پودمان دوم

تحلیل مدارهای الکترونیکی

درحال 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 نشانده شد و چندی بعد با تکیه بر دانش الکترونیک و هوا فضا نمونه ایرانی آن مهندسی معکوس و ساخته شد.

واحد یادگیری: تحلیل مدارهای الکترونیکی

آیا می‌دانید

- 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:

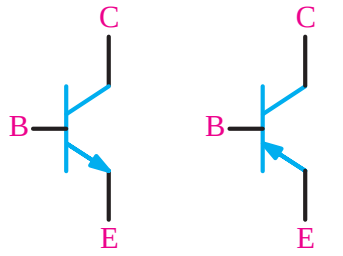
۱ بررسی نواحی کار ترانزیستورها
۲ ولتاژها و جریان‌های پایه‌های ترانزیستور را در مدار بایاس محاسبه کند.
۳ مقایسه سه نوع آرایش تقویت‌کننده ترانزیستوری
۴ بررسی تقویت‌کننده‌های خاص (تفاضلی، دارلینگتون و کامپلی منتاری)
۵ ساخت یک تقویت‌کننده صوتی عملی
۶ نماد و شکل ظاهری تقویت‌کننده عملیاتی
۷ بررسی و تحلیل مدارهای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

استاندارد عملکرد

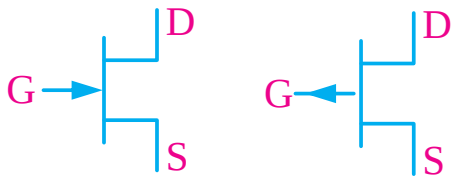
پس از اتمام واحد یادگیری و کسب شایستگی، هنرجویان می‌توانند تحلیل، طراحی و ساخت مدارات بایاس ترانزیستوری، تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری و تقویت‌کننده‌های عملیاتی را انجام دهند.

دراین پودمان المان سه ترمینالی با نام ترانزیستور دو قطبی (Bipolar Junction Transistor) و 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. ترانزیستورBJT برای سال‌های متمادی انتخاب اول برای انواع دستگاه‌های دیجیتال و آنالوگ بود اما در دهه اخیر به‌سرعت 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 به‌صورت مشترک در مدار قرار گیرد!

ترانزیستورها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند.



ترانزیستورهای دو قطبی
Bipolar junction transistors (BJT)



ترانزیستورهای اثر میدان Field effect transistors (FET)

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

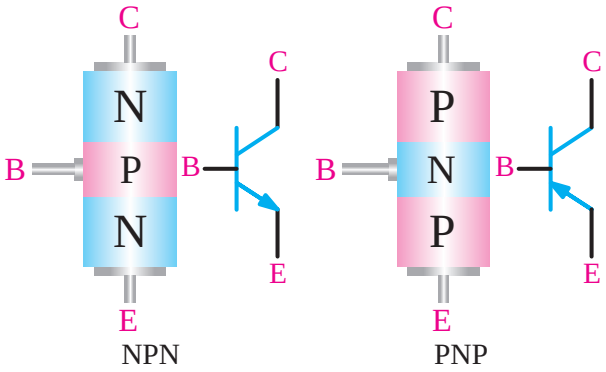
فرکانس پایین Low- frequency	طراحی برای فرکانس‌های زیر ۱۰۰ کیلو هرتز فرکانس‌های صوتی و مدارهای خطی
فرکانس بالا High- frequency	برای فرکانس‌های بالای ۱۰۰ کیلو هرتز فرکانس‌های رادیویی، پهنای باند بالا
قدرت power	این ترانزیستورها توان بالایی دارند و در مدارات رادیویی و صوتی کاربرد دارند.
سوییچینگ switching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

فعالیت

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.

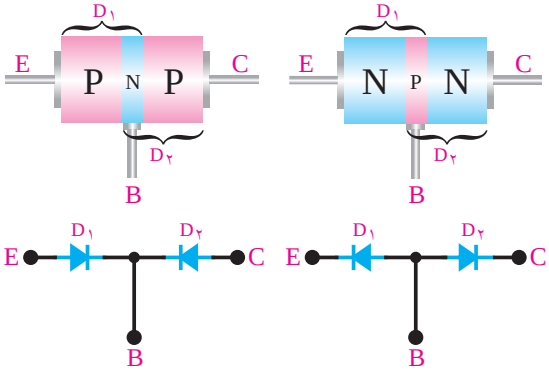
ترانزیستورهای دوقطبی Bipolar junction transistor (BJT)

همان‌طور که در فصل اول دانش فنی پایه گفته شد ترانزیستور دو قطبی از سه نیمه هادی نوع P و N تشکیل شده است. ترتیب قرارگرفتن نیمه هادی‌های P و N در کنارهم به‌صورت یکی از حالت‌های زیر است. با توجه به شکل زیر مشاهده می‌شود دو نوع ترانزیستور وجود دارد که به یکی NPN و دیگری PNP گفته می‌شود. سه‌پایه ترانزیستور نیز امیتر Emitter یعنی منتشرکننده، بیس Base یعنی پایه و کلکتور Collector یعنی جمع‌کننده نامگذاری شده است.



ساختمان داخلی و نماد فنی ترانزیستور

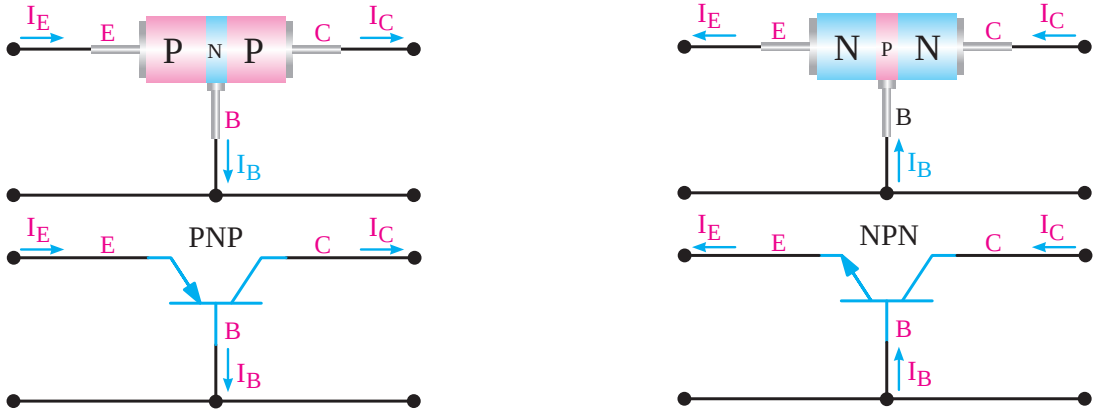
مدار معادل دیودی ترانزیستور: هر اتصال N-P معادل یک دیود بوده، از این‌رو می‌توان یک ترانزیستور را معادل ۲ دیود نشان داد.



نمای دیودی ترانزیستور

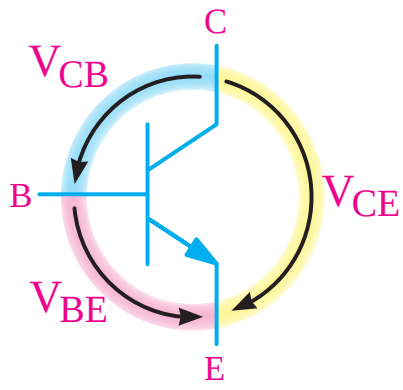
جهت جریان‌ها در ترانزیستور: جریانی کــه از کلکتور عبور می‌کند با حرف I_C، جریانی که از بیس عبور می‌کند با حرف I_B و جریانی که از امیتر عبور می‌کند با حرف I_E نشان داده می‌شود. جریانی که از امیتر عبور می‌کند، به دو انشعاب تقسیم می‌شود. قسمت بسیار کمی از جریان از بیس و قسمت اعظم آن از کلکتور عبور می‌کند. لذا جریان امیتر برابراست با جریان بیس به علاوهٔ جریان کلکتور، یعنی:

$$I_E = I_B + I_C$$



جهت قرار دادی جریان در ترانزیستورهای BJT

ولتاژهای ترانزیستور: برای اینکه بتوان از ترانزیستور به‌عنوان تقویت‌کنندهٔ سیگنال‌های الکتریکی یا... استفاده نمود، باید ترانزیستور را با ولتاژ dc تغذیه کرد. در هرحالت، ولتاژهایی که به قسمت‌های مختلف ترانزیستور اعمال می‌شوند، باهم فرق می‌کنند دراین قسمت به نامگذاری ولتاژ قسمت‌های مختلف می‌پردازیم. ولتاژی که بین پایه‌های بیس و امیتر قرار می‌گیرد با V_{BE}، ولتاژی که در قسمت کلکتور ـ بیس قرار می‌گیرد با V_{CB}، ولتاژی که بین کلکتور ـ امیتر وصل می‌شود با V_{CE} نشان داده می‌شوند. شکل روبه‌رو ولتاژهای قسمت‌های مختلف ترانزیستور را نشان می‌دهد.



V_{BE} یعنی ولتاژ بیس نسبت به امیتر

جهت قراردادی ولتاژ در ترانزیستورهای BJT

بایاس ترانزیستور: برای استفاده از یک ترانزیستور به‌عنوان تقویت‌کننده ابتدا باید آن را بایاس نمود. برای این‌کار در ترانزیستور باید دیود بیس-امیتر در بایاس موافق و دیود کلکتور - بیس در بایاس مخالف قرار گیرد. به‌طور کلی بایاس کردن به‌معنای تغذیه نمودن و اعمال ولتاژ dc به‌صورت صحیح به ترانزیستور می‌باشد. از این‌رو جهت تأمین ولتاژهای لازم برای ترانزیستور باید از مدارات بایاس استفاده کرد.

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

انتخاب نقطهٔ کار: برای انتخاب نقطهٔ کار، ابتدا باید محدودیت‌های ترانزیستور را درنظر گرفت. از جمله محدودیت‌ها، 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 ـ 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 به‌صورت 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 Tj نمایش می‌دهند.

انواع مدارات بایاس

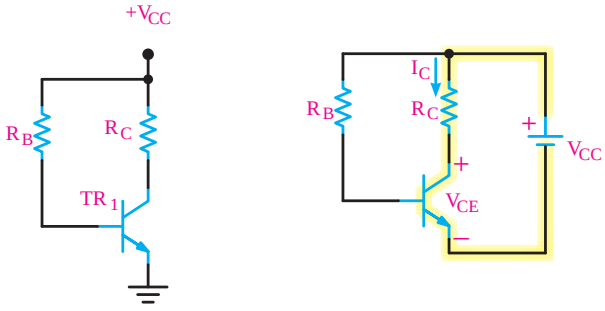
اصولاً مدارات بایاس شکل مشخص و ثابتی ندارند بنابراین هر مداری که بتواند ولتاژ تغذیه دیود بیس- امیتر را فراهم کند را مدار بایاس گویند. ولی استفاده از مدارات زیر متداول‌تر است.

پخش فیلم

بایاس ثابت

بایاس ثابت

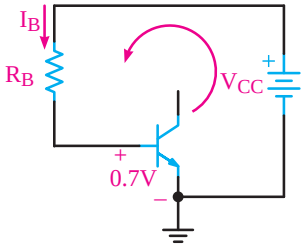
در این مدار دیود بیس- امیتر مستقیماً توسط یک منبع dc تغذیه می‌شود و پیوند بیس- امیتر مستقیماً از طریق مقاومت R_B به منبع V_{cc} متصل است. در برخی نقشه‌های مدار جهت سهولت از رسم منبع V_{cc} خودداری می‌کنند.



مدار بایاس ثابت

تحلیل محاسباتی:

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



حلقه ورودی مدار بایاس ثابت

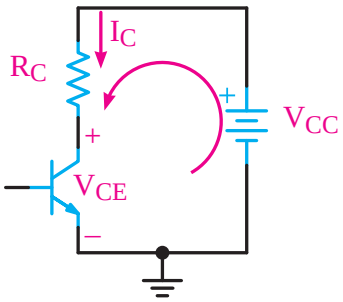
$$-V_{CC} + R_B I_B + V_{BE} = 0$$

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

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

$I_C = \beta I_B$

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

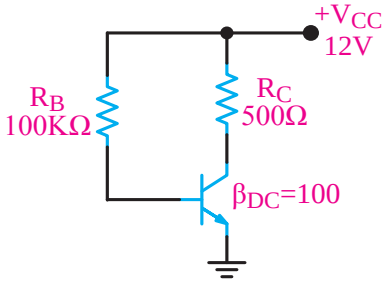


حلقه خروجی مدار بایاس ثابت

خروجی KVL $\quad -V_{CC}+R_CI_C+V_{CE}=0$

$V_{CE}=V_{CC}-R_CI_C \quad$ یا $\quad R_C=\dfrac{V_{CC}-V_{CE}}{I_C}$

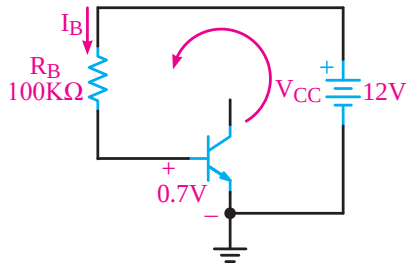
مثال ۱: در مدار شکل زیر مقادیر I_B، I_C، V_{CE} را محاسبه کنید. $(V_{BE}=0/7)$



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:



مدار بایاس ثابت

$-V_{CC}+R_BI_B+V_{CE}=0$

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

محاسبه I_B:

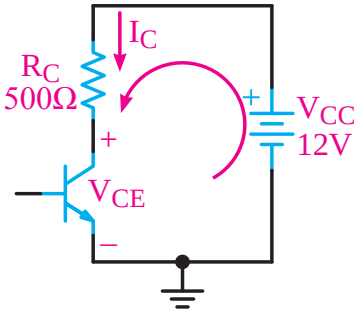
$I_B=\dfrac{12-0/7}{100K\Omega}=\dfrac{11/3}{100}mA$

$I_B=113\mu A$

محاسبه I_C:

$I_C=\beta I_B \qquad I_C=100\times\dfrac{11/3}{100}=11/3mA$

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



KVL در حلقه خروجی

معادله KVL در حلقه خروجی:

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$
$$-V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} = ۰$$

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

$$V_{CE} = ۶/۳۵V \qquad V_{CE} = ۱۲ - (۰/۵K)(۱۱/۳m)$$

مثال ۲: برای نقطه کار Q با مختصات:

$$Q\begin{cases} I_B = ۰/۱mA \\ I_C = ۵mA \\ V_{CE} = ۶V \\ V_{BE} = ۰/۷ \end{cases}$$

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: معادلهٔ KVL در حلقه خروجی

$$KVL\ (I) \Rightarrow -V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} = ۰$$

محاسبه RC

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C} \qquad R_C = \frac{۱۲ - ۶}{۵} = \frac{۶}{۵} = ۱/۲K\Omega$$

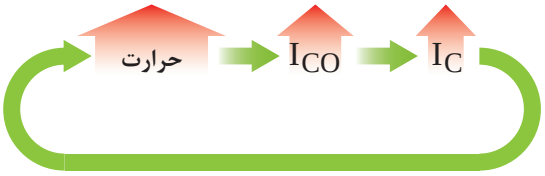
معادله KVL در حلقه ورودی

$$KVL(II) \Rightarrow +V_{CC} + R_B I_B + V_{BE} = ۰$$

محاسبه R_B

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} \qquad R_B = \frac{۱۱/۳}{۰/۱} = ۱۱۳k$$

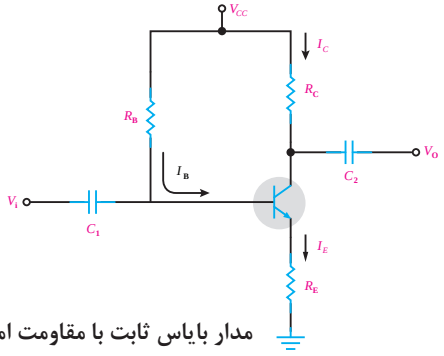
مزایا و معایب: مهم‌ترین مزیت این مدار سادگی آن است ولی این مدار در برابر حرارت محیط و قطعات حساس است و با تغییر دمای ترانزیستور و نقطه کار تغییر می‌کند. به این‌صورت که اگر حرارت زیاد شود، I_C نیز افزایش می‌یابد و این امر تا ناپایداری و آسیب دیدن مدار ادامه می‌یابد. که برای رفع این ناپایداری باید یک مقاومت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



تغییر دمای ترانزیستور

بایاس ثابت با مقاومت امیتر

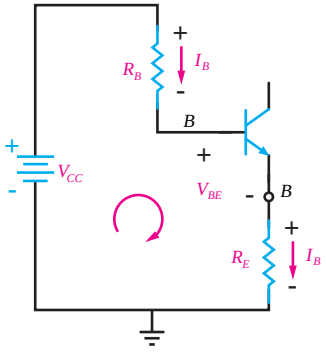
با قرار دادن مقاومت R_E حساسیت نقطه کار به حرارت بسیار کم می‌شود. علت این امر را در ادامه مطالعه خواهید کرد.



مدار بایاس ثابت با مقاومت امیتر

تحلیلی محاسباتی:

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



حلقه ورودی

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

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

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

اکنون از I_B فاکتور می‌گیریم

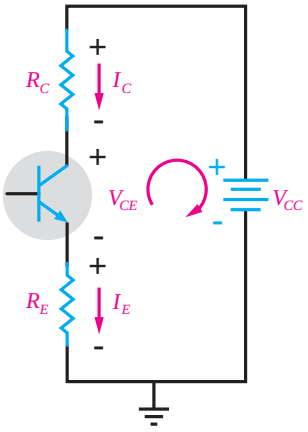
$$I_B(R_B + (\beta+1)R_E) = V_{CC} - V_{BE} \quad \Rightarrow \quad I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta+1)R_E}$$

گام دوم: I_C و I_E با استفاده از روابط ۱ـ۵ و ۱ـ۶ محاسبه می‌شوند.

$I_C=\beta I_B$ و $I_E=(\beta+1)I_B$

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

KVL خروجی: $-V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E = ۰ \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C - R_E I_E$

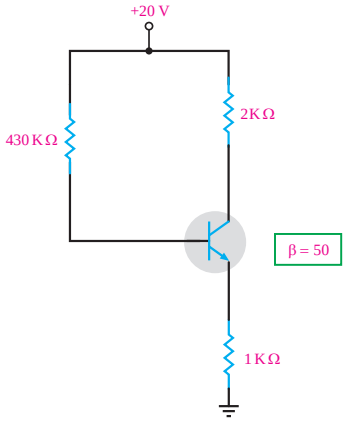


حلقه خروجی

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

$V_E = R_E I_E$ $V_B = V_{BE} + V_E$ $V_C = V_{CC} - R_C I_C$

مثال۳: مقادیر نقطه کار I_C و V_{CE} چقدر است؟



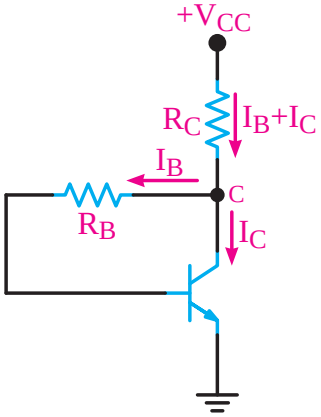
بایاس ثابت با مقاومت امیتر

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + ۱)R_E} = \frac{۲۰ - ۰/۷}{۴۳۰K + (۵۱)۱K} = \frac{۱۹/۳}{۴۸۱K} \cong ۰/۰۴mA$$

$I_C = \beta I_B = ۵۰ \times ۰/۰۴ = ۲$ mA

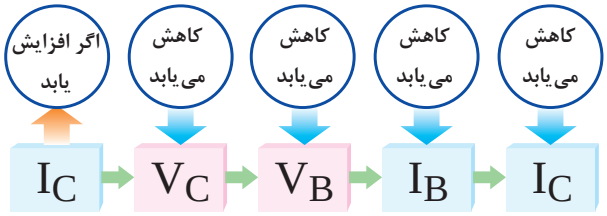
$I_E \cong I_C = ۲$ mA

KVL خروجی: $V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C - R_E I_E = ۲۰ - (۲k \times ۲m) - (۱k \times ۲m) = ۱۴v$ $V_{CE} = ۱۴$



بایاس خودکار (بایاس فیدبک کلکتور)

بایاس خودکار (بایاس فیدبک کلکتور): در مدار شکل زیر نقطه کار تا حد زیادی به مقدار βی ترانزیستور وابسته است و با تغییر β، نقطه کار جابه‌جا می‌شود. برای اینکه مدار فوق روبه‌رو در برابر تغییرات β ثبات 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.



تاثیر 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.

$I_E = I_B + I_C$

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

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

اگر از I_B فاکتور بگیریم

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

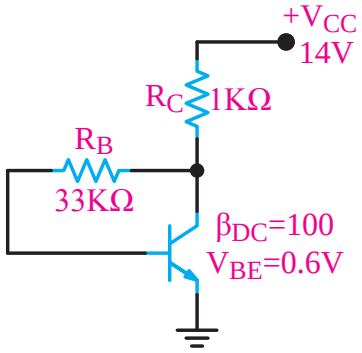
گام دوم: با استفاده از روابط زیر مقدار I_E و I_C را حساب کنید.

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

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

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

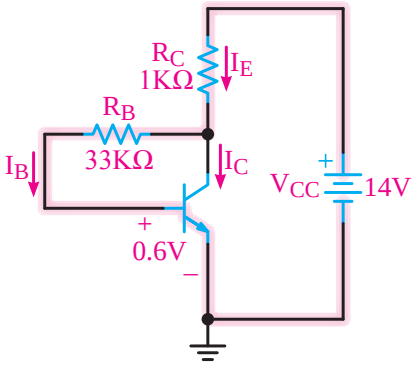
مثال ۴: با توجه به شکل زیر و مقادیر داده شده در مدار، I_B، I_C و V_{CE} را محاسبه کنید.



بایاس خودکار (بایاس فیدبک کلکتور)

پاسخ: با توجه به اینکه $I_C = \beta I_B$ و $I_{E=}(۱+\beta)I_B$ است، جریان امیتر ترانزیستور بر حسب I_B محاسبه می گردد.

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



بایاس خودکار (بایاس فیدبک کلکتور)

محاسبه جریان I_C و I_B بر حسب I_B: $I_E=۱۰۱I_B$ $I_C=۱۰۰I_B$

معادله KVL در حلقه خروجی و ورودی: $-V_{CC}+R_CI_E+R_BI_B+V_{BE}=۰$

جایگزینی اعداد در معادله و محاسبه I_B $-۱۴+۱(۱۰۱I_B)+۳۳I_B+۰/۶=۰$

$۱۳۴I_B=۱۴-۰/۶=۱۳/۴$ $I_B=\frac{۱۳/۴}{۱۳۴}=۰/۱mA$

محاسبه I_C: $I_C=\beta I_B=۱۰۰\times۰/۱=۱۰mA$

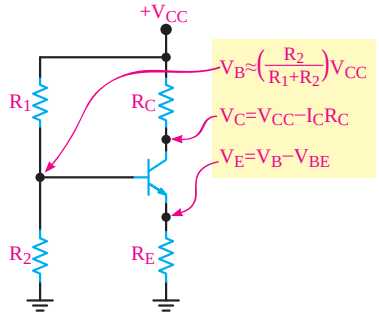
محاسبه I_E: $I_E=I_C+I_B=۱۰/۱mA$

معادله KVL در حلقه خروجی برای محاسبه V_{CE} $V_{CE}-V_{CC}+R_CI_E+V_{CE}=۰$

محاسبه V_{CE} $V_{CE}=V_{CC}-R_CI_E$ $V_{CE}=۱۴-(۱)(۱۰/۱)=۳/۹V$

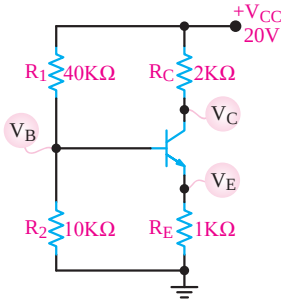
پخش فیلم

بایاس سرخود



بایاس مقسم ولتاژ یا تغذیهٔ سرخود

بایاس مقسم ولتاژ یا تغذیهٔ سرخود: در این مدار نقطه کار ترانزیستور درحد قابل قبول تثبیت شده است. و در شرایط خاص تا حدودی مستقل از βی 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_2 قابل چشم‌پوشی باشد.



بایاس مقسم ولتاژ یا تغذیهٔ سرخود

مثال ۵: در شکل زیر با فرض $I_E = I_C$ ولتاژ پایه‌ها و جریان پایه‌های ترانزیستور را محاسبه کنید. (V_{BE} = ۰/۷ ولت)

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

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

$$V_B = \frac{۲۰ \times ۱۰}{۱۰ + ۴۰} = ۴V$$

محاسبه V_E:

$$V_E = V_B - V_{BE} \qquad V_E = (۴) - (۰/۷) = ۳/۳V$$

محاسبه I_E:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{۳/۳}{۱K} = ۳/۳mA$$

محاسبه I_C:

$$I_C = I_E = ۳/۳mA$$

محاسبه V_C:

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C \qquad V_C = ۲۰ - (۲ \times ۳/۳) \qquad V_C = ۱۳/۴V$$

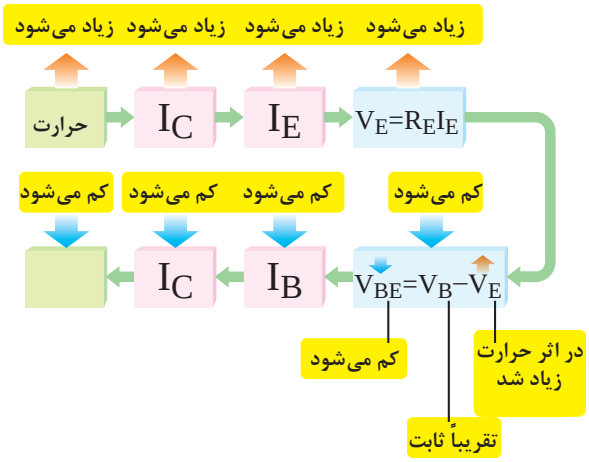
پخش فیلم

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

چگونگی تثبیت نقطهٔ 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 نشتی 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 به‌دست 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 شدهٔ اولیهٔ خود برمی‌گردد. این تغییرات را می‌توان به‌صورت روبه‌رو نشان داد:

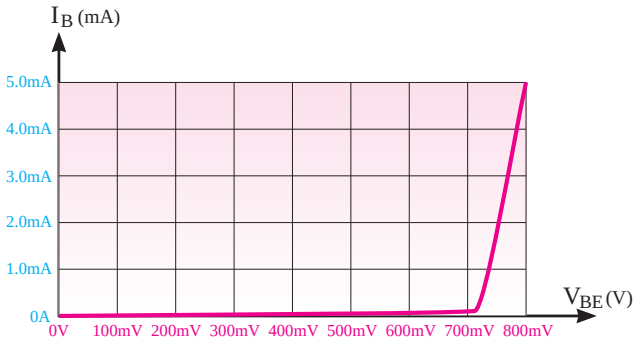


چگونگی تثبیت نقطهٔ کار توسط RE

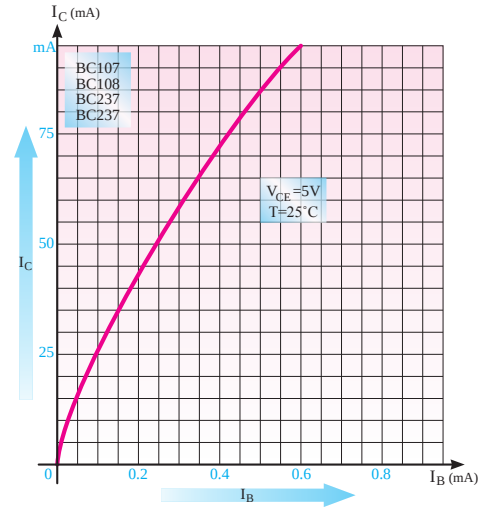
منحنی مشخصه‌های ترانزیستور

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

منحنی مشخصه ورودی: منحنی مشخصهٔ ورودی ترانزیستور بیان‌کنندهٔ مقدار جریان ورودی I_B، برحسب ولتاژ ورودی V_{BE} است. همان‌طوری که مدار ورودی شبیه یک دیود است منحنی مشخصهٔ آن نیز شبیه منحنی مشخصهٔ ولت ـ آمپر دیود معمولی است. باید توجه داشت که در ترانزیستور منحنی مشخصهٔ 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 جزیی است و در اکثر موارد می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. مقدار ولتاژ V_{CE} را، که به‌ازای آن منحنی مشخصهٔ ورودی رسم شده است، کارخانه سازنده مشخص می‌نماید. در شکل روبه‌رو، منحنی مشخصهٔ ورودی ترانزیستوری از جنس سیلیسیم رسم شده است.



منحنی مشخصهٔ ورودی ترانزیستوری از جنس سیلیسیم

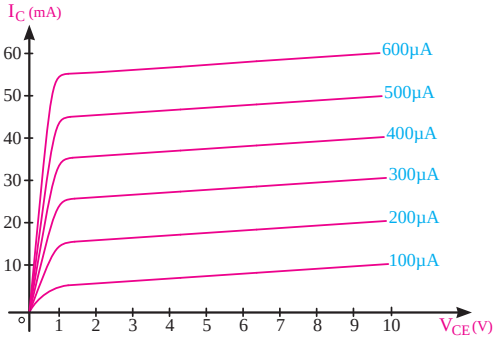


منحنی مشخصهٔ انتقالی

منحنی مشخصه انتقالی: منحنی مشخصهٔ انتقالی، رابطهٔ بین جریان ورودی I_B و خروجی I_C ترانزیستور را به‌ازای مقادیرثابت V_{CE} نشان می‌دهد. شکل روبه‌رو منحنی مشخصه انتقالی ترانزیستور BC۱۰۷ را به ازای $V_{CE} = ۵V$ نشان می‌دهد. چون ضریب تقویت جریان، برابر نسبت جریان خروجی به‌ورودی است، لذا از این منحنی می‌توان ضریب تقویت جریان را به‌دست آورد. ضریب تقویت جریان را با β نشان می‌دهند. مقدار β بستگی به مشخصات فیزیکی و ساخت ترانزیستور دارد.

.

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



منحنی مشخصهٔ خروجی

منحنی مشخصه خروجی: منحنی مشخصهٔ خروجی رابطهٔ 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 مشخصهٔ خروجی ترانزیستور، شامل ۳ ناحیهٔ قطع، فعال و اشباع است.

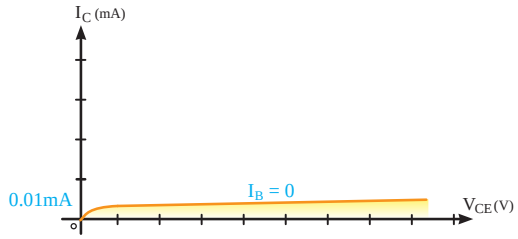
نواحی کار ترانزیستور

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

ناحیهٔ قطع

$$I_B = ۰$$
$$I_C = ۰$$
$$V_{CE} \approx V_{CC}$$

شکل زیر ناحیهٔ قطع را روی منحنی مشخصهٔ خروجی نشان می‌دهد.

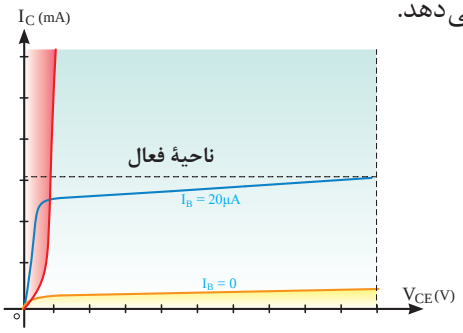


ناحیهٔ قطع

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

ناحیهٔ فعال $I_B \neq ۰$ ، $I_C \neq ۰$ ، $V_{CE} \neq ۰$

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

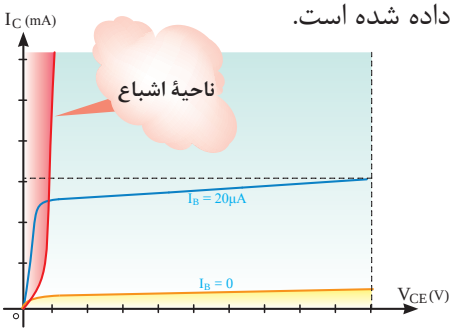


ناحیهٔ فعال روی منحنی مشخصه خروجی

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

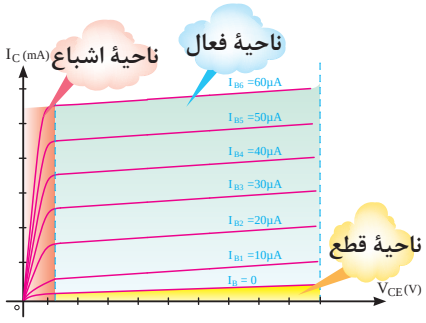
ناحیهٔ اشباع $I_B \neq ۰$ ، $I_C \neq ۰$ تقریباً حداکثر ، $V_{CE} \neq ۰$ تقریباً حداقل ، $V_{CE} \cong ۰/۲۷$

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



ناحیهٔ اشباع در روی منحنی مشخصه خروجی

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



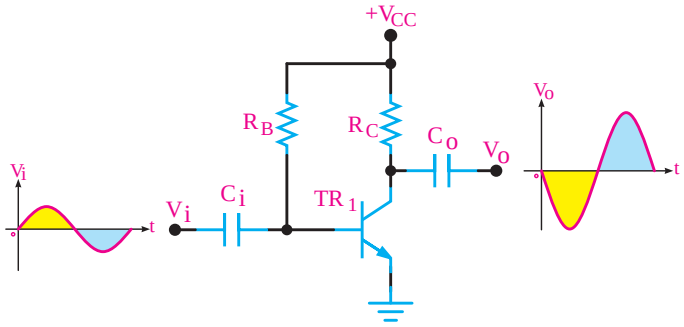
سه ناحیهٔ کار روی منحنی مشخصه خروجی

چگونگی عمل تقویت کنندگی در ترانزیستور

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

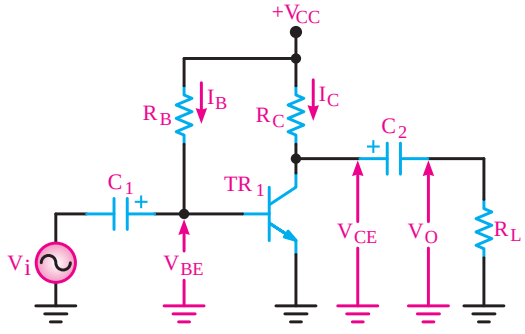
$$A_V = \frac{\text{دامنه سیگنال خروجی}}{\text{دامنه سیگنال ورودی}} = \frac{V_O}{V_i}$$

شکل زیر مدار یک تقویت‌کنندهٔ ساده را با تغذیه ثابت نشان می‌دهد.

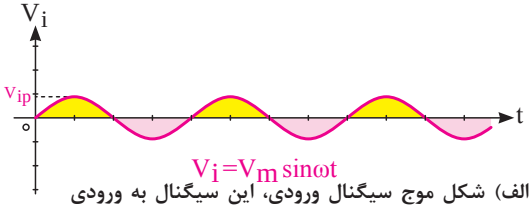


مدار یک تقویت‌کنندهٔ ساده

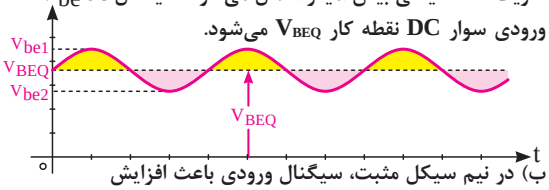
در مدار فوق Ci **خازن کوپلاژ** نام دارد و مانع عبور سیگنال DC است و فقط سیگنال AC ورودی را به بیس ترانزیستور اعمال می‌کند. Co نیز خازن کوپلاژ است و مانع عبور سیگنال DC به بار می‌شود و فقط سیگنال AC از آن عبور می‌نماید. نحوهٔ تقویت سیگنال متناوب ورودی در شکل‌های الف تا ج تشریح شده است.



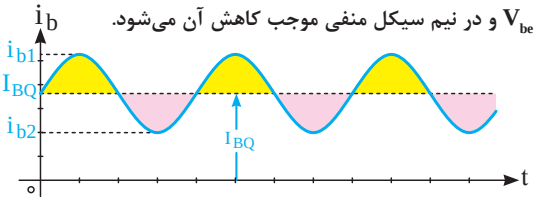
مدار یک تقویت کنندهٔ نمونه



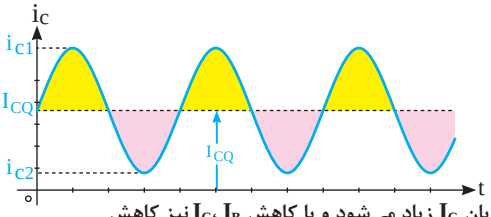
الف) شکل موج سیگنال ورودی، این سیگنال به ورودی تقویت‌کننده، یعنی بیس امیتر اعمال می‌شود. سیگنال V_{be} ac ورودی سوار DC نقطه کار V_{BEQ} می‌شود.



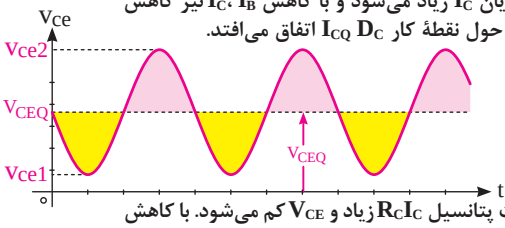
ب) در نیم سیکل مثبت، سیگنال ورودی باعث افزایش V_{be} و در نیم سیکل منفی موجب کاهش آن می‌شود.



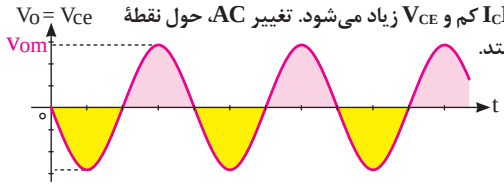
پ) شکل موج جریان بیس، افزایش ولتاژ دو سر پیوند بیس امیتر موجب افزایش جریان بیس می‌شود و کاهش این ولتاژ، کاهش جریان بیس را به دنبال دارد. تغییرات I_B حول نقطهٔ کار DC I_{BQ} اتفاق می‌افتد.



ت) با افزایش I_B جریان I_C زیاد می‌شود و با کاهش I_B، I_C نیز کاهش می‌یابد. تغییرات I_C حول نقطهٔ کار DC I_{CQ} اتفاق می‌افتد.



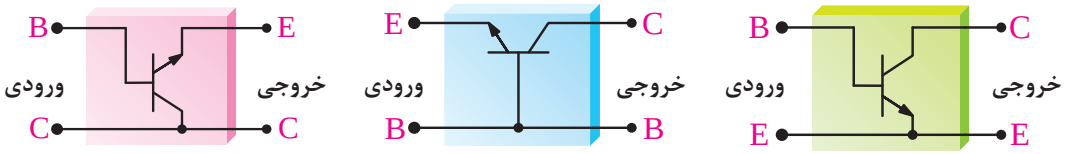
ث) با افزایش I_C، افت پتانسیل R_CI_C زیاد و V_{CE} کم می‌شود. با کاهش I_C، افت پتانسیل I_CR_C کم و V_{CE} زیاد می‌شود. تغییر AC، حول نقطهٔ کار V_{CEQ} اتفاق می‌افتد.



ج) خازن C_2 مؤلفهٔ DC D_C سیگنال کلکتور را حذف می‌کند و فقط سیگنال ac به بار می‌رسد. مشاهده می‌شود تغییرات سیگنال AC در دو سر بار نسبت به سیگنال ورودی بسیار بیشتر است و سیگنال در خروجی تقویت شده است.

آرایش‌های تقویت‌کننده ترانزیستوری

در تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری همیشه سیگنال ورودی به دو پایه از سه پایهٔ ترانزیستور داده می‌شود و سیگنال خروجی از دو پایهٔ آن گرفته می‌شود به طوری که یکی از پایه‌ها بین ورودی و خروجی، مشترک است. لذا با توجه به پایهٔ مشترک، نام آرایش انتخاب می‌شود.



تقویت‌کننده کلاس A: برحسب اینکه یک تقویت‌کننده در چه کسری از یک پریود کامل (T) فعال باشد، آن را در یکی از کلاس‌های A، B، AB یا C جای می‌دهند. به تقویت‌کننده‌هایی که تمام موج ورودی را به‌طور کامل عبور می‌دهند، تقویت‌کننده‌های کلاس A می‌گویند. یک تقویت‌کننده کلاس A همواره در ناحیه فعال کار می‌کند. تقویت‌کننده‌هایی که در ادامه می‌آیند نیز کلاس A هستند.

پخش فیلم

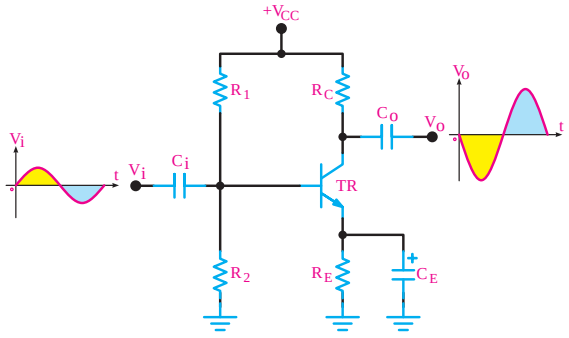
در این فیلم ساخت، یک تقویت‌کننده صوتی امیتر مشترک پخش می‌شود.

پخش فیلم

دراین فیلم شبیه‌سازی تقویت‌کننده امیتر مشترک پخش می‌شود.

تحلیل تقویت‌کننده امیتر مشترک (CE):

تقویت‌کننده امیتر مشترک، بیشترین کاربرد در انواع تقویت‌کننده‌ها را دارد. تقویت‌کننده امیتر مشترک علاوه برتقویت جریان، تقویت ولتاژ را نیز انجام می‌دهد و به همین دلیل، در بسیاری از موارد، نسبت به تقویت‌کننده‌های دیگر برتری دارد. مدار زیر یک تقویت‌کننده ساده صوتی عملی با آرایش امیتر مشترک را نشان می‌دهد مدار بایاس این تقویت‌کننده از نوع خودکار است. در مدار شکل زیر یک تقویت‌کننده امیتر مشترک با بایاس سرخود را مشاهده می‌کنید.



تقویت‌کننده امیتر مشترک

این تقویت‌کننده هم جریان و هم ولتاژ را تقویت می‌کند. بنابراین از این مدار می‌توان در تقویت‌کننده‌های انتهایی، میانی و ابتدایی مدارهای الکترونیکی استفاده کرد. پهنای باند تقویت‌کننده امیتر مشترک نسبتاً خوب است. همچنین بین ولتاژ ورودی و خروجی این نوع تقویت‌کننده ۱۸۰ درجه اختلاف فاز به‌وجود می‌آید. خازن‌های Ci و Co در مدار نیز خازن کوپلاژ است. همان‌طوری که ملاحظه شد R_E باعث پایداری حرارتی نقطه کار در مدار می‌شود. بنابراین برای پایداری نقطه کار وجود R_E ضروری و اجتناب ناپذیر است. از طرفی وجود R_E باعث کاهش بهره A_V درمدار می‌شود، زیرا ولتاژ AC دوسر R_E افت می‌کند. برای خنثی‌سازی اثر R_E در مقابل سیگنال ac خازنی C_E را به دوسر R_E متصل می‌کنند. این خازن یک **خازن بای پاس** است که هنگام عبور سیگنال AC به‌صورت اتصال کوتاه عمل می‌کند و اثر مقاومت R_E را از بین می‌برد به بیانی دیگر سیگنال AC بر روی مقاومت R_E تلف نمی‌شود.

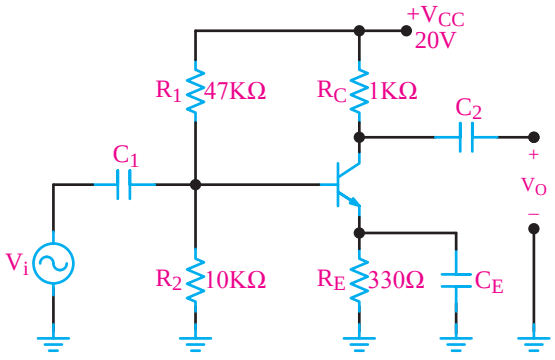
تعیین مقدار ظرفیت خازن بای پاس: برای آنکه خازن بای پاس بتواند درمقابل سیگنال ac به‌صورت اتصال کوتاه عمل کند، باید ظرفیت آن را بزرگ انتخاب کنند. برای تعیین مقدار ظرفیت خازن ابتدا رابطه مقدار مقاومت ظاهری خازن Xc را برای کمترین فرکانس ورودی حساب می‌کنیم.

$$X_C = \frac{۱}{۲\pi f_{min} C}$$

سپس Xc را برابر $\frac{X_C}{۱۰}$ قرار می‌دهند سپس مقدار C را محاسبه می‌کنند:

$$X_C = \frac{R_E}{۱۰} = \frac{۱}{۲\pi f_{min} C}$$

مثال۶: در تقویت‌کننده 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 بای‌پاس شود؟



تقویت‌کننده امیتر مشترک

پاسخ:

محاسبه مقاومت خازن

$$X_C = \frac{R_E}{۱۰} = \frac{۳۳۰}{۱۰} = ۳۳\Omega \qquad X_C = \frac{۱}{۲\pi f_{min} C}$$

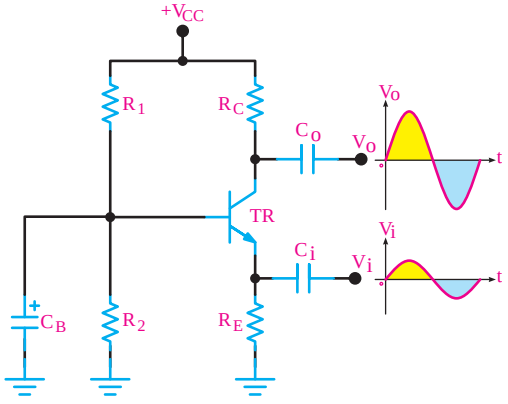
محاسبه C_E:

$$\frac{۱}{۲\pi f_{min} C_E} = \frac{R_E}{۱۰} = ۳۳\Omega \qquad C_E = \frac{۱}{۲\pi(۵۰۰)(۳۳)} F \qquad C_E = ۹/۶۵\mu F = ۱۰\mu F$$

پخش فیلم

شبیه‌سازی تقویت‌کننده بیس مشترک

تحلیل تقویت‌کننده بیس مشترک: در این آرایش سیگنال متناوب ورودی به امیتر اتصال داده می‌شود و سیگنال خروجی از کلکتور دریافت می‌شود. پایهٔ بیس بین ورودی و خروجی مشترک است. خازن‌های Ci و Co در مدار نیز خازن کوپلاژ و C_B خازن بای‌پاس است. تقویت‌کننده بیس مشترک یک تقویت‌کننده ولتاژ است و بهره ولتاژ آن زیاد است و باند فرکانسی وسیع‌تری نسبت به تقویت‌کننده امیتر مشترک دارد. در این آرایش ولتاژهای ورودی و خروجی هم فاز هستند.

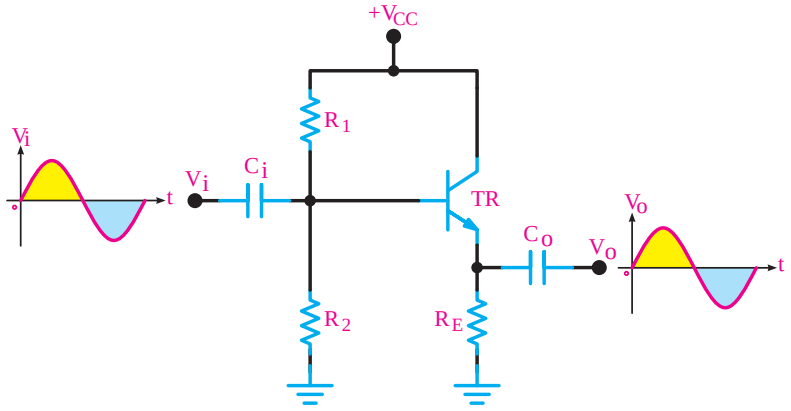


تقویت‌کننده بیس مشترک

پخش فیلم

شبیه‌سازی تقویت‌کننده کلکتور مشترک

تحلیل تقویت‌کننده کلکتور مشترک: در این آرایش سیگنال متناوب ورودی به بیس اتصال داده می‌شود و سیگنال خروجی از امیتر دریافت می‌شود. به این ترتیب پایهٔ کلکتور پایهٔ مشترک بین ورودی و خروجی است. شکل زیر این آرایش را نشان می‌دهد. این تقویت‌کننده دارای بهرهٔ ولتاژ کم و بهرهٔ جریان زیاد است و فقط سیگنال AC را از لحاظ جریانی تقویت می‌کند. از این تقویت‌کننده به عنوان تقویت‌کنندهٔ جریان در رگولاتورها و تقویت‌کننده‌های صوتی استفاده می‌شود. از این تقویت‌کننده به عنوان تطبیق‌دهنده امپدانس بین دو طبقه تقویت‌کننده استفاده می‌شود.



تقویت‌کننده کلکتور مشترک

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

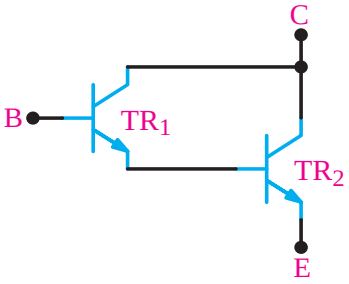
نوع آرایش	بهرهٔ ولتاژ A_V	بهرهٔ جریان A_I
امیتر مشترک CE	متوسط	متوسط
بیس مشترک CB	زیاد	کم و کوچک‌تر از ۱
کلکتور مشترک CC	کم و کوچک‌تر از ۱	زیاد

مقایسه سه تقویت‌کننده

پخش فیلم

شبیه سازی زوج دارلینگتون

زوج دارلینگتون Darlington Pair: یک نمونه از تقویت‌کننده‌های دوطبقه زوج دارلینگتون است که در شکل روبه‌رو نشان داده شده است. از آنجا که ترانزیستورهای قدرت اغلب دارای βی کوچکی هستند، برای به‌دست آوردن βی بزرگتر، و تقویت جریان بیشتر از ترانزیستورهای زوج دارلینگتون استفاده می‌شود.

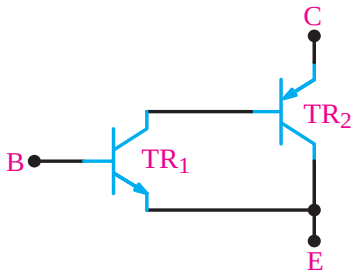


زوج دارلینگتون NPN

اگرضریب 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 به‌دست می‌آید.

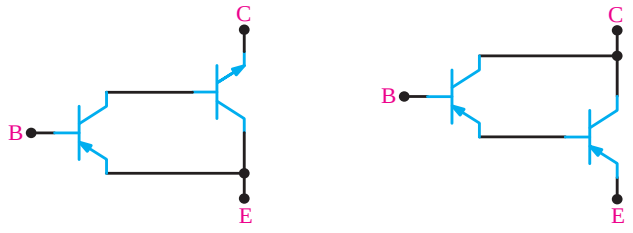
$$\beta_T = \beta_1 . \beta_2$$

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



معادل زوج دارلینگتون NPN

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.



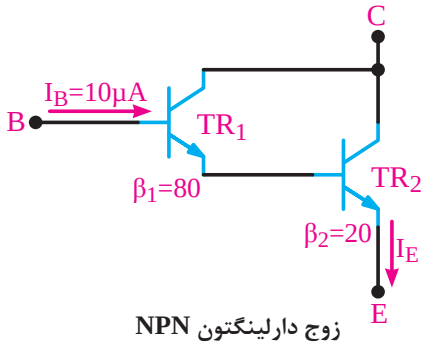
زوج دارلینگتون PNP و معادل آن

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

زوج دارلینگتون در یک بسته بندی

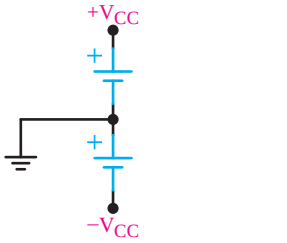
تمرین

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

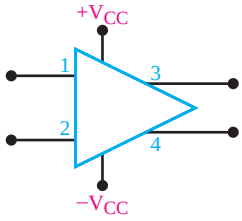


زوج دارلینگتون NPN

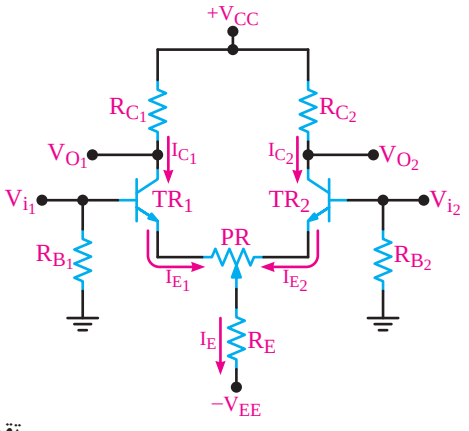
تقویت‌کنندهٔ تفاضلی: در تقویت‌کننده‌های معمولی مانند امیتر مشترک با انتخاب R_E و بای‌پاس نمودن آن توسط خازن، می‌توان به‌ضریب تقویت کافی وپایداری حرارتی مناسب دست یافت. ولی به‌دلیل وجود خازن بای پاس در این نوع تقویت‌کننده‌ها فرکانس‌های کم و سیگنال DC به‌درستی تقویت نمی‌شوند و ضریب تقویت کاهش می‌یابد. برای تقویت سیگنال‌های با فرکانس پایین و DC از تقویت‌کنندهٔ تفاضلی (differential amp) استفاده می‌کنیم. یکی دیگر از مشکلات تقویت‌کننده‌ها 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. در صورتی که تقویت‌کنندهٔ تفاضلی دارای قابلیت تفکیک سیگنال از نویز است. و می‌تواند نویز را تضعیف و سیگنال را تقویت کند. نقشهٔ سادهٔ یک تقویت‌کنندهٔ 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 VCC+ و VEE- به‌نقاط موردنظر و سیم مشترک آن به زمین وصل شده است.



چگونگی ایجاد خط تغذیهٔ متقارن

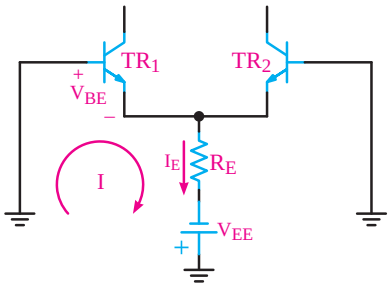


نقشه فنی تقویت‌کنندهٔ تفاضلی



تقویت‌کنندهٔ تفاضلی

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



ورودی kvL $\Rightarrow R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E - V_{EE} = ۰$

با توجه به ناچیز بودن I_B می‌توانیم از آن صرف نظر کنیم، بنابراین $R_B I_B = ۰$ می‌شود پس:

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

به شرط تقارن مدار

$$I_{E۱} = I_{E۲} = I_{C۱} = I_{C۲} = \frac{I_E}{۲}$$

همچنین

$$V_{C۱} = V_{C۲} = V_{CC} - R_{C۱} I_{C۱}$$

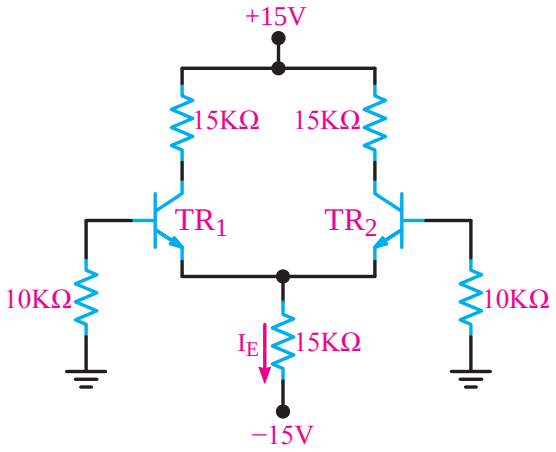
با فرض صفر بودن I_B مقدار $V_B = ۰$ می‌شود پس:

$$V_{E۲} = V_{E۱} = V_B - V_{BE} \Rightarrow V_{E۲} - V_{E۱} = ۰ - V_{BE} = -V_{BE}$$

$$V_{CE۱} = V_{CE۲} = V_{C۱} - V_{E۱}$$

مثال ۷: جریان I_E و ولتاژهای $V_{CE۱}$ و $V_{CE۲}$ را محاسبه کنید. از I_B ترانزیستورها صرف‌نظر کنید.

$V_{BE۱} = V_{BE۲} = ۰/۷V$ $\beta_۱ = \beta_۲ = ۲۰۰$



تقویت‌کنندهٔ تفاضلی

$$kvL:\ R_BI_B + V_{BE} + R_EI_E - V_{EE} = ۰ \xrightarrow{R_BI_B=۰} I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E} = \frac{۱۵ - ۰/۷}{۱۵K} = ۰/۹۵mA$$

$$I_{C۱} = I_{C۲} = I_{E۱} = I_{E۲} = \frac{I_E}{۲} = \frac{۰/۹۵}{۲} = ۰/۴۷mA$$

$$V_{E۲} = V_{E۱} = V_B = V_{BE} = -۰/۷$$

$$V_C = V_{CC} - R_{C۱}I_{C۱} = ۱۵ - (۱۵k \times ۰/۴۷mA) = ۱۵ - ۷/۰۵ = ۷/۹۵V \Rightarrow$$

$$V_{C۱} = V_{C۲} = ۷/۹۵mA$$

$$V_{CE۱} = V_{CE۲} = V_{C۱} - V_{E۱} = ۷/۹۵ - (-۰/۷) = ۸/۶۵V$$

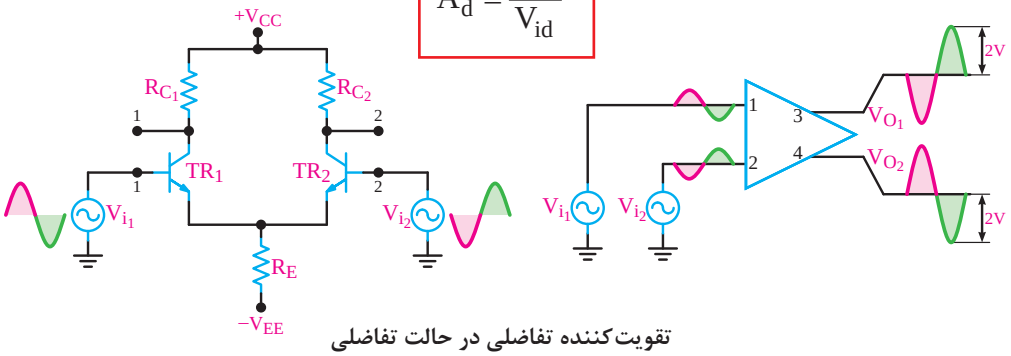
پخش فیلم

شبیه‌سازی تقویت‌کننده تفاضلی در حالت تفاضلی

بررسی رفتار AC تقویت‌کننده تفاضلی

الف) تقویت‌کننده تفاضلی در حالت تفاضلی: اگر سیگنال AC موردنظر را به‌صورت دو سیگنال با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه به ورودی‌های تقویت‌کننده تفاضلی اعمال کنیم این سیگنال به‌صورت مطلوبی تقویت می‌شود بهره ولتاژ تقویت‌کننده دراین حالت از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$A_d = \frac{V_{od}}{V_{id}}$$



تقویت‌کننده تفاضلی در حالت تفاضلی

پخش فیلم

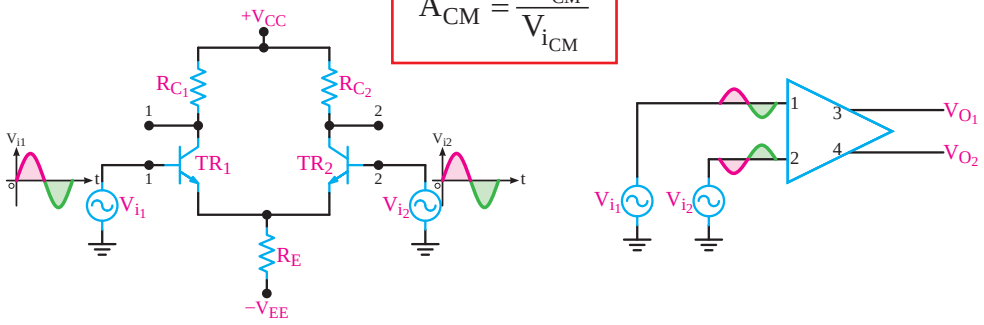
شبیه‌سازی تقویت‌کننده تفاضلی درحالت سیگنال مشترک

پخش فیلم

شبیه‌سازی تقویت‌کننده تفاضلی در حذف نویز

ب) تقویت‌کننده تفاضلی درحالت سیگنال مشترک: یکی از مهم‌ترین کاربردهای تقویت‌کننده تفاضلی حالت سیگنال مشترک است. در این حالت دو سیگنال با فاز، دامنه و فرکانس مساوی به دو ورودی تقویت‌کننده داده می‌شود. شکل زیر مدار تقویت‌کننده تفاضلی را دراین حالت نشان می‌دهد. در این حالت سیگنال‌ها در خروجی اثر هم را خنثی می‌کنند لذا V_{O1} و V_{O2} مساوی صفر می‌شود. البته در حالت ایده‌آل خروجی صفر نمی‌شود ولی به‌شدت تضعیف می‌شود. تضعیف بهره ولتاژ تقویت‌کننده در این حالت از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$A_{CM} = \frac{V_{o_{CM}}}{V_{i_{CM}}}$$



تقویت‌کننده تفاضلی در حالت سیگنال مشترک

ضریب حذف سیگنال مشترک CMRR (Common Mode Rejection Ratio) در یک تقویت‌کننده تفاضلی سیگنال ورودی را به‌صورت تفاضلی به دو ورودی اعمال می‌کنیم. این سیگنال مطابق آنچه که شرح داده شد، پس از تقویت در خروجی‌ها ظاهر می‌شود. همچنین سیگنال ناخواسته (نویز یا پارازیت) روی خط‌های ورودی به‌صورت یکسان می‌نشیند. در این حالت تقویت‌کننده تفاضلی برای نویز درحالت سیگنال مشترک عمل می‌کند و نویز را در خروجی حذف می‌نماید. 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 می‌نامند.

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

مثال۸: در یک تقویت‌کننده تفاضلی بهره سیگنال مشترک ۰/۲ است و بهره تفاضلی ۲۰۰۰ است. CMRR را محاسبه کنید؟ مفهوم عدد به‌دست آمده چیست؟ شرح دهید.

پاسخ:

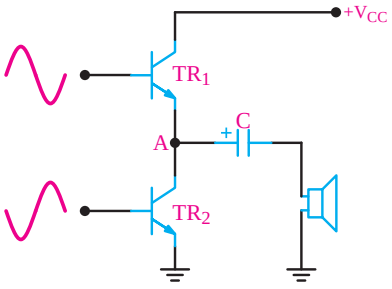
$$A_d = ۲۰۰۰ \qquad A_{CM} = ۰/۲ \qquad CMRR = \frac{A_d}{A_{CM}} = \frac{۲۰۰۰}{۰/۲} = ۱۰۰۰۰$$

CMRR برابر ۱۰۰۰۰ به این مفهوم است که سیگنال هدف ۱۰۰۰۰ مرتبه بیشتر از سیگنال ناخواسته(نویز) تقویت می‌شود.

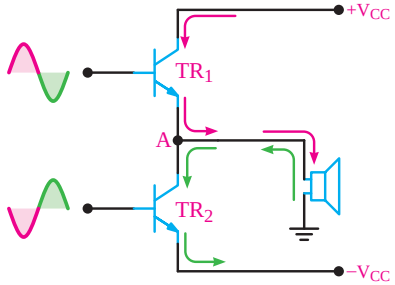
تقویت‌کننده کلاس B: بازده تقویت‌کننده‌های کلاس A به‌علت تلفات زیادی که دارد بسیار کم است و از ۵۰ درصد تجاوز نمی‌کند. تلفات زیاد توان در این تقویت‌کننده‌ها در اثر برقراری دائمی جریان کلکتور به وجود می‌آید، اگر ترانزیستور را در ناحیه قطع بایاس کنیم، هنگامی که سیگنال وجود ندارد، از

کلکتور ترانزیستور جریانی نمی‌گذرد بنابراین توان تلف شده درحالت 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_1 خاموش و ترانزیستور TR_2 روشن می‌شود. دراین 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



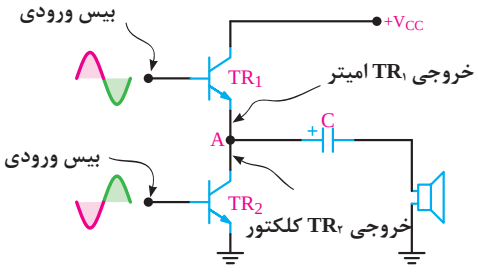
تقویت‌کننده با منبع تغذیهٔ متقارن

$$V_A = \frac{V_{CC}}{۲}$$

$V_A = ۰$

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.



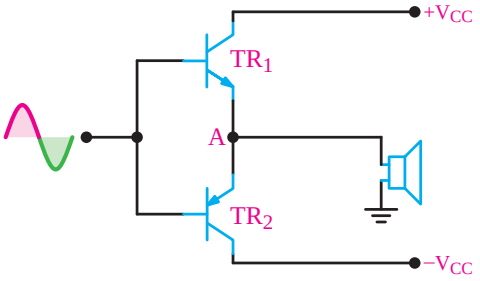
دو ترانزیستور آرایش‌های متفاوت دارند.
تقویت‌کننده پوش پول

پخش فیلم

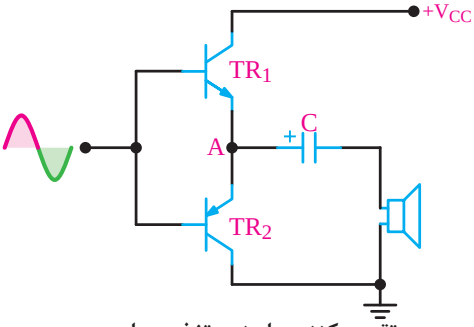
شبیه‌سازی تقویت‌کننده پوش پول با ترانزیستورهای مکمل

تقویت‌کننده پوش پول با ترانزیستورهای مکمل (Complementary): در تقویت‌کننده با ترانزیستورهای مکمل چون هر دو ترانزیستور به‌صورت کلکتور مشترک عمل می‌کنند، هر دو ترانزیستور مشخصات یکسانی دارند لذا سیگنال خروجی کامل متقارن است. همچنین از آنجایی که هر دو آرایش کلکتور مشترک دارند از این‌رو تقویت جریان را در خروجی انجام می‌دهند. در شکل صفحهٔ بعد دو تقویت‌کننده کامپلی منتاری را با منبع تغذیه ساده و منبع تغذیه متقارن نشان داده شده است.

تقویت‌کننده پوش پول ترانزیستورهای مکمل(Complementary)

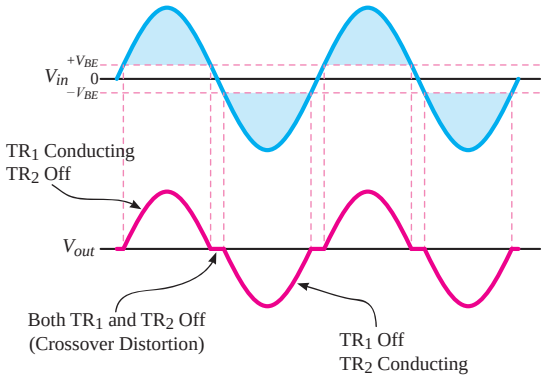


تقویت‌کننده با منبع تغذیه متقارن



تقویت‌کننده با منبع تغذیه ساده

معایب پوش پول کلاس B: چون هر دو ترانزیستور در ناحیه قطع بایاس شده‌اند، دیود بیس امیتر ترانزیستورها باید توسط سیگنال متناوب ورودی روشن شود لذا حدود۰/۷ ولتاژ دامنه سیگنال ورودی برای بایاس بیس به‌کار می‌رود و تقویت نمی‌شود. پس در شکل موج خروجی تغییرشکل (اعوجاج) مطابق شکلبه وجود می‌آید. این تغییر شکل را، اعوجاج تقاطعی (distortion crossover) می‌نامند. برای برطرف کردن این عیب باید ترانزیستورها را در کلاس AB بایاس کنیم. این کار را با روش‌های مختلف می‌توانیم انجام دهیم.

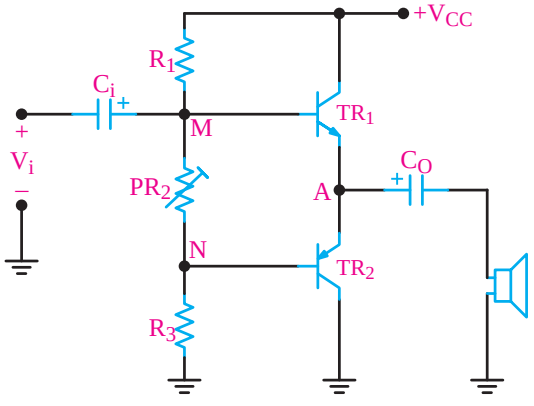


اعوجاج تقاطعی در خروجی

قرار دادن ترانزیستورها در آستانهٔ هدایت (کلاس AB)

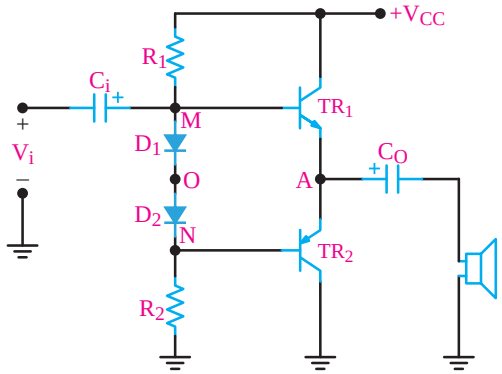
با روش‌های مختلف می‌توان بیس امیتر ترانزیستورهای TR_1 و TR_2 را در آستانه هدایت یعنی ۰/۶ قرار دهیم.

الف) استفاده از مقاومت‌های تقسیم کنندهٔ ولتاژ: با تنظیم PR_2 می‌توان پتانسیل نقاط M تا N را در حدود ۱/۲ ولت تنظیم کنیم تا ترانزیستورها در آستانه هدایت قرار گیرند.



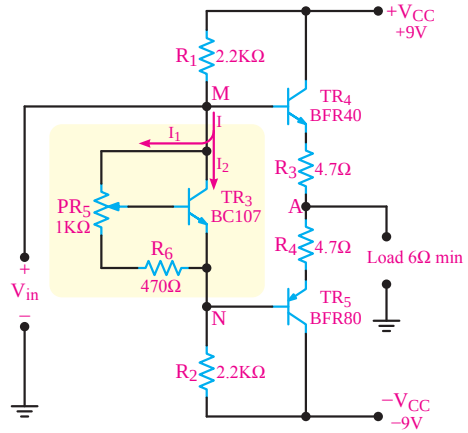
تقویت‌کننده پوش پول با استفاده از مقاومت‌های تقسیم کنندهٔ ولتاژ

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 ۰/۶ ولت افت ولتاژ وجود دارد. به این ترتیب پتانسیل نقاط MN در حدود ۱/۲ ولت تثبیت می‌شود.



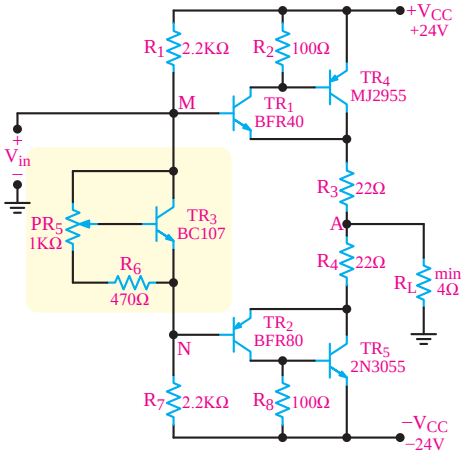
تنظیم پتانسیل MN توسط دو دیود
تقویت‌کننده پوش پول با استفاده از دیود

پ) استفاده از رگولاتور موازی: مناسب‌ترین روش تأمین ولتاژ بین بیس ترانزیستورها استفاده از یک ترانزیستور دیگر به‌عنوان رگولاتور ولتاژ است. در شکل روبه‌رو نمونه چنین مداری را مشاهده می‌کنید. دراین مدار ترانزیستور TR_3 به صورت یک تثبیت‌کننده ولتاژ عمل می‌کند و **همواره اختلاف پتانسیل بین دونقطه M و N را مساوی۱/۲ ولت ثابت نگه می‌دارد.**



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

استفاده از زوج دارلینگتون برای افزایش قدرت خروجی: درصورتی 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.

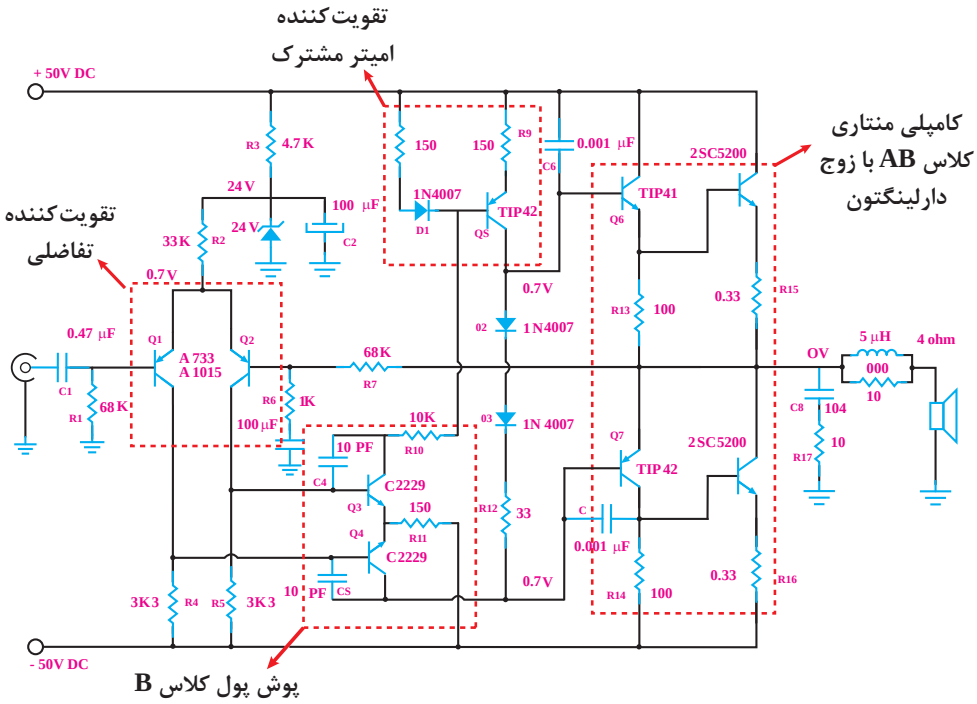


استفاده از زوج دارلینگتون برای افزایش قدرت تقویت‌کننده
تقویت‌کننده پوش پول با استفاده از زوج دارلینگتون

فعالیت عملی

ساخت یک تقویت‌کننده صوتی ترانزیستوری

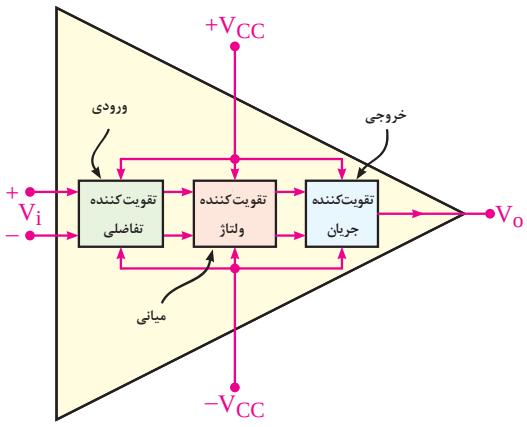
در شکل زیر مدار یک تقویت‌کننده صوتی عملی را مشاهده می‌کنید. در این مدار تقویت‌کننده‌هایی که تاکنون توضیح داده شده‌اند مشاهده می‌شود. همچنین اطلاعات تکمیلی این پروژه در لوح فشرده ضمیمه شده است.



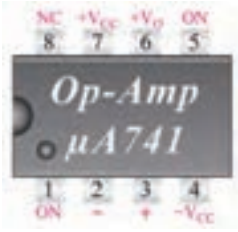
پروژه عملی ساخت یک تقویت‌کننده صوتی

آشنایی با تقویت‌کننده عملیاتی (op ـ Amp)

تقویت‌کننده‌های عملیاتی که به اختصار (op ـ Amp) نامیده می‌شود **تقویت‌کننده‌ای با ضریب تقویت بسیار بزرگ است**. تقویت‌کننده‌های عملیاتی در سیستم‌های الکترونیکی کاربردهای متنوعی دارند. از نظر اقتصادی نیز ارزان قیمت‌اند و از مزایایی چون **ابعاد کوچک**، **قابلیت اطمینان بالا** و **پایداری حرارتی** خوب برخوردارند. تقویت‌کنندهٔ عملیاتی دارای دو یا چندطبقه تقویت‌کنندهٔ تفاضلی است که خروجی‌های هر طبقه به ورودی‌های طبقهٔ دیگر متصل شده است. در انتهای این تقویت‌کننده، یک تقویت‌کنندهٔ جریان قرار دارد که معمولاً یک مدار کامپلی منتاری است. این مدار جریان خروجی تقویت کنندهٔ تفاضلی آخر را تقویت می‌کند. خروجی تقویت‌کنندهٔ عملیاتی از خروجی مدار تقویت جریان دریافت می‌کند، همچنین ورودی‌های تقویت‌کنندهٔ عملیاتی همان ورودی‌های اولین تقویت‌کنندهٔ تفاضلی است؛ بنابراین، تقویت‌کنندهٔ عملیاتی دارای دو ورودی و یک خروجی است. در شکل روبه‌رو بلوک دیاگرام مدار داخلی op ـ Amp و پایه‌های ورودی، خروجی و تغذیهٔ آن نشان داده شده است.



بلوک دیاگرام داخلی تقویت‌کنندهٔ عملیاتی



تقویت کنندهٔ عملیاتی ۷۴۱

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

کاربردهای تقویت کنندهٔ عملیاتی

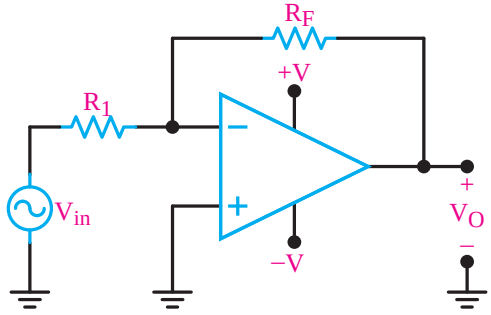
تقویت‌کننده‌های عملیاتی کاربردهای متنوعی دارند. در این قسمت، چند کاربرد مهم آنها را بررسی می‌کنیم.

پخش فیلم

شبیه‌سازی مدارات تقویت‌کننده‌های عملیاتی

تقویت‌کنندهٔ معکوس‌گر (Inverting Amplifier): مدار شکل زیر یک تقویت‌کننده معکوس‌گر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل می‌بینید سیگنال ورودی از طریق مقاومت R_1 به ورودی معکوس‌کننده(ورودی منفی) اتصال دارد. از آنجایی که سیگنال خروجی نسبت به سیگنال ورودی ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارد از این‌رو این تقویت‌کننده را معکوس‌گر گویند. بهره ولتاژ این تقویت‌کننده برابر است با:

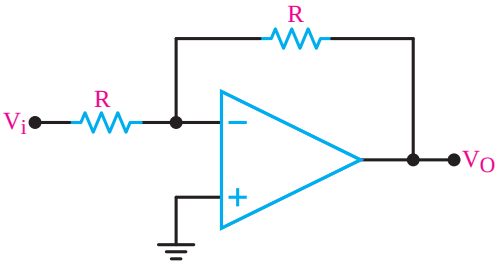
$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$



مدار یک تقویت کنندهٔ معکوس‌کننده

در این تقویت‌کننده اگر $R_1 = R_F$ باشد **بهره ولتاژ برابر ۱- می‌شود** و سیگنال ورودی و خروجی برابر با اختلاف ۱۸۰ درجه می‌شود در این حالت مدار را بافر منفی گویند.

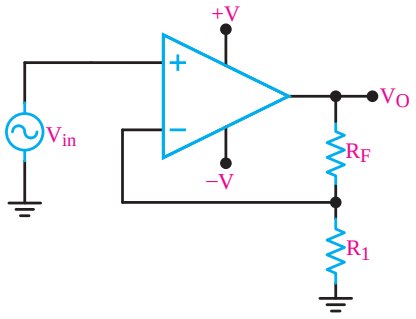
$$A_V = -\frac{R_F}{R_1} = -\frac{R}{R} = -1$$



مدار بافر منفی

تقویت‌کنندهٔ غیرمعکوس‌گر (Noninverting Amplifier):

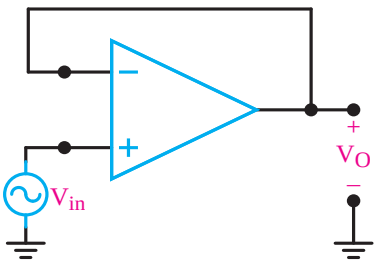
مدار شکل زیر یک تقویت‌کننده غیر معکوس‌گر را نشان می‌دهد. همان‌طورکه در شکل می‌بینید سیگنال ورودی به ورودی غیرمعکوس‌گر (ورودی مثبت) اتصال دارد. از آنجایی که سیگنال خروجی و سیگنال ورودی هم فاز هستند از این‌رو این تقویت‌کننده را غیرمعکوس‌گر گویند. بهره ولتاژ این تقویت‌کننده برابر است با:



تقویت کنندهٔ غیر معکوس کننده

$$A_V = -\frac{V_O}{V_{in}} = ۱ + \frac{R_f}{R_۱}$$

در این تقویت‌کننده اگر $R_F = ۰$ باشد بهره ولتاژ برابر ۱+ می‌شود و سیگنال ورودی و خروجی برابر و هم‌فاز می‌شود در این حالت مدار را بافر مثبت گویند.

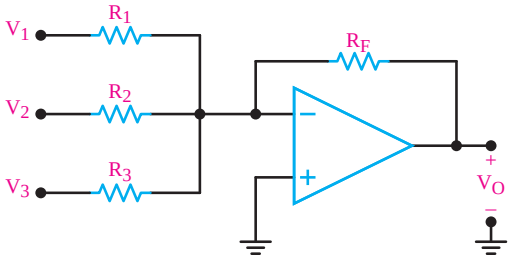


مدار بافر مثبت

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 روبه‌رو یک جمع‌کننده ولتاژ با سه ورودی را نشان می‌دهد.

در این مدار ولتاژ خروجی برابر است با:



مدار جمع کننده

$$V_O = -R_F\left(\frac{V_۱}{R_۱} + \frac{V_۲}{R_۲} + \frac{V_۳}{R_۳}\right)$$

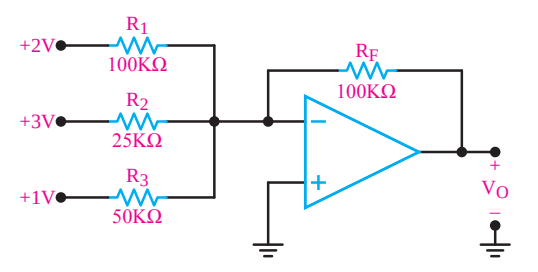
تحت شرایط خاص، چنانچه $R_۱ = R_۲ = R_۳ = R_F$ باشد.

$$V_O = -(V_۱ + V_۲ + V_۳)$$

در این حالت مدار را، مدار جمع‌کننده با بهره واحد می‌نامند.

تمرین

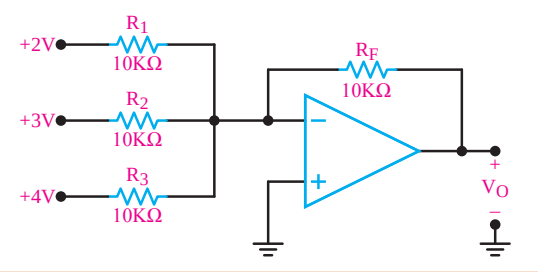
ولتاژ خروجی در مدار زیر را محاسبه کنید؟



مدار جمع‌کننده

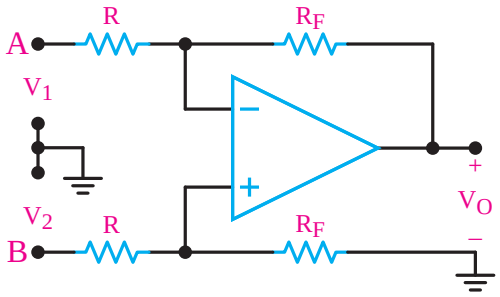
تمرین

ولتاژ خروجی در مدار زیر را محاسبه کنید؟



مدار جمع‌کننده

تقویت‌کننده با ورودی تفاضلی (تفریق‌گر): تاکنون تقویت‌کننده‌های عملیاتی را با اعمال یک سیگنال ورودی مورد بحث قرار دادیم. بسیاری از اوقات به تقویت‌کننده‌ای با ورودی تفاضلی نیازمندیم زیرا یک تقویت‌کننده 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 ثبت‌کننده می‌رسد. در شکل زیر تقویت‌کننده عملیاتی با ورودی تفاضلی نشان داده شده است.

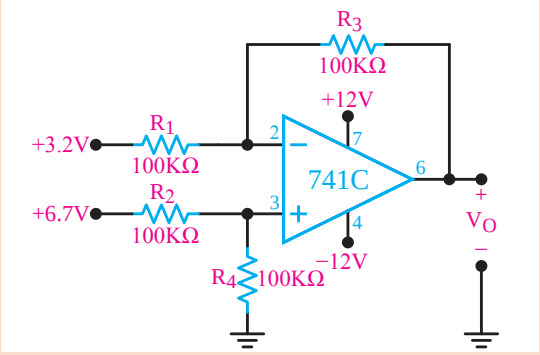


تقویت‌کننده با ورودی تفاضلی

ولتاژ خروجی تقویت‌کننده با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود.

تمرین

در شکل مقدار ولتاژ خروجی چند ولت است؟



تقویت‌کننده با ورودی تفاضلی

پخش فیلم

شبیه‌سازی مدار مقایسه‌گر در تقویت‌کننده عملیاتی

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

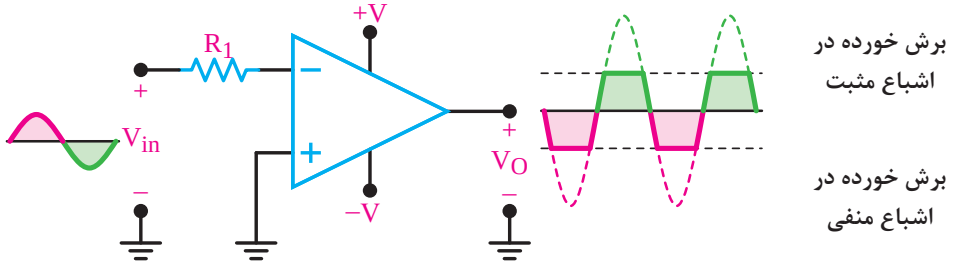
مقایسه‌کننده (Comparator): مقایسه‌کننده به مداری گفته می‌شود که ولتاژ یکی از ورودی‌های خود را با ولتاژ مبنا در ورودی دیگر مقایسه می‌کند. ولتاژ مبنا می‌تواند مثبت، منفی یا صفر باشد. درصورتی‌که مقدار ولتاژ ورودی مثبت بیشتر از ولتاژ ورودی منفی باشد خروجی به ولتاژ اشباع مثبت و اگر مقدار ولتاژ ورودی منفی بیشتر از ولتاژ ورودی مثبت باشد خروجی به اشباع منفی می‌رود. این نوع مدار را مدار مقایسه‌کننده می‌نامند.

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

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

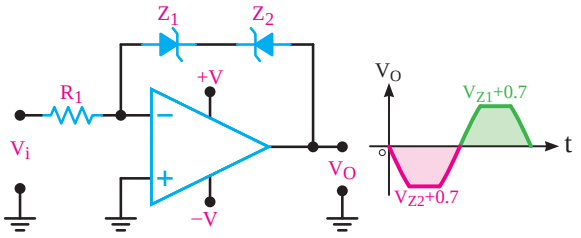
مقایسه‌کننده در مدارهای مختلفی کاربرد دارد که در ادامه به آن می‌پردازیم.

تبدیل موج سینوسی به مربعی: در شکل زیر مدار مقایسه‌کننده با ولتاژ مبنای 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 مبنا را تشکیل می‌دهد و ولتاژی که باید با مبنا مقایسه شود (V_{in}) به ورودی منفی داده شده است.



مدار مبدل امواج سینوسی به مربعی

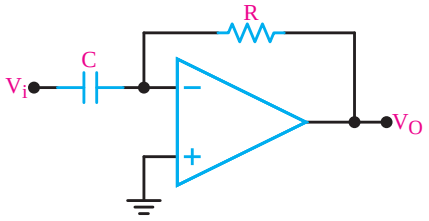
در بعضی موارد لازم است که دامنه ولتاژ خروجی در حدی کمتر از ولتاژ اشباع محدود شود. برای این منظور می‌توان با استفاده از دیود زنر در مدار فیدبک، دامنه ولتاژ خروجی را روی یک مقدار دلخواه تنظیم کرد. شکل روبه‌رو این مدار را نشان می‌دهد.



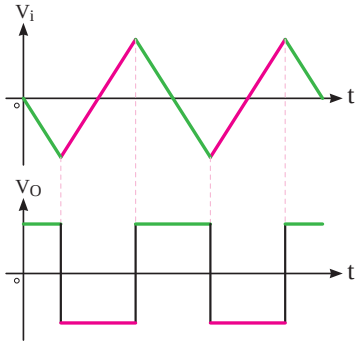
مدار مبدل امواج سینوسی به مربعی با محدودکننده دو طرفه

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 ۰/۷ است. از این رو ولتاژ خروجی به $\pm (V_Z + ۰/۷)$ محدود می‌شود.

مدارهای مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر: مدارهای مشتق گیر 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.

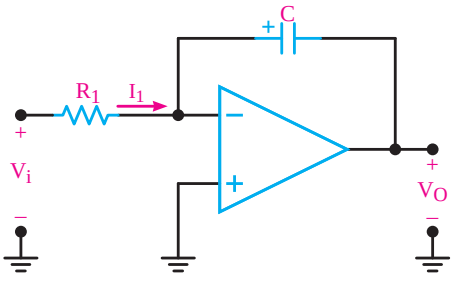


مدار مشتق‌گیر

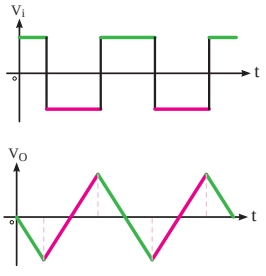


موج ورودی و خروجی مدار مشتق‌گیر

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



مدار انتگرال‌گیر



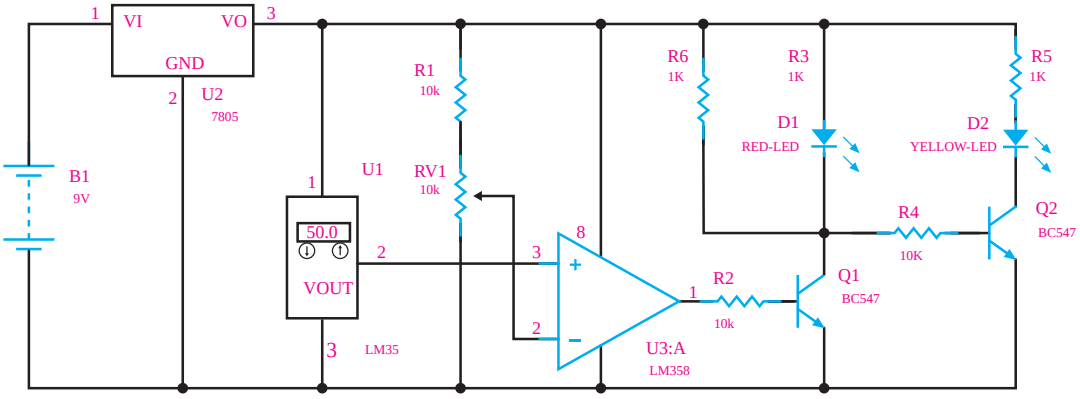
موج ورودی و خروجی مدار انتگرال‌گیر

فعالیت عملی

ساخت مدار کنترل دمای محیط با آپ امپ و LM۳۵

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: آی‌سی ۷۸۰۵ برای ارائه منبع تغذیه ۵ ولت در مدار به کار می‌رود. هنگامی که دما زیر ۵۰ درجهٔ 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 وLED زرد رنگ خاموش می‌شوند.



مدار کنترل دمای محیط با آپ امپ و LM35

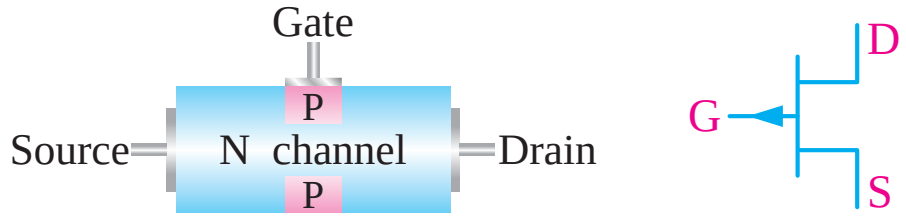
آشنایی با ترانزیستورهای اثر میدان[۱] (FET)

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 این‌رو 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 ترانزیستورهایBJT 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

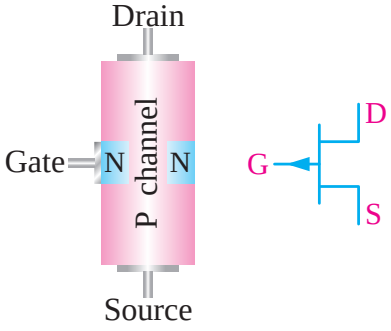
ترانزیستور JFET: اگر در یک نیمه‌هادی نوع N مانند شکل زیر یک نیمه‌هادی نوع P نفوذ دهند یک ترانزیستور JFET با کانال N تشکیل می‌شود در این حالت ناحیه N را کانال و نیمه‌هادی نوع P را دروازه یا گیت (Gate) می‌نامند. شکل زیر ساختمان JFET با کانال N، پایه‌ها و علامت اختصاری آن را نشان می‌دهد.



ساختمان و علامت اختصاری JFET با کانال N

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

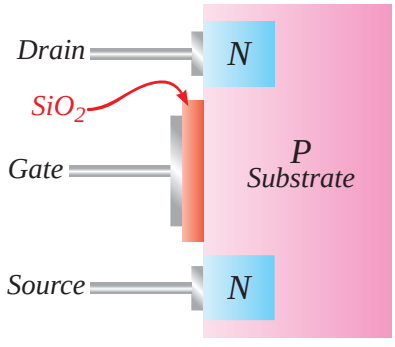
ترانزیستور MOSFET: چون در ترانزیستور JFET



ساختمان و علامت اختصاری JFET با کانال P

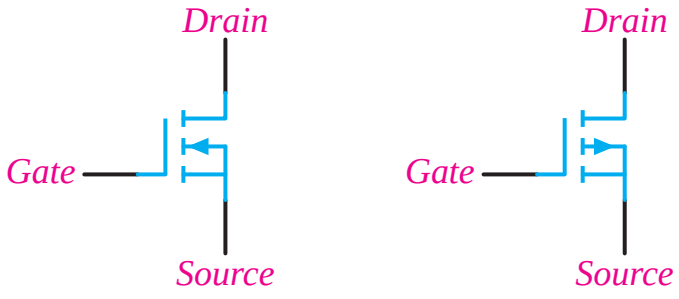
جریان نشتی پیوند گیت سورس با افزایش دمای محیط افزایش می‌یابد، ترانزیستور نسبت به حرارت تا حدودی ناپایدار است و مقاومت ورودی آن در اثر گرما به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. برای افزایش این مقاومت، می‌توان از ترانزیستور اثر میدان با گیت عایق شده استفاده کرد. در این ترانزیستور، گیت با لایه اکسید سیلیکون از 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

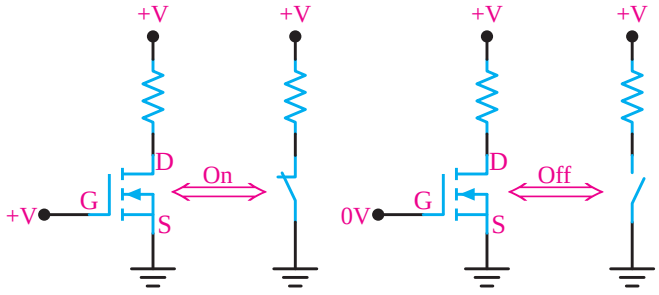


علامت اختصاری MOSFET با کانال P و N

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

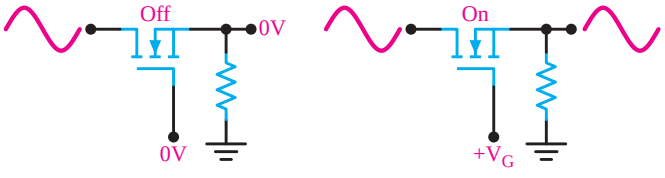
عملکرد MOSFET به عنوان کلید

اگر ولتاژ گیت سورس کمتر از ولتاژ آستانه $V_{GS(th)}$ باشد MOSFET قطع است و به‌صورت کلید باز عمل می‌کند و هنگامی که ولتاژ گیت سورس بیشتر از ولتاژ آستانه می‌شود، به صورت کلید بسته عمل می‌کند لذا با تغییر ولتاژ می‌توان به MOSFET به عنوان کلید فرمان داد. شکل زیر MOSFET با کانال N و معادل کلیدی آن را نشان می‌دهد.



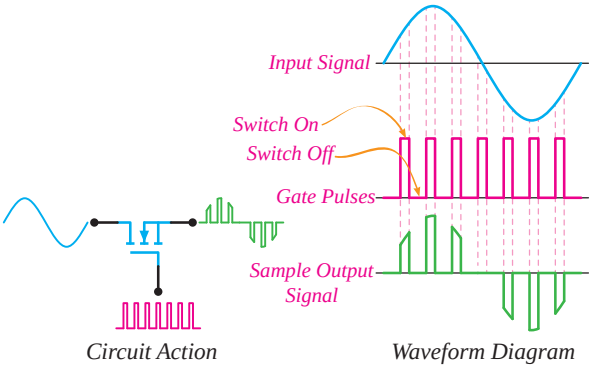
MOSFET به عنوان کلید

شکل روبه‌رو یک نمونه کاربرد سوئیچ در انتقال سیگنالی آنالوگ به خروجی را نشان می‌دهد.



یک نمونه کاربرد سوئیچ در انتقال سیگنال آنالوگ

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.



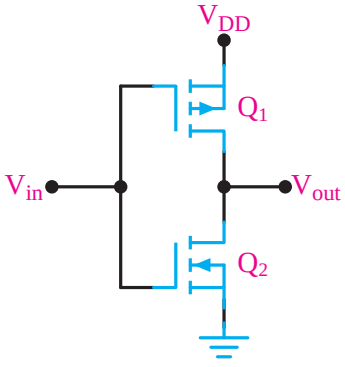
کاربرد سوئیچ آنالوگ در مدار ADC

پخش فیلم

شبیه‌سازی گیت‌های منطقی به‌وسیله MOSFET

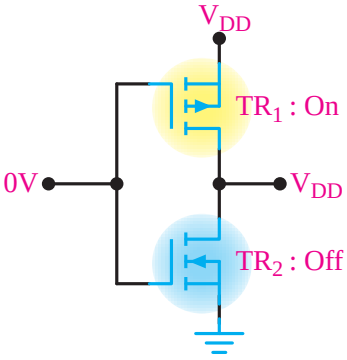
استفاده از MOSFET در مدارات مجتمع(IC)

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 راحت تر 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 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 AND – OR – NOT.... 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.



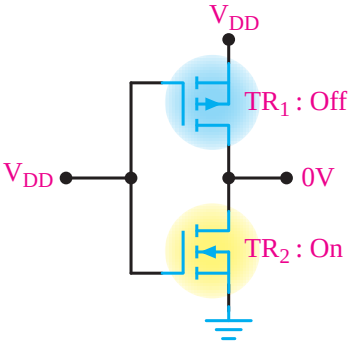
مدار داخلی گیت NOT

وقتی مانند شکل زیر V_{in} = ۰ است، TR_1 وصل و TR_2 قطع و مانند کلیدی باز عمل می‌کند و خروجی تقریباً برابر V_{DD} است.



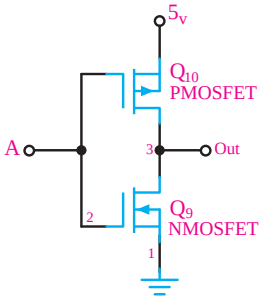
TR_1 وصل و TR_2 قطع

وقتی به Vin ولتاژ V_{DD} بدهیم TR_1 قطع و مانند کلید باز عمل می‌کند و TR_2 وصل و مانند کلید بسته عمل می‌کند و خروجی زمین شده و صفر ولت را نشان می‌دهد.



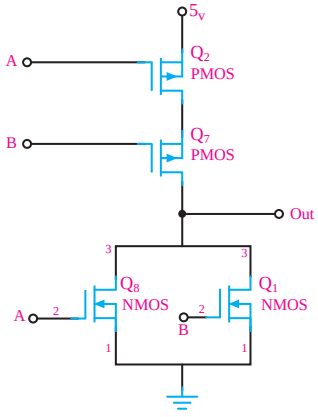
TR_1 قطع و TR_2 وصل

در شکل زیر مدار داخلی گیت‌های NOT , NOR , NAND و جدول صحت آنها را مشاهده می‌کنید. توجه داشته باشید که A و B ورودی‌های منطقی هستند همچنین ترانزیستورهای NMOS با یک منطقی و PMOS با صفر منطقی وصل می‌شود.



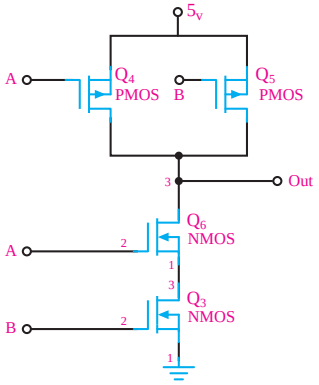
NOT

A	Out
0	1
1	0



NOR

A	B	Out
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



NAND

A	B	Out
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

مدار داخلی دروازه‌های منطقی

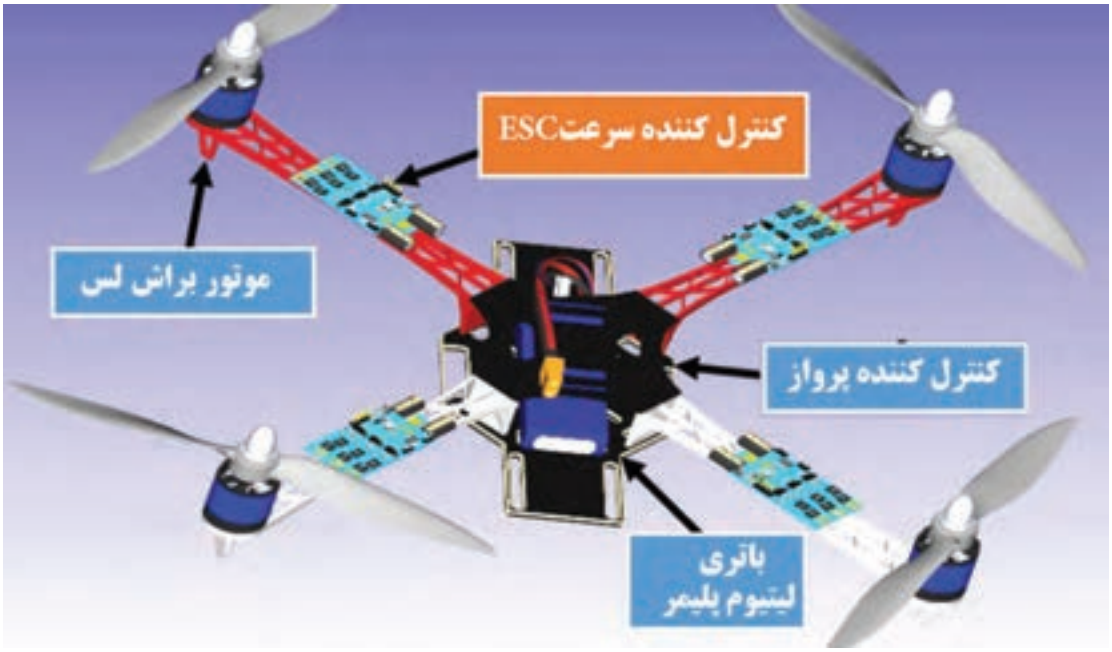
فعالیت

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

پژوهش

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 به‌صورت خلاصه بلوک‌های کواد را توضیح می‌دهیم.

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 به‌وسیله 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 گسترده ای در زمینه تصویر برداری هوایی، نقشه‌برداری، جاسوسی، تفریحی و ... دارد.



ساختار کلی یک کواد کوپتر

تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده در کوادکوپتر

موتور براشلس: موتورهای براشلس 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 electronic speed control (ESC) انجام می‌دهد. سریع‌ترین راه برای تشخیص اینکه یک موتور براشلس است یا معمولی این است که به سیم‌های آن نگاه کنید. موتورهای معمولی دو تا سیم دارند در حالی‌که موتورهای براشلس 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 آنجایی‌که 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 سیم‌پیچ‌ها قرار داده شده‌اند. در نوع Outrunner، آهنرباهای دائمی در قسمت بیرونی قرار گرفته‌اند. همان‌طور 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 Outrunner

موتور براشلس

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

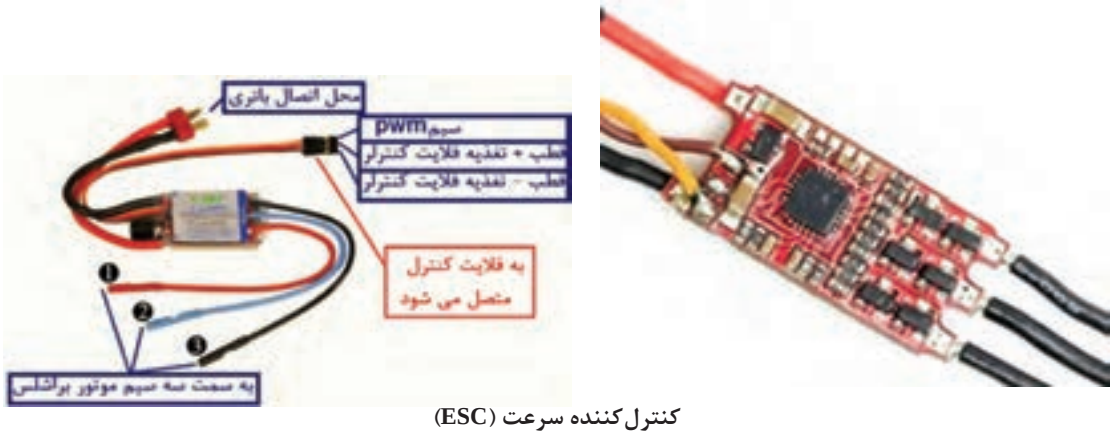
Outrunner: دور پایین، گشتاور بالا، راندمان پایین تر، عدم نیاز به گیربکس، محدودیت در انتخاب ملخ، تقریباً بی صدا

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

ثابت گشتاور: ثابت گشتاور را Kt می‌نامند. برای همه موتورها، Kt = ۱۳۵۵/Kv. با این وصف، هرچه دور یک موتور در یک ولتاژ مشخص بالاتر باشد، گشتاور آن پایین‌تر خواهد بود. به‌طور کلی، موتورهای Outrunner دارای Kv پایین‌تر هستند که باعث ایجاد گشتاور بالاتر و توانایی چرخاندن ملخ‌های بزرگ‌تر در آنها می‌شود.

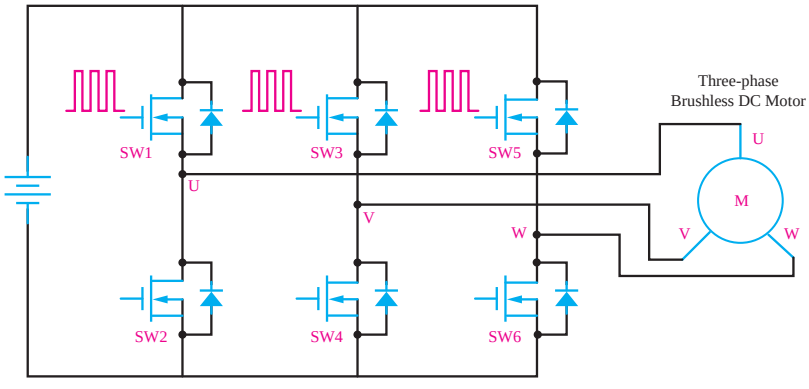
عکس این موضوع هم در مورد موتورهای Inrunner صادق است.

کنترل‌کننده 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 به‌صورت پروژهٔ خانگی ساخته می‌شوند، کاربرد دارد ESC از گیرندهٔ رادیوکنترل 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 بودجهٔ شما بستگی دارد.



کنترل‌کننده سرعت (ESC)

موتور براشلس 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 کنترل‌کننده سرعت (ESC)

کنترل‌کننده 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 مدارکنترل‌کننده نیاز خواهیم داشت که عملیات هماهنگی چهار موتور کوادکوپتر را به جهت فراهم آوردن عملکرد مورد نیاز کنترل‌کننده انجام دهد. این مدار را کنترل‌کننده پرواز (Flight Controller) گویند. در یک کوادکوپتر شما به‌طور مستقیم توانایی کم یا زیاد کردن سرعت یکی از موتورها را نخواهید داشت! شما فقط عملیات مورد نظرتان را کنترل می‌کنید و به‌وسیلهٔ 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 حتی‌امکان رفت و برگشت خودکار مسیر بر اساس GPS را به کوادکوپتر شما بیفزایند.

کنترل‌کننده پرواز (Flight Controller)

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 ۳/۸ ولت برسانید. تا در صورت تخلیه خود به‌خودی 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. به‌خاطر 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	۱ـ تحلیل فنی ترانزیستورها، انواع آرایش آنها و تحلیل تقویت کننده‌های ترانزیستوری ۲ـ 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
			درحد 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 آمپ در کاربردهای مختلف	۲
			پایین‌تر 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				