

پودمان دوم

تحلیل مدارهای الکترونیکی



در حال حاضر الکترونیک کلید فتح شگفتی‌های جهان است و با تمام علوم و فنون موجود به‌نحوی پیوند خورده است. علاوه بر وسایل الکترونیکی از جمله دستگاه‌های مخابراتی مثل رادیو، تلویزیون، ضبط صوت و تصویر، انواع وسایل پزشکی، صنعتی، نظامی، در دیگر وسایل غیرالکترونیکی هم، کمتر وسیله‌ای را می‌توان یافت که الکترونیک در آن دخالتی نکرده باشد. از جمله در اتومبیل و صنایع حمل و نقل و وسایل خانگی نقش الکترونیک بسیار فعال و جالب توجه شده است. با توجه به این مختصر می‌توان نتیجه گرفت که امروزه الکترونیک برای همه افرادی که به نحوی با امور فنی درگیرند لازم است و به فراخور حرفه خویش باید از این رشته اطلاعی داشته باشند. یکی از مصداق‌های عملی در اهمیت الکترونیک دفاع از امنیت ملی کشور است به‌طور مثال می‌توان به هواپیمای جاسوسی بدون سرنشین فوق پیشرفته آمریکایی به نام RQ-170 اشاره کرد که به حریم کشور تجاوز کرده بود و توسط نیروهای جنگ الکترونیک سپاه پاسداران انقلاب اسلامی تحت کنترل درآمد و به‌صورت سالم به زمین نشاندند و چندی بعد با تکیه بر دانش الکترونیک و هوا فضا نمونه ایرانی آن مهندسی معکوس و ساخته شد.



واحد یادگیری: تحلیل مدارهای الکترونیکی

- پرکاربردترین قطعه الکترونیکی چیست؟
- چگونه باید ترانزیستور را تغذیه کنیم؟
- انواع ترانزیستورها و کاربرد آنها را می‌شناسید؟
- انواع تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری به چه منظور استفاده می‌شوند؟
- چگونه ترانزیستور عمل تقویت را انجام می‌دهد؟
- مشخصات و ویژگی‌های تقویت‌کننده‌های مختلف چیست؟
- مدار مجتمع (آی سی) چیست؟
- تقویت‌کننده عملیاتی (op_Amp) چیست و کاربرد آن چگونه است؟

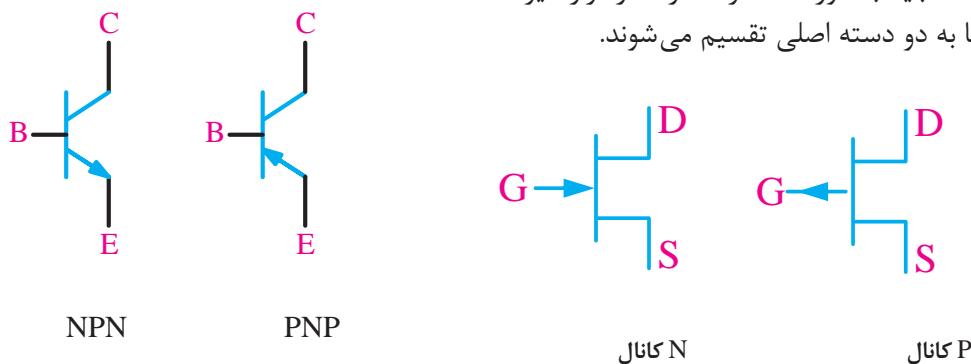
هدف از این شایستگی عبارت است از:

- ۱ بررسی نواحی کار ترانزیستورها
- ۲ ولتاژها و جریان‌های پایه‌های ترانزیستور را در مدار بایاس محاسبه کند.
- ۳ مقایسه سه نوع آرایش تقویت‌کننده ترانزیستوری
- ۴ بررسی تقویت‌کننده‌های خاص (تفاضلی، دارلینگتون و کامپلی منتاری)
- ۵ ساخت یک تقویت‌کننده صوتی عملی
- ۶ نماد و شکل ظاهری تقویت‌کننده عملیاتی
- ۷ بررسی و تحلیل مدارهای تقویت‌کننده عملیاتی و کاربرد آن
- ۸ ساختمان ترانزیستور اثر میدان (FET)، نماد و انواع آنها
- ۹ کاربرد ترانزیستور اثر میدان به‌عنوان سوئیچ

استاندارد عملکرد

پس از اتمام واحد یادگیری و کسب شایستگی، هنرجویان می‌توانند تحلیل، طراحی و ساخت مدارات بایاس ترانزیستوری، تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری و تقویت‌کننده‌های عملیاتی را انجام دهند.

در این پودمان المان سه ترمینالی با نام ترانزیستور دو قطبی (Bipolar Junction Transistor) یا BJT را بررسی می‌کنیم. BJT در سال ۱۹۴۸ اختراع شده و با معرفی دستگاه‌هایی که با ترانزیستور نیمه هادی کار می‌کردند انقلابی در دنیا پدید آورد. ترانزیستور BJT برای سال‌های متمادی انتخاب اول برای انواع دستگاه‌های دیجیتال و آنالوگ بود اما در دهه اخیر به سرعت با MOSFET جایگزین گشته است. BJT امروزه در مدارات آنالوگ کاربرد زیادی دارد. ترانزیستور نام کوتاه شده Transfer Resistor می‌باشد. از آنجا که ترانزیستورها شامل سه پایه هستند، برای استفاده از آنها باید مدار شامل دو پایه ورودی و خروجی باشد و یکی از پایه‌ها باید به صورت مشترک در مدار قرار گیرد! ترانزیستورها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند.



ترانزیستورهای دو قطبی
Bipolar junction transistors (BJT)

ترانزیستورهای اثر میدان (FET)
Field effect transistors (FET)

ترانزیستورها براساس نوع کاربردشان نیز (به عنوان مثال: عمومی، سویچینگ، فرکانس بالا و غیره...) دسته‌بندی می‌شوند.

طراحی برای فرکانس‌های زیر ۱۰۰ کیلو هرتز فرکانس‌های صوتی و مدارهای خطی	فرکانس پایین Low-frequency
برای فرکانس‌های بالای ۱۰۰ کیلو هرتز فرکانس‌های رادیویی، پهنای باند بالا	فرکانس بالا High-frequency
این ترانزیستورها توان بالایی دارند و در مدارات رادیویی و صوتی کاربرد دارند.	قدرت power
در مدارات سویچینگ و کلیدزنی مانند منابع تغذیه سویچینگ و upsها	سویچینگ switching
مدارهایی که در اصلی برای تقویت سیگنال‌هایی با دامنه بسیار کم طراحی می‌شوند و عموماً قابلیت تحمل نویز بسیار بالایی دارند. مانند مدارات مخابراتی	نویز پایین Low-noise
ترانزیستورهایی که برای ولتاژهای کاری بالا طراحی شده‌اند.	ولتاژ بالا High-voltage

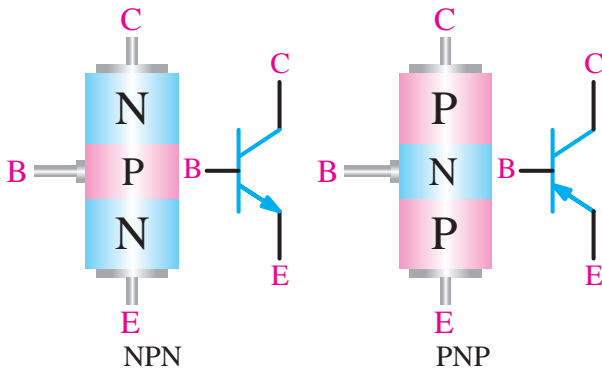
از طریق سایت www.alldatasheet.com و راهنمایی هنرآموز مربوطه برای کاربردهای مختلف (جدول فوق) یک نمونه ترانزیستور استخراج کنید و مشخصات آن را در کلاس بیان کنید.

فعالیت



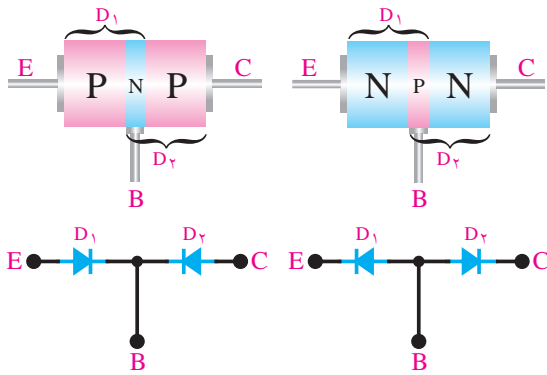
ترانزیستورهای دو قطبی (BJT) Bipolar junction transistor

همان طور که در فصل اول دانش فنی پایه گفته شد ترانزیستور دو قطبی از سه نیمه هادی نوع P و N تشکیل شده است. ترتیب قرار گرفتن نیمه هادی های P و N در کنارهم به صورت یکی از حالت های زیر است. با توجه به شکل



ساختمان داخلی و نماد فنی ترانزیستور

زیر مشاهده می شود دو نوع ترانزیستور وجود دارد که به یکی NPN و دیگری PNP گفته می شود. سه پایه ترانزیستور نیز امیتر Emitter یعنی منتشرکننده، بیس Base یعنی پایه و کلکتور Collector یعنی جمع کننده نامگذاری شده است.

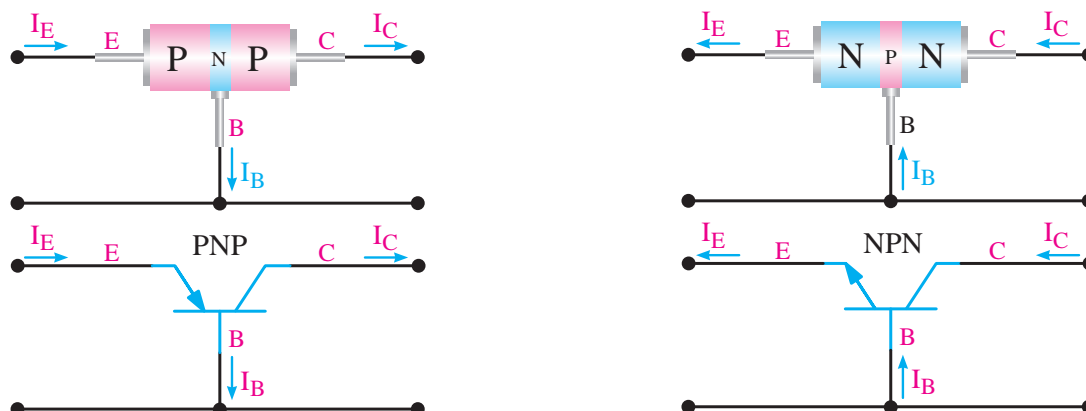


نمای دیودی ترانزیستور

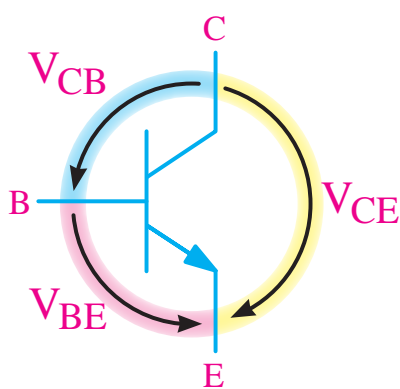
مدار معادل دیودی ترانزیستور: هر اتصال N-P معادل یک دیود بوده، از این رو می توان یک ترانزیستور را معادل ۲ دیود نشان داد.

جهت جریان ها در ترانزیستور: جریانی که از کلکتور عبور می کند با حرف I_C ، جریانی که از بیس عبور می کند با حرف I_B و جریانی که از امیتر عبور می کند با حرف I_E نشان داده می شود. جریانی که از امیتر عبور می کند، به دو انشعاب تقسیم می شود. قسمت بسیار کمی از جریان از بیس و قسمت اعظم آن از کلکتور عبور می کند. لذا جریان امیتر برابراست با جریان بیس به علاوه جریانی کلکتور، یعنی:

$$I_E = I_B + I_C$$



جهت قرار دادی جریان در ترانزیستورهای BJT



V_{BE} یعنی ولتاژ بیس نسبت به امیتر

جهت قراردادی ولتاژ در ترانزیستورهای BJT

ولتاژهای ترانزیستور: برای اینکه بتوان از ترانزیستور به عنوان تقویت کننده سیگنال های الکتریکی یا... استفاده نمود، باید ترانزیستور را با ولتاژ dc تغذیه کرد. در هر حالت، ولتاژهایی که به قسمت های مختلف ترانزیستور اعمال می شوند، باهم فرق می کنند در این قسمت به نامگذاری ولتاژ قسمت های مختلف می پردازیم. ولتاژی که بین پایه های بیس و امیتر قرار می گیرد با V_{BE} ، ولتاژی که در قسمت کلکتور - بیس قرار می گیرد با V_{CB} ، ولتاژی که بین کلکتور - امیتر وصل می شود با V_{CE} نشان داده می شوند. شکل روبه رو ولتاژهای قسمت های مختلف ترانزیستور را نشان می دهد.

بایاس ترانزیستور: برای استفاده از یک ترانزیستور به عنوان تقویت کننده ابتدا باید آن را بایاس نمود. برای این کار در ترانزیستور باید دیود بیس-امیتر در بایاس موافق و دیود کلکتور - بیس در بایاس مخالف قرار گیرد. به طور کلی بایاس کردن به معنای تغذیه نمودن و اعمال ولتاژ dc به صورت صحیح به ترانزیستور می باشد. از این رو جهت تأمین ولتاژهای لازم برای ترانزیستور باید از مدارات بایاس استفاده کرد.

نقطه کار: به مقادیر dc کمیت های $I_C - I_B - V_{CE} - V_{BE}$ در شرایطی که هیچ منبع سیگنال AC به ورودی آن متصل نباشد، نقطه کار DC ترانزیستور گویند. نقطه کار را با حرف Q نشان می دهند. Q حرف اول کلمه Quicent point به مفهوم نقطه کار است.

انتخاب نقطه کار: برای انتخاب نقطه کار، ابتدا باید محدودیت های ترانزیستور را در نظر گرفت. از جمله محدودیت ها، تحمل توان تلف شده در ترانزیستور، حداکثر جریان کلکتور و حداکثر ولتاژ بین کلکتور و امیتر است.

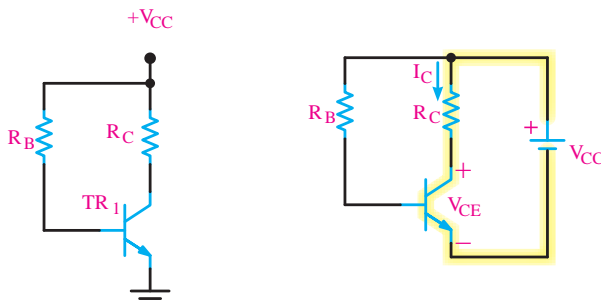
مقادیر حد در ترانزیستورها: هر المان نیمه هادی، از جمله ترانزیستور، برای مقادیر الکتریکی مشخصی ساخته می‌شود. مثلاً هر ترانزیستوری را برای تحمل توان مشخصی می‌سازند. اگر مقادیر الکتریکی اعمال شده به ترانزیستور بیشتر از آنچه کارخانه سازنده مشخص کرده است باشد، ترانزیستور معیوب می‌شود. این مقادیر الکتریکی به مقادیر حد معروفند. کارخانجات سازنده، حداکثر مقدار مجاز مقادیر الکتریکی را مشخص می‌کنند. مهمترین این مقادیر عبارتند از :

- ۱ **حداکثر ولتاژ کلکتور - امیتر:** این پارامتر، حداکثر ولتاژ مجاز بین پایه‌های کلکتور و امیتر را مشخص می‌کند و آن را با V_{CEmax} نمایش می‌دهند.
- ۲ **حداکثر جریان کلکتور:** حداکثر جریانی است که ترانزیستور می‌تواند در دمای مشخص شده از طرف کارخانه سازنده، تحمل کند و آن را با I_{max} نمایش می‌دهند.
- ۳ **حداکثر توان:** حداکثر توانی است که می‌تواند در یک ترانزیستور به صورت حرارت تلف شود و آن را با P_{Cmax} نمایش می‌دهند.
- ۴ **حداکثر درجه حرارت محل پیوند:** حداکثر درجه حرارتی است که در محل اتصال کلکتور بیس، ترانزیستور می‌تواند تحمل کند و آن را با T_j نمایش می‌دهند.

انواع مدارات بایاس

اصولاً مدارات بایاس شکل مشخص و ثابتی ندارند بنابراین هر مداری که بتواند ولتاژ تغذیه دیود بیس-امیتر را فراهم کند را مدار بایاس گویند. ولی استفاده از مدارات زیر متداول تر است.

بایاس ثابت



مدار بایاس ثابت

بایاس ثابت

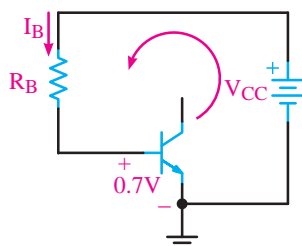
در این مدار دیود بیس-امیتر مستقیماً توسط یک منبع dc تغذیه می‌شود و پیوند بیس-امیتر مستقیماً از طریق مقاومت R_B به منبع V_{CC} متصل است. در برخی نقشه‌های مدار جهت سهولت از رسم منبع V_{CC} خودداری می‌کنند.

تحلیل محاسباتی:

گام اول: با نوشتن قانون kvl در حلقه ورودی شکل ۸-۱ می‌توانیم R_B یا I_B را محاسبه کنیم.

$$-V_{CC} + R_B I_B + V_{BE} = 0$$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} \quad \text{یا} \quad I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$



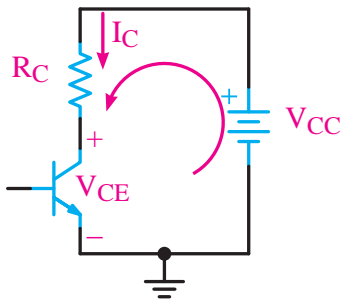
حلقه ورودی مدار بایاس ثابت

بخش فیلم



گام دوم: با فرض اینکه مدار بایاس در ناحیه فعال قرار دارد بنابراین از طریق رابطه زیر می‌توانیم مقدار I_C را حساب کنیم.

$$I_C = \beta I_B$$



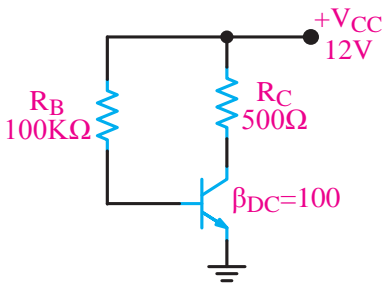
حلقه خروجی مدار بایاس ثابت

گام سوم: با نوشتن قانون kvl در حلقه خروجی شکل زیر می‌توانیم V_{CE} یا R_C را محاسبه کنیم.

خروجی KVL

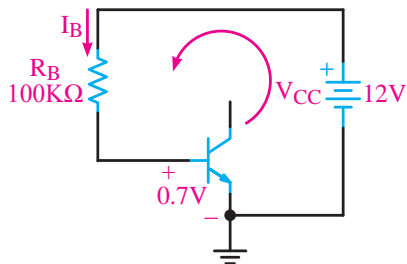
$$-V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C \quad \text{یا} \quad R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C}$$



مدار بایاس ثابت

مثال ۱: در مدار شکل زیر مقادیر I_C ، I_B ، V_{CE} را محاسبه کنید. ($V_{BE} = 0.7$)



مدار بایاس ثابت

پاسخ: با نوشتن معادله kvl در حلقه ورودی مطابق شکل زیر می‌توان I_B را محاسبه نمود.
معادله kvl در حلقه خروجی و ورودی:

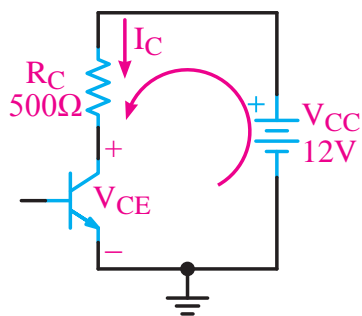
$$-V_{CC} + R_B I_B + V_{BE} = 0$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_B = \frac{12 - 0.7}{100 \text{ K}\Omega} = \frac{11.3}{100} \text{ mA} \quad \text{محاسبه } I_B$$

$$I_B = 113 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B \quad I_C = 100 \times \frac{11.3}{100} = 11.3 \text{ mA} \quad \text{محاسبه } I_C$$



KVL در حلقه خروجی

با نوشتن معادله KVL در حلقه خروجی در شکل زیر می‌توان V_{CE} را محاسبه نمود.

معادله KVL در حلقه خروجی:

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

$$-V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} = 0$$

در معادله عددگذاری نموده و V_{CE} را محاسبه می‌کنیم.

$$V_{CE} = 6/35V$$

$$V_{CE} = 12 - (0/5K)(11/3m)$$

مثال ۲: برای نقطه کار Q با مختصات:

$$Q \begin{cases} I_B = 0/1mA \\ I_C = 5mA \\ V_{CE} = 6V \\ V_{BE} = 0/7 \end{cases}$$

و با معلوم بودن مقدار V_{CC} برابر ۱۲ ولت، مقاومت‌های بایاس R_C و R_B را در مدار شکل فوق محاسبه کنید.

پاسخ: معادله KVL در حلقه خروجی

$$KVL(I) \Rightarrow -V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} = 0$$

محاسبه R_C

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C}$$

$$R_C = \frac{12 - 6}{5} = \frac{6}{5} = 1/2K\Omega$$

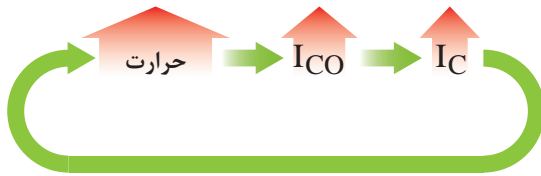
$$KVL(II) \Rightarrow +V_{CC} + R_B I_B + V_{BE} = 0$$

معادله KVL در حلقه ورودی

محاسبه R_B

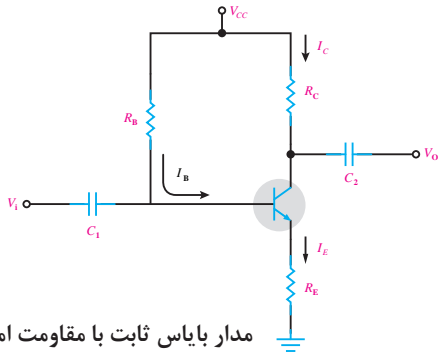
$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B}$$

$$R_B = \frac{12/3}{0/1} = 113k$$



تغییر دمای ترانزیستور

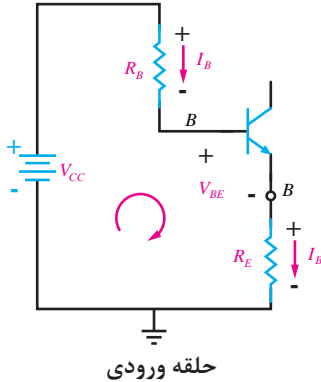
مزایا و معایب: مهم‌ترین مزیت این مدار سادگی آن است ولی این مدار در برابر حرارت محیط و قطعات حساس است و با تغییر دمای ترانزیستور و نقطه کار تغییر می‌کند. به این صورت که اگر حرارت زیاد شود، I_C نیز افزایش می‌یابد و این امر تا ناپایداری و آسیب دیدن مدار ادامه می‌یابد. که برای رفع این ناپایداری باید یک مقاومت در امیتر ترانزیستور قرار دهیم.



مدار بایاس ثابت با مقاومت امیتر

بایاس ثابت با مقاومت امیتر

با قرار دادن مقاومت R_E حساسیت نقطه کار به حرارت بسیار کم می‌شود. علت این امر را در ادامه مطالعه خواهید کرد.



حلقه ورودی

تحلیلی محاسباتی:

گام اول: در حلقه ورودی که در شکل زیر نشان داده شده است، قانون kvl را می‌نویسیم.

$$\text{KVL ورودی: } -V_{CC} + R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E = 0$$

از آنجایی که $I_E = (\beta + 1)I_B$ می‌باشد، رابطه kvl به صورت زیر به دست می‌آید.

$$-V_{CC} + R_B I_B + V_{BE} + R_E (\beta + 1) I_B = 0$$

اکنون از I_B فاکتور می‌گیریم

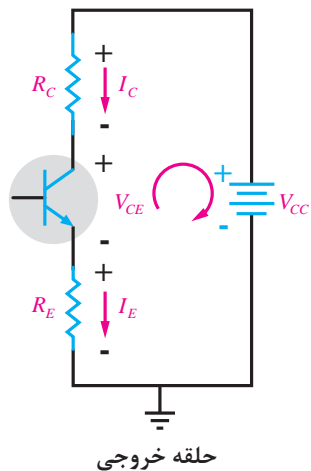
$$I_B (R_B + (\beta + 1)R_E) = V_{CC} - V_{BE} \quad \Rightarrow \quad I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E}$$

گام دوم: I_E و I_C با استفاده از روابط ۱-۵ و ۱-۶ محاسبه می‌شوند.

$$I_C = \beta I_B \quad \text{و} \quad I_E = (\beta + 1) I_B$$

گام سوم: با نوشتن kvl در حلقه خروجی می توانیم مقدار V_{CE} را حساب کنیم.

$$\text{KVL خروجی: } -V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C - R_E I_E$$



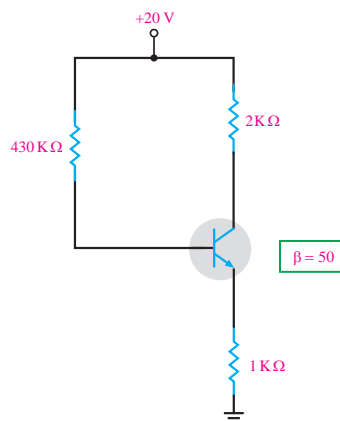
گام چهارم: محاسبه V_C و V_E ، V_B توسط روابط زیر انجام می شود.

$$V_E = R_E I_E$$

$$V_B = V_{BE} + V_E$$

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C$$

مثال ۳: مقادیر نقطه کار I_C و V_{CE} چقدر است؟



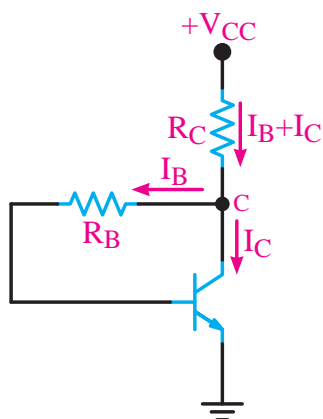
بایاس ثابت با مقاومت امیتر

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} = \frac{20 - 0.7}{430\text{K} + (51)1\text{K}} = \frac{19.3}{481\text{K}} \cong 0.04\text{mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 50 \times 0.04 = 2\text{mA}$$

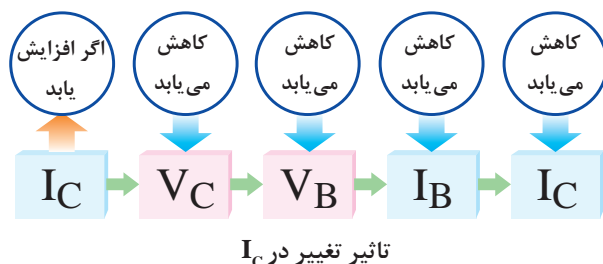
$$I_E \cong I_C = 2\text{mA}$$

$$\text{KVL خروجی: } V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C - R_E I_E = 20 - (2\text{k} \times 2\text{m}) - (1\text{k} \times 2\text{m}) = 14\text{V} \quad V_{CE} = 14$$



بایاس خودکار (بایاس فیدبک کلکتور)

بایاس خودکار (بایاس فیدبک کلکتور): در مدار شکل زیر نقطه کار تا حد زیادی به مقدار β ی ترانزیستور وابسته است و با تغییر β ، نقطه کار جابه‌جا می‌شود. برای اینکه مدار فوق روبه‌رو در برابر تغییرات β ثابت بیشتری داشته باشد، می‌توانیم به‌جای آنکه تغذیه بیس ترانزیستور را مستقیماً از V_{CC} تأمین کنیم، طبق شکل روبه‌رو ولتاژ تغذیه بیس را از کلکتور ترانزیستور دریافت نماییم. به‌این ترتیب، با افزایش مقدار جریان I_C ، ولتاژ کلکتور کاهش می‌یابد. با کاهش ولتاژ کلکتور، ولتاژ بیس کم می‌شود و جریان بیس را کاهش می‌دهد. بنابراین هرگونه تغییر در I_C ، اثر معکوس روی جریان I_B می‌گذارد.



تأثیر تغییر در I_C

تحلیل محاسباتی

گام اول: با نوشتن kvl در حلقه ورودی و همچنین با جای‌گذاری رابطه $I_E = (\beta + 1)I_B$ در kvl می‌توانیم جریان I_B را به‌دست آوریم.

$$I_E = I_B + I_C$$

$$\text{KVL ورودی: } -V_{CC} + R_C I_E + R_B I_B + V_{BE} = 0$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B \quad \text{از طرفی } R_C (\beta + 1)I_B + R_B I_B - V_{CC} - V_{BE} = 0$$

اگر از فاکتور بگیریم

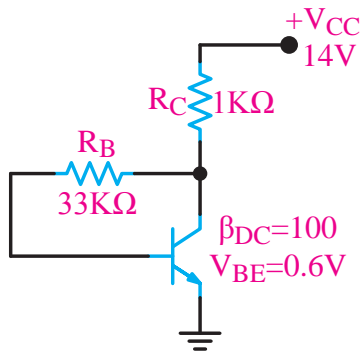
$$I_B ((\beta + 1) R_C + R_B) = V_{CC} - V_{BE} \Rightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{(\beta + 1) R_C + R_B}$$

گام دوم: با استفاده از روابط زیر مقدار I_C و I_E را حساب کنید.

$$I_C = \beta I_B \quad I_E = (\beta + 1) I_B$$

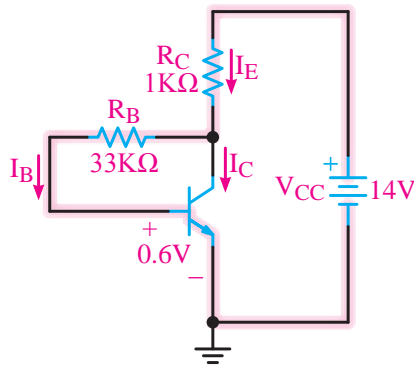
گام سوم: با نوشتن kvl در حلقه خروجی مقدار V_{CE} نقطه کار محاسبه می‌شود.

$$\text{KVL خروجی: } -V_{CC} + R_C I_E + V_{CE} = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C I_E$$



بایاس خودکار (بایاس فیدبک کلکتور)

مثال ۴: با توجه به شکل زیر و مقادیر داده شده در مدار، I_C و V_{CE} را محاسبه کنید.



بایاس خودکار (بایاس فیدبک کلکتور)

پاسخ: با توجه به اینکه $I_C = \beta I_B$ و $I_E = (1 + \beta) I_B$ است، جریان امیتر ترانزیستور بر حسب I_B محاسبه می‌گردد.

با نوشتن معادله KVL در حلقه نشان داده شده در شکل روبه‌رو، I_B به دست می‌آید.

$$I_C = 100 I_B \quad I_E = 101 I_B$$

$$-V_{CC} + R_C I_E + R_B I_B + V_{BE} = 0$$

$$-14 + 1(101 I_B) + 33 I_B + 0.6 = 0$$

$$134 I_B = 14 - 0.6 = 13.4$$

$$I_B = \frac{13.4}{134} = 0.1 \text{ mA}$$

محاسبه جریان I_C و I_B بر حسب I_B :

معادله KVL در حلقه خروجی و ورودی:

جایگزینی اعداد در معادله و محاسبه I_B

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0.1 = 10 \text{ mA}$$

محاسبه I_C :

$$I_E = I_C + I_B = 10.1 \text{ mA}$$

محاسبه I_E :

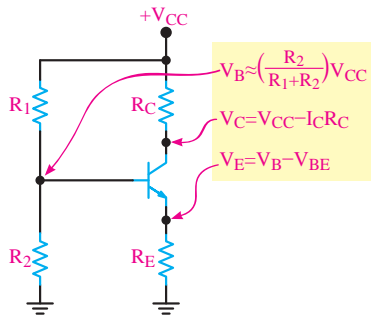
$$V_{CE} - V_{CC} + R_C I_E + V_{CE} = 0$$

معادله KVL در حلقه خروجی برای محاسبه

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_E \quad V_{CE} = 14 - (1)(10.1) = 3.9 \text{ V}$$

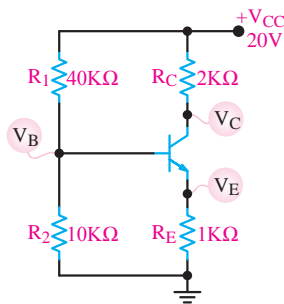
محاسبه V_{CE}





بایاس مقسم ولتاژ یا تغذیه سرخود

بایاس مقسم ولتاژ یا تغذیه سرخود: در این مدار نقطه کار ترانزیستور در حد قابل قبول تثبیت شده است. و در شرایط خاص تا حدودی مستقل از β ی ترانزیستور است. در این مدار مقاومت‌های تقسیم‌کننده R_1 و R_2 ولتاژ تغذیه بیس ترانزیستور را تأمین می‌کند. و برای آنکه V_B تقریباً ثابت بماند، باید مقدار جریان I_B در مقایسه با مقدار جریان I_E قابل چشم‌پوشی باشد.



بایاس مقسم ولتاژ یا تغذیه سرخود

مثال ۵: در شکل زیر با فرض $I_E = I_C$ ولتاژ پایه‌ها و جریان پایه‌های ترانزیستور را محاسبه کنید. ($V_{BE} = 0.7$ ولت)

$$V_B = \frac{V_{CC} R_2}{R_1 + R_2}$$

پاسخ: محاسبه V_B بر اساس تقسیم ولتاژ V_{CC} روی مقاومت‌های R_1 و R_2

$$V_B = \frac{20 \times 10}{10 + 40} = 4V$$

محاسبه V_E :

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

$$V_E = (4) - (0.7) = 3.3V$$

محاسبه I_E :

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{3.3}{1K} = 3.3mA$$

محاسبه I_C :

$$I_C = I_E = 3.3mA$$

محاسبه V_C :

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C \quad V_C = 20 - (2 \times 3.3) \quad V_C = 13.4V$$

در این فیلم عکس‌العمل نقطه کار ترانزیستور نسبت به دما در بایاس‌های مختلف باهم مقایسه می‌شوند.

بخش فیلم

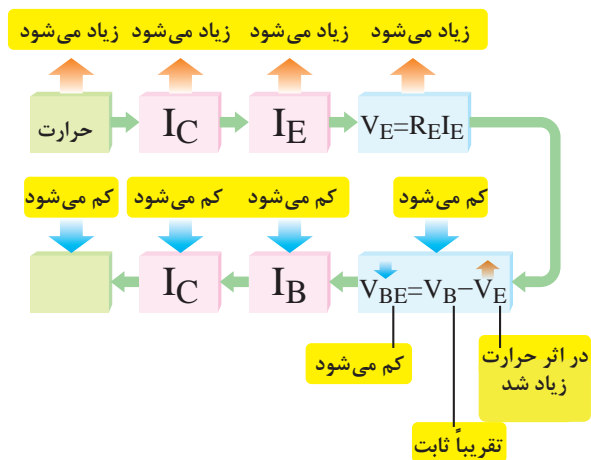


چگونگی تثبیت نقطه کار توسط R_E می‌دانیم اگر نقطه کار تقویت‌کننده ترانزیستوری تغییر کند، منجر به تغییر سایر مشخصات تقویت‌کننده نیز می‌شود. افزایش حرارت و افزایش جریان ناشی از مواردی است که تغییر آن باعث جابه‌جایی نقطه کار می‌شود. در این حالت جریان I_C افزایش می‌یابد. از طرفی می‌دانیم I_C تقریباً برابر I_E است. لذا افزایش I_C ، جریان I_E را نیز زیاد می‌کند. با زیاد شدن I_E افت ولتاژ دو سر R_E نیز زیاد

می‌شود. زیرا داریم $(V_E = R_E I_E)$ از سوی دیگر مقدار V_{BE} از رابطه $V_{BE} = V_B - V_E$ به دست می‌آید. مقدار V_B تقریباً ثابت است و از این رابطه به دست می‌آید:

$$V_B = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

در رابطه V_{BE} ، چون V_B ثابت است و V_E زیاد شده است بنابراین V_{BE} کم می‌شود. کم شدن V_{BE} مقدار I_B را کاهش می‌دهد و هدایت ترانزیستور را کم می‌کند. کم شدن I_B در نهایت موجب کاهش I_C و حرارت می‌شود. به این ترتیب نقطه کار ترانزیستور به نقطه تعریف شده اولیه خود برمی‌گردد. این تغییرات را می‌توان به صورت روبه‌رو نشان داد:



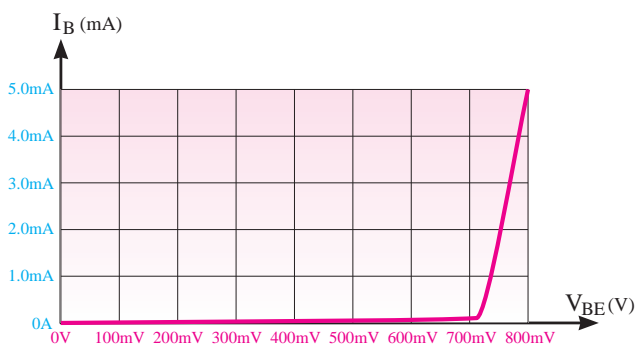
چگونگی تثبیت نقطه کار توسط RE

منحنی مشخصه های ترانزیستور

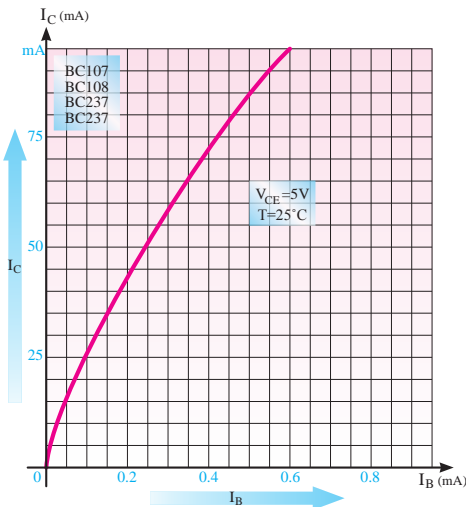
روابط بین جریان‌ها و ولتاژها و تغییرات آنها در ترانزیستور و همچنین ضریب تقویت به عامل‌هایی چون درجه حرارت، فرکانس و..... بستگی دارد. بنابراین رابطه ولتاژها و جریان‌های ترانزیستور تابع یک معادله خطی ریاضی نیست. لذا برای به دست آوردن این رابطه‌ها از منحنی‌هایی، که بیان‌کننده رابطه بین جریان‌ها و ولتاژها است استفاده می‌شود. این منحنی‌ها عبارتند از: الف) منحنی مشخصه ورودی (ب) منحنی مشخصه انتقالی (ج) منحنی مشخصه خروجی.

منحنی مشخصه ورودی: منحنی مشخصه ورودی ترانزیستور بیان‌کننده مقدار جریان ورودی I_B بر حسب ولتاژ ورودی V_{BE} است. همان‌طوری که مدار ورودی شبیه یک دیود است منحنی مشخصه آن نیز شبیه منحنی مشخصه ولت - آمپر دیود معمولی است. باید توجه داشت که در ترانزیستور منحنی مشخصه ورودی به ازای یک ولتاژ معین V_{CE} رسم می‌شود. اگر V_{CE} تغییر کند منحنی مشخصه نیز کمی تغییر می‌کند.

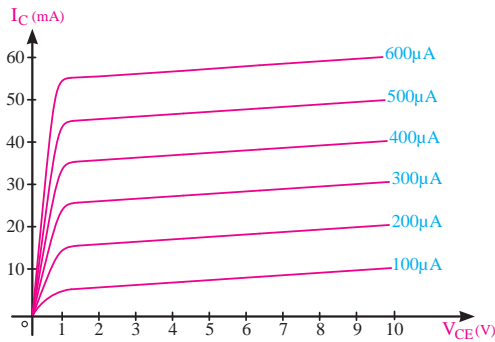
البته این تغییرات بسیار جزئی است و در اکثر موارد می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. مقدار ولتاژ V_{CE} را، که به‌ازای آن منحنی مشخصه ورودی رسم شده است، کارخانه سازنده مشخص می‌نماید. در شکل روبه‌رو، منحنی مشخصه ورودی ترانزیستوری از جنس سیلیسیم رسم



منحنی مشخصه ورودی ترانزیستوری از جنس سیلیسیم



منحنی مشخصه انتقالی



منحنی مشخصه خروجی

شده است.

منحنی مشخصه انتقالی: منحنی مشخصه انتقالی، رابطه بین جریان ورودی I_B و خروجی I_C ترانزیستور را به ازای مقادیر ثابت V_{CE} نشان می‌دهد. شکل روبه‌رو منحنی مشخصه انتقالی ترانزیستور BC107 را به ازای $V_{CE} = 5V$ نشان می‌دهد. چون ضریب تقویت جریان، برابر نسبت جریان خروجی به ورودی است، لذا از این منحنی می‌توان ضریب تقویت جریان را به دست آورد. ضریب تقویت جریان را با β نشان می‌دهند. مقدار β بستگی به مشخصات فیزیکی و ساخت ترانزیستور دارد.

$$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B} = \text{جریان خروجی}$$

جریان ورودی

منحنی مشخصه خروجی: منحنی مشخصه خروجی رابطه بین جریان I_C و ولتاژ خروجی V_{CE} به ازای جریان ورودی I_B معین را نشان می‌دهد. شکل روبه‌رو منحنی مشخصه‌های خروجی ترانزیستور را به ازای جریان‌های I_B ثابت نشان می‌دهد.

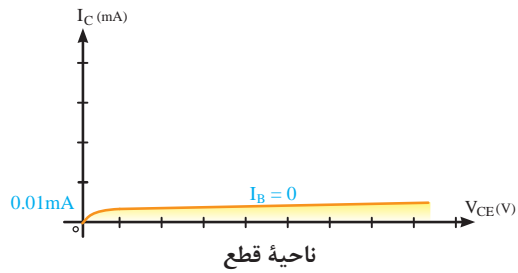
مقدار جریان خروجی تابع دو عامل I_B و V_{CE} است. یعنی با کم و زیاد شدن I_B جریان خروجی I_C نیز کم یا زیاد می‌شود. این مطلب در مورد V_{CE} نیز صادق است، لیکن تأثیر تغییرات V_{CE} بر I_C ناچیز و در مواردی غیرقابل توجه است. منحنی مشخصه خروجی ترانزیستور، شامل ۳ ناحیه قطع، فعال و اشباع است.

نواحی کار ترانزیستور

الف) ناحیه قطع: ناحیه‌ای است که جریان بیس، صفر و ترانزیستور هنوز به آستانه هدایت نرسیده است. لذا دارای مقادیر زیر است:

$$\begin{aligned} I_B &= 0 \\ \text{ناحیه قطع} \quad I_C &= 0 \\ V_{CE} &\approx V_{CC} \end{aligned}$$

شکل زیر ناحیه قطع را روی منحنی مشخصه خروجی نشان می‌دهد.



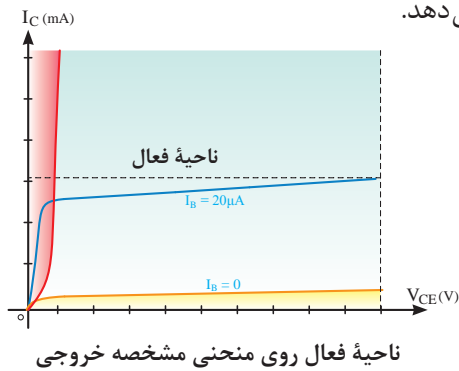
ب) ناحیه فعال: در این ناحیه، ترانزیستور در حال هدایت است و با تغییرات زیاد V_{CE} تغییرات جریان کلکتور کم است. (جریان بیس ثابت است) لذا این ناحیه دارای مشخصات زیر است:

$$I_B \neq 0$$

$$\text{ناحیه فعال } I_C \neq 0$$

$$V_{CE} \neq 0$$

شکل زیر ناحیه فعال را روی منحنی مشخصه خروجی نشان می‌دهد.



ناحیه فعال روی منحنی مشخصه خروجی

ج) ناحیه اشباع: ناحیه‌ای است که ترانزیستور در حال هدایت است، ولی با تغییر جزئی V_{CE} (کسری از ولت) تغییرات بسیار زیادی در جریان کلکتور مشاهده می‌شود. لذا دارای مشخصات زیر است.

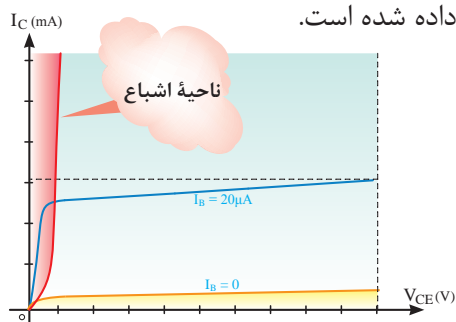
$$I_B \neq 0$$

$$\text{ناحیه اشباع } I_C \neq 0 \text{ تقریباً حداکثر}$$

$$V_{CE} \neq 0 \text{ تقریباً حداقل}$$

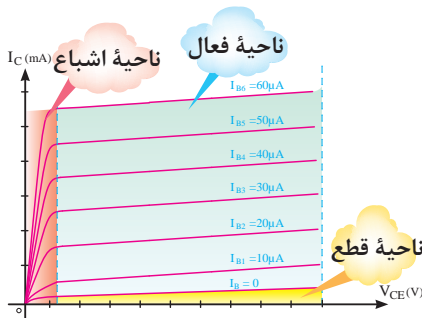
$$V_{CE} \cong 0.2V$$

در شکل زیر ناحیه اشباع روی منحنی مشخصه، خروجی نشان داده شده است.



ناحیه اشباع در روی منحنی مشخصه خروجی

در شکل زیر سه ناحیه کار ترانزیستور نشان داده شده است.



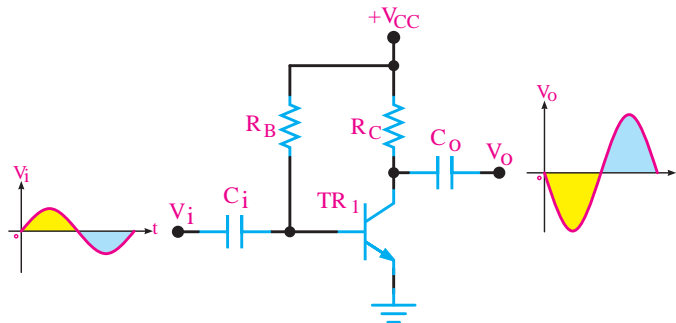
سه ناحیه کار روی منحنی مشخصه خروجی

چگونگی عمل تقویت کنندگی در ترانزیستور

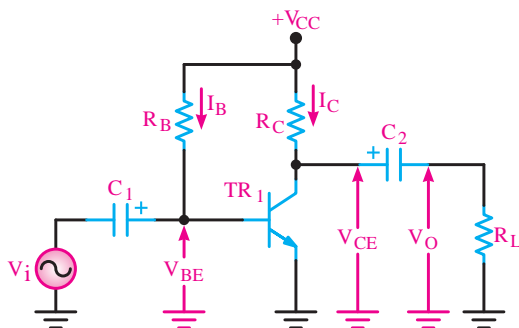
برای اینکه بتوانیم یک سیگنال الکتریکی را از لحاظ دامنه ولتاژ یا جریان، تقویت نماییم، باید ابتدا تقویت کننده را از نظر ولتاژ DC (یکی از انواع مدارات بایاس) تغذیه نماییم، سپس سیگنال را به ورودی وصل کنیم و از خروجی تقویت کننده، سیگنال تقویت شده را دریافت نماییم. اگر ضریب تقویت ولتاژ را با A_V نشان دهیم، رابطه A_V برابر است با:

$$A_V = \frac{\text{دامنه سیگنال خروجی}}{\text{دامنه سیگنال ورودی}} = \frac{V_O}{V_i}$$

شکل زیر مدار یک تقویت کننده ساده را با تغذیه ثابت نشان می دهد.

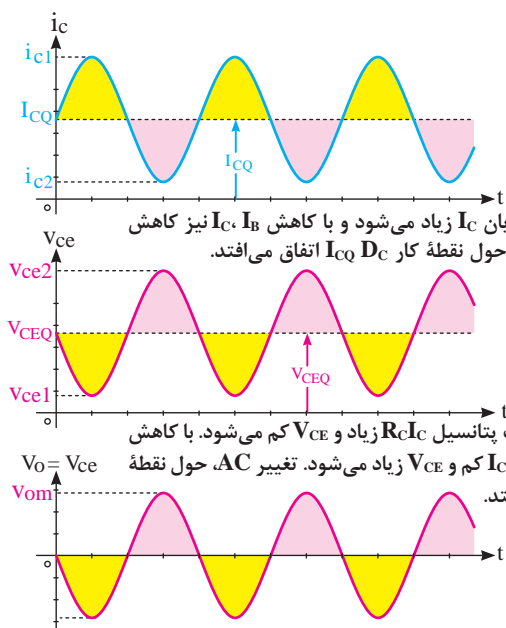


مدار یک تقویت کننده ساده



مدار یک تقویت کننده نمونه

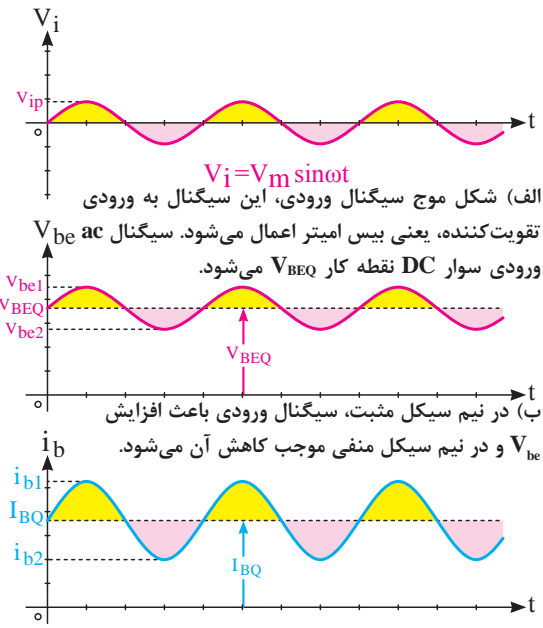
در مدار فوق C_i خازن کوپلاژ نام دارد و مانع عبور سیگنال DC است و فقط سیگنال AC ورودی را به بیس ترانزیستور اعمال می کند. C_o نیز خازن کوپلاژ است و مانع عبور سیگنال DC به بار می شود و فقط سیگنال AC از آن عبور می نماید. نحوه تقویت سیگنال متناوب ورودی در شکل های الف تا ج تشریح شده است.



ت) با افزایش I_B جریان I_C زیاد می شود و با کاهش I_B ، I_C نیز کاهش می یابد. تغییرات I_C حول نقطه کار I_{CQ} اتفاق می افتد.

ث) با افزایش I_C افت پتانسیل $R_C I_C$ زیاد و V_{CE} کم می شود. با کاهش I_C ، افت پتانسیل $R_C I_C$ کم و V_{CE} زیاد می شود. تغییر AC ، حول نقطه کار V_{CEQ} اتفاق می افتد.

ج) خازن C_T مؤلفه D_C سیگنال کلکتور را حذف می کند و فقط سیگنال ac به بار می رسد. مشاهده می شود تغییرات سیگنال AC در دو سر بار نسبت به سیگنال ورودی بسیار بیشتر است و سیگنال در خروجی تقویت شده است.



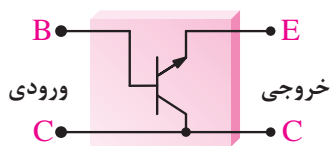
الف) شکل موج سیگنال ورودی، این سیگنال به ورودی تقویت کننده، یعنی بیس امیتر اعمال می شود. سیگنال ac ورودی سوار DC نقطه کار V_{BEQ} می شود.

ب) در نیم سیکل مثبت، سیگنال ورودی باعث افزایش V_{be} و در نیم سیکل منفی موجب کاهش آن می شود.

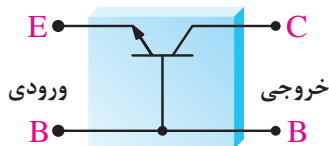
پ) شکل موج جریان بیس، افزایش ولتاژ دو سر پیوند بیس - امیتر موجب افزایش جریان بیس می شود و کاهش این ولتاژ، کاهش جریان بیس را به دنبال دارد. تغییرات I_B حول نقطه کار I_{BQ} اتفاق می افتد.

آرایش های تقویت کننده ترانزیستوری

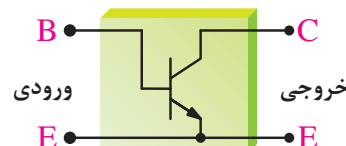
در تقویت کننده های ترانزیستوری همیشه سیگنال ورودی به دو پایه از سه پایه ترانزیستور داده می شود و سیگنال خروجی از دو پایه آن گرفته می شود به طوری که یکی از پایه ها بین ورودی و خروجی، مشترک است. لذا با توجه به پایه مشترک، نام آرایش انتخاب می شود.



آرایش کلکتور مشترک



آرایش بیس مشترک



آرایش امیتر مشترک

تقویت کننده کلاس A: برحسب اینکه یک تقویت کننده در چه کسری از یک پریود کامل (T) فعال باشد، آن را در یکی از کلاس های A، B، AB یا C جای می دهند. به تقویت کننده هایی که تمام موج ورودی را به طور کامل عبور می دهند، تقویت کننده های کلاس A می گویند. یک تقویت کننده کلاس A همواره در ناحیه فعال کار می کند. تقویت کننده هایی که در ادامه می آیند نیز کلاس A هستند.

پخش فیلم

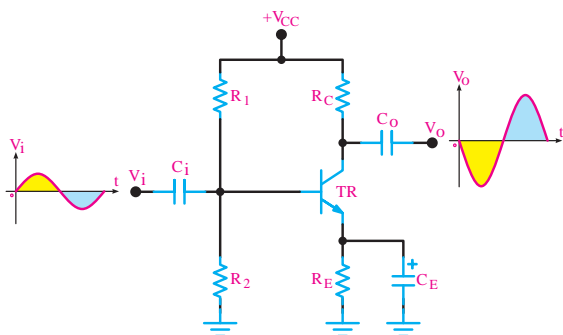


در این فیلم ساخت، یک تقویت کننده صوتی امیتر مشترک پخش می شود.

پخش فیلم



در این فیلم شبیه سازی تقویت کننده امیتر مشترک پخش می شود.



تقویت کننده امیتر مشترک

تحلیل تقویت کننده امیتر مشترک (CE):

تقویت کننده امیتر مشترک، بیشترین کاربرد در انواع تقویت کننده ها را دارد. تقویت کننده امیتر مشترک علاوه بر تقویت جریان، تقویت ولتاژ را نیز انجام می دهد و به همین دلیل، در بسیاری از موارد، نسبت به تقویت کننده های دیگر برتری دارد. مدار زیر یک تقویت کننده ساده صوتی عملی با آرایش امیتر مشترک را نشان می دهد. مدار بایاس این تقویت کننده از نوع خودکار است. در مدار شکل زیر یک تقویت کننده امیتر مشترک با بایاس سرخود را مشاهده می کنید.

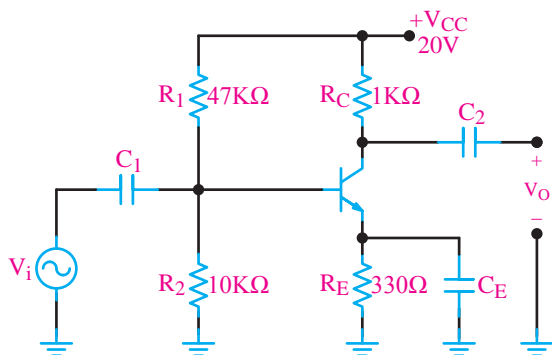
این تقویت کننده هم جریان و هم ولتاژ را تقویت می کند. بنابراین از این مدار می توان در تقویت کننده های انتهایی، میانی و ابتدایی مدارهای الکترونیکی استفاده کرد. پهنای باند تقویت کننده امیتر مشترک نسبتاً خوب است. همچنین بین ولتاژ ورودی و خروجی این نوع تقویت کننده 180° درجه اختلاف فاز به وجود می آید. خازن های C_i و C_o در مدار نیز خازن کوپلاژ است. همان طوری که ملاحظه شد R_E باعث پایداری حرارتی نقطه کار در مدار می شود. بنابراین برای پایداری نقطه کار وجود R_E ضروری و اجتناب ناپذیر است. از طرفی وجود R_E باعث کاهش بهره A_V در مدار می شود، زیرا ولتاژ AC دوسر R_E افت می کند. برای خنثی سازی اثر R_E در مقابل سیگنال ac خازنی C_E را به دوسر R_E متصل می کنند. این خازن یک **خازن بای پاس** است که هنگام عبور سیگنال AC به صورت اتصال کوتاه عمل می کند و اثر مقاومت R_E را از بین می برد به بیانی دیگر سیگنال AC بر روی مقاومت R_E تلف نمی شود.

تعیین مقدار ظرفیت خازن بای پاس: برای آنکه خازن بای پاس بتواند در مقابل سیگنال ac به صورت اتصال کوتاه عمل کند، باید ظرفیت آن را بزرگ انتخاب کنند. برای تعیین مقدار ظرفیت خازن ابتدا رابطه مقدار مقاومت ظاهری خازن X_C را برای کمترین فرکانس ورودی حساب می کنیم.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_{\min} C}$$

سپس X_C را برابر $\frac{X_C}{10}$ قرار می دهند سپس مقدار C را محاسبه می کنند:

$$X_C = \frac{R_E}{10} = \frac{1}{2\pi f_{\min} C}$$



تقویت کننده امیتر مشترک

مثال ۶: در تقویت کننده شکل زیر اگر فرکانس سیگنال متناوب ورودی از ۵۰۰ هرتز تا ۷ کیلوهرتز تغییر کند ظرفیت خازن C_E را چقدر انتخاب کنیم تا R_E در مقابل سیگنال ac به درستی بای پاس شود؟

پاسخ:

محاسبه مقاومت خازن

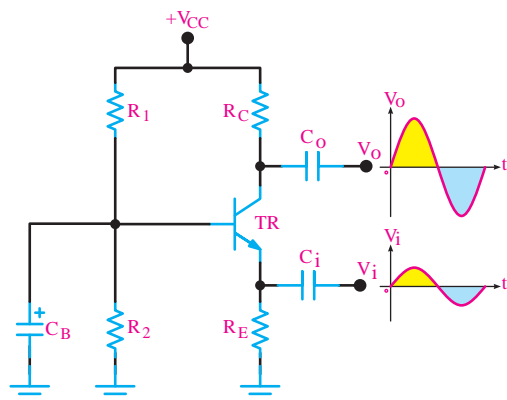
$$X_C = \frac{1}{2\pi f_{\min} C} \quad X_C = \frac{R_E}{10} = \frac{330}{10} = 33\Omega$$

محاسبه C_E :

$$\frac{1}{2\pi f_{\min} C_E} = \frac{R_E}{10} = 33\Omega \quad C_E = \frac{1}{2\pi(500)(33)} \text{ F} \quad C_E = 9/65 \mu\text{F} = 10 \mu\text{F}$$

شبیه سازی تقویت کننده بیس مشترک

پخش فیلم



تقویت کننده بیس مشترک

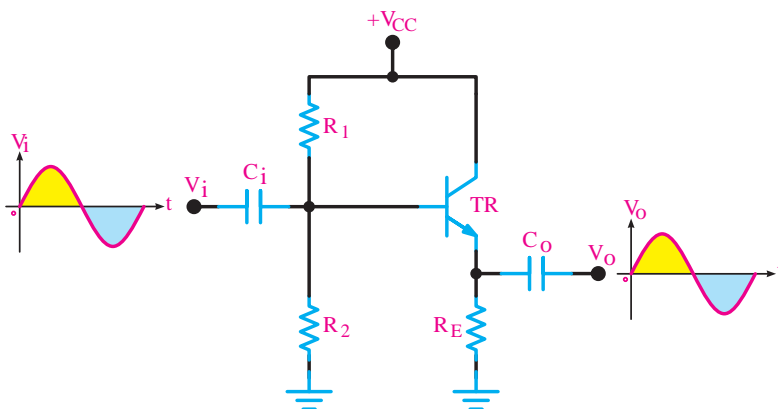
تحلیل تقویت کننده بیس مشترک: در این آرایش سیگنال متناوب ورودی به امیتر اتصال داده می شود و سیگنال خروجی از کلکتور دریافت می شود. پایه بیس بین ورودی و خروجی مشترک است. خازن های C_i و C_o در مدار نیز خازن کوپلاژ و C_B خازن بای پاس است. تقویت کننده بیس مشترک یک تقویت کننده ولتاژ است و بهره ولتاژ آن زیاد است و باند فرکانسی وسیع تری نسبت به تقویت کننده امیتر مشترک دارد. در این آرایش ولتاژهای ورودی و خروجی هم فاز هستند.

شبیه سازی تقویت کننده کلکتور مشترک

پخش فیلم



تحلیل تقویت کننده کلکتور مشترک: در این آرایش سیگنال متناوب ورودی به بیس اتصال داده می شود و سیگنال خروجی از امیتر دریافت می شود. به این ترتیب پایه کلکتور پایه مشترک بین ورودی و خروجی است. شکل زیر این آرایش را نشان می دهد. این تقویت کننده دارای بهره ولتاژ کم و بهره جریان زیاد است و فقط سیگنال AC را از لحاظ جریانی تقویت می کند. از این تقویت کننده به عنوان تقویت کننده جریان در رگولاتورها و تقویت کننده های صوتی استفاده می شود. از این تقویت کننده به عنوان تطبیق دهنده امپدانس بین دو طبقه تقویت کننده استفاده می شود.



تقویت کننده کلکتور مشترک

مقایسه سه آرایش از لحاظ بهره تقویت کننده: در جدول زیر بهره ولتاژ این سه نوع تقویت کننده در شرایط یکسان بایاس با هم مقایسه شده است.

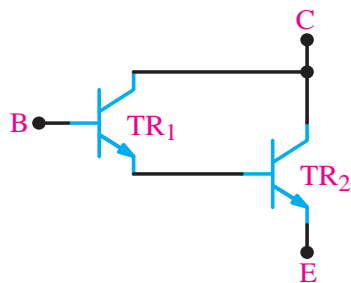
بهره جریان A_I	بهره ولتاژ A_V	نوع آرایش
متوسط	متوسط	امیتر مشترک CE
کم و کوچک تر از ۱	زیاد	بیس مشترک CB
زیاد	کم و کوچک تر از ۱	کلکتور مشترک CC

مقایسه سه تقویت کننده

شبه سازی زوج دارلینگتون

پخش فیلم



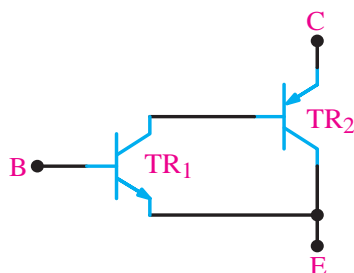


زوج دارلینگتون NPN

زوج دارلینگتون **Darlington Pair**: یک نمونه از تقویت کننده‌های دوطبقه زوج دارلینگتون است که در شکل روبه‌رو نشان داده شده است. از آنجا که ترانزیستورهای قدرت اغلب دارای β ی کوچکی هستند، برای به دست آوردن β ی بزرگتر، و تقویت جریان بیشتر از ترانزیستورهای زوج دارلینگتون استفاده می‌شود.

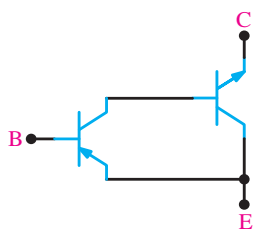
اگر ضریب تقویت جریان ترانزیستور TR_1 را β_1 و ضریب تقویت جریان ترانزیستور TR_2 را β_2 فرض کنیم، ضریب تقویت جریان زوج دارلینگتون از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\beta_T = \beta_1 \cdot \beta_2$$

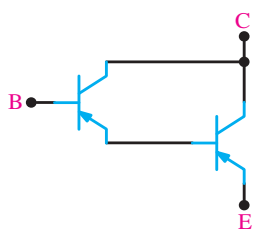


معادل زوج دارلینگتون NPN

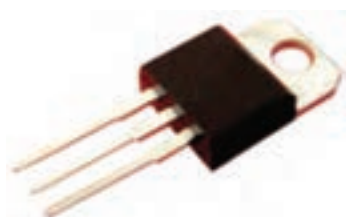
در شکل زیر زوج دارلینگتون از دو ترانزیستور NPN تشکیل شده است. همچنین مطابق شکل زیر ترانزیستور زوج دارلینگتون NPN را می‌توان به کمک یک ترانزیستور NPN و یک ترانزیستور PNP نیز ایجاد کرد.



زوج دارلینگتون PNP و معادل آن



همچنین زوج دارلینگتون PNP ممکن است از دو ترانزیستور PNP و یا با استفاده از یک ترانزیستور PNP و یک ترانزیستور NPN تشکیل شده باشد. شکل زیر زوج دارلینگتون PNP با دو ترانزیستور PNP و معادل آن با یک ترانزیستور PNP و یک ترانزیستور NPN را نشان می‌دهد.

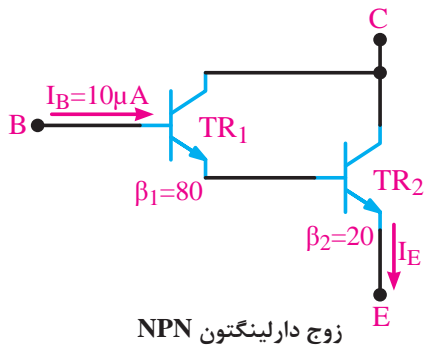


زوج دارلینگتون در یک بسته بندی

زوج دارلینگتون را در یک بسته بندی و مشابه ترانزیستورهای ساده نیز به بازار عرضه می‌کنند. برای نمونه سری ترانزیستورهای **2N6383** , **2N6384** , **2N6385** به صورت ترکیب دارلینگتون هستند. این ترانزیستورها به صورت NPN با β نزدیک به ۳۰۰۰ و قدرتی برابر ۱۰۰ وات ساخته می‌شوند. در شکل روبه‌رو ترانزیستور زوج دارلینگتون در یک بسته بندی نشان داده شده است.

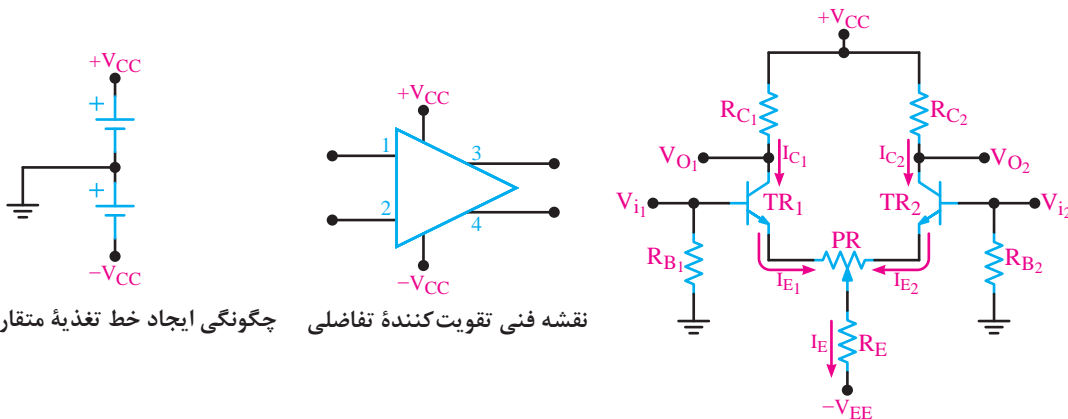


با توجه به مدار زیر جریان I_E دارلینگتون چند میلی آمپر است؟



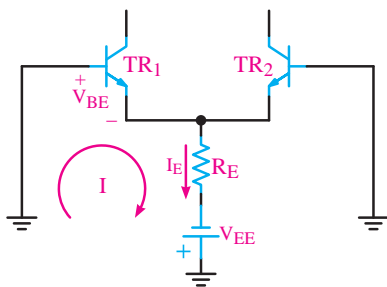
زوج دارلینگتون NPN

تقویت کننده تفاضلی: در تقویت کننده‌های معمولی مانند امیتر مشترک با انتخاب R_E و بای پاس نمودن آن توسط خازن، می‌توان به ضریب تقویت کافی و پایداری حرارتی مناسب دست یافت. ولی به دلیل وجود خازن بای پاس در این نوع تقویت کننده‌ها فرکانس‌های کم و سیگنال DC به درستی تقویت نمی‌شوند و ضریب تقویت کاهش می‌یابد. برای تقویت سیگنال‌های با فرکانس پایین و DC از تقویت کننده تفاضلی (differential amp) استفاده می‌کنیم. یکی دیگر از مشکلات تقویت کننده‌ها که تاکنون آنها را بررسی کرده‌ایم این است که توانایی تفکیک سیگنال از نویز را ندارند و هر دو را به یک اندازه تقویت می‌کنند. صورتی که تقویت کننده تفاضلی دارای قابلیت تفکیک سیگنال از نویز است. و می‌تواند نویز را تضعیف و سیگنال را تقویت کند. نقشه ساده یک تقویت کننده تفاضلی در شکل زیر رسم شده است. این مدار دارای دو ورودی V_{i1} و V_{i2} و دو خروجی V_{O1} و V_{O2} است. همچنین دو منبع تغذیه برای مدار وجود دارد. ولتاژهای $+V_{CC}$ و $-V_{EE}$ به نقاط موردنظر و سیم مشترک آن به زمین وصل شده است.



چگونگی ایجاد خط تغذیه متقارن نقشه فنی تقویت کننده تفاضلی

تقویت کننده تفاضلی



بررسی رفتار DC تقویت کننده تفاضلی: در مدار تقویت کننده تفاضلی باید قطعات هر دو نیمه مدار از نظر تعداد و مقدار یکسان باشند یعنی $TR_1 = TR_2$ ، $RC_1 = RC_2$ ، $RB_1 = RB_2$ است. با فرض تقارن کامل دو نیمه، می‌توانیم بنویسیم.

$$kVL \Rightarrow R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E - V_{EE} = 0$$

با توجه به ناچیز بودن I_B می‌توانیم از آن صرف نظر کنیم، بنابراین $R_B I_B = 0$ می‌شود پس:

$$\Rightarrow I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E}$$

به شرط تقارن مدار

$$I_{E1} = I_{E2} = I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_E}{2}$$

همچنین

$$V_{C1} = V_{C2} = V_{CC} - R_{C1} I_{C1}$$

با فرض صفر بودن I_B مقدار $V_B = 0$ می‌شود پس:

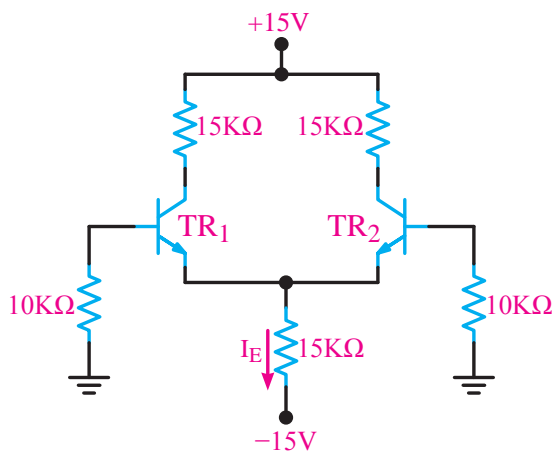
$$V_{E1} = V_{E2} = V_B - V_{BE} \Rightarrow V_{E1} - V_{E2} = 0 - V_{BE} = -V_{BE}$$

$$V_{CE1} = V_{CE2} = V_{C1} - V_{E1}$$

مثال ۷: جریان I_E و ولتاژهای V_{CE1} و V_{CE2} را محاسبه کنید. از I_B ترانزیستورها صرف نظر کنید.

$$\beta_1 = \beta_2 = 200$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} = 0.7V$$



تقویت کننده تفاضلی

$$kVL: R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E - V_{EE} = 0 \xrightarrow{R_B I_B = 0} I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E} = \frac{15 - 0.7}{15K} = 0.95mA$$

$$I_{C1} = I_{C2} = I_{E1} = I_{E2} = \frac{I_E}{2} = \frac{0.95}{2} = 0.475mA$$

$$V_{E1} = V_{E2} = V_B = V_{BE} = -0.7V$$

$$V_{C1} = V_{C2} = V_{CC} - R_{C1} I_{C1} = 15 - (15k \times 0.475mA) = 15 - 7.125 = 7.875V \Rightarrow$$

$$V_{C1} = V_{C2} = 7.875mA$$

$$V_{CE1} = V_{CE2} = V_{C1} - V_{E1} = 7.875 - (-0.7) = 8.575V$$

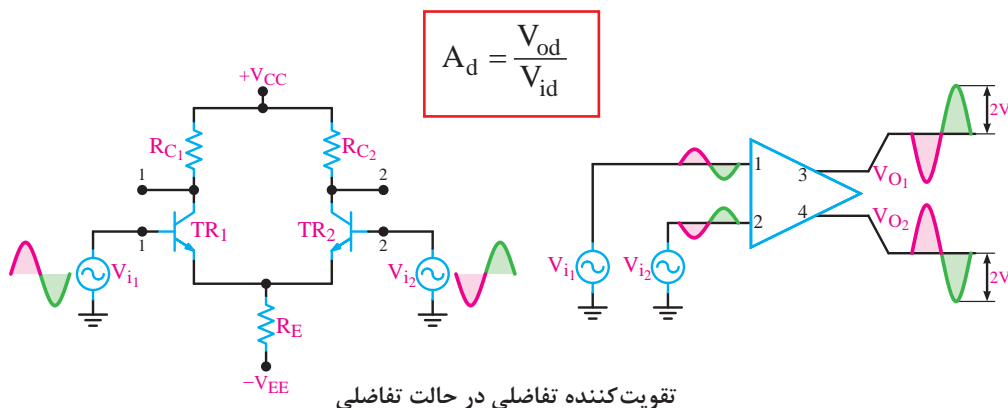
پخش فیلم



شبیه‌سازی تقویت‌کننده تفاضلی در حالت تفاضلی

بررسی رفتار AC تقویت‌کننده تفاضلی

الف) تقویت‌کننده تفاضلی در حالت تفاضلی: اگر سیگنال AC موردنظر را به صورت دو سیگنال با اختلاف فاز 180° درجه به ورودی‌های تقویت‌کننده تفاضلی اعمال کنیم این سیگنال به صورت مطلوبی تقویت می‌شود بهره ولتاژ تقویت‌کننده در این حالت از رابطه زیر به دست می‌آید.



تقویت‌کننده تفاضلی در حالت تفاضلی

پخش فیلم



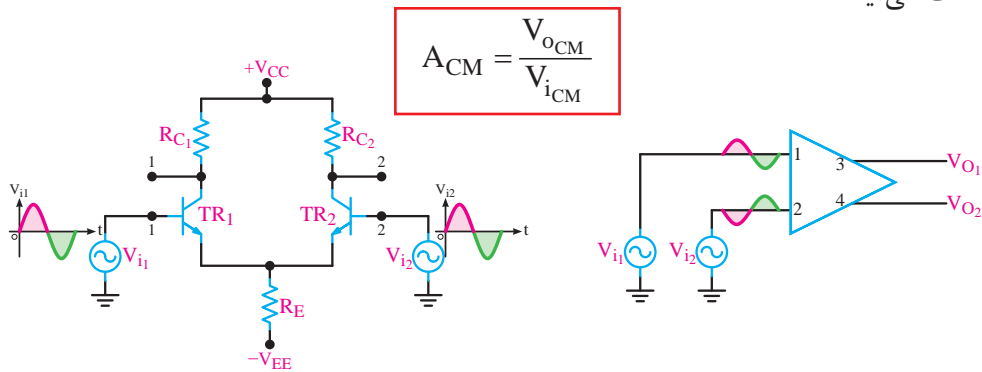
شبیه‌سازی تقویت‌کننده تفاضلی در حالت سیگنال مشترک

پخش فیلم



شبیه‌سازی تقویت‌کننده تفاضلی در حذف نویز

ب) تقویت کننده تفاضلی در حالت سیگنال مشترک: یکی از مهم ترین کاربردهای تقویت کننده تفاضلی حالت سیگنال مشترک است. در این حالت دو سیگنال با فاز، دامنه و فرکانس مساوی به دو ورودی تقویت کننده داده می شود. شکل زیر مدار تقویت کننده تفاضلی را در این حالت نشان می دهد. در این حالت سیگنال ها در خروجی اثر هم را خنثی می کنند لذا V_{O1} و V_{O2} مساوی صفر می شود. البته در حالت ایده آل خروجی صفر نمی شود ولی به شدت تضعیف می شود. تضعیف بهره ولتاژ تقویت کننده در این حالت از رابطه زیر به دست می آید.



تقویت کننده تفاضلی در حالت سیگنال مشترک

ضریب حذف سیگنال مشترک **CMRR** (Common Mode Rejection Ratio) در یک تقویت کننده تفاضلی سیگنال ورودی را به صورت تفاضلی به دو ورودی اعمال می کنیم. این سیگنال مطابق آنچه که شرح داده شد، پس از تقویت در خروجی ها ظاهر می شود. همچنین سیگنال ناخواسته (نویز یا پارازیت) روی خط های ورودی به صورت یکسان می نشیند. در این حالت تقویت کننده تفاضلی برای نویز در حالت سیگنال مشترک عمل می کند و نویز را در خروجی حذف می نماید. در عمل معمولاً بهره تفاضلی عددی بزرگ و بهره سیگنال مشترک خیلی کمتر از ۱ است. نسبت بهره تفاضلی A_d به بهره سیگنال مشترک A_{CM} را ضریب حذف سیگنال مشترک یا **CMRR** می نامند.

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{CM}}$$

مثال ۸: در یک تقویت کننده تفاضلی بهره سیگنال مشترک $0/2$ است و بهره تفاضلی 2000 است. **CMRR** را محاسبه کنید؟ مفهوم عدد به دست آمده چیست؟ شرح دهید.
پاسخ:

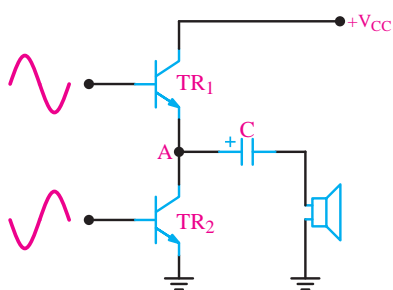
$$A_d = 2000 \quad A_{CM} = 0/2 \quad CMRR = \frac{A_d}{A_{CM}} = \frac{2000}{0/2} = 10000$$

CMRR برابر 10000 به این مفهوم است که سیگنال هدف 10000 مرتبه بیشتر از سیگنال ناخواسته (نویز) تقویت می شود.

تقویت کننده کلاس B: بازده تقویت کننده های کلاس A به علت تلفات زیادی که دارد بسیار کم است و از 50% درصد تجاوز نمی کند. تلفات زیاد توان در این تقویت کننده ها در اثر برقراری دائمی جریان کلکتور به وجود می آید، اگر ترانزیستور را در ناحیه قطع بایاس کنیم، هنگامی که سیگنال وجود ندارد، از

کلکتور ترانزیستور جریانی نمی‌گذرد بنابراین توان تلف شده در حالت سکون برابر صفر می‌شود. به این ترتیب می‌توانیم **بازده تقویت‌کننده را به ۷۸/۵ درصد افزایش دهیم**. در این حالت ترانزیستور فقط برای نیمی از یک سیکل سیگنال ورودی هدایت می‌کند و در نیم سیکل دیگر خاموش است. و در اصطلاح می‌گوییم تقویت‌کننده در کلاس B قرار دارد. از این‌رو در این تقویت‌کننده‌ها از دو ترانزیستور استفاده می‌شود تا بتوان یک سیکل کامل را تقویت کرد. کاربرد اصلی این تقویت‌کننده‌ها در تقویت‌کننده‌های صوتی است.

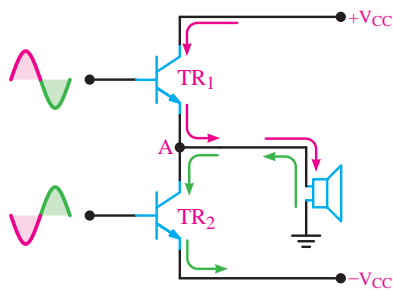
تقویت‌کننده (پوش پول): در شکل زیر مدار یک تقویت‌کننده پوش پول رسم شده است. در این مدار در حالتی که سیگنال متناوب ورودی صفر است، ترانزیستورها در حالت خاموش قرار دارند و هیچ جریانی از منبع تغذیه کشیده نمی‌شود. در اولین نیم سیکل ترانزیستور TR_1 فعال می‌شود. در این حالت جریان از TR_1 عبور می‌کند و سیگنال تقویت‌شده ورودی به بلندگو انتقال می‌یابد و در نیم سیکل دوم ترانزیستور TR_2 خاموش و ترانزیستور TR_1 روشن می‌شود. در این حالت، چون منبع تغذیه از مدار کلکتور TR_2 قطع می‌شود، تغذیه ترانزیستور TR_2 از طریق دشارژ خازن C انجام می‌گیرد.



تقویت‌کننده با منبع تغذیه ساده

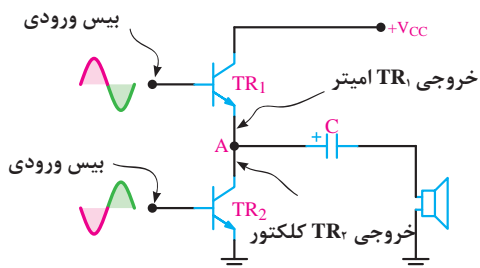
$$V_A = \frac{V_{CC}}{2}$$

تقویت‌کننده پوش پول



تقویت‌کننده با منبع تغذیه متقارن

$$V_A = 0$$



دو ترانزیستور آرایش‌های متفاوت دارند.

تقویت‌کننده پوش پول

یکی از اشکال‌های تقویت‌کننده عدم تقارن دو نیم سیکل سیگنال خروجی است زیرا TR_1 دارای آرایش کلکتور مشترک و TR_2 دارای آرایش امیتر مشترک است، وجود این دو نوع آرایش برای دونیم سیکل مثبت و منفی عدم تقارن ایجاد می‌کند.

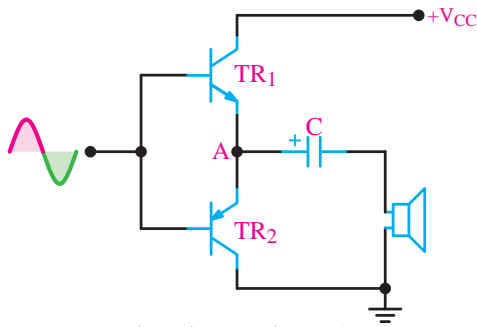
شبه‌سازی تقویت‌کننده پوش پول با ترانزیستورهای مکمل

بخش فیلم

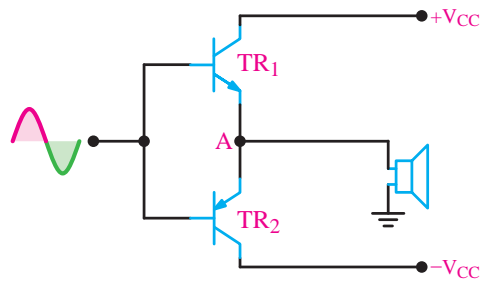


تقویت کننده پوش پول با ترانزیستورهای مکمل (Complementary): در تقویت کننده با ترانزیستورهای مکمل چون هر دو ترانزیستور به صورت کلکتور مشترک عمل می کنند، هر دو ترانزیستور مشخصات یکسانی دارند لذا سیگنال خروجی کامل متقارن است. همچنین از آنجایی که هر دو آرایش کلکتور مشترک دارند از این رو تقویت جریان را در خروجی انجام می دهند. در شکل صفحه بعد دو تقویت کننده کامپلی منتاری را با منبع تغذیه ساده و منبع تغذیه متقارن نشان داده شده است.

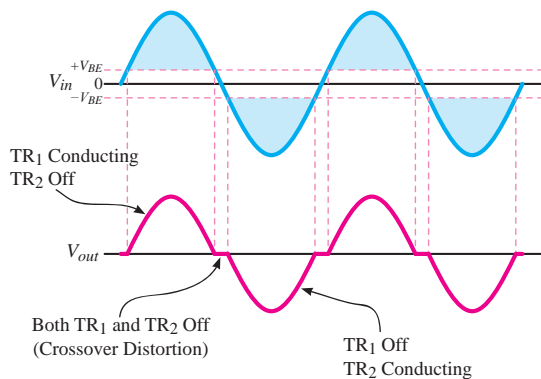
تقویت کننده پوش پول ترانزیستورهای مکمل (Complementary)



تقویت کننده با منبع تغذیه ساده



تقویت کننده با منبع تغذیه متقارن

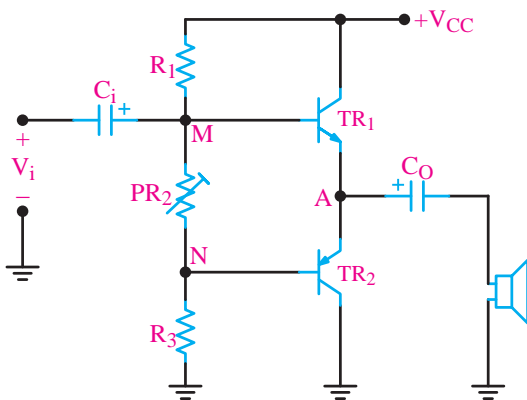


اعوجاج تقاطعی در خروجی

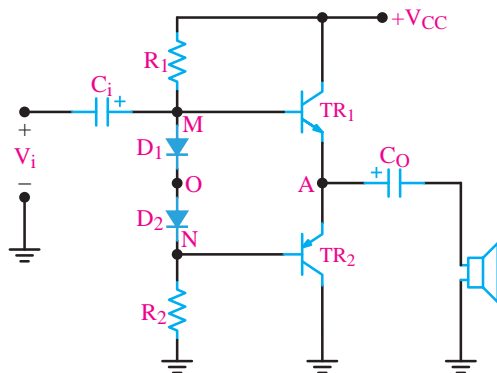
معایب پوش پول کلاس B: چون هر دو ترانزیستور در ناحیه قطع بایاس شده اند، دیود بیس امیتر ترانزیستورها باید توسط سیگنال متناوب ورودی روشن شود لذا حدود $0.7/V$ ولتاژ دامنه سیگنال ورودی برای بایاس بیس به کار می رود و تقویت نمی شود. پس در شکل موج خروجی تغییر شکل (اعوجاج) مطابق شکله وجود می آید. این تغییر شکل راه اعوجاج تقاطعی (distortion crossover) می نامند. برای برطرف کردن این عیب باید ترانزیستورها را در کلاس AB بایاس کنیم. این کار را با روش های مختلف می توانیم انجام دهیم.

قرار دادن ترانزیستورها در آستانه هدایت (کلاس AB)

با روش های مختلف می توان بیس امیتر ترانزیستورهای TR_1 و TR_2 را در آستانه هدایت یعنی 0.6 قرار دهیم. الف) استفاده از مقاومت های تقسیم کننده ولتاژ: با تنظیم PR_2 می توان پتانسیل نقاط M تا N را در حدود $1/2$ ولت تنظیم کنیم تا ترانزیستورها در آستانه هدایت قرار گیرند.

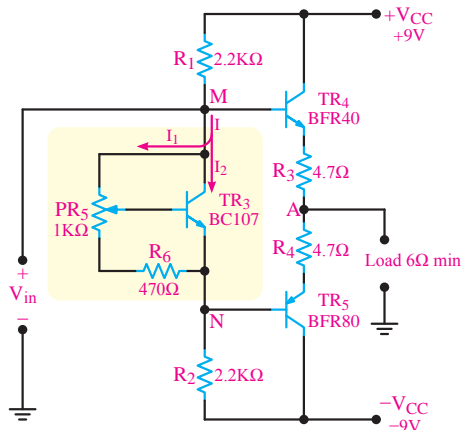


تقویت کننده پوش پول با استفاده از مقاومت های تقسیم کننده ولتاژ



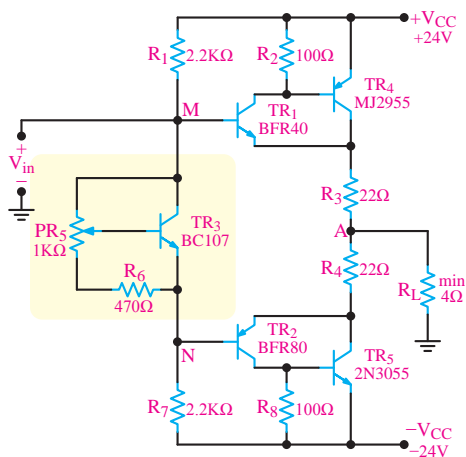
تنظیم پتانسیل MN توسط دو دیود
تقویت کننده پوش پول با استفاده از دیود

ب) استفاده از دیود: در این روش دو دیود سری بین بیس‌های دو ترانزیستور مطابق شکل روبه‌رو قرار گرفته است. در دو سر هر دیود حدود 0.6 ولت افت ولتاژ وجود دارد. به این ترتیب پتانسیل نقاط MN در حدود $1/2$ ولت تثبیت می‌شود.



رگولاتور ولتاژ موازی برای قرار دادن ترانزیستورهای مکمل در کلاس AB
تقویت کننده پوش پول با استفاده از رگولاتور ولتاژ موازی

پ) استفاده از رگولاتور موازی: مناسب‌ترین روش تأمین ولتاژ بین بیس ترانزیستورها استفاده از یک ترانزیستور دیگر به‌عنوان رگولاتور ولتاژ است. در این روبه‌رو نمونه چینی مداری را مشاهده می‌کنید. در این مدار ترانزیستور TR_3 به صورت یک تثبیت‌کننده ولتاژ عمل می‌کند و همواره اختلاف پتانسیل بین دو نقطه M و N را مساوی $1/2$ ولت ثابت نگه می‌دارد.



استفاده از زوج دارلینگتون برای افزایش قدرت تقویت کننده
تقویت کننده پوش پول با استفاده از زوج دارلینگتون

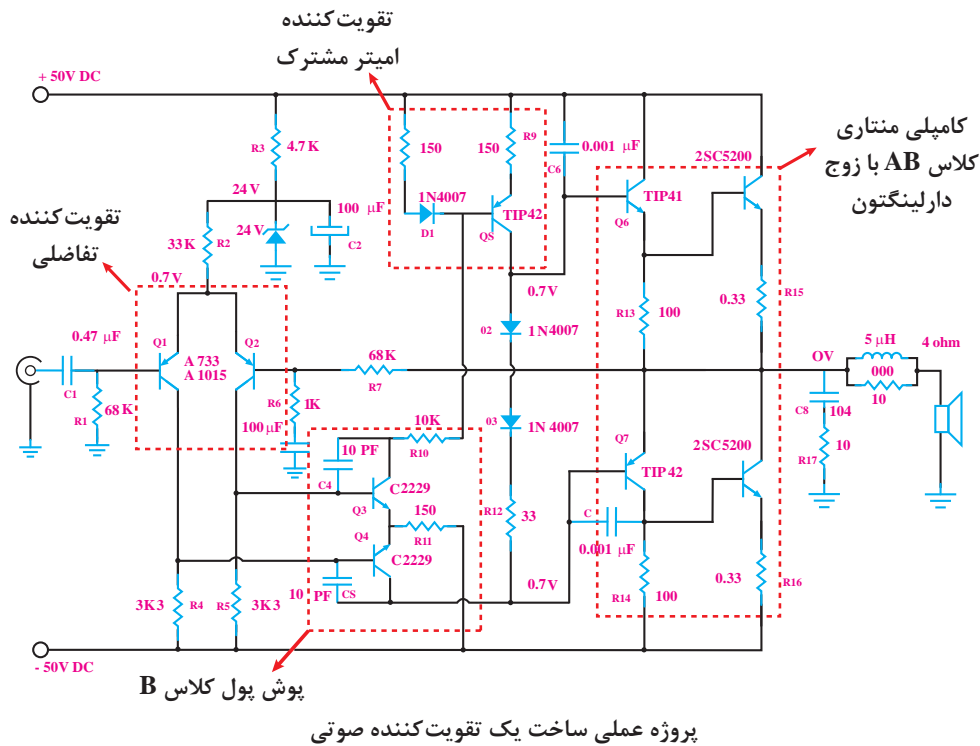
استفاده از زوج دارلینگتون برای افزایش قدرت خروجی: در صورتی که تقویت‌کننده‌ای با قدرت زیاد لازم باشد، می‌توانیم به‌جای هریک از ترانزیستورهای مکمل از یک زوج دارلینگتون استفاده کنیم. در شکل روبه‌رو یک تقویت‌کننده با زوج دارلینگتون نشان داده شده است.

ساخت یک تقویت کننده صوتی ترانزیستوری

فعالیت
عملی



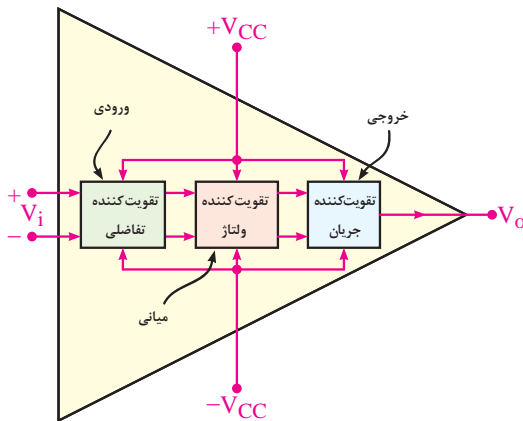
در شکل زیر مدار یک تقویت کننده صوتی عملی را مشاهده می کنید. در این مدار تقویت کننده هایی که تاکنون توضیح داده شده اند مشاهده می شود. همچنین اطلاعات تکمیلی این پروژه در لوح فشرده ضمیمه شده است.



پروژه عملی ساخت یک تقویت کننده صوتی

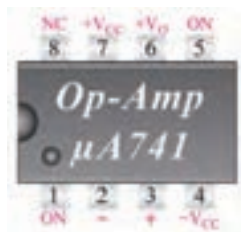
آشنایی با تقویت کننده عملیاتی (op - Amp)

تقویت کننده های عملیاتی که به اختصار (op - Amp) نامیده می شود **تقویت کننده ای با ضریب تقویت بسیار بزرگ است**. تقویت کننده های عملیاتی در سیستم های الکترونیکی کاربردهای متنوعی دارند. از نظر اقتصادی نیز ارزان قیمت اند و از مزایایی چون **ابعاد کوچک، قابلیت اطمینان بالا و پایداری حرارتی** خوب برخوردارند. تقویت کننده عملیاتی دارای دو یا چند طبقه تقویت کننده تفاضلی است که خروجی های هر طبقه به ورودی های طبقه دیگر متصل شده است. در انتهای این تقویت کننده، یک تقویت کننده جریان قرار دارد که معمولاً یک



بلوک دیاگرام داخلی تقویت کننده عملیاتی

مدار کامپلی منتاری است. این مدار جریان خروجی تقویت کننده تفاضلی آخر را تقویت می کند. خروجی تقویت کننده عملیاتی از خروجی مدار تقویت جریان دریافت می کند، همچنین ورودی های تقویت کننده عملیاتی همان ورودی های اولین تقویت کننده تفاضلی است؛ بنابراین، تقویت کننده عملیاتی دارای دو ورودی و یک خروجی است. در شکل روبه رو بلوک دیاگرام مدار داخلی op - Amp و پایه های ورودی، خروجی و تغذیه آن نشان داده شده است.



تقویت کننده عملیاتی ۷۴۱

در شکل زیر پایه‌های تقویت کننده عملیاتی با شماره ۷۴۱ را مشاهده می‌کنید. پایه‌های ۵ و ۱ ورودی‌های Offset هستند و جهت تنظیم آپ امپ استفاده می‌شوند و پایه ۸ از درون به مدار اتصال ندارد و فقط برای رعایت تقارن و استانداردسازی نصب شده است.

کاربردهای تقویت کننده عملیاتی

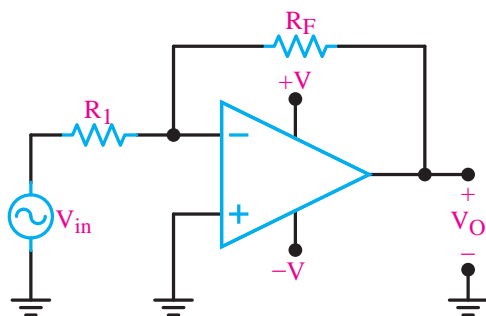
تقویت کننده‌های عملیاتی کاربردهای متنوعی دارند. در این قسمت، چند کاربرد مهم آنها را بررسی می‌کنیم.

پخش فیلم



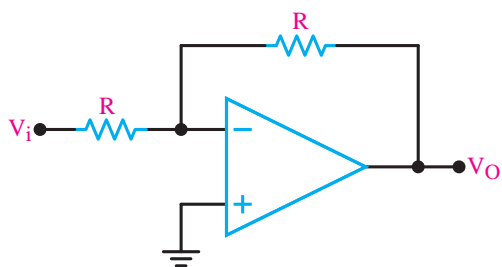
شبیه‌سازی مدارات تقویت کننده‌های عملیاتی

تقویت کننده معکوس گر (Inverting Amplifier): مدار شکل زیر یک تقویت کننده معکوس گر را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل می‌بینید سیگنال ورودی از طریق مقاومت R_1 به ورودی معکوس کننده (ورودی منفی) اتصال دارد. از آنجایی که سیگنال خروجی نسبت به سیگنال ورودی 180° درجه اختلاف فاز دارد از این رو این تقویت کننده را معکوس گر گویند. بهره ولتاژ این تقویت کننده برابر است با:



مدار یک تقویت کننده معکوس کننده

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$



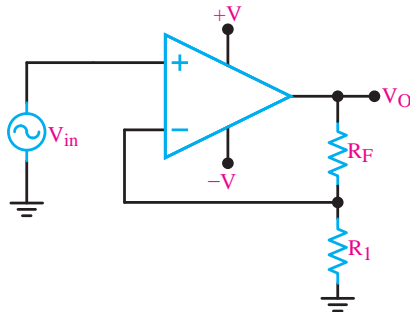
مدار بافر منفی

در این تقویت کننده اگر $R_1 = R_f$ باشد **بهره ولتاژ برابر -۱ می‌شود** و سیگنال ورودی و خروجی برابر با اختلاف 180° درجه می‌شود در این حالت مدار را بافر منفی گویند.

$$A_V = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{R}{R} = -1$$

تقویت کننده غیر معکوس گر (Noninverting Amplifier):

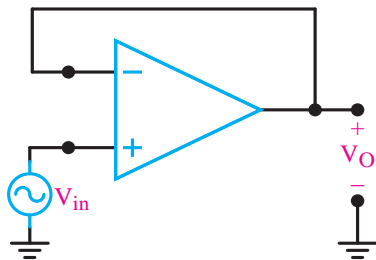
مدار شکل زیر یک تقویت کننده غیر معکوس گر را نشان می دهد. همان طور که در شکل می بینید سیگنال ورودی به ورودی غیر معکوس گر (ورودی مثبت) اتصال دارد. از آنجایی که سیگنال خروجی و سیگنال ورودی هم فاز هستند از این رو این تقویت کننده را غیر معکوس گر گویند. بهره ولتاژ این تقویت کننده برابر است با:



تقویت کننده غیر معکوس کننده

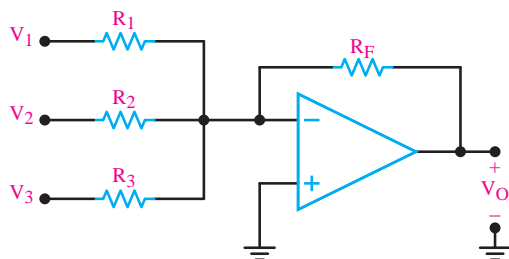
$$A_V = \frac{V_O}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

در این تقویت کننده اگر $R_f = 0$ باشد بهره ولتاژ برابر 1 می شود و سیگنال ورودی و خروجی برابر و هم فاز می شود در این حالت مدار را بافر مثبت گویند.



مدار بافر مثبت

یکی از مشخصات مهم بافر مثبت، ایجاد تطبیق بین امپدانس بسیار زیاد با امپدانس کم است. زیرا عملاً امپدانس ورودی مدار بافر بسیار زیاد و امپدانس خروجی آن بسیار کم است. **مدار جمع کننده:** این مدار دارای دو یا چند ورودی و یک خروجی است. شکل روبه رو یک جمع کننده ولتاژ با سه ورودی را نشان می دهد. در این مدار ولتاژ خروجی برابر است با:



مدار جمع کننده

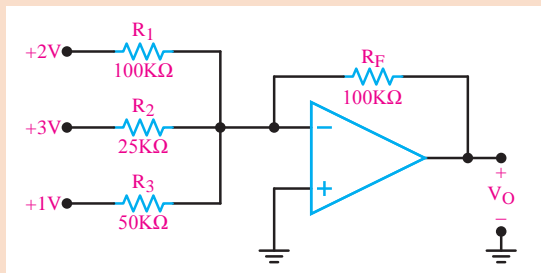
$$V_O = -R_F \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

تحت شرایط خاص، چنانچه $R_1 = R_2 = R_3 = R_F$ باشد.

$$V_O = -(V_1 + V_2 + V_3)$$

در این حالت مدار را، مدار جمع کننده با بهره واحد می نامند.

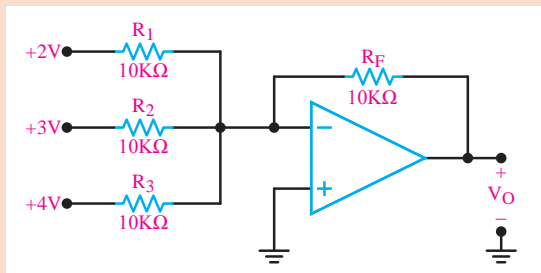
تمرین



ولتاژ خروجی در مدار زیر را محاسبه کنید؟

مدار جمع کننده

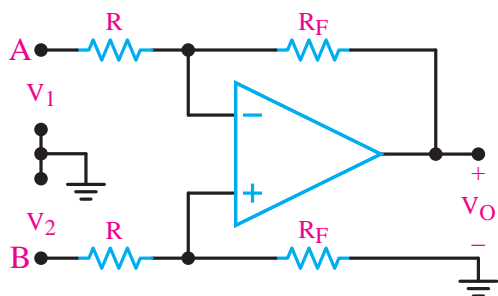
تمرین



ولتاژ خروجی در مدار زیر را محاسبه کنید؟

مدار جمع کننده

تقویت کننده با ورودی تفاضلی (تفریق گر): تاکنون تقویت کننده‌های عملیاتی را با اعمال یک سیگنال

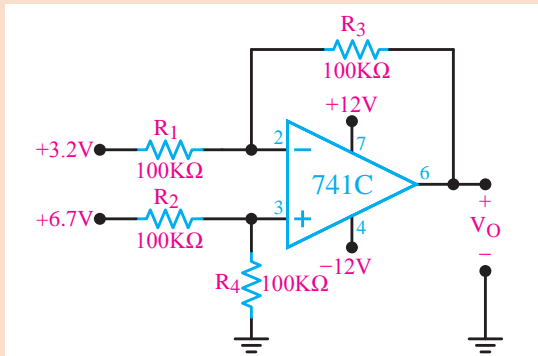


تقویت کننده با ورودی تفاضلی

ورودی مورد بحث قرار دادیم. بسیاری از اوقات به تقویت کننده‌ای با ورودی تفاضلی نیازمندیم زیرا یک تقویت کننده با ورودی تفاضلی میزان نویز را به حداقل می‌رساند. به عنوان مثال در طبقه ورودی یک دستگاه الکتروکاردیوگراف (نوار قلب) متأسفانه علاوه بر جذب سیگنال قلب مقداری نویز ۵۰ هرتز برق شهر نیز جذب می‌شود. با استفاده از این مدار می‌توان میزان نویز مربوط به ۵۰ هرتز را به شدت کاهش داد. این دستگاه سیگنال قلب را دریافت

می‌کند. سپس این سیگنال تقویت می‌شود و به بلندگو، اسیلوسکوپ یا نوار ثبت کننده می‌رسد. در شکل زیر تقویت کننده عملیاتی با ورودی تفاضلی نشان داده شده است.

ولتاژ خروجی تقویت کننده با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود.



تقویت کننده با ورودی تفاضلی

در شکل مقدار ولتاژ خروجی چند ولت است؟



شبه سازی مدار مقایسه گر در تقویت کننده عملیاتی

$$V_O = \frac{R_F}{R} (V_2 - V_1)$$

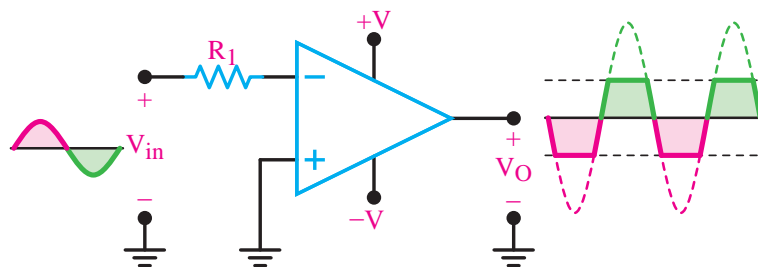
مقایسه کننده (Comparator): مقایسه کننده به مداری گفته می شود که ولتاژ یکی از ورودی های خود را با ولتاژ مینا در ورودی دیگر مقایسه می کند. ولتاژ مینا می تواند مثبت، منفی یا صفر باشد. در صورتی که مقدار ولتاژ ورودی مثبت بیشتر از ولتاژ ورودی منفی باشد خروجی به ولتاژ اشباع مثبت و اگر مقدار ولتاژ ورودی منفی بیشتر از ولتاژ ورودی مثبت باشد خروجی به اشباع منفی می رود. این نوع مدار را مدار مقایسه کننده می نامند.

$$V_i^+ > V_i^- \Rightarrow V_O = +V_{sat} \text{ اشباع مثبت}$$

$$V_i^- > V_i^+ \Rightarrow V_O = -V_{sat} \text{ اشباع منفی}$$

مقایسه کننده در مدارهای مختلفی کاربرد دارد که در ادامه به آن می پردازیم.

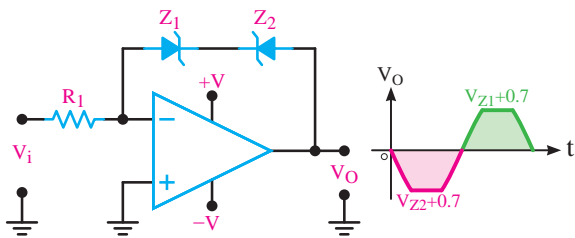
تبدیل موج سینوسی به مربعی: در شکل زیر مدار مقایسه کننده با ولتاژ مینای صفر رسم شده است. این مدار مبدل امواج سینوسی به مربعی است. در این مدار زمین یا پتانسیل صفر به ورودی مثبت اعمال شده است و ولتاژ مینا را تشکیل می دهد و ولتاژی که باید با مینا مقایسه شود (V_{in}) به ورودی منفی داده شده است.



برش خورده در اشباع مثبت

برش خورده در اشباع منفی

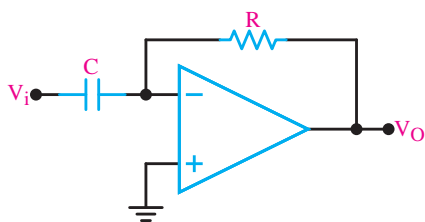
مدار مبدل امواج سینوسی به مربعی



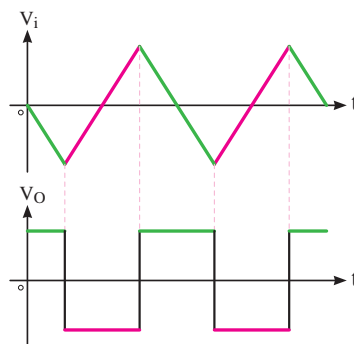
مدار مبدل امواج سینوسی به مربعی با محدودکننده دو طرفه

در بعضی موارد لازم است که دامنه ولتاژ خروجی در حدی کمتر از ولتاژ اشباع محدود شود. برای این منظور می‌توان با استفاده از دیود زنر در مدار فیدبک، دامنه ولتاژ خروجی را روی یک مقدار دلخواه تنظیم کرد. شکل روبه‌رو این مدار را نشان می‌دهد.

در هر نیم سیکل یکی از دیودهای زنر در حالت شکست و ولتاژ دو سر آن V_Z است و دیود دیگر در بایاس موافق قرار می‌گیرد و ولتاژ دو سر آن $0/V$ است. از این رو ولتاژ خروجی به $\pm (V_Z + 0/V)$ محدود می‌شود. مدارهای مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر: مدارهای مشتق‌گیر مدارهایی هستند که از شکل موج ورودی مشتق می‌گیرند. به عنوان مثال اگر به ورودی ولتاژ مثلثی داده شود در خروجی آن ولتاژ مربعی که همان مشتق ولتاژ ورودی است ظاهر می‌شود. در شکل زیر شکل موج ورودی و خروجی مدار مشتق‌گیر رسم شده است.

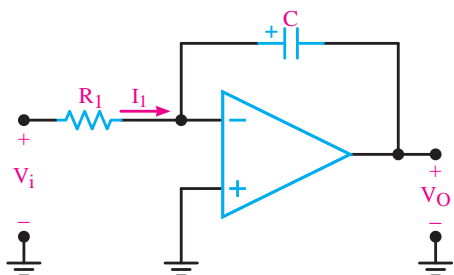


مدار مشتق‌گیر

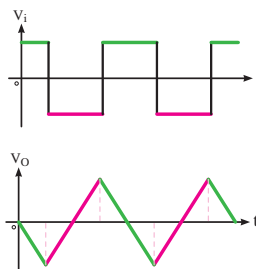


موج ورودی و خروجی مدار مشتق‌گیر

عکس عمل مشتق‌گیری را انتگرال‌گیری می‌نامند. عمل انتگرال‌گیری را می‌توانیم توسط مدارهای الکترونیکی انجام دهیم. شکل زیر مدار انتگرال‌گیر را با شکل موج ورودی و خروجی آن نشان می‌دهد.



مدار انتگرال‌گیر



موج ورودی و خروجی مدار انتگرال‌گیر

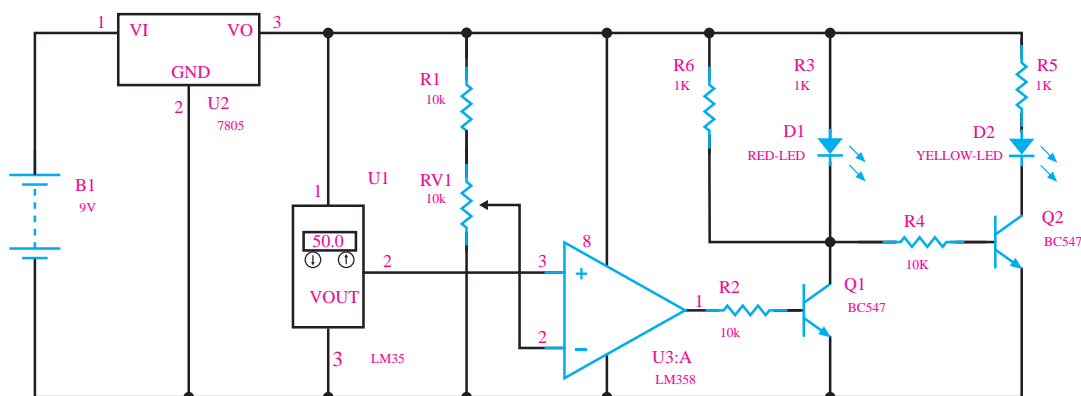
ساخت مدار کنترل دمای محیط با آپ‌امپ و LM35

فعالیت
عملی



در این مدار قصد داریم به کنترل LEDها با توجه به درجه حرارت محیط اطراف بپردازیم. در درجه حرارت فراتر از یک سطح خاص (۵۰ درجه در این مدار) LED قرمز رنگ به طور خودکار روشن خواهد شد، در غیر این صورت LED زرد رنگ در دمای کمتر از سطح خاص روشن خواهد شد.

عملکرد مدار: آی سی ۷۸۰۵ برای ارائه منبع تغذیه ۵ ولت در مدار به کار می‌رود. هنگامی که دما زیر ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد LED زرد روشن است و LED قرمز خاموش می‌شود و خروجی LM۳۵۸ نیز LOW می‌شود و ترانزیستور Q۱ در حالت خاموش باقی می‌ماند و ترانزیستور Q۲ در حالت روشن می‌باشد. اما هنگامی که دمای محیط بیشتر از ۵۰ درجه شود ولتاژ خروجی LM۳۵ در پین ۳ فراتر از ولتاژ مرجع (ولتاژ در پین ۲) شود خروجی LM۳۵۸ نیز HIGH می‌گردد. خروجی LM۳۵۸ به بیس ترانزیستور Q۱ متصل است بنابراین Q۱ روشن می‌شود و LED قرمز رنگ نیز روشن می‌گردد. در همان زمان بیس ترانزیستور Q۲ به زمین متصل شده و Q۲ و LED زرد رنگ خاموش می‌شوند.



مدار کنترل دمای محیط با آپ امپ و LM35

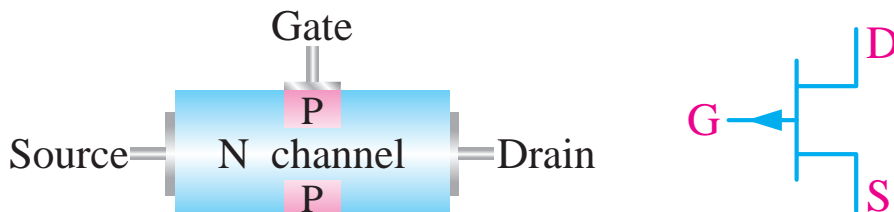
آشنایی با ترانزیستورهای اثر میدان^۱ (FET)

ترانزیستورهای معمولی به دلیل ساختار فیزیکی خاصی که دارند ترانزیستورهای دوپیوندی یا BJT نامیده می‌شوند و عناصری هستند که جریان را کنترل می‌کنند به زبانی دیگر جریان بیس ترانزیستور جریان کلکتور را کنترل می‌کند. مقاومت ورودی ترانزیستورهای BJT نسبتاً کم می‌باشد مثلاً هنگام اتصال دستگاه‌های اندازه‌گیری مانند ولت‌متر و اسیلوسکوپ به مدار، نباید از مدار مورد اندازه‌گیری جریان زیادی گرفته شود. از این رو لازم است این دستگاه‌ها مقاومت ورودی زیادی داشته باشند. بنابراین در این گونه مدارها، ترانزیستورهای BJT کارایی لازم را ندارند. ساختمان داخلی ترانزیستورهای اثر میدان در مقایسه با ترانزیستورهای BJT ساده‌تر است و مقاومت ورودی بسیار زیاد دارند. ترانزیستورهای اثر میدان با ولتاژ کنترل می‌شوند و در ساختمان داخلی آنها فقط دو نوع نیمه هادی به کار می‌رود، به همین علت این ترانزیستورها را تک پیوندی (unijunction Transistor) گویند. ترانزیستورهای اثر میدان را در دو نوع متفاوت JFET و MOSFET می‌سازند.

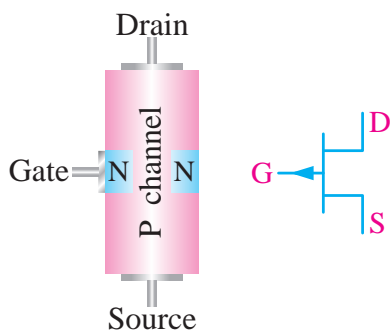
۱- Field Effect Transistor

ساختمان داخلی و نماد ترانزیستورهای FET

ترانزیستور JFET: اگر در یک نیمه‌هادی نوع N مانند شکل زیر یک نیمه‌هادی نوع P نفوذ دهند یک ترانزیستور JFET با کانال N تشکیل می‌شود در این حالت ناحیه N را کانال و نیمه‌هادی نوع P را دروازه یا گیت (Gate) می‌نامند. شکل زیر ساختمان JFET با کانال N، پایه‌ها و علامت اختصاری آن را نشان می‌دهد.



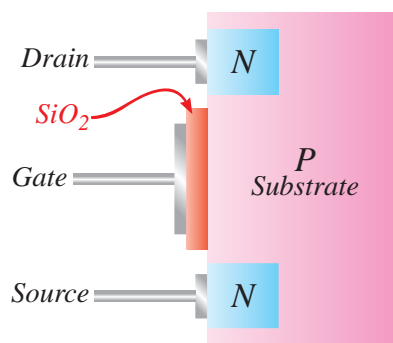
ساختمان و علامت اختصاری JFET با کانال N



ساختمان و علامت اختصاری JFET با کانال P

به طریق مشابه در شکل زیر ساختمان JFET با کانال P، پایه‌ها و علامت اختصاری آن را مشاهده می‌کنید. ترانزیستور MOSFET: چون در ترانزیستور JFET

جریان نشتی پیوند گیت سورس با افزایش دمای محیط افزایش می‌یابد، ترانزیستور نسبت به حرارت تا حدودی ناپایدار است و مقاومت ورودی آن در اثر گرما به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. برای افزایش این مقاومت، می‌توان

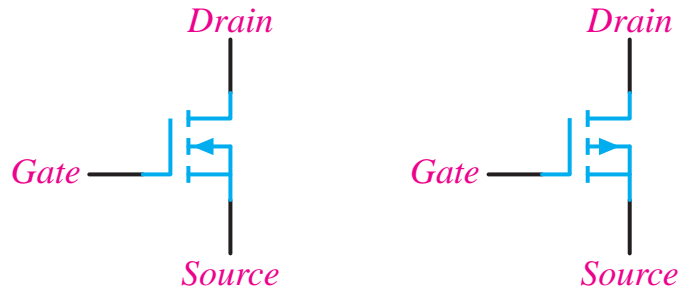


از ترانزیستور اثر میدان با گیت عایق شده استفاده کرد. در این ترانزیستور، گیت با لایه اکسید سیلیکون از کانال جدا می‌شود و هیچ جریانی از گیت عبور نمی‌کند. لذا مقاومت ورودی آن فوق‌العاده افزایش می‌یابد. این ترانزیستور را MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET) می‌نامند. شکل روبه‌رو ساختمان MOSFET با کانال N را نشان می‌دهد.

علامت اختصاری هر دو نوع MOSFET در شکل زیر رسم

ساختمان و علامت اختصاری MOSFET با کانال N

شده است



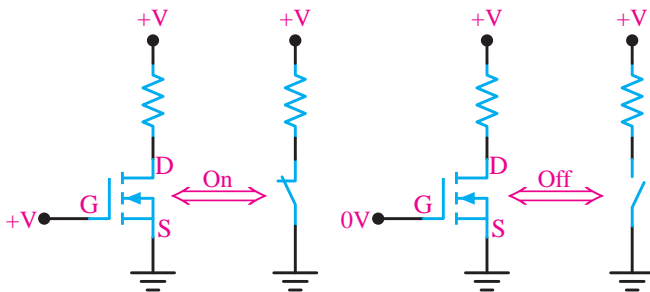
علامت اختصاری MOSFET با کانال P و N

در صورتی که گیت - سورس را طوری بایاس کنیم که پتانسیل گیت مثبت تر از سورس باشد، آنگاه جریان درین برقرار می شود و ترانزیستور روشن می شود. حداقل ولتاژی را که لازم است بین گیت - سورس اعمال شود تا جریان درین برقرار گردد، ولتاژ آستانه $V_{GS(th)}$ می گویند. مقدار این ولتاژ در حدود ۲ ولت است. البته در تکنولوژی های جدید این ولتاژ کاهش یافته است. MOSFET ها به دلیل کوچک بودن اندازه و ساده تر بودن ساخت آن، در تولید مدارهای مجتمع (IC) کاربرد بیشتری دارد.

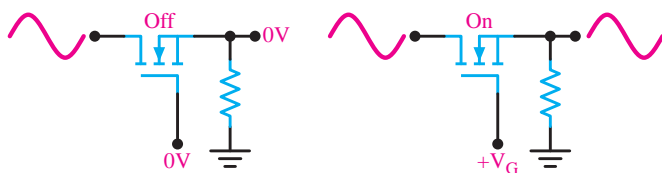
عملکرد MOSFET به عنوان کلید

اگر ولتاژ گیت سورس کمتر از ولتاژ آستانه $V_{GS(th)}$ باشد MOSFET قطع است و به صورت کلید باز عمل می کند و هنگامی که ولتاژ گیت سورس بیشتر از ولتاژ آستانه می شود، به صورت کلید بسته عمل می کند

لذا با تغییر ولتاژ می توان به MOSFET به عنوان کلید فرمان داد. شکل زیر MOSFET با کانال N و معادل کلیدی آن را نشان می دهد.

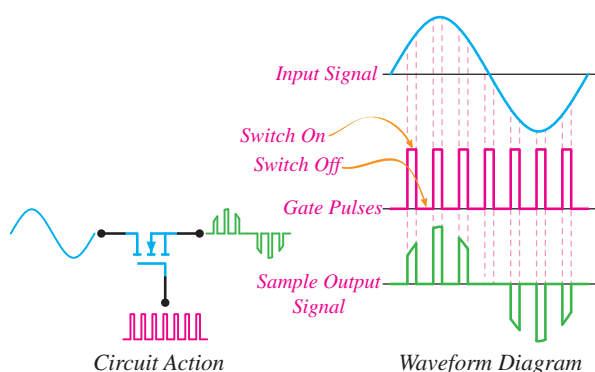


MOSFET به عنوان کلید



شکل روبه رو یک نمونه کاربرد سوئیچ در انتقال سیگنالی آنالوگ به خروجی را نشان می دهد.

یک نمونه کاربرد سوئیچ در انتقال سیگنال آنالوگ



کاربرد سوئیچ آنالوگ در مدار ADC

یکی از کاربردهای سوئیچ‌های آنالوگ استفاده از آنها برای تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال است. این عمل در مدار مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) انجام می‌گیرد. شکل روبه‌رو لحظات وصل سوئیچ و سیگنال نمونه‌برداری شده در خروجی سوئیچ را نشان می‌دهد.

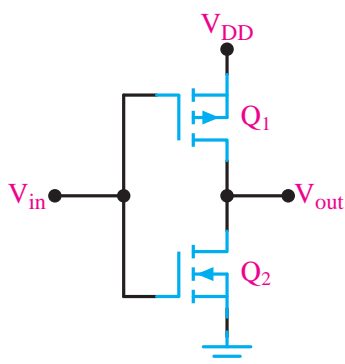
بخش فیلم



شبیه‌سازی گیت‌های منطقی به وسیله MOSFET

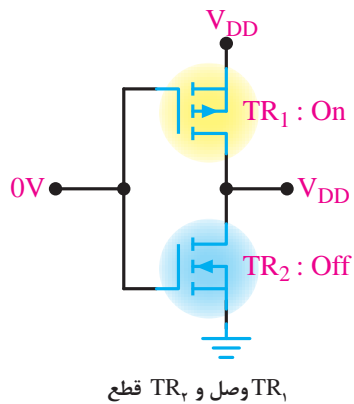
استفاده از MOSFET در مدارات مجتمع (IC)

مدار مجتمع یا آی‌سی به مجموعه‌ای از مدارات الکترونیکی اطلاق می‌گردد که با استفاده از مواد نیمه‌رسانا در ابعادی کوچک (معمولاً کمتر از یک سانتی‌متر مربع) ساخته می‌شود. مدارات الکتریکی عموماً شامل المان‌های مداری مقاومت، خازن، سلف و ترانزیستور می‌باشد. با توجه به اینکه فرایند ساخت ترانزیستور در تکنولوژی‌های مدارات مجتمع راحت‌تر از المان‌های مقاومت، خازن، سلف است، طراحان ترجیح می‌دهند این المان‌ها را توسط ترانزیستورها پیاده‌سازی کنند و تا حد ممکن تمامی المان‌های مدارات الکترونیکی را به ترانزیستور تبدیل نمایند. مدارهای مجتمع بر پایه فناوری ترانزیستورهای اثر میدان MOSFET را می‌توان بسیار ریزتر

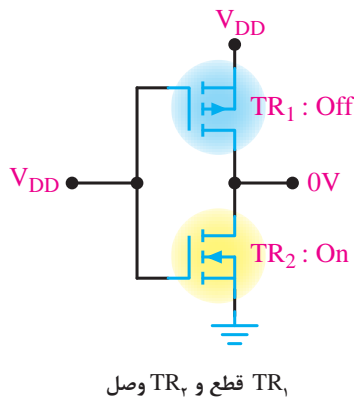


مدار داخلی گیت NOT

و ساده‌تر از مدارهای مجتمع بر پایه ترانزیستورهای دوقطبی BJT ساخت، همین ویژگی، تولید انبوه آنها را آسان می‌کند، چندان که هم اکنون بیشتر از ۸۵ درصد مدارهای مجتمع، بر پایه فناوری MOSFET طراحی و ساخته می‌شوند. به‌طور مثال یکی از کاربردهای ترانزیستور MOSFET در مدارهای مجتمع استفاده از آنها در دروازه‌های منطقی یا گیت‌های منطقی می‌باشد به‌گونه‌ای که امکان ساخت گیت‌های NOT - OR - AND... را فراهم می‌آورد. مدار روبه‌رو که از سری کردن دو نوع MOSFET با کانال P و N تشکیل شده است مدار داخلی گیت NOT می‌باشد.

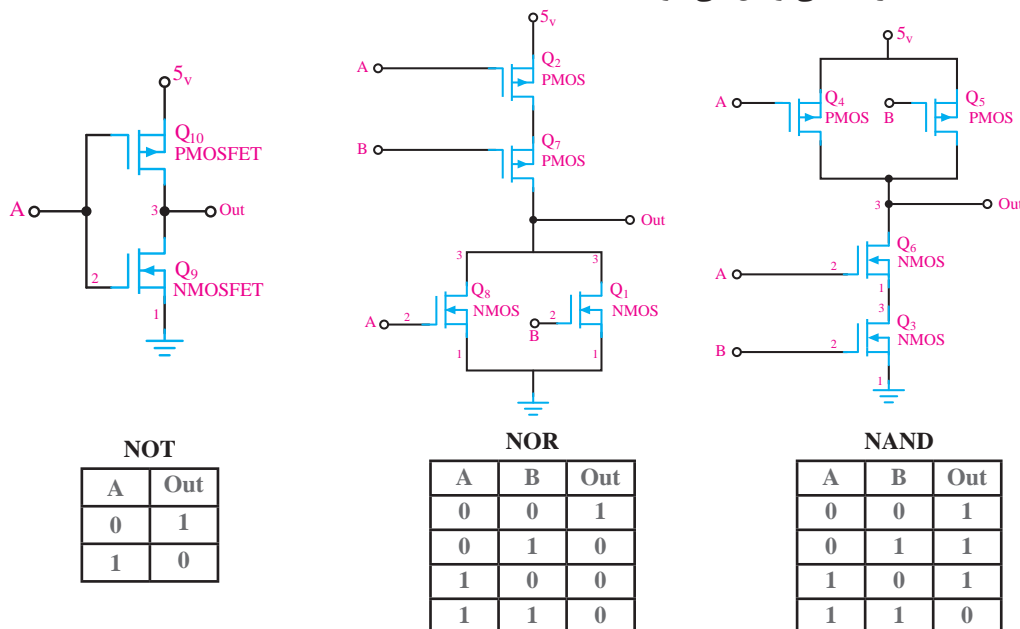


وقتی مانند شکل زیر $V_{in} = 0$ است، TR_1 وصل و TR_2 قطع و مانند کلیدی باز عمل می کند و خروجی تقریباً برابر V_{DD} است.



وقتی به V_{in} ولتاژ V_{DD} بدهیم TR_1 قطع و مانند کلید باز عمل می کند و TR_2 وصل و مانند کلید بسته عمل می کند و خروجی زمین شده و صفر ولت را نشان می دهد.

در شکل زیر مدار داخلی گیت های NOT, NOR, NAND و جدول صحت آنها را مشاهده می کنید. توجه داشته باشید که A و B ورودی های منطقی هستند همچنین ترانزیستورهای NMOS با یک منطقی و PMOS با صفر منطقی وصل می شود.



مدار داخلی دروازه های منطقی

با استفاده از گیت‌های صفحه قبل که با ترانزیستور طراحی شده‌اند، گیت‌های منطقی AND و OR را طراحی نمایید.

فعالیت

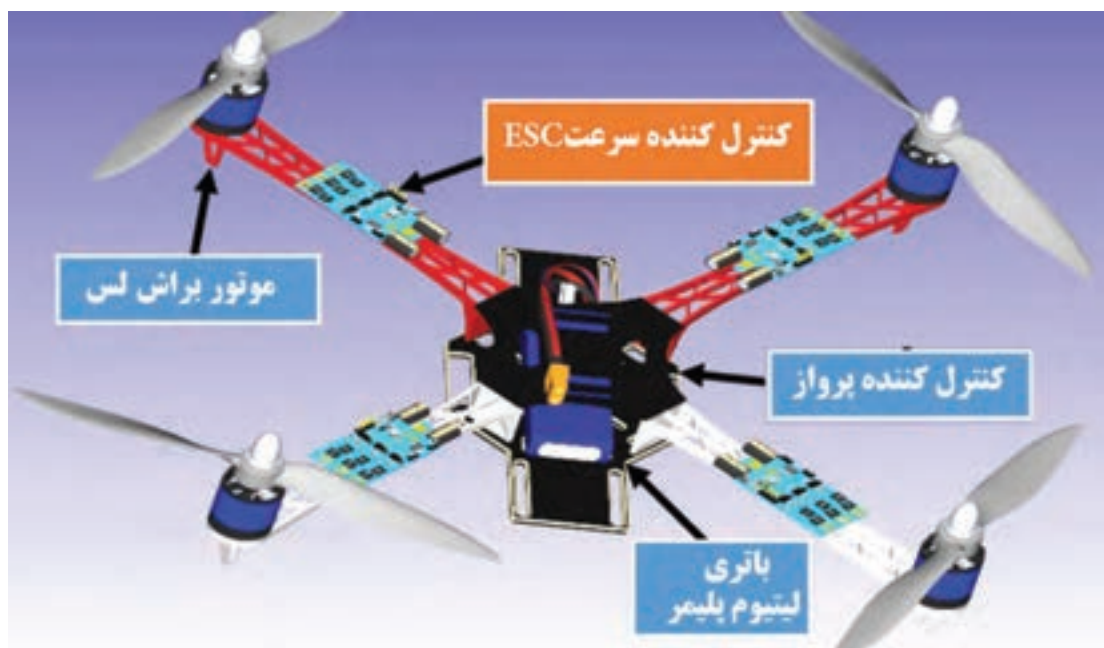


با استفاده از موتور جست‌وجوی <https://www.google.com> در مورد بلوک‌های مختلف یک کوادکوپتر تحقیق کنید و آن را در کلاس ارائه دهید. در ادامه به صورت خلاصه بلوک‌های کواد را توضیح می‌دهیم.

پژوهش



کوادکوپتر از چهار موتور که چهار پروانه ثابت بر آن سوار شده تشکیل یافته و هر جفت پروانه در خلاف جهت هم حرکت می‌کنند و ریزکنترل‌گر آن جهت چرخش را به وسیله کنترل زمین تنظیم می‌کند. با کم و زیاد کردن سرعت چرخش پروانه‌ها، گشتاور نیرو تغییر کرده و حرکت و یا فرود و اوج آن کنترل می‌گردد. کوادکوپتر کاربردهای گسترده‌ای در زمینه تصویر برداری هوایی، نقشه برداری، جاسوسی، تفریحی و ... دارد.



ساختار کلی یک کواد کوپتر

تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده در کوادکوپتر

موتور برآشلس: موتورهای برآشلس هم با همان اصل مورد استفاده در موتورهای معمولی کار می‌کنند، با این تفاوت که در این موتورها، سیم پیچ ثابت بوده و آهنرباها می‌چرخند. از آنجایی که سیم پیچ در این موتورها ساکن است، نیازی به برس‌ها نیست. کار تقسیم ولتاژ بین سیم‌پیچ‌ها را کنترل‌کننده سرعت موتور (ESC) انجام می‌دهد. سریع‌ترین راه برای تشخیص اینکه یک موتور برآشلس است یا معمولی این است که به سیم‌های آن نگاه کنید. موتورهای معمولی دو تا سیم دارند در حالی که موتورهای برآشلس دارای سه سیم هستند. سیم وسط فیدبک نام دارد و تغییر جای دو سیم دیگر باعث خواهد

شد که جهت چرخش موتور برعکس شود.

مزایای موتورهای براشلس:

- ۱ از آنجایی که برس وجود ندارد، خوردگی آن هم در این موتورها وجود ندارد.
- ۲ اصطکاک برس برای گرفتن سرعت موتور وجود ندارد.
- ۳ به همین علت، مدت زمان کارکرد موتور با یک باتری در این موتورها بالاتر است.
- ۴ نسبت توان به وزن بسیار بالاتری دارند.

دو نوع موتور براشلس برای مدل های رادیو کنترل وجود دارد. Inrunner و Outrunner. در نوع Inrunner، آهنرباهای دائمی در قسمت داخلی سیم پیچها قرار داده شده‌اند. در نوع Outrunner، آهنرباهای دائمی در قسمت بیرونی قرار گرفته‌اند. همان طور که در عکس می‌توانید ببینید، کاسه بیرونی موتور که محور موتور به آن متصل است، آهنرباهای دائمی را بر روی خود نصب دارد.

مقایسه این دو نوع موتور



موتور براشلس

موتور براشلس Outrunner

Inrunner: دور بالا، گشتاور پایین، راندمان بالاتر، نیاز به گیربکس دارند، قابلیت استفاده از انواع ملخ، سر و صدای زیاد

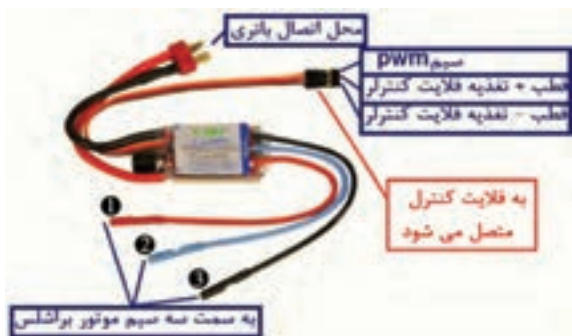
Outrunner: دور پایین، گشتاور بالا، راندمان پایین تر، عدم نیاز به گیربکس، محدودیت در انتخاب ملخ، تقریباً بی صدا

ثابت ولتاژ: یا Kv عبارت است از تعداد دوری که موتور به ازای هر ولت می‌زند. از آنجایی که هیچ موتوری با راندمان ۱۰۰ درصد نیست، معمولاً مقدار واقعی کمی کمتر از این خواهد بود. به عنوان مثال اگر شما ولتاژ ۱۰ ولت به یک موتور با Kv برابر با ۱۲۰۰ وارد نمایید، این موتور با دور $1200 \times 10 = 12000$ دور در دقیقه خواهد چرخید.

ثابت گشتاور: ثابت گشتاور را Kt می‌نامند. برای همه موتورها، $Kt = 1355/Kv$. با این وصف، هرچه دور یک موتور در یک ولتاژ مشخص بالاتر باشد، گشتاور آن پایین تر خواهد بود. به طور کلی، موتورهای Outrunner دارای Kv پایین تر هستند که باعث ایجاد گشتاور بالاتر و توانایی چرخاندن ملخهای بزرگ تر در آنها می‌شود.

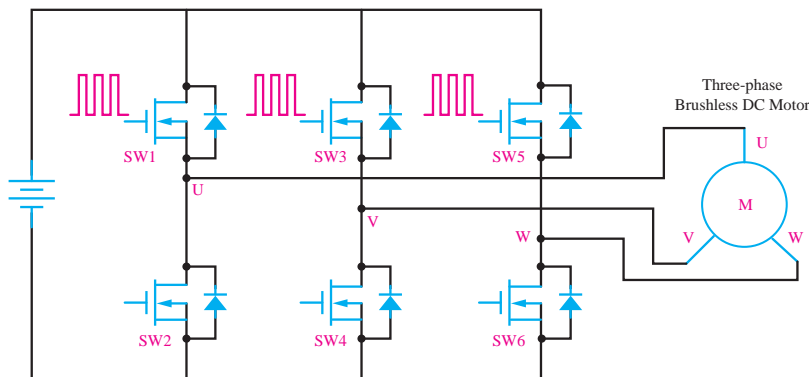
عکس این موضوع هم در مورد موتورهای Inrunner صادق است.

کنترل کننده سرعت (ESC) electronic speed control: یکی از پرکاربردترین وسایل در انجام انواع پروژه‌های هوافضا سیستم کنترل سرعت (ESC) می‌باشد. این سیستم که در هواپیماهای مدل پروازی، هلیکوپترها، هاورکرافت، قایق و... که برای سرگرمی و به صورت پروژه‌خانه‌گی ساخته می‌شوند، کاربرد دارد ESC از گیرنده رادیو کنترل پالس‌ها را دریافت می‌کند و با توجه به کد مربوطه میزان جریان خروجی که به موتور می‌رود و در نهایت دور موتور (RPM) را کنترل می‌کند. اسپید کنترل بر حسب اندازه و طول پالس‌ها کار می‌کند و به همین دلیل در شکل آن را (PWM) می‌نامند، که مخفف Pulse Width Modulation به معنای مدلاسیون پهنای باندهاست. کافی است تا باتری به ESC وصل شود و آن نیز به گیرنده متصل گردد. باید گفت که انتخاب ESC مناسب به میزان جریانی که موتور شما می‌کشد، وزن حداقلی و بودجه شما بستگی دارد.



کنترل کننده سرعت (ESC)

موتور برشلس یک موتور سه فاز است که ولتاژ مورد نیاز توسط مدار ESC تأمین می‌شود. در شکل زیر مدار داخلی ESC را مشاهده می‌کنید. پالس اعمالی به گیت ترانزیستورها پالس PWM است که با تغییر پهنای پالس (دیوتی سایکل) می‌توانیم سرعت موتور را کنترل کنیم.



مدار کنترل کننده سرعت (ESC)

کنترل کننده پرواز (Flight Controller): یک کوادکوپتر ساده می‌تواند به سادگی تعادل خود را حفظ کند، در یک نقطه ثابت بماند و در چندین جهت مختلف حرکت کند، برای کنترل یک کوادکوپتر به یک مدارکنترل کننده نیاز خواهیم داشت که عملیات هماهنگی چهار موتور کوادکوپتر را به جهت فراهم آوردن عملکرد مورد نیاز کنترل کننده انجام دهد. این مدار را کنترل کننده پرواز (Flight Controller) گویند. در یک کوادکوپتر شما به طور مستقیم توانایی کم یا زیاد کردن سرعت یکی از موتورها را نخواهید داشت! شما فقط عملیات مورد نظرتان را کنترل می‌کنید و



کنترل کننده پرواز (Flight Controller)

به وسیلهٔ ریموت کنترل عملیات مورد نظرتان را به فلایت کنترل اطلاع می‌دهید و فلایت کنترل بر اساس دستور دریافتی از خلبان، عملیات مورد نظر را انجام می‌دهد. فلایت کنترل در حقیقت مغز متفکر پرنده شماست. فلایت کنترل‌ها می‌توانند امکانات بسیار جالبی مانند تعیین خودکار ارتفاع، امکان بازگشت به نقطهٔ امن با استفاده از GPS، فرود امن در صورت اتمام باتری و حتی امکان رفت و برگشت خودکار مسیر بر اساس GPS را به کوادکوپتر شما بیفزایند.

باتری‌های لیپو (LiPo): جنس آنها لیتیوم پلیمر بوده و معمولاً در سل‌های با آمپر متفاوت عرضه می‌شوند. از امتیازات این نوع باتری‌ها این است که می‌توان در مدت چند دقیقه چندین آمپر از آنها جریان کشید. و به سرعت شارژشان کرد. باتری از نوع پلیمر لیتیوم دارای وزن کمتری نسبت به مدل‌های دیگر است. اما ویژگی منحصر به فردی که سازندگان گوشی‌های موبایل را به سمت استفاده از این نوع باتری می‌کشاند این است که این باتری‌ها را می‌توان به هر شکل هندسی که در طراحی مورد نیاز باشد درآورد. نگهداری آنها با سایر باتری‌ها کمی متفاوت است زیرا باید آنها را برای نگهداری تا ولتاژ خاصی تخلیه کنید. یعنی ولتاژ هر سل را نباید تا زیر ۳ ولت تخلیه کنید. و بهترین حالت برای زمانی که بخواهید آنها را بیش از دو هفته نگهداری کنید لازم است ولتاژ هر سل را به $3/8$ ولت برسانید. تا در صورت تخلیه خود به خودی آن ولتاژش از ۳ ولت پایین‌تر نیاید. هیچ قلم دیگری از اقلام مورد استفاده در این سرگرمی، به اندازه باتری‌های قابل شارژ در آن تأثیرگذار نبوده‌اند. به خاطر داشته باشید که در مورد باتری‌ها هرچه اطلاعات بیشتری داشته باشید، بهتر خواهد بود.



باتری‌های لیپو (LiPo)

عنوان پودمان	تکالیف عملکردی (واحدهای یادگیری)	استاندارد عملکرد (کیفیت)	نتایج مورد انتظار	شاخص تحقق	نمره
پودمان ۲: تحلیل مدارهای الکترونیکی	۱- تحلیل فنی ترانزیستورها، انواع آرایش آنها و تحلیل تقویت کننده‌های ترانزیستوری ۲- تحلیل تقویت کننده‌های عملیاتی و کاربرد آنها	بررسی مفاهیم و محاسبات مربوط به کاربرد ترانزیستورها و آپ امپ‌ها به عنوان تقویت کننده در مدارات الکترونیکی	بالاتر از حد انتظار	تعیین انواع بایاس ترانزیستور، منحنی مشخصه‌ها، محاسبات انواع آرایش‌های ترانزیستور تعیین میزان تقویت مد مشترک و تفاضلی، تعیین مشخصات پوش پول، تعیین خروجی آپ امپ در کاربردهای مختلف، تحلیل Jfet و mosfet برای کار در ناحیه فعال، تعیین آرایش moseft برای کاربرد در مدارات مجتمع	۲
			در حد انتظار	تعیین انواع بایاس ترانزیستور، منحنی مشخصه‌ها، محاسبات انواع آرایش‌های ترانزیستور، تعیین میزان تقویت مد مشترک و تفاضلی، تعیین مشخصات پوش پول، تعیین خروجی آپ امپ در کاربردهای مختلف	۲
			پایین تر از حدانتظار	تعیین انواع بایاس ترانزیستور، منحنی مشخصه‌ها، محاسبات انواع آرایش‌های ترانزیستور، تعیین میزان تقویت مد مشترک و تفاضلی	۱
نمره مستمر از ۵					
نمره شایستگی پودمان					
نمره پودمان از ۲۰					