فصل چهارم

تقویت‌کننده‌های چندطبقه

Multistage Amplifiers

زمان اجرا : ۱۲ ساعت آموزشی

هدف کلی : بررسی تقویت‌کننده‌های چندطبقه و انواع کوپلاژ بین طبقات

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

۱ــ تقویت‌کنندهٔ چندطبقه را توضیح دهد.
۲ــ علل استفاده از تقویت‌کننده‌های چندطبقه را شرح دهد.
۳ــ بهرهٔ تقویت‌کننده‌های چندطبقه را محاسبه کند.
۴ــ روش‌های مختلف کوپلاژ تقویت‌کننده‌های چندطبقه را شرح دهد.
۵ــ کوپلاژ خازنی را با رسم یک نمونه مدار توضیح دهد.
۶ــ محاسبات مربوط به مدار معادل DC کوپلاژ خازنی را انجام دهد.
۷ــ کوپلاژ ترانسفورماتوری را بارسم یک نمونه مدار توضیح دهد.
۸ــ محاسبات مربوط به مدار معادل DC کوپلاژ ترانسفورماتوری را انجام دهد.
۹ــ کوپلاژ مستقیم را با رسم یک نمونه مدار توضیح دهد.
۱۰ــ محاسبات مربوط به مدار معادل DC کوپلاژ مستقیم را انجام دهد.
۱۱ــ مزایا و معایب انواع کوپلاژ را بیان کند.
۱۲ــ زوج دارلینگتون و انواع آن را شرح دهد.
۱۳ــ تقویت کنندهٔ آبشاری را با ترانزیستور BJT و JFET، توضیح دهد.
۱۴ــ مسائل مربوط به انواع کوپلاژ را حل کند.
۱۵ــ به سؤالات الگوی پرسش پاسخ دهد.

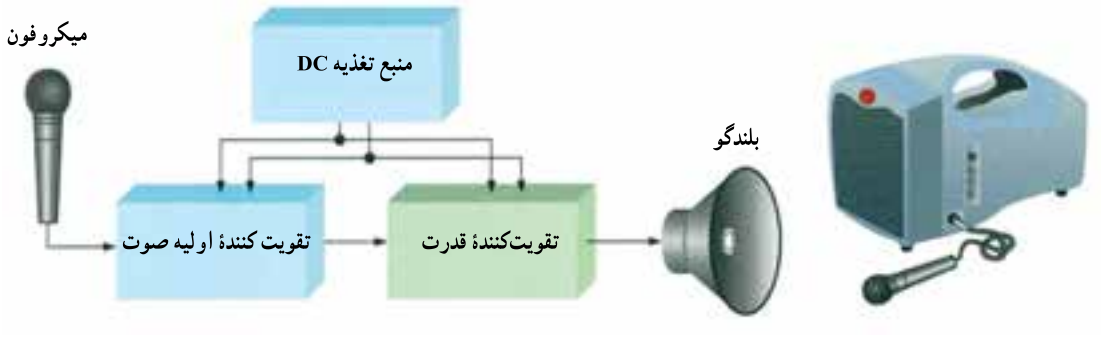
پیش‌گفتار

در فصل های گذشته تقویت کننده های امیتر مشترک، بیس مشترک و کلکتور مشترک را بررسی کردیم و دیدیم که محدودیت هایی در بهره، امپدانس ورودی و امپدانس خروجی این نوع تقویت‌کننده‌ها وجود دارد. لذا به دلیل این محدودیت‌ها، در بسیاری از سیستم‌های الکترونیکی نمی‌توانیم تنها از یک طبقه تقویت‌کننده استفاده کنیم. در این شرایط برای به دست آوردن بهرهٔ مورد نیاز، باید چند طبقه تقویت‌کننده را پشت سرهم ببندیم و تقویت‌کننده‌های چندطبقه را تشکیل دهیم.

۱ــ۴ــ ساختار تقویت‌کننده‌های چندطبقه

شکل ۱ــ۴ شکل ظاهری و شکل ۲ــ۴، بلوک دیاگرام یک سیستم کامل آمپلی‌فایر صوتی را نشان می‌دهد.

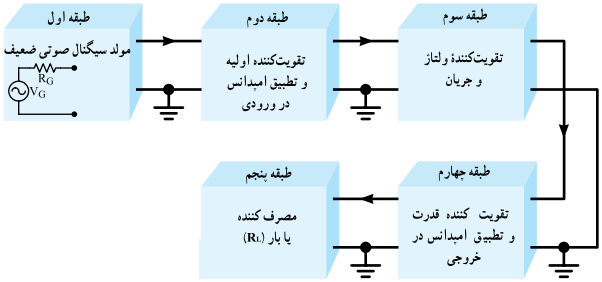
ورودی این سیستم می‌تواند میکروفون، خروجی دستگاه پخش صوت، خروجی دستگاه CD خوان و ... باشد. بار یا مصرف‌کنندهٔ متصل شده به خروجی، یک بلندگو است.



الف ــ نمونهٔ واقعی آمپلی‌فایر　　ب ــ بلوک دیاگرام یک سیستم صوتی

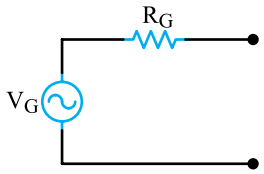
شکل ۱ــ۴ــ بلوک دیاگرام یک سیستم آمپلی‌فایر صوتی و نمونهٔ واقعی آن

هر بلوک این آمپلی‌فایر ممکن است شامل چند بلوک فرعی و هر بلوک فرعی شامل چندین ترانزیستور یا آی‌سی باشد. طبق شکل ۲ــ۴ این آمپلی‌فایر صوتی در ۵ طبقه نشان داده شده است.



شکل ۲ــ۴ــ بلوک دیاگرام کامل‌تری از یک آمپلی‌فایر صوتی

طبقهٔ اول مولد سیگنال صوتی ضعیف مثلاً میکروفون است. مدار معادل الکتریکی تونن آن مشابه شکل ۳ــ۴ است، امپدانس خروجی این طبقه را R_G درنظر می گیریم.



شکل ۳ــ۴ــ مدار معادل الکتریکی مولد سیگنال

برای آن که حداکثر توان از طبقهٔ اول به طبقهٔ دوم انتقال داده شود، باید امپدانس خروجی طبقهٔ اول (R_G) با امپدانس ورودی طبقهٔ دوم برابر باشد. لذا در طبقهٔ دوم از تقویت‌کننده‌ای استفاده می‌شود که بتواند تطبیق امپدانس بین طبقهٔ اول و دوم را به درستی برقرار کند. مثلاً میکروفون‌های کریستالی یا خازنی امپدانس داخلی زیادی دارند. بنابراین برای تطبیق امپدانس باید امپدانس ورودی طبقه دوم زیاد باشد. در این شرایط تقویت‌کننده‌ای با ترانزیستور FET برای این کار نیاز است که در طبقه دوم قرار می‌گیرد.

در طبقهٔ سوم ولتاژ و جریان سیگنال صوتی در حدی تقویت می‌شود که بتواند طبقهٔ تقویت‌کنندهٔ قدرت را راه‌اندازی کند. به این طبقه مدار راه‌انداز یا درایور (Driver) می‌گویند. در طبقهٔ راه‌انداز معمولاً یک یا چند طبقه تقویت‌کنندهٔ امیتر مشترک قرار می‌گیرد.

طبقهٔ چهارم همان‌طوری که گفته شد، تقویت‌کنندهٔ قدرت است. در این طبقه معمولاً یک تقویت‌کنندهٔ کلکتور مشترک قرار می‌گیرد، زیرا بهرهٔ جریان در مدار کلکتور مشترک زیاد و امپدانس خروجی آن کم است. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که جریان کافی برای تحریک و راه‌اندازی بلندگو فراهم شود و بلندگو را که امپدانس کمی دارد با مدار تقویت‌کنندهٔ قدرت تطبیق دهد.

در طبقهٔ انتهایی تقویت‌کننده معمولاً بلندگو قرار می‌گیرد. بلندگو سیگنال الکتریکی را به ارتعاشات مکانیکی تبدیل می‌کند و امواج صوتی قابل شنیدن را با شدت و توان کافی مهیا می‌سازد. همان‌طوری که در ابتدای این بحث متذکر شدیم توسط

یک طبقه تقویت‌کنندهٔ معمولی نمی‌توان بهرهٔ ولتاژ، بهرهٔ جریان و بهرهٔ توان بسیار بالا و در حدنیاز را تولید کرد. هم‌چنین درصورت استفاده از یک طبقه تقویت‌کننده نمی‌توان تطابق لازم را بین مبدل‌های ورودی و خروجی مدار تقویت کننده برقرار نمود.

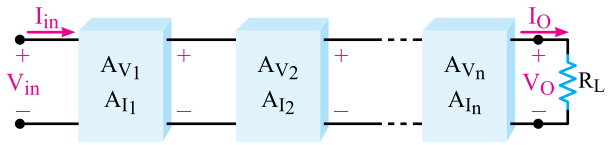
هنگام پشت سرهم قرار دادن تقویت‌کننده‌ها باید به دو نکتهٔ مهم توجه کنید :

- تطبیق امپدانس بین طبقات و مبدل های ورودی و خروجی تقویت‌کننده صورت گیرد.
- ارتباط بین دوطبقه تقویت‌کننده به‌طور صحیح برقرار شود. نحوهٔ ارتباط بین تقویت‌کننده‌ها را کوپلاژ (Coupling) تقویت‌کننده‌ها به یک‌دیگر می گویند. شکل ۴ــ۴ چند طبقه تقویت‌کننده را که به صورت بلوک دیاگرام به هم اتصال داده شده‌اند، نشان می‌دهد. شرط تطبیق امپدانس، برابر بودن امپدانس خروجی هر طبقه با ورودی طبقهٔ بعدی است.

شکل ۴ــ۴ــ بلوک دیاگرام اتصال چندطبقه تقویت‌کننده به هم

۲ــ۴ــ بهرهٔ تقویت‌کننده‌های چندطبقه

اگر n طبقهٔ تقویت‌کننده با بهره‌های ولتاژ Av_1 و Av_2 و ... Av_n و بهره‌های جریان Ai_1 و Ai_2 و ... Ai_n طبق شکل ۵ــ۴ پشت سرهم قرار گیرند، یک تقویت‌کنندهٔ n طبقه به‌دست می‌آید.



شکل ۵ــ۴ــ بلوک دیاگرام n طبقه تقویت‌کننده

با توجه به اختلاف بین سیگنال های ورودی و خروجی تقویت کننده‌ها، بهرهٔ ولتاژ و بهرهٔ جریان کل تقویت‌کننده از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$A_{VT} = \frac{V_{on}}{V_{i_1}} = \pm Av_1 Av_2 ... Av_n$$

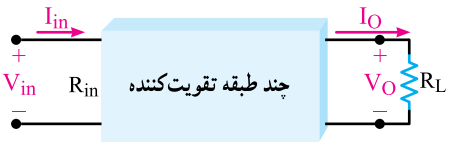
$$A_{IT} = \frac{I_{on}}{I_{i_1}} = \pm A_{I1} A_{I2} ... A_{In}$$

در رابطهٔ بهرهٔ ولتاژ کل (A_{VT})، علامت (+) به معنی هم فاز بودن V_O یا V_{in} و علامت (–) به معنی وجود ۱۸۰° درجه اختلاف فاز بین V_O و V_{in} است. در رابطهٔ بهرهٔ جریان کل (A_{IT})، علامت‌های ± نیز همین مفهوم را دارند.

باید توجه داشت که در شکل ۵ــ۴ بهره ولتاژ (A_V) و بهرهٔ جریان (A_I) برای هر طبقه در شرایطی درنظر گرفته شده است که همهٔ طبقات به هم اتصال دارند به عبارت دیگر، A_V و A_I بیانگر میزان تقویت هر طبقه به‌طور مستقل نیست. بهرهٔ توان کل از حاصل ضرب بهرهٔ ولتاژ و بهرهٔ جریان به‌دست می‌آید.

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

برای اثبات رابطهٔ بهره توان کل می توان بلوک دیاگرام چندطبقه تقویت‌کننده را به صورت یک بلوک کلی مانند شکل ۶ــ۴ درنظر گرفت.



شکل ۶ــ۴ــ نمایش چند طبقه تقویت‌کننده در یک بلوک تکی

در بلوک شکل ۶ــ۴ بهرهٔ توان کل از رابطهٔ زیر به‌دست 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 :

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

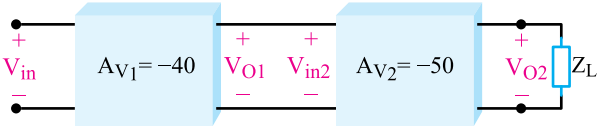
به‌جای مقادیر $R_L I_O$ و $R_{in} I_{in}$ مقادیر معادل آن یعنی V_O و V_{in} را قرار می‌دهیم.

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

اگر در این معادله به‌جای $\frac{V_O}{V_m}$ و $\frac{I_o}{I_{in}}$ ، A_{VT} و A_{IT} قرار داده شود رابطهٔ بهرهٔ توان کل به‌صورت $\boxed{A_P = A_{VT} \times A_{IT}}$ به‌دست می‌آید.

تحقیق کنید : با مراجعه به منابع مختلف و سایت‌های اینترنتی تحقیق کنید که به چه دلیل میزان بهرهٔ طبقات تقویت کننده به صورت جداگانه و متصل به هم تفاوت دارد. نتیجه تحقیق خود را به کلاس ارائه دهید.

مثال ۱ــ۴ : با توجه به شکل ۷ــ۴ اگر V_{in} برابر ۱mV باشد، V_{O1} و V_{O2} و AV_T را محاسبه کنید.



شکل ۷ــ۴ــ بلوک دیاگرام دو طبقه تقویت‌کننده

پاسخ : بهرهٔ ولتاژ طبقهٔ اول از رابطهٔ $A_{V1} = \frac{V_{O1}}{V_{in1}}$ به‌دست می‌آید. لذا $V_{O1} = A_{V1} V_{in1}$ است. به‌جای 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 اندازهٔ 180° اختلاف فاز دارد. بهرهٔ ولتاژ طبقهٔ دوم از رابطهٔ $A_{V2} = \frac{V_{O2}}{V_{in2}}$ به‌دست می‌آید. رابطه را به صورت $V_{O2} = A_{V2} V_{in2}$ می‌نویسیم. چون V_{O1} برابر V_{in2} است به‌جای V_{in2} مقدار عددی V_{O1} را قرار می‌دهیم :

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

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

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

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

$$A_{VT} = (-40)(-50) = +2000$$ مرتبه

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

تمرین کلاسی : اگر A_{V1} برابر +۲۰ و A_{V2} برابر –۱۰ باشد A_{VT} را محاسبه کنید.

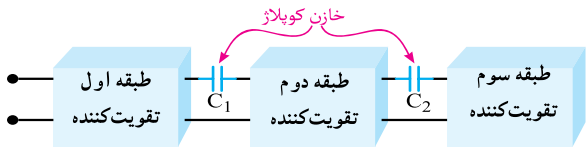
۳ــ۴ــ اتصال تقویت‌کننده‌ها به یکدیگر

برای انتقال سیگنال از یک طبقهٔ تقویت کننده به طبقهٔ دیگر، باید دو طبقه را به یکدیگر اتصال دهیم. چگونگی اتصال دو طبقه تقویت کننده را به یکدیگر کوپلاژ (Coupling) می‌گویند. اتصال بین طبقات به وسیلهٔ خازن، ترانسفورماتور یا به‌طور مستقیم امکان‌پذیر است. از این‌رو سه نوع کوپلاژ خازنی، ترانسفورماتوری و مستقیم تعریف می‌شود.

۴ــ۴ــ کوپلاژ خازنی

اگر دو یا چندطبقه تقویت‌کننده را به وسیلهٔ یک یا چند خازن

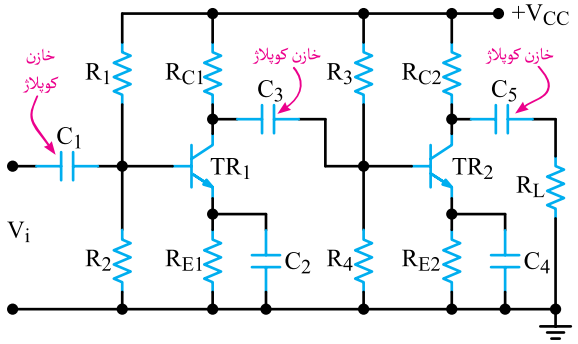
به یکدیگر وصل کنیم می‌گوییم کوپلاژ بین طبقات تقویت‌کننده به صورت خازنی است. در شکل ۸ــ۴ بلوک دیاگرام سه طبقه تقویت‌کننده و خازن‌های کوپلاژ بین آن‌ها نشان داده شده است.



شکل ۸ــ۴ــ 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.

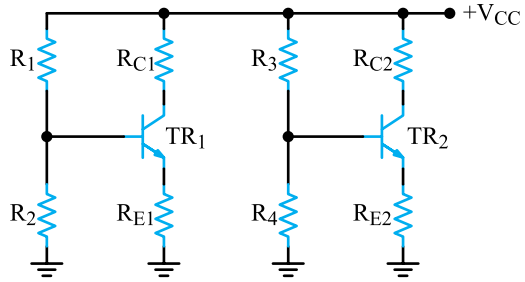
۱ــ۴ــ۴ــ مدار تقویت‌کننده با کوپلاژ RC : در شکل ۹ــ۴ مدار یک تقویت‌کنندهٔ دو طبقه با کوپلاژ RC نشان داده شده است. در این مدار، دو طبقهٔ تقویت‌کننده توسط خازن کوپلاژ C_3 به یکدیگر متصل شده‌اند. هر دو طبقهٔ تقویت‌کننده از نوع امیتر مشترک‌اند و نوع بایاس ترانزیستورها سرخود یا تقسیم ولتاژ مقاومتی است.



شکل ۹ــ۴ــ 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 طبقهٔ 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.

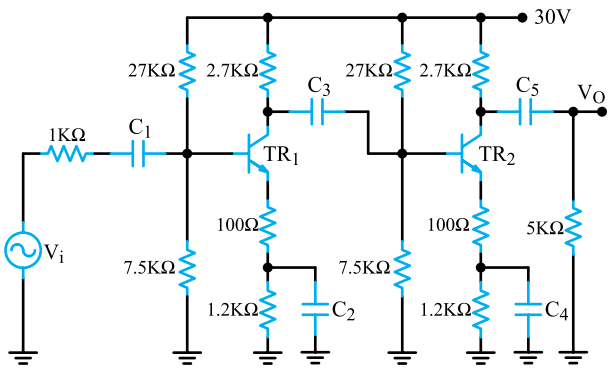
۲ــ۴ــ۴ــ مدار معادل DC تقویت‌کننده با کوپلاژ خازنی : در مدار معادل DC، کلیهٔ خازن‌های مدار مقاومت (∞) دارند و به صورت باز درنظر گرفته می‌شوند. بنابراین معادل DC شکل ۹ــ۴ به صورت مدار شکل ۱۰ــ۴ درمی‌آید.



شکل ۱۰ــ۴ــ مدار معادل DC دوطبقه تقویت‌کننده با کوپلاژ خازنی

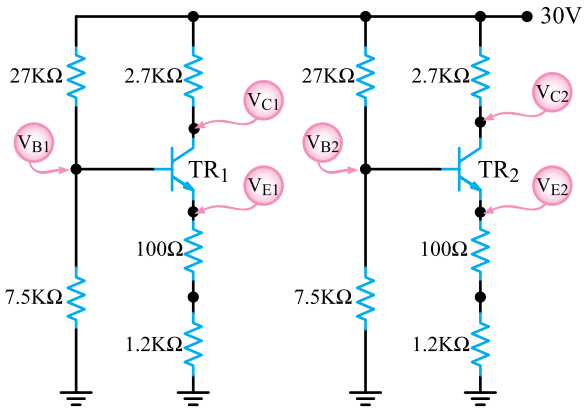
همان‌طوری که در شکل ۱۰ــ۴ مشاهده می‌شود، تغذیهٔ دوطبقه مدار تقویت‌کنندهٔ امیتر مشترک از طریق یک منبع تغذیه و به صورت بایاس تقسیم کننده ولتاژ مقاومتی (سرخود) صورت می‌گیرد و هیچ‌گونه ارتباط DC بین دوطبقه وجود ندارد. هم‌چنین محاسبات DC هر طبقه باید به‌طور جداگانه انجام شود.

مثال ۲ــ۴ : در شکل ۱۱ــ۴ اگر $\beta_1 = \beta_2 = 200$ و $V_{BE1} = V_{BE2} = 0/7V$ باشد ولتاژ هریک از پایه‌های ترانزیستورهای TR_1 و TR_2 را نسبت به شاسی محاسبه کنید.



شکل ۱۱ــ۴ــ دوطبقه تقویت‌کننده با کوپلاژ خازنی

پاسخ : ابتدا مدل DC تقویت‌کننده را رسم می‌کنیم. شکل ۱۲ــ۴ مدل DC تقویت‌کننده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ــ۴ــ مدل DC تقویت کننده

ازنظر DC مقاومت امیتر ترانزیستورها، از دو مقاومت سری Ω ۱۲۰۰ و Ω ۱۰۰ تشکیل شده است. هم‌چنین با توجه به مشابه بودن ترانزیستورها و یکسان بودن مقاومت‌های بایاس، نقطهٔ کار دو ترانزیستور مشابه یک‌دیگر است. با استفاده از تقسیم ولتاژ بین دو مقاومت ۲۷kΩ و ۷/۵ kΩ مقدار ولتاژ B_1 و B_2 را محاسبه می‌کنیم.

$$V_{B1} = V_{B2} = ۳۰ \times \frac{۷/۵}{۷/۵ + ۲۷} = ۶/۵۲V$$

$$\boxed{V_{B1} = V_{B2} = ۶/۵۲V}$$

با توجه به مقدار V_{BE} ، مقدار V_{E1} و V_{E2} را به‌دست می‌آوریم.

$$V_{E1} = V_{E2} = V_{B1} - V_{BE1} = V_{B2} - V_{BE2}$$
$$= ۶/۵۲ - ۰/۷ = ۵/۸۲V$$

$$\boxed{V_{E1} = V_{E2} = ۵/۸۲V}$$

جریان امیتر از حاصل تقسیم V_{E_1} بر R_{E1} به‌دست می‌آید.

$$I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_{E1}} = \frac{۵/۸۲}{۰/۱ + ۱/۲} = ۴/۴۸mA$$

چون I_C تقریباً برابر با I_E است می‌توانیم بنویسیم.

$$\boxed{I_{C1} = I_{E1} = I_{C2} = I_{E2} = ۴/۴۸mA}$$

در حلقهٔ خروجی مقدار V_{C1} و V_{C2} را محاسبه می‌کنیم.

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

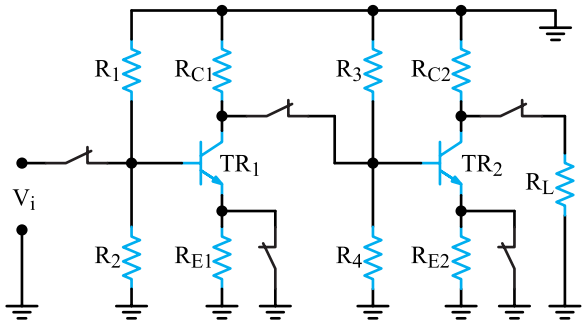
$$V_{C1} = V_{C2} = ۳۰ - (۲/۷)(۴/۴۸)$$

$$\boxed{V_{C1} = V_{C2} = ۱۷/۹V}$$

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

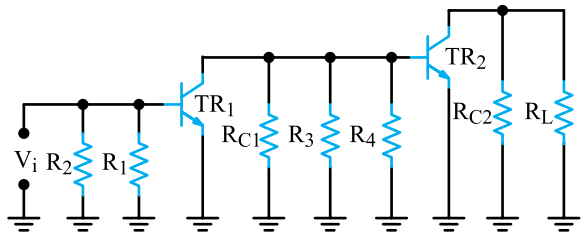
۳ــ۴ــ۴ــ مدار معادل AC تقویت‌کننده با کوپلاژ RC

: در رسم مدار معادل AC، کلیهٔ خازن‌های مدار را به‌صورت اتصال کوتاه در نظر می‌گیریم و منبع تغذیهٔ $+V_{CC}$ را به زمین الکتریکی وصل می‌کنیم. بنابراین مدار معادل ac تقویت‌کنندهٔ شکل ۹ــ۴ به صورت شکل ۱۳ــ۴ درمی‌آید.



شکل ۱۳ــ۴ــ مدل AC مدار تقویت‌کننده

با رعایت قواعد مربوط به رسم نقشهٔ فنی یک مدار الکترونیکی، شکل ۱۳ــ۴ به صورت شکل ۱۴ــ۴ درمی‌آید.

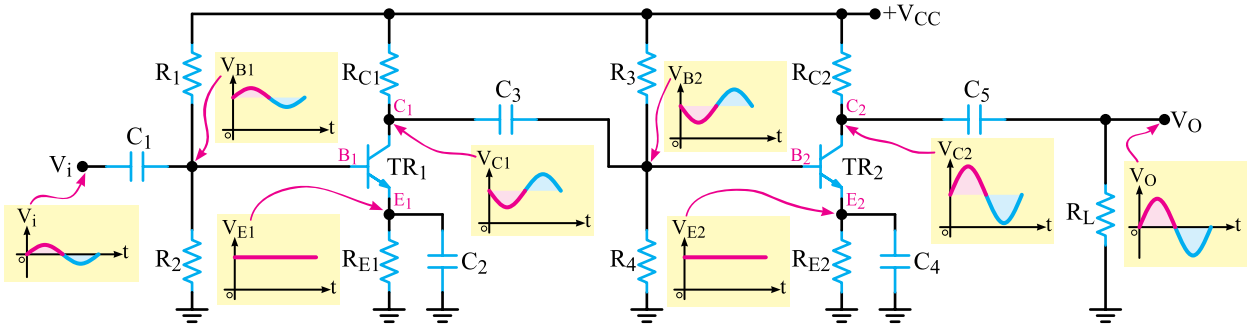


شکل ۱۴ــ۴ــ مدل AC تقویت‌کننده

همان‌طور که مشاهده می شود در مدار معادل ac این تقویت کننده، مقاومت‌های بایاس R_1 و R_2 هم‌چنین R_3 و R_4 باهم به صورت موازی درمی‌آیند. در ضمن مقاومت بار (R_L) با مقاومت R_{C2} به صورت موازی دیده می‌شود. توجه داشته باشید که مقاومت‌های بایاس R_3 و R_4 به عنوان بار R_{L1} با مقاومت R_{C1}

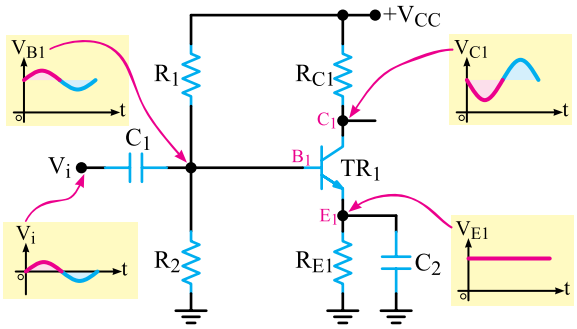
به صورت موازی بسته شده است. به‌نظر می‌رسد که در این مدار منبع تغذیه وجود ندارد اما توجه داشته باشید که ترانزیستورها به‌عنوان یک منبع تغذیهٔ وابسته عمل می‌کنند که تحلیل آن از بحث ما خارج است.

۴ــ۴ــ۴ــ شکل موج نقاط مختلف مدار : به تقویت‌کنندهٔ دوطبقه و شکل موج نقاط مختلف آن در شکل ۱۵ــ۴ توجه کنید. می‌خواهیم شکل موج نقاط مختلف مدار را بررسی کنیم. با مراجعه به مثال ۲ــ۴ 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 نقطهٔ B_1 را به وجود می‌آورد.



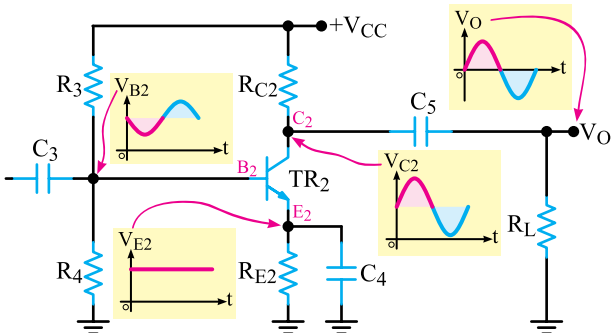
شکل ۱۵ــ۴ــ تقویت‌کنندهٔ دوطبقه با کوپلاژ خازنی

این سیگنال با ۱۸۰ درجه اختلاف فاز در کلکتور ترانزیستور تقویت می‌شود. مشابه نقطهٔ B_1، سیگنال در کلکتور TR_1 (نقطهٔ C_1) سیگنالی ac سوار بر سیگنال DC کلکتور است. چون امیتر ترانزیستور از نظر ac توسط خازن بای‌پاس C_2 به زمین الکتریکی اتصال کوتاه شده است، در نقطهٔ E_1 فقط مؤلفهٔ DC با مقدار V_{E1} وجود دارد. شکل ۱۶ــ۴، شکل موج نقاط مختلف طبقهٔ اول تقویت‌کنندهٔ دوطبقهٔ شکل ۱۵ــ۴ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶ــ۴ــ شکل موج نقاط مختلف طبقهٔ اول تقویت‌کننده (ترانزیستور T_{R1})

خازن کوپلاژ C_2 مقدار مؤلفهٔ DC کلکتور TR_1 را حذف می‌کند و فقط سیگنال ac کلکتور TR_1 را به بیس TR_2 می‌رساند. این سیگنال ac در نقطهٔ B_2 سوار مؤلفهٔ DC بیس TR_2 می‌شود. مراحل انجام تقویت در این طبقه نیز شبیه طبقهٔ اول تقویت‌کنندهٔ دوطبقه است. در نهایت خازن کوپلاژ C_5 مؤلفهٔ DC کلکتور TR_2 را حذف می‌کند و فقط سیگنال متناوب را به بار (R_L) انتقال می‌دهد. به علت وجود دو طبقه تقویت‌کننده امیتر مشترک، سیگنال ورودی و خروجی با هم هم‌فاز هستند. شکل ۱۷ــ۴ شکل موج نقاط مختلف تقویت‌کنندهٔ طبقه دوم (ترانزیستور TR_2) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷ــ۴ــ شکل موج‌های طبقه دوم تقویت‌کننده

۵ــ۴ــ۴ــ مزایا و معایب کوپلاژ خازنی : اتصال چندطبقه تقویت‌کننده از طریق کوپلاژ خازنی به یکدیگر، دارای

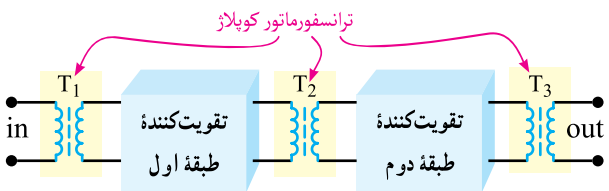
مزایا و معایبی است. یکی از مزایای این نوع کوپلاژ، در این است که طبقات از نظر مقادیر DC (نقطهٔ کار ترانزیستورها) کاملاً مستقل از هم هستند و تغییر نقطهٔ کار یک طبقه، روی سایر طبقات اثر نمی‌گذارد.

اِشکال عمدهٔ کوپلاژ خازنی آن است که تقویت‌کننده، سیگنال‌های با فرکانس پایین را به درستی تقویت نمی‌کند؛ زیرا در فرکانس‌های پایین عکس‌العمل خازن‌های کوپلاژ و خازن های بای‌پاس امیتر افزایش می‌یابد و همین امر موجب تضعیف سیگنال خروجی می‌شود.

هم‌چنین در این نوع تقویت‌کننده‌ها، به علت استفاده از تعداد زیاد مقاومت‌ها و تلفات زیاد توان در آن‌ها، قدرت اعمال شده به بار کم است. درعمل، از کوپلاژ خازنی در تقویت‌کننده‌های با قدرت کم استفاده می‌شود.

۵ــ۴ــتقویت‌کننده‌های با کوپلاژ ترانسفورماتوری

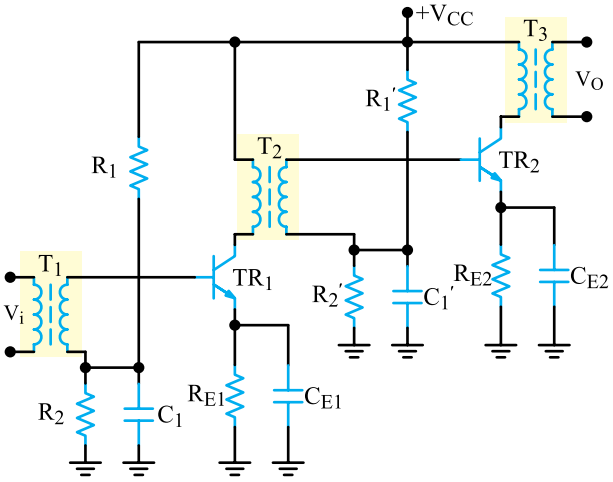
در کوپلاژ R_C به دلیل این که در هر تقویت کننده بین کلکتور ترانزیستور و منبع تغذیه یک مقاومت R_C وجود دارد، افت توان در مقاومت R_C به‌وجود می‌آید. در نتیجه، قدرت اعمال شده به بار کم است. برای برطرف کردن این عیب، به‌خصوص در تقویت‌کننده‌های با قدرت زیاد، از کوپلاژ ترانسفورماتوری استفاده می‌کنند. به این ترتیب که اولیهٔ یک ترانسفورماتور را به جای مقاومت R_C، در کلکتور ترانزیستور قرار می‌دهند و موج خروجی را از ثانویهٔ آن می‌گیرند و به ورودی طبقهٔ بعدی می‌رسانند. ترانسفورماتورهای کوپلاژ ممکن است از نوع افزاینده یا کاهندهٔ ولتاژ باشند. ترانسفورماتور نیز مانند خازن مانع اثرگذاری ولتاژ DC طبقات روی یک‌دیگر می‌شود. شکل ۱۸ــ۴ نحوهٔ اتصال دو طبقه تقویت کننده را به صورت بلوک دیاگرام و با کوپلاژ ترانسفورماتوری نشان می‌دهد.



شکل ۱۸ــ۴ــ بلوک دیاگرام دو طبقه تقویت‌کننده با کوپلاژ ترانسفورماتوری

۱ــ۵ــ۴ــ مدار تقویت‌کننده با کوپلاژ ترانسفورماتوری

: در شکل ۱۹ــ۴ مدار یک نمونه تقویت کنندهٔ دوطبقه با کوپلاژ ترانسفورماتوری را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۹ــ۴ــ مدار تقویت‌کنندهٔ دوطبقه با کوپلاژ ترانسفورماتوری

در این مدار، مقاومت‌های R_1 ، R_2 برای تأمین بایاس بیس TR_1، مقاومت R_{E1} برای پایداری حرارتی TR_1 و خازن C_{E1} خازن بای‌پاس R_{E1} است که به صورت موازی با مقاومت R_{E1} قرار گرفته است. خازن C_1 (خازن بای‌پاس R_2) را به این جهت در مدار قرار می‌دهند که وقتی موج متناوب به مدار داده می‌شود، امپدانس خازن به شدت کاهش می‌یابد و مقاومت R_2 را در مقابل AC اتصال کوتاه (بای‌پاس) می‌کند. در این حالت، ضریب تقویت زیاد می‌شود. نحوهٔ 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.

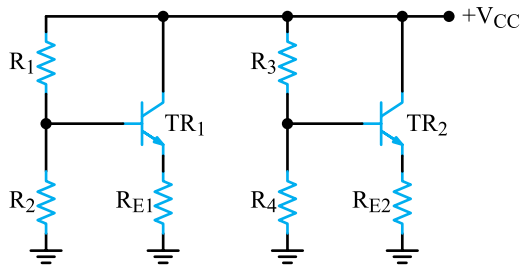
استفاده از ترانسفورماتور T_2 بین TR_1 و TR_2 ضمن این که تلفات تقویت‌کننده را کم می‌کند، راندمان مدار را نیز بالا برده هم چنین وسیله‌ای برای ایجاد تطبیق امپدانس بین دو تقویت‌کننده به شمار می‌آید. همان‌طور که می‌دانید، تقویت‌کنندهٔ امیتر مشترک دارای امپدانس ورودی متوسط و امپدانس خروجی متوسط است. بنابراین، در موقع کوپلاژ دو تقویت‌کنندهٔ CE به یک‌دیگر، مسئلهٔ تطبیق امپدانس وجود دارد که باید به‌طریقی آن را حل کرد. عموماً در کوپلاژ R_C این مسئله حل نمی‌شود؛ در حالی

که در کوپلاژ ترانسفورماتوری مسئلهٔ تطبیق امپدانس به راحتی حل‌شدنی است. زیرا امپدانس اولیه و ثانویهٔ 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 به‌خوبی عمل نمی‌کند؟ بررسی کنید و نتایج را به کلاس ارائه دهید.

۲ــ۵ــ۴ــ مدار معادل DC تقویت‌کننده با کوپلاژ ترانسفورماتوری

ترانسفورماتوری : از آن‌جا که معمولاً سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویهٔ 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 به‌صورت مدار باز درنظر گرفته می‌شوند، لذا مدار معادل DC تقویت‌کنندهٔ شکل ۱۹ــ۴ به‌صورت شکل ۲۰ــ۴ درمی‌آید.



شکل ۲۰ــ۴ــ معادل DC مدار تقویت‌کنندهٔ با کوپلاژ ترانسفورماتوری

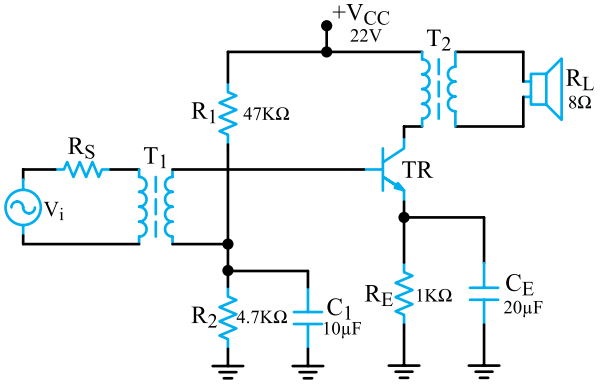
همان‌طور که در شکل مشاهده می‌کنید، دوطبقه از نظر DC هیچ‌گونه ارتباطی باهم ندارند و محاسبات DC ترانزیستورها باید به‌طور جداگانه انجام گیرد.

بایاس مدار از نوع تقسیم‌کنندهٔ ولتاژ مقاومتی است با این فرض که در کلکتور مقاومتی وجود ندارد. بنابراین، از نظر محاسبهٔ DC مانند مدار بایاس تقسیم‌کنندهٔ 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.

برای هنرجویان علاقه‌مند

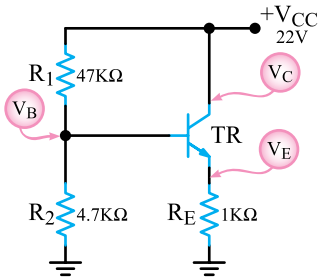
تحقیق کنید : با مراجعه به منابع مختلف و سایت‌های اینترنتی شرایط ایجاد کلاس A در تقویت‌کننده‌های با کوپلاژ ترانسفورماتوری را بررسی کنید و نتایج را به کلاس ارائه نمایید.

مثال ۳ــ۴ : در شکل ۲۱ــ۴ اگر ترانسفورماتورها ایده‌آل فرض شوند، ضمن رسم مدار معادل DC، نقطهٔ کار DC ترانزیستور را محاسبه کنید. $V_{BE} = ۰/۷$ ولت و $\beta = ۲۰۰$ است.



شکل ۲۱ــ۴ــ مدار با کوپلاژ ترانسفورماتوری

پاسخ : با اتصال کوتاه درنظر گرفتن سیم‌پیچ اولیهٔ ترانسفورماتورها و با باز بودن خازن‌ها، مدار معادل DC به‌صورت شکل ۲۲ــ۴ درمی‌آید.



شکل ۲۲ــ۴ــ معادل DC مدار

در مدار تقسیم‌کنندهٔ ولتاژ مقاومتی $R_۱$ و $R_۲$، مقدار V_B را محاسبه می‌کنیم.

$$V_B = \frac{V_{CC}R_۲}{R_۱ + R_۲} = \frac{۲۲ \times ۴/۷}{۴/۷ + ۴۷} = \frac{۱۰۳/۴}{۵۱/۷}$$

$V_B = ۲V$

V_E از تفاضل V_B و V_{BE} به‌دست می‌آید.

$$V_E = V_B - V_{BE} = ۲ - ۰/۷ = ۱/۳V$$

I_E را محاسبه می‌کنیم.

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

مقدار I_C را تقریباً برابر با I_E درنظر می‌گیریم.

$$I_C \approx I_E = ۱/۳mA$$

با توجه به مقدار β ، I_B را محاسبه می‌کنیم.

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{۱/۳}{۲۰۰} = ۶/۵ \times ۱۰^{-۳} mA$$

$$I_B = ۶/۵ \mu A$$

مقدار V_{CE} را به‌دست می‌آوریم.

$$V_C = V_{CC} = ۲۲V$$

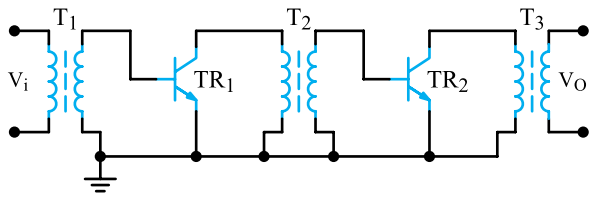
$$V_{CE} = V_C - V_E = ۲۲ - ۱/۳ = ۲۰/۷V$$

$$V_{CE} = ۲۰/۷V$$

۳ــ۵ــ۴ــ مدار معادل AC تقویت‌کننده با کوپلاژ ترانسفورماتوری

: در مدار معادل A C، خازن های مدار به‌صورت اتصال کوتاه درنظر گرفته می‌شوند و منبع ولتاژ $+V_{CC}$ به زمین الکتریکی اتصال دارد.

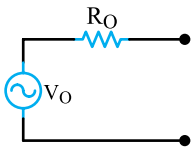
سیم پیچ‌ها به دلیل داشتن X_L یک مقاومت ac از خود نشان می‌دهند. بنابراین مدار معادل AC تقویت‌کنندهٔ شکل ۱۹ــ۴ به‌صورت ۲۳ــ۴ درمی‌آید.



شکل ۲۳ــ۴ــ معادل ac تقویت‌کننده

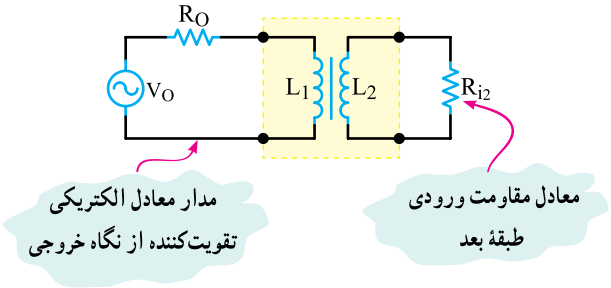
۴ــ۵ــ۴ــ نقش ترانسفورماتور به‌عنوان تطبیق‌دهندهٔ امپدانس بین دو طبقه

: مدار معادل تونن یک تقویت‌کننده را از درگاه خروجی می‌توانیم به‌صورت شکل ۲۴ــ۴ درنظر بگیریم.



شکل ۲۴ــ۴ــ معادل تقویت‌کننده از درگاه خروجی

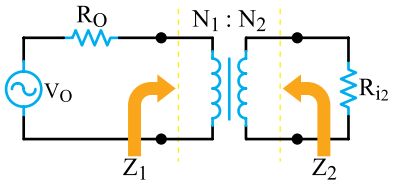
ترانسفورماتور می‌تواند به‌راحتی بین مقاومت خروجی طبقهٔ قبل (R_O) و مقاومت ورودی طبقهٔ بعد ($R_{in۲}$) تطابق برقرار کند. شکل ۲۵ــ۴ نقش ترانسفورماتور را بین دوطبقه نشان می‌دهد.



شکل ۲۵ــ۴ــ نقش ترانسفورماتور به عنوان تطبیق‌دهنده

۵ــ۴ــ۵ــ محاسبهٔ امپدانس اولیه و ثانویهٔ ترانسفورماتور تطبیق

: در شکل ۲۶ــ۴ اگر امپدانس اولیهٔ ترانسفورماتور $Z_۱$ و امپدانس ثانویهٔ آن را $Z_۲$ و تعداد دور اولیه را $N_۱$ و تعداد دور ثانویه را $N_۲$ فرض کنیم می‌توانیم با توجه به مقادیر $Z_۱$ و $Z_۲$ و $N_۱$ و $N_۲$ (یا نسبت $\frac{N_۱}{N_۲}$) در صورتی که یکی از مقادیر مجهول باشد، آن را محاسبه کنیم.



شکل ۲۶ــ۴ــ ترانسفورماتور جهت تطبیق امپدانس

رابطهٔ بین امپدانس اولیه و ثانویه در ترانسفورماتور به‌صورت زیر است :

$$\frac{Z_۱}{Z_۲} = (\frac{N_۱}{N_۲})^۲$$

برای برقراری تطابق لازم است $Z_۱ = R_O$ و $Z_۲ = R_{in۲}$

درنظر گرفته شود.

مثال ۴ــ۴ : در شکل ۴ــ۲۶ اگر $\frac{N_1}{N_2}=10$ و R_{in2} $=R_L=8\Omega$ باشد، مقدار R_O چه‌قدر انتخاب شود تا حداکثر توان از منبع V_O به بار انتقال یابد؟

پاسخ :

$$Z_2=R_L=8\Omega$$

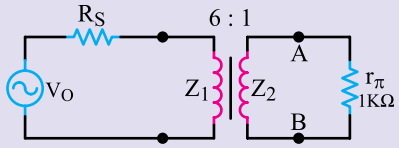
$$\frac{Z_1}{Z_2}=(\frac{N_1}{N_2})^2=(\frac{10}{1})^2=100$$

$$\frac{Z_1}{8}=100\Rightarrow Z_1=800\Omega$$

برای آن که حداکثر توان از منبع V_S به بار انتقال یابد باید R_O با Z_1 برابر باشد.

$$R_O=Z_1=800\Omega$$

تمرین کلاسی : در شکل ۴ــ۲۷ اگر مقاومت AB مقاومت معادل ac بیس امیتر ترانزیستور در آرایش امیتر مشترک (r_π) باشد، R_S را چه‌قدر انتخاب کنیم تا تطابق برقرار شود؟



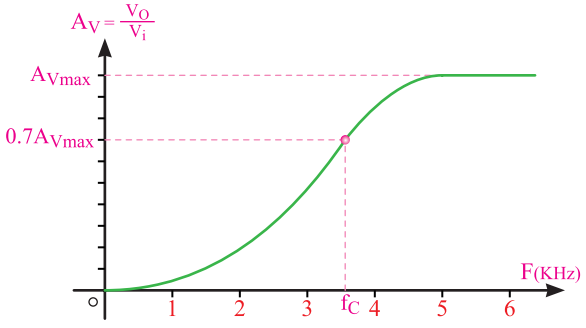
شکل ۴ــ۲۷

۶ــ۵ــ۴ــ 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. تقویت‌کننده‌های با کوپلاژ ترانسفورماتوری معایبی به شرح زیر دارند.

الف) ابعاد این نوع تقویت‌کننده‌ها به علت وجود ترانسفورماتور بزرگ می‌شود.

ب) در فرکانس‌های پایین به علت استفاده از بار سلفی پاسخ فرکانسی بدی دارند. در شکل ۴ــ۲۸ منحنی پاسخ فرکانسی تقویت‌کننده‌های با کوپلاژ ترانسفورماتوری را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد، فرکانس‌های پایین به درستی تقویت نمی‌شوند.



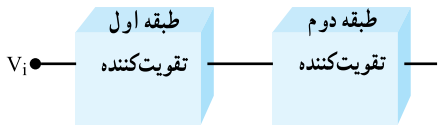
شکل ۴ــ۲۸ــ پاسخ فرکانسی بد برای فرکانس‌های پایین

پ) قیمت این تقویت‌کننده‌ها به‌علت استفاده از ترانسفورماتور افزایش می‌یابد. به‌دلیل وجود عیوب یادشده، امروزه در دستگاه‌های صوتی و تصویری به‌ندرت از تقویت‌کننده‌های با کوپلاژ ترانسفورماتوری استفاده می‌شود.

برای هنرجویان علاقه‌مند : با مراجعه به منابع مختلف و سایت‌های اینترنتی تحقیق کنید، به چه دلیل در تقویت‌کننده‌های فرکانس بالا مانند تقویت کننده‌های IF در گیرنده‌های رادیویی و تلویزیونی از کوپلاژ ترانسفورماتوری می‌توان استفاده کرد.

۶ــ۴ــ کوپلاژ مستقیم

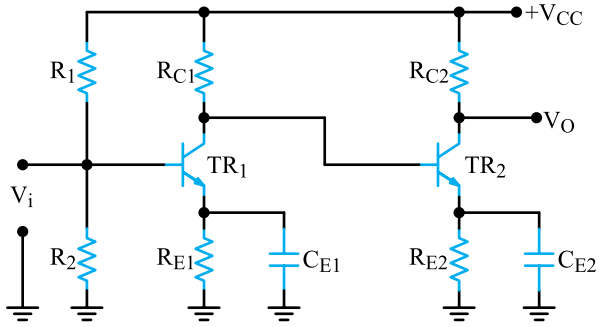
در این نوع کوپلاژ، دوطبقه تقویت‌کننده به صورت مستقیم به یکدیگر وصل می‌شوند. شکل ۴ــ۲۹ بلوک دیاگرام دوطبقه تقویت‌کننده را که به صورت کوپلاژ مستقیم به هم وصل شده‌اند، نشان می‌دهد.



شکل ۴ــ۲۹ــ بلوک دیاگرام دوطبقه تقویت‌کننده با کوپلاژ مستقیم

۱ــ۶ــ۴ــ مدار تقویت‌کننده با کوپلاژ مستقیم :

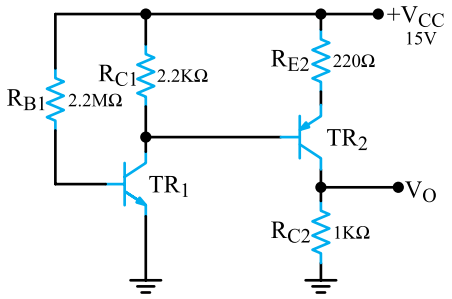
در شکل ۴ــ۳۰ مدار یک تقویت‌کنندهٔ دوطبقه با کوپلاژ مستقیم نشان داده شده است. در این مدار، مقاومت‌های R_1 و R_2 برای بایاس بیس T_{R1} است و R_{C1} ضمن تغذیهٔ کلکتور T_{R1}، بیس ترانزیستور T_{R2} را نیز بایاس می‌کند.



شکل ۳۰ــ ۴ــ مدار یک تقویت‌کنندهٔ دو طبقه با کوپلاژ مستقیم

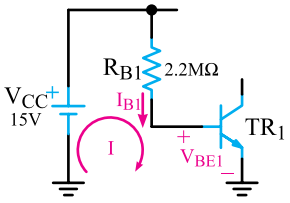
در این مدار هر دو طبقهٔ تقویت‌کننده از نوع امیتر مشترک هستند. با توجه به این که طبقات تقویت‌کننده ازنظر ولتاژ و جریان DC مستقل از یکدیگر نیستند، تغییرات نقطهٔ کار یک طبقه، روی نقطهٔ کار طبقهٔ دیگر تقویت‌کننده اثر می‌گذارد، لذا باید محاسبات DC مدار برای کلیهٔ طبقات به طور هم‌زمان انجام شود. همین وابستگی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

مثال ۵ــ۴ : در شکل ۳۱ــ۴ با فرض $\beta_1 = \beta_2 = 200$ و $|V_{BE}| = 0/6V$ مقدار ولتاژ DC خروجی چه‌قدر است؟



شکل ۳۱ــ۴ــ تقویت‌کننده با کوپلاژ مستقیم

پاسخ : ابتدا معادلهٔ KVL را در حلقهٔ I در شکل ۳۲ــ۴ می‌نویسیم :



شکل ۳۲ــ۴ــ بخشی از مدار ۳۱ــ۴

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

مقدار I_{B1} را محاسبه می‌کنیم.

$$I_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R_{B1}} = \frac{15 - 0/6}{2/2M\Omega}$$

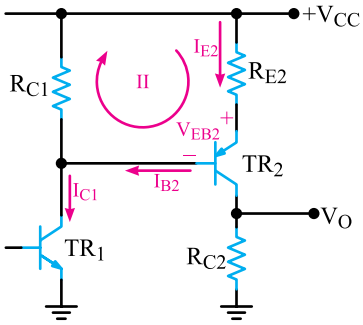
$$\boxed{I_{B1} = 6/54\mu A}$$

با استفاده از β مقدار I_{C1} را به‌دست می‌آوریم.

$$I_{C1} = \beta_1 I_{B1} = 6/54 \times 200 = 1308\mu A$$

$$\boxed{I_{C1} \approx 1/3mA}$$

به حلقهٔ II در شکل ۳۳ــ۴ توجه کنید.



شکل ۳۳ــ۴ــ بخش دیگری از مدار ۳۱ــ۴

با صرفنظر کردن از مقدار I_{B2}، جریان I_{C1} با جریان عبوری از مقاومت R_{C1} برابر می‌شود. هم‌چنین I_{E2} با I_{C2} تقریباً برابر درنظر گرفته می‌شود. معادلهٔ KVL را در حلقهٔ II می‌نویسیم.

$$R_{E2}I_{E2} + V_{EB2} - R_{C1}I_{C1} = 0$$

مقادیر عددی را جایگزین می کنیم و I_{E2} را به دست می‌آوریم.

$$0/22I_{E2} + 0/6 - 2/2 \times 1/3 = 0$$

$$0/22I_{E2} = 2/2 \times 1/3 - 0/6 = 2/26$$

$$I_{E2} = \frac{2/26}{0/22} = 10/27$$

$$\boxed{I_{C2} = I_{E2} = 10/27mA}$$

مقدار V_O از حاصل‌ضرب R_{C2} در I_{C2} به‌دست می‌آید.

$$V_O = R_{C2}I_{C2} = (1)(10/27) = 10/27V$$

$$\boxed{V_O = 10/27V}$$

۲ــ۶ــ۴ــ مزایا و معایب کوپلاژ مستقیم : از مزایای کوپلاژ مستقیم صرفه‌جویی در قطعات و مقرون به صرفه بودن ازنظر 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 نقطهٔ کار یک طبقه روی نقطهٔ 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 تقویت‌کننده‌های با کوپلاژ مستقیم به‌کار رفته است، باید توجه داشته باشید که در صورت سوختن یکی از ترانزیستورها باید کلیهٔ ترانزیستورها را مورد آزمایش قرار دهید و از صحت آن‌ها اطمینان حاصل کنید.

۷ــ۴ــ الگوی پرسش

کامل کردنی

۱ــ۷ــ۴ــ برای انتقال حداکثر توان از یک طبقه تقویت‌کننده به‌طبقهٔ دیگر باید امپدانس ..... طبقهٔ اول با امپدانس ..... طبقهٔ دوم برابر باشد.

صحیح یا غلط

۲ــ۷ــ۴ــ با قطع خازن کوپلاژ نقطهٔ کار DC تقویت‌کننده تغییر می‌کند.

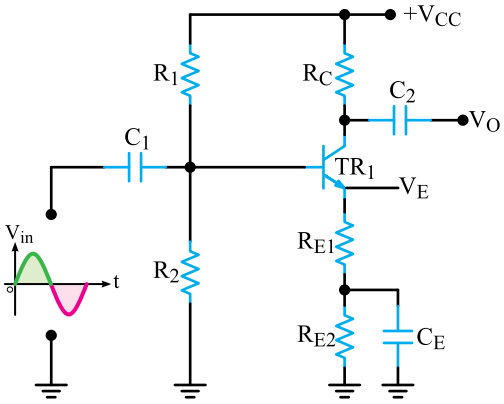
☐ صحیح ☐ غلط

کوتاه پاسخ

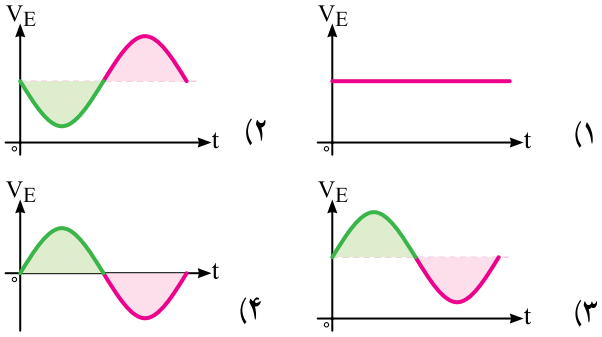
۳ــ۷ــ۴ــ برای اتصال دو تقویت‌کننده که در فرکانس‌های خیلی کم کار می‌کنند کدام نوع کوپلاژ از بقیه مناسب‌تر است؟

چهارگزینه‌ای

۴ــ۷ــ۴ــ باتوجه به سیگنال ورودی مدار ۴ــ۳۴ شکل موج ولتاژ امیتر ترانزیستور کدام است؟



شکل ۴ــ۳۴



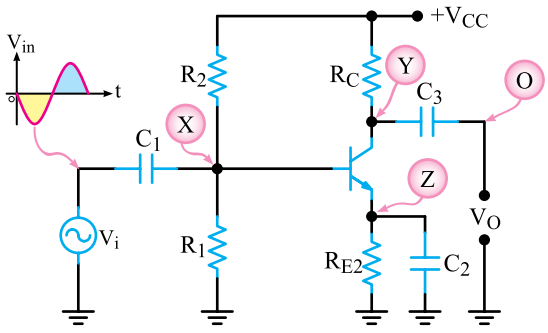
تشریحی

۵ــ۷ــ۴ــ کوپلاژ را تعریف کنید و انواع آن را نام ببرید.

۶ــ۷ــ۴ــ مزایا و معایب کوپلاژ ترانسفورماتوری را شرح دهید.

ترسیمی

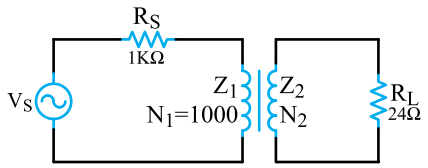
۷ــ۷ــ۴ــ با توجه به شکل موج ورودی تقویت‌کنندهٔ شکل ۴ــ۳۵، شکل موج نقاط X ، Y ، Z و O را رسم کنید.



شکل ۴ــ۳۵

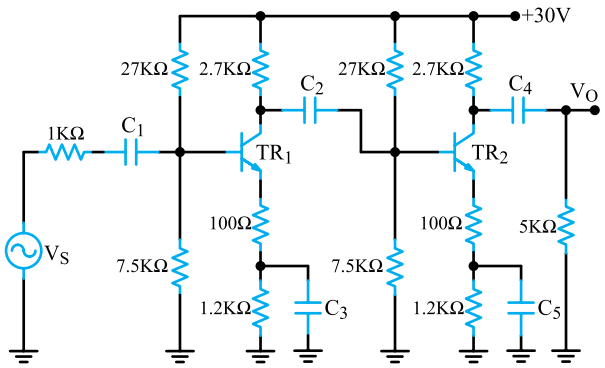
محاسباتی

۸ــ۷ــ۴ــ در مدار شکل ۴ــ۳۶، N_2 را چه‌قدر انتخاب کنیم تا بین مولد و بار تطابق برقرار باشد؟



شکل ۴ــ۳۶

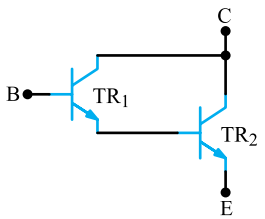
۹ــ۷ــ۴ــ در شکل ۴ــ۳۷ با فرض $\beta_1 = \beta_2 = 80$ و $V_{BE1} = V_{BE2} = 0/7V$، ولتاژ هریک از پایه‌های ترانزیستورهای T_{R1} و T_{R2} را نسبت به شاسی محاسبه کنید.



شکل ۴ــ۳۷

۸ــ۴ــ زوج دارلینگتون (Darlington Pair)

یک نمونه از تقویت‌کننده‌های دوطبقه با کوپلاژ مستقیم، زوج دارلینگتون است که در شکل ۴ــ۳۸ نشان داده شده است. از آن‌جا که ترانزیستورهای قدرت اغلب دارای βی کوچکی هستند، برای به‌دست آوردن βی بزرگ‌تر، از ترانزیستورهای زوج دارلینگتون استفاده می‌شود. در ضمن زوج دارلینگتون دارای مقاومت ورودی زیاد است.



شکل ۴ــ۳۸ــ زوج دارلینگتون NPN

تحقیق کنید : با مراجعه به منابع مختلف و سایت‌های اینترنتی تحقیق کنید به چه دلیل امپدانس ورودی تقویت‌کننده با زوج دارلینگتون زیاد است؟ نتایج را طی یک گزارش به کلاس ارائه نمایید.

اگر ضریب تقویت جریان ترانزیستور TR_1 را β_1 و ضریب تقویت جریان ترانزیستور TR_2 را β_2 فرض کنیم، می‌توان ثابت کرد که ضریب تقویت جریان زوج دارلینگتون از رابطهٔ زیر به دست می‌آید.

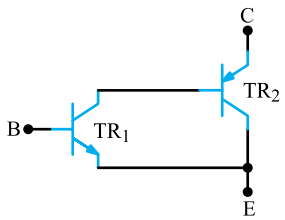
$$\beta_T \approx \beta_1 \beta_2$$

در شکل ۴ــ۳۸ 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 T_{R2} نسبت به TR_1 قدرت بیشتری دارد و β_2 از β_1 کم‌تر است.

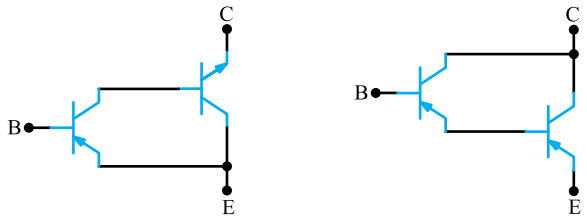
۱ــ ۸ ــ۴ــ انواع زوج دارلینگتون : ترانزیستور زوج دارلینگتون NPN را می‌توان به کمک یک ترانزیستور NPN و یک ترانزیستور PNP نیز ایجاد کرد.

در این حالت مطابق شکل ۴ــ۳۹ زوج دارلینگتون مکمل شکل می‌گیرد که معادل یک ترانزیستور NPN است.



شکل ۴ــ۳۹ــ 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 ۴ــ۴۰ زوج دارلینگتون PNP با دو ترانزیستور PNP و معادل آن با یک ترانزیستور PNP و یک ترانزیستور NPN را نشان می‌دهد.



شکل ۴۰ــ۴ــ زوج دارلینگتون PNP و معادل آن با یک ترانزیستور NPN و یک ترانزیستور PNP

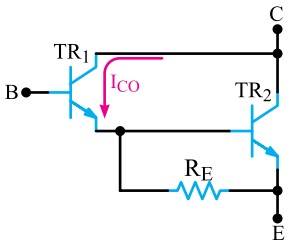
آشنایی با مخترعین و دانشمندان

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 به‌نام ایشان (Sziklai Pair) نامیده شد. سیدنی دارلینگتون در سال ۱۹۹۷ چشم از جهان بربست.

۲ــ ۸ ــ۴ــ زوج دارلینگتون در یک بسته بندی : کارخانه های سازندهٔ 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 β نزدیک به ۳۰۰۰ و قدرتی برابر ۱۰۰ وات ساخته می‌شوند. در شکل ۴۱ــ۴ ترانزیستور زوج دارلینگتون در یک بسته‌بندی نشان داده شده است.

شکل ۴۱ــ۴ــ زوج دارلینگتون در یک بسته‌بندی

۳ــ ۸ ــ۴ــ تأثیر جریان نشتی روی نقطهٔ کار مدار زوج دارلینگتون : در زوج دارلینگتون، جریان نشتی I_{CO} ترانزیستور اوّل که در اثر حرارت تولید می‌گردد روی نقطهٔ کار به شدت اثر می‌گذارد. I_{CO} ایجاد شده به وسیلهٔ این ترانزیستور، توسط ترانزیستو ر دوم تقویت می شود و در خرو جی، جریان ناخواستهٔ زیادی را ایجاد می‌کند. این جریان باعث گرم شدن بیش‌تر ترانزیستورها و افزایش بیش‌تر I_{CO} می‌شود. برای برطرف کردن این اِشکال، می‌توان مدار را به‌صورت شکل ۴۲ــ۴ اصلاح کرد.



شکل ۴۲ــ۴ــ زوج دارلینگتون اصلاح شده به‌منظور ایجاد ثبات حرارتی

در این ترکیب مقدار R_E را باید به‌گونه‌ای محاسبه کرد که اگر تمام جریان نشتی از مسیر آن بگذرد ترانزیستور دوم روشن نشود. باید مقدار R_E به‌گونه‌ای انتخاب شود که با گذشتن جریان I_{CO} از آن، افت پتانسیل دوسر آن از ۰/۶ ولت تجاوز نکند. بنابراین می‌توانیم بنویسیم :

$$R_E = \frac{0/6V}{I_{CO}}$$

مثال ۶ــ۴ : در صورتی که ولتاژ هدایت ترانزیستور دوم (TR_2) در شکل ۴۲ــ۴، برابر با $V_{BE2} = 0/7V$ و جریان I_{CO} برابر با یک میلی‌آمپر باشد مقدار R_E را محاسبه کنید.

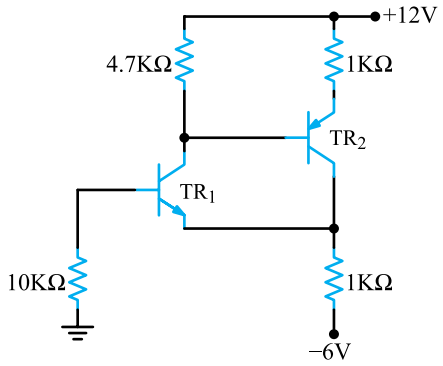
پاسخ : باید مقدار R_E را به‌گونه‌ای محاسبه کنیم که با گذشتن جریان ۱mA از آن، افت پتانسیل دوسر آن از ۰/۶ ولت تجاوز نکند بنابراین :

$$R_E = \frac{0/6}{1mA} = 600\Omega$$

هرچند با افزودن R_E به ترکیب دارلینگتون، پایداری حرارتی آن درحد قابل توجهی ترمیم می شود اما چون این مقاومت با مقاومت ورودی ترانزیستور TR_2 موازی شده است،

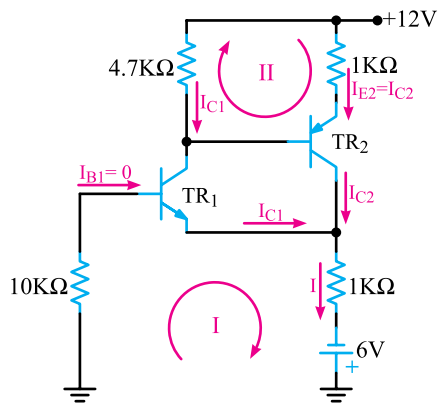
موجب کاهش مقاومت ورودی TR_2 و در نتیجه کاهش مقاومت ورودی کل زوج دارلینگتون می‌شود.

مثال ۷ــ۴ : در شکل ۴۳ــ۴ مقدار تقریبی جریان کلکتور ترانزیستورها را محاسبه کنید. β ترانزیستورها عدد بزرگی درنظر گرفته شده و $|VBE| = ۰/۶$ ولت است.



شکل ۴۳ــ۴ــ مدار تقویت‌کننده با ترانزیستور به صورت زوج دارلینگتون

پاسخ : با بیان β بزرگ و مقدار تقریبی جریان کلکتور به این نکته پی‌می‌بریم که باید از جریان بیس ترانزیستورها صرفنظر کنیم. دراین صورت $I_{E1} = I_{C1}$ و $I_{E2} = I_{C2}$ است. معادلهٔ KVL را در حلقهٔ I و حلقهٔ II می‌نویسیم. شکل ۴۴ــ۴ حلقهٔ I و حلقهٔ II و جریان نقاط مختلف مدار را نشان می‌دهد. معادلهٔ KVL در حلقهٔ I برابر است با :



شکل ۴۴ــ۴

$$۱۰ I_{B1} + V_{BE1} + ۱(I_{C1} + I_{C2}) - ۶ = ۰$$

در معادله عددگذاری می‌کنیم.

$$۱۰(۰) + ۰/۶ + ۱ (I_{C1} + I_{C2}) - ۶ = ۰$$

$$\boxed{I_{C1} + I_{C2} = ۵/۴}$$

معادلهٔ KVL را در حلقهٔ II می‌نویسیم :

$$I_{C2}(۱) + V_{EB2} - ۴/۷I_{C1} = ۰$$

$$\boxed{-۴/۷I_{C1} + I_{C2} = -۰/۶}$$

$$\begin{cases} I_{C1} + I_{C2} = ۵/۴ \\ -۴/۷I_{C1} + I_{C2} = -۰/۶ \end{cases}$$

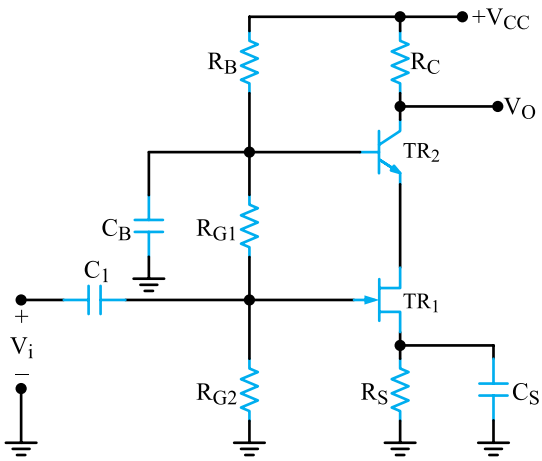
با حل دستگاه دو معادلهٔ دو مجهول، I_{C1} و I_{C2} به دست می‌آید.

$$I_{C1} = ۱mA \qquad I_{C2} = ۴/۴mA$$

۹ــ۴ــ تقویت‌کنندهٔ آبشاری(Cascade Amplifier)

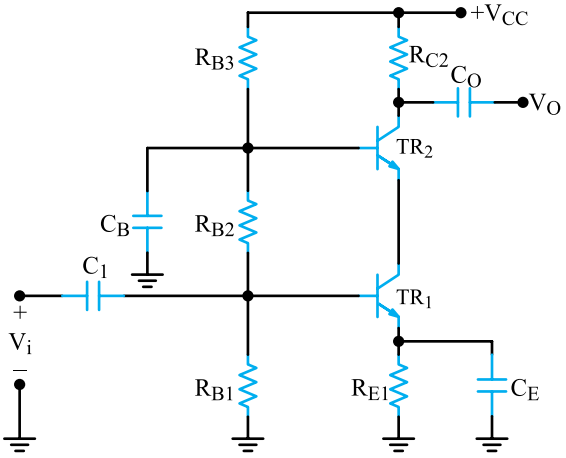
در شکل ۴۵ــ۴ ترکیب دیگری از اتصال مستقیم دو ترانزیستور را می‌بینید. این ترکیب را ترکیب آبشاری می‌نامند. از این ترکیب بیش‌تر در فرکانس‌های بالا استفاده می‌کنند.

در شکل ۴۵ــ۴ 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 ۴۵ــ۴ 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 بهرهٔ ولتاژ کم طرح می‌کنند.



شکل ۴۵ــ۴ــ تقویت‌کنندهٔ آبشاری

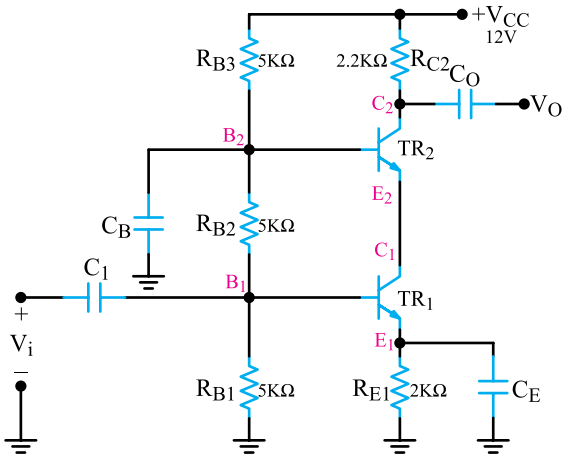
تقویت کنندهٔ آبشاری را می‌توان با دو ترانزیستور BJT به‌صورت شکل ۴۶ــ۴ نیز طرح نمود.



شکل ۴۶ــ۴ــ تقویت‌کنندهٔ آبشاری با دو ترانزیستور BJT

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

مثال ۸ــ۴ : در شکل ۴۷ــ۴ با فرض $\beta_1 = \beta_2 = ۱۲۰$ و $V_{BE1} = V_{BE2} = ۰/۷V$ قدرت تلف شده در هر ترانزیستور را محاسبه کنید.



شکل ۴۷ــ۴ــ مدار تقویت‌کنندهٔ آبشاری

پاسخ :

$$V_{B1} = \frac{V_{CC}R_{B1}}{R_{B1}+R_{B2}+R_{B3}} = \frac{۱۲\times ۵}{۵+۵+۵}$$

$$V_{B1} = \frac{۶۰}{۱۵} = ۴V$$

$$V_{E1} = V_{B1} - V_{BE1} = ۴ - ۰/۷ = ۳/۳ \text{ ولت}$$

$$I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_{E1}} = \frac{۳/۳}{۲} = ۱/۶۵mA$$

چون از I_B ترانزیستورها صرفنظر می‌شود لذا $I_{E1} = I_{C1}$ و $I_{C1} = I_{E2} = I_{C2}$ است پس :

$$I_{C2} = I_{E2} = I_{C1} = I_{E1} = ۱/۶۵mA$$

با تقسیم ولتاژ مقاومتی V_{B2} را محاسبه می‌کنیم.

$$V_{B2} = \frac{V_{CC}(R_{B1}+R_{B2})}{R_{B1}+R_{B2}+R_{B3}} = \frac{۱۲(۵+۵)}{۵+۵+۵}$$

$$V_{B2} = ۸ \text{ ولت}$$

چون V_{E2} برابر V_{C1} است، با محاسبهٔ V_{C1} ، V_{CE1} و سپس توان تلف شدهٔ ترانزیستور محاسبه می‌شود.

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

$$V_{E2} = V_{C1} = ۸ - ۰/۷ = ۷/۳ \text{ ولت}$$

$$V_{CE1} = V_{C1} - V_{E1} = ۷/۳ - ۳/۳ = ۴V$$

$$P_{T1} = V_{CE1} \times I_{C1} = ۴ \times ۱/۶۵ = \boxed{۶/۶mW}$$

با محاسبهٔ V_{C2} می‌توان V_{CE2} را محاسبه نمود.

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

$$V_{C2} = ۱۲ - (۲/۲)(۱/۶۵) = ۱۲ - ۳/۶۲$$

$$V_{C2} = ۸/۳۷V$$

$$V_{CE2} = V_{C2} - V_{E2} = ۸/۳۷ - ۷/۳$$

$$V_{CE2} = ۱/۰۷ \text{ ولت}$$

$$P_{T2} = V_{CE2} \times I_{C2} = ۱/۰۷ \times ۱/۶۵$$

$$\boxed{P_{T2} = ۱/۷۶۵mW}$$

تمرین کلاسی : در این مرحله یک نمونه تمرین کلاسی که توسط دانش‌آموز یا هنرآموز طراحی می‌شود را اجرا نمایید.

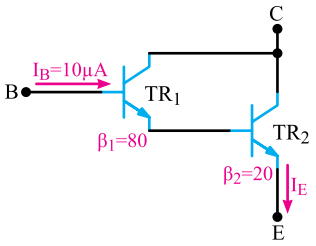
۱۰ــ۴ــ الگوی پرسش

کامل‌کردنی

۱ــ۱۰ــ۴ــ زوج دارلینگتون دارای بهرهٔ جریان ..... و مقاومت ورودی ..... است.

چهارگزینه‌ای

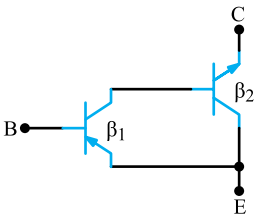
۲ـ۱۰ـ۴ـ با توجه به مدار ۴ـ۴۸ I_E دارلینگتون چند میلی‌آمپر است؟



شکل ۴ـ۴۸

۱) ۸ ۲) ۱۰ ۳) ۱۲ ۴) ۱۶

۳ـ۱۰ـ۴ـ مدار شکل ۴ـ۴۹ زوج دارلینگتون NPN یا PNP است؟ β_T کدام است؟



شکل ۴ـ۴۹

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

۴ـ۱۰ـ۴ـ از تقویت‌کنندهٔ آبشاری بیش‌تر در کدام فرکانس استفاده می‌کنند؟

تشریحی

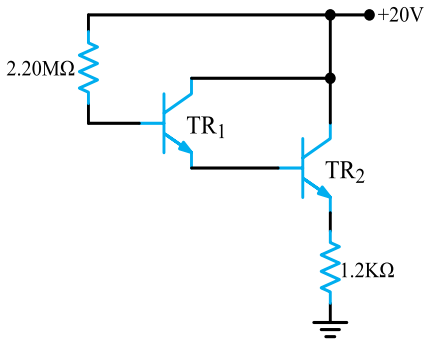
۵ـ۱۰ـ۴ـ ویژگی‌های زوج دارلینگتون را بنویسید.

۶ـ۱۰ـ۴ـ اِشکال زوج دارلینگتون را شرح دهید. چگونه اِشکال برطرف می‌شود؟

۷ـ۱۰ـ۴ـ کاربرد تقویت‌کنندهٔ آبشاری را شرح دهید.

محاسباتی

۸ـ۱۰ـ۴ـ در شکل ۴ـ۵۰ با فرض $\beta_1 = \beta_2 = 50$ و $V_{BE1} = V_{BE2} = 0/7V$ چه قدرتی در ترانزیستور TR_2 تلف می‌شود؟



شکل ۴ـ۵۰