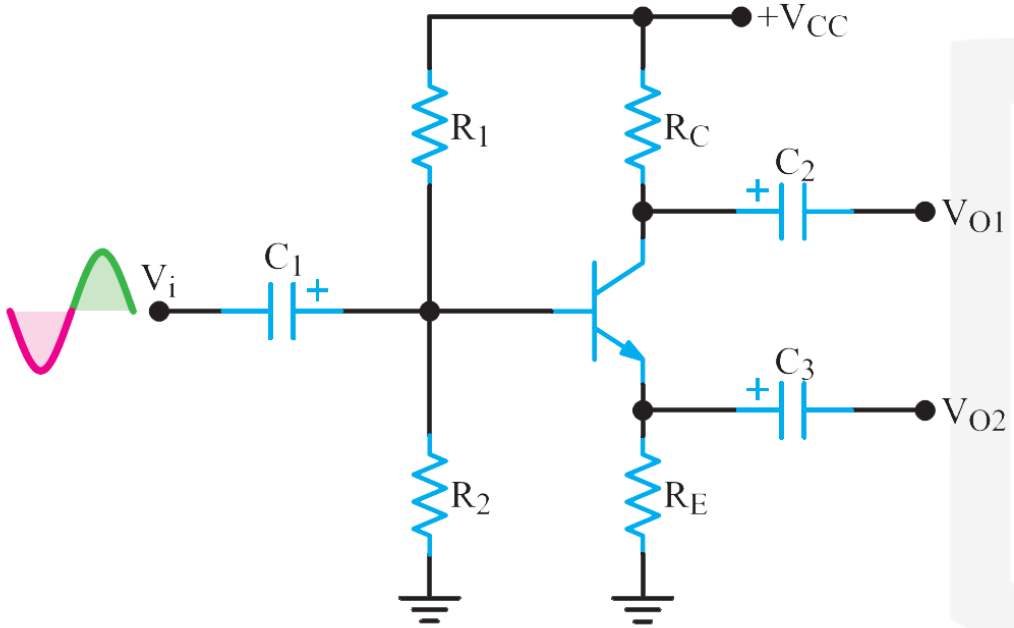


تقویت‌کننده با منبع تغذیهٔ متقارن

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

مدار جداکنندهٔ فاز (Splitter Phase)



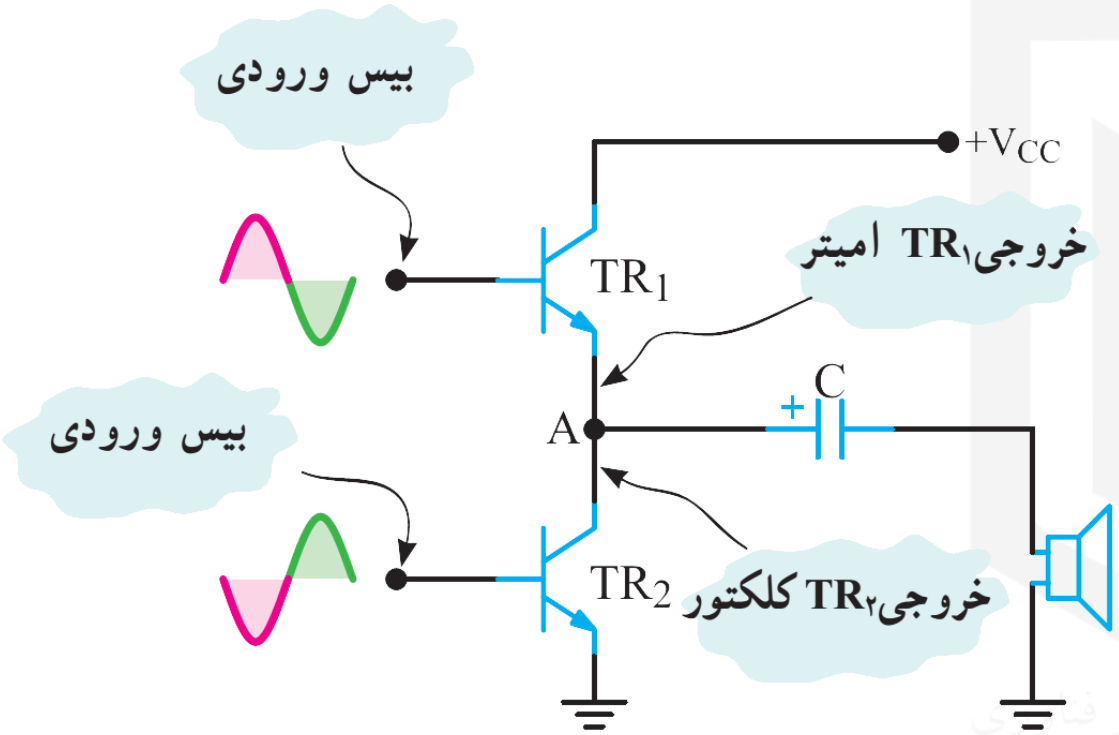
مدار جداکنندهٔ فاز

- ایجاد دو سیگنال هم‌دامنه و با فاز مخالف
- به جای ترانسفورماتور می‌توان از این مدار استفاده کرد.
- ورودی ۱۸۰ درجه با V_{O1} اختلاف فاز دارد.
- ورودی با V_{O2} همفاز است.
- اگر R_E و R_C هم اندازه باشند دامنه دو خروجی با هم برابر هستند.

https://skills.study

عیب پوش پول بدون ترانسفورماتور

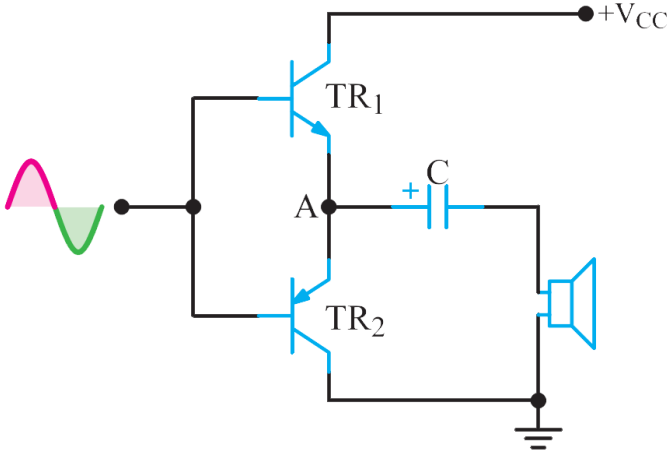
- در حالت هدایت امپدانس دیده شده توسط دو ترانزیستور متفاوت است.
- یکی امیتر مشترک و دیگری کلکتور مشترک است.
- منجر به عدم تقارن می‌شود.



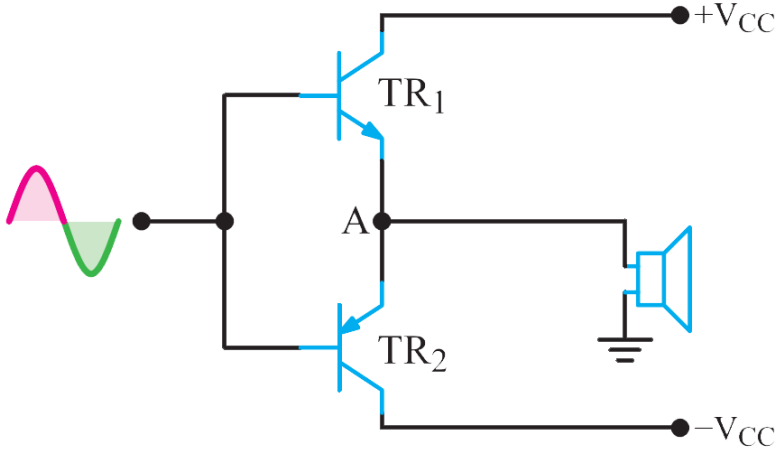
دو ترانزیستور آرایش‌های متفاوت دارند.

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

تقویت کنندهٔ پوش پول با ترانزیستورهای مکمل (Complementary)



تقویت‌کننده با منبع تغذیهٔ ساده

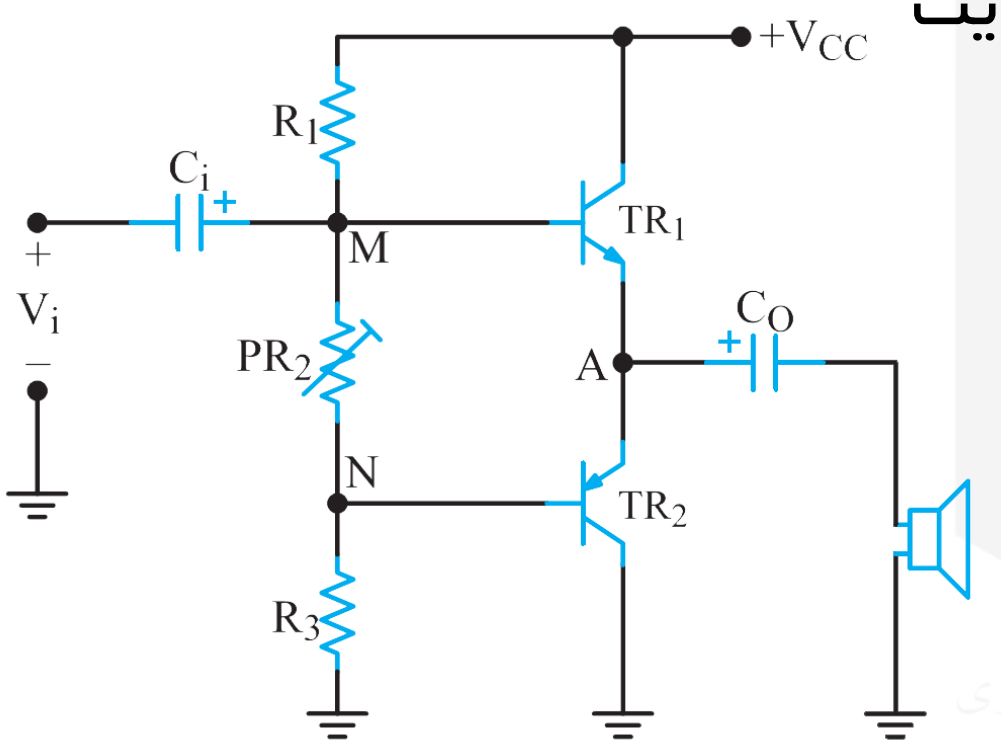


تقویت‌کننده با منبع تغذیهٔ متقارن

- یکی PNP و دیگری NPN هستند.
- مشخصات یکسان و هر دو کلکتور مشترکند.
- خروجی کاملا متقارن است.
- به طبقه جدا کننده فاز نیازی ندارد.
- اگر از منبع تغذیه متقارن استفاده شود نیازی به خازن کوپلاژ بلندگو ندارد.
- چون در حالت عادی ولتاژ بیس صفر است بخشی از سیگنال ورودی صرف راه اندازی ترانزیستورها می‌شود

https://skills.study

آستانهٔ هدایت (کلاس AB)

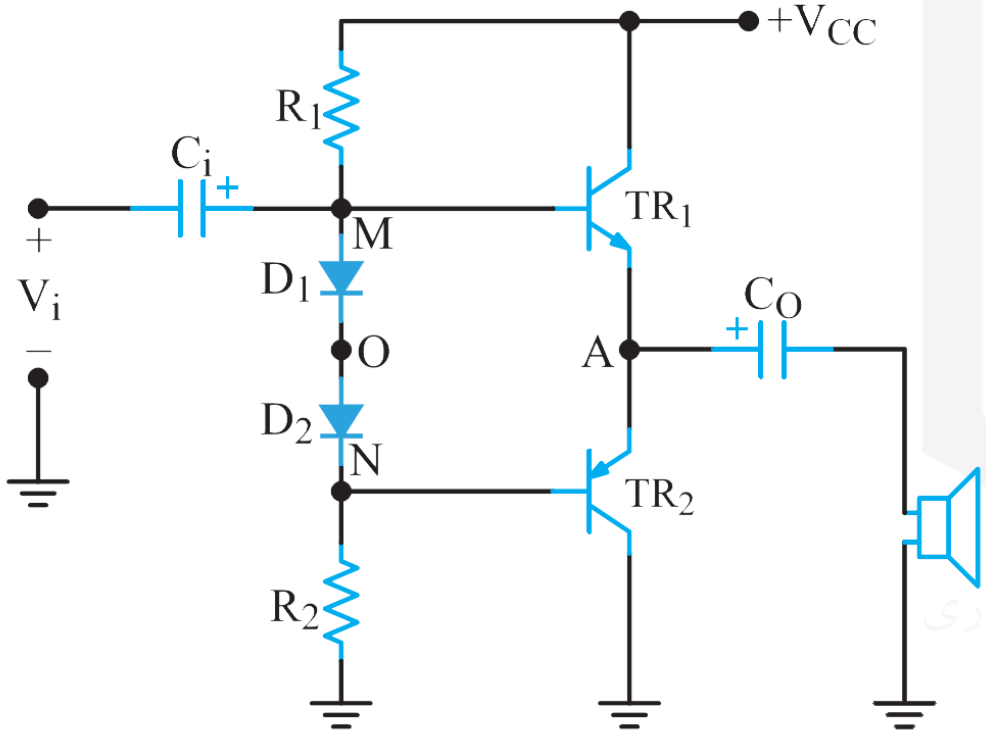


تنظیم پتانسیل MN توسط $P_{R۲}$

- روشهای قرار دادن ترانزیستورها در آستانه هدایت
- استفاده از مقاومتهای تقسیم کنندهٔ ولتاژ
- ولتاژ بیسها با استفاده از پتانسیومتر روی ۱/۲ تنظیم می‌شوند.
- مشکل این است که ولتاژ ورودی مقداری روی مقاومت متغیر افت می‌کند.
- جریان سیکل منفی توسط V_{CO} تأمین می‌شود.
- نقش پتانسیومتر تنظیم ولتاژ MN روی ۱/۲ است.

کلاس AB استفاده از دیود

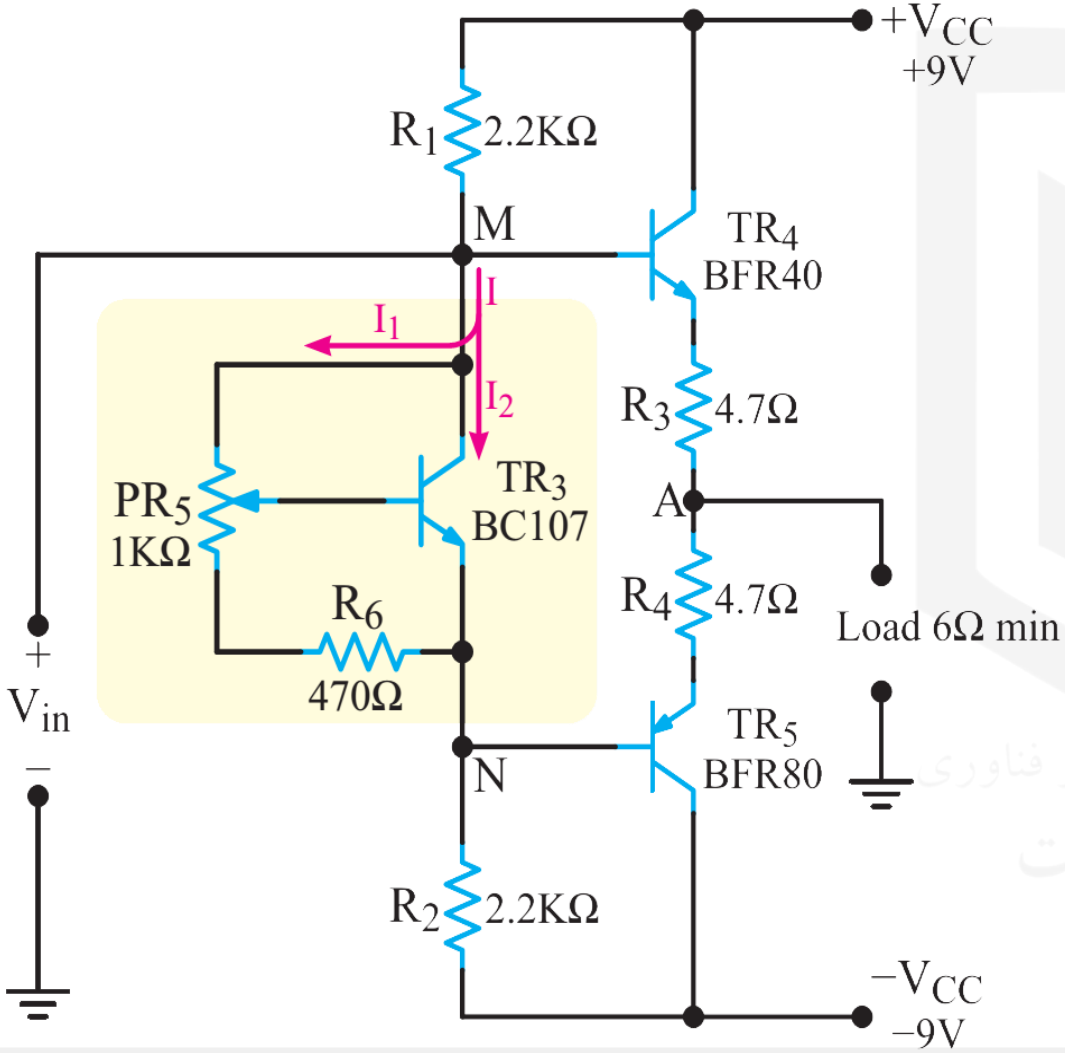
- از دو دیود برای تنظیم ولتاژ بیس دو ترانزیستور استفاده می‌شود.
- ورودی را به نقطه O نیز می‌توان وصل کرد.
- مشکل این است که:
  - اگر افت ولتاژ روی دیودها زیاد شود،
  - ترانزیستورها هدایت می‌کنند و بازده افت می‌کند.



تنظیم پتاسیل MN توسط دو دیود

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

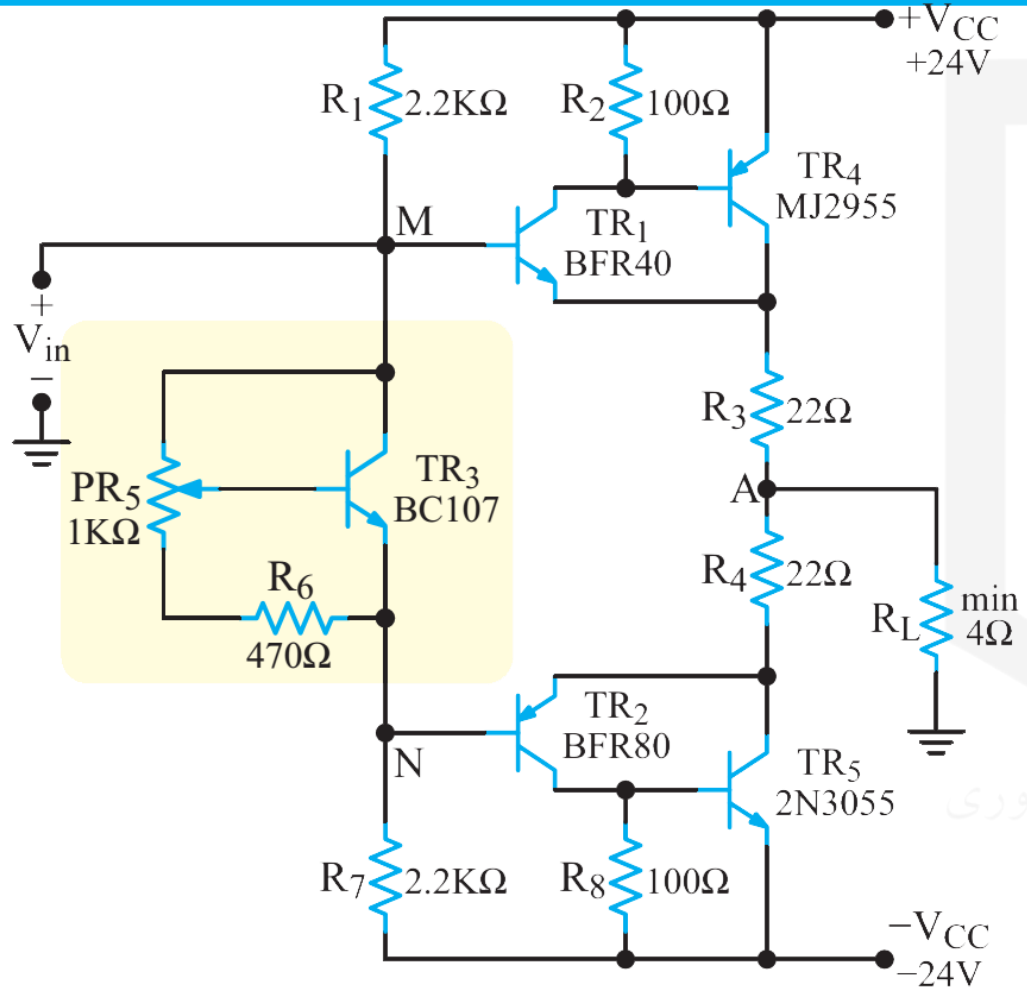
کلاس AB استفاده از رگولاتور ولتاژ موازی



- ترانزیستور سومی برای تنظیم ولتاژ بیس‌ها استفاده می‌شود.
- ابتدا با استفاده از پتانسیومتر ولتاژ کلکتور–امیتر TR3 روی ۱/۲ ولت تنظیم می‌شود.
- پس از آن جریان I1همواره ثابت می‌ماند زیرا:
- به فرض آنکه افزایش جریان I موجب افزایش مقدار I1 گردد، چون جریان I1 از مقاومت R6 و قسمت پایینی پتانسیومتر R5می‌گذرد، افت ولتاژ دو سر این مقاومت‌ها افزایش می‌یابد. لذا V_{BE} ترانزیستور $TR_۳$ زیادتر و ترانزیستور، هادی‌تر می‌شود؛ یعنی، مقاومت کلکتور امیترآن کاهش می‌یابد و موجب افزایش $I_۲$ (که جریان کلکتور $TR_۳$ است) می‌شود. بنابراین افزایش $I_۲$ کاهش مقدار $I_۱$ را به دنبال دارد.

https://skills.study

استفاده از زوج دارلینگتون

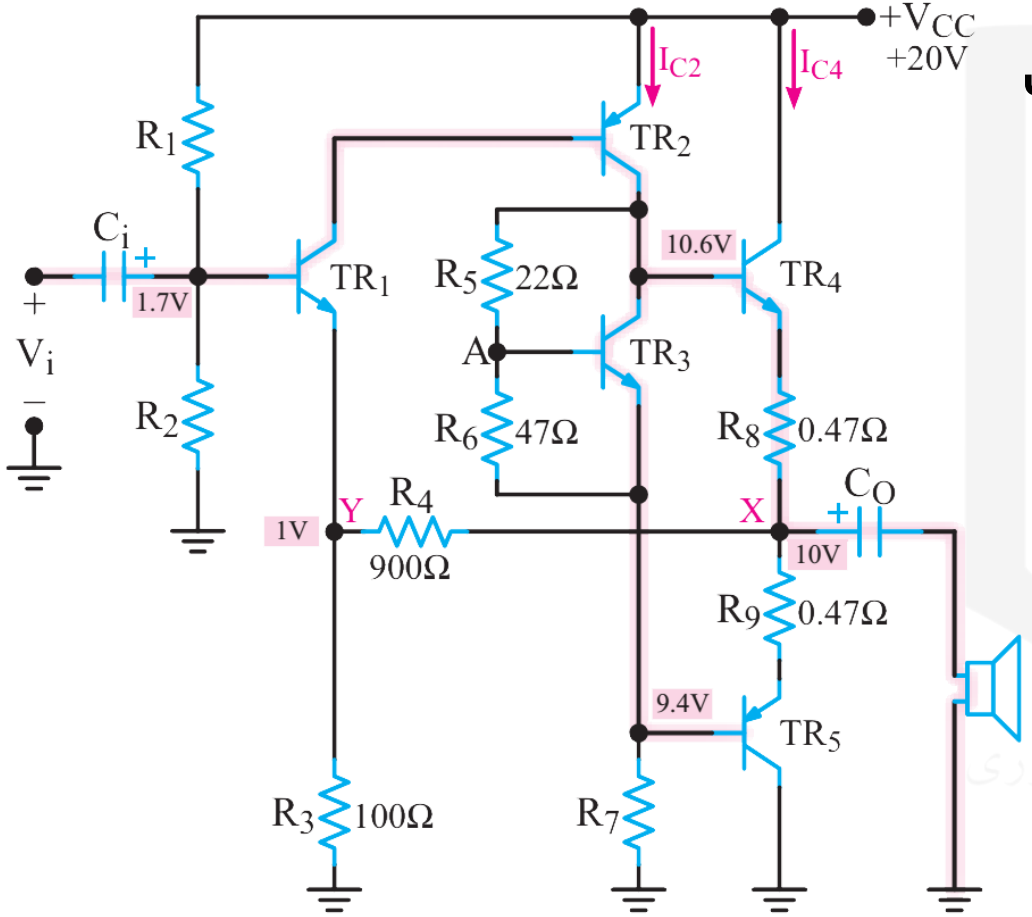


استفاده از زوج دارلینگتون برای افزایش قدرت تقویت‌کننده

- برای افزایش قدرت خروجی به جای ترانزیستورهای مکمل از زوج دارلینگتون استفاده می‌کنیم.
- در اینجا رگولاتور ولتاژ باید ولتاژ ۲/۴ ولت را در سر کلکتور امیتر ایجاد کند.
- از پایداری رگولاتور کاسته می‌شود.

https://skills.study

تقویت کنندهٔ پوش پول مکمل با طبقهٔ راه انداز



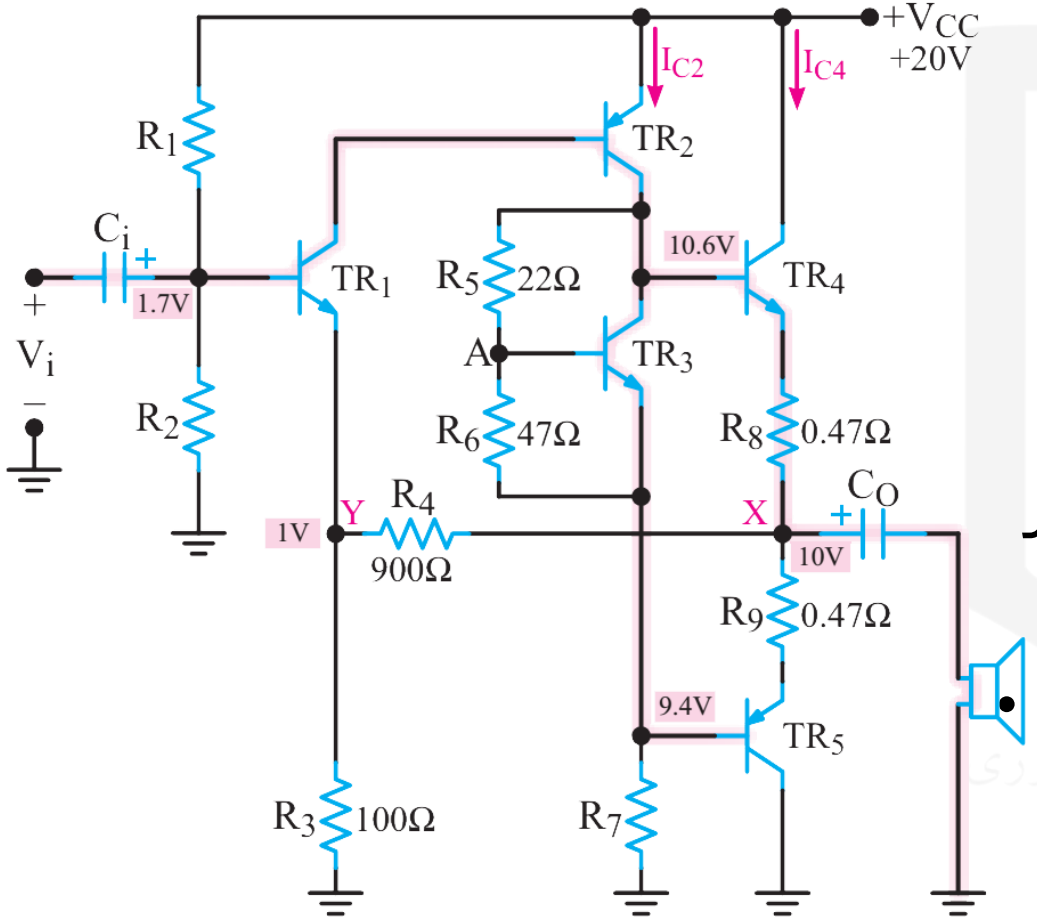
مدار یک تقویت‌کنندهٔ پوش پول با طبقهٔ راه‌انداز و فیدبک

- مدار تقویت کننده مکمل با طبقه راه‌انداز و فیدبک
- TR4 و TR5 تقویت ولتاژ خروجی
- TR3 رگولاتور آستانه هدایت برای TR4 و TR5
- TR2 ترانزیستور راه‌انداز است که موج ac را به طبقه‌ی قدرت می‌دهد.
- TR1 راه انداز و تقویت کننده ولتاژ اولیه است.
- مسیر عبور موج ac با خط زمینه پر رنگ روی شکل

https://skills.study

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

تقویت کنندهٔ پوش پول مکمل با طبقهٔ راه انداز

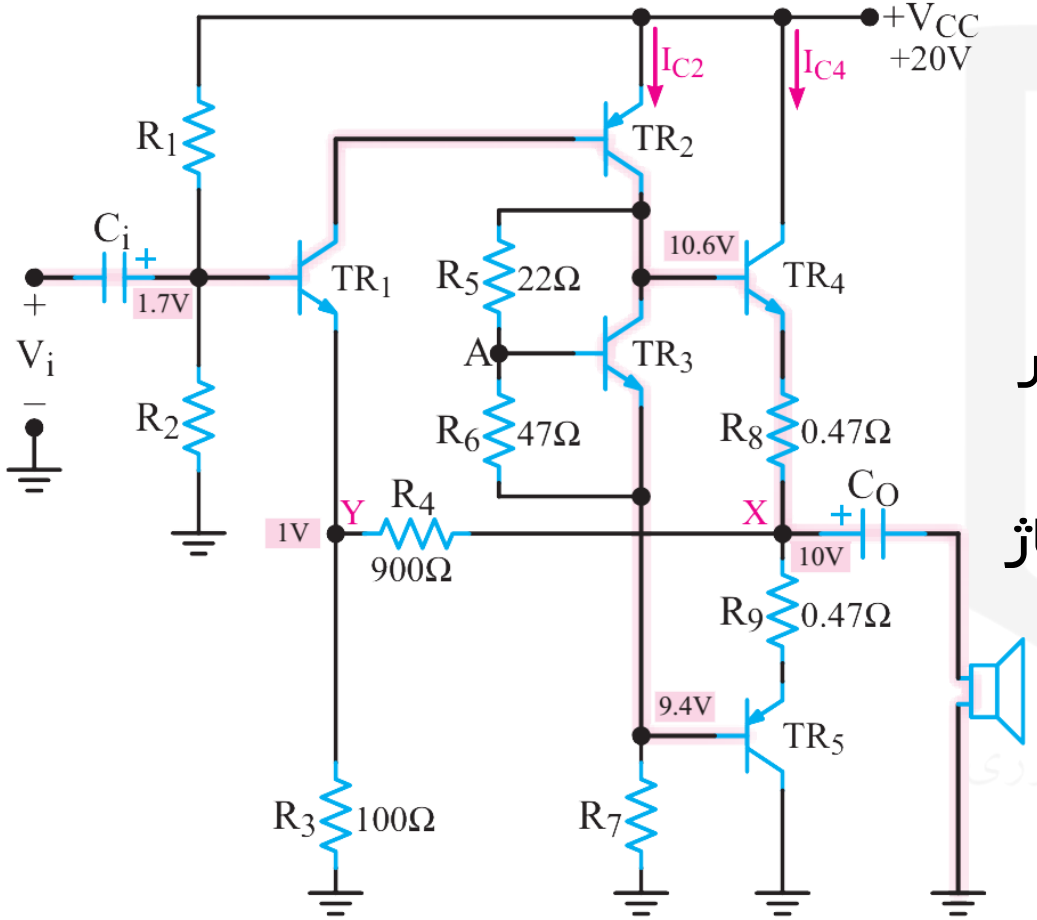


مدار یک تقویت‌کنندهٔ پوش پول با طبقهٔ راه‌انداز و فیدبک

- قدرت خروجی و مقاومت بار جریان TR2 را تعیین می‌کند. یعنی TR2 باید جریان مورد نیاز بیس TR4 و TR5 را که مساوی $\frac{I_{C4}}{\beta_4}$ است، تأمین کند.
- ولتاژ DC خروجی X برابر $\frac{V_{CC}}{2} = 10$ است.
- R3 و R4 باید جوری تعیین شوند که ولتاژ دو سر R3 (امیتر TR1) یک ولت شود.
- $V_{ETR1} = V_3 = \frac{V_x R3}{R3+R4} = \frac{10\times100}{900+100} = 1v$
- از I_{E1} صرف نظر شد.

https://skills.study

تقویت کنندهٔ پوش پول مکمل با طبقهٔ راه انداز

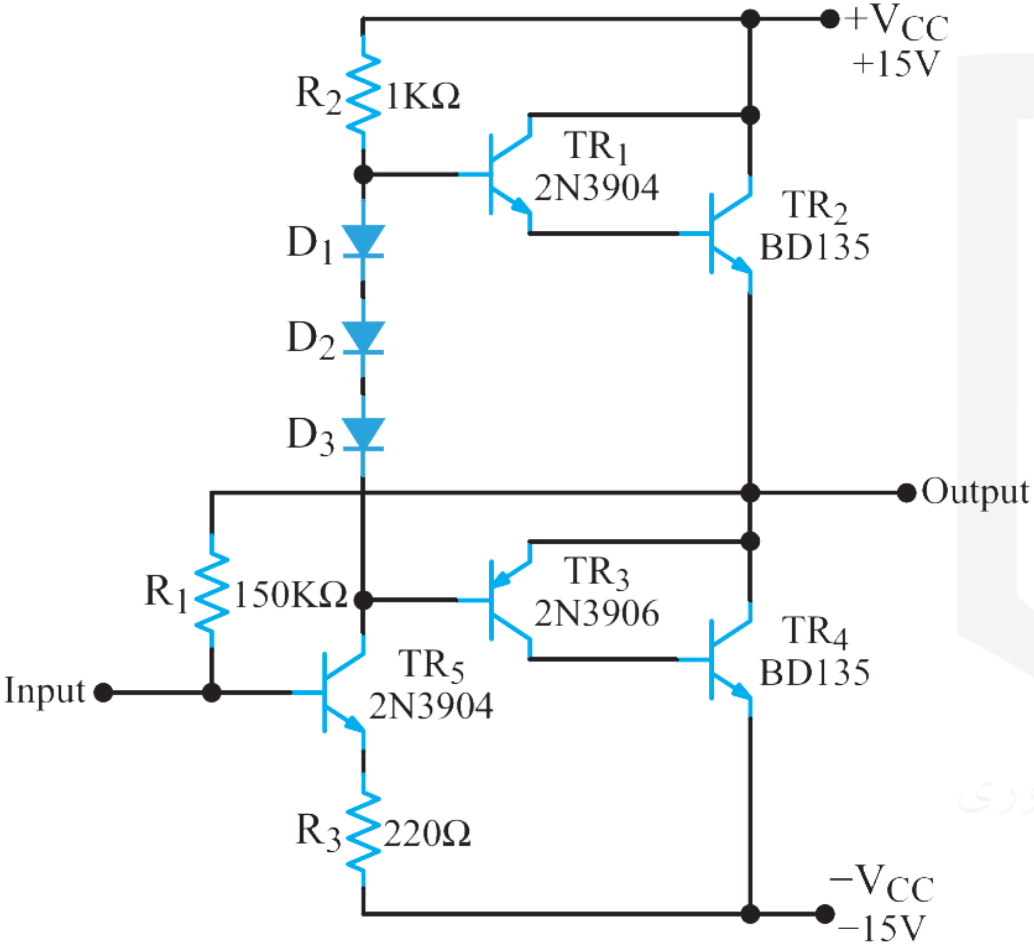


مدار یک تقویت‌کنندهٔ پوش پول با طبقهٔ راه‌انداز و فیدبک

- هدایت TR1 موجب فعال شدن TR2 می‌شود
- با هادی شدن بیشتر TR2، ولتاژ کلکتور امیتر آن کم می‌شود و بیس TR4 را مثبت تر می‌کند.
- در نتیجه هدایت TR4 بیشتر می‌شود و ولتاژ نقطه X بیشتر می‌شود.
- با رسیدن ولتاژ نقطه X به ۱۰ ولت (نصف منبع تغذیه) ولتاژ نقطه Y به یک ولت می‌رسد.
- اگر ولتاژ نقطه X بیش از ۱۰ ولت شود ولتاژ Y بیشتر می‌شود و هدایت آن را کم می‌کند پس ولتاژ X هیچگاه از ۱۰ بیشتر نمی‌شود.

https://skills.study

مدار کاربردی تقویت کنندهٔ پوش پول با مدار راه انداز

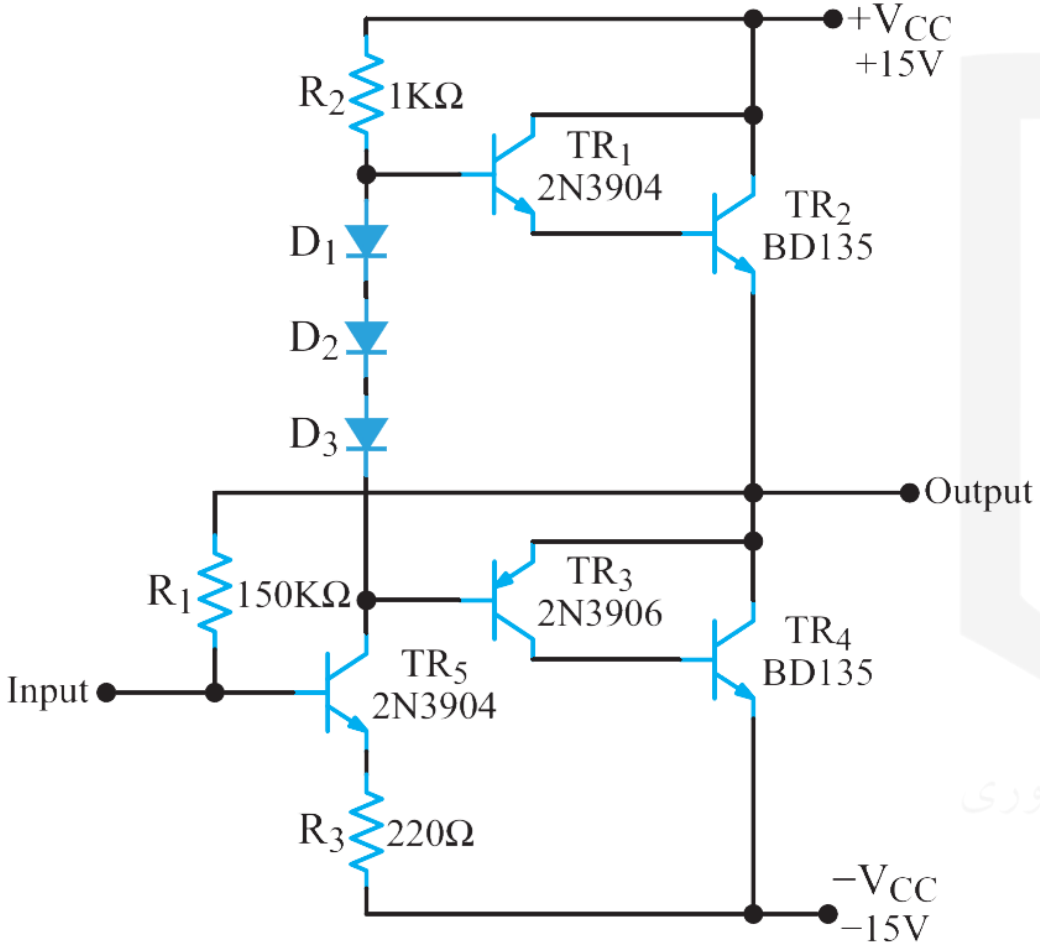


تقویت‌کنندهٔ قدرت همراه با تقویت‌کنندهٔ درایور

- زوج دارلینگتون جریان کافی را برای بلندگوی ۸ اهمی فراهم می‌کند.
- سیگنالی که از تقویت کننده‌ی اولیه دریافت می‌شود باید به‌صورت کوپلاژ خازنی به طبقه‌ی تقویت کننده‌ی درایور (TR5) داده شود.
- ترانزیستور TR5علاوه برتقویت سیگنال در حد مورد نیاز برای طبقات بعدی، مانع بارگذاری روی طبقه‌ی تقویت کننده‌ی اولیه (قبلی) می‌شود و بهره‌ی مدار را افزایش می‌دهد.
- بایاس بیس TR5از طریق R1و از ولتاژ خروجی که در حالت سکون (بدون اعمال سیگنال متناوب) صفر ولت است، تأمین می‌شود

https://skills.study

مدار کاربردی تقویت کنندهٔ پوش پول با مدار راه انداز



تقویت‌کنندهٔ قدرت همراه با تقویت‌کنندهٔ درایور

- . سیگنال ac خروجی نیز از طریق R1 به بیس TR5 فیدبک داده می‌شود. این سیگنال، با سیگنال ورودی که به بیس داده می‌شود در فاز مخالف است و فیدبک منفی ac ایجاد می‌کند و سبب پایداری بهره‌ی مدار می‌شود.
- در این مدار به این دلیل از سه دیود استفاده شده است که باید دیودهای بیس امیتر ترانزیستورهای TR1 و TR2 و TR3 را در آستانه‌ی هدایت قرار دهد، زیرا ولتاژ مورد نیاز این سه ترانزیستور در حدود ۱ /۸ V = ۰ /۶ * ۳ است.

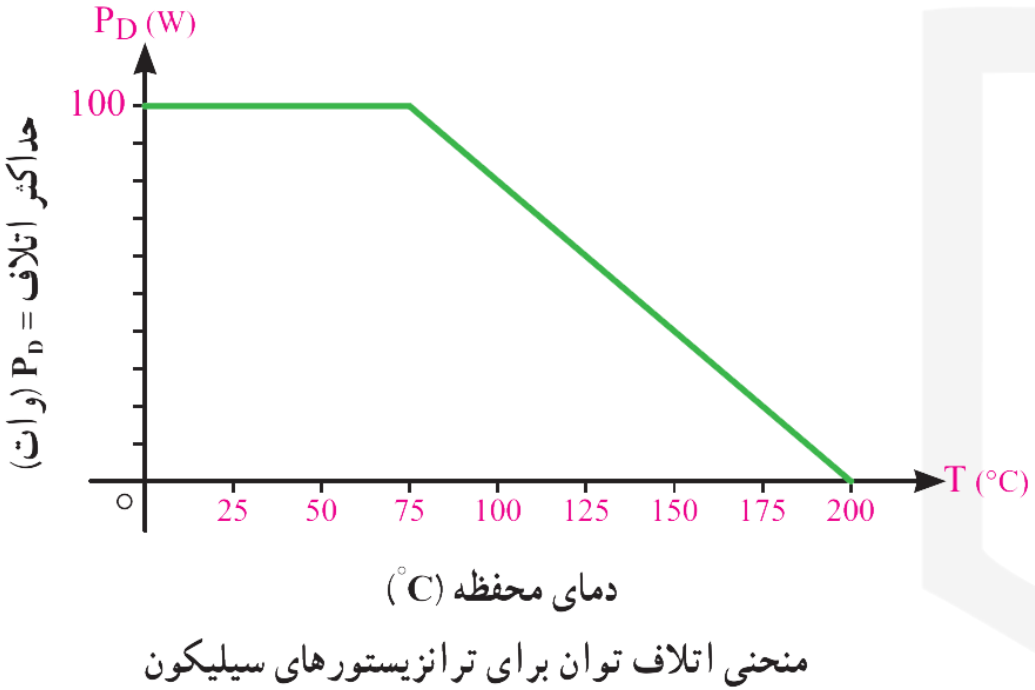
https://skills.study

هیت سینک

- جلوگیری از خرابی و کاهش عمر ترانزیستور
- حداکثر دمای قابل تحمل ترانزیستور مربوط به دمای پیوندهای آن است.
- پیوند سیلیکون تحمل بیشتر دمایی نسبت به ژرمانیوم دارد.
- سیلیکون ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد
- ژرمانیوم ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی گراد
- توان حداکثر با افزایش دما کاهش می‌یابد

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

مشخصهٔ‌گرمایی ترانزیستور قدرت



منحنی اتلاف توان برای ترانزیستورهای سیلیکون

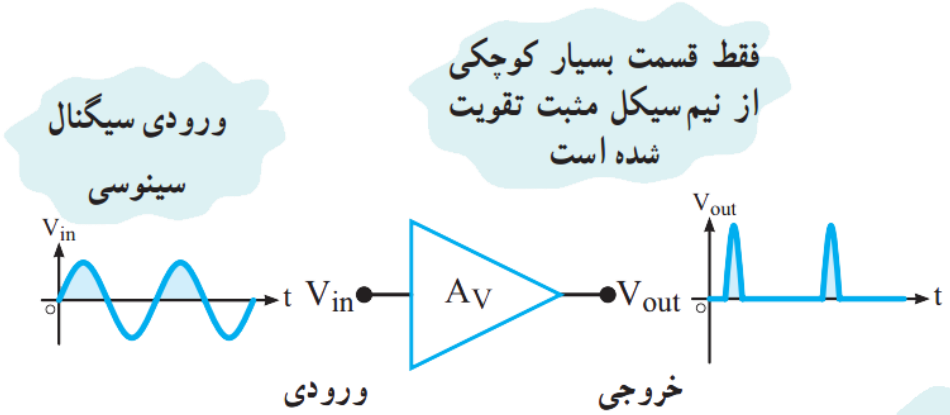
- مشخصهٔ‌گرمایی ترانزیستور قدرت
- رابطهٔ آن با توان تلف شده

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

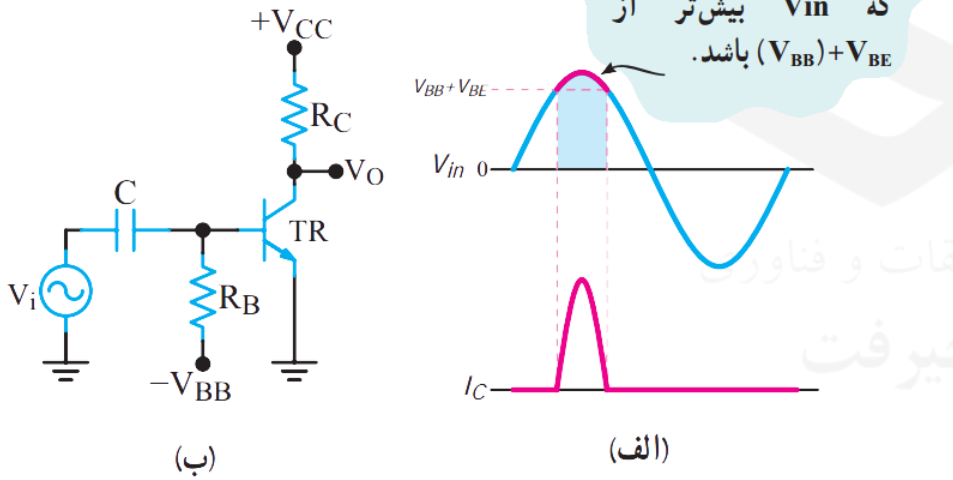
تقویت کننده کلاس C

- در یک تقویت کننده‌ی کلاس C، ترانزیستور درکمتر از نیم تناوب هدایت می‌کند. در این کلاس تلفات ترانزیستور از کلاس B کمتر و بازده مدار از هر دو کلاس A و B بیشتر است.

بیس ترانزیستور توسط ولتاژ (VBB) در بایاس مخالف قرار گرفته است. لازم است دامنه‌ی پیک سیگنال ac ورودی اندکی بیشتر از $|V_{BB}| + V_{BE}$ باشد تا بتواند پتانسیل بایاس مخالف دیود بیس امیتر را خنثی کند و ترانزیستور را هادی نماید. در شکل موج ورودی و جریان کلکتور ترانزیستور در زمان هدایت، نشان داده شده است



شکل موج ورودی و خروجی در تقویت‌کنندهٔ کلاس C



تقویت‌کنندهٔ کلاس C و موج ورودی و خروجی آن

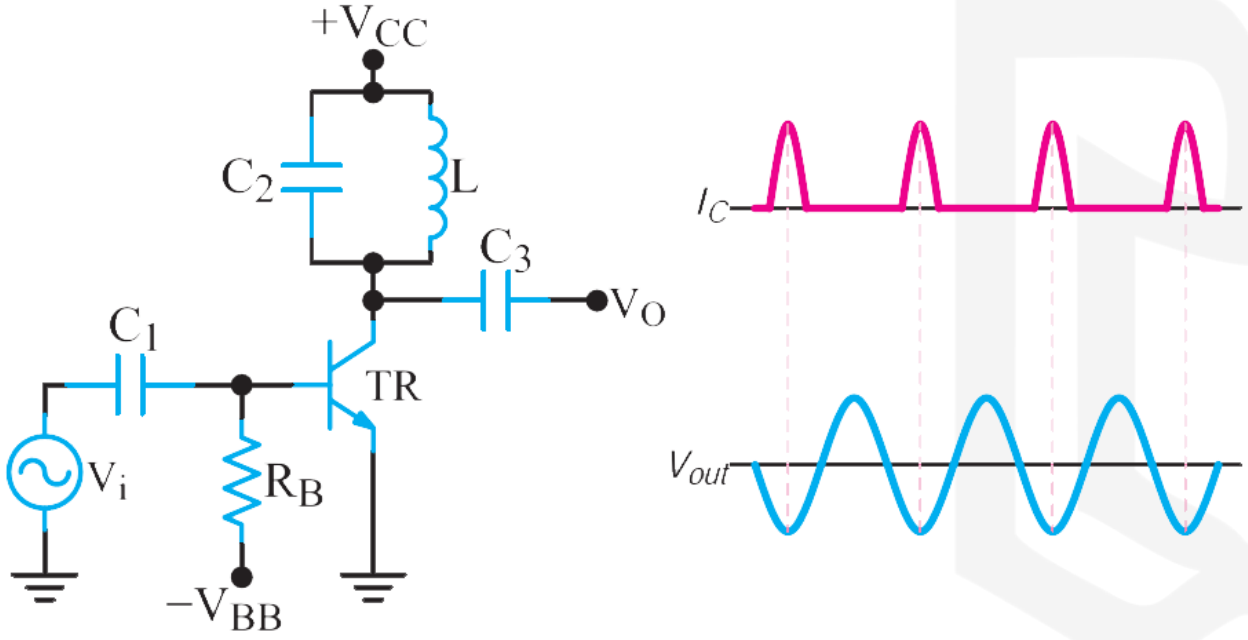
https://skills.study

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

تقویت کننده کلاس C

- از آنجایی که سیگنال کلکتور شبیه موج ورودیِ نیست، آمپلیفایر کلاس Cبا بار مقاومتی عملاً کاربردی ندارد. درصورتی که از مدار رزونانس LC موازی (مدار تانک) در کلکتور استفاده کنیم، نوعی مدار کاربردی به وجود می‌آید.
- یک تقویت کننده‌ی کلاس C با مدار تانک در کلکتور و شکل موج جریان کلکتور و ولتاژ خروجی.
- فرکانس رزونانس مدار تانک:

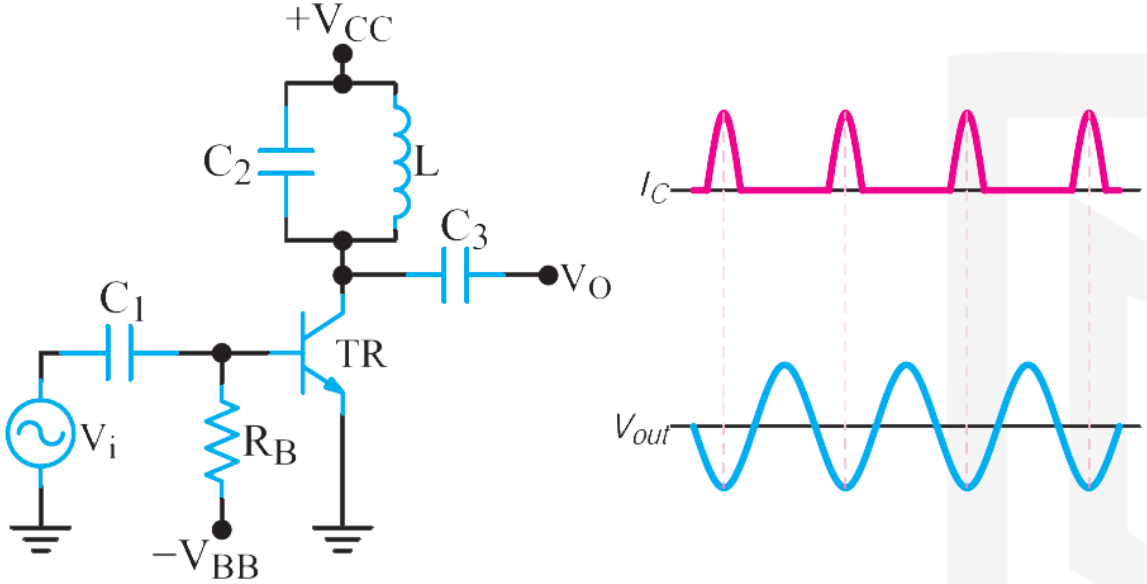
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_2}}$$



مدار تقویت‌کننده کلاس C با شکل موج I_C و V_{out}

https://skills.study

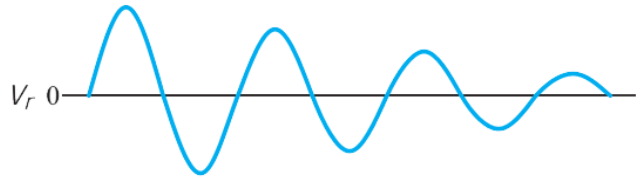
تقویت کننده کلاس C



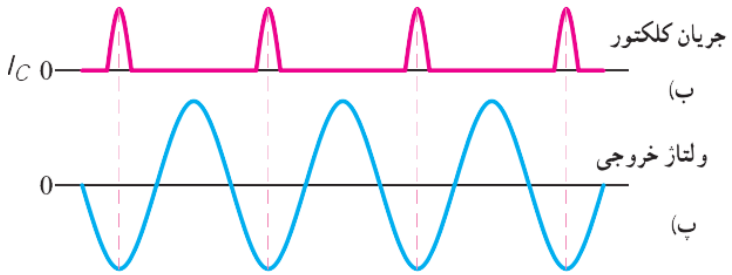
مدار تقویت‌کننده کلاس C با شکل موج I_C و V_{out}

- پالسهای کوتاه جریان کلکتور در هر سیکل، سبب آغاز و ادامه نوسان در مدار تانک می‌شود و موجی سینوسی را در کلکتور ترانزیستور به وجود می‌آورد. چون مدار تانک امپدانس بسیار بالایی در نزدیک فرکانس رزونانس دارد، لذا بهره‌ی مدار فقط در این فرکانس خیلی زیاد است. چنانچه مدار تانک، روی دومین هارمونیک فرکانس ورودی تنظیم شود، در اینصورت تقویت کننده‌ی کلاس C به عنوان مدار دو برابر کننده‌ی فرکانس عمل می‌کند. همچنین تغییر فرکانس رزونانس می‌توان فرکانس هارمونیکهای بالاتر را نیز دریافت نمود.

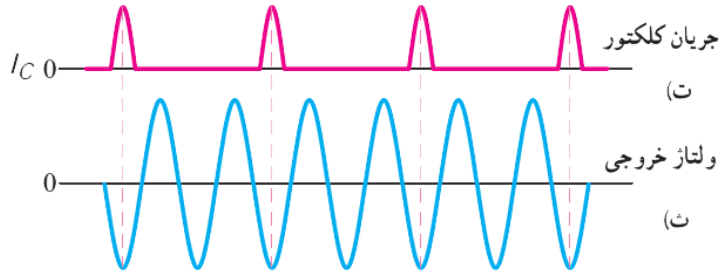
تقویت کننده کلاس C



الف) نوسان‌های میراشونده در مدار تانک



مدار تانک روی هارمونیک اصلی موج ورودی تنظیم شده است.



مدار تانک روی دومین هارمونیک تنظیم شده است.

هارمونیک‌های جریان I_c

- شکل روبرو موج ولتاژ خروجی مدار تانک، جریان کلکتور ترانزیستور و موج ولتاژ خروجی روی هارمونیک اصلی و هارمونیک دوم را نشان می‌دهد. از تقویت کننده‌های کلاس C در مدارهای گیرنده و فرستنده‌ی رادیویی نیز استفاده می‌شود.

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه جیرفت

تقویت کننده کلاس D

- درتقویت کننده‌ی کلاس D ترانزیستور در حالت قطع و اشباع و به صورت یک سوئیچ عمل می‌کند.
- در این حالت در زمان قطع و اشباع ترانزیستور، تقریباً تلفات توان وجود ندارد. به عبارت دیگر میزان تلفات توان در مقایسه با تقویت کننده‌ی کلاس AB بسیار ناچیز است.
- از آنجا که در دستگاههایی مانند تلفن همراه موضوع تلفات توان و تمام شدن انرژی باتری بسیار اهمیت دارد، از تقویت کلاس D در قسمت تقویت کننده‌های خروجی این نوع دستگاهها استفاده می‌کنند. به این ترتیب که با استفاده از یک IC اضافی، تقویت کننده‌ی کلاس AB را در کلاس D بایاس می‌کنند. در این روش از تبدیل سیگنال دیجیتال به آنالوگ استفاده می‌شود.