

### تقویت کننده‌های چندطبقه

#### Multistage Amplifiers

زمان اجرا: ۱۲ ساعت آموزشی

**هدف کلی:** بررسی تقویت کننده‌های چندطبقه و انواع کوپلاژ بین طبقات

**هدف‌های رفتاری:** پس از پایان این فصل از فراگیرنده انتظار می‌رود که:

- ۸- محاسبات مربوط به مدار معادل DC کوپلاژ ترانسفورماتوری را انجام دهد.
- ۹- کوپلاژ مستقیم را با رسم یک نمونه مدار توضیح دهد.
- ۱۰- محاسبات مربوط به مدار معادل DC کوپلاژ مستقیم را انجام دهد.
- ۱۱- مزایا و معایب انواع کوپلاژ را بیان کند.
- ۱۲- زوج دارلینگتون و انواع آن را شرح دهد.
- ۱۳- تقویت کننده آشناری را با ترانزیستور BJT و JFET، توضیح دهد.
- ۱۴- مسائل مربوط به انواع کوپلاژ را حل کند.
- ۱۵- به سؤالات الگوی پرسش پاسخ دهد.

- ۱- تقویت کننده چندطبقه را توضیح دهد.
- ۲- علل استفاده از تقویت کننده‌های چندطبقه را شرح دهد.
- ۳- بهره تقویت کننده‌های چندطبقه را محاسبه کند.
- ۴- روش‌های مختلف کوپلاژ تقویت کننده‌های چندطبقه را شرح دهد.
- ۵- کوپلاژ خازنی را با رسم یک نمونه مدار توضیح دهد.
- ۶- محاسبات مربوط به مدار معادل DC کوپلاژ خازنی را انجام دهد.
- ۷- کوپلاژ ترانسفورماتوری را با رسم یک نمونه مدار توضیح دهد.

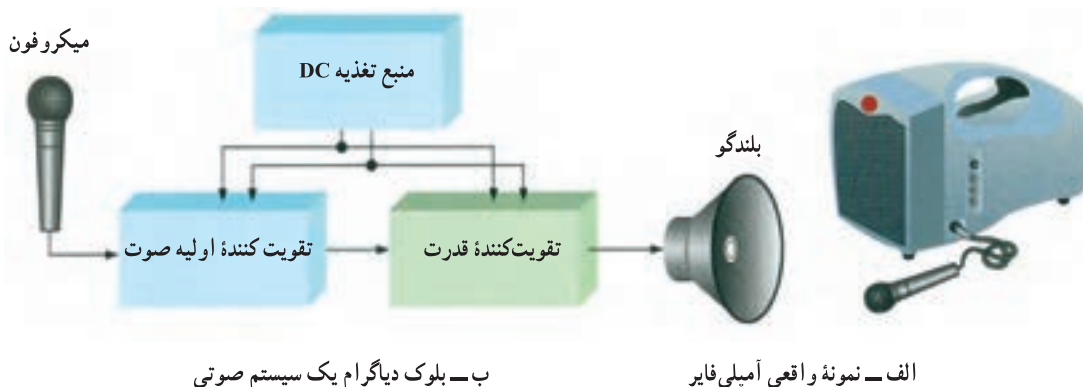
و تقویت کننده‌های چندطبقه را تشکیل دهیم.

#### پیش‌گفتار

در فصل‌های گذشته تقویت کننده‌های امیتر مشترک، بیس مشترک و کلکتور مشترک را بررسی کردیم و دیدیم که محدودیت‌هایی در بهره، امپدانس ورودی و امپدانس خروجی این نوع تقویت کننده‌ها وجود دارد. لذا به دلیل این محدودیت‌ها، در بسیاری از سیستم‌های الکترونیکی نمی‌توانیم تنها از یک طبقه تقویت کننده استفاده کنیم. در این شرایط برای به دست آوردن بهره مورد نیاز، باید چند طبقه تقویت کننده را پشت سرهم ببندیم

#### ۴-۱- ساختار تقویت کننده‌های چندطبقه

شکل ۴-۱ شکل ظاهری و شکل ۴-۲، بلوک دیاگرام یک سیستم کامل آمپلی‌فایر صوتی را نشان می‌دهد. ورودی این سیستم می‌تواند میکروفون، خروجی دستگاه پخش صوت، خروجی دستگاه CD خوان و ... باشد. بار یا مصرف کننده متصل شده به خروجی، یک بلندگو است.



شکل ۴-۱: بلوک دیاگرام یک سیستم آمپلی فایر صوتی و نمونه واقعی آن

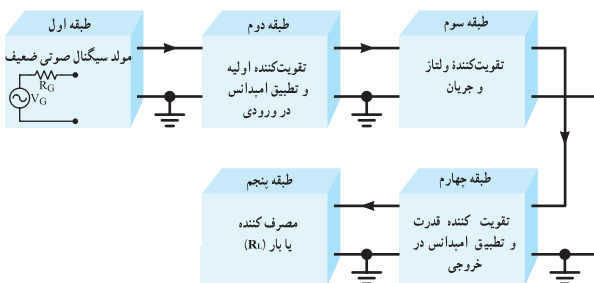
ورودی طبقه دوم برابر باشد. لذا در طبقه دوم از تقویت کننده ای استفاده می شود که بتواند تطبیق امپدانس بین طبقه اول و دوم را به درستی برقرار کند. مثلاً میکروفون های کریستالی یا خازنی امپدانس داخلی زیادی دارند. بنابراین برای تطبیق امپدانس باید امپدانس ورودی طبقه دوم زیاد باشد. در این شرایط تقویت کننده ای با ترانزیستور FET برای این کار نیاز است که در طبقه دوم قرار می گیرد.

در طبقه سوم ولتاژ و جریان سیگنال صوتی در حدی تقویت می شود که بتواند طبقه تقویت کننده قدرت را راه اندازی کند. به این طبقه مدار راه انداز یا درایور (Driver) می گویند. در طبقه راه انداز معمولاً یک یا چند طبقه تقویت کننده امیتر مشترک قرار می گیرد.

طبقه چهارم همان طوری که گفته شد، تقویت کننده قدرت است. در این طبقه معمولاً یک تقویت کننده کلکتور مشترک قرار می گیرد، زیرا بهره جریان در مدار کلکتور مشترک زیاد و امپدانس خروجی آن کم است. این ویژگی ها باعث می شود که جریان کافی برای تحریک و راه اندازی بلندگو فراهم شود و بلندگو را که امپدانس کمی دارد با مدار تقویت کننده قدرت تطبیق دهد.

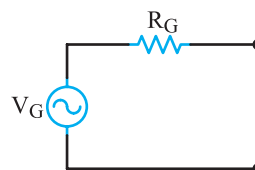
در طبقه انتهایی تقویت کننده معمولاً بلندگو قرار می گیرد. بلندگو سیگنال الکتریکی را به ارتعاشات مکانیکی تبدیل می کند و امواج صوتی قابل شنیدن را با شدت و توان کافی مهیا می سازد. همان طوری که در ابتدای این بحث متذکر شدیم توسط

هر بلوک این آمپلی فایر ممکن است شامل چند بلوک فرعی و هر بلوک فرعی شامل چندین ترانزیستور یا آی سی باشد. طبق شکل ۴-۲ این آمپلی فایر صوتی در ۵ طبقه نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: بلوک دیاگرام کامل تری از یک آمپلی فایر صوتی

طبقه اول مولد سیگنال صوتی ضعیف مثلاً میکروفون است. مدار معادل الکتریکی تونن آن مشابه شکل ۴-۳ است، امپدانس خروجی این طبقه را  $R_G$  در نظر می گیریم.

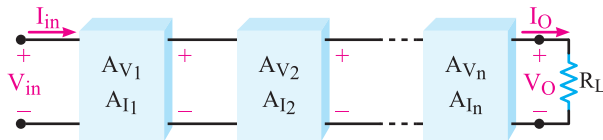


شکل ۴-۳: مدار معادل الکتریکی مولد سیگنال

برای آن که حداکثر توان از طبقه اول به طبقه دوم انتقال داده شود، باید امپدانس خروجی طبقه اول ( $R_G$ ) با امپدانس

## ۴-۲- بهره تقویت کننده‌های چند طبقه

اگر  $n$  طبقه تقویت کننده با بهره‌های ولتاژ  $Av_1$  و  $Av_2$  و  $Av_n \dots$  و بهره‌های جریان  $Ai_1$  و  $Ai_2 \dots$  طبق شکل ۴-۵ پشت سرهم قرار گیرند، یک تقویت کننده  $n$  طبقه به دست می‌آید.



شکل ۴-۵- بلوک دیاگرام  $n$  طبقه تقویت کننده

با توجه به اختلاف بین سیگنال‌های ورودی و خروجی تقویت کننده‌ها، بهره ولتاژ و بهره جریان کل تقویت کننده از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$A_{VT} = \frac{V_{on}}{V_{i_1}} = \pm A_{v_1} A_{v_2} \dots A_{v_n}$$

$$A_{IT} = \frac{I_{on}}{I_{i_1}} = \pm A_{i_1} A_{i_2} \dots A_{i_n}$$

در رابطه بهره ولتاژ کل ( $A_{VT}$ )، علامت (+) به معنی هم فاز بودن  $V_o$  یا  $V_{in}$  و علامت (-) به معنی وجود  $180^\circ$  درجه اختلاف فاز بین  $V_o$  و  $V_{in}$  است. در رابطه بهره جریان کل ( $A_{IT}$ )، علامت‌های  $\pm$  نیز همین مفهوم را دارند. باید توجه داشت که در شکل ۴-۵ بهره ولتاژ ( $A_v$ ) و بهره جریان ( $A_i$ ) برای هر طبقه در شرایطی در نظر گرفته شده است که همه طبقات به هم اتصال دارند به عبارت دیگر،  $A_v$  و  $A_i$  بیانگر میزان تقویت هر طبقه به طور مستقل نیست. بهره توان کل از حاصل ضرب بهره ولتاژ و بهره جریان به دست می‌آید.

$$A_{PT} = A_{VT} \times A_{IT}$$

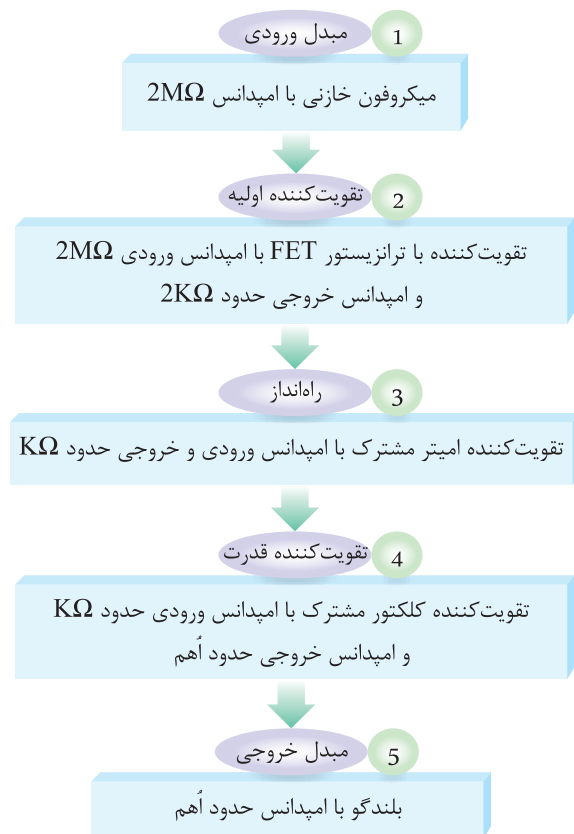
برای اثبات رابطه بهره توان کل می‌توان بلوک دیاگرام چندطبقه تقویت کننده را به صورت یک بلوک کلی مانند شکل ۴-۶ در نظر گرفت.

یک طبقه تقویت کننده معمولی نمی‌توان بهره ولتاژ، بهره جریان و بهره توان بسیار بالا و در حد نیاز را تولید کرد. هم چنین در صورت استفاده از یک طبقه تقویت کننده نمی‌توان تطابق لازم را بین مبدل‌های ورودی و خروجی مدار تقویت کننده برقرار نمود. هنگام پشت سرهم قرار دادن تقویت کننده‌ها باید به دو نکته

مهم توجه کنید:

● تطبیق امپدانس بین طبقات و مبدل‌های ورودی و خروجی تقویت کننده صورت گیرد.

● ارتباط بین دو طبقه تقویت کننده به طور صحیح برقرار شود. نحوه ارتباط بین تقویت کننده‌ها را کوپلاژ (Coupling) تقویت کننده‌ها به یک دیگر می‌گویند. شکل ۴-۴ چند طبقه تقویت کننده را که به صورت بلوک دیاگرام به هم اتصال داده شده‌اند، نشان می‌دهد. شرط تطبیق امپدانس، برابر بودن امپدانس خروجی هر طبقه با ورودی طبقه بعدی است.



شکل ۴-۴- بلوک دیاگرام اتصال چندطبقه تقویت کننده به هم

به دست می‌آید. لذا  $V_{O1} = A_{V1} V_{in1}$  است. به جای  $A_{V1}$  و  $V_{in1}$  عددگذاری می‌کنیم:

$$V_{O1} = (-40)(1\text{mV}) = -40\text{mV}$$

علامت (-) نشان می‌دهد که  $V_{O1}$  با  $V_{in}$  به اندازه  $180^\circ$

اختلاف فاز دارد. بهره و لتاژ طبقه دوم از رابطه  $A_{V2} = \frac{V_{O2}}{V_{in2}}$  به دست می‌آید. رابطه را به صورت  $V_{O2} = A_{V2} V_{in2}$  می‌نویسیم. چون  $V_{O1}$  برابر  $V_{in2}$  است به جای  $V_{in2}$  مقدار عددی  $V_{O1}$  را قرار می‌دهیم:

$$V_{O2} = (-50)(-40) = +2000\text{mV}$$

مقدار  $A_{VT}$  را از مقادیر  $V_{in}$  و  $V_{O2}$  محاسبه می‌کنیم.

$$A_{VT} = \frac{V_{O2}}{V_{in}} = \frac{2000}{1} = 2000 \text{ مرتبه}$$

مقدار  $A_{VT}$  را از رابطه  $A_{VT} = A_{V1} \times A_{V2}$  نیز می‌توان محاسبه نمود.

$$A_{VT} = (-40)(-50) = +2000 \text{ مرتبه}$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود  $A_{VT}$  علامت مثبت دارد یعنی ولتاژ خروجی با ولتاژ ورودی هم‌فاز است.

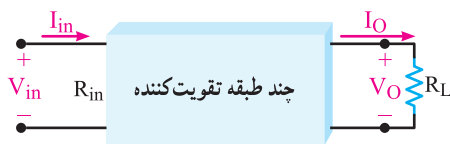
**تمرین کلاسی:** اگر  $A_{V1}$  برابر  $20^\circ$  و  $A_{V2}$  برابر  $10^\circ$  باشد  $A_{VT}$  را محاسبه کنید.

### ۴-۳ اتصال تقویت‌کننده‌ها به یکدیگر

برای انتقال سیگنال از یک طبقه تقویت‌کننده به طبقه دیگر، باید دو طبقه را به یکدیگر اتصال دهیم. چگونگی اتصال دو طبقه تقویت‌کننده را به یکدیگر کوپلاژ (Coupling) می‌گویند. اتصال بین طبقات به وسیله خازن، ترانسفورماتور یا به‌طور مستقیم امکان‌پذیر است. از این روش نوع کوپلاژ خازنی، ترانسفورماتوری و مستقیم تعریف می‌شود.

### ۴-۴ کوپلاژ خازنی

اگر دو یا چند طبقه تقویت‌کننده را به وسیله یک یا چند خازن



شکل ۴-۶ نمایش چند طبقه تقویت‌کننده در یک بلوک تکی

در بلوک شکل ۴-۶ بهره توان کل از رابطه زیر به دست

می‌آید:

$$A_P = \frac{P_O}{P_{in}}$$

از آنجایی که  $P_O = R_L I_O^2$  و  $P_{in} = R_{in} I_{in}^2$  است، می‌توان

نوشت:

$$A_P = \frac{P_O}{P_{in}} = \frac{R_L I_O^2}{R_{in} I_{in}^2} = \frac{R_L I_O}{R_{in} I_{in}} \times \frac{I_O}{I_{in}}$$

به جای مقادیر  $R_{in} I_{in}$  و  $R_L I_O$  مقادیر معادل آن یعنی  $V_O$  و

$V_{in}$  را قرار می‌دهیم.

$$A_P = \frac{V_O}{V_{in}} \times \frac{I_O}{I_{in}}$$

اگر در این معادله به جای  $\frac{I_O}{I_{in}}$  و  $\frac{V_O}{V_{in}}$ ،  $A_{IT}$  و  $A_{VT}$  قرار

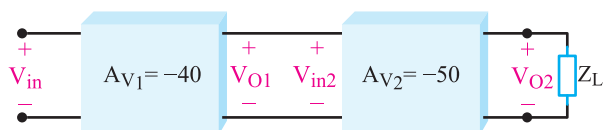
داده شود رابطه بهره توان کل به صورت  $A_P = A_{VT} \times A_{IT}$  به دست می‌آید.

### تحقیق کنید: با مراجعه به منابع مختلف و سایت‌های

اینترنتی تحقیق کنید که به چه دلیل میزان بهره طبقات تقویت‌کننده به صورت جداگانه و متصل به هم تفاوت دارد. نتیجه تحقیق خود را به کلاس ارائه دهید.

مثال ۴-۱: با توجه به شکل ۴-۷ اگر  $V_{in}$  برابر  $1\text{mV}$

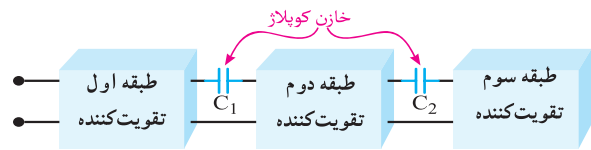
باشد،  $V_{O1}$ ،  $V_{O2}$  و  $A_{VT}$  را محاسبه کنید.



شکل ۴-۷ بلوک دیاگرام دو طبقه تقویت‌کننده

پاسخ: بهره ولتاژ طبقه اول از رابطه  $A_{V1} = \frac{V_{O1}}{V_{in1}}$

به یکدیگر وصل کنیم می‌گوییم کوپلاژ بین طبقات تقویت‌کننده به صورت خازنی است. در شکل ۴-۸ بلوک دیاگرام سه طبقه تقویت‌کننده و خازن‌های کوپلاژ بین آن‌ها نشان داده شده است.

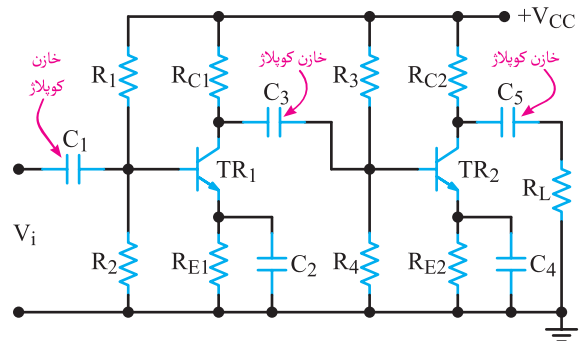


شکل ۴-۸ بلوک دیاگرام سه طبقه تقویت‌کننده با کوپلاژ خازنی

به کوپلاژ خازنی، کوپلاژ RC نیز می‌گویند. دلیل این نام‌گذاری وجود خازن‌های کوپلاژ و مقاومتهای  $R_C$  است که در طبقات تقویت‌کننده وجود دارد و یک مدار RC را تشکیل می‌دهد.

#### ۴-۴-۱ مدار تقویت‌کننده با کوپلاژ RC :

شکل ۴-۹ مدار یک تقویت‌کننده دو طبقه با کوپلاژ RC نشان داده شده است. در این مدار، دو طبقه تقویت‌کننده توسط خازن کوپلاژ  $C_3$  به یکدیگر متصل شده‌اند. هر دو طبقه تقویت‌کننده از نوع آمپتر مشترک‌اند و نوع بایاس ترانزیستورها سرخود یا تقسیم ولتاژ مقاومتی است.



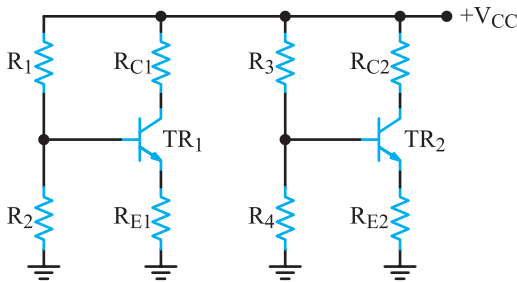
شکل ۴-۹ دو طبقه تقویت‌کننده با کوپلاژ RC

خازن‌های  $C_1$  و  $C_3$  و  $C_5$  خازن‌های کوپلاژ هستند. به علت وجود خازن  $C_3$ ، ارتباط DC از خروجی طبقه اول به ورودی طبقه دوم تقویت‌کننده، قطع است.  $C_5$  نیز مانع ورود DC کلکتور به مقاومت بار ( $R_L$ ) می‌شود. ظرفیت خازن‌های کوپلاژ را طوری انتخاب می‌کنند که عکس‌العمل خازنی آن‌ها ( $X_C$ ) در حداقل فرکانس کار تقویت‌کننده، قابل چشم‌پوشی باشد به‌طوری

که بتوان همواره آن‌ها را اتصال کوتاه فرض کرد.

#### ۴-۴-۲ مدار معادل DC تقویت‌کننده با کوپلاژ

خازنی : در مدار معادل DC، کلیه خازن‌های مدار مقاومت ( $\infty$ ) دارند و به صورت باز در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین معادل DC شکل ۴-۹ به صورت مدار شکل ۴-۱۰ درمی‌آید.

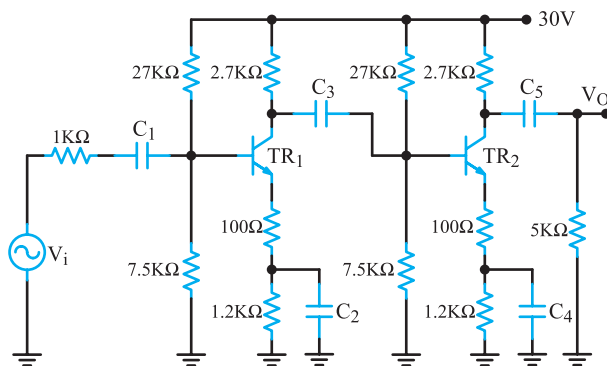


شکل ۴-۱۰ مدار معادل DC دو طبقه تقویت‌کننده با کوپلاژ خازنی

همان‌طوری که در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود، تغذیه دو طبقه مدار تقویت‌کننده آمپتر مشترک از طریق یک منبع تغذیه و به صورت بایاس تقسیم‌کننده ولتاژ مقاومتی (سرخود) صورت می‌گیرد و هیچ‌گونه ارتباط DC بین دو طبقه وجود ندارد. هم‌چنین محاسبات DC هر طبقه باید به‌طور جداگانه انجام شود.

مثال ۴-۲ : در شکل ۴-۱۱ اگر  $\beta_1 = \beta_2 = 200$  و

$V_{BE1} = V_{BE2} = 0.7V$  باشد ولتاژ هر یک از پایه‌های ترانزیستورهای  $TR_1$  و  $TR_2$  را نسبت به شاسی محاسبه کنید.



شکل ۴-۱۱ دو طبقه تقویت‌کننده با کوپلاژ خازنی

پاسخ : ابتدا مدل DC تقویت‌کننده را رسم می‌کنیم. شکل

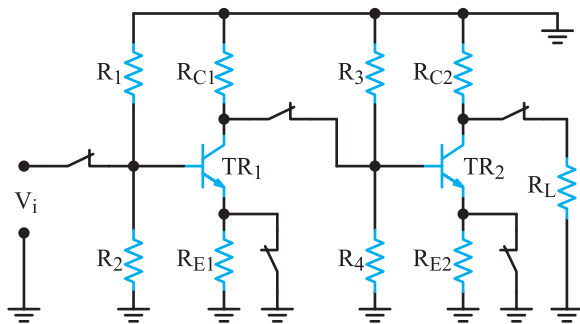
۴-۱۲ مدل DC تقویت‌کننده را نشان می‌دهد.

$$V_{C1} = V_{C2} = 3 - (2/7)(4/48)$$

$$V_{C1} = V_{C2} = 17/9V$$

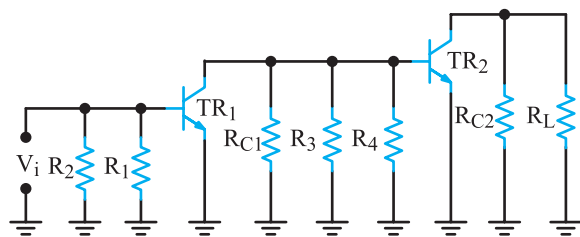
اگر مقدار قطعات دو مدار مشابه نباشند، باید محاسبات DC هر طبقه به طور جداگانه انجام شود.

۳-۴-۴ مدار معادل AC تقویت کننده با کویلاژ RC: در رسم مدار معادل AC، کلیه خازن های مدار را به صورت اتصال کوتاه در نظر می گیریم و منبع تغذیه  $V_{CC}$  را به زمین الکتریکی وصل می کنیم. بنابراین مدار معادل ac تقویت کننده شکل ۴-۹ به صورت شکل ۴-۱۳ در می آید.



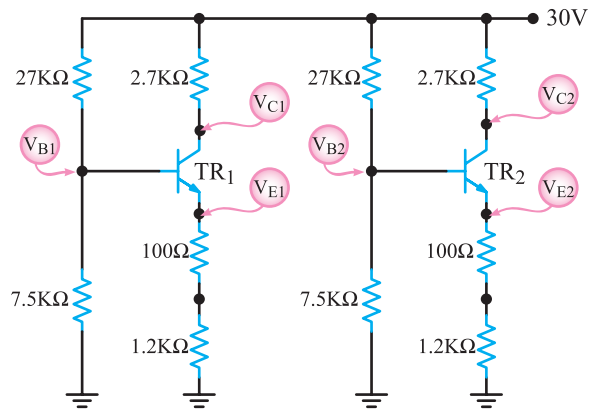
شکل ۴-۱۳ مدل AC مدار تقویت کننده

با رعایت قواعد مربوط به رسم نقشه فنی یک مدار الکترونیکی، شکل ۴-۱۳ به صورت شکل ۴-۱۴ در می آید.



شکل ۴-۱۴ مدل AC تقویت کننده

همان طور که مشاهده می شود در مدار معادل AC این تقویت کننده، مقاومت های بایاس  $R_1$  و  $R_2$  هم چنین  $R_3$  و  $R_4$  با هم به صورت موازی در می آیند. در ضمن مقاومت بار ( $R_L$ ) با مقاومت  $R_{C2}$  به صورت موازی دیده می شود. توجه داشته باشید که مقاومت های بایاس  $R_3$  و  $R_4$  به عنوان بار  $R_{L1}$  با مقاومت  $R_{C1}$



شکل ۴-۱۲ مدل DC تقویت کننده

از نظر DC مقاومت آمیتر ترانزیستورها، از دو مقاومت سری  $100\Omega$  و  $1200\Omega$  تشکیل شده است. هم چنین با توجه به مشابه بودن ترانزیستورها و یکسان بودن مقاومت های بایاس، نقطه کار دو ترانزیستور مشابه یک دیگر است. با استفاده از تقسیم ولتاژ بین دو مقاومت  $27k\Omega$  و  $7/5k\Omega$  مقدار ولتاژ  $B_1$  و  $B_2$  را محاسبه می کنیم.

$$V_{B1} = V_{B2} = 3 \times \frac{7/5}{7/5 + 27} = 6/52V$$

$$V_{B1} = V_{B2} = 6/52V$$

با توجه به مقدار  $V_{BE}$ ، مقدار  $V_{E1}$  و  $V_{E2}$  را به دست می آوریم.

$$V_{E1} = V_{E2} = V_{B1} - V_{BE1} = V_{B2} - V_{BE2}$$

$$= 6/52 - 0/7 = 5/82V$$

$$V_{E1} = V_{E2} = 5/82V$$

جریان آمیتر از حاصل تقسیم  $V_{E1}$  بر  $R_{E1}$  به دست می آید.

$$I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_{E1}} = \frac{5/82}{0/1 + 1/2} = 4/48mA$$

چون  $I_C$  تقریباً برابر با  $I_E$  است می توانیم بنویسیم.

$$I_{C1} = I_{E1} = I_{C2} = I_{E2} = 4/48mA$$

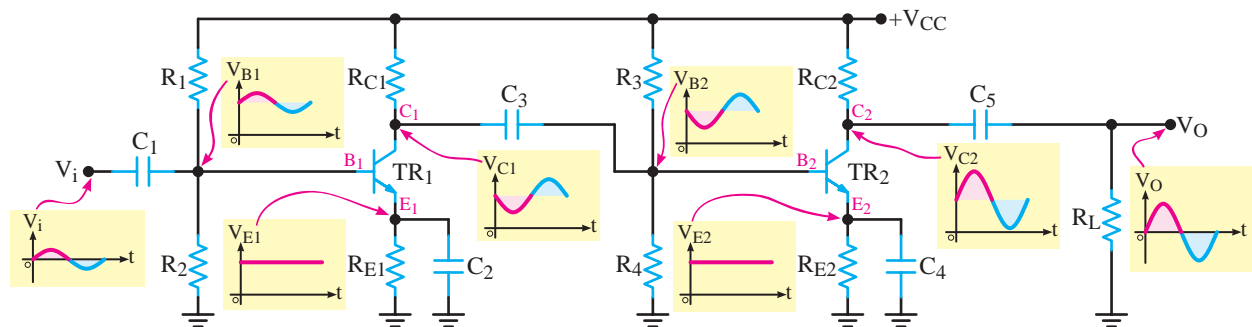
در حلقه خروجی مقدار  $V_{C1}$  و  $V_{C2}$  را محاسبه می کنیم.

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

می‌خواهیم شکل موج نقاط مختلف مدار را بررسی کنیم. با مراجعه به مثال ۴-۲ مشاهده می‌شود که بیس و امیتر و کلکتور ترانزیستورهای مدار دارای ولتاژ DC است. سیگنال AC ورودی، پس از عبور از خازن کوپلاژ  $C_1$  سوار بر ولتاژ DC بیس  $T_{R1}$  می‌شود و شکل موج نقطه  $B_1$  را به وجود می‌آورد.

به صورت موازی بسته شده است. به نظر می‌رسد که در این مدار منبع تغذیه وجود ندارد اما توجه باشید که ترانزیستورها به عنوان یک منبع تغذیه وابسته عمل می‌کنند که تحلیل آن از بحث ما خارج است.

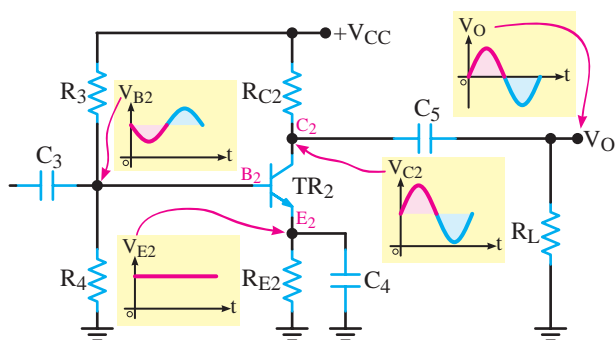
**۴-۴-۴- شکل موج نقاط مختلف مدار:** به تقویت کننده دوطبقه و شکل موج نقاط مختلف آن در شکل ۴-۱۵ توجه کنید.



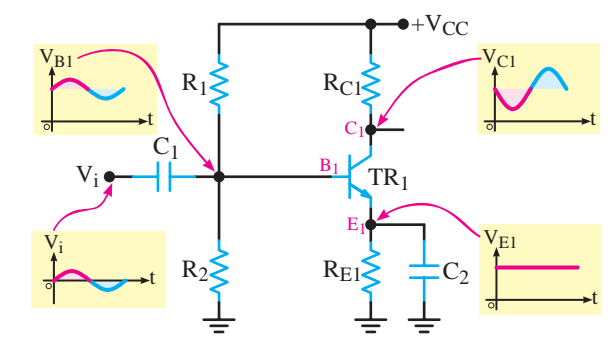
شکل ۴-۱۵- تقویت کننده دوطبقه با کوپلاژ خازنی

این سیگنال با  $180^\circ$  درجه اختلاف فاز در کلکتور ترانزیستور تقویت می‌شود. مشابه نقطه  $B_1$ ، سیگنال در کلکتور  $T_{R1}$  (نقطه  $C_1$ ) سیگنالی ac سوار بر سیگنال DC کلکتور است. چون امیتر ترانزیستور از نظر ac توسط خازن بای پاس  $C_4$  به زمین الکتریکی اتصال کوتاه شده است، در نقطه  $E_1$  فقط مؤلفه DC با مقدار  $V_{E1}$  وجود دارد. شکل ۴-۱۶، شکل موج نقاط مختلف طبقه اول تقویت کننده دوطبقه شکل ۴-۱۵ را نشان می‌دهد.

این سیگنال با  $180^\circ$  درجه اختلاف فاز در کلکتور ترانزیستور تقویت می‌شود. مشابه نقطه  $B_1$ ، سیگنال در کلکتور  $T_{R1}$  (نقطه  $C_1$ ) سیگنالی ac سوار بر سیگنال DC کلکتور است. چون امیتر ترانزیستور از نظر ac توسط خازن بای پاس  $C_4$  به زمین الکتریکی اتصال کوتاه شده است، در نقطه  $E_1$  فقط مؤلفه DC با مقدار  $V_{E1}$  وجود دارد. شکل ۴-۱۶، شکل موج نقاط مختلف طبقه اول تقویت کننده دوطبقه شکل ۴-۱۵ را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۷- شکل موج‌های طبقه دوم تقویت کننده



شکل ۴-۱۶- شکل موج نقاط مختلف طبقه اول تقویت کننده (ترانزیستور  $T_{R1}$ )

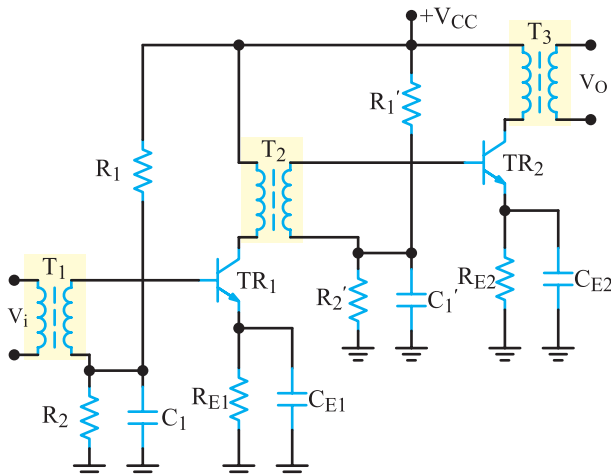
**۴-۴-۵- مزایا و معایب کوپلاژ خازنی:** اتصال چندطبقه تقویت کننده از طریق کوپلاژ خازنی به یکدیگر، دارای

خازن کوپلاژ  $C_3$  مقدار مؤلفه DC کلکتور  $T_{R1}$  را حذف می‌کند و فقط سیگنال ac کلکتور  $T_{R1}$  را به بیس  $T_{R2}$  می‌رساند.



### ۱-۵-۴- مدار تقویت کننده با کوپلاژ

ترانسفورماتوری: در شکل ۱۹-۴ مدار یک نمونه تقویت کننده دوطبقه با کوپلاژ ترانسفورماتوری را مشاهده می کنید.



شکل ۱۹-۴- مدار تقویت کننده دوطبقه با کوپلاژ ترانسفورماتوری

در این مدار، مقاومت های  $R_1$ ،  $R_2$  برای تأمین بایاس بیس  $TR_1$ ، مقاومت  $R_{E1}$  برای پایداری حرارتی  $TR_1$  و خازن  $C_{E1}$  خازن بای پاس  $R_{E1}$  است که به صورت موازی با مقاومت  $R_{E1}$  قرار گرفته است. خازن  $C_1$  (خازن بای پاس  $R_2$ ) را به این جهت در مدار قرار می دهند که وقتی موج متناوب به مدار داده می شود، امپدانس خازن به شدت کاهش می یابد و مقاومت  $R_2$  را در مقابل AC اتصال کوتاه (بای پاس) می کند. در این حالت، ضریب تقویت زیاد می شود. نحوه بایاس کردن ترانزیستور  $TR_2$  نیز مشابه ترانزیستور  $TR_1$  است. عملکرد قطعات متصل شده به آن با عملکرد قطعات متصل شده به ترانزیستور  $TR_1$  مشابهت دارد. استفاده از ترانسفورماتور  $T_2$  بین  $TR_1$  و  $TR_2$  ضمن این که تلفات تقویت کننده را کم می کند، راندمان مدار را نیز بالا برده هم چنین وسیله ای برای ایجاد تطبیق امپدانس بین دو تقویت کننده به شمار می آید. همان طور که می دانید، تقویت کننده امیتر مشترک دارای امپدانس ورودی متوسط و امپدانس خروجی متوسط است. بنابراین، در موقع کوپلاژ دو تقویت کننده CE به یک دیگر، مسئله تطبیق امپدانس وجود دارد که باید به طریقی آن را حل کرد. عموماً در کوپلاژ  $R_C$  این مسئله حل نمی شود؛ در حالی

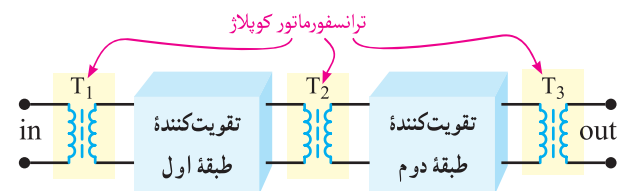
مزایا و معایبی است. یکی از مزایای این نوع کوپلاژ، در این است که طبقات از نظر مقادیر DC (نقطه کار ترانزیستورها) کاملاً مستقل از هم هستند و تغییر نقطه کار یک طبقه، روی سایر طبقات اثر نمی گذارد.

اشکال عمده کوپلاژ خازنی آن است که تقویت کننده، سیگنال های با فرکانس پایین را به درستی تقویت نمی کند؛ زیرا در فرکانس های پایین عکس العمل خازن های کوپلاژ و خازن های بای پاس امیتر افزایش می یابد و همین امر موجب تضعیف سیگنال خروجی می شود.

هم چنین در این نوع تقویت کننده ها، به علت استفاده از تعداد زیاد مقاومت ها و تلفات زیاد توان در آن ها، قدرت اعمال شده به بار کم است. در عمل، از کوپلاژ خازنی در تقویت کننده های با قدرت کم استفاده می شود.

### ۵-۴- تقویت کننده های با کوپلاژ ترانسفورماتوری

در کوپلاژ  $R_C$  به دلیل این که در هر تقویت کننده بین کلکتور ترانزیستور و منبع تغذیه یک مقاومت  $R_C$  وجود دارد، افت توان در مقاومت  $R_C$  به وجود می آید. در نتیجه، قدرت اعمال شده به بار کم است. برای برطرف کردن این عیب، به خصوص در تقویت کننده های با قدرت زیاد، از کوپلاژ ترانسفورماتوری استفاده می کنند. به این ترتیب که اولیه یک ترانسفورماتور را به جای مقاومت  $R_C$ ، در کلکتور ترانزیستور قرار می دهند و موج خروجی را از ثانویه آن می گیرند و به ورودی طبقه بعدی می رسانند. ترانسفورماتورهای کوپلاژ ممکن است از نوع افزایشنده یا کاهشنده ولتاژ باشند. ترانسفورماتور نیز مانند خازن مانع اثرگذاری ولتاژ DC طبقات روی یک دیگر می شود. شکل ۱۸-۴ نحوه اتصال دوطبقه تقویت کننده را به صورت بلوک دیاگرام و با کوپلاژ ترانسفورماتوری نشان می دهد.



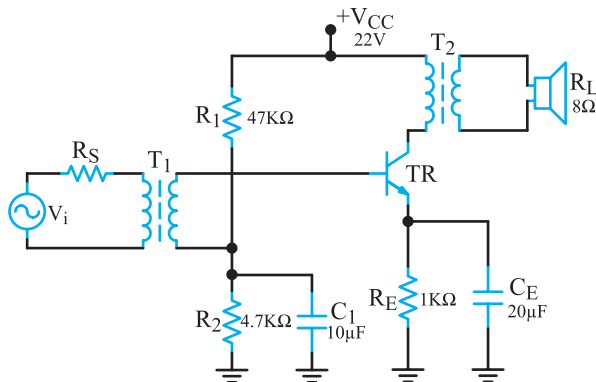
شکل ۱۸-۴- بلوک دیاگرام دوطبقه تقویت کننده با کوپلاژ ترانسفورماتوری



## برای هنرجویان علاقه‌مند

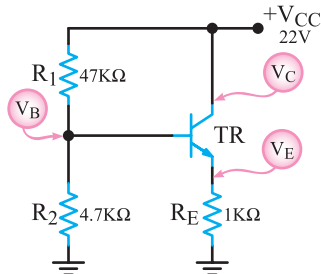
تحقیق کنید: با مراجعه به منابع مختلف و سایت‌های اینترنتی شرایط ایجاد کلاس A در تقویت‌کننده‌های با کوپلاژ ترانسفورماتوری را بررسی کنید و نتایج را به کلاس ارائه نمایید.

مثال ۴-۳: در شکل ۴-۲۱ اگر ترانسفورماتورها ایده‌آل فرض شوند، ضمن رسم مدار معادل DC، نقطه کار DC ترانزیستور را محاسبه کنید.  $V_{BE} = 0.7$  ولت و  $\beta = 200$  است.



شکل ۴-۲۱ مدار با کوپلاژ ترانسفورماتوری

پاسخ: با اتصال کوتاه در نظر گرفتن سیم پیچ اولیه ترانسفورماتورها و با باز بودن خازن‌ها، مدار معادل DC به صورت شکل ۴-۲۲ درمی‌آید.



شکل ۴-۲۲ مدار معادل DC

در مدار تقسیم‌کننده ولتاژ مقاومتی  $R_1$  و  $R_2$ ، مقدار  $V_B$  را محاسبه می‌کنیم.

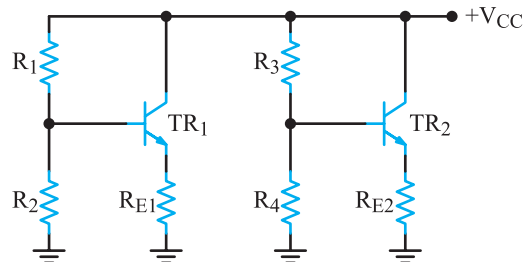
$$V_B = \frac{V_{CC} R_2}{R_1 + R_2} = \frac{22 \times 4.7}{47 + 4.7} = \frac{103}{51.7}$$

که در کوپلاژ ترانسفورماتوری مسئله تطبیق امپدانس به راحتی حل‌شدنی است. زیرا امپدانس اولیه و ثانویه ترانسفورماتور را می‌توانیم با تغییر تعداد دور سیم‌پیچ‌های آن تغییر دهیم و به مقدار دلخواه برسانیم.

**تحقیق کنید:** به چه دلیل کوپلاژ ترانسفورماتوری در فرکانس‌های بالا و پایین به خوبی عمل نمی‌کند؟ بررسی کنید و نتایج را به کلاس ارائه دهید.

## ۴-۵-۲ مدار معادل DC تقویت‌کننده با کوپلاژ

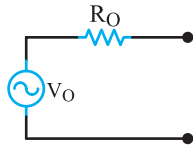
ترانسفورماتوری: از آن‌جا که معمولاً سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتورهای کوپلاژ مقاومت اهمی کمی دارند، ولتاژ کمی بر روی آن‌ها افت می‌کند. در بررسی DC، آن‌ها را اتصال کوتاه فرض می‌کنیم. خازن‌های مدار نیز به صورت مدار باز در نظر گرفته می‌شوند، لذا مدار معادل DC تقویت‌کننده شکل ۴-۱۹ به صورت شکل ۴-۲۰ درمی‌آید.



شکل ۴-۲۰ مدار معادل DC تقویت‌کننده با کوپلاژ ترانسفورماتوری

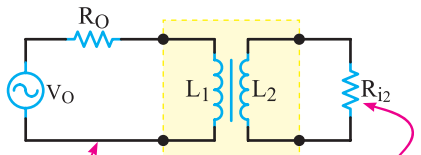
همان‌طور که در شکل مشاهده می‌کنید، دوطبقه از نظر DC هیچ‌گونه ارتباطی باهم ندارند و محاسبات DC ترانزیستورها باید به‌طور جداگانه انجام گیرد.

بایاس مدار از نوع تقسیم‌کننده ولتاژ مقاومتی است با این فرض که در کلکتور مقاومتی وجود ندارد. بنابراین، از نظر محاسبه DC مانند مدار بایاس تقسیم‌کننده ولتاژ مقاومتی است. در این مدار، ولتاژ  $V_{CC}$  بین کلکتور امیتر و مقاومت  $R_{E1}$  تقسیم می‌شود. از آن‌جا که معمولاً ولتاژ کمی بر روی  $R_{E1}$  وجود دارد، قسمت اعظم ولتاژ تغذیه در دو سر کلکتور امیتر ترانزیستور می‌افتد.



شکل ۴-۲۴ - معادل تقویت کننده از درگاه خروجی

ترانسفورماتور می تواند به راحتی بین مقاومت خروجی طبقه قبل ( $R_O$ ) و مقاومت ورودی طبقه بعد ( $R_{in2}$ ) تطابق برقرار کند. شکل ۴-۲۵ نقش ترانسفورماتور را بین دو طبقه نشان می دهد.



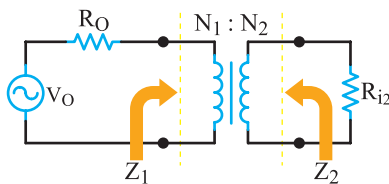
مدار معادل الکتریکی  
تقویت کننده از نگاه خروجی

معادل مقاومت ورودی  
طبقه بعد

شکل ۴-۲۵ - نقش ترانسفورماتور به عنوان تطبیق دهنده

#### ۵-۴-۵ - محاسبه امپدانس اولیه و ثانویه

ترانسفورماتور تطبیق: در شکل ۴-۲۶ اگر امپدانس اولیه ترانسفورماتور  $Z_1$  و امپدانس ثانویه آن را  $Z_2$  و تعداد دور اولیه را  $N_1$  و تعداد دور ثانویه را  $N_2$  فرض کنیم می توانیم با توجه به مقادیر  $Z_1$  و  $Z_2$  و  $N_1$  و  $N_2$  (یا نسبت  $\frac{N_1}{N_2}$ ) در صورتی که یکی از مقادیر مجهول باشد، آن را محاسبه کنیم.



شکل ۴-۲۶ - ترانسفورماتور جهت تطبیق امپدانس

رابطه بین امپدانس اولیه و ثانویه در ترانسفورماتور به صورت

زیر است:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

برای برقراری تطابق لازم است  $Z_1 = R_O$  و  $Z_2 = R_{in2}$

$$V_B = 2V$$

$V_E$  از تفاضل  $V_B$  و  $V_{BE}$  به دست می آید.

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2 - 0.7 = 1.3V$$

$I_E$  را محاسبه می کنیم.

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1.3}{1k} = 1.3mA$$

مقدار  $I_C$  را تقریباً برابر با  $I_E$  در نظر می گیریم.

$$I_C \approx I_E = 1.3mA$$

با توجه به مقدار  $\beta$ ،  $I_B$  را محاسبه می کنیم.

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1.3}{200} = 6.5 \times 10^{-3} mA$$

$$I_B = 6.5 \mu A$$

مقدار  $V_{CE}$  را به دست می آوریم.

$$V_C = V_{CC} = 22V$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 22 - 1.3 = 20.7V$$

$$V_{CE} = 20.7V$$

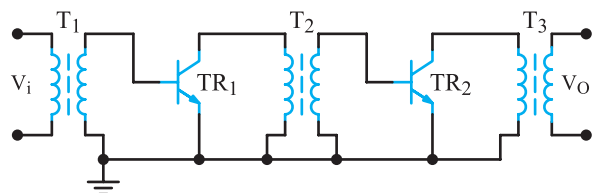
#### ۳-۴-۵ - مدار معادل AC تقویت کننده با کوپلاژ

ترانسفورماتوری: در مدار معادل AC، خازن های مدار به صورت اتصال کوتاه در نظر گرفته می شوند و منبع ولتاژ  $V_{CC}$  به زمین الکتریکی اتصال دارد.

سیم پیچ ها به دلیل داشتن  $X_L$  یک مقاومت ac از خود

نشان می دهند. بنابراین مدار معادل AC تقویت کننده شکل ۴-۱۹

به صورت ۴-۲۳ در می آید.



شکل ۴-۲۳ - معادل ac تقویت کننده

#### ۴-۴-۵ - نقش ترانسفورماتور به عنوان تطبیق دهنده

امپدانس بین دو طبقه: مدار معادل تونن یک تقویت کننده را از درگاه خروجی می توانیم به صورت شکل ۴-۲۴ در نظر بگیریم.

در نظر گرفته شود.

**مثال ۴-۴:** در شکل ۴-۲۶ اگر  $\frac{N_1}{N_2} = 10$  و

$R_{in} = R_L = 8\Omega$  باشد، مقدار  $R_O$  چه قدر انتخاب شود تا حداکثر

توان از منبع  $V_O$  به بار انتقال یابد؟

**پاسخ:**

$$Z_T = R_L = 8\Omega$$

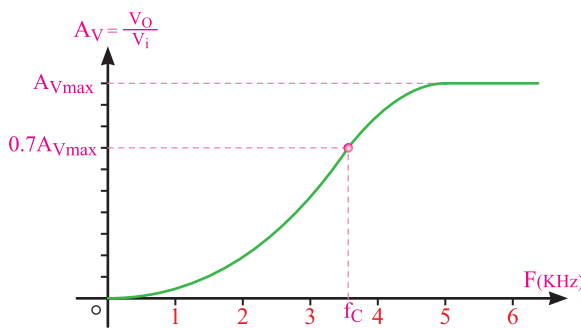
$$\frac{Z_1}{Z_T} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \left(\frac{1}{10}\right)^2 = 10^{-2}$$

$$\frac{Z_1}{8} = 10^{-2} \Rightarrow Z_1 = 800\Omega$$

برای آن که حداکثر توان از منبع  $V_S$  به بار انتقال یابد باید

$R_O$  با  $Z_1$  برابر باشد.

$$R_O = Z_1 = 800\Omega$$



شکل ۴-۲۸ پاسخ فرکانسی بد برای فرکانس‌های پایین

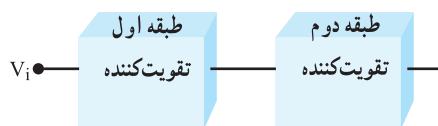
پ) قیمت این تقویت کننده‌ها به علت استفاده از ترانسفورماتور افزایش می‌یابد. به دلیل وجود عیوب یادشده، امروزه در دستگاه‌های صوتی و تصویری به ندرت از تقویت کننده‌های با کوپلاژ ترانسفورماتوری استفاده می‌شود.

### برای هنرجویان علاقه‌مند: با مراجعه به منابع مختلف

و سایت‌های اینترنتی تحقیق کنید، به چه دلیل در تقویت کننده‌های فرکانس بالا مانند تقویت کننده‌های IF در گیرنده‌های رادیویی و تلویزیونی از کوپلاژ ترانسفورماتوری می‌توان استفاده کرد.

### ۴-۶ کوپلاژ مستقیم

در این نوع کوپلاژ، دو طبقه تقویت کننده به صورت مستقیم به یکدیگر وصل می‌شوند. شکل ۴-۲۹ بلوک دیاگرام دو طبقه تقویت کننده را که به صورت کوپلاژ مستقیم به هم وصل شده‌اند، نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۹ بلوک دیاگرام دو طبقه تقویت کننده با کوپلاژ مستقیم

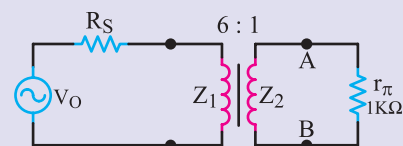
### ۴-۶-۱ مدار تقویت کننده با کوپلاژ مستقیم:

در شکل ۴-۳۰ مدار یک تقویت کننده دو طبقه با کوپلاژ مستقیم نشان داده شده است. در این مدار، مقاومت‌های  $R_1$  و  $R_2$  برای بایاس بیس  $T_{R1}$  است و  $R_{C1}$  ضمن تغذیه کلکتور  $T_{R1}$ ، بیس ترانزیستور  $T_{R2}$  را نیز بایاس می‌کند.

### تمرین کلاسی: در شکل ۴-۲۷ اگر مقاومت AB

مقاومت معادل ac بیس آمپتر ترانزیستور در آرایش آمپتر مشترک

$(r_{\pi})$  باشد،  $R_S$  را چه قدر انتخاب کنیم تا تطابق برقرار شود؟



شکل ۴-۲۷

### ۴-۵-۶ مزایا و معایب کوپلاژ ترانسفورماتوری:

از مزایای ترانسفورماتور کاهش تلفات تقویت کننده و افزایش راندمان مدار است. در ضمن تطبیق امپدانس بین طبقات به راحتی انجام می‌گیرد. تقویت کننده‌های با کوپلاژ ترانسفورماتوری معایبی به شرح زیر دارند.

الف) ابعاد این نوع تقویت کننده‌ها به علت وجود ترانسفورماتور

بزرگ می‌شود.

ب) در فرکانس‌های پایین به علت استفاده از بار سلفی

پاسخ فرکانسی بدی دارند. در شکل ۴-۲۸ منحنی پاسخ فرکانسی تقویت کننده‌های با کوپلاژ ترانسفورماتوری را مشاهده می‌کنید. همان طور که نمودار نشان می‌دهد، فرکانس‌های پایین به درستی تقویت نمی‌شوند.

$$-V_{CC} + R_{B1}I_{B1} + V_{BE1} = 0$$

مقدار  $I_{B1}$  را محاسبه می‌کنیم.

$$I_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R_{B1}} = \frac{15 - 0.7}{2 \times 10^6 \Omega}$$

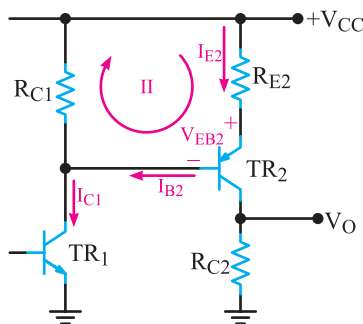
$$I_{B1} = 6.5 \mu A$$

با استفاده از  $\beta$  مقدار  $I_{C1}$  را به دست می‌آوریم.

$$I_{C1} = \beta I_{B1} = 6.5 \times 200 = 1.3 \text{ mA}$$

$$I_{C1} \approx 1.3 \text{ mA}$$

به حلقه II در شکل ۴-۳۳ توجه کنید.



شکل ۴-۳۳ بخش دیگری از مدار ۴-۳۱

با صرف نظر کردن از مقدار  $I_{B2}$ ، جریان  $I_{C1}$  با جریان عبوری از مقاومت  $R_{C1}$  برابر می‌شود. هم چنین  $I_{E2}$  با  $I_{C2}$  تقریباً برابر در نظر گرفته می‌شود. معادله KVL را در حلقه II می‌نویسیم.

$$R_{E2}I_{E2} + V_{BE2} - R_{C1}I_{C1} = 0$$

مقادیر عددی را جایگزین می‌کنیم و  $I_{E2}$  را به دست می‌آوریم.

$$0.22I_{E2} + 0.7 - 2.2 \times 1.3 = 0$$

$$0.22I_{E2} = 2.2 \times 1.3 - 0.7 = 2.26$$

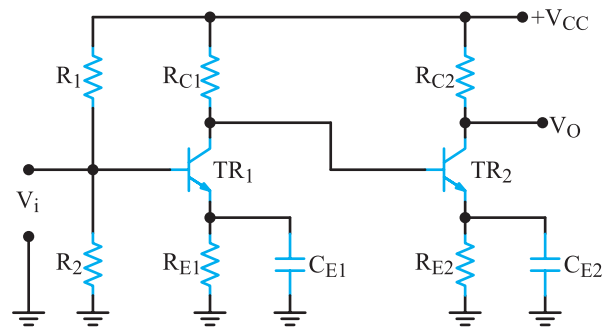
$$I_{E2} = \frac{2.26}{0.22} = 10.27 \text{ mA}$$

$$I_{C2} = I_{E2} = 10.27 \text{ mA}$$

مقدار  $V_O$  از حاصل ضرب  $R_{C2}$  در  $I_{C2}$  به دست می‌آید.

$$V_O = R_{C2}I_{C2} = (1)(10.27) = 10.27 \text{ V}$$

$$V_O = 10.27 \text{ V}$$

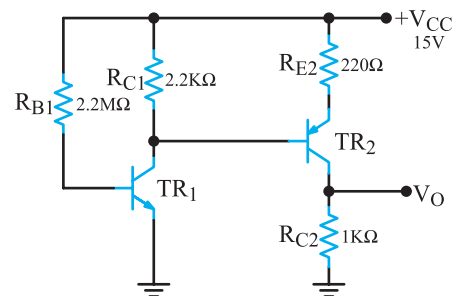


شکل ۴-۳۰ مدار یک تقویت کننده دو طبقه با کوبلاژ مستقیم

در این مدار هر دو طبقه تقویت کننده از نوع امیتر مشترک هستند. با توجه به این که طبقات تقویت کننده از نظر ولتاژ و جریان DC مستقل از یکدیگر نیستند، تغییرات نقطه کار یک طبقه، روی نقطه کار طبقه دیگر تقویت کننده اثر می‌گذارد، لذا باید محاسبات DC مدار برای کلیه طبقات به طور هم زمان انجام شود. همین وابستگی نقطه کار طبقات به یکدیگر، مدار را به شدت به حرارت حساس می‌کند. برای آن که از ناپایداری حرارتی مدار کاسته شود، اولاً باید نقطه کار ترانزیستور با دقت بیشتری محاسبه شود. ثانیاً با پیش‌بینی مدارهایی، پایداری مدار تأمین گردد.

مثال ۴-۵: در شکل ۴-۳۱ با فرض  $\beta_1 = \beta_2 = 200$  و

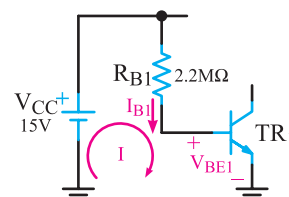
$|V_{BE}| = 0.7 \text{ V}$  مقدار ولتاژ DC خروجی چه قدر است؟



شکل ۴-۳۱ تقویت کننده با کوبلاژ مستقیم

پاسخ: ابتدا معادله KVL را در حلقه I در شکل ۴-۳۲

می‌نویسیم:



شکل ۴-۳۲ بخشی از مدار ۴-۳۱

## ۲-۶-۴- مزایا و معایب کوپلاژ مستقیم :

مزایای کوپلاژ مستقیم صرفه‌جویی در قطعات و مقرون به صرفه بودن از نظر اقتصادی است، در ضمن فرکانس‌های خیلی کم حتی DC نیز به‌خوبی تقویت می‌شوند.

از معایب این نوع کوپلاژ می‌توان به موارد زیر اشاره

کرد :

(الف) تغییرات نقطه کار یک طبقه روی نقطه کار سایر طبقات تأثیر می‌گذارد.

(ب) مدار به شدت نسبت به حرارت حساس است.

(پ) در صورت بروز عیب در یکی از طبقات به سایر طبقات

نیز آسیب وارد می‌سازد. لذا هنگام تعمیر دستگاه‌هایی که در آن تقویت کننده‌های با کوپلاژ مستقیم به کار رفته است، باید توجه داشته باشید که در صورت سوختن یکی از ترانزیستورها باید کلیه ترانزیستورها را مورد آزمایش قرار دهید و از صحت آن‌ها اطمینان حاصل کنید.

## ۷-۴- الگوی پرسش

### کامل کردنی

۷-۴-۱- برای انتقال حداکثر توان از یک طبقه تقویت کننده

به طبقه دیگر باید امپدانس ..... طبقه اول با امپدانس ..... طبقه دوم برابر باشد.

### صحیح یا غلط

۷-۴-۲- با قطع خازن کوپلاژ نقطه کار DC تقویت کننده

تغییر می‌کند.

□ صحیح □ غلط

### کوتاه پاسخ

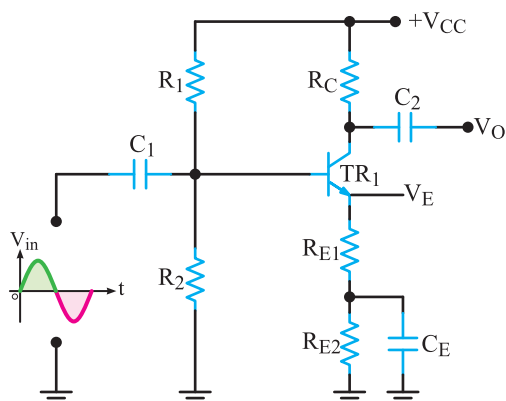
۷-۴-۳- برای اتصال دو تقویت کننده که در فرکانس‌های

خیلی کم کار می‌کنند کدام نوع کوپلاژ از بقیه مناسب‌تر است؟

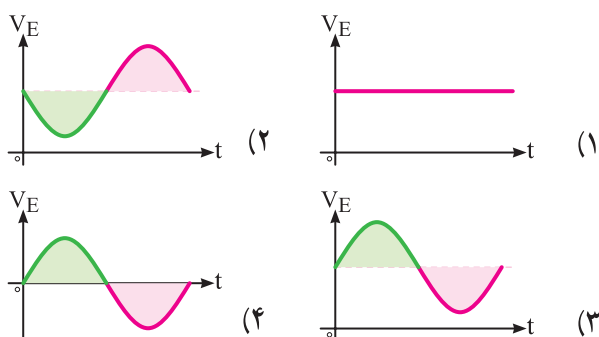
### چهار گزینه‌ای

۷-۴-۴- با توجه به سیگنال ورودی مدار ۴-۳۴ شکل

موج ولتاژ آمیتر ترانزیستور کدام است؟



شکل ۴-۳۴



### تشریحی

۷-۴-۵- کوپلاژ را تعریف کنید و انواع آن را نام ببرید.

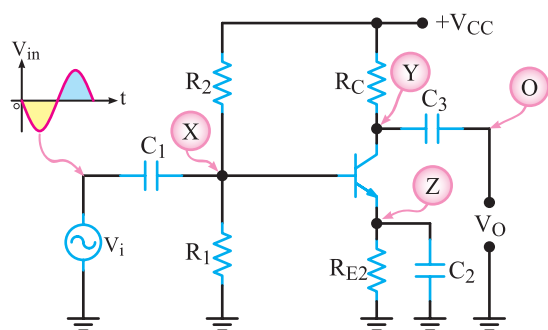
۷-۴-۶- مزایا و معایب کوپلاژ ترانسفورماتوری را شرح

دهید.

### ترسیمی

۷-۴-۷- با توجه به شکل موج ورودی تقویت کننده شکل

۴-۳۵، شکل موج نقاط X، Y، Z و O را رسم کنید.

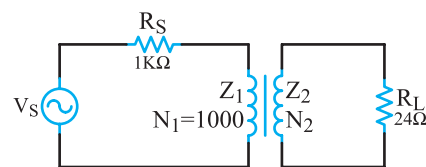


شکل ۴-۳۵

## محاسباتی

۸-۷-۴ در مدار شکل ۴-۳۶،  $N_2$  را چه قدر انتخاب

کنیم تا بین مولد و بار تطابق برقرار باشد؟

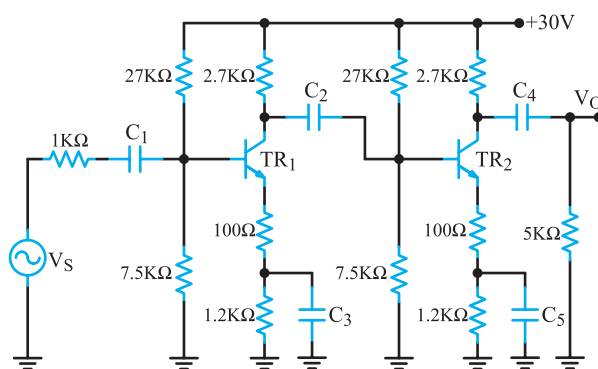


شکل ۴-۳۶

۹-۷-۴ در شکل ۴-۳۷ با فرض  $\beta_1 = \beta_2 = \infty$  و

$V_{BE1} = V_{BE2} = 0.7V$ ، ولتاژ هریک از پایه‌های ترانزیستورهای

$T_{R1}$  و  $T_{R2}$  را نسبت به شاسی محاسبه کنید.



شکل ۴-۳۷

## ۸-۴ زوج دارلینگتون (Darlington Pair)

یک نمونه از تقویت کننده‌های دوطبقه با کوپلاژ مستقیم،

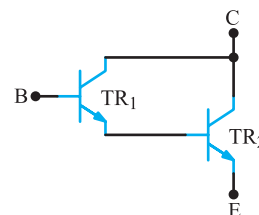
زوج دارلینگتون است که در شکل ۴-۳۸ نشان داده شده است.

از آن جا که ترانزیستورهای قدرت اغلب دارای  $\beta$  ی کوچکی

هستند، برای به دست آوردن  $\beta$  ی بزرگ تر، از ترانزیستورهای

زوج دارلینگتون استفاده می شود. در ضمن زوج دارلینگتون

دارای مقاومت ورودی زیاد است.



شکل ۴-۳۸ زوج دارلینگتون NPN

## تحقیق کنید: با مراجعه به منابع مختلف و سایت های

اینترنتی تحقیق کنید به چه دلیل امپدانس ورودی تقویت کننده با زوج دارلینگتون زیاد است؟ نتایج را طی یک گزارش به کلاس ارائه نمایید.

اگر ضریب تقویت جریان ترانزیستور  $TR_1$  را  $\beta_1$  و ضریب

تقویت جریان ترانزیستور  $TR_2$  را  $\beta_2$  فرض کنیم، می توان ثابت

کرد که ضریب تقویت جریان زوج دارلینگتون از رابطه زیر به

دست می آید.

$$\beta_T \approx \beta_1 \beta_2$$

در شکل ۴-۳۸ زوج دارلینگتون معادل یک ترانزیستور

NPN است و از دو ترانزیستور NPN تشکیل شده است.

جریان بیس ترانزیستور  $TR_2$  همان جریان امیتر ترانزیستور

$TR_1$  است؛ لذا نسبت  $T_{R2}$  به  $TR_1$  قدرت بیشتری دارد و  $\beta_2$  از

$\beta_1$  کم تر است.

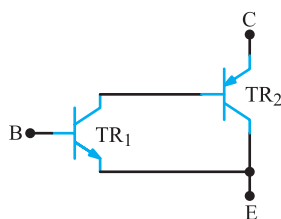
۱- ۸-۴ انواع زوج دارلینگتون: ترانزیستور

زوج دارلینگتون NPN را می توان به کمک یک ترانزیستور

NPN و یک ترانزیستور PNP نیز ایجاد کرد.

در این حالت مطابق شکل ۴-۳۹ زوج دارلینگتون مکمل

شکل می گیرد که معادل یک ترانزیستور NPN است.



شکل ۴-۳۹ معادل زوج دارلینگتون NPN

هم چنین زوج دارلینگتون PNP ممکن است از دو

ترانزیستور PNP و یا با استفاده از یک ترانزیستور PNP و

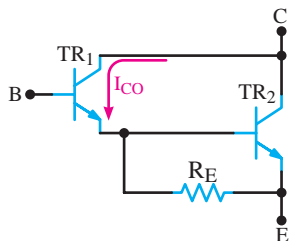
یک ترانزیستور NPN تشکیل شده باشد. شکل ۴-۴۰ زوج

دارلینگتون PNP با دو ترانزیستور PNP و معادل آن با یک

ترانزیستور PNP و یک ترانزیستور NPN را نشان می دهد.

### ۳-۸-۴- تأثیر جریان نشتی روی نقطه کار مدار

زوج دارلینگتون: در زوج دارلینگتون، جریان نشتی  $I_{CO}$  ترانزیستور اول که در اثر حرارت تولید می‌گردد روی نقطه کار به شدت اثر می‌گذارد.  $I_{CO}$  ایجاد شده به وسیله این ترانزیستور، توسط ترانزیستور دوم تقویت می‌شود و در خروجی، جریان ناخواسته زیادی را ایجاد می‌کند. این جریان باعث گرم شدن بیش‌تر ترانزیستورها و افزایش بیش‌تر  $I_{CO}$  می‌شود. برای برطرف کردن این اشکال، می‌توان مدار را به صورت شکل ۴-۴۲ اصلاح کرد.



شکل ۴-۴۲- زوج دارلینگتون اصلاح شده به منظور ایجاد ثبات حرارتی

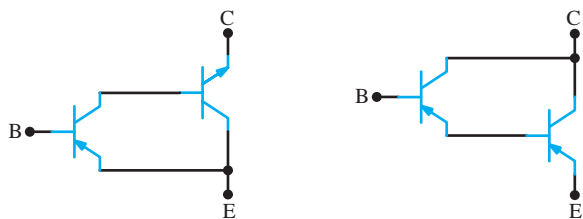
در این ترکیب مقدار  $R_E$  را باید به گونه‌ای محاسبه کرد که اگر تمام جریان نشتی از مسیر آن بگذرد ترانزیستور دوم روشن نشود. باید مقدار  $R_E$  به گونه‌ای انتخاب شود که با گذشتن جریان  $I_{CO}$  از آن، افت پتانسیل دوسر آن از  $\frac{1}{6}$  ولت تجاوز نکند. بنابراین می‌توانیم بنویسیم:

$$R_E = \frac{0.6V}{I_{CO}}$$

**مثال ۴-۶:** در صورتی که ولتاژ هدایت ترانزیستور دوم ( $TR_1$ ) در شکل ۴-۴۲، برابر با  $V_{BE2} = 0.7V$  و جریان  $I_{CO}$  برابر با یک میلی‌آمپر باشد مقدار  $R_E$  را محاسبه کنید.  
**پاسخ:** باید مقدار  $R_E$  را به گونه‌ای محاسبه کنیم که با گذشتن جریان  $1mA$  از آن، افت پتانسیل دوسر آن از  $\frac{1}{6}$  ولت تجاوز نکند بنابراین:

$$R_E = \frac{0.6}{1mA} = 600\Omega$$

هرچند با افزودن  $R_E$  به ترکیب دارلینگتون، پایداری حرارتی آن در حد قابل توجهی ترمیم می‌شود اما چون این مقاومت با مقاومت ورودی ترانزیستور  $TR_1$  موازی شده است،



شکل ۴-۴۰- زوج دارلینگتون PNP و معادل آن با یک ترانزیستور NPN و یک ترانزیستور PNP

## آشنایی با مخترعین و دانشمندان

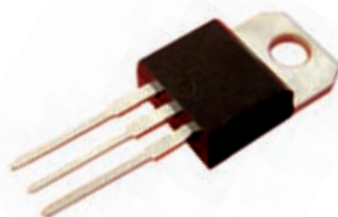


آقای سیدنی دارلینگتون مهندس برق بود و در سال ۱۹۰۶ در آمریکا متولد شد. وی در سال ۱۹۵۳ توانست ترانزیستور ترکیبی زوج دارلینگتون را اختراع کند. چند سال بعد یک دانشمند مجارستانی به نام جورج کلیفورد زیکلای اختراع ایشان را کامل کرد

و ترانزیستور مکمل دارلینگتون را با استفاده از یک ترانزیستور PNP و یک ترانزیستور NPN اختراع نمود. دارلینگتون مکمل به نام ایشان (Sziklai Pair) نامیده شد. سیدنی دارلینگتون در سال ۱۹۹۷ چشم از جهان برپست.

### ۳-۸-۴- زوج دارلینگتون در یک بسته بندی:

کارخانه‌های سازنده قطعات نیمه‌هادی زوج دارلینگتون را در یک بسته بندی و مشابه ترانزیستورهای ساده نیز به بازار عرضه می‌کنند. برای نمونه سری ترانزیستورهای ۲N۶۳۸۳, ۲N۶۳۸۴ و ۲N۶۳۸۵ به صورت ترکیب دارلینگتون هستند. این ترانزیستورها به صورت NPN با  $\beta$  نزدیک به  $300$  و قدرتی برابر  $100$  وات ساخته می‌شوند. در شکل ۴-۴۱ ترانزیستور زوج دارلینگتون در یک بسته بندی نشان داده شده است.



شکل ۴-۴۱- زوج دارلینگتون در یک بسته بندی



$$I_{C1} + I_{C2} = 5/4$$

معادله KVL را در حلقه II می‌نویسیم :

$$I_{C2}(1) + V_{EB2} - 4/VI_{C1} = 0$$

$$-4/VI_{C1} + I_{C2} = -0/6$$

$$\begin{cases} I_{C1} + I_{C2} = 5/4 \\ -4/VI_{C1} + I_{C2} = -0/6 \end{cases}$$

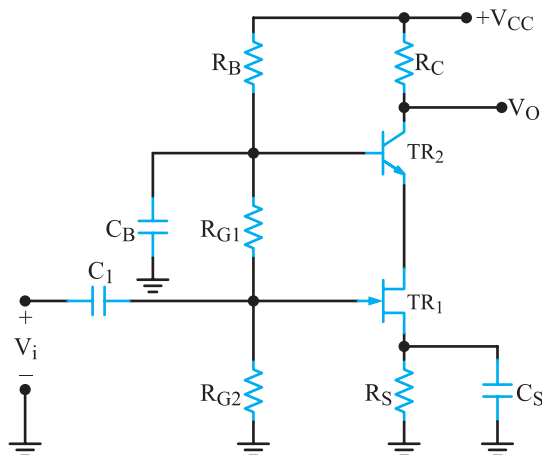
با حل دستگاه دو معادله دو مجهول،  $I_{C1}$  و  $I_{C2}$  به دست می‌آید.

$$I_{C1} = 1\text{mA} \quad I_{C2} = 4/4\text{mA}$$

#### ۴-۹- تقویت‌کننده آبشاری (Cascade Amplifier)

در شکل ۴-۴۵ ترکیب دیگری از اتصال مستقیم دو ترانزیستور را می‌بینید. این ترکیب را ترکیب آبشاری می‌نامند. از این ترکیب بیش‌تر در فرکانس‌های بالا استفاده می‌کنند.

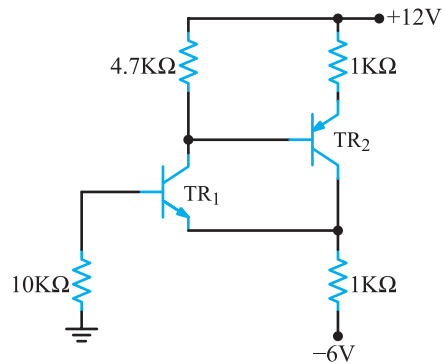
در شکل ۴-۴۵ ترانزیستور  $TR_1$  یک ترانزیستور FET با آرایش سورس مشترک (CS) و ترانزیستور  $TR_2$  یک ترانزیستور BJT با آرایش بیس مشترک (CB) است. متأسفانه امپدانس ورودی کم ترکیب بیس مشترک در اغلب موارد، مشکل عدم هماهنگی امپدانس را به‌وجود می‌آورد. در شکل ۴-۴۵ ترانزیستور  $TR_1$  که به صورت سورس مشترک بسته شده است، مقاومت ورودی مدار را تا حدودی ترمیم می‌کند. برای حفظ پایداری حرارتی مدار، ترانزیستور  $TR_1$  را با بهره ولتاژ کم طرح می‌کنند.



شکل ۴-۴۵- تقویت‌کننده آبشاری

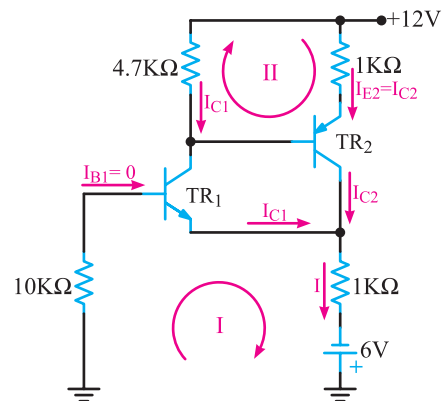
موجب کاهش مقاومت ورودی  $TR_2$  و در نتیجه کاهش مقاومت ورودی کل زوج دارلینگتون می‌شود.

مثال ۴-۷: در شکل ۴-۴۳ مقدار تقریبی جریان کلکتور ترانزیستورها را محاسبه کنید.  $\beta$  ترانزیستورها عدد بزرگی در نظر گرفته شده و  $|V_{BE}| = 0/6$  ولت است.



شکل ۴-۴۳- مدار تقویت‌کننده با ترانزیستور به صورت زوج دارلینگتون

پاسخ: با بیان  $\beta$  بزرگ و مقدار تقریبی جریان کلکتور به این نکته پی می‌بریم که باید از جریان بیس ترانزیستورها صرف‌نظر کنیم. در این صورت  $I_{E1} = I_{C1}$  و  $I_{E2} = I_{C2}$  است. معادله KVL را در حلقه I و حلقه II می‌نویسیم. شکل ۴-۴۴ حلقه I و حلقه II و جریان نقاط مختلف مدار را نشان می‌دهد. معادله KVL حلقه I برابر است با:



شکل ۴-۴۴

$$1 \cdot I_{B1} + V_{BE1} + 1(I_{C1} + I_{C2}) - 6 = 0$$

در معادله عددگذاری می‌کنیم.

$$1 \cdot (0) + 0/6 + 1(I_{C1} + I_{C2}) - 6 = 0$$

$$V_{E1} = V_{B1} - V_{BE1} = 4 - 0.7 = 3.3 \text{ ولت}$$

$$I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_{E1}} = \frac{3.3}{2} = 1.65 \text{ mA}$$

چون از  $I_B$  ترانزیستورها صرف نظر می شود لذا  $I_{E1} = I_{C1}$  و  
 $I_{C1} = I_{E1} = I_{C2}$  است پس:

$$I_{C2} = I_{E2} = I_{C1} = I_{E1} = 1.65 \text{ mA}$$

با تقسیم ولتاژ مقاومتی  $V_{B2}$  را محاسبه می کنیم.

$$V_{B2} = \frac{V_{CC}(R_{B1} + R_{B2})}{R_{B1} + R_{B2} + R_{B3}} = \frac{12(5 + 5)}{5 + 5 + 5}$$

$$V_{B2} = 8 \text{ ولت}$$

چون  $V_{E2}$  برابر  $V_{C1}$  است، با محاسبه  $V_{C1}$ ،  $V_{CE1}$  و سپس توان تلف شده ترانزیستور محاسبه می شود.

$$V_{E2} = V_{C1} = V_{B2} - V_{BE2}$$

$$V_{E2} = V_{C1} = 8 - 0.7 = 7.3 \text{ ولت}$$

$$V_{CE1} = V_{C1} - V_{E1} = 7.3 - 3.3 = 4 \text{ V}$$

$$P_{T1} = V_{CE1} \times I_{C1} = 4 \times 1.65 = \boxed{6.6 \text{ mW}}$$

با محاسبه  $V_{C2}$  می توان  $V_{CE2}$  را محاسبه نمود.

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

$$V_{C2} = 12 - (2)(1.65) = 12 - 3.3 = 8.7 \text{ V}$$

$$V_{C2} = 8.7 \text{ V}$$

$$V_{CE2} = V_{C2} - V_{E2} = 8.7 - 7.3$$

$$V_{CE2} = 1.4 \text{ ولت}$$

$$P_{T2} = V_{CE2} \times I_{C2} = 1.4 \times 1.65$$

$$\boxed{P_{T2} = 2.31 \text{ mW}}$$

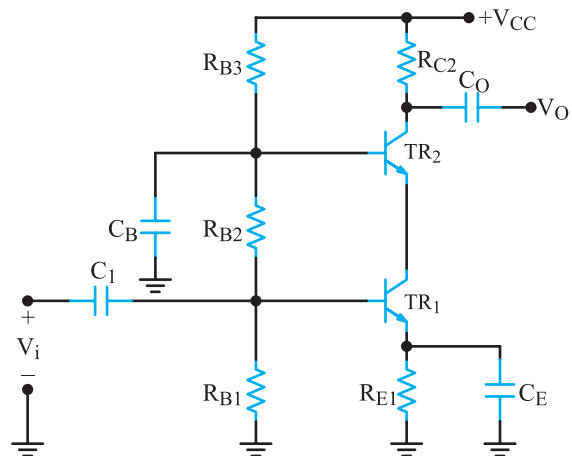
**تمرین کلاسی:** در این مرحله یک نمونه تمرین کلاسی که توسط دانش آموز یا هنرآموز طراحی می شود را اجرا نمایید.

## ۱-۴- الگوی پرسش

### کامل کردنی

۱-۴- زوج دارلینگتون دارای بهره جریان .....  
 و مقاومت ورودی ..... است.

تقویت کننده آبهاری را می توان با دو ترانزیستور BJT به صورت شکل ۴-۴۶ نیز طرح نمود.

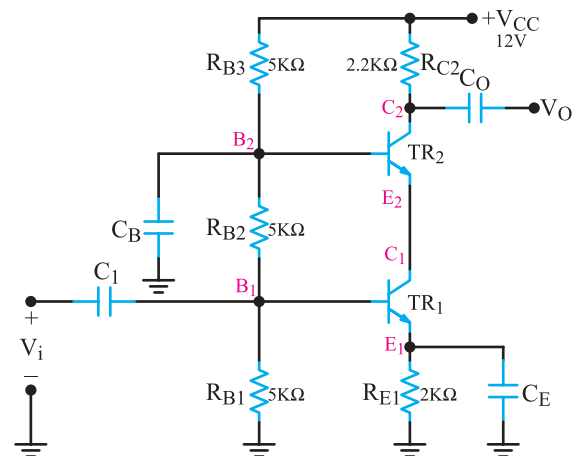


شکل ۴-۴۶- تقویت کننده آبهاری با دو ترانزیستور BJT

در این مدار  $TR_1$  دارای آرایش امیتر مشترک و  $TR_2$  دارای آرایش بیس مشترک است.

مثال ۸-۴: در شکل ۴-۴۷ با فرض  $\beta_1 = \beta_2 = 120$

و  $V_{BE1} = V_{BE2} = 0.7 \text{ V}$  قدرت تلف شده در هر ترانزیستور را محاسبه کنید.



شکل ۴-۴۷- مدار تقویت کننده آبهاری

$$V_{B1} = \frac{V_{CC}R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2} + R_{B3}} = \frac{12 \times 5}{5 + 5 + 5}$$

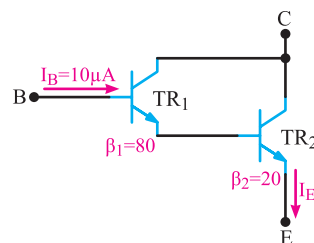
$$V_{B1} = \frac{60}{15} = 4 \text{ V}$$

پاسخ:

## چهارگزینهای

۴-۱-۲- با توجه به مدار ۴-۴۸  $I_E$  دارلینگتون چند

میلی آمپر است؟

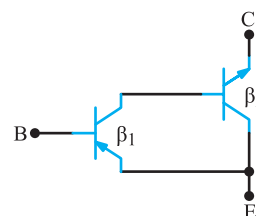


شکل ۴-۴۸

۸ (۱) ۱۰ (۲) ۱۲ (۳) ۱۶ (۴)

۴-۱-۳- مدار شکل ۴-۴۹ زوج دارلینگتون NPN یا

PNP است؟  $\beta_T$  کدام است؟



شکل ۴-۴۹

(۱)  $\beta_T = \beta_1 \beta_2$  , PNP

(۲)  $\beta_T = \beta_1 + \beta_2$  , PNP

(۳)  $\beta_T = \beta_1 \beta_2$  , NPN

(۴)  $\beta_T = \beta_1 + \beta_2$  , NPN

## کوتاه پاسخ

۴-۱-۴- از تقویت کننده آشناری بیش تر در کدام فرکانس

استفاده می کنند؟

## تشریحی

۴-۱-۵- ویژگی های زوج دارلینگتون را بنویسید.

۴-۱-۶- اشکال زوج دارلینگتون را شرح دهید.

چگونه اشکال برطرف می شود؟

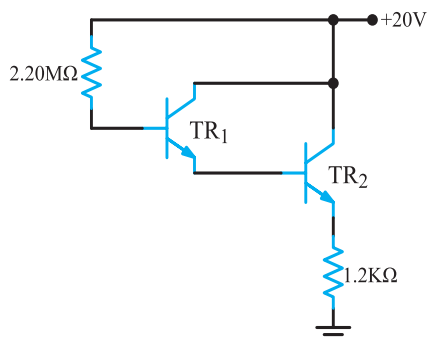
۴-۱-۷- کاربرد تقویت کننده آشناری را شرح دهید.

## محاسباتی

۴-۱-۸- در شکل ۴-۵۰ با فرض  $\beta_1 = \beta_2 = 50$

و  $V_{BE1} = V_{BE2} = 0.7V$  چه قدرتی در ترانزیستور  $TR_2$  تلف

می شود؟



شکل ۴-۵۰