به نام خدا

الکترونیک ۱

دانشکده فیزیک

مبحث:

بررسی مدارهای ترانزیستوری

اهداف مبحث:

۱ -آشنایی با برخی از مدارهای کاربردی با استفاده از ترانزیستور
۲-بررسی مدار های چند طبقه و چند ترانزیستوری

مقدمه:

در درس های گذشته سعی کردیم مدل های ساده ای از ترانزیستور را بیان کنیم و همچنین تمام تاکیدمان، روی بدست آوردن بهترین نقطه کار و اهمیت این موضوع بود. در تمام مدارهایی که روی آنها بحث کردیم تنها از یک ترانزیستور به عنوان تقویت کننده استفاده شده بود و جزئیات آنها را تا حدودی بررسی کردیم و الان می توانیم ضرایب تقویت ولتاژ (A_v) و جریان A_i و مقاومت ورودی و خروجی را به راحتی تعیین کنیم.

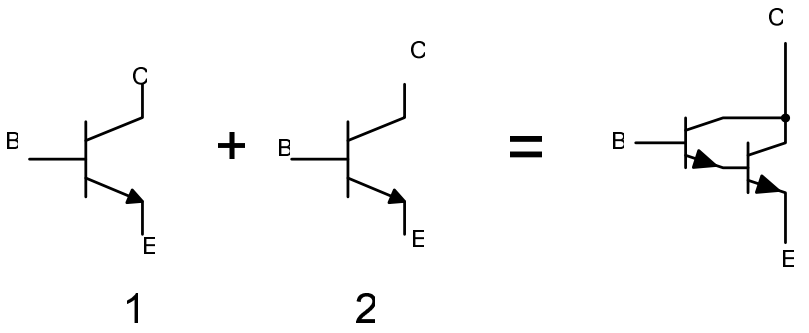
در این فصل می خواهیم علاوه بر کاربردهای مهمی که از ترانزیستور در ترکیبهای مختلف می شود؛ مدارهایی را بررسی کنیم که حاوی چندین ترانزیستور و طبقه می باشد.لذا برای خواندن مباحث این فصل حتما دو فصل گذشته را یکبار مرور کنید. از طرفی خیالمان راحت است که بررسی مدارهای بزرگ یا چند طبقه از قوانین جدایی پیروی نمی کنند و برای بررسی مدارهای بزرگ کافی است که نقش هر طبقه یا ترانزیستور در مدار را بدانیم، که در این فصل هدف اصلی ما را همین موضوع تشکیل می دهد، یعنی ، می خواهیم مدارهایی را بررسی کنیم که قوانین حاکم بر قطعات تشکیل دهنده آن را می دانیم و تنها موضوع مهمی که در اینجا باید بدانیم این است که؛ هر طبقه را چطور به طبقه های بعدی وصل کنیم تا بتوانیم به *حداکثر توان انتقالی* دست پیدا کنیم که خوشبختانه این موضوع را هم بلدیم و آن را در بحث *امپدانس مچینگ* بیان کرده ایم.

پس در این فصل بیشتر به تحلیل کیفی مدارها خواهیم پرداخت و تحلیل های کمی و محاسبات ریاضی آنها را با توجه به درس های گذشته از قبل می دانیم روند کلی در این فصل بدین صورت است که ابتدا ترکیب های کاربردی BJT را بررسی می کنیم که شامل ترکیب دارلینگتون و امیتر فالوور می باشد و تا حدودی هم مدارهای تقویت کننده تفاضلی را بررسی می کنیم و در پایان، این مدارها را پشت سرهم وصل می کنیم و یک مدار تقویت کننده کامل را می سازیم که این کار مستلزم این است که هر طبقه از مدار را جداگانه بررسی کرده باشیم. هرچند؛ قدم در مبحث های بزرگ گذاشتن کار و وقت بزرگی را هم می طلبد ولی ما این کار را در حد خودمان خواهیم کرد.

ترکیب دارلینگتون:

هرگاه بخواهیم از ترانزیستور بهره جریان بالاتری از β بدست آوریم (مثلا چندین برابر β) می توانیم این طور عمل کنیم که آنها را با هم ترکیب کنیم یعنی مثلاً جریان خروجی یک ترانزیستور که β_1برابر جریان وروی آن است را به ورودی ترانزیستوری با β_2ی مخصوص خود

بدهیم که در این صورت جریانی که در خروجی ترانزیستور دوم داریم برابر با حاصلضرب β_1 در β_2. که این موضوع را در شکل زیر می بینیم:



شکل (۱): ترکیب جفت دارلینگتون

حال ممکن است بگوییم که ترکیب های دیگر هم می توان از دو ترانزیستور بدست آورد ولی ترکیبی که ماکزیمم بهره را به ما می دهد همین ترکیب جفت دارلینگتون است که روابط حاکم بر آن به قرار زیر است:

برای ترانزیستور (۱) از شکل بالا داریم:

۱) $$I_{B_1} = \beta_1 I_{C_1}$$

۲) $$I_{E_1} = I_{C_1} + I_{B_1}$$

بنابراین:

۳) $$I_{E_1} = (\beta_1 + 1) I_{B_1}$$

با توجه به شکل داریم:

۴) $$I_{E_1} = I_{B_2}$$

این به معنای آن است که جریان ورودی ترانزیستور دوم از جریان امیتر ترانزیستور اول حاصل می شود. حال در مورد ترانزیستور (۲) می دانیم که:

۵) $$I_{C_2} = \beta_2 I_{B_2} = \beta_2 I_{E_1}$$

یا

۶) $$I_{C_2} = \beta_2 (\beta_1 + 1) I_{B_1} \approx \beta_1 \beta_2 I_{B_1}$$

که این همان رابطه ای است که به دنبالش بودیم. اگر جفت دارلینگتون را داخل در یک بسته در دست داشته باشیم (که واقعاً هم همین طور است) در این صورت برای β ی کل این مجموعه خواهیم داشت:

۷) $$\beta = \beta_1 \beta_2$$

می توان این رابطه را برای N ترانزیستور مختلف بست داد و به رابطه زیر رسید:

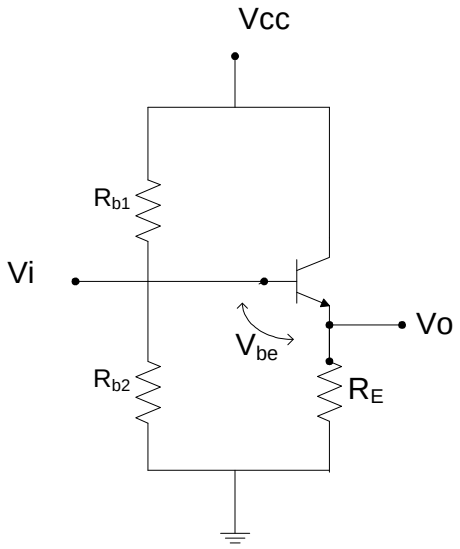
۸) $$\beta \simeq \prod_{1}^{N} \beta_i = (\beta_1 \beta_2 \ldots)$$

که اثبات آن را به عنوان تمرین رها می کنیم. البته می دانیم که این رابطه با تقریب بدست می آید که چون β_i ها بزرگ اند، این رابطه در حالت کاربردی درست است. پس از این به بعد هر گـاه ترکیبی به صورت شکل (۱) دیدیم به آن دارلینگتون می گوییم و به آن به عنوان یک طبقه تقویت کننده نگاه می کنیم در حالت خاصی که در اکثر کاربردها هم همینطور است؛ اگر $\beta_1 = \beta_2$ در این صورت:

۹) $$\beta := \beta^2$$

مدار امیتر فالوور: (*Emitter Follower*):

در این مدار که شکل آن را در پایین می بینیم، از یک ترانزیستور در حالـت کلکتـور مـشترک استفاده شده است. همانطور که می دانیم از دیدگاه ac باید V_{cc} را به زمین وصل کنیم پس در این حالت کلکتور از دید ac به زمین وصل می شود و بین ورودی و خروجی به صوت مشترک قرار مـی گیرد. به این دلیل به آن کلکتور مشترک نیز می گویند.



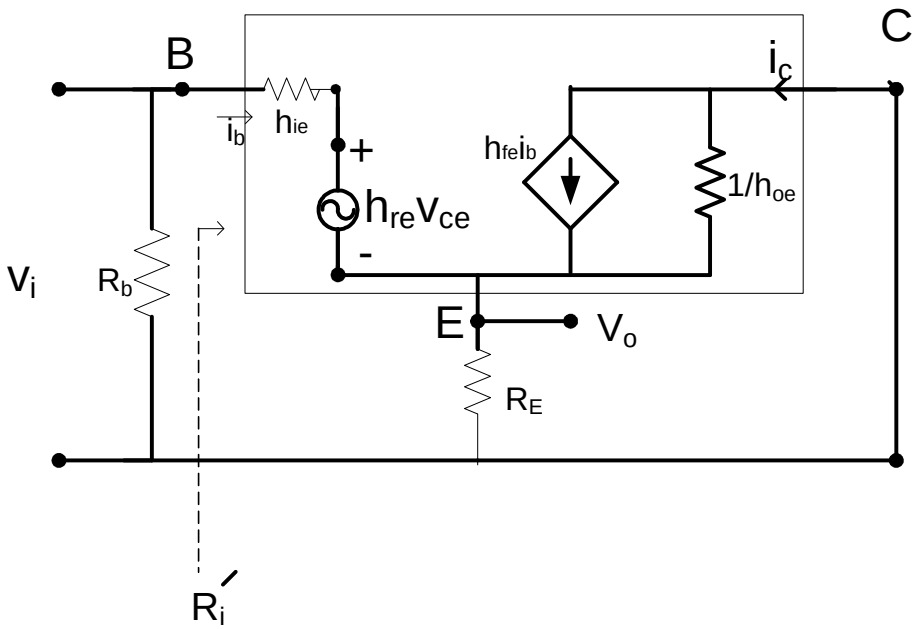
شکل ۲: مدار امیتر فالوور

اگر روابط حاکم بر این مدار را با استفاده از KVL در حلقه بیس- امیتر بنویسیم داریم:

۱۹) $$V_i - V_{BE} = V_0$$

که اگر $V_{BE}=0.7$ باشد مشاهده می شود که ولتاژ خروجی مدار همواره به اندازه ۰/۷ ولت کمتر از ولتاژ ورودی آن است از این رو در این مدار همواره بهره ولتاژ ($A_v = \frac{V_0}{V_i}$ کمتر از (۱) خواهد بود. و دلیل اینکه ولتاژ خروجی همواره پیرو ولتاژ امیتر آن است به آن نام امیتر فـالوور(پیـروِ امیتـر) را

داده اند. حال این سئوال مطرح می شود که این مدار چه سودی دارد در حالی که بهره ولتاژ کمتـر از ۱ دارد.
جواب را با توجه به مدل هیبرید که در شکل ۳ آمده، برای ویژگیِ دیگر این مدار باید توضیح داد.



شکل (۳) مدل هیبرید کامل مدار امیتر فالوور

می دانیم که در این مدار مقاومت ورودی با توجه به مدل هیبرید آن که در بالا آمده است برابر با:

۱۱) $$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_b \| R_i'$$

که در آن:

۱۲) $$R_i' = h_{ie} + \frac{(1-h_{re})(1+h_{fe})R_E}{1+h_{oe}R_E} \quad \text{و} \quad R_b = R_{b_1} \| R_{b_2}$$

اثبات این رابطه با توجه به مدل هیبرید؛ کاملاً آسان است و چون در بحث گذشته مطرح شد، آن را به عنوان تمرین رها می کنیم.

اما رابطه ۱۲ را می توان به صورت ساده شده نوشت، هرگاه در حالت کاربردی در نظر بیـاوریم که:

۱۳) $$\begin{cases} h_{re} = 0 \\ h_{oe} = 0 \end{cases}$$

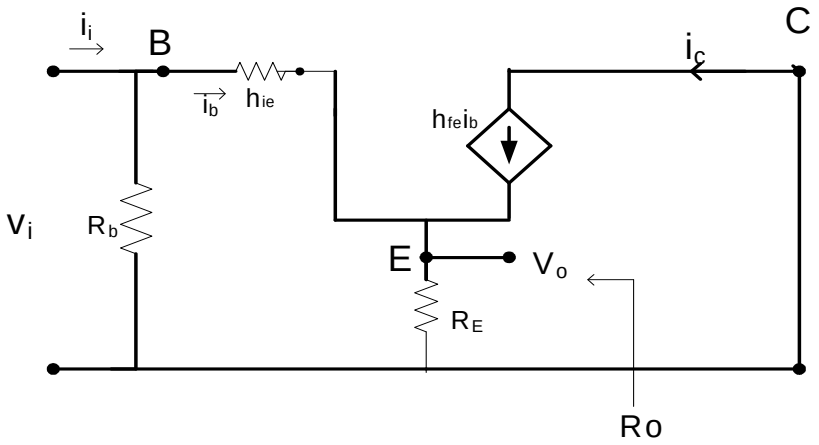
در این صورت:

۱۴) $$R_i' \simeq h_{ie} + (1+h_{fe})R_E \simeq h_{ie} + h_{fe}R_E$$

که رابطه اخیر را به عنوان رابطه اصلی برای مقاومت داخلی در نظر می گیریم. که اگر آن را با R_b موازی کنیم مقاومت ورودی R_i مدار بدست می آید:

$$R_i = \left(h_{ie} + h_{fe}R_E\right) \| R_b \qquad (۱۵$$

کسانی که می خواهند کاربردی کار کنند مطمئناً از شکل ۳ و رابطه (۱۲) چندان خوششان نمی آید بنابراین شکل (۴) را برای حالت کاربردی (تقریبی) به کار می گیریم و رابطه ۱۴ را به جای ۱۲ در نظر می گیریم:



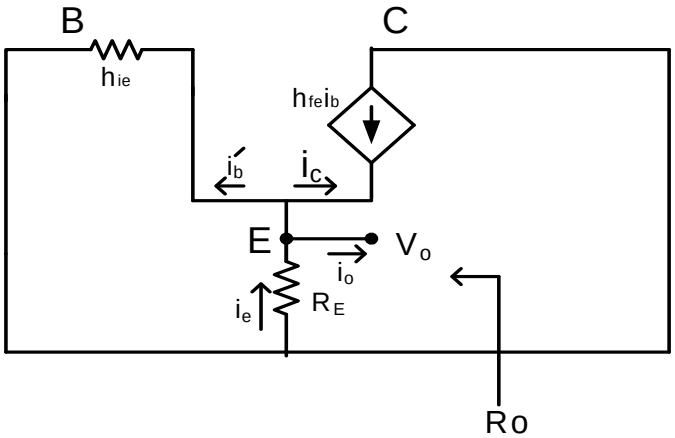
شکل (۴): مدل هیبرید تقریبی برای مدار امیتر فالوور

از روی این شکل کاملا مشخص است که مقاومت ورودی از رابطه ۱۵ بدست می آید.

حال به یافتن مقاومت خروجی R_o با توجه به تعریف آن می پردازیم:

$$R_o = \left.\frac{v_0}{i_0}\right|_{V_i=0} \qquad (۱۶$$

که با توجه به شکل ۴ اگر v_i را صفر در نظر بگیریم شکل زیر حاصل می شود:



شکل۵: مدل هیبرید تقریبی مدار امیتر فالوور با در نظر گرفتن $v_i=0$ جهت تعیین مقاومت خارجی

با توجه به شکل ۵ هویدا است که:

$$i_0 = i_e + i_b' + i_c \qquad (۱۷$$

توجه داشته باشید که i_o قرار است از مقاومت بار (که آنرا در شکل ۵ نکشیده ایم) عبور کند.

با توجه به شکل:

$$\begin{cases} i_b' = -i_b = \dfrac{v_0}{h_{ie}} \\ i_c = -h_{fe} i_b \\ i_e = \dfrac{v_0}{R_E} \end{cases} \qquad ۱۸)$$

با توجه به رابطه ۱۷ می توان نوشت:

$$i_0 = \frac{v_0}{R_E} + \frac{v_0}{h_{ie}} + \frac{v_0}{h_{ie}} h_{fe} \qquad ۱۹)$$

و یا:

$$i_0 = \left(\frac{1}{R_E} + \frac{1+h_{fe}}{h_{ie}} \right) v_0 = g_0 v_0 \qquad ۲۰)$$

بنابراین:

$$R_0 = g_0^{-1} \qquad ۲۱)$$

با کمی ساده سازی می رسیم به:

$$R_0 = R_E \left\| \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} \simeq R_E \right\| \frac{h_{ie}}{h_{fe}} = R_E \| r_e \qquad ۲۲)$$

در این رابطه نسبت $\frac{h_{ie}}{h_{fc}}$ خیلی کوچک است و می توان با تقریب خوبی R_E را که با آن موازی شده است در نظر نگرفت و نوشت:

$$if \quad R_E >> r_e \Rightarrow R_0 \simeq r_e \qquad ۲۳)$$

با کمی دقت متوجه می شویم که r_e همان مقاومت دینامیک پیوند امیتر است که در فصل پیش در مبحث هیبرید پای آن را بیان کردیم و مقدار آن با توجه به رابطه (۶) از فصل قبل برابر با:

$$\boxed{r_e = \frac{V_T}{I_C} = R_o \quad if \quad I_E \simeq I_C} \qquad ۲۴)$$

که در آن V_T ولتاژ بایاس مستقیم دیود در پیوندِ بیس – امیتر است.

در اینجا این همه محاسبه انجام دادیم صرفاً برای اینکه روابط مهم ۱۵ و ۲۴ را بیابیم یعنی مقاومت ورودی و خروجی مدار امیتر فالوور را بدست آوریم که تمام هدف ما در ادامه به مقایسه R_0 و R_i معطوف می شود بار دیگر تاکید می کنیم که تمام هدف ما از این روابط مقایسه R_0 با R_i است که در زیر به آن می پردازیم:

$$\begin{cases} R_i = \left(h_{ie} + h_{fe} R_E \right) \| R_b \\ R_0 = r_e = \dfrac{V_T}{I_c} \end{cases} \qquad ۲۵)$$

این دو رابطه از بین تمام روابط بالا ارزش بسیار فراوانی دارند زیرا به ما می گویند که R_0 خیلی کوچکتر از R_i است. برای این مقایسه مثالی کاربردی را مطرح می کنیم:

مشخصات ترانزیستور *BC107* را در جریان نقطه کار $I_{CQ}=1mA$ در نظر می گیریم:

$$h_{ie}=7K\Omega \qquad h_{fe}=300 \qquad V_T\simeq 0.7V$$

اگر مداری که ترانزیستور به آن متصل است دارای مقاومت های زیر باشد:

$$R_E=2K\Omega \qquad R_{b_1}=33K\Omega \qquad R_{b_2}=15K\Omega$$

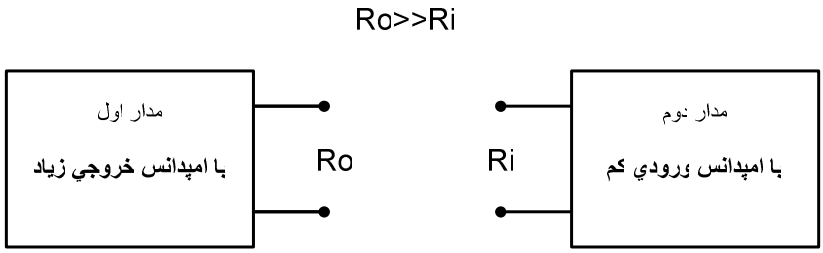
در این صورت:

$$R_i=\left(7+300\ (2)\right)\|33\|15\approx 10.1K\Omega$$

در حالی که برای R_0 داریم:

$$R_0\simeq\frac{0.7}{0.001}=700\Omega$$

مشاهده می کنیم که R_i حدوداً ۱۴/۵ برابر R_0 است. خب این یعنی چه؟! دانشجویی که اهمیت موضوع *امپدانس مچینگ* را بین دو مدار درک کرده باشد؛ براحتی می تواند جواب این سؤال را بدهد. همین یک جمله جواب سؤال است ؛یعنی مدار امیتر فالوور مداری است که برای وصل کردن دو مدار؛ با امپدانس های کاملاً متفاوت به کار می رود. این موضوع با توجه به تفاوت بسیار زیاد مقاومت ورودی و خروجی آن کاملاً قابل درک است. همچنین باید توجه داشت که مدار امیتر فالوور اصلاً خاصیت تقویت کنندگی ندارد (که در ابتدای بحث به آن اشاره کردیم) و در حالت حدی ضریب تقویت آن، ماکزیمم به ۱ می رسد. هر چه R_E بزرگتر انتخاب شود A_v به یک نزدیکتر است. ولی همین که این مدار امپدانس دو طبقه را با هم مَچ می کند کاری بس ارزشمند را انجام داده است چرا که انتقال توان بین دو مجموعه وقتی ماکزیمم است که امپدانس دو مجموعه با هم یکی باشد این موضوع را در شکل زیر می بینیم:



شکل (۶) مدار اول قرار است به مدار (۲) وصل شود به شرطی که حداکثر توان منتقل شود.

حال کسی که می خواهد این دو مجموعه را به هم وصل کند اگر عاقل باشد! این کار را بدون واسطه نمی کند چرا که امپدانس R_0 برای مدار (۱) با R_i برای مدار (۲) با هم خیلی فرق می کند؛ پس در اینجا باید از یک *مبدل امپدانس* استفاده کند که یکی از آنها در الکترونیک همان مدار امیتر فالوور است که نام دیگر آن مدار *تطبیق امپدانس* نیز (با توجه به کاربرد آن) می باشد.

توجه کنید که بحث امپدانس مچینگ در تمام سیستم های فیزیکی، که از چند قسمت تشکیل شده اند بسیار اهمیت دارد به عنوان یک مثال ساده به این موضوع توجه کنید که چرا ما در زیر آب قادر به شنیدن صدای اطراف نیستیم؟

جواب آن این است که گوش ما برای *هوا* ساخته شده است نه *آب*. ولی این جواب علمی ای نیست. بلکه علمی تر آن است که بگوییم: *امپدانسِ* گوش ما برای هوا طراحی شده است یعنی با هوا مَچ است و وقتی که در آب قرار می گیرد امپدانس آکوستیکی آن نسبت به آب متفاوت می باشد و دیگر، *توانی(power)* را از اطراف نمی تواند به داخل خود راه دهد چرا که امپدانس مچینگ رعایت نشده است در اینجا نیز اگر یک مبدل امپدانس آکوستیکی مناسب بین گوش و آب به عنوان واسطه قرار دهیم مشکل حل است و ما قادر به شنیدن صدای اطراف خودمان در آب خواهیم بود.

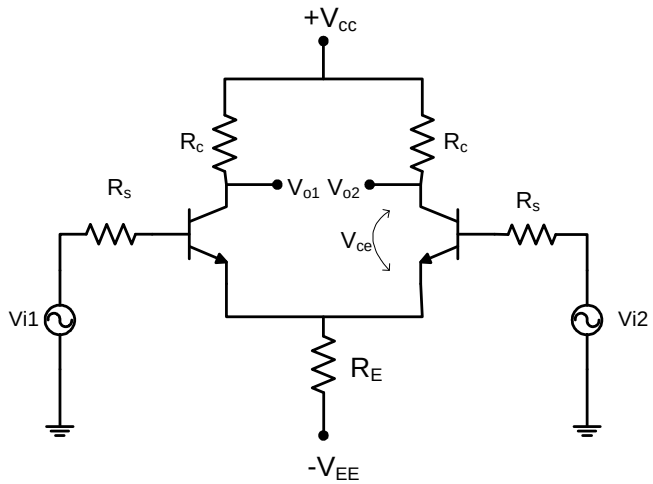
از این مثال ها در خلقتِ آسمان ها و زمین فراوان یافت می شود ولی به دلیل اینکه به ادامه بحث بپردازیم از ادامه دادن در آن زمینه خودداری می کنیم.

تا اینجا از ترکیب زوج دارلینگتون افزایش بهره را فرا گرفتیم و از مدار امیتر فالوور امپدانس مچینگ را فرا گرفته ایم در ادامه به طور خیلی ساده و کاربردی مدار تقویت کننده تفاضلی را مطرح می کنیم که بعد از آن قادر باشیم و آماده این شویم که یک مدار پر از ترانزیستور را به راحتی تحلیل کنیم.

مدار تقویت کننده تفاضلی: *Differential Amplifier*

هدف از بیان این مدار در این فصل تنها آشنایی با این نوع مدار و تا حدودی هم کاربرد آن است. به طور کلی این بحث خود یک فصل مجزا را می طلبد و به دلیل اهمیت فراوان آن به خصوص در *مدارهای مجتمع*(IC=*Integrated Circuit*) لازم است که روی آن فراوان بحث شود ولی در حدی که کار ما را برای ادامه بحث راه بیاندازد در اینجا آن را مطرح می کنیم.

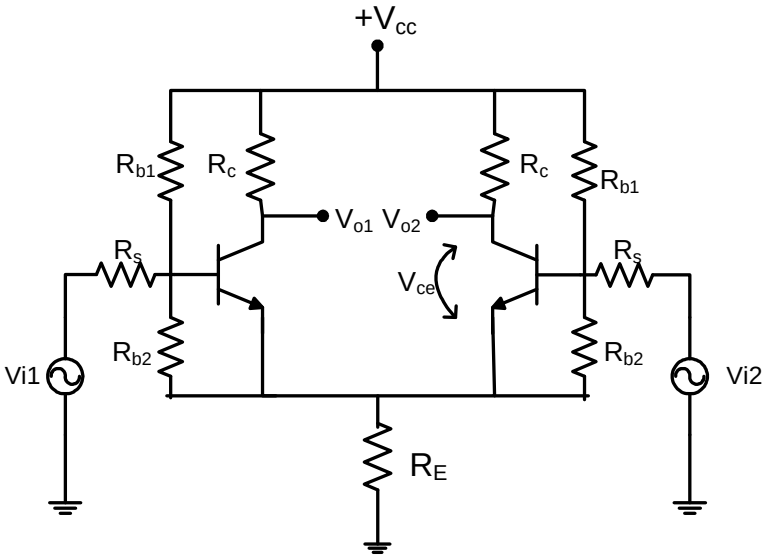
بدین منظور شکل کلی این مدار را که در زیر آمده در نظر می گیریم:



شکل ۷. تقویت کننده تفاضلی

همانطور که از شکل ۷ مشخص است این مدار دارای دو ورودی مجزا و دو خروجی مجزا است که به صورت آرایش امیتر مشترک؛ دو ترانزیستور (معمولاً مشابه) را در حالتی متقارن بایاس می کنیم.

مدارهای تفاضلی معمولاً دارای دو منبع تغذیه $+V_{cc}$ و $-V_{EE}$ هستند از این رو ترانزیستورهای مدار در حالی که v_i ها هم صفر باشد باز هم در حالت هدایت قرار می‌گیرند و اگر یکی از منبع های تغذیه (مثلاً $-V_{EE}$) را حذف کنیم لازم است که از مقاومت‌های R_{b_1} و R_{b_2} جهت تغذیه DC بیس استفاده کنیم که شکل آن در زیر آمده است:



شکل ۸: تقویت کننده تفاضلی با یک منبع تغذیه

همانطور که گفتیم در اکثر کاربردها تقارن مدار اهمیت دارد بنابراین هر دو ترانزیستور را مشابه، انتخاب می کنند و R های موجود در مدار را نیز مشابه در نظر می‌گیریم یعنی در اصل دو تقویت کننده امیتر مشترک را با یک مقاومت R_Eی مشترک به هم وصل می کنیم با این شرط که هر کدام، ورودی و خروجی جداگانه ای دارند.

شرح کار مدار به این صورت است که ابتدا فرض می کنیم v_i افزایش یابد در این صورت Q_1 بیشتر هدایت می کند و جریان I_{C_1} و به دنبال آن I_{E_1} افزایش می یابد وقتی که این جریان یعنی I_{E_1} از R_E می گذرد، پس با افزایش آن ولتاژ دو سر R_E در نقطه e افزایش می یابد $(V_e \alpha I_E)$ این افزایش ولتاژ سبب می شود که ولتاژ امیتر افزایش یابد با افزایش ولتاژ امیتر هدایت $Q_۲$ کم می شود (با فرض ثابت بودن V_{B_1}) یعنی ولتاژ کلکتورِ $Q_۲$ افزایش می یابد این بدان معناست که با افزایش ولتاژِ بیسِ یک ترانزیستور؛ ولتاژ کلکتور ترانزیستور مقابل افزایش یافته است.

در تقویت کننده های معمولی، معمولاً یکی از ورودی ها را به عنوان ورودی اصلی و دیگری را به عنوان ورودیِ فیدبک در نظر می گیرند که معمولاً ورودی فیدبک از طریق یک سری کوپلاژ مقاومتی و خازنی از خروجیِ کل مدار به ورودی آن متصل می شود ،که این بحث به دلیل اهمیت ویژه آن باید جدا بررسی شود. ما در اینجا قصد نداریم به تحلیل مداریِ این مدار بپردازیم فقط در این حد از این مدار بدانیم که ضریب تقویتِ مدار کمتر از ضریب تقویت یک تقویت کننده معمولی امیتر مشترک است(حدوداً نصف).

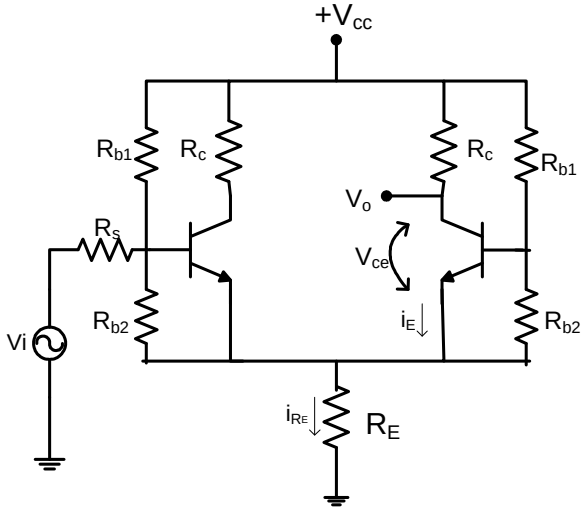
و چنانچه ورودی را به Q_1 بدهیم و خروجی را از $Q_۲$ بگیریم اختلاف فاز ورودی و خروجی صفر و اگر خروجی را از خود $Q_۱$ بگیریم اختلاف فاز ۱۸۰ درجه خواهیم داشت.

در ضمن باید بدانیم که جریانی که وارد R_E می شود- اگر مدار متقارن باشد- دو برابر جریان در حالت قبل است یعنی:

۲۶) $$I_{R_E} = I_{E_1} + I_{E_2} = 2I_E$$

بقیه تحلیل ها از جمله یافتن نقطه کار و خط بار و یا تعیین مقاومت ورودی و خروجی مشابه آنچه است که در قبل فرا گرفته ایم.

مثلاً برای تعیین خط بار و نقطه کار برای مدار شکل زیر که برای سادگی تنها یک ورودی ac به آن وصل کرده ایم و ورودی $Q_۲$ را از نظر ac به زمین وصل کرده ایم؛ به صورت زیر (مشابه قبل) پیش می رویم. البته توجه کنید که خروجی مدار از $Q_۲$ گرفته شده است در حالی که ورودی به $Q_۱$ داده شده است که در این صورت بین ورودی و خروجی مدار اختلاف فازی مشاهده نمی شود.



شکل (۹) مدار تقویت کننده تفاضلی در حالت تک ورودی

در این صورت در تحلیل DC مدار سمت راست داریم:

۲۷) $$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} - R_E(2I_E) = 0$$

که در آن:

۲۸) $$2I_E = I_{E_1} + I_{E_{1\,2}} = (\beta+1)I_{C_1} + (\beta+1)I_{C_2}$$

و برای حالت کاربردی:

۲۹) $$I_E = \beta I_C \quad \text{یا} \quad I_{R_E} = 2\beta I_C$$

در این صورت معادله خط بار DC برابر با:

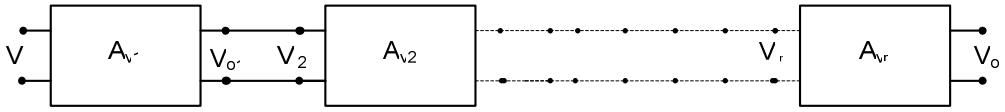
۳۰) $$V_{CC} = (R_C + 2R_E)I_C + V_{CE}$$

طبیعتاً بهترین نقطه کار نیز همانند قبل نقطه وسط خط بار است توجه کنید در اینجا خط بار DC و ac یکی هستند (چرا؟)

در بخش بعدی یک مدار تقویت کننده چند طبقه را بررسی می کنیم ولی قبل از آن بهتر است که دلیل تعدد طبقات را شرح دهیم و بدانیم که افزایش طبقات چه اهمیتی دارد و ادامه دادن این کار تا کجا مفید است.

تقویت کننده های چند طبقه:

دیاگرام زیر بیانگر یک تقویت کننده n طبقه است که ضریب تقویت هر طبقه $(A_v)_i$ است.



شکل ۱۰: تقویت کننده n *طبقه*

در مدار فوق شرطی که در توضیحات مستتر بود ولی اهمیت ویژه دارد؛ مچ بودن امپدانس های خروجی هر طبقه با امپدانس ورودی طبقه بعد از آن است. با رعایت این شرط داریم:

$$V_{0_1} = A_1 V_i$$

$$V_{0_2} = A_2 V_{i2} \quad , \quad V_{i2} = V_{01} \qquad \text{۱۳)}$$

$$\vdots$$

$$V_{\alpha(n)} = A_n V_{i(n)} \quad , \quad V_{i(n)} = V_{0(n-1)}$$

با توجه به روابط بالا می توانیم بنویسیم:

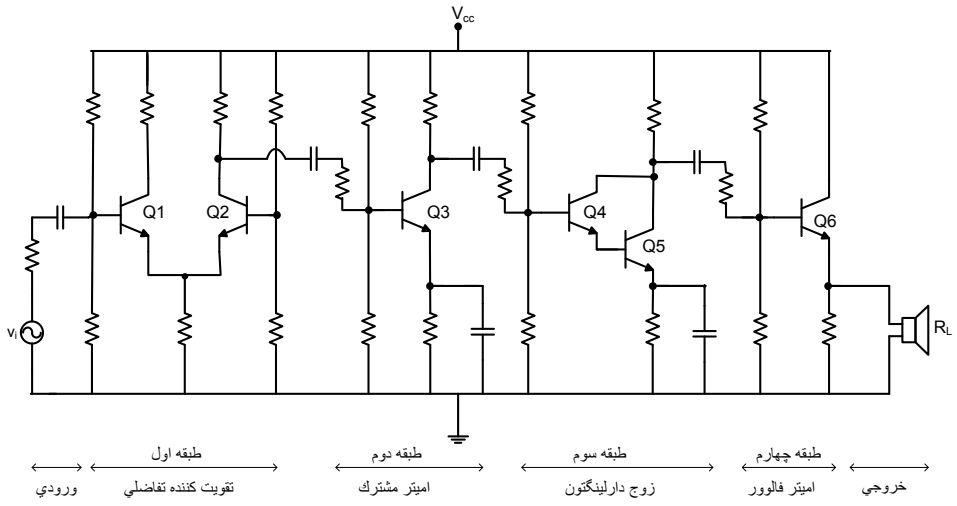
$$V_0 = V_{0(n)} = (A_1 A_2 \ldots A_n) V_i = A_t V_i \qquad \text{۳۲)}$$

با توجه به رابطه اخیر ضریب تقویت کل مدار برابر است با:

$$A_{tot} = \prod_{i=1}^{n} A_i \qquad \text{۳۳)}$$

مطمئناً این کار را تا تعداد خیلی زیادی نمی توان انجام داد چرا که تا یک جایی مدار nام به حالت اشباع می رسد و از این مدار به بعد دیگر افزایش تعداد طبقات کاری بیهوده است از این رو شرط اضافه کردن طبقه n ام این است که ورودی آن که خروجی مدار $(n\text{-}1)$ ام است، باعث اشباع مدار n ام نشود یا به عبارتی مدار n ام توانایی تقویت سیگنال ورودی اش را که به اندازه $\left(\prod_{1}^{n-1} A_i\right)$ برابر سیگنال اولی تقویت شده است را داشته باشد که این کار را می توان با توجه به نقطه کار ترانزیستور طبقه n ام و ماکزیمم دامنه تغییرات آن؛ مورد بررسی قرار داد.

در اینجا به عنوان مثالی از یک تقویت کننده چند طبقه، مدار زیر را مورد بررسی قرار می دهیم که تمام طبقه های آن را به طور مجزا؛ طی درس های گذشته بررسی و تحلیل کرده ایم و در اینجا فقط به تحلیل مدار از دید ظاهری می پردازیم و بررسی روابط حاکم بر آن را به بررسی روابط حاکم بر هر طبقه تقسیم می کنیم که چون این کار را قبلاً کرده‌ایم خیالمان راحت است که موضوع عجیبی جلوی رویمان نخواهد بود.



شکل ۱۱. یک تقویت کننده ساده ۴ طبقه با ۶ ترانزیستور

در این مدار از ۶ ترانزیستور مختلف در چهار طبقه تقویت کننده که هر کدام از طبقه‌ها ضریب تقویت مربوط به خود را دارد استفاده شده است.

برای تحلیل ظاهری مدار فرض کنید که ورودی مدار از طریق یک میکروفون تامین می‌شود و خروجی آن به یک بلندگو یا *Speaker* وصل است یعنی در این صورت مدار یک تقویت کننده صوتی معمولی را می خواهیم بررسی کنیم.

تحلیل مدار: فرض کنید که میکروفون سیگنالی را با دامنه μv ۲ تولید کرده است؛ این دامنه ولتاژ بسیار کم است و قابل شنیدن از طریق بلندگو نیست پس طی چهار مرحله تقویت ؛می خواهیم این دامنه را به حدی برسانیم که از طریق بلندگو قابل شنیدن باشد.

طبقه اول :

قسمت تفاضلی: سیگنال ورودی پس از وارد شدن به Q_1 باعث می شود که این

ترانزیستور حول نقطه کار تعیین شده اش شروع به فعالیت کند و از طریق مقاومت امیتر R_E می تواند Q_2 را به فعالیت وادارد که در این صورت با فعال شدن Q_2؛ ولتاژ خروجی از قسمت تفاضلی (که از کلکتور Q_2 گرفته شده است) به اندازه A_1 برابر افزایش می یابد که A_1 ضریب تقویت قسمت تفاضلی مدار است همچنین دقت کنیم که فاز سیگنال ورودی هنوز همفاز با سیگنال ورودی است.

طبقه دوم: با ادامه دادن مسیر حرکت سیگنال به قسمت دوم تقویت؛ یعنی طبقه دوم که یک تقویت کننده امیتر مشترک است وارد می شویم. در این طبقه نیز باید مقاومت های تغذیه بیس طوری تعیین شوند که علاوه بر حفظ نقطه کار در مکان مناسب (وسط خط بار) مسئله امپدانس مچینگ هم رعایت شود. حال با عبور سیگنال از Q_3 وارد مرحله ای می‌شویم که تقویت؛ به اندازه A_2 برابر ورودی این طبقه که A_1V_i بود، افزایش می یابد پس تا اینجای کار A_1A_2 برابر سیگنال

ورودی تقویت صورت گرفته است. در ضمن فاز سیگنال نیز ^{o} ۱۸۰ تغییر کرده است. با عبور از این طبقه به طبقه سوم که یک زوج دارلینگتون با ضریب تقویت A_3 است وارد می شویم

طبقه سوم: می دانیم که ضریب تقویت جفت دارلینگتون حاصلضرب ضرایب تقویت Q_4 و Q_5 است که به طور کلی آن را با A_3 نمایش می دهیم پس A_3 نسبتاً بزرگتر از طبقه های دیگر خواهد بود. در این مدار می توانیم Q_4 و Q_5 را متفاوت نیز فرض کنیم ولی در کل بعد از عبور از این طبقه، تقویت سیگنال ورودی اولیه به صورت ($A_1A_2A_3$) خواهد شد. همچنین فاز موج ورودی به این طبقه ^{o} ۱۸۰ تغییر کرده است که با ^{o} ۱۸۰ درجه تغییر فازی که در طبقه دوم رخ داده بود؛ در قسمت خروجیِ طبقه سوم؛ اختلاف فازی نسبت به ورودی اولیه v_i نخواهیم داشت.

طبقه ۴: حال با عبور از زوج دارلینگتون وارد طبقه آخر که یک مدار امیتر فالوور است می شویم در این قسمت می دانیم که ضریب تقویت A_4 کمتر از (۱) است ولی دلیل گذاشتن آن در مدار را می دانیم و آن هم *تطبیق امپدانس* بین بلندگو (امپدانس کم) و خروجی مدار دارلینگتون (امپدانس زیاد) است. همچنین می دانیم که فاز موج در عبور از طبقه آخر هیچ تغییری نمی کند و درخروجی که به مقاومت بار R_L (که در اینجا یک بلندگو فرض شده است) می رسیم ، ولتاژی که روی آن می افتد A_t برابر ولتاژ تولیدی از میکروفون است. به طوری که:

$$A_t = \frac{v_o}{v_i} = A_1A_2A_3A_4 \qquad (۳۴$$

در رابطه فوق اگر به طور مثال در نظر بگیریم:

$$A_1 = 50 \qquad A_2 = 70 \qquad A_3 = 100 \qquad A_4 \simeq 0.9$$

که اعداد فوق تقریبی هستند و می دانیم که A_4 حتماً کمتر از (۱) است و A_1 و A_2 و A_3 هم به طور مثال آورده شده اند پس:

$$A_t = 50\times 70\times 100\times 0.9 = 3.3\times 10^6$$

که این رابطه به ما می گوید:

$$v_L = v_o = 3.3\times 10^6 \times v_i$$

که اگر طبق فرض اولیه v_i را $2\ \mu V$ در نظر بگیریم:

$$v_L = 3.3\times 10^6 \times 2\times 10^{-6} = 6.6V$$

که این عدد یعنی $6/6\ V$ بسیار مناسب برای راه اندازی یک بلندگوی معمولی است که به راحتی صدای مورد نظر از طریق این سیستم پخش خواهد شد.

البته این موضوع را حتماً در نظر داشته باشید، هر طبقه باید با توجه به حلقه های ورودی و خروجی آن طراحی شود تا سیگنال ورودی به هر طبقه با حداقل اتلاف از آن تقویت و خارج شود.

حال در موقعیتی هستیم که می توانیم مدارهای با حجم بیش از یک طبقه را بررسی کنیم و حداقل از نگاه ظاهری مدار را تفسیر کنیم هرچند ریزه کاری هایی همواره در مسیر کسانی که

کاربردی می خواهند کار کنند وجود خواهد داشت که به عنوان مثال فرکانس سیگنالی که قرار است تقویت شود حتما در ضریب تقویت هر طبقه تاثیر می‌گذارد که این موضوع یعنی بررسی پاسخ فرکانسیِ مدار؛ خود یک بحث مفصل و مهمی است که در آینده به آن می پردازیم. همچنین این موضوع بسیار مهم است که نقطه کار هر ترانزیستور را دقیقاً تعیین کنیم که برای این کار بهتر است از پتانسیومترهایی (که در مدار نکشیدیم) جهت تغذیه بیس استفاده کنیم. همچنین در مدارهای واقعاً کاربردی ممکن است چندین خازن و مقاومت اضافه تر نیز ببینیم که صرفاً برای کاهش برخی نویزها و یا سیگنال های ناخواسته درون مدار است.

به هر حال اگر بخواهیم کاربردی کار کنیم مطمئناً محدودیت هایی جلوی رویمان هست ولی با استفاده از تجربه و ممارست در آزمایشگاه می توانیم بر این موضوع فایق شویم. که این موضوع آخر مربوط به افراد *Experimental* است تا *Theorist* ها.