بخش سوم

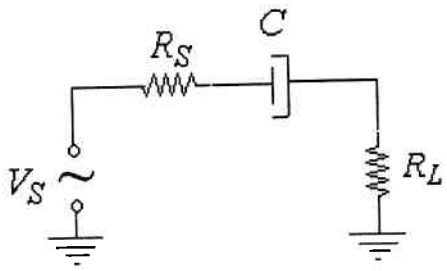
تقویت‌کننده‌ها

پس از تغذیهٔ ترانزیستور با یکی از روشهای پیش گفته در آزمایش ۷، به صورتی که نقطهٔ کار تقریباً در وسط خط بار قرار داشته باشد، می‌توان یک سیگنال متناوب (ac) با دامنهٔ کم را به بیس ترانزیستور اعمال کرد. در نتیجه سیگنال متناوبی با دامنهٔ زیاد، در کلکتور ظاهر می‌شود که مشابهٔ سیگنال ورودی بوده ولی دامنهٔ آن خیلی بیشتر است. این افزایش دامنه را تقویت می‌گویند. باتوجه به این که خازن در مقابل عبور جریان dc، در حال قطع و هنگام عبور جریان ac، اتصال کوتاه می‌شود، در مدارهای تقویت‌کننده از خازنها به دو صورت می‌توان استفاده کرد:

الف) به عنوان خازن کوپلاژ یا اتصال

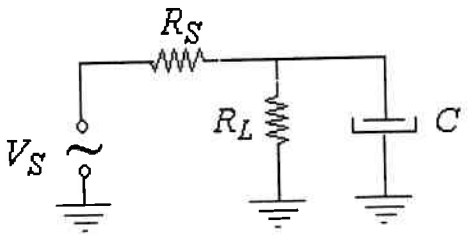
ب) به عنوان خازن بای پاس.

درهر دو صورت با توجه به رابطهٔ $X_c = \frac{1}{2\pi f.c}$، واضح است که برای بسامدهای بالا خازن به صورت اتصال کوتاه عمل کرده و از مدار جریان می‌گذرد و برای بسامد بسیار پایین به صورت مدار باز عمل می‌کند و جریان صفر است. مطابق شکل ۱، خازن کوپلاژ c در مسیر جریان متناوب به طور سری قرار می‌گیرد.



شکل ۱. اتصال خازن کوپلاژ c در مدار جریان متناوب

حداکثر جریان در این مدار عبارت است از: $I_{max} = \frac{V_s}{R} = \frac{V_s}{R_s + R_L}$ که R_s می‌تواند مقاومت داخلی منبع باشد. در عمل برای این که در بسامدهای پایین ac، خازن کوپلاژ درست کار کند و اتصال کوتاه باشد بایستی ظرفیت خازن طوری انتخاب شود که $X_c < ۰/۱R$، باشد. در شکل ۲، خازن c به عنوان خازن بای پاس موازی با مقاومت بار قرار دارد، در این حالت کار خازن ممانعت از عبور جریان ac از مقاومت بار و هدایت آن به زمین است.



شکل ۲ . اتصال خازن بای‌پاس c در مدار جریان متناوب

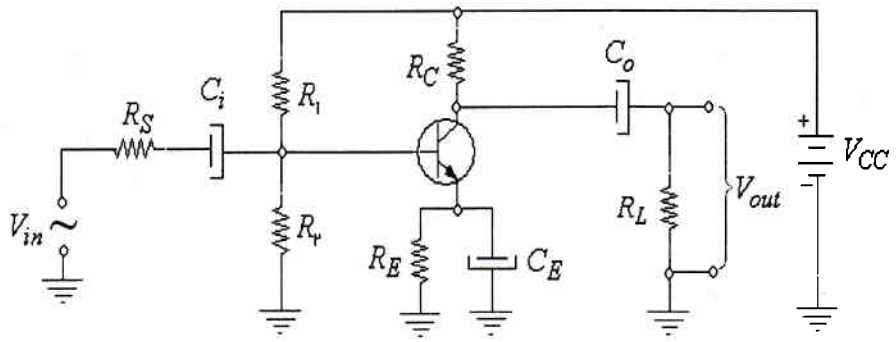
در عمل برای هر دو مورد استفاده از خازنها در تقویت‌کننده‌ها یک بسامد بحرانی[۱] (f_c) وجود دارد که اگر ظرفیت خازن طوری انتخاب شود که بسامد مولد از ده برابر بسامد

---

۱. بسامد بحرانی برای خازن کوپلاژ از رابطهٔ $f_c = \frac{1}{۲\pi(R_s+R_L)C}$ و برای خازن بای‌پاس از رابطهٔ $f_c = \frac{1}{۲\pi(\frac{R_sR_L}{R_s+R_L})C}$ به دست می‌آید.

بحرانی بیشتر باشد ($f > ۱۰f_c$)، خازن چه کوپلاژ و چه بای پاس باشد، مانند اتصال کوتاه عمل می‌کند.

شکل ۳، مدار یک تقویت‌کنندهٔ امیتر مشترک با تغذیهٔ سرخود را نشان می‌دهد، در این



شکل ۳ . مدار تقویت‌کنندهٔ امیتر مشترک با تغذیهٔ سرخود.

مدار، موج ورودی V_{in} در نیم موج مثبت باعث افزایش جریان بیس و در نیم موج منفی باعث کاهش جریان بیس می‌شود. تغییرات جریان بیس باعث تغییر در I_C و V_{CE} می‌شود و در شرایط ac موج خروجی بین کلکتور و زمین قرار می‌گیرد. یک موج کوچک V_{in} در جریان I_B تغییرات ضعیفی ایجاد می‌کند و باعث بروز تغییرات قوی در جریان کلکتور می‌شود که به نوبهٔ خود در ولتاژ خروجی V_{out} نوسانهای بزرگی به وجود می‌آورد.

R_2 و R_1، در این مدار برای تغذیهٔ بیس ترانزیستور به کار رفته‌اند و باعث می‌شوند در غیاب موج متناوب ورودی، یک جریان اولیه در بیس ترانزیستور (I_B) جاری شود.

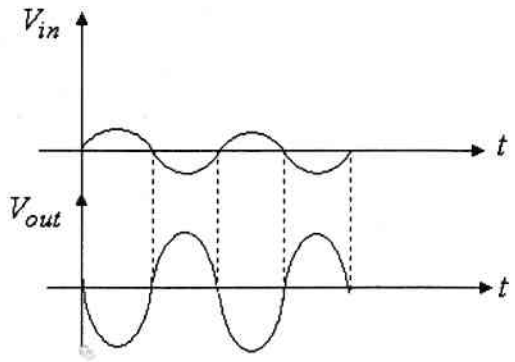
R_C در مسیر کلکتور برای تنظیم جریان آن قرار داده می‌شود. همچنین در غیاب موج ورودی V_{in}، جریانهایی که از بیس، کلکتور و امیتر می‌گذرند dc بوده و خازن C_E اثری در مدار ندارد و تنها باعث پایداری حرارتی مقاومت R_E ترانزیستور می‌شود. با ورود موج V_{in}، در جریانهای بیس، کلکتور و امیتر یک موج ac نیز ایجاد می‌شود که در این صورت خازن C_E از خود جریان عبور می‌دهد. هرچه امپدانس خازن (X_c) در

مقابل عبور جریان نسبت به R_E کمتر باشد (بسامد موج بیشتر باشد)، جریان بیشتری از آن می‌گذرد و لذا جریان عبوری از R_E کمتر می‌شود و نیز مقاومت معادل این اتصال موازی کمتر شده و در نتیجه ضریب تقویت ترانزیستور افزایش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در عمل ظرفیت C_E را طوری انتخاب می‌کنند که امپدانس یا مقاومت ظاهری آن نسبت به R_E بسیار ناچیز باشد تا ضمن کم‌شدن مقاومت مجموعه، ضریب تقویت ترانزیستور افزایش یابد، در این صورت جریان متناوبی که در امیتر وجود دارد تقریباً به تمامی از C_E می‌گذرد و از R_E عبور نمی‌کند، خازن C_E را در این حالت خازن بای‌پاس می‌گویند. بنابراین مقاومت R_E از نظر dc، پایداری حرارتی ترانزیستور را تأمین می‌کند که چون وجود آن ضریب تقویت را کاهش می‌دهد، از خازن بای‌پاس C_E برای جبران افت ضریب تقویت استفاده می‌شود زیرا در شرایط ac اثر مقاومت R_E را بسیار کم می‌کند (تقریباً اتصال می‌شود) و ضریب تقویت را بالا می‌برد.

C_i و C_o: خازهای اتصال یا کوپلاژ هستند که تقویت‌کننده را از نظر dc از طبقات قبل و بعد مجزا می‌کنند. به عبارتی اگر قبل یا بعد از تقویت کننده، تقویت‌کننده‌های دیگری باشند که به طریقی تغذیهٔ dc شده باشند، این خازنها از تأثیر ولتاژ dc طبقات قبلی و بعدی روی تقویت‌کنندهٔ میانی جلوگیری می‌کنند و نمی‌گذارند در شرایط تغذیهٔ ترانزیستور تغییری حاصل شود.

V_{out} و V_{in}، سیگنال متناوب V_{in} از طریق خازن C_i به ترانزیستور اعمال می‌شود و V_{out}، موج خروجی است که پس از عبور از خازن C_o، از کلکتور ترانزیستور گرفته می‌شود.

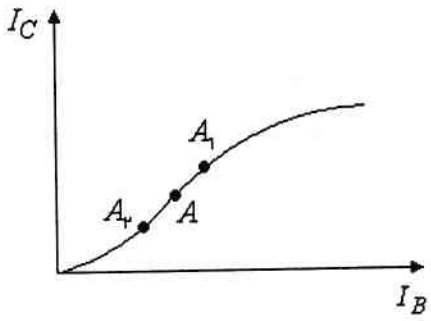
هرگاه ولتاژ متناوب ورودی و خروجی را با یکدیگر مقایسه کنیم، اگرچه دامنهٔ موج خروجی بزرگتر است ولی با موج ورودی در فاز مخالف بوده یا ۱۸۰° با آن اختلاف فاز دارد، زیرا جریان ac کلکتور تقریباً با جریان ac امیتر مساوی است. عبور جریان I_C از کلکتور باعث ایجاد ولتاژ ac در آن می‌شود. در نیم سیکل مثبت از سیگنال ورودی، که ولتاژ بیس در حال افزایش است، جریان کلکتور (I_C) هم در حال افزایش است و هرچند ولتاژ دو سر مقاومت کلکتور (R_CI_C) افزایش می‌یابد، ولتاژ کلکتور–امیتر (V_{CE}) در حال کاهش خواهد بود. زیرا داریم: $V_{CC}+V_{CE}+R_CI_C$،



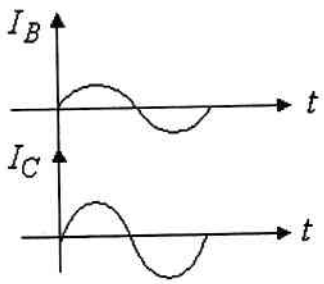
شکل ٤. اختلاف فاز موج ورودی و موج تقویت‌شدهٔ خروجی ۱۸۰° است.

همچنین با شروع نیم‌سیکل منفی موج ورودی، و I_B کاهش می‌یابد، در نتیجه جریان کلکتور و در نتیجه R_CI_C نیز کاهش می‌یابد ولی V_{CE} در حال افزایش خواهد بود به عبارت دیگر موج خروجی در نیم‌سیکل مثبت خواهد بود.

اعمال یک موج متناوب ورودی V_{in} باعث تغییرات تناوبی در جریانهای بیس و کلکتور می‌شود؛ در تقویت‌کننده‌ای که ابتدا از طریق مقاومتهای R_1 و R_2 تغذیه شده باشد، جریان dc در بیس و کلکتور وجود دارد، نقطه A شکل ٥، با اعمال موج متناوب ورودی V_{in} در نیم‌سیکل مثبت وقتی موج ورودی به حداکثر می‌رسد، در نمودار I_C برحسب I_B، به نقطهٔ A_1 در روی منحنی می‌رود و سپس پایین می‌آید و به نقطهٔ A باز می‌گردد و در نیم سیکل منفی که جریانهای I_C و I_B کم می‌شوند، نقطهٔ A روی منحنی رو به پایین می‌آید تا A_2 و سپس به نقطهٔ A برمی‌گردد، در نتیجه اعمال یک موج متناوب ورودی V_{in} باعث تغییرات تناوبی در I_C و I_B به صورت شکل ٦ می‌شوند.



شکل ۵. نمودار I_C برحسب I_B و تغییرات این دو جریان با اعمال ولتاژ متناوب



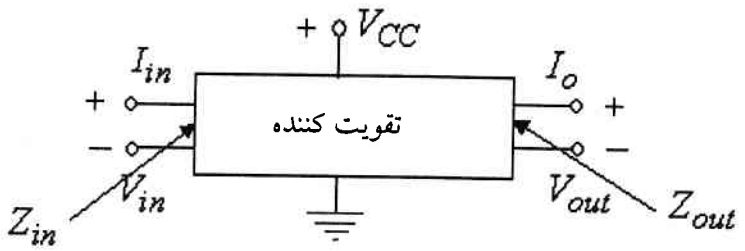
شکل ٦. تغییرات جریان بیس و جریان کلکتور نسبت به زمان با اعمال ولتاژ متناوب به مدار تقویت‌کننده

نقطهٔ کار ترانزیستور مقادیر ولتاژ جریان dc ترانزیستور را معین می‌کند و اعمال ولتاژی ac به بیس ترانزیستور باعث تغییرات لحظه‌ای در نقطهٔ کار ترانزیستور می‌شود. اگر دامنهٔ موج ac اعمال شده بزرگ باشد، تغییرات ایجاد شده نیز بزرگ خواهد بود و هرچند با اعمال ولتاژ ac به بیس جریان ac در امیتر با همان بسامد می‌شود ولی شکل جریان امیتر با شکل موج ولتاژ اعمال شده کاملاً شبیه نیست و کمی اعوجاج دارد، هرچه دامنهٔ ولتاژ ac اعمال شده کوچکتر باشد، تغییرات جریان امیتر هم مشابه شکل

موج ورودی و با اعوجاج کمتری همراه خواهد بود. این نوع تقویت‌کننده‌ها را تقویت‌کننده‌های سیگنال کوچک می‌نامند که منظور از سیگنال کوچک در عمل سیگنالی است که مقدار اوج به اوج جریان ac امیتر ایجاد شده از ده درصد جریان dc امیتر کمتر باشد. تقویت‌کننده‌هایی که در اینجا بررسی می‌کنیم، تقویت‌کننده‌های سیگنال کوچک هستند.

مشخصه‌های یک تقویت‌کنندهٔ سیگنال کوچک

در حالت کلی یک تقویت‌کننده را می‌توان متشکل از دو سر ورودی و دو سر خروجی و دو سر برای تغذیه در نظرگرفت (شکل ۷).



شکل ۷. نمایش تقویت‌کننده به صورت شبکهٔ دو قطبی

تقویت‌کننده، سیگنال کوچک متناوب ورودی (V_{in}) را از هر وسیله‌ای که بتواند آن را تولید کند (مثل آنتن رادیو یا تلویزیون یا میکروفون یا هد ضبط)، می‌گیرد و پس از تقویت آن را به یک مصرف‌کننده می‌دهد. مصرف‌کننده یا بار وسیله‌ای است که از موج تقویت شده استفاده می‌کند، مثل بلندگو یا تقویت‌کنندهٔ دیگر و غیره.

مشخصه‌های یک تقویت‌کننده به صورت زیر تعریف می‌شوند:

بهرهٔ ولتاژ (گین ولتاژ):
$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

بهرهٔ جریان (گین جریان):
$$A_I = \frac{I_{out}}{I_{in}}$$

امپدانس ورودی:
$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}}$$

امپدانس خروجی:
$$Z_{out} = \frac{V_{out}}{I_{out}}$$

چون پارامترهای فوق در شرایط متناوب موردنظر هستند، بنابراین در این روابط مقادیر مؤثر در آنها قرار داده می‌شود.

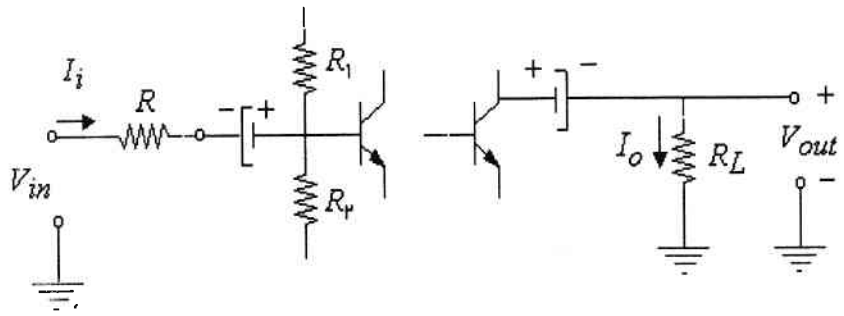
اندازه‌گیری مشخصه‌های یک تقویت‌کننده در عمل

۱- اندازه‌گیری بهرهٔ ولتاژ (A_V)؛ هنگامی که هر دو سیگنال خروجی و ورودی بدون اعوجاج هستند؛ دامنهٔ اوج به اوج سیگنال خروجی را به دامنهٔ اوج سیگنال ورودی تقسیم می‌کنیم؛

$$A_V = \frac{V_{o(p-p)}}{V_{in(p-p)}}$$

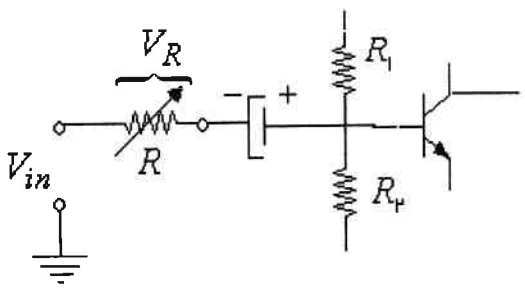
۲- اندازه‌گیری بهرهٔ جریان (A_I)؛ مطابق شکل ۸؛ یک مقاومت بار R_L در خروجی قرارداده و ولتاژ خروجی (V_{out}) را بر آن تقسیم می‌کنیم تا جریان خروجی به دست آید و نیز یک مقاومت مناسب (R)،۲۰۰ Ω تا ۵۰۰Ω در ورودی قرار می‌دهیم و افت ولتاژ دوسر آن را بر این مقاومت تقسیم می‌کنیم C جریان ورودی به دست آید. حال با دردست داشتن I_{out} و I_{in}، داریم:

$$A_I = \frac{V_{out}/R_L}{V_{in}/R} = \frac{I_{out}}{I_{in}}$$



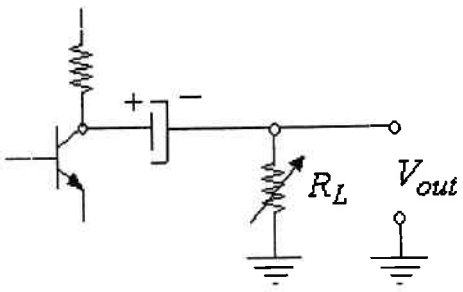
شکل ۸ تعیین I_{out} و I_{in} برای به دست آوردن بهرهٔ جریان

۳- اندازه‌گیری امپدانس ورودی (Z_{in})؛ ساده‌ترین روش برای تعیین امپدانس ورودی قراردادن یک پتانسیومتر در ورودی مدار است (شکل ۹)، پتانسیومتر را آنقدر تغییر می‌دهیم تا افت ولتاژ دو سر آن نصف ورودی شود، در این صورت مقاومتی که پتانسیومتر نشان می‌دهد، امپدانس ورودی تقویت‌کننده است.



شکل ۹. اندازه‌گیری امپدانس ورودی

٤- اندازه‌گیری امپدانس خروجی (Z_{out})؛ ابتدا مقدار ولتاژ خروجی بدون بار را اندازه می‌گیریم، سپس یک پتانسیومتر در خروجی به عنوان R_L قرار می‌دهیم و آنقدر آن را تغییر می‌دهیم تا ولتاژ خروجی به نصف مقدار اولیه‌اش برسد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. اندازه‌گیری امپدانس خروجی

در این حالت، مقاومت پتانسیومتر همان امپدانس خروجی است.