فصل ۶

تقویت کنندهٔ تفاضلی

هدف‌های فصل

دانشی	مهارتی	نگرشی
۱ــ آشنایی با کاربرد آرایش‌های تفاضلی و مشترک در تقویت کنندهٔ تفاضلی ۲ــ آشنایی با ویژگی‌های تقویت کنندهٔ تفاضلی ۳ــ آشنایی با کاربردهای اصلی تقویت کنندهٔ تفاضلی	۱ــ توانایی تحلیل نحوهٔ عملکرد تقویت کنندهٔ تفاضلی در آرایش‌های مختلف ورودی و خروجی ۲ــ توانایی توضیح نقش قطعات مختلف استفاده شده در ساختار تقویت کنندهٔ تفاضلی	۱ــ شناخت قابلیت تقویت کنندهٔ تفاضلی در تقویت سیگنال‌های با فرکانس پایین و DC ۲ــ شناخت رفتار تقویت کنندهٔ تفاضلی در حالت‌های DC و AC

سرفصل‌ها و عناوین اصلی

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

مفاهیم اساسی فصل

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

مراحل پیشنهادی برای تدریس

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

دانستنی‌ها و پیش نیازهای مورد نیاز برای آسان شدن یادگیری مطالب فصل

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

مهارت‌های اصلی معرفی شده در فصل که یادگیری آن‌ها برای دانش‌آموزان ضروری است

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

ارتباط مباحث مطرح شده در فصل با فناوری‌های رایج

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

نحوهٔ ارزشیابی و مقدار زمان اختصاص داده شده به هر قسمت از فصل

همکاران محترم می‌توانند با توجه به وضعیت درسی دانش‌آموزان در میزان زمان در نظر گرفته شده برای هر قسمت یا روش ارزشیابی، به صلاحدید خود تجدیدنظر کنند. زمان‌بندی با توجه به بودجه‌بندی ارائه شده در کتاب الکترونیک عمومی ۲، سطح کلاس و نظر معلم انجام می‌شود.

سرفصل مطالب	هدف‌ها در قلمرو دانش، مهارت و نگرش	محتوا و فعالیت‌های یادگیری	روش‌های پیشنهادی برای ارزشیابی	ابزارهای اندازه‌گیری پیشنهادی	زمان پیشنهادی برای تدریس (ساعت)	توضیحات
مدار تقویت‌کنندهٔ تفاضلی	معرفی ویژگی‌های اصلی تقویت‌کننده و تأکید بر قابلیت آن در مواجهه با سیگنال‌های فرکانس پایین و نویزی	بحث، مطالعه	مجموعی	تشریحی	۱	سؤال در مورد ویژگی‌های این تقویت‌کننده و مقایسهٔ آن با تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری معمولی
بررسی رفتار DC تقویت‌کنندهٔ تفاضلی	تحلیل DC تقویت‌کنندهٔ تفاضلی	حل تمرین	تکوینی، مجموعی	محاسباتی	۲	تعیین ولتاژ و جریان المان‌های مختلف تقویت‌کننده در قالب سؤال‌های محاسباتی
مدار منبع جریان	درک نقش منبع جریان در ساختار تقویت‌کنندهٔ تفاضلی	مطالعه، حل تمرین	مجموعی	تشریحی، محاسباتی	۲	سؤال در مورد نقش و مزایای منبع جریان در تقویت‌کنندهٔ تفاضلی در قالب سؤالات تشریحی محاسبهٔ جریان‌ها ولتاژهای مختلف در یک مدار منبع جریان زنری

بررسی رفتار AC تقویت‌کنندهٔ تفاضلی	آشنایی با آرایش‌های مختلف این تقویت‌کننده و توانایی تحلیل عملکرد آن در حالت‌های مشترک و تفاضلی	بحث، حل تمرین	تکوینی، مجموعی	تشریحی	۲	تعیین حالت کار تقویت‌کننده (تفاضلی یا مشترک) و تعیین ولتاژخروجی آن به ازای انواع خروجی‌های اعمالی
ضریب حذف سیگنال مشترک	شناخت ضریب حذف مشترک به‌عنوان معیاری از نزدیک بودن عملکرد تقویت‌کنندهٔ تفاضلی به حالت ایده آل خود و توانایی محاسبهٔ این ضریب	بحث، حل تمرین	مجموعی	محاسباتی	۱	طرح پرسش‌هایی برای محاسبهٔ ضریب حذف مشترک

۶ـ۱ـ پیشگفتار (صفحهٔ ۱۳۷ از کتاب درسی)

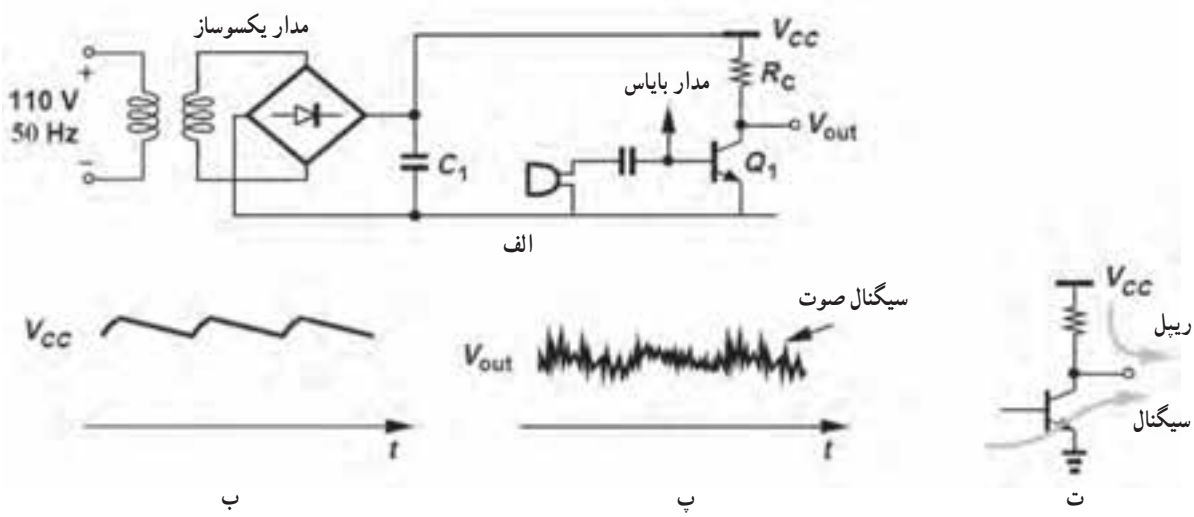
به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

مثال ۱ : مدار نشان داده در شکل ۱ـ۶ـ الف که شامل یک یکسوساز و یک تقویت‌کنندهٔ ترانزیستوری است برای تقویت سیگنال دریافتی از یک میکروفون طراحی شده است. سیگنال دریافت شده از خروجی دارای یک نویز با مؤلفهٔ فرکانس پایین است. علت این شکل موج خروجی را توضیح دهید.

پاسخ : می دانیم که جریان گرفته شده از خروجی یک یکسوساز یک شکل موج به صورت ریپل است که فرکانس آن متناسب با مقدار فرکانس خط تغذیهٔ AC است(شکل ۱ـ۶ـ ب) که از اینجا می‌توان به علت فرکانس پایین نویز خروجی پی برد. تقویت‌کنندهٔ استفاده شده در این مدار دارای ساختار امیتر مشترک است و با آزمایش خروجی آن می‌توان دو مؤلفه را در آن شناسایی کرد : ۱) نسخهٔ تقویت شدهٔ سیگنال میکروفون و ۲) سیگنال ریپل که روی منبع تغذیهٔ DC (V_{CC}) ظاهر شده است. برای ولتاژ خروجی داریم :

$$V_{ou} \quad V_{CC} \quad R_C I_C$$

که نشان می‌دهد سیگنال خروجی مقدار ولتاژ منبع تغذیهٔ DC را دنبال می‌کند و بنابراین شامل ریپل در سرتاسر آن است. شکل ۱ـ۶ـ پ سیگنال خروجی تقویت‌کننده را نشان می‌دهد که شامل سیگنال صوتی و ریپل است. در شکل ۱ـ۶ـ ت این پدیده به صورت خلاصه نشان داده شده است.



شکل ۱ـ۶

آزمونک ۱

چرا تقویت‌کننده‌های تفاضلی برای تقویت سیگنال‌های با فرکانس پایین مناسب‌اند؟

پاسخ : از آنجا که خازن‌های به‌کارگرفته شده در ساختار تقویت‌کننده‌های معمولی در فرکانس‌های پایین اتصال باز هستند نمی‌توانند پایداری حرارتی تقویت‌کننده را حفظ کنند. از طرفی چون در طراحی تقویت‌کننده‌های تفاضلی از خازن استفاده نمی‌شود، این نوع تقویت‌کننده‌ها برای تقویت سیگنال‌های با فرکانس پایین و حتی DC مناسب‌اند.

۶ـ۲ـ مدار تقویت کنندهٔ تفاضلی (صفحهٔ ۱۳۸ از کتاب درسی)

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

☑ فرصت یاددهی ـ یادگیری

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

۶ـ۳ـ بررسی رفتار DC تقویت کنندهٔ تفاضلی (صفحهٔ ۱۳۸ از کتاب درسی)

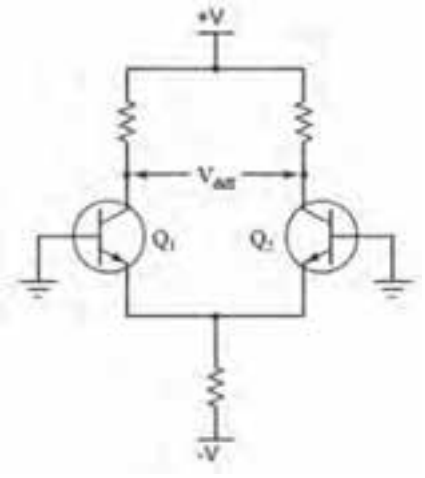
پرسش ۱

☑ هدف

ــ بررسی عملکرد تقویت‌کنندهٔ تفاضلی در حالتی که پارامترهای الکتریکی یکی از ترانزیستورها (مقدار توان داده شده و ورودی‌های اعمال شده به آن) ثابت باشد اما دمای آن به وسیلهٔ حرارت بالا رود.

فرض کنید مدار زوج تفاضلی شکل ۲ــ۶ کاملاً متعادل باشد. در این شرایط انتظار می‌رود که چه مقدار ولتاژ بین کلکتورهای دو ترانزیستور وجود داشته باشد؟ اگر ترانزیستور Q_2 حرارت داده شود ولتاژ تفاضلی V_d چه وضعیتی خواهد داشت؟

پاسخ : در شرایط تعادل V_d ۰ است. برای درک رفتار تقویت‌کنندهٔ تفاضلی هنگامی که یکی از ترانزیستورها حرارت داده می‌شود بایستی عکس العمل یک پیوند pn مثل دیود را در مقابل حرارت در نظر گرفت. با یادآوری رابطهٔ جریان دیود و منحنی ولت ــ آمپر آن می‌توان فهمید که با افزایش حرارت از میزان جریان پیوند pn و به تبع آن از مقدار جریان کلکتور کاسته می‌شود. در نتیجه مقدار ولتاژ کلکتور ترانزیستور Q_2 افزایش یافته، تعادل در خروجی بر هم می‌خورد ویک ولتاژ تفاضلی در خروجی تقویت‌کننده ظاهر می‌شود.



شکل ۴ــ۶

۶ـ۴ـ مدار منبع جریان (صفحهٔ ۱۴۰ از کتاب درسی)

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

☑ پاسخ به سؤالات الگوی پرسش ۵ـ۶ (صفحه ۱۴۲ از کتاب درسی)

۱ــ۵ــ۶ــ پاسخ : تقویت‌کنندهٔ تفاضلی می‌تواند سیگنال‌های با فرکانس پایین و DC را تقویت کند.

۲ــ۵ــ۶ــ پاسخ : غلط

۳ــ۵ــ۶ــ پاسخ : می‌توان این سؤال را با فرض β ۱۰۰ برای ترانزیستورها و درنظر گرفتن تقارن کامل این مدار حل کرد.

ابتدا معادلهٔ KVL حلقهٔ ورودی را می‌نویسیم :

$$KVL: \ ۱۰۰^{K\Omega} I_B \quad V_{BEon} \quad ۱^{K\Omega} I_O \quad ۱۴^V$$

با در نظرگرفتن این نکته که $I_O \quad ۲I_E$ داریم :

$$\frac{(100^{K\Omega} I_E)}{100} + 0/7^V + 1^{K\Omega}(2I_E) = 14^V \rightarrow 3^{K\Omega} I_E = 13/3^V \rightarrow I_E = \frac{(13/3^V)}{(3^{K\Omega})}$$

$$\rightarrow I_O \quad ۲ I_E \quad ۸/۸۷ \sim ۹^{mA}$$

گزینهٔ ۲ صحیح است.

۴ــ۵ــ۶ــ پاسخ : از آنجا که در صورت سؤال ذکر شده است که از I_B ترانزیستورها صرف‌نظر شود، می‌توان افت ولتاژ روی مقاومت‌های بیس را نادیده گرفت. مدار تقویت‌کنندهٔ تفاضلی کاملاً متقارن است و می‌توان معادلات ولتاژ را تنها برای یک نیمه از مدار نوشت. ابتدا با فرض روشن بودن ترانزیستورها معادلهٔ KVL را برای حلقهٔ پیوند بیس ــ امیتر، مقاومت ۱۵ کیلو اهمی متصل به امیتر و منبع تغذیه منفی می‌نویسیم :

$$KVL \ ۱ : \ V_{BE} + 15^{K\Omega} I_E = 15^V \rightarrow I_E = \frac{(15 - 0/7)}{15} = 0/953^{mA}$$

ولتاژ پیوندهای کلکتور ــ امیتر با نوشتن یک KVL در حلقهٔ خروجی قابل محاسبه است :

$$KVL \ ۲: \ ۱۵^V \quad ۱۵^{K\Omega} I_{C۱} \quad V_{CE۱} \quad ۱۵^{K\Omega} I_E \quad ۱۵^V$$

به خاطر تقارن مدار می‌توان نوشت $V_{CE۱} \quad V_{CE۲}$ و $I_{C۱} \quad I_{C۲} \quad \frac{I_E}{2}$

در نتیجه داریم :

$$V_{CE1} = 30^V - 45^{K\Omega} I_{C1} = 8/56^V$$

۵ــ۵ــ۶ــ پاسخ : برای محاسبهٔ جریان امیتر $TR_۳$ که تقریباً برابر I_E نیز هست می‌توان نوشت :

$$KVL \ ۱ : \ V_Z \quad V_{BE} \quad ۲/۷^{K\Omega} I_{E۳} \rightarrow I_{E۳} \quad \frac{(8 - 0/7)^V}{2/7^{K\Omega}} \quad ۲/۷^{mA}$$

برای محاسبهٔ $V_{C۱}$ بایستی جریان $I_{C۱}$ را در اختیار داشت. با توجه به تقارن مدار تقویت‌کننده می‌توان نوشت $I_{C۱} \quad I_E/۲$ و داریم :

$$V_{C۱} \quad ۲۲^V \quad ۸/۲^{K\Omega} I_{C۱} \quad ۲۲^V \quad ۸/۲^{K\Omega} \left(\frac{2/7}{2}\right)^{mA} \quad ۱۰/۹۳^V$$

۶ــ۵ــ۶ــ پاسخ : در این‌حالت با اعمال ولتاژ مثبت به بیس $TR_۲$ میزان هدایت این ترانزیستور و جریان عبوری از آن افزایش می‌یابد. با افزایش جریان کلکتور $TR_۲$ میزان افت پتانسیل روی $R_{C۲}$ افزایش یافته و ولتاژ کلکتور این ترانزیستور کاهش می‌یابد. افزایش $I_{C۲}$ باعث افزایش ولتاژ امیتر می‌شود و از آنجا که بیس $TR_۱$ به زمین متصل است افزایش ولتاژ امیتر باعث کاهش $V_{BE۱}$ شده و در نتیجه مقدار $I_{B۱}$ و $I_{C۱}$ کاهش می‌یابد. کاهش $I_{C۱}$ منجر به کاهش افت ولتاژ روی مقاومت $R_{C۱}$ و افزایش $V_{C۱}$ خواهد شد.

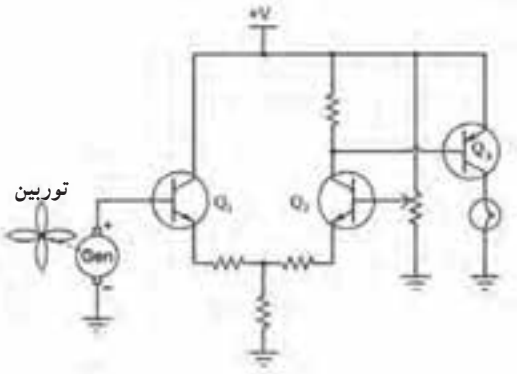
۶ـ۵ـ بررسی رفتار AC تقویت‌کنندهٔ تفاضلی (صفحهٔ ۱۴۳ از کتاب درسی)

پرسش ۲ (دانش افزایی)

هدف

ــ معرفی مدار تقویت‌کنندهٔ تفاضلی به عنوان مقایسه کننده

مدار نشان داده شده در شکل ۵ــ۶ بخشی از یک ایستگاه هواشناسی است. سرعت باد با استفاده از ولتاژ خروجی یک ژنراتور DC سنجیده می‌شود و میزان ولتاژ ژنراتور توسط پره‌های توربین معین می‌شود. یک لامپ که به کلکتور ترانزیستور $Q_۲$ متصل شده است هنگامی روشن می‌شود که سرعت باد از یک حد آستانه عبور کند. این حد آستانه با استفاده از پتانسیومتر به‌کار گرفته شده در بیس ترانزیستور $Q_۲$ معین می‌شود. از دانش‌آموزان خواسته شود که بر اساس درکی که از عملکرد مدار یک تقویت تفاضلی دارند دربارهٔ اینکه مدار شکل ۵ــ۶ نشان دهندهٔ سرعت بالای باد یا سرعت پایین باد است نظر خود را بیان کنند.



شکل ۵ــ۶ مدار یک تقویت‌کنندهٔ تفاضلی که در بخشی از یک دستگاه مربوط به هواشناسی بکار گرفته شده است

پاسخ : ابتدا باید در نظر داشت که سؤال فوق یک سؤال مفهومی است و به جنبه‌های محاسباتی آن به صورت کلی نگریسته شده است و به همین دلیل پارامترهای مدار از جمله مقادیر مقاومت‌ها و ولتاژها داده نشده است.

برای پاسخ به سؤال دو نکته را باید مورد توجه قرار دارد. اوّل اینکه یک زوج تفاضلی با دو ورودی و یک خروجی طراحی شده است که ولتاژ خروجی که از کلکتور ترانزیستور $Q_۲$ گرفته شده است و با افزایش ولتاژ بیس $Q_۱$ مقدار ولتاژ کلکتور $Q_۲$ نیز افزایش می‌یابد.

نکتهٔ دوم این است که ترانزیستور $Q_۳$ هنگامی فعال است و موجب روشن شدن لامپ می‌شود که ولتاژ امیتر ــ بیس آن بیشتر از ولتاژ آستانهٔ هدایت باشد. در نتیجه لازم است سطح ولتاژ کلکتور $Q_۲$ کمتر از امیتر $Q_۳$ باشد.

با در نظر گرفتن نکات بالا می‌توان دو حالت ممکن برای سرعت باد را بررسی کرد. اگر سرعت باد بیشتر از یک مقدار خاص باشد و منجر به مثبت شدن اختلاف بین بیس ترانزیستور $Q_۱$ $(V_۱)$ و بیس ترانزیستور $Q_۲$ $(V_۲)$ شود $(V_۱ \ V_۲ > ۰)$، علامت ولتاژ خروجی نیز مثبت می‌شود. در این شرایط بسته به مقدار بهرهٔ مدار، اگر اختلاف ولتاژ بین بیس $Q_۳$ و کلکتور $Q_۲$ بیشتر از حد آستانهٔ هدایت شود ترانزیستور هدایت کرده و لامپ روشن می‌شود. اگر سرعت باد کمتر از میزان فوق شود ترانزیستور $Q_۳$ روشن است و این حالت تا زمانی که مقادیر ولتاژ $V_۱$ کمتر از $V_۲$ شود نیز ادامه دارد. در این حالت اختلاف بین $V_۱$ و $V_۲$ منفی شده و در نتیجه ولتاژ خروجی تقویت‌کننده نیز منفی ولامپ روشن می‌شود.

از توصیفات فوق می‌توان فهمید که وقتی سرعت باد از یک حد آستانه کمتر باشد لامپ روشن خواهد بود.

آزمونک ۲

مزیت اصلی استفاده از حالت سیگنال مشترک در تقویت‌کننده‌های تفاضلی چیست؟

پاسخ : این آرایش نسبت به سیگنال‌های پارازیتی، تغییرات ولتاژ منبع تغذیه و درجه حرارت مقاوم است زیرا سیگنال‌های مشترکی که به ورودی اعمال می‌شوند به یک اندازه تقویت می‌شوند، تغییراتشان در هر دو ترانزیستور مشابه است و در نتیجه تفاضل

آن‌ها در خروجی تقویت‌کننده صفر خواهد بود.

☑ پاسخ به سؤالات الگوی پرسش ۸ ـ۶(صفحهٔ ۱۴۷ از کتاب درسی)

۱ــ۸ــ۶ــ پاسخ : صحیح

۲ــ۸ــ۶ــ پاسخ : $CMRR \quad (A_{v(d)})/(A_{cm})$ که در این رابطه $A_{V(d)}$ بهرهٔ تفاضلی و A_{cm} بهرهٔ مد مشترک است.

۳ــ۸ــ۶ــ پاسخ : از آنجا که V_n به یکی از ورودی‌های تقویت‌کنندهٔ اوّل داده شده و ورودی دوم این تقویت‌کننده به زمین متصل است برای $V_{O۲}$ داریم :

$$V_{O۲} \quad A_{V۱}V_n$$

و موج خروجی $V_{O۲}$ با V_n هم‌فاز است. طبقهٔ دوم، یک تقویت‌کنندهٔ تفاضلی با دو ورودی و دو خروجی است. شکل موج‌های ورودی دارای دامنهٔ یکسان و فاز مخالف اند، پس دامنهٔ هر یک از خروجی‌های تقویت‌کنندهٔ دوم، دو برابر حاصلضرب دامنهٔ ورودی در بهرهٔ تقویت‌کننده است و برای $V_{O۴}$ داریم :

$$V_{O۴} \quad ۲A_{V۱}V_{O۲} \quad ۲A_{V۱}A_{v۲}V_n$$

و گزینهٔ ۱ پاسخ صحیح است.

۴ــ۸ــ۶ــ پاسخ : مدار نشان داده شده یک تقویت‌کنندهٔ تفاضلی با یک ورودی و دو خروجی است که از آن به‌عنوان جدا کنندهٔ فاز استفاده می‌شود و گزینهٔ ۴ پاسخ صحیح است.

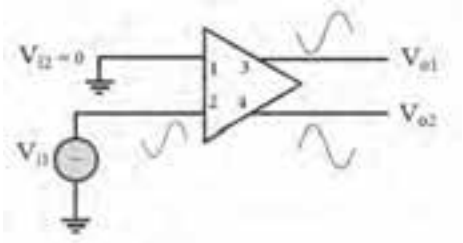
۵ــ۸ــ۶ــ پاسخ :

$$CMRR \quad (A_{v(d)})/(A_{cm}) \quad (\frac{12500}{0/25}) = 50000$$

$$CMRR(dB) \quad ۲۰ \log (۵۰۰۰۰) \quad ۹۳/۹۸$$

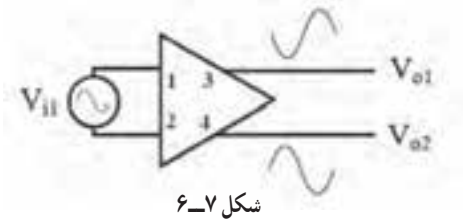
۶ــ۸ــ۶ــ پاسخ : تقویت‌کننده در حالت یک ورودی و دو خروجی و در مد تفاضلی استفاده شده است. $TR_۱$ دارای آرایش امیتر مشترک و $TR_۲$ دارای آرایش بیس مشترک است.

۷ــ۸ــ۶ــ پاسخ : تقویت‌کننده در حالت دو ورودی و دو خروجی استفاده شده و چون سیگنال‌های ورودی دارای فاز یکسانی هستند تقویت‌کننده در مد مشترک استفاده شده است.



شکل ۶ــ۶

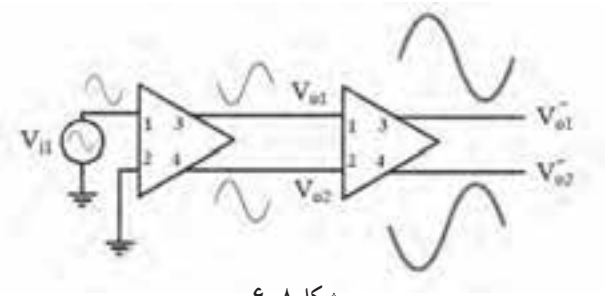
۸ــ۸ــ۶ــ پاسخ : شکل ۶ــ۶ خروجی‌های تقویت شدهٔ تقویت‌کنندهٔ تفاضلی را نشان می‌دهد که در آن $V_{o۱}$ با ورودی هم‌فاز و $V_{o۲}$ دارای فاز مخالف با ورودی است.



شکل ۷ــ۶

۹ــ۸ــ۶ــ پاسخ : مدار نشان داده شده در شکل ۴۱ــ۶ کتاب درسی یک تقویت‌کنندهٔ تفاضلی ایده آل است. ولتاژ خروجی این تقویت‌کننده در شکل ۷ــ۶ نشان داده شده است.

۱۰ــ۸ــ۶ــ **پاسخ** : طبقهٔ اول، یک تقویت‌کنندهٔ تفاضلی با یک ورودی و دو خروجی است. شکل موج‌های V_{o1} و V_{o2} در شکل ۸ــ۶ نشان داده شده است. در این‌حالت تقویت شدهٔ ولتاژ ورودی در V_{o2} با فاز موافق و در V_{o1} با فاز مخالف ظاهر می‌شود. طبقهٔ دوم، یک تقویت‌کنندهٔ تفاضلی با دو ورودی و دو خروجی است. این‌بار نیز ولتاژهای خروجی، تقویت شدهٔ ولتاژهای متناظر ورودی و با فاز مخالف است و دامنهٔ ولتاژهای خروجی دو برابر حاصلضرب دامنهٔ سیگنال ورودی در بهرهٔ ولتاژ طبقهٔ دوم است.



شکل ۸ــ۶

WWW

معرفی سایت

۱ــ http: //www.st_andrews.ac.uk/~jcgl/Scots Guide/audio/part۱/page۳.html

۲ــ http: //www.ecircuitcenter.com/circuits/bjt diffamp۱/bjt diffamp۱.htm

موضوعات پیشنهادی برای تحقیق و ارائهٔ آن به صورت سمینار

۱ــ بررسی نقش تقویت‌کنندهٔ تفاضلی در طبقهٔ ورودی تقویت‌کننده‌های عملیاتی

۲ــ مدارهای تقویت‌کنندهٔ تفاضلی با FET

۳ــ بررسی چند مورد از کاربرد تقویت‌کنندهٔ تفاضلی در مد مشترک و تفاضلی

موضوعات پیشنهادی برای تحقیق و ارائه آن به صورت سمینار در لوح فشرده ضمیمه کتاب آمده است.

اجرای نرم افزار

برای اجرای دقیق آموزش و عمق دادن به مفاهیم تشریح شده لازم است کلیه فرآیندهای آموزش که با استفاده از نرم افزار مولتی سیم قابل اجرا است را از قبل اجرا کنید و آن را برای هنرجویان در کلاس به نمایش درآورید، همچنین از آنان بخواهید که در خارج از ساعات کلاسی به اجرای موارد مطرح شده به صورت نرم افزاری بپردازند. اشاره‌ای هم داشته باشید به کتاب کارگاه الکترونیک عمومی که در آن اجرای عملی و نرم افزاری توصیه شده است. در کتاب آزمایشگاه مجازی جلد ۲ با کد ۴۶۶/۶ تمام مراحل اجرا شده و فایل‌های اجرا شده در لوح فشرده در ضمیمه کتاب وجود دارد.

فصل ۷

تقویت‌کنندهٔ عملیاتی

هدف‌های فصل

دانشی	مهارتی	نگرشی
۱ــ آشنایی با نماد، بلوک دیاگرام و مدار داخلی تقویت‌کنندهٔ عملیاتی ۲ــ آشنایی با نقش تقویت‌کنندهٔ تفاضلی در طبقهٔ ورودی تقویت‌کنندهٔ عملیاتی ۳ــ آشنایی با کاربردهای تقویت‌کنندهٔ عملیاتی	۱ــ توانایی تحلیل کلی طبقات مختلف تقویت‌کنندهٔ عملیاتی ۲ــ توانایی طراحی مدارهای تقویت‌کننده با بهره‌ها و مقاومت‌های ورودی مختلف با استفاده از Op_Amp ۳ــ توانایی معرفی مشخصات تقویت‌کنندهٔ عملیاتی ایده آل و واقعی	۱ــ شناخت ویژگی‌های اساسی تقویت‌کنندهٔ عملیاتی ۲ــ شناخت طبقات تشکیل دهندهٔ تقویت‌کنندهٔ عملیاتی ۳ــ شناخت Op_Amp به عنوان یک تقویت‌کننده با انعطاف پذیری بالا

سرفصل‌ها و عناوین اصلی

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

مفاهیم اساسی فصل

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

مراحل پیشنهادی برای تدریس

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

دانستنی‌ها و پیش نیازهای مورد نیاز برای آسان شدن یادگیری مطالب فصل

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

مهارت‌های اصلی معرفی شده در فصل که یادگیری آن‌ها برای دانش‌آموزان ضروری است

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

ارتباط مباحث مطرح شده در فصل با فناوری‌های رایج

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

نحوهٔ ارزشیابی و مقدار زمان اختصاص داده شده به هر قسمت از فصل

همکاران محترم می‌توانند با توجه به وضعیت درسی دانش‌آموزان در میزان زمان در نظر گرفته شده برای هر قسمت یا روش ارزشیابی، به صلاحدید خود تجدید نظر کنند. زمان بندی با توجه به بودجه بندی ارائه شده در کتاب الکترونیک عمومی ۲، سطح کلاس و نظر معلم انجام می‌شود.

سرفصل مطالب	هدف‌ها در قلمرو دانش، مهارت و نگرش	محتوا و فعالیت‌های یادگیری	روش‌های پیشنهادی برای ارزشیابی	ابزارهای اندازه گیری پیشنهادی	زمان پیشنهادی برای تدریس (ساعت)	توضیحات
بلوک دیاگرام مدار داخلی تقویت‌کنندهٔ عملیاتی	آشنایی با طبقات مختلف تقویت‌کنندهٔ عملیاتی و ویژگی‌های تقویت‌کنندهٔ عملیاتی ایده آل و واقعی	مطالعه، بحث	تکوینی، مجموعی	تشریحی	۰/۵	طرح سؤالات تشریحی در مورد مشخصات هر طبقهٔ تقویت‌کنندهٔ عملیاتی و مدل‌های ایده آل و واقعی آن
پایه‌های تقویت‌کنندهٔ عملیاتی و کمیت‌های مربوط به آن	آشنایی با روش تغذیه، سطوح ولتاژ و جریان خروجی در تقویت‌کنندهٔ عملیاتی	مطالعه، بحث	تکوینی، مجموعی	تشریحی	۱/۵	طرح سؤالات تشریحی در مورد نحوهٔ تغذیهٔ تقویت‌کننده و مقادیر ولتاژ مورد نیاز برای یک تقویت‌کنندهٔ نوعی و همچنین سطوح ولتاژ خروجی و علامت آنها با توجه به ورودی‌های اعمالی به تقویت‌کننده

بهرهٔ ولتاژ حلقه باز و حلقه بسته	آشنایی با مزایای به‌کارگیری فیدبک منفی در تقویت‌کنندهٔ عملیاتی و توانایی محاسبهٔ بهرهٔ حلقه باز و حلقه بستهٔ تقویت‌کننده در آرایش‌های مختلف	مطالعه، بحث، حل تمرین	تکوینی، مجموعی	تشریحی، محاسباتی	۲	طرح سؤالات تشریحی در مورد کاربرد فیدبک منفی در مدار تقویت‌کنندهٔ عملیاتی و مفهوم زمین مجازی محاسبهٔ بهره‌های حلقه باز و حلقه بسته (با تکیه بر مدارهای کاربردی معرفی شده)
کاربردهای تقویت‌کنندهٔ عملیاتی	آشنایی با برخی از کاربردهای اصلی این تقویت‌کننده و محدودیت‌های عملی استفاده از آن	مطالعه، حل تمرین	تکوینی، مجموعی	محاسباتی، تشریحی	۳	سؤال در مورد عوامل محدود کنندهٔ استفاده از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی در قالب سؤالات تشریحی سؤال در مورد انواع پارامترهای درگیر در طراحی تقویت‌کننده‌های طراحی شدهٔ مختلف با استفاده از Op_Amp و همچنین مدارهای کاربردی ساخته شده توسط آن در قالب سؤالات محاسباتی
تعاریف اصلی در تقویت‌کنندهٔ عملیاتی	آشنایی با ویژگی‌هایی از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی که در عمل بر رفتار تقویت‌کننده تأثیر می‌گذارند	مطالعه، بحث	تکوینی، مجموعی	تشریحی	۱	پرسش در مورد معانی عبارات معرفی شده در این قسمت از فصل و تأثیر هر یک از آن‌ها بر عملکرد تقویت‌کنندهٔ عملیاتی در قالب سؤالات تشریحی

۷ـ۱ـ تاریخچهٔ مختصر تقویت‌کننده‌های عملیاتی
۷ـ۲ـ پیشگفتار (صفحهٔ ۱۵۰ از کتاب درسی)

مباحث ۷ـ۱ و ۷ـ۲ در لوح فشرده ضمیمه کتاب آمده است.

۷ـ۳ـ بلوک دیاگرام و مدار داخلی تقویت‌کنندهٔ عملیاتی (صفحهٔ ۱۵۱ از کتاب درسی)

۷ـ۳ـ۱ـ طبقهٔ ورودی تقویت‌کنندهٔ عملیاتی
۷ـ۳ـ۲ـ طبقهٔ میانی تقویت‌کنندهٔ عملیاتی
۷ـ۳ـ۳ـ طبقهٔ خروجی تقویت‌کنندهٔ عملیاتی

مباحث ۷ـ۳ و زیر مجموعه‌های آن در لوح فشرده ضمیمه کتاب آمده است.

۷ـ۴ـ مدل جریان آب تقویت‌کنندهٔ عملیاتی

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید

آزمونک ۱

چرا در تقویت‌کننده‌های عملیاتی، اگر یک ورودی با دامنهٔ کم به تقویت‌کننده اعمال شود تقویت‌کننده به اشباع می‌رود؟

پاسخ: از آنجا که تقویت‌کننده‌های عملیاتی دارای ضریب تقویت بسیار بالایی هستند، با اعمال یک سیگنال با دامنهٔ کم به ورودی آنها سیگنالی با دامنهٔ بسیار بزرگ‌تر در خروجی آنها تشکیل می‌شود. اما از آنجا که ناحیهٔ عملکرد خطی هر تقویت‌کننده

محدود است، تقویت‌کننده به ناحیهٔ اشباع رفته، به صورت غیر خطی عمل می‌کند و شکل موج خروجی برش می‌خورد.

۷ـ۵ـ چرا فیدبک منفی؟

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

۷ــ۵ــ۱ــ ترموستات[1]؛ مداری با عملکرد مشابه با یک تقویت‌کنندهٔ عملیاتی با فیدبک منفی

مباحث ۷ـ۵ و زیر مجموعه‌های آن در لوح فشرده ضمیمه کتاب آمده است.

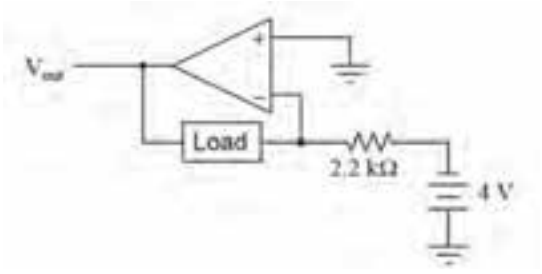
۷ـ۶ـ کاربردهای تقویت‌کنندهٔ عملیاتی (صفحهٔ ۱۵۷ از کتاب درسی)

پرسش ۱

هدف

ــ بررسی نقش مقاومت فیدبک در عملکرد مدار تقویت‌کنندهٔ معکوس کننده

جریان عبوری از مقاومت بار در مدار شکل ۵ــ۷ چند آمپر است؟ تغییر در مقدار مقاومت بار چه تأثیری بر عملکرد مدار دارد؟



شکل ۵ــ۷

پاسخ : در این مدار پایهٔ معکوس کنندهٔ تقویت‌کننده در حکم زمین مجازی است و جریان گذرنده از مقاومت متصل به این پایه برابر است با :

$$I = \frac{۴^{V}}{۲/۲^{K\Omega}} = ۱/۸۱۸^{ma}$$

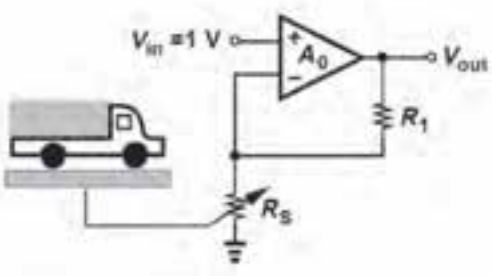
از آنجا که هیچ جریانی به تقویت‌کننده وارد نمی شود تمام جریان از مقاومت بار خواهد گذشت. تغییر در مقاومت بار تأثیری بر جریان عبوری از آن نخواهد داشت و تنها مقدار ولتاژ خروجی و در نتیجه بهرهٔ تقویت‌کننده را تغییر می‌دهد.

پرسش ۲

هدف

ــ مطالعهٔ یک کاربرد عملی از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی در حالت ناوارونگر

در ساختار یک باسکول (شکل ۶ــ۷)، سنسوری به کار گرفته شده است که مقاومت آن به‌صورت خطی با وزن بار روی آن تغییر می‌کند : R_S $R_\circ$ W. در این رابطه $R_\circ$ یک مقاومت ثابت است و W وزن کامیون قرار گرفته بر روی باسکول است. به چه نحو می‌توان با استفاده از ولتاژ خروجی تقویت‌کننده وزن بار روی باسکول را سنجید.



شکل ۶ــ۷یک باسکول که در ساختار آن از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی در حالت ناوارونگر استفاده شده است.

۱ــ Thermostat

پاسخ : در مدار نشان داده شده ولتاژ پایهٔ معکوس کننده برابر با پایهٔ غیرمعکوس کننده و مساوی ۱ ولت است. جریان عبوری از مقاومت فیدبک برابر $۱/R_S$است و مقدار آن با تغییر وزن بار روی باسکول و در نتیجه مقاومت R_S تغییر می‌کند. برای ولتاژ خروجی داریم :

$$V_{out} = \frac{R_۱}{R_S} + ۱ = \frac{R_۱}{R_۰ + W} + ۱$$

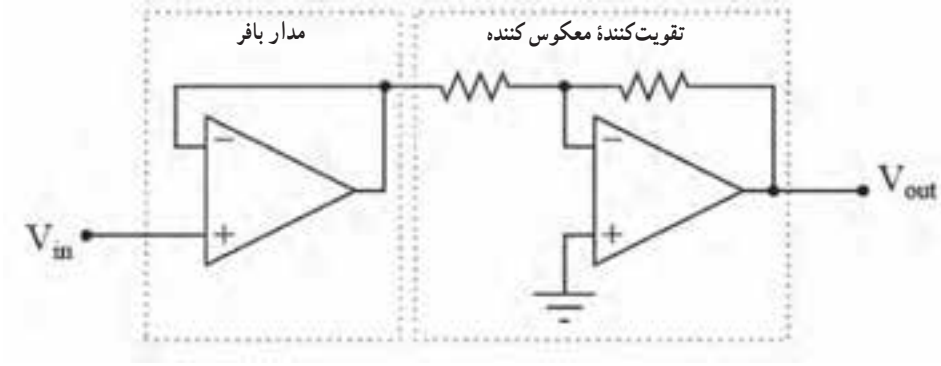
در نتیجه با داشتن ولتاژ خروجی و دانستن مقدار اولیهٔ مقاومت‌های ثابت مدار می‌توان اندازهٔ W را محاسبه کرد.

پرسش ۳

هدف

ــ بررسی یکی از کاربردهای مدار بافر و همچنین یادآوری مبحث تطبیق امپدانس

در مدار نشان داده شده در شکل ۷ــ۷ چه مزیتی از افزودن یک بافر به ابتدای یک تقویت‌کنندهٔ معکوس کننده حاصل می‌شود؟



شکل ۷ــ۷

پاسخ : می‌دانیم که مقاومت ورودی تقویت‌کنندهٔ عملیاتیِ معکوس‌کننده برابر مقاومت بین ورودی و پایهٔ معکوس کننده است. از طرفی می‌دانیم مقاومت ورودی تقویت‌کنندهٔ غیرمعکوس کننده بسیار زیاد است. از این رو با اتصال یک بافر به ابتدای یک تقویت‌کنندهٔ معکوس‌کننده، مقاومت ورودی آن افزایش پیدا می‌کند در حالی که بهرهٔ آن ثابت باقی‌مانده است.

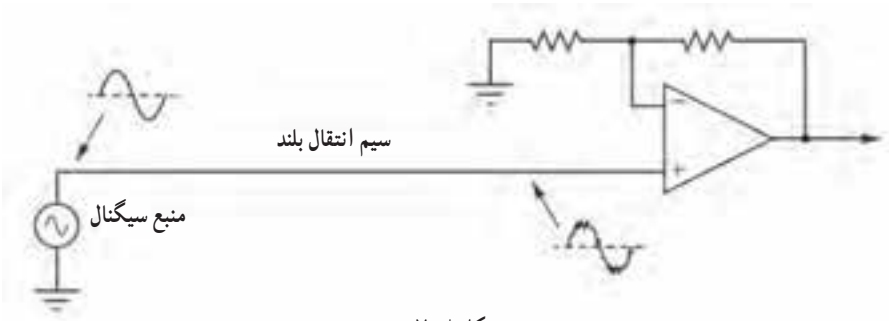
می‌توان از دانش‌آموزان خواست تا در مورد تطبیق امپدانس بین دو مدار با یکدیگر به بحث و تبادل نظر بپردازند. از آنجا که مقاومت خروجی یک تقویت‌کنندهٔ عملیاتی کوچک است و خروجی این تقویت‌کننده به مقاومت ورودی تقویت‌کنندهٔ معکوس‌کننده که آن نیز دارای مقدار نه چندان بالایی است متصل شده است می‌توان نتیجه گرفت که تطبیق امپدانس بین دو مدار برقرار است.

مثال ۱

هدف

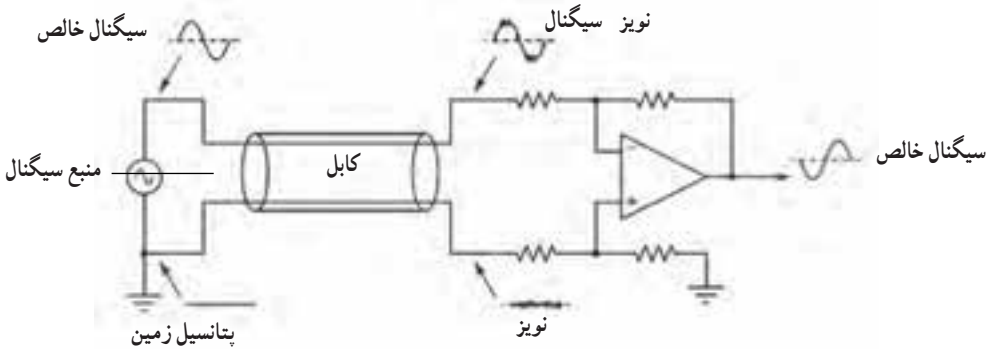
ــ بررسی کاربرد تقویت‌کنندهٔ عملیاتی با ورودی تفاضلی در حذف نویز

اگر یک ولتاژ ضعیف از یک منبع سیگنال به یک تقویت‌کنندهٔ عملیاتی داده شود، تقویت‌کننده ممکن است علاوه بر سیگنال مورد نظر ولتاژهای دیگری را نیز تشخیص دهد. به‌همراه سیگنال مطلوب، نویزهای خارجی نیز می‌توانند از طریق سیم انتقال سیگنال به تقویت‌کننده منتقل شوند. سیگنال‌های ناشی از خطوط انتقال توان، امواج رادیویی و دیگر منابع تداخل الکترومغناطیس مثال‌هایی از منابع نویز هستند. شکل ۸ــ۷ تأثیر نویز بر سیگنال ورودی تقویت‌کننده را نشان می‌دهد.



شکل ۸ــ۷

پوشاندن روکش بر روی سیم انتقال سیگنال همیشه یک راهکار مناسب برای مواجهه با محیط‌های شامل نویزهای الکتریکی است. اما راهکار بسیار بهتری برای روبرو شدن با این مشکل وجود دارد. به‌جای استفاده از یک تقویت‌کننده با یک ورودی، می‌توان سیگنال را از طریق دو کابل انتقال داد و از یک تقویت‌کنندهٔ تفاضلی استفاده کرد. در شکل ۹ــ۷ مدار تقویت‌کنندهٔ عملیاتی با ورودی‌های تفاضلی و سیگنال ظاهر شده روی اجزای مختلف مدار نسبت به زمین نشان داده شده است.



شکل ۹ــ۷

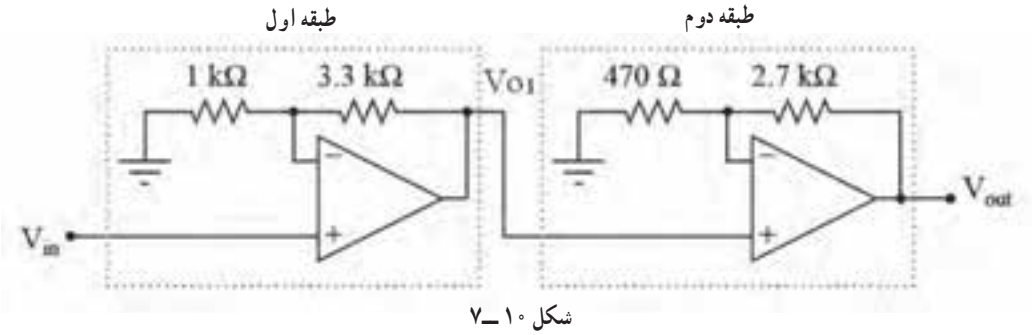
اگر دو کابل در تمام طول مسیر انتقال با یکدیگر موازی باشند، با این فرض که منابع نویز در طول مسیر برای هر دو کابل یکسان باشند، ولتاژ نویز در انتهای سیم متصل به زمین که به تقویت‌کننده وارد می‌شود مشابه ولتاژ نویزی است که در سیم انتقال دیگر با سیگنال ولتاژ اصلی جمع می‌شود. از آنجا که تفاضل سیگنال‌های ورودی تقویت می‌شوند، نویز موجود روی سیگنال اصلی از نویز رسیده به پایهٔ دیگر تقویت‌کننده کم شده و در انتها سیگنال تقویت شدهٔ خالص در خروجی ظاهر می‌شود.

پرسش ۴

هدف

ــ استفاده از دانسته‌های دانش‌آموزان در مورد تقویت‌کننده‌های چند طبقه و به‌کارگیری آن برای محاسبهٔ بهرهٔ یک ساختار تقویت کنندگی مبتنی بر Op_Amp

بهرهٔ کلی تقویت‌کنندهٔ نشان داده شده در شکل ۱۰ــ ۷ را محاسبه کنید.



شکل ۱۰ــ۷

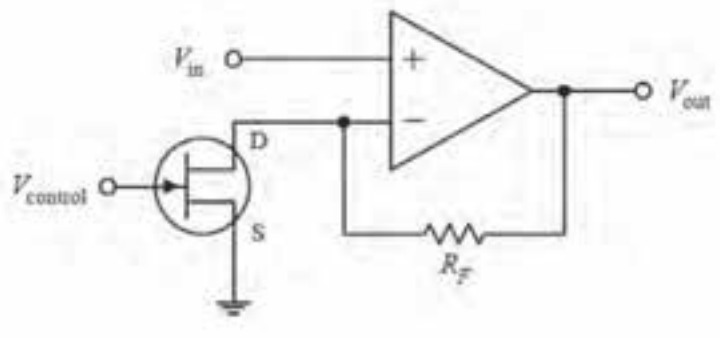
پاسخ : همانطور که از شکل ۱۰ــ۷ مشخص است تقویت‌کننده از دو طبقهٔ مجزا تشکیل شده است. از مبحث تقویت‌کننده‌های چند طبقه به یاد داریم که برای محاسبهٔ بهرهٔ چنین تقویت‌کننده‌هایی بایستی بهرهٔ هر طبقه را به صورت مجزا محاسبه کرد و حاصلضرب بهره‌ها را به‌عنوان بهرهٔ کل در نظر گرفت. هر طبقه، یک تقویت‌کنندهٔ غیرمعکوس کننده است که بهرهٔ آن از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود :

$$\frac{V_o}{V_i} = (۱ + \frac{R_۲}{R_۱})$$

که در این رابطه $R_۲$ مقاومت فیدبک است. در نتیجه بهرهٔ هر یک از طبقات و بهرهٔ کل تقویت‌کننده عبارت‌است از :

$$\left.\begin{aligned} \frac{V_{o۱}}{V_{in}} &= (۱ + \frac{۳/۳^{K\Omega}}{۱^{K\Omega}}) = ۴/۳ \\ \frac{V_{out}}{V_{o۱}} &= (۱ + \frac{۲/۷^{K\Omega}}{۰/۴۷^{K\Omega}}) = ۶/۷۴ \end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{out}}{V_{o۱}} \times \frac{V_{o۱}}{V_{in}} = ۶/۷۴ \times ۴/۳ = ۲۸/۹۸$$

مثال ۲ (دانش افزایی) : شکل ۱۱ــ۷ یک مدار کنترل بهرهٔ خودکار[۱] را نشان می‌دهد که با استفاده از یک JFET و یک تقویت‌کنندهٔ عملیاتی ساخته شده است.



شکل ۱۱ــ۷

با یادآوری ویژگی‌های JFET برای دانش‌آموزان وقتی در ناحیهٔ اهمی کار می‌کند می‌توان نقش JFET را در این مدار توضیح داد. در این مدار تقویت‌کنندهٔ عملیاتی در حالت ناوارونگر استفاده شده است و JFET نقش مقاومتِ بین پایهٔ وارونگر تقویت‌کنندهٔ عملیاتی و زمین را ایفا می‌کند. با فرض V_n ثابت و با توجه به اینکه ولتاژ درین JFET با V_n برابر است می‌توان دید که ولتاژ درین ــ سورس JFET مقداری ثابت است. با فرض کارکردن JFET در ناحیهٔ اهمی، با تغییر ولتاژ گیت ($V_{con\ ro}$) میزان مقاومت درین ــ سورس (R_{DS}) تغییر کرده و با کاهش مقدار $V_{con\ ro}$ مقاومت افزایش پیدا می‌کند.

می‌دانیم که در یک تقویت‌کننده ناوارونگر مقدار بهره از رابطهٔ $R\ /R_{DS}\ ۱$ محاسبه می‌شود و این یعنی که با تغییر $V_{con\ ro}$ و مقاومت R_{DS} میزان بهره قابل تغییر است. با فرض $R\ ۲۹^{K\Omega}$ و $R_{DS(on)}\ ۱^{K\Omega}$، مقدار بهرهٔ مدار برابر ۳۰ خواهد شد. حال با کاهش $V_{con\ ro}$ و در نتیجه ولتاژ گیت ــ سورس، میزان مقاومت درین ــ سورس افزایش می‌یابد و وقتی $R_{DS} >> R$ باشد مقدار بهرهٔ مدار برابر واحد خواهد شد. پس می‌توان دید که مقدار بهرهٔ این مدار بین بازهٔ ۱ تا ۳۰ قابل کنترل است.

۱ــ Automatic Gain Control

☑ پاسخ به سؤالات الگوی پرسش ۸ـ۷(صفحهٔ ۱۶۲از کتاب درسی)

۱ـ۸ـ۷ـ پاسخ : صحیح

۲ـ۸ـ۷ـ پاسخ : غلط

۳ـ۸ـ۷ـ پاسخ : صحیح

۴ـ۸ـ۷ـ پاسخ : غلط. در این‌حالت بهرهٔ تقویت‌کننده برابر بهرهٔ حلقه باز است.

۵ـ۸ـ۷ـ پاسخ : تقویت‌کنندهٔ عملیاتی ۷۴۱ μA دارای مقاومت خروجی ۵۰ اهم است.

۶ـ۸ـ۷ـ پاسخ : اگر هر دو ورودی op‌ـAmp ایده‌آل به زمین الکتریکی (ولتاژ صفر) وصل شود ولتاژ خروجی آن **صفر ولت** است.

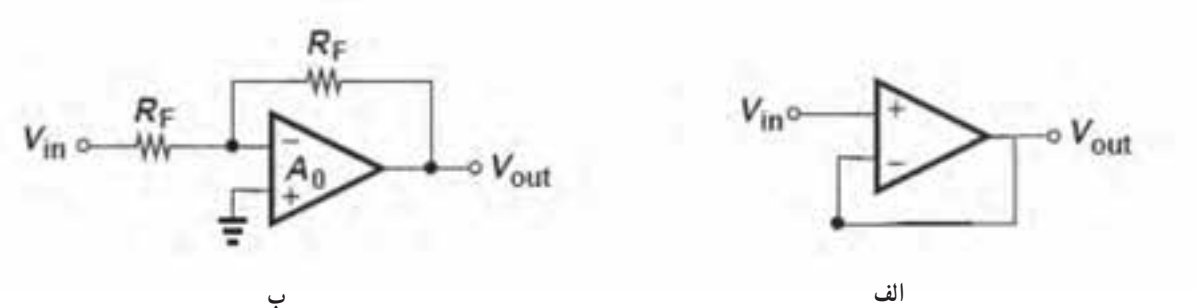
۷ـ۸ـ۷ـ پاسخ : اگر در مدار شکل ۲۹ـ۷ (کتاب درسی) مقدار R کاهش یابد بهرهٔ ولتاژ مدار کاهش می‌یابد.

۸ـ۸ـ۷ـ پاسخ : میزان بهرهٔ ولتاژ تقویت‌کنندهٔ شکل ۳۰ـ۷ (کتاب درسی) برابر $26 = (\frac{1000}{40}) + 1$ و شکل ۳۱ـ۷ برابر ۱۰ ۳۳۰/۳۳ است.

۹ـ۸ـ۷ـ پاسخ : مدار داده شده در شکل ۳۲ـ۷ کتاب درسی یک تقویت‌کنندهٔ معکوس کننده است که بهرهٔ آن از رابطهٔ $\frac{-R_3}{R_1}$ قابل محاسبه است. اگر R_1 R_2 باشد این تقویت‌کننده به یک بافر منفی تبدیل می‌شود و گزینهٔ ۴ پاسخ صحیح است.

۱۰ـ۸ـ۷ـ پاسخ : مدار داده شده یک جمع کننده است که ولتاژ خروجی آن در گزینهٔ ۳ داده شده است.

۱۱ـ۸ـ۷ـ پاسخ : مدارهای بافر مثبت و منفی به ترتیب در شکل‌های ۱۲ـ۷ـ الف و ۱۲ـ۷ـ ب نشان داده شده است.



ب الف

شکل ۱۲ـ۷

برای مدار بافر مثبت داریم $\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$ و رابطهٔ بهرهٔ ولتاژ برای مدار بافر منفی عبارت است از : $\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_F}{R_F} = -1$

۱۲ـ۸ـ۷ـ پاسخ : اگر تقویت‌کنندهٔ عملیاتی، ایده‌آل باشد چون ولتاژ هر دو پایهٔ ورودی آن صفر است ولتاژ خروجی آن نیز صفر است. اگر تقویت‌کننده را واقعی در نظر بگیریم مقداری ولتاژ خطا در خروجی وجود خواهد داشت که ولتاژ آفست نامیده می‌شود.

۱۳ـ۸ـ۷ـ پاسخ : مدار نشان داده شده در شکل ۳۵ـ۷ کتاب درسی یک تقویت‌کنندهٔ وارونگر است که ولتاژ خروجی در آن را می‌توان از رابطهٔ زیر بدست آورد : $V_O = (\frac{-R_F}{R_1})V_i = (\frac{-12}{10}) \times 4^V = -4/8^V$

۱۴ـ۸ـ۷ـ پاسخ : مدار نشان داده شده در شکل ۳۶ـ۷ کتاب درسی یک تقویت‌کنندهٔ ناوارونگر است که ولتاژ خروجی آن را می‌توان از رابطهٔ زیر بدست آورد : $V_O = (1 + \frac{R_2}{R_1})V_i = (1 + \frac{12}{8}) \times 4^V = 10^V$

۱۵ــ۸ــ۷ــ پاسخ : مدار داده شده یک بافر مثبت است. در این مدار دامنهٔ ولتاژ خروجی برابر با دامنهٔ ولتاژ ورودی است و فاز سیگنال‌های ورودی و خروجی یکسان‌اند. در نتیجه اگر دامنهٔ ولتاژ خروجی ۱ ولت باشد می‌توان نتیجه گرفت که دامنهٔ ولتاژ ورودی نیز برابر ۱ ولت است.

۱۶ــ۸ــ۷ــ پاسخ : مدار داده شده یک جمع کننده است که ولتاژ خروجی آن از رابطهٔ زیر قابل محاسبه است :

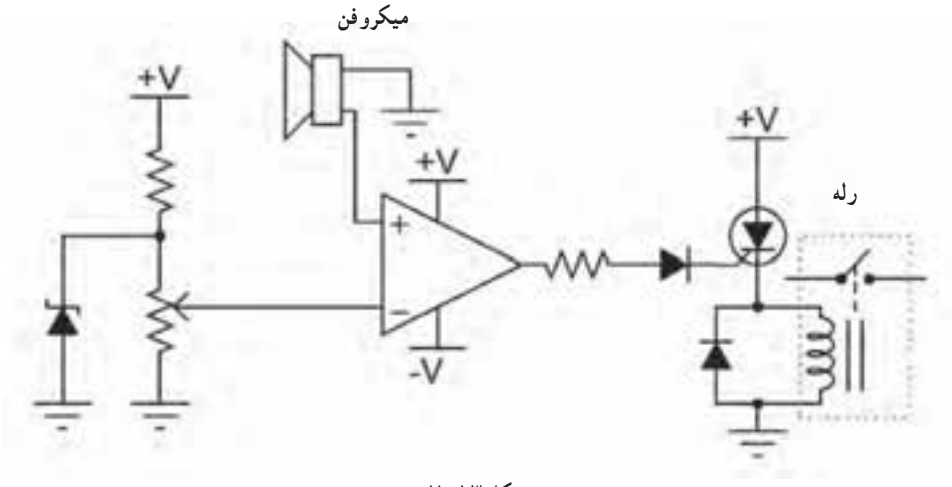
$$V_o = -R_f\left(\frac{3/7^V}{R_1}+\frac{2/6^V}{R_2}\right) = -100^{K\Omega}\left(\frac{3/7^V}{100^{K\Omega}}+\frac{2/6^V}{100^{K\Omega}}\right) = -6/3^V$$

۱۷ــ۸ــ۷ــ پاسخ : مدار داده شده یک تقویت‌کننده با ورودی تفاضلی است که در آن مقدار تمامی مقاومت‌ها با یکدیگر برابرند و طبق رابطهٔ گفته شده در کتاب درسی می‌توان نوشت :

$V_O \quad 100^{K\Omega}/100^{K\Omega}(6/7 - 3/2)^V \quad 3/5^V$

۷ـ۷ـ مقایسه کننده (صفحهٔ ۱۶۴ از کتاب درسی) (دانش‌افزایی)

مثال ۳ : شکل ۱۳ــ۷ مدار یک رلهٔ فعال شوندهٔ صوتی را نشان می‌دهد.

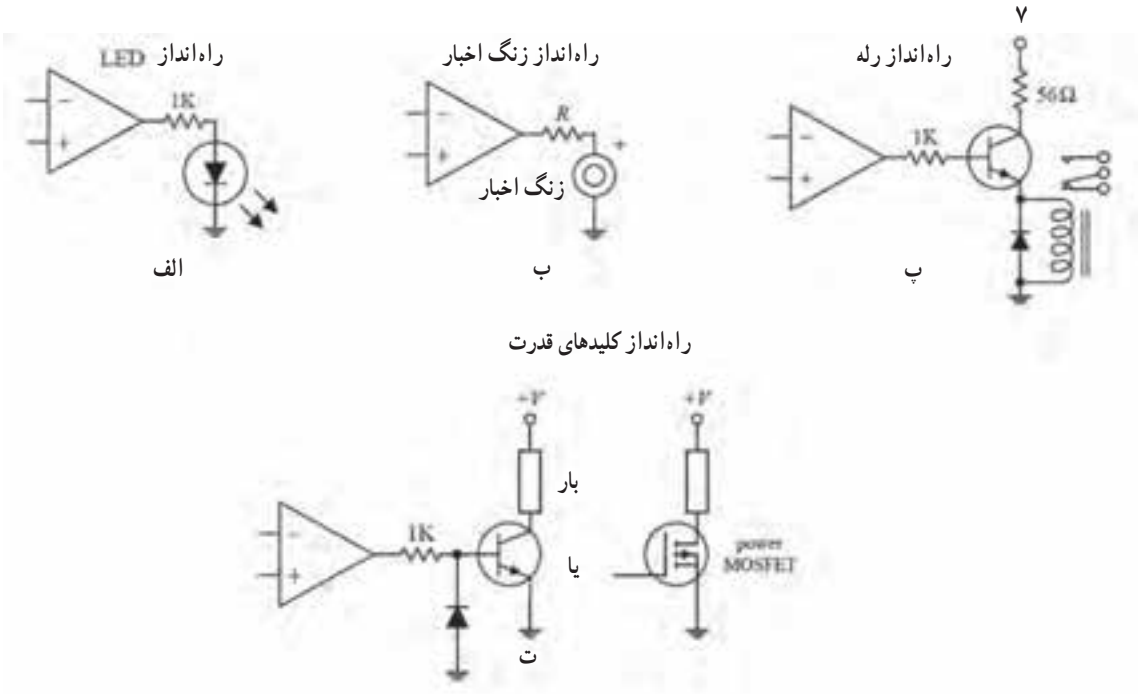


شکل ۱۳ــ۷

ابتدا می‌توان از دانش‌آموزان خواست تا در مورد نقش تقویت‌کنندهٔ عملیاتی در مدار فوق با یکدیگر گفتگو کنند. پاسخ این است که Op_Amp به عنوان یک مقایسه کننده عمل می‌کند. سپس می‌توان از آنها خواست تا در مورد ولتاژ مبنا و سیگنال متغیر داده شده به مقایسه کننده با یکدیگر بحث و گفتگو کنند. سیگنال صوتی از طریق میکروفن به ورودی غیرمعکوس‌کنندهٔ تقویت‌کننده اعمال می‌شود و با ولتاژ روی پایهٔ معکوس کننده مقایسه می‌شود. در صورتی‌که دامنهٔ سیگنال صوتی بیشتر از دامنهٔ سیگنال روی پایهٔ معکوس کننده باشد، تقویت‌کننده به اشباع مثبت رفته و باعث هدایت دیود و در نتیجه عمل کردن رله می‌شود.

دامنهٔ سیگنال صوتی مورد نیاز برای عمل کردن رله توسط پتانسیومتر تعیین می‌شود. برای مقادیر مقاومت‌های بالای پتانسیومتر، احتیاج به سیگنال‌های صوتی با دامنهٔ بزرگتری است.

مثال ۴ : شکل ۱۴ــ۷ کاربردهایی از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی به عنوان مقایسه‌کننده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴ــ۷

در مدار الف از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی برای راه اندازی یک LED استفاده شده است و هنگامی که ولتاژ پایهٔ مثبت آن بیشتر از پایهٔ منفی می‌شود LED روشن می‌شود. مدار ب نیز عملکردی مشابه مدار الف دارد و برای راه اندازی یک زنگ اخبار استفاده شده است. در مدار پ وقتی ولتاژ پایهٔ مثبت بیشتر از پایهٔ منفی است و تقویت‌کننده به اشباع مثبت می‌رود، ترانزیستور هدایت کرده و باعث فعال شدن رله می‌شود. در این مدار وقتی ترانزیستور خاموش می‌شود، دیود مانع عبور جریان سیم پیچ به امیتر ترانزیستور می‌شود. در مدار ت از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی برای راه اندازی کلیدهای ترانزیستوری استفاده شده است. نقش دیود در این مدار جلوگیری از بایاس منفی ورودی ترانزیستور و آسیب رسیدن به آنها است.

۷ـ۸ـ پیاده سازی توابع ریاضی با استفاده تقویت‌کنندهٔ عملیاتی

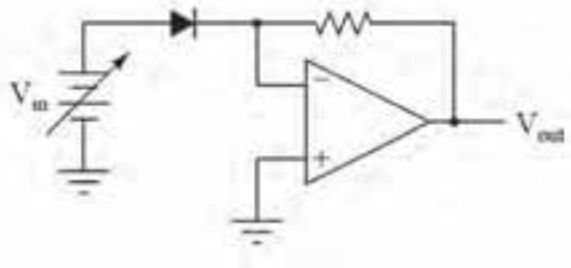
به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

پرسش ۵ (دانش افزایی)

هدف

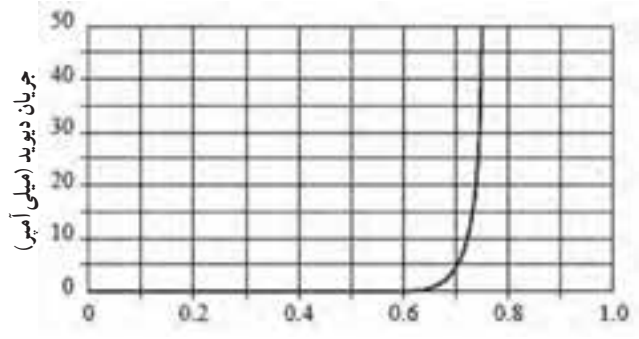
ــ مطالعهٔ نحوهٔ پیاده سازی یک تابع ریاضی با استفاده از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی

تابع انتقال (ولتاژ خروجی بر حسب ولتاژ ورودی) مدار نشان داده شده در شکل ۱۵ــ۷ را رسم کرده و نحوهٔ عملکرد آن را توضیح دهید. چه تابع ریاضی با استفاده از این مدار پیاده‌سازی می‌شود؟



شکل ۱۵ــ۷

پاسخ : به دلیل خاصیت زمین مجازی، ولتاژ پایهٔ معکوس کنندهٔ تقویت‌کننده برابر صفر است. بنابراین جریان عبوری از بار همان جریان دیود است. در این مرحله می‌توان از دانش‌آموزان خواست تا در مورد ویژگی‌های منحنی ولت ــ آمپر دیود با یکدیگر گفتگو کنند. این منحنی در فصل اول کتاب بررسی و در شکل ۱۶ــ۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۶ــ۷ منحنی ولت ــ آمپر دیود

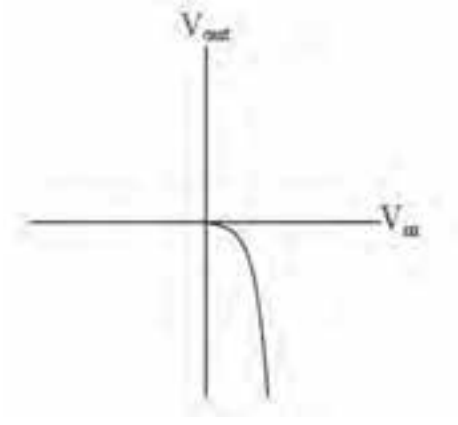
همانطور که از شکل ۱۶ــ۷ می‌توان فهمید دیود تنها به ازای ولتاژهای ورودی بیشتر از حد آستانهٔ آن هدایت می‌کند. رابطهٔ جریان دیود بر حسب ولتاژ آن عبارت است از :

$$I_D \quad I_S e^{AV\,n}$$

این جریان که از یک رابطهٔ نمایی تبعیت می‌کند از مقاومت بار نیز می‌گذرد و ولتاژ خروجی را شکل می‌دهد :

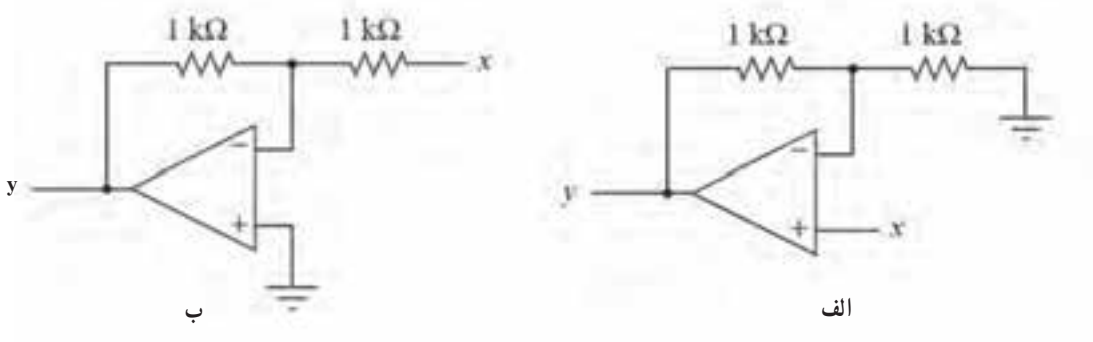
$$V_{ou} \qquad RI_D \qquad RI_S e^{AV\,n}$$

در نتیجه تابع انتقالی همانند شکل ۱۷ــ۷ حاصل خواهد شد. از این‌رو مدار ارائه شده یک تابع نمایی را بازنمایی می‌کند.



شکل ۱۷ــ۷

مثال ۵ : شکل‌های ۱۸ــ۷ ــ الف و ب دو تقویت‌کنندهٔ عملیاتی را نشان می‌دهند که به ترتیب در حالت ناوارونگر و وارونگر استفاده شده‌اند.



شکل ۱۸ــ۷

می‌توان نشان داد که مدارهای بالا قابلیت پیاده‌سازی توابع خطی را نیز دارند. در مدار الف رابطهٔ بین y و x عبارت است از y و به ازای مقادیر مختلف x و مقادیر متناظر y یک تابع خطی با شیب ۲ پیاده سازی شده است. رابطهٔ ریاضی پیاده سازی شده توسط مدار وارونگر ب عبارت است از x y .

۷ـ۹ـ سرعت چرخش (صفحهٔ ۱۷۱ از کتاب درسی)

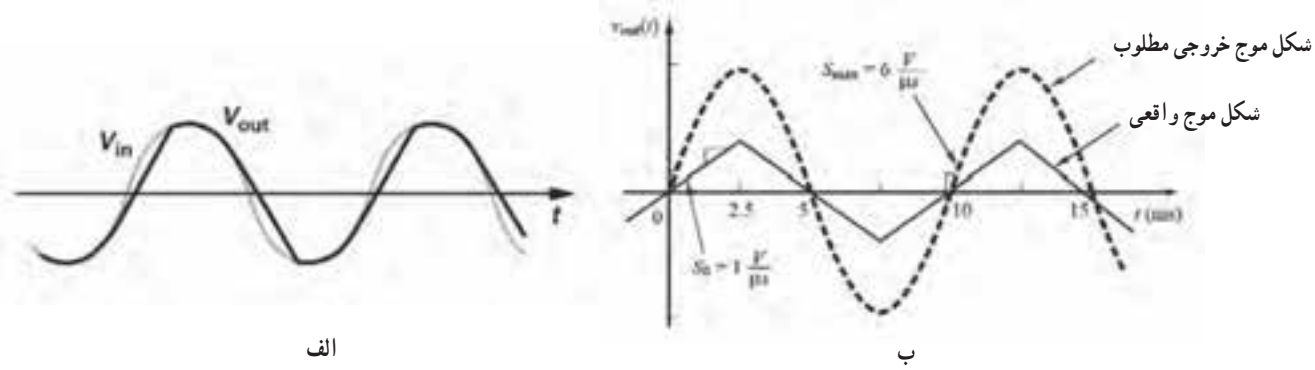
به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

پرسش ۶

در صورت اعمال یک موج سینوسی به ورودی یک تقویت‌کنندهٔ عملیاتی غیرمعکوس‌کننده، شکل موج سیگنال خروجی به چه نحو از محدودیت سرعت چرخش متأثر می‌شود؟ چه خصوصیاتی از سیگنال سینوسی ورودی می‌تواند باعث تقویت محدودیت سرعت چرخش شود؟

پاسخ : شکل ۲۰ـ۷ دو حالت کلی ممکن برای سیگنال خروجی تقویت‌کننده را نشان می‌دهد. در حالت الف شکل موج خروجی دارای اعوجاج است اما توانسته رفتار کلی سیگنال سینوسی را دنبال کند. اما در حالت ب شکل موج خروجی از حالت ایده‌آل فاصلهٔ زیادی گرفته و دیگر فرم سینوسی ندارد. برای توجیه شکل موج‌های تولید شده بایستی ویژگی‌هایی از سیگنال سینوسی را مورد نظر قرار داد که باعث تأثیر محدودیت سرعت چرخش می‌شوند.

در یک سیگنال سینوسی، هم میزان تغییرات دامنهٔ سیگنال و هم فرکانس آن می‌تواند محدودیت سرعت چرخش را ایجاد کند. اگر میزان دامنهٔ ولتاژ دارای تغییرات زیادی باشد شکل موج خروجی به زمان قابل توجهی نیاز دارد تا به حالت پایدار خود برسد. همچنین اگر فرکانس سیگنال ورودی زیاد باشد یا به عبارتی زمان تغییر مقادیر بیشینه و کمینهٔ سیگنال کم باشد، شکل موج خروجی نمی تواند سیگنال ورودی را دنبال کند. در حالت الف اگرچه شکل موج خروجی کاملاً شکل موج ورودی را دنبال نمی کند (به دلیل تغییرات نسبتاً زیاد در مقدار دامنهٔ ولتاژ یا فرکانس نسبتاً بالای سیگنال ورودی) اما شکل کلی سینوسی قابل تشخیص است. در حالت ب زمان تغییرات سیگنال ورودی برابر ۶ V/μs است که خیلی بیشتر از سرعت چرخش تقویت‌کننده است که برابر ۱ V/μs است. از این جهت اعوجاج زیادی در سیگنال خروجی ایجاد شده و شکل موج خروجی فرم سینوسی ندارد.



الف ب

شکل ۲۰ـ۷ اثر محدودیت سرعت چرخش بر شکل موج خروجی یک تقویت‌کنندهٔ عملیاتی نوعی الف) تأثیر نسبتاً خفیف محدودیت سرعت چرخش بر سیگنال خروجی ب) تأثیر نامطلوب سرعت چرخش بر سیگنال خروجی تقویت‌کننده ناشی از فرکانس زیاد سیگنال ورودی

۷ـ۱۰ـ مقایسهٔ چند نمونه تقویت‌کنندهٔ عملیاتی

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

☑ نکتهٔ آموزش

به لوح فشرده ضمیمه کتاب مراجعه کنید.

WWW

معرفی سایت: ویژگی‌ها و مبانی اصلی عملکرد تقویت‌کننده‌های عملیاتی

۱ـ http://holbert.faculty.asu.edu/ece۲۰۱/opamp.html

در وب سایت فوق مفاهیم مرتبط با تقویت‌کنندهٔ عملیاتی و نحوهٔ عمل آن و همچنین برخی از مدارهای عملی به صورت گرافیکی ارائه شده است و به این طریق بستر مناسبی برای درک مفاهیم اصلی فراهم آورده است.

۲ـ http://www.electronics_tutorials.ws/opamp/opamp ۱.html

۳ـ http://hyperphysics.phy_astr.gsu.edu/hbase/electronic/opampvar.html

۴ـ http://www.allaboutcircuits.com/videos/۸۰.html

۵ـ http://www.allaboutcircuits.com/vol ۳/chpt ۸/۱۱.html

☑ پاسخ به سؤالات الگوی پرسش ۱۶ـ۷(صفحهٔ ۱۷۳ از کتاب درسی)

۱ـ۱۶ـ۷ـ پاسخ: صحیح

۲ـ۱۶ـ۷ـ پاسخ: غلط

۳ـ۱۶ـ۷ـ پاسخ: صحیح

۴ـ۱۶ـ۷ـ پاسخ: یک مدار آشکارساز عبور از صفر می‌تواند موج سینوسی را به موج **مربعی** تبدیل کند.

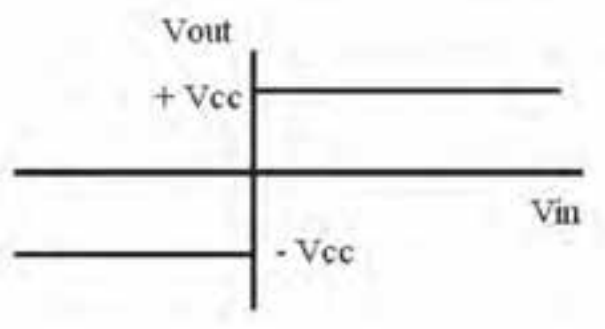
۵ـ۱۶ـ۷ـ پاسخ: مقدار ولتاژ مبنا با استفاده از تقسیم ولتاژ به‌دست می‌آید و برابر ۲ ولت است. لذا گزینهٔ ۲ صحیح است.

۶ـ۱۶ـ۷ـ پاسخ: با استفاده از تعریف سرعت چرخش می‌توان نوشت:

$$SR = \frac{\Delta V_O}{\Delta t} = 8/12 = 0/666$$

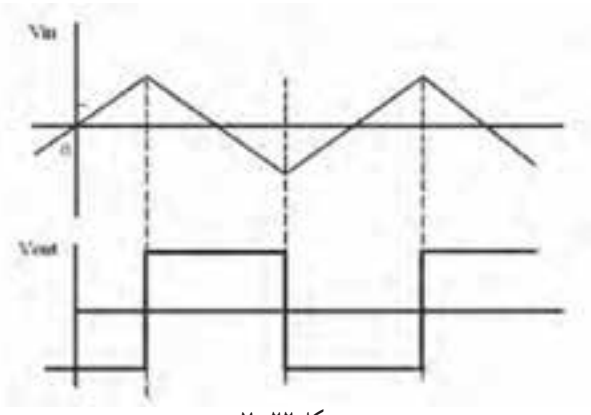
لذا گزینهٔ ۲ صحیح است.

۷ـ۱۶ـ۷ـ پاسخ: چون تقویت‌کننده به صورت حلقه ـ باز استفاده شده است، با فرض اینکه بهرهٔ حلقه ـ باز بسیار زیاد باشد، تقویت‌کننده با مقادیر اندک ولتاژ ورودی به اشباع می‌رود. ولتاژ ورودی به پایهٔ مثبت تقویت‌کننده داده شده است و با پایهٔ منفی که زمین است مقایسه می‌شود. برای ولتاژهای ورودی با دامنهٔ مثبت تقویت‌کننده به اشباع مثبت رفته و دامنهٔ ولتاژ خروجی برابر ولتاژ منبع تغذیهٔ مثبت شده و برای ولتاژهای ورودی با دامنهٔ منفی، تقویت‌کننده به اشباع منفی رفته و دامنهٔ ولتاژ خروجی برابر دامنهٔ ولتاژ منبع تغذیهٔ منفی است (شکل ۲۱ـ۷).



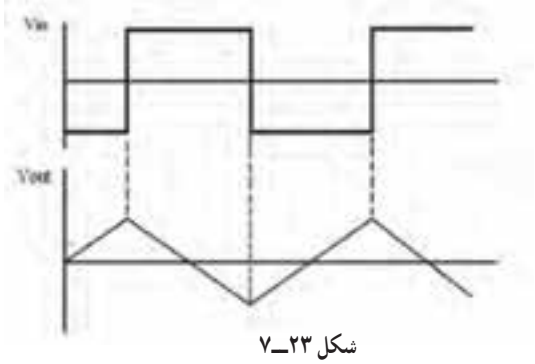
شکل ۲۱ـ۷

۸ــ۱۶ــ۷ــ پاسخ : برای رسم شکل موج ولتاژ خروجی که مشتق ولتاژ ورودی است باید به این نکته دقت کرد که چون مدار مشتق گیر در قالب یک تقویت‌کنندهٔ معکوس کننده طراحی شده است هنگامی شکل موج ورودی دارای روندی صعودی است و به مقدار بیشینهٔ خود میل می‌کند، ولتاژ خروجی روندی معکوس داشته و به سمت مقدار کمینه خود میل خواهد کرد. از این‌رو در مواقعی که شیب سیگنال ورودی مثبت است ولتاژ خروجی دارای مقداری منفی است و بالعکس (شکل ۲۲ــ۷).



شکل ۲۲ــ۷

۹ــ۱۶ــ۷ــ پاسخ : چون انتگرال شکل موج ولتاژ ورودی در خروجی ظاهر شده است می‌توان با مشتق گرفتن از شکل موج ولتاژ خروجی به سیگنال ورودی رسید. از آنجا که ولتاژ خروجی یک سیگنال دندانه اره‌ای است و در هر نیم پریود از توابع شیب رو به بالا یا رو به پایین تشکیل شده است، مشتق آن یک سیگنال پله خواهد شد. تنها باید به این نکته توجه کرد که چون تقویت‌کننده به صورت معکوس کننده طراحی شده است علامت ولتاژ ورودی مخالف شیب شکل موج ورودی در هر نیم پریود آن است (شکل ۲۳ــ۷).



شکل ۲۳ــ۷

۱۰ــ۱۶ــ۷ــ پاسخ : ابتدا بایستی دقت شود که تقویت‌کننده به صورت حلقه ــ باز مورد استفاده قرار گرفته است و بسته به مقدار ولتاژ ورودی در یکی از حالات اشباع منفی یا مثبت عمل می‌کند. در این مدار مقدار ولتاژ روی پایهٔ ۳ با استفاده از پتانسومتر R_1 تنظیم و ولتاژ ورودی با آن مقایسه می‌شود. چون ورودی به پایهٔ معکوس کنندهٔ تقویت‌کننده اعمال شده است، اگر مقدار آن بیشتر از ولتاژ پایهٔ غیرمعکوس کننده باشد تقویت‌کننده به اشباع منفی رفته و باعث روشن شدن دیود نوری می‌شود. در غیر این‌صورت تقویت‌کننده در اشباع مثبت و دیود خاموش است.

۱۱ــ۱۶ــ۷ــ پاسخ : ولتاژ آفست ورودی مقدار ولتاژی است که باید بین ترمینال‌های ورودی اعمال شود تا ولتاژ خروجی Op‌ــAmp صفر باشد. مقدار ولتاژ خروجی در حالی‌که ورودی‌های Op‌ــAmp زمین شده‌اند را ولتاژ آفست خروجی می‌نامند.

موضوعات پیشنهادی برای تحقیق و ارائهٔ آن به‌صورت سمینار

۱ــ بررسی نقش تقویت‌کنندهٔ عملیاتی در ساختار کامپیوترهای آنالوگ

۲ــ بررسی محدودیت‌های استفاده از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی

۳ــ نوسان ساز با استفاده از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی

* دانش‌آموزان برای انجام این تحقیق می‌توانند از وب سایت‌های متنوعی که در این زمینه در اینترنت وجود دارد استفاده کنند. نمونه‌ای از این وب سایت‌ها در ادامه آمده است :

http: //hyperphysics.phy astr.gsu.edu/hbase/electronic/square.html

۴ــ ولت مترهای DC و AC با استفاده از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی

۵ــ منبع جریان با استفاده از تقویت‌کنندهٔ عملیاتی

موضوعات پیشنهادی برای تحقیق و ارائه آن به صورت سمینار در لوح فشرده ضمیمه کتاب آمده است.

اجرای نرم افزار

برای اجرای دقیق آموزش و عمق دادن به مفاهیم تشریح شده لازم است کلیه فرآیندهای آموزش که با استفاده از نرم افزار مولتی سیم قابل اجرا است را از قبل اجرا کنید و آن را برای هنرجویان در کلاس به نمایش درآورید، هم‌چنین از آنان بخواهید که در خارج از ساعات کلاسی به اجرای موارد مطرح شده به‌صورت نرم‌افزاری بپردازند. اشاره‌ای هم داشته باشید به کتاب کارگاه الکترونیک عمومی که در آن اجرای عملی و نرم افزاری توصیه شده است. در کتاب آزمایشگاه مجازی جلد ۲ با کد ۴۶۶/۶ تمام مراحل اجرا شده و فایل‌های اجرا شده در لوح فشرده در ضمیمه کتاب وجود دارد.