

# كتاب الكترونيک او ۲ مارس

تهیه شده در الکترونیک باز | مرجع دانلود الکترونیک

[www.gselectronic.ir](http://www.gselectronic.ir)

تهیه و تنظیم: صادق حیدری فراهانی

Sadegh.heidari.farahani@gmail.com

فصل هشتم



منحنی‌های مختلفی از عملکرد آپ‌امپ ارائه می‌شود. در جداول آپ‌امپ‌ها مقادیر مجاز، حداقل و همچنین حدود مجاز ولتاژ تغذیه، حداقل و ولتاژ وجه مشترک ورودی، بهره حلقه باز، مقاومت ورودی تفاضلی، مقاومت ورودی وجه مشترک، مقاومت خروجی، نویز ولتاژی و نویز جریانی، جریان‌های بایاس ورودی و جریان‌های افست و ولتاژ‌های افست، تغییرات دمایی پارامترهای مختلف، پهنای باند، حداقل سوئینگ متقارن خروجی به ازای ولتاژ تغذیه معین و منحنی‌هایی از قبیل پاسخ بهره بر حسب فرکانس و پاسخ CMRR بر حسب فرکانس و بسیاری دیگر از اطلاعات مورد نیاز درج می‌شود تا کاربر بتواند بر حسب نوع مدار مورد نظر، آپ‌امپ مناسب را انتخاب کند. آپ‌امپ‌ها در بسته‌های مختلفی ارائه می‌شوند تا بر حسب نوع کار و مکان نصب به کار گرفته شوند. برای استفاده از آپ‌امپ باید به یادداشت‌های کاربردی سازنده قطعه (Application Notes) توجه کرد تا بهترین روش استفاده از قطعه مورد نظر به کار گرفته شود. اگر آپ‌امپ بدون فیدبک استفاده شود، در این صورت به صورت مقایسه‌کننده عمل می‌کند.

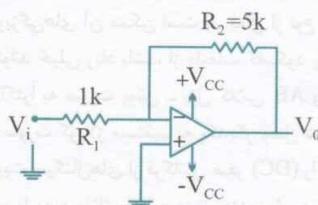
قاعده‌ای استفاده از مدارهای مجتمع تحت عنوان مقایسه‌کننده (Comparator) در موارد حلقه باز ترجیح داده می‌شود؛ زیرا مقایسه‌کننده‌های ساخته شده نوعی آپ‌امپ با بهره حلقه باز زیادی هستند که دارای جریان سازی داخلی نیستند و طبقه خروجی آن‌ها هم به صورت پوش - پول یا کلاس A نیست، بلکه غالباً طبقه خروجی به صورت کلکتور باز (Open-Collector) است. می‌شود تا کاربر بتواند خروجی را بر حسب مدارهای TTL یا CMOS با ولتاژ تغذیه مناسب مجهز کند. مقایسه‌کننده را می‌توان به عنوان یک مدار مبدل آنالوگ به دیجیتال یکپیتی مورد توجه قرار داد. مقایسه‌کننده‌ها را می‌توان در حلقه فیدبک مثبت داد و برای آن‌ها پسماند (هیسترزیس) مناسب طرح کرد.

در زیر تعداد محدودی از کاربردهای آپ‌امپ‌ها برای روشن شدن ذهن خواننده بیان می‌شود. تقویت‌کننده وارونگر، تقویت‌کننده ناوارونگر، مخلوط‌کننده موج‌ها، جمع‌کننده چند سیگنال، تقویت‌کننده ابزار دقیق، استفاده از آپ‌امپ در مبدل‌های دیجیتال به آنالوگ و یا مدارهای آنالوگ به دیجیتال، فیلترهای فعال، انترگال‌گیری و مشتق‌گیری، منابع جریان، مدارهای جذر‌گیر، مدارهای ایجاد ولتاژ مؤثر واقعی، مدارهای توان، ضرب‌کننده‌های آنالوگ، نوسان‌سازها، پردازشگرهای آنالوگ، یکسوکننده‌های دقیق، اختلاف فازدهنده‌ها، اندازه‌گیر جریان و ولتاژ، ایجاد امیدانس منفی، پرش‌دهنده‌ها، تغییر سطوح، حلقه‌های AGC، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ، مدارهای PWM و ...

## ۲-۸ برسی و حل تعدادی از مسایل مربوط به آپ‌امپ‌ها

در حل مسایل مربوط به تقویت‌کننده‌های عملیاتی، عموماً آپ‌امپ‌ها به صورت ایده‌آل در نظر گرفته می‌شوند. حالت ایده‌آل یعنی بهره خیلی زیاد و مقاومت ورودی خیلی بزرگ و مقاومت خروجی خیلی کوچک. در مواردی که ولتاژ‌های افست و یا پاسخ فرکانسی و یا مسایل نویز مطرح می‌شوند باید اطلاعات مربوط به تقویت‌کننده عملیاتی مورد نظر به کار گرفته شوند. در حل مسایل زیر سعی می‌شود موارد واقعی تقویت‌کننده‌های عملیاتی بعد از حل هر مثال توضیح داده شود.

**مثال ۱:** در مدار شکل (۱-۸) جریان بایاس ورودی آپ‌امپ به کار گرفته 500 نانوآمپر است، در حالی که  $V_i = 0$  است، ولتاژ خروجی با تغذیه متقارن  $V_{CC} \pm V_{CC}$  چقدر خواهد شد؟



شکل ۱-۸

**حل:** در همه مسایل این بخش، ولتاژ پایه منفی،  $(-)V$  و ولتاژ پایه مثبت،  $(+)V$  نشان داده می‌شود. ولتاژ خروجی با ولتاژ پایه منفی ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارد. اگر به سبب دامنه ورودی و مقدار ولتاژ تغذیه اشباعی رخ ندهد، می‌توان  $(+)V$  و  $(-)V$  را

همان‌گونه که در مباحث فیدبک گفته شد برابر یکدیگر قرار داد. در بحث فیدبک داشتیم  $X_e = X_i \frac{1}{1+AB}$ ؛ یعنی اگر خیلی بزرگ باشد،  $(-) - V_{(+) -} = V_o$  به سمت صفر می‌پیدا می‌کند و یا به عبارتی بین این دو قطب اتصال کوتاه مجازی قابل تصور است. KCL در گره قطب منفی عبارت است از:

$$\frac{V_{(-)} - V_i}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_2} + I_B = 0$$

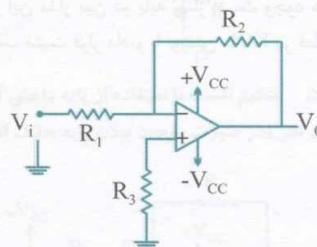
لازم به ذکر است که جریان بایاس ورودی می‌تواند علامت مثبت یا منفی داشته باشد؛ زیرا علامت آن بر حسب نوع ترانزیستور ورودی است.

اگر  $V_i = 0$  باشد، پس داریم:

$$\frac{0 - 0}{R_1} + \frac{0 - V_o}{R_2} + 0.5 \text{ mA} = 0$$

$$V_o = \pm 2.5 \text{ mV}$$

در این صورت به سبب وجود جریان بایاس ورودی ولتاژ خروجی صفر نیست. این مقدار ولتاژ افست در خروجی به سبب جریان بایاس ایجاد شده است.



شکل ۲-۸

**مثال ۲:** در مدار شکل (۲-۸) به ازای چه مقدار مقاومت  $R_3$ ، افست خروجی به سبب جریان بایاس ورودی آپ-امپ صفر ولت می‌شود؟

حل: در قطب منفی KCL نوشته می‌شود، جریان بایاس مربوط به قطب مثبت و منفی را باید هم‌جهت اختیاب کرد. این جریان بایاس را به سمت قطبها و یا به سمت خارج قطبها منظور کنید.

$I_B$ : جریان بایاس ورودی است که به سمت قطبها منظور شده‌اند.

$$V_{(+)} = -R_3(I_B)$$

$$V_{(-)} = V_{(+)}$$

$$\frac{V_{(-)} - 0}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_2} + I_B = 0$$

$$\frac{-R_3(I_B) - 0}{R_1} + \frac{-R_3(I_B)}{R_2} - \frac{V_o}{R_2} + I_B = 0$$

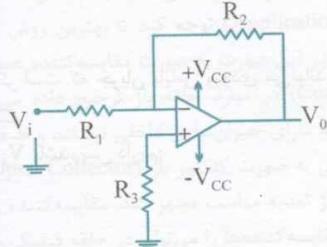
برای آنکه  $V_o = 0$  شود، داریم:

$$\frac{-R_3}{R_1} - \frac{R_3}{R_2} + 1 = 0$$

$$R_3 = R_1 \parallel R_2$$

مشاهده می‌شود اگر مقاومتی به اندازه  $R_1 \parallel R_2$  در پایه مثبت وصل شود، آن‌گاه جریان بایاس، ولتاژ افست در خروجی ایجاد نمی‌کند. این موضع در کاربرد تقویت‌کننده‌های عملیاتی که جریان بایاس بزرگی دارند، رعایت می‌شود.

هرگاه  $R_1 = 1k\Omega$  و  $R_2 = 4k\Omega$  باشد، وصل مقاومت  $R_3 = 0.8k\Omega$ ، افست را در خروجی به سبب جریان بایاس حذف خواهد کرد. اگر  $R_3$  مقدار دیگری داشته باشد، نوشتن KCL در گره (–) نشان‌دهنده ولتاژ افست در خروجی خواهد بود. لازم به ذکر است در تقویت‌کننده‌های آپامپ که با کوپل‌لار خازنی به کار می‌روند، غالباً احتیاجی به حذف افست خروجی نیست.



شکل ۳-۸

**مثال ۳:** در مدار شکل (۳-۸)، ولتاژ افست ورودی حداقل ۱۰ میلیولت در آپامپ مورد نظر است. ولتاژ افست در خروجی با تغذیه متقارن چقدر خواهد شد؟ جریان بایاس ورودی را صفر در نظر بگیرید. ( $R_1 = R_2$ )

**حل:** در این مدار بین دو پایه ولتاژ افست وجود دارد. می‌توان این ولتاژ افست را بدون توجه به پلاریته در یکی از قطب‌ها مثلاً قطب مثبت قرار داد و با نوشتن KCL در قطب منفی مقدار ولتاژ افست را به دست آورد:

$$V_{(+)} = 10\text{mV}$$

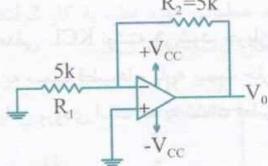
$$V_{(+)} = V_{(-)}$$

$$\frac{10\text{mV}}{R_1} + \frac{10\text{mV} - V_o}{R_2} = 0$$

$$V_o = 20\text{mV}$$

ولتاژ افست خروجی می‌تواند به اضافه یا منهای ۲۰ میلیولت باشد.

**مثال ۴:** در مدار شکل (۴-۸) اگر حداقل ولتاژ افست ورودی در آپامپ به کارفته ۱ میلیولت و حداقل جریان افست ورودی ۵۰ نانوآمپر فرض شود، مقدار ولتاژ افست در خروجی با تغذیه متقارن چقدر است؟



شکل ۴-۸

**حل:** تفاوت بین جریان‌های بایاس دو قطب ورودی آپامپ را جریان افست ورودی می‌نامند و در برگه مشخصات داده می‌شود:

$$I_{\text{offset}} = I_{B_1} - I_{B_2} \quad (\text{جریان افست ورودی})$$

مقاومت  $R_3 = R_1 \parallel R_2$ ، افست ناشی از جریان بایاس را حذف می‌کند، بنابراین می‌توان در نوشتن KCL در قطب منفی جریان پایه (+) را صفر و جریان پایه (–) را جریان افست قرار داد:

$$V_o = 1\text{mV} \left( \pm \frac{R_2}{R_1} \right) \pm R_2 (I_{\text{off}}) = \pm 1\text{mV} \pm 0.25\text{mV}$$

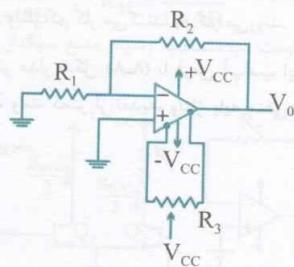
$$V_o = \begin{cases} \pm 1.25 \text{ mV} \\ \pm 0.75 \text{ mV} \end{cases}$$

ولتاژ افست ورودی و جریان افست ورودی آپ‌امپ‌ها تابع دما است. مثلاً در نوعی آپ‌امپ این مقادیر در جدول قطعه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\text{Input offset Voltage Drift} = 10 \frac{\mu\text{V}}{^{\circ}\text{C}}$$

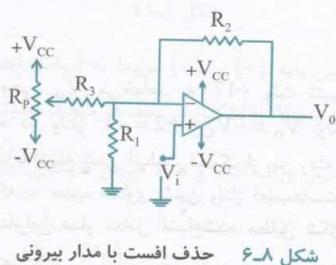
$$\text{Input offset Current Drift} = 1 \frac{\text{pA}}{^{\circ}\text{C}}$$

برای از بین بردن افست خروجی ناشی از تغییرات دما از مدارهای جبران‌ساز، با روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که موضوع این درس نیست.



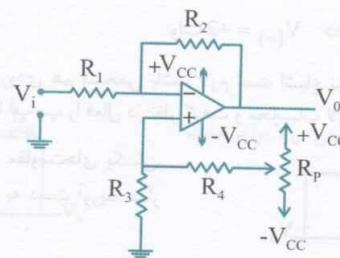
شکل ۵-۸ تنظیم افست با استفاده از پایه داخلی آپ‌امپ مورد نظر (در صورت موجود بودن پایه حذف افست)

برای از بین بردن ولتاژ افست خروجی و یا تنظیم آن به مقدار مورد نظر (در صورت نیاز) از دو روش می‌توان استفاده کرد. روش اول استفاده از پایه افست یا پایه Null در آپ‌امپ مورد نظر است، در صورتی که این پایه‌ها موجود باشند، به شکل (۵-۸) توجه کنید. آپ‌امپ به کاررفته دو پایه افست دارد. در این طرح با توجه به یادداشت سازنده می‌توان پتانسیومتر وصل شده بین این دو پایه را چنان تنظیم کرد تا ولتاژ افست خروجی صفر و یا عدد مناسبی بشود.



شکل ۶-۸ حذف افست با مدار بیرونی

با توجه به یادداشت سازنده ممکن است ولتاژ تعذیه مثبت یا منفی به سر وسط پتانسیومتر اعمال شود. در صورت موجود بودن این پایه‌ها، به نام پایه offset یا پایه Null یا پایه Balance معرفی می‌شوند. روش دوم حذف افست، اعمال ولتاژ قابل تنظیم به پایه مثبت و یا به پایه منفی است. به شکل‌های (۶-۸) و (۷-۸) برای حذف افست در دو مورد توجه کنید.



شکل ۷-۸ حذف افست با مدار بیرونی

در شکل (۷-۸) که موج به پایه منفی اعمال می‌شود (تقویت‌کننده وارونگر)، می‌توان با تنظیم  $R_p$  ولتاژ DC در خروجی را وقتی  $V_i = 0$  است، به مقدار دلخواه تنظیم کرد، برای حذف افست، مقادیر متعارف مقاومت‌ها عبارت‌اند از:

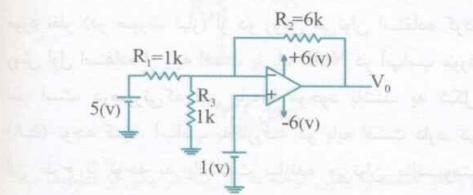
$$R_3 = 100\Omega, R_p = 50k\Omega, R_4 = 50k\Omega$$

در شکل (۶-۸) که موج ورودی به پایه مثبت داده می‌شود (تقویت‌کننده مستقیم)، می‌توان با تنظیم  $R_p$  ولتاژ افست در خروجی را وقتی  $V_i = 0$  است تنظیم کرد. مقادیر متعارف مقاومت‌ها عبارت‌اند از:

$$R_3 = 100k\Omega, R_p = 50k\Omega$$

در برخی از یادداشت‌های سازنده مقادیر مقاومت‌های مناسب برای حذف افست اطلاع داده می‌شوند. حداکثر ولتاژ سوئینگ خروجی آپامپ‌ها به ازای ولتاژ تغذیه معین در برگه مشخصات و همچنین به وسیله منحنی ارائه می‌شود. در بسیاری از آپامپ‌ها ولتاژ اشباع اشباع حوالی ۲ ولت کمتر از ولتاژ تغذیه پیش‌بینی می‌شود. در برخی از آپامپ‌ها که تحت عنوان Rail-To-Rail هستند ولتاژ اشباع چند دهم ولت کمتر از ولتاژ تغذیه است. این آپامپ‌ها عموماً برای استفاده در دستگاه‌هایی که با باتری ولتاژ کم کار می‌کنند، به کار می‌روند.

**مثال ۵:** در مدار شکل (۸-۸) با فرض آپامپ ایده‌آل و ولتاژ اشباع ۲ ولت کمتر از تغذیه، ولتاژ پایه منفی (-)  $V_o$  را به دست آورید.

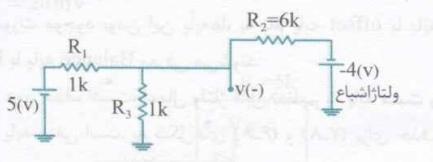


شکل ۸-۸

**حل:** با فرض آپامپ فعال با نوشتن KCL در قطب منفی،  $V_o$  به دست می‌آید:

$$V_o(-) = V_o(+) = 1V$$

$$\frac{1-0}{R_3} + \frac{1-5}{R_1} + \frac{1-V_o}{R_2} = 0 \Rightarrow V_o = -17V$$

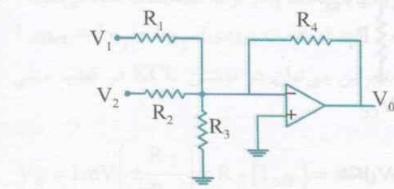


شکل ۹-۸ حالت اشباع مدار

ولتاژ خروجی  $V_o$  می‌خواهد به  $-17$  ولت ثابت شود، در حالی که در ولتاژ  $-4 = -V_{CC} + 2$  ولت اشباع شده است. با اشباع شدن آپامپ فیدبک از بین رفته و ارتباط فیدبکی که به سبب مساوی شدن ولتاژ قطب‌هاست، از بین می‌رود؛ بنابراین مدار معادل اشباع شده مطابق شکل (۹-۸) قابل بررسی است.

$$\frac{V_o(-)}{R_3} + \frac{V_o(-) - 5}{R_1} + \frac{V_o(-) + 4}{R_2} = 0 \Rightarrow V_o(-) = +2$$

اگر ولتاژ تغذیه معلوم و دامنه سیگنال ورودی هم مشخص باشد، لازم است اشباع نبودن مدار تأیید شود. در صورتی که یکی از عوامل گفته شده ذکر نشود می‌توان مدار با آپامپ را فعال در نظر گرفت و محاسبات لازم را انجام داد.



شکل ۱۰-۸

**مثال ۶:** در مدار شکل (۱۰-۸) با فرض مقاومت‌های یکسان، ولتاژ خروجی را برحسب  $V_1$  و  $V_2$  به دست آورید. مدار جمع‌کننده وارونگر است.

حل: تقویت کننده به صورت وارونگر وصل شده است. فیدبک از نوع ولتاژ - موازی است. چون  $AB$  بسیار بزرگ است، بنابراین

$$\frac{1}{B} \text{ جواب مدار است:}$$

$$V_{(-)} = V_{(+)} = 0$$

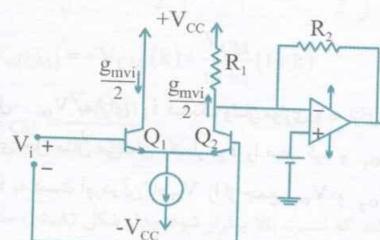
$$\text{KCL} \Rightarrow \frac{0-0}{R_3} + \frac{0-V_1}{R_1} + \frac{0-V_2}{R_2} + \frac{0-V_o}{R_4} = 0$$

$$V_o = -(V_1 + V_2)$$

در مدار شکل (۱۰-۸) که فیدبک ولتاژ - موازی است، با فرض آپامپ ایده‌آل انتظار می‌رود که مقاومت خروجی به سمت صفر و همچنین مقاومت دیده‌شده، از گره منفی هم صفر باشد، زیرا:

$$R_{\text{of}} = \frac{R_o}{1+AB}, \quad R_{\text{if}} = \frac{R_i}{1+AB}$$

در این صورت مقاومت دیده‌شده به وسیله منبع سیگنال  $V_1$  برابر  $R$  و مقاومت دیده‌شده به وسیله منبع سیگنال  $V_2$  برابر  $R_2$  است.



شکل ۱۱-۸

مثال ۷: در مدار شکل (۱۱-۸) مدار در ناحیه فعال بایاس

$$\text{شده است. بهره } \frac{V_o}{V_i} \text{ را حساب کنید.}$$

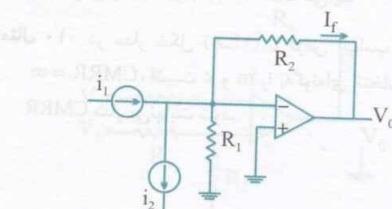
حل: سیگنال خروجی ترانزیستور  $Q_2$  برابر با  $\frac{g_m V_i}{2}$  است. از آنجاکه بین پایه (+) و (-) مربوط به آپامپ اتصال کوتاه مجازی است، این جریان به  $R_1$  نمی‌رود بلکه از  $R_2$  جاری می‌شود و  $V_o$  را تشکیل می‌دهد. در مبحث فیدبک داشتیم

$$X_f = X_i \frac{AB}{1+AB}$$

صورت جریان فیدبک از  $R_2$  می‌گذرد:

$$V_o = -R_2 \left( g_m \frac{V_i}{2} \right)$$

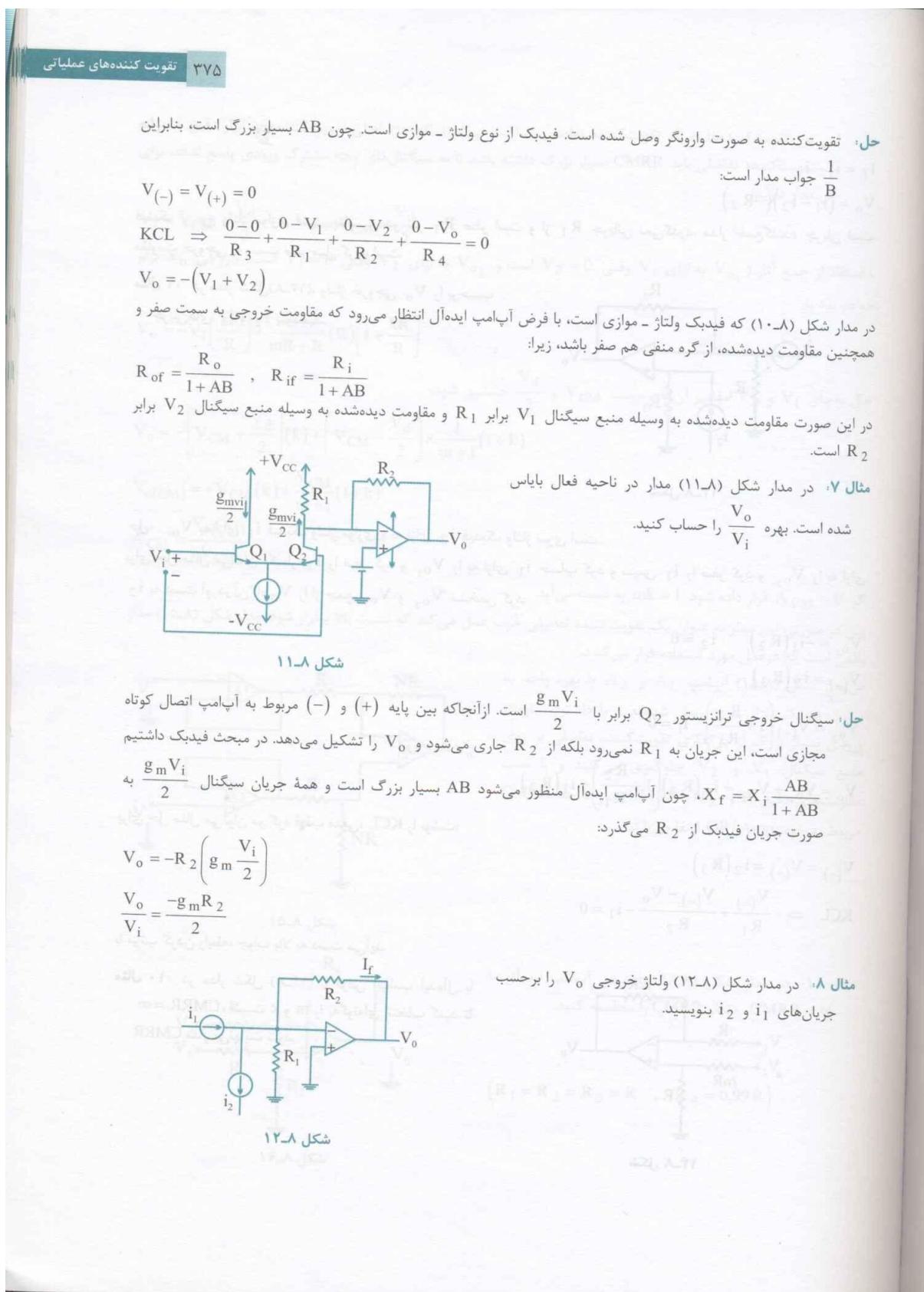
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-g_m R_2}{2}$$



شکل ۱۲-۸

مثال ۸: در مدار شکل (۱۲-۸) ولتاژ خروجی  $V_o$  را بمحاسبه

جریان‌های  $i_1$  و  $i_2$  بنویسید.



حل:

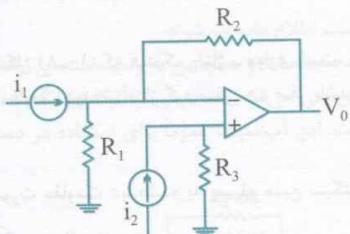
$$I_f = i_1 - i_2$$

$$V_o = (i_1 - i_2)(-R_2)$$

فیدبک از نوع ولتاژ موازی است. پتانسیل دو سر  $R_1$  صفر است و از  $R$  جریانی نمی‌گذرد. مدار جمع‌کننده جریان است. مقاومت خروجی به سمت صفر میل کرده است.

**مثال ۹:** در مدار شکل (۱۳-۸)، ولتاژ خروجی  $V_o$  را برحسب

جریان‌های  $i_1$  و  $i_2$  بنویسید.



شکل ۱۳-۸

حل:  $V_o$  به ازای  $i_1$  فیدبک ولتاژ موازی و به ازای  $i_2$  فیدبک ولتاژ سری است.

برای حل مثال می‌توان یکبار  $i_2$  را صفر کرد و  $V_{o_1}$  را به ازای  $i_1$  حساب کرد و سپس  $i_1$  را صفر کرد و  $V_{o_2}$  را به ازای  $i_2$  به دست آورد، آن‌گاه  $V_o$  را از جمع  $V_{o_1}$  و  $V_{o_2}$  مشخص کرد:

$$V_{o_1} = -i_1(R_2) \quad i_2 = 0$$

$$V_{(+)} = i_2(R_3)$$

$$V_{o_2} = V_{(+)} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad I_1 = 0$$

$$V_o = V_{o_1} + V_{o_2} = i_2(R_3) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - i_1(R_2)$$

برای حل مثال می‌توان در گره قطب منفی، KCL را نوشت:

$$V_{(-)} = V_{(+)} = i_2(R_3)$$

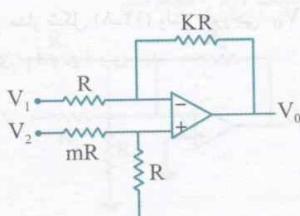
$$\text{KCL} \Rightarrow \frac{V_{(-)} - V_o}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_2} - i_1 = 0$$

با مرتب کردن رابطه، جواب بالا به دست می‌آید.

**مثال ۱۰:** در مدار شکل (۱۴-۸) با فرض آپ‌امپ ایده‌آل با

نسبت  $k$  و  $m$  را به گونه‌ای انتخاب کنید تا

CMRR مدار بینهایت شود.



شکل ۱۴-۸

**حل:** این نوع تقویت کننده‌ها به نام تقویت کننده تفاضلی شناخته می‌شوند که جزء اصلی تقویت کننده‌های ابزار دقیق هستند. یک تقویت کننده تفاضلی باید CMRR بسیار بزرگ داشته باشد تا به سیگنال‌های وجه مشترک ورودی پاسخ ندهد. برای

حل مدار داریم:

$$V_1 = V_{CM} + \frac{V_d}{2}, \quad V_2 = V_{CM} - \frac{V_d}{2}$$

با استفاده از جمع آثار ( $V_{o_1}$ ) به ازای  $V_1$  وقتی  $V_2 = 0$  است و  $V_{o_2}$  به ازای  $V_2$  وقتی  $V_1 = 0$  است) خروجی  $V_o$  برابر

خواهد بود با:

$$V_o = -V_1 \left( \frac{kR}{R} \right) + \frac{V_2}{mR + R} \left( R \left[ 1 + \frac{kR}{R} \right] \right)$$

حال به جای  $V_1$  و  $V_2$  مقادیر آنها بر حسب  $V_{CM}$  و  $\frac{V_d}{2}$  جانشین شود:

$$V_o = -\left[ V_{CM} + \frac{V_d}{2} \right] \left( k \right) + \left( V_{CM} - \frac{V_d}{2} \right) \times \frac{1}{m+1} \left( 1+k \right)$$

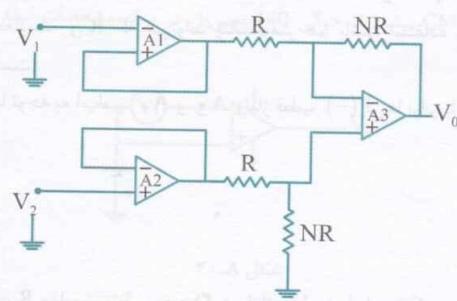
$$V_{o(CM)} = -V_{CM} \left( k \right) + \frac{V_{CM}}{m+1} \left( 1+k \right)$$

$$A_{CM} = \frac{V_{o(CM)}}{V_{CM}}$$

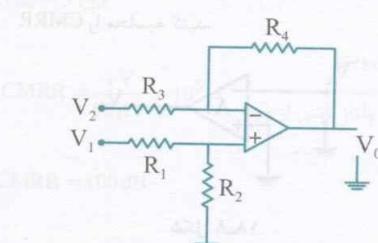
اگر  $A_{CM} = 0$  قرار داده شود  $mk = 1$  به دست می‌آید.

پس در صورتی این مدار به عنوان یک تقویت کننده تفاضلی خوب عمل می‌کند که نسبت بالا برقرار شود. مدار شکل (۱۵-۸) مدار واقعی است که در عمل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مدار شکل (۱۵-۸) آپامپ  $A_1$  و  $A_2$  با بهره واحد به صورت فیدبک ولتاژ سری وصل شده‌اند و با داشتن مقاومت ورودی بسیار بزرگ از بارگذاری تقویت کننده تفاضلی بر روی منبع سیگنال  $V_1$  و  $V_2$  جلوگیری می‌کنند و با نصب مقاومت‌های دقیق  $R$  و  $N_R$  مدار تا حد CMRR مربوط به خود OP/Amp ارتقا می‌یابد.



شکل ۱۵-۸



شکل ۱۶-۸

**مثال ۱۱:** در مدار شکل (۱۶-۸) با فرض آپامپ ایده‌آل با CMRR  $\infty$ ، مقدار CMRR را محاسبه کنید.

$$(R_1 = R_2 = R_3 = R, \quad R_4 = 0.99 R)$$

حل: با توجه به مثال ۱۰ داریم:

$$V_o = \left( -\frac{R_4}{R_3} \right) V_2 + \frac{V_1}{R_1 + R_2} \cdot R_2 \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right)$$

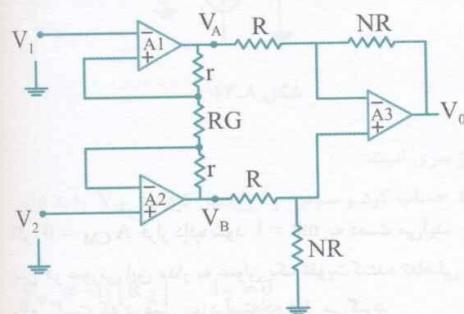
$$V_o = 0.95 V_1 - 0.99 V_2$$

$$V_1 = V_{CM} - \frac{V_d}{2}, \quad V_2 = V_{CM} + \frac{V_d}{2}$$

$$V_o = 0.005 V_{CM} - 0.9925 V_d$$

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{CM}} = \frac{0.9925}{0.005} = 198.5$$

$$CMRR_{dB} = 20 \log 198.5 = 45.9 \text{ dB}$$



شکل ۱۷.۸ تقویت‌کننده ابزار دقیق

در این مثال متوجه دقت انتخاب مقاومتها شده‌اید. کافی است مقاومتها با دقت بسیار زیادی نصب نشده باشند. آن‌گاه به شدت کم خواهد شد. در مدارات مجتمع ساخته شده با عنوان تقویت‌کننده ابزار دقیق، اعمال مقاومتها بسیار دقیق در اطراف، آپامپ خوبی است که خود CMRR بزرگی دارد. به مدار تقویت‌کننده ابزار دقیق شکل (۱۷.۸) توجه کنید. از آپامپ‌های A<sub>1</sub> و A<sub>2</sub> به منظور بافر کردن منابع سیگنال V<sub>1</sub> و V<sub>2</sub>

استفاده شده است. برای توانایی تغییر بهره  $\frac{V_o}{V_1 - V_2}$  از مقاومت R<sub>G</sub> که می‌تواند پتانسیومتر هم باشد، استفاده شده است.

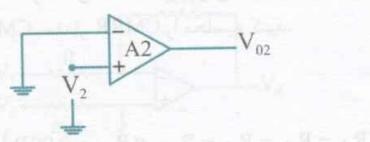
با توجه به آپامپ A<sub>1</sub> و A<sub>2</sub> ولتاژ قطب (- آن‌ها برابر با V<sub>1</sub> و V<sub>2</sub> است. درنتیجه داریم:

$$\frac{V_A - V_1}{r} = \frac{V_1 - V_2}{R_G} = \frac{V_2 - V_B}{r}$$

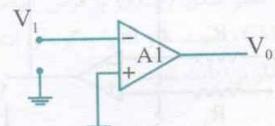
$$V_o = (V_2 - V_1) \left( \frac{N_R}{R} \right) \left( 1 + \frac{2r}{R_G} \right)$$

R<sub>G</sub> مقاومت تنظیم بهره (گین ولتاژی) است. از این ترکیب به صورت بسته مدار مجتمع آماده ساخته می‌شود.

**مثال ۱۲:** در یک آپامپ مطابق شکل (۱۸.۸) و (۱۹.۸) بهره نسبت به پایه وارونگر، A<sub>1</sub> و نسبت پایه تاوارونگر، A<sub>2</sub> است. CMRR را محاسبه کنید.



شکل ۱۹.۸



شکل ۱۸.۸

حل:

$$A_1 = \frac{V_{o1}}{V_1}$$

$$A_2 = \frac{V_{o2}}{V_2}$$

$$V_{o1} = -A_1 \left( V_{CM} + \frac{V_d}{2} \right)$$

$$V_{o2} = A_2 \left( V_{CM} - \frac{V_d}{2} \right)$$

وقتی  $V_1$  و  $V_2$  به آپامپ وصل شوند  $V_o$  برابر است با:

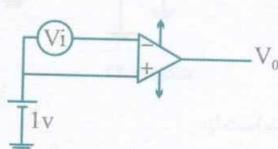
$$V_o = V_{CM} (A_2 - A_1) - V_d \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right)$$

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_{CM}} \right| = \frac{A_1 + A_2}{2(A_1 - A_2)}$$

در مثال (۱۱) فرض کنید  $A_1 = 99999$  و  $A_2 = 9990$  هستند، در این صورت آپامپ برابر است با:

$$CMRR = \left| \frac{A_1 + A_2}{2(A_1 + A_2)} \right| = 11110 \Rightarrow CMRR_{dB} = 80.9 \text{ dB}$$

با توجه به مثال (۱۲)، آپامپ‌ها وضعیت کاملاً متقارن در ورودی ندارند و به همین دلیل است که بهره هر آپامپ نسبت به دو پایه ورودی مساوی نیست و همین عدم طبیعی ترانزیستورهای ورودی آپامپ‌ها و ایدهآل نبودن منابع جریان آن‌ها سبب کاهش CMRR آپامپ‌ها می‌شود. نگارنده تا به حال، آپامپ‌هایی با بیشتر از حوالی ۱۴۰ دسیبل در برگه مشخصات انواع ساخته شده مشاهده نکرده است.



شکل ۲۰-۸

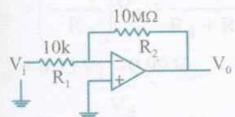
**مثال ۱۳:** مطابق شکل (۲۰-۸) به پایه‌های (+) و (-) یک آپامپ ولتاژ +1 ولت اعمال شده است، در حالی که  $V_i = 0$  است. در خروجی آپامپ با تغذیه متقارن، ولتاژ  $V_o$  افست ایجاد شده است. برای حذف این ولتاژ افست،  $V_i$  اضافه شده است، تا جایی که افست خروجی صفر ولت شده است، در این حالت  $V_i = 10$  میکروولت است. آپامپ را به دست آورید.

$$V_{od} = V_{CM}$$

$$CMRR = \frac{1V}{10\mu V} = 10^5 = \frac{\text{ولتاژ مشترک ورودی}}{\text{ولتاژ تفاضلی ورودی برای همان ولتاژ ناشی از وجه مشترک}} = \frac{\frac{V_{od}}{V_{id}}}{\frac{V_{oCM}}{V_{iCM}}} = \frac{V_{iCM}}{V_{id}}$$

$$CMRR = 100 \text{ dB}$$

**مثال ۱۴:** در مدار شکل (۲۱-۸) بهره ولتاژ  $\frac{V_o}{V_i}$  را به دست آورید.



$$\text{آپامپ ایدهآل نیست} \Rightarrow (A_V = 10^3, R_{id} = \infty, R_o = 0)$$

شکل ۲۱-۸

**حل:** چون آپامپ بهره محدود دارد، بنابراین داریم:

$$[V_{(-)} - V_{(+)}]A_V = -10^3 \Rightarrow V_{(-)} = -\frac{V_o}{1000}$$

$$(KCL) \frac{V_{(-)} - V_i}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_2} = 0$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -500$$

در مثال (۱۴) دیده می‌شود که بهره ولتاژی را نمی‌توان بر حسب مدار ایدهآل منظور کرد، در حالت ایدهآل  $\infty$  است و

$$\text{به عنوان جواب مسئله است. اگر آپامپ ایدهآل بود، درنتیجه } A_V = \frac{V_o}{V_i} = -1000 = -\frac{1}{B} \text{ حاصل می‌شد. در مثال (۱۴) اگر}$$

$V_i = 2 \text{ mV}$  باشد، در این صورت  $V_o = 1 \text{ V}$  است و ولتاژ قطب منفی برابر است با:

$$V_{(-)} = \frac{1 \text{ V}}{10^3} = 1 \text{ mV}$$

با استفاده از قضیه میلر مشاهده می‌شود که مقاومت مؤثر  $R_2$  در ورودی برابر است با:

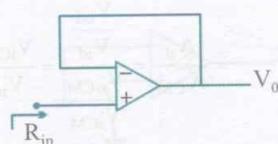
$$R_2(\text{مؤثر}) = \frac{10 \text{ M}}{1 - A_V} = 10 \text{ k}\Omega$$

بنابراین داریم:

$$V_{(-)} = \left( \frac{V_i}{R_1 + R_2(\text{مؤثر})} \right) (R_2(\text{مؤثر})) = 1 \text{ mV}$$

از این رو در کاربرد واقعی مدارهای آپامپ اگر AB بزرگ نباشد، تفکر  $V_{(+)} = V_{(-)}$  ممکن است خطای زیادی در محاسبات به وجود بیاورد.

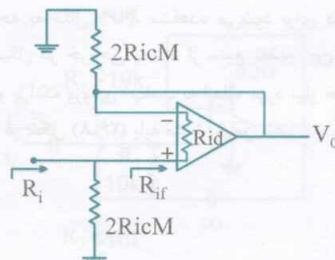
**مثال ۱۵:** در تقویت‌کننده شکل (۲۲-۸) مقاومت ورودی  $i_R$  را به دست آورید.



مشخصات

$$(A_V = 10^6, R_{id} = 1 \text{ M}\Omega, R_{i_{CM}} = 50 \text{ M}\Omega) \text{ آپامپ}$$

شکل ۲۲-۸



شکل ۲۴-۸

حل: این مدار به صورت فیدبک ولتاژ سری است. مدار معادل آن با منظور کردن  $R_{i_{CM}}$  مانند شکل (۲۴-۷) است.

در کاربرد تقویت کننده های عملیاتی به صورت تقویت کننده مستقیم انتظار نمی رود که مقاومت ورودی با فیدبک وصل شده به اندازه  $R_{id}(1+AB)$  باشد؛ زیرا مقاومت ورودی وجه مشترک یک عضو تعیین کننده مقاومت ورودی کل تلقی می شود. اگر بهره حلقه باز بسیار بزرگ باشد، مقاومت ورودی وجه مشترک گویای مقاومت ورودی کل مدار تلقی می شود:

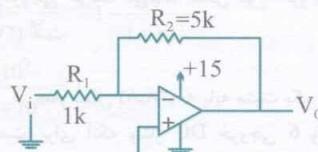
$$R_i = 2R_{i_{CM}} \parallel R_{if}$$

$$R_{if} = R_{id}(1+AB)$$

$$AB = 10^6 \times 1 = 10^6$$

$$R_{if} = 10^{12} \Omega$$

$$R_i = 100 M\Omega \parallel 10^{12} \Omega = 100 M\Omega$$



شکل ۲۴-۹

مثال ۱۶: در مدار شکل (۲۴-۸) که آپ‌امپ با یک تغذیه کار می‌کند، شکل موج خروجی را به ازای ورودی  $V_i = 1V \sin \omega t$  رسم کنید.

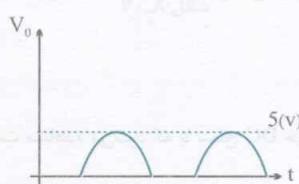
حل: بهره عمومی مدار که به صورت تقویت کننده وارونگر وصل شده است، عبارت است از:

$$V_{(-)} = V_{(+)} = 0$$

$$I_{(R_1)} = \frac{V_i - 0}{1k} \Rightarrow V_o = (I_{R1})(-R_2) \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} = -5$$

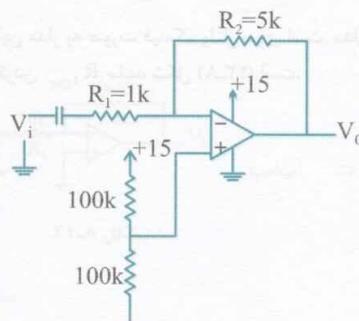
به ازای  $V_i = 0$  در گره قطب منفی نشان دهنده  $V_o = 0V_{DC}$  است. به ازای نیمسیکل منفی ورودی در قله موج داریم:

$$V_o = -1 \left( \frac{V_o}{V_i} \right) = +5V$$



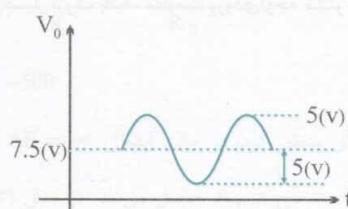
شکل ۲۵-۸

به ازای نیمسیکل مثبت ورودی، خروجی باید منفی شود؛ چون ولتاژ تغذیه منفی وجود ندارد، بنابراین سیکل‌های منفی در خروجی وجود نخواهند داشت و خروجی به صورت شکل (۲۵-۸) دیده خواهد شد:



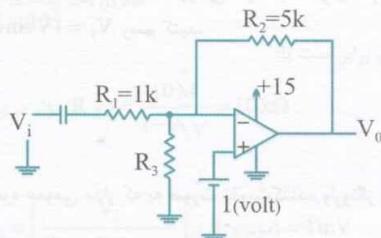
شکل ۲۶-۸

با توجه به مثال (۱۶)، مشاهده می‌شود برای داشتن هر دو نیم‌سیکل در خروجی یا باید از منبع تغذیه  $\pm V_{CC}$  استفاده کرد و یا آنکه ورودی آپامپ به اندازه مورد نیاز خروجی بایاس شود. در شکل (۲۶-۸) پایه مثبت بایاس شده است:



شکل ۲۷-۸

از خازن کوپلرز در ورودی استفاده می‌شود تا ولتاژ DC مشکلی برای منبع سینکنال ایجاد نکند. ولتاژ قطب مثبت مدار شکل (۲۶-۸) برابر با ۷.۵ ولت است که با فیدبک وصل شده، ولتاژ قطب منفی هم ۷.۵ ولت می‌شود، درنتیجه ولتاژ DC خروجی هم ۷.۵ ولت است. اگر  $V_i = 1\sin \omega t$  ولت باشد، خروجی معکوس ورودی با دامنه ۵ ولت سینوسی است که حول ولتاژ ۷.۵ ولت خروجی حرکت می‌کند. شکل موج خروجی مطابق شکل (۳۷-۸) است:



شکل ۲۸-۸

**مثال ۱۷:** در مدار شکل (۳۸-۸) به پایه مثبت یک ولت وصل شده است. برای آنکه ولتاژ DC خروجی ۶ ولت باشد، مقاومت  $R_3$  را تعیین کنید.

$$V_i = 1\sin \omega t \text{ ولت}$$

$$V_{(+)} = 1V, \quad V_{(-)} = 1V$$

در گره قطب منفی KCL نوشته شود، در حالی که  $V$  برابر با ۶ ولت منظور می‌شود:

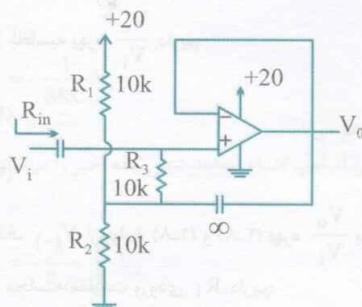
$$\frac{1}{R_3} + \frac{1-6}{R_2} = 0$$

$$R_3 = 1k\Omega$$

در این حالت مشاهده می‌شود که با سطح DC خروجی برابر با ۶ ولت، سینکنال خروجی با دامنه  $\pm 5$  ولت بدون بریدگی ایجاد شده است.

تقویت کننده های عملیاتی

۳۸۳



شکل ۲۹-۸

**مثال ۱۸:** در تقویت کننده شکل (۲۹-۸) که به صورت مستقیم (فیدبک ولتاژ سری) وصل شده است و تغذیه ۲۰ ولت به کار رفته است، مقاومت ورودی  $R_{in}$  را به دست آورید. مشخصات آپامپ به شرح زیر فرض شود:

$$(A_V = 10^3, R_{id} = \infty, R_{i_{CM}} = \infty, R_o = 0)$$

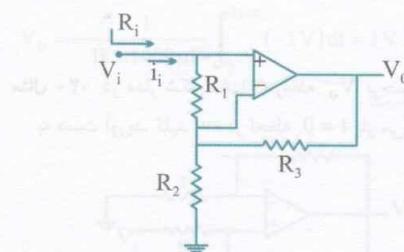
**حل:** هرگاه ولتاژ ۱۰ ولت به صورت مقسم معمولی ولتاژ به پایه (+) داده شود، خروجی دارای سطح DC برابر با ۱۰ ولت می شود. ولی مقاومت ورودی تقریباً برابر با  $R_{in} = R_1 \parallel R_2 = 5\text{k}$  است. هرگاه مقاومت ورودی زیادی مورد نظر باشد، از مقاومت  $R_3$  و خازن که ترکیب بوت استرب (میلر) است، استفاده می شود.

$$[V_{(+)} - V_{(-)}](A_V) = V_o \Rightarrow (V_i - V_o)(A_V) = V_o \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \frac{A_V}{1 + A_V}$$

$$R_{in} = \frac{R_3}{1 - \frac{V_o}{V_i}} = \frac{10\text{k}}{1 - \frac{10^3}{1 + 10^3}} \approx 10\text{M}\Omega$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{10^3}{1 + 10^3} \approx 1$$

**مثال ۱۹:** در مدار شکل (۳۰-۸) مقاومت ورودی  $R_{in}$  و بهره  $\frac{V_o}{V_i}$  را تعیین کنید.



شکل ۳۰-۸

مشخصات آپامپ:

$$\left( \frac{V_o}{V_d} = A, R_{id} = \infty, R_o = 0 \right)$$

**حل:** آپامپ بهره محدود  $A$  دارد؛ یعنی  $\frac{V_o}{V_{(+)} - V_{(-)}} = A$  است.

برای محاسبه بهره  $\frac{V_o}{V_i}$  داریم:

$$\text{KCL (قطب منفی)} \Rightarrow \frac{V(-)}{R_2} + \frac{V(-) - V_o}{R_3} + \frac{V(-) - V_i}{R_1} = 0 \quad (1-8)$$

$$\left[ V(-) - V_i \right] A = -V_o \quad (2-8)$$

با حذف  $V(-)$  از روابط (۱-۸) و (۲-۸) بهره بر حسب پارامترهای مدار به دست می‌آید.

برای محاسبه مقاومت ورودی  $R_i$  داریم:

$$\begin{aligned} I_i &= \frac{V_i - V(-)}{R_1} \\ I_i &= V_i \left( 1 - \frac{V(-)}{V_i} \right) \\ R_i &= \frac{V_i}{I_i} = \frac{R_1}{1 - \frac{V(-)}{V_i}} \end{aligned} \quad (3-8)$$

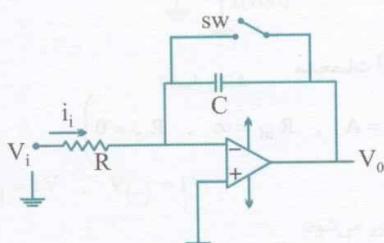
با حذف  $V_o$  در روابط (۱-۸) و (۲-۸) و به دست آوردن  $(-) V$  و جایگزین کردن  $(-) V$  در رابطه (۳-۸)، مقاومت ورودی  $i$  به دست می‌آید.

هرگاه در مثال (۱۹) بهره آپامپ ایده‌آل منظور می‌شد، آن‌گاه  $(-) V = V_{(+)}$  شده و طبق رابطه (۳-۸) مقاومت ورودی  $\infty$

می‌شود و بهره  $\frac{V_o}{V_i}$  هم برابر است با:

$$\begin{aligned} R_i &= \frac{R_1}{1-1} = \infty \\ \frac{V_o}{V_i} &= 1 + \frac{R_3}{R_2} \end{aligned}$$

**مثال ۲۰:** در مدار شکل (۳۱-۸) رابطه  $V_o$  بر حسب  $V_i$  را به دست آورید. کلید SW در لحظه  $t = 0$  باز می‌شود.



شکل ۳۱-۸

**حل:** پیش از باز شدن کلید، حلقه فیدبک بسته است و ازین‌رو  $V_{(+)} = V_{(-)} = V_o = 0$  است. با باز شدن کلید SW، جریان از صرف شارژ خازن (C) می‌شود، در این صورت داریم:

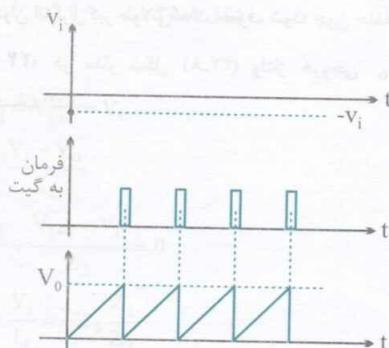
$$\text{KCL}((-)) \Rightarrow \frac{0 - V_i}{R} + \frac{0 - V_o}{\frac{1}{SC}} = 0$$

$$S = J\omega$$

$$V_o = -\frac{1}{SRC} V_i$$

رابطه اخیر نشان دهنده مدار انگرال گیر است که این مدار را انگرال گیر میلر هم می نامند.  
اگر  $V_i$  مثبت و ثابت باشد، خروجی یک موج رمپ منفی است و پس از مدتی آپامپ اشباع خواهد شد. رابطه اخیر را می توان در حوزه زمان مرتب کرد:

$$V_o = -\frac{1}{R C} \int_0^t V_i$$



برحسب نوع  $V_i$ ، خروجی مورد نظر ایجاد می شود، اگر به جای  $-V_i$  یک ترانزیستور مثلاً FET وصل شود و ولتاژ ورودی  $-V_i$  ثابت باشد و ترانزیستور به وسیله موج های سوزنی تکرارشونده پیش از اشباع شدن آپامپ روشن و خاموش شود، موج خروجی به صورت دندانه ارها ایجاد می شود. در شکل (۳۲-۸) این روند نشان داده شده است.

شکل ۳۲-۸ ایجاد موج دندانه ارها با استفاده از مدار شکل

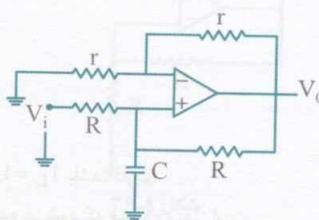
(۳۱-۸)

مثلاً اگر در شکل (۳۱-۸)،  $V_i = -1$  و  $R = 1k$ ،  $C = 1000\mu F$ ، فاصله پالس های روشن کننده FET ۱ ثانیه باشد، با فرض ولت، داریم:

$$V_o = -\frac{1}{1k \times 1000\mu F} \int_0^{1sec} (-1V) dt = 1V$$

پس موج های دندانه ارها با دامنه یک ولت و فرکانس یک هرتز ساخته شده است.

**مثال ۲۱:** در مدار شکل (۳۳-۸) رابطه  $V_o$  برحسب  $V_i$  را بنویسید.



شکل ۳۳-۸

$$V_o = V_{(+)} \left( 1 + \frac{r}{R} \right) = 2 V_{(+)}$$

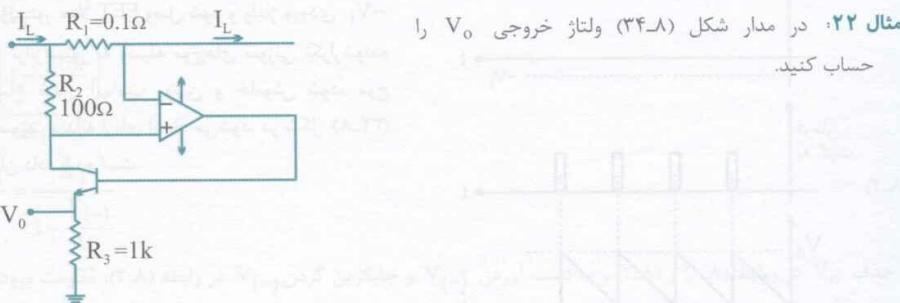
حل:

$$\text{KCL} \Rightarrow \frac{V(+)-V_i}{R} + \frac{V(+)-V_o}{R} + \frac{V(+)}{\frac{1}{SC}} = 0$$

از جانشین کردن اجزای دو رابطه داریم:

$$V_o = \frac{2}{SRC} (V_i)$$

مشاهده می شود که این مدار یک انتگرال گیر است. انتگرال گیر میلر، اشکال شارژ شدن خازن C به سبب جریان بایاس وروودی را دارد که پس از مدت کوتاهی حتی در نبودن موج وروودی خازن شارژ شده و آپامپ اشباع می شود. بنابراین انتگرال گیر میلر برای کاربردهای مناسب است که در زمان های کوتاهی مانند مثال (۲۰) عمل انتگرال گیری تکرار شود. ولی مدار شکل (۳۳-۸) می تواند به عنوان انتگرال گیر طولانی مدت مصرف شود؛ چون حلقه فیدبک منفی آن همواره برقرار است و آپامپ اشباع نمی شود.



شکل ۳۴-۸

**حل:** این نوع مدار یکی از روش های اندازه گیری جریان  $I_L$  است. البته وقتی مدار می تواند کار کند که ولتاژ موجود در قطب منفی آپامپ، با توجه به ولتاژ تعذیه آپامپ کوچک تر باشد و اشباعی در آپامپ ایجاد نشود. در این صورت داریم:

$$V_{(+)} = V_{(-)}$$

$$I_L (R_1) = R_2 (I_C)$$

$$I_L (R_1) = R_2 (I_E)$$

$$I_L (R_1) = R_2 \left( \frac{V_o}{R_3} \right)$$

$$V_o = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} (I_L) = 1V$$

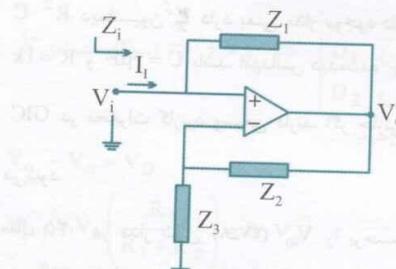
اگر  $\beta$  بزرگ باشد، داریم:

اگر  $I_L = 1A_{mp}$  باشد، داریم:

در مدار دیده می شود که فیدبک منفی است.



$$V_o = \left( \frac{1}{\frac{R_f}{R_s} + 1} \right) V_i$$



شکل ۳۵-۸

مثال ۲۳: در مدار شکل (۳۵-۸) رابطه امپدانس ورودی  $Z_{in}$  را به دست آورید.

$$V_{(-)} = V_{(+)} = V_i$$

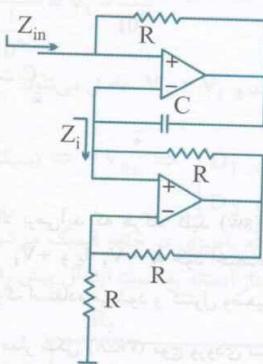
$$I_i = \frac{V_i - V_o}{Z_1}$$

$$\frac{V_{(+)} - V_{(-)}}{Z_3} + \frac{V_{(+)} - V_o}{Z_2} = 0$$

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = -Z_3 \frac{Z_1}{Z_2}$$

دیده می‌شود که امپدانس ورودی  $Z_i$  به صورت امپدانس منفی ظاهر شده است که مدار مورد نظر را مدار NIC (مبدل امپدانس منفی) هم می‌نامند.

اگر در مدار شکل (۳۵-۸)  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = R$  باشد، در این صورت امپدانس ورودی برابر با  $-R$  ظاهر می‌شود.



شکل ۳۶-۸

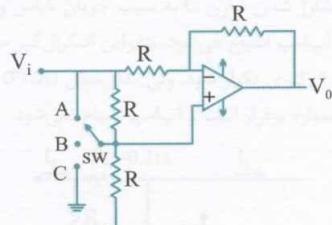
مثال ۲۴: در مدار شکل (۳۶-۸)، امپدانس ورودی  $Z_{in}$  را به دست آورید. آپ‌امپ را ایده‌آل فرض کنید.

حل: با توجه به مثال (۲۳)،  $Z_i = -R$  است. حال اگر بهجای مجموعه آپ‌امپ پایینی ( $-R$ ) وصل شود و دوباره مثال (۲۳)

حل شود،  $Z_{in}$  به دست می‌آید. بهجای امپدانس خازن  $\frac{1}{SC}$  قرار داده شود:

$$Z_{in} = S \cdot R^2 \cdot C$$

دیمانسیون  $L$  دارد یعنی مدار موجود دارای  $Z_{in} = R^2 \cdot C$  است. مثلاً اگر  $C = 1\mu F$  و  $R = 1k$  باشد، امپدانس دیده شده  $Z_{in}$  معادل اندوکتانسی برابر با یک هاتری است. چنین مدارهایی تحت عنوان GIC در مخابرات کاربرد وسیعی دارند. اگر خازنی با  $Z_{in}$  موازی شود، فرکانس تشیدیدی برابر با  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$  ایجاد می‌شود.



شکل ۳۷-۸

**مثال ۲۵:** در مدار شکل (۳۷-۸)  $V_o$  را بر حسب  $V_i$  در حالات مختلف وضعیت کلید (مکان A و B و C) تعیین کنید.

$$V_{(+)} = V_i = V_{(-)}$$

KCL (قطب منفی)  $\Rightarrow \frac{V_i - V_i}{R} + \frac{V_i - V_o}{R} = 0 \Rightarrow V_i = V_o$

حل: کلید در وضعیت A :

$$V_{(+)} = \frac{V_i}{R+R} \cdot R = \frac{V_i}{2} = V_{(-)}$$

KCL (قطب منفی)  $\Rightarrow \frac{\frac{V_i - V_i}{2}}{R} + \frac{\frac{V_i - V_o}{2}}{R} = 0 \Rightarrow V_o = 0$

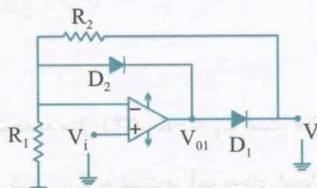
کلید در وضعیت B :

$$V_{(+)} = 0 = V_{(-)}$$

KCL (قطب منفی)  $\Rightarrow \frac{0 - V_i}{R} + \frac{0 - V_o}{R} = 0 \Rightarrow V_o = -V_i$

کلید در وضعیت C :

از سه حالت بالا برمی‌آید که هرگاه کلید (SW) به وسیله‌ای در وضعیت‌های سه‌گانه قرار داده شود، خروجی آپامپ می‌تواند وضعیت صفر و  $+V_i$  و یا  $-V_i$  به خود اختصاص بدهد. این مدار در بخش‌های کنترل کاربرد زیادی دارد. به جای کلید SW از سوئیچ‌های آنالوگ استفاده می‌شود و کنترل وضعیت سوئیچ هم به وسیله یک مدار دیجیتالی یا میکروها قابل اجراست.



شکل ۳۸-۸

**مثال ۲۶:** در مدار شکل (۳۸-۸) موج ورودی سینوسی است.

$V_o$  را مشخص کنید. فرض کنید که  $r_d = 0$  است و

آپامپ، بهره ولتاژی A با مقاومت ورودی بزرگ دارد.

حل: در حل مدارهای دیودی، یک بار سیکل مثبت و بار دیگر سیکل منفی بررسی می‌شود:  
 $V_i \Rightarrow +V_{o_1} \Rightarrow \begin{cases} D_1 \\ D_2 \end{cases}$  حلقه فیدبک بسته (روشن)  
 (سیکل منفی) (خاموش)

در این صورت با بسته بودن حلقه فیدبک منفی روابط حاکم در مدار نوشته می‌شود:

$$V_{o_1} - V_o = V_D$$

$$V_{(-)} = V_o \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = B \cdot V_o$$

$$[V_{(+)} - V_{(-)}]A = V_{o_1}$$

$$V_{(+)} = V_i$$

$$V_o = \frac{A}{1+AB} V_i - \frac{V_D}{1+AB}$$

در این رابطه دیده می‌شود که در سیکل مثبت ورودی بخش اول رابطه، مربوط به فیدبک است و بخش دوم  $\frac{V_D}{1+AB}$  است. در

این صورت هرگاه دیود در حلقه فیدبک منفی قرار داده شود، ولتاژ آستانه دیود تقسیم بر  $1+AB$  شده است که مطلب اخیر نشانه سقوط ولتاژ آستانه دیود است. مثلاً اگر  $R_2 = 0$  قرار داده شود  $B = 1$  می‌شود و  $A = 10^6$  خیلی بزرگ مثلاً  $A = 10^6$  باشد

در این حالت:

$$V_o = \frac{V_i - \frac{V_D}{A}}{1 + \frac{1}{A}}$$

$$V_o = \frac{V_i - \frac{V_D}{10^6}}{1 + \frac{1}{10^6}} = V_i - \frac{V_D}{10^6}$$

یعنی اگر ولتاژ آستانه دیود 0.6 ولت باشد، در این مدار به  $0.6\mu V$  سقوط می‌کند و  $V_o \approx V_i$  حاصل می‌شود.

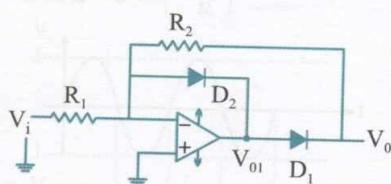
اکنون سیکل منفی ورودی بررسی می‌شود:

$$V_i \Rightarrow -V_{o_1} \Rightarrow \begin{cases} D_1 \\ D_2 \end{cases} \Rightarrow V_o = 0$$

(آپ اشباع نمی‌شود) (سیکل منفی)  
 (آپ اشباع نمی‌شود) (روشن) حلقه فیدبک بسته

پس این مدار یک مدار یکسوساز نیموج دقیق است و دیود دارای ولتاژ آستانه ناچیزی در حلقه فیدبک می‌شود. این ترکیب دیود - آپ اشباع را آبردیود (Supper Diode) هم نامند؛ یعنی دیود از لحاظ ولتاژ آستانه به سمت ایده‌آل پیش رفته است.

مثال ۲۷: در مدار شکل (۳۹-۸) با ورودی سینوسی، موج خروجی را مشخص کنید. فرض  $R_1 = R_2 = R$ .

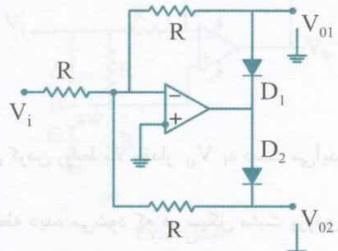


شکل ۳۹-۸

حل: این مدار نسبت به مثال (۲۶) به صورت وارونگر وصل شده است و تحلیل به همان صورت قبل انجام می‌گیرد. در سیکل منفی ورودی  $V_{01}$  مثبت می‌شود و  $D_1$  هدایت می‌کند، با فرض آپ‌امپ ایده‌آل ولتاژ آستانه دیود به سمت صفر میل

$$\text{می‌کند و در نیم‌سیکل منفی ورودی } V_0 = V_i \left( -\frac{R_2}{R_1} \right) = -V_i \text{ است. در نیم‌سیکل مثبت ورودی } V_{01} \text{ منفی شده و}$$

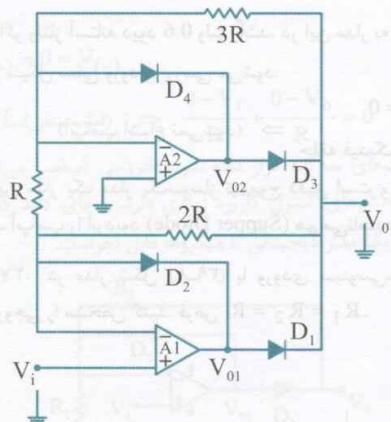
$D_1$  خاموش و  $D_2$  روشن می‌شود. با روشن شدن  $D_2$  حلقه فیدبک بسته می‌شود و اشباع آپ‌امپ اتفاق نخواهد افتاد و به سبب خاموش بودن  $D_1$ ، خروجی صفر می‌شود. این مدار هم یک مدار یک‌سواساز نیم‌موج مانند مثال (۲۶) است.



مثال ۲۸: در مدار شکل (۴۰-۱) با ورودی سینوسی موج خروجی  $V_{01}$  و  $V_{02}$  را بررسی کنید.

شکل ۴۰-۸

حل: با توجه به مثال (۲۷)، در نیم‌سیکل‌های منفی ورودی  $D_2$  روشن می‌شود و خروجی  $V_{02} = -\frac{R}{R} V_i$  است، در حالی‌که  $V_{01}$  صفر است. بر عکس در نیم‌سیکل‌های مثبت ورودی  $D_1$  روشن شده و  $D_2$  خاموش می‌شود و  $V_{01}$  دیده می‌شود که این مدار به عنوان جداکننده فاز مصرف می‌شود. یعنی سیکل‌های مثبت به صورت معکوس در  $V_{01}$  و سیکل‌های منفی به صورت معکوس در  $V_{02}$  ظاهر می‌شوند. وقتی لازم باشد سیکل‌های مثبت و منفی از یک‌دیگر جدا شوند، از چنین مداری استفاده می‌شود.



مثال ۲۹: در مدار شکل (۴۱-۸) با ورودی سینوسی، موج خروجی  $V_0$  را بررسی کنید. آپ‌امپ را ایده‌آل منظور کنید.

شکل ۴۱-۸

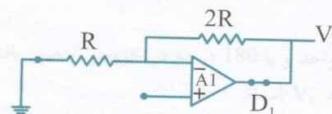
تقویت کننده‌های عملیاتی

۳۹۱

**حل:** مدار بالا ترکیب دو مدار شکل (۴۲-۸) و (۴۳-۸) است. خروجی حاصل تمام‌موج مثبت است.

شرح عملکرد مدار چنین است:

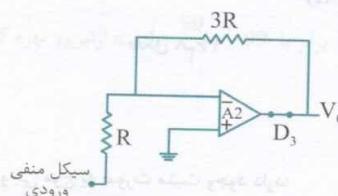
$$\begin{aligned} \text{سیکل مثبت ورودی} &\Rightarrow +V_{01} \Rightarrow \left| \begin{array}{l} D_1 \text{ (روشن)} \\ D_2 \text{ (خاموش)} \end{array} \right| \Rightarrow (\text{حلقه ابیم } A_1 \text{ بسته}) \Rightarrow (V_+ = V_-) \Rightarrow (V_i = V_o) \Rightarrow (\text{ولتاژ قطب منفی } A_1 \text{ برابر با } V_i) \\ &\Rightarrow (-V_{02}) \Rightarrow \left| \begin{array}{l} D_4 \text{ (روشن)} \\ D_3 \text{ (خاموش)} \end{array} \right| \Rightarrow (\text{حلقه ابیم } A_2 \text{ بسته}) \Rightarrow (V_{(-)} = V(+) = 0) \Rightarrow (V_o = V_i \left( 1 + \frac{2R}{R} \right) = 3V_i) \end{aligned}$$



شکل ۴۲-۸

در این صورت سیکل مثبت ورودی با پهله ۳ در خروجی با همان علامت مثبت وجود دارد. برای عملکرد مدار در سیکل منفی تحلیل چنین است:

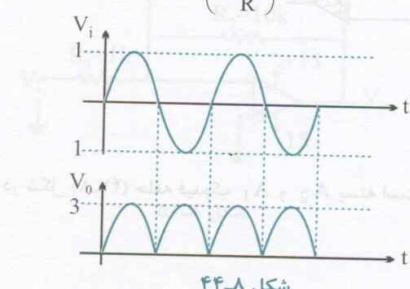
$$\begin{aligned} \text{سیکل منفی ورودی} &\Rightarrow -V_{01} \Rightarrow \left| \begin{array}{l} D_1 \text{ (خاموش)} \\ D_2 \text{ (روشن)} \end{array} \right| \Rightarrow (\text{فیدبک } A_1 \text{ بسته}) \Rightarrow (V_+ = V_-) \Rightarrow \\ &\Rightarrow (+V_{02}) \Rightarrow \left| \begin{array}{l} D_3 \text{ (روشن)} \\ D_4 \text{ (خاموش)} \end{array} \right| \Rightarrow (\text{حلقه فیدبک } A_2 \text{ بسته}) \Rightarrow (V_o = V_i \left( 1 - \frac{3R}{R} \right) = -3V_i) \end{aligned}$$



شکل ۴۳-۸

در این صورت ولتاژ خروجی برابر است با:

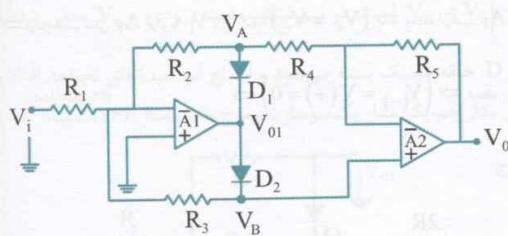
$$V_o = \text{سیکل منفی ورودی} \left( -\frac{3R}{R} \right)$$



پس سیکل منفی ورودی با پهله ۳ - در خروجی وجود دارد.  
در شکل (۴۴-۸) شکل موج خروجی در برابر شکل موج ورودی رسم شده است.

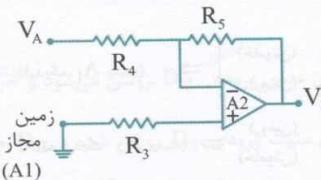
$$(v_o(-V)) = (v_o(+V)) = 3V$$

این مدار مطمئناً مشکلاتی دارد و آن هم ایدهآل نبودن منحنی مشخصه دیود است؛ زیرا مقاومت  $r_d$  در دامنه‌های جریان کم، زیاد می‌شود و همچنین عدم تطبیق دو آپ‌امپ و ولتاژهای افست آپ‌امپ است. این مسایل سبب می‌شوند که موج یکسوشده خروجی (سیکل مثبت و منفی) کاملاً متقاض نباشد.



شکل ۴۵-۸

**مثال ۳۰:** در مدار شکل (۴۵-۸) یکسوشاز تمام‌موج با استفاده از دو آپ‌امپ نشان داده شده است. مدار را بررسی کنید. (فرض موج ورودی سینوسی است.) فرض کنید تمام مقاومتها برابر باشند.

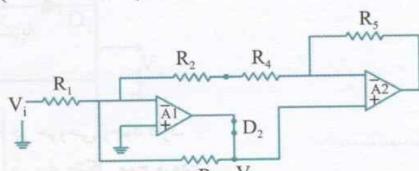


شکل ۴۶-۸

$$V_0 = -V_i \left( -\frac{R_5}{R_4} \right) = +V_i$$

در این صورت با موج ورودی مثبت در خروجی موج به صورت مثبت وجود دارد:

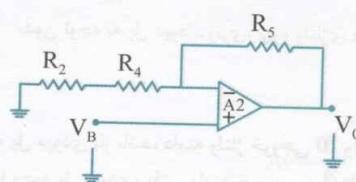
$$(-V_i) \Rightarrow +V_{o1} \Rightarrow \begin{pmatrix} D_1 & (\text{خاموش}) \\ D_2 & (\text{روشن}) \end{pmatrix} \Rightarrow V_B \Rightarrow ((47-8))$$



شکل ۴۷-۸

در شکل (۴۷-۸) حلقه فیدبک  $A_1$  و  $A_2$  بسته است؛ بنابراین می‌توان نوشت:

$$V_B = (V_{(+)}_{A2}) = (V_{(-)}_{A2})$$



شکل ۴۸-۸

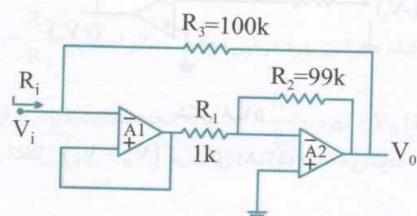
در این حالت با نوشتن KCL در قطب منفی ( $A_1$ ) داریم:

$$\frac{0 - V_i}{R_1} + \frac{0 - V_B}{R_3} + \frac{0 - V_B}{R_2 + R_4} = 0$$

$$V_B = -\frac{2}{3}V_i \Rightarrow (48-8)$$

$$V_o = V_B \left( 1 + \frac{R_5}{R_2 + R_4} \right) = \frac{3}{2}V_B$$

درنتیجه ولتاژ سیکل منفی ورودی با بهره واحد و با ۱۸۰ درجه در خروجی حضور یافته است و شکل موج خروجی حاصل، تمام موج بالای خط صفر با دامنه‌ای برابر با دامنه  $V_i$  است.



شکل ۴۹-۸

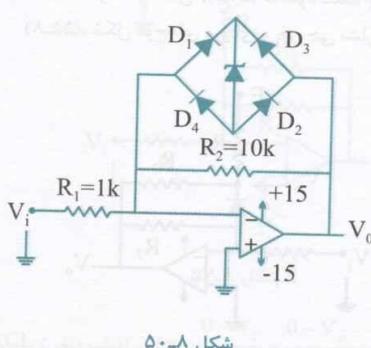
مثال ۳۱: در مدار شکل (۴۹-۸) با فرض آپ‌امپ ایده‌آل مقاومت ورودی  $R_i$  را به دست آورید.

$$\text{حل: بهره مدار } A_1 = 1 \text{ و بهره مدار } A_2 \text{ برابر با } -99 = -\frac{99}{1} \text{ است؛ ازین‌رو بهره کل } -99 \text{ است.}$$

با توجه به قضیه میلر:

$$R_i = \frac{R_3}{1 - \frac{V_o}{V_i}} = 1\text{k}\Omega$$

مثال ۳۲: در شکل (۵۰-۸) یک محدودکننده دامنه با استفاده از دیود زنر و پل دیودی نشان داده شده است.تابع انتقال  $V_o - V_i$  را رسم کنید.



$$V_z = 5\text{V}, V_D = 0.6\text{V}, V_i = 1\sin\omega t \text{ (ولت)}$$



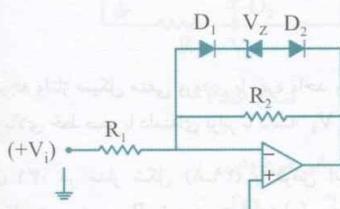
شکل ۵۰-۸

حل: بدون توجه به پل دیود - زنری، بهره و لتاژ مدار برابر است با:

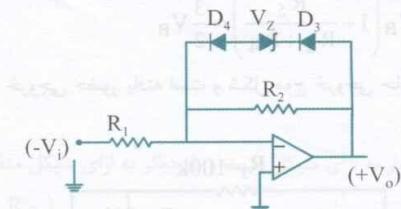
$$A_V = -\frac{R_2}{R_1} = -10$$

هرگاه پل دیودی باز باشد، دامنه ولتاژ خروجی 10 ولت خواهد شد.

ولی با وجود پل دیودی، وقتی دامنه خروجی به آستانه هدایت زنر برسد، دیود زنر هدایت می‌کند و خروجی محدود می‌شود. برای سیکل منفی ورودی و هدایت پل مدار به صورت شکل (۵۱-۸) دیده می‌شود و برای سیکل مثبت ورودی و هدایت پل مدار به صورت شکل (۵۲-۸) دیده می‌شود:

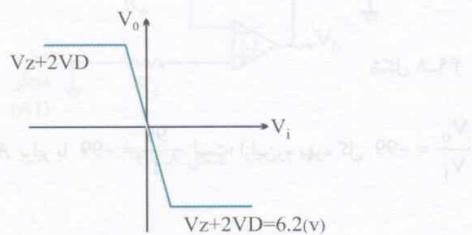


شکل ۵۲-۸



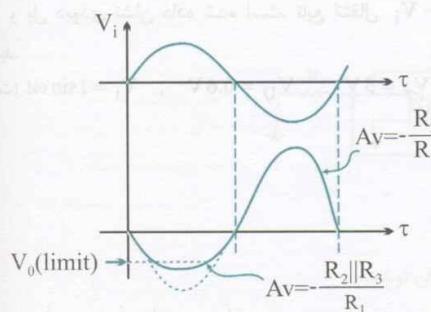
شکل ۵۱-۸

تابع انتقال  $(V_o - V_i)$  در شکل (۵۳-۸) دیده می‌شود:

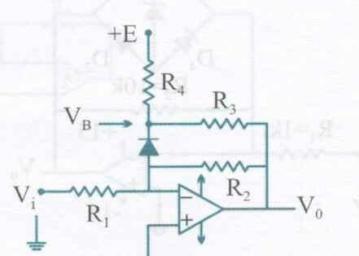


شکل ۵۳-۸

مثال ۳۳: در مدار شکل (۵۴-۸) محدودکننده بهره به ازای بخشی از نیم‌سیکل منفی خروجی نشان داده شده است. در شکل (۵۵-۸)، شکل موج‌های ورودی و خروجی نشان داده شده‌اند:

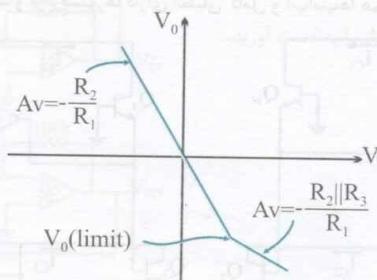


شکل ۵۵-۸ شکل موج ورودی و خروجی



شکل ۵۴-۸

در شکل (۵۶-۸) تابع انتقال  $(V_o - V_i)$  نشان داده شده است.



شکل ۵۶-۸

به ازای سیکل منفی ورودی خروجی  $V_o$  مثبت است و دیود کار نمی‌کند؛ بنابراین بهره در این موقعیت برابر است با  $-\frac{R_2}{R_1}$ .

در سیکل مثبت ورودی تا آنجا که دیود هدایت نکرده است (تا  $V_o(\text{limit})$ )، بهره  $-\frac{R_2}{R_1}$  است. به مجرد هدایت دیود، با فرض

می‌توان مقدار  $V_o(\text{limit})$  را به دست آورد.

بیش از هدایت دیود داریم:

$$\frac{V_B - E}{R_4} + \frac{V_B - V_o}{R_3} = 0$$

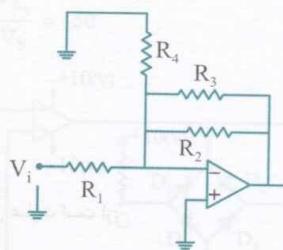
به مجرد هدایت دیود در این رابطه  $V_o = V_o(\text{limit})$  و  $V_D = 0$  شده  $V_B = 0$  می‌شود. در این صورت:

$$\frac{0 - E}{R_4} + \frac{0 - V_o(\text{limit})}{R_3} = 0$$

$$V_o(\text{limit}) = -\frac{(E) \cdot R_3}{R_4}$$

بهره از این ناحیه به بعد را می‌توان مطابق شکل (۵۷-۸) مشخص کرد.

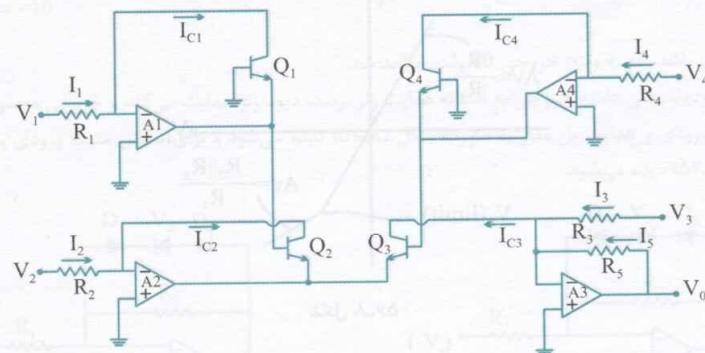
ولتاژ E در محاسبه بهره زمین تلقی می‌شود.



شکل ۵۷-۸

$$\text{KCL (قطب منفی)} \Rightarrow \frac{0 - V_i}{R_1} + \frac{0 - V_o}{R_2} + \frac{0 - V_o}{R_3} = 0$$

**مثال ۳۴:** در مدار شکل (۵۸-۸)، رابطه  $V_0$  را بحسب ولتاژهای ورودی  $V_1$  و  $V_2$  و  $V_3$  و  $V_4$  به دست آورید. همه قطعات در ناحیه فعال بایاس شده‌اند و ترانزیستورها دارای انطباق کامل و آپ‌امپ‌ها هم ایده‌آل فرض شوند.



شکل ۵۸-۸

**حل:** یک مدار فیدبک منفی را تشکیل داده‌اند و بنابراین:  $Q_1$  و  $A_1$

$$V_{(+)} = V_{(-)} \Rightarrow I_1 = I_{C_1} = \frac{V_1}{R_1}$$

$$I_2 = I_{C_2} = \frac{V_2}{R_2}$$

$$I_{C_3} = I_3 + I_5 = \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_0}{R_5}$$

$$I_4 = I_{C_4} = \frac{V_4}{R_4}$$

از طرفی با نوشتن KVL از بیس  $Q_1$  تا بیس  $Q_4$  داریم:

$$V_{BE_1} + V_{BE_2} + V_{EB_3} + V_{EB_4} = 0$$

$$V_T \ln \frac{I_{C_1}}{I_S} + V_T \ln \frac{I_{C_2}}{I_S} = V_T \ln \frac{I_{C_3}}{I_S} + V_T \ln \frac{I_{C_4}}{I_S}$$

$$V_T \ln \frac{I_{C_1}}{I_{C_3}} = V_T \ln \frac{I_{C_4}}{I_{C_2}}$$

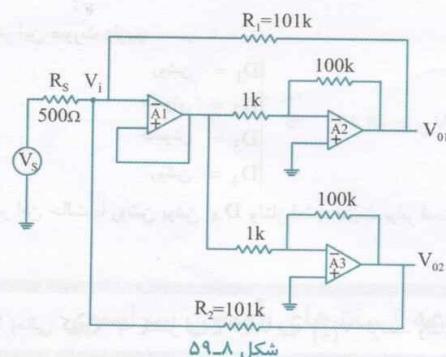
رابطه نهایی عبارت است از:

$$\frac{I_{C_1}}{I_{C_3}} = \frac{I_{C_4}}{I_{C_2}}$$

$$I_{C_1} \cdot I_{C_2} = I_{C_3} \cdot I_{C_4}$$

با اعمال ولتاژ به پایه‌های منفی و یا مثبت و وصل پایه  $V_0$  به پایه‌های دیگر آپ‌امپ‌ها عملیات گوناگون ریاضی مانند جذر، توان 2 و ریشه سوم و تقسیم کننده و ... را می‌توان انجام داد.

تقویت کننده‌های عملیاتی ۳۹۷



شکل ۵۹-۸

مثال ۳۵: در مدار شکل (۵۹-۸) با فرض آپ‌امپ‌های ایده‌آل

$$A_{V_{S_2}} = \frac{V_{o_2}}{V_S} \quad \text{و} \quad A_{V_{S_1}} = \frac{V_{o_1}}{V_S}$$

حل:

$$A_{V_1} = \frac{V_{o_1}}{V_1} = -100$$

$$A_{V_2} = \frac{V_{o_2}}{V_1} = -100$$

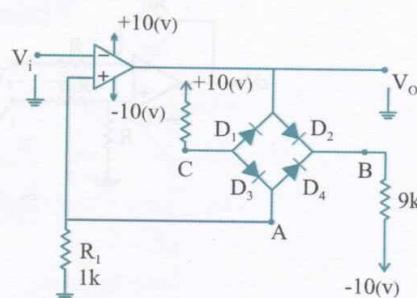
و  $A_1$  و  $A_2$  و  $R_1$  و  $R_2$  فیدبک منفی ولتاژ موازی است.و  $A_3$  و  $A_1$  و  $R_2$  فیدبک منفی ولتاژ موازی است. مقاومت‌های  $R_1$  و  $R_2$  در ورودی به صورت میلر ظاهر می‌شوند:

$$R_1 = \frac{R_1}{1 - A_{V_1}} = 1k$$

$$R_2 = \frac{R_2}{1 - A_{V_2}} = 1k$$

$$\frac{V_i}{V_S} = \frac{1k \parallel 1k}{(1k \parallel 1k) + R_S} = 0.5$$

$$\frac{V_{o_1}}{V_S} = \frac{V_{o_2}}{V_S} = -50$$



شکل ۶۰-۸

مثال ۳۶: در مدار شکل (۶۰-۸) ولتاژ اشباع آپ‌امپ را ۹ ولت

فرض کنید. ( $V_{o\text{Max}} = \pm 9$  ولت)ولتاژ ورودی  $V_i$  بین -1 ولت الی +1 ولت تغییر می‌کند.تفییرات ولتاژ خروجی  $V_o$  را مشخص کنید.آپ‌امپ را با بهره خیلی زیاد در نظر بگیرید. ( $V_D = 0.6V$ )حل: فرض کنید در لحظه اول، ولتاژ قطب مثبت آپ‌امپ صفر ولت باشد و ولتاژ ورودی  $V_i$  بزرگ‌تر از صفر ولت منظور شود.

در این صورت داریم:

$$V_i > 0 \Rightarrow V_o = -9V \Rightarrow V_C = -8.4V \Rightarrow$$

$D_1$	= روشن
$D_2$	= خاموش
$D_3$	= خاموش
$D_4$	= روشن

در این حالت با روشن بودن  $D_4$  ولتاژ قطب مثبت برابر است با:

$$V_{(+)} = V_A = \frac{-10 + V_{D_4}}{10k} (1k) = -0.94V$$

تا زمانی که  $V_i$  به کمتر از  $V_{(+)} = -0.94V$  نرسد، ولتاژ خروجی 9 ولت باقی می‌ماند. اکنون فرض کنید که ولتاژ ورودی

کمتر از  $-0.94V$  شود، در این صورت داریم:

$$V_i < -0.94V \Rightarrow V_o = +9V \Rightarrow V_B = +8.4V \Rightarrow$$

$D_1$	= خاموش
$D_2$	= روشن
$D_3$	= روشن
$D_4$	= خاموش

در این حالت با روشن بودن  $D_3$  ولتاژ قطب مثبت برابر است با:

$$V_{(+)} = \frac{10 - V_{D_3}}{10} \times 1 = +0.94V$$

تا زمانی که  $V_i$  کمتر از  $+0.94V$  باشد، خروجی 9 ولت باقی می‌ماند. با تغییر مقاومت  $R_1$  می‌توان ولتاژ آستانه ورودی را برای خروجی 9+ یا 9- ولت تنظیم کرد.



و شکنون در این مدار دستگاهی داشته باشیم که ولتاژ خروجی مثبت می‌باشد که برابر با ولتاژ خروجی منفی می‌باشد. این دستگاه دستگاهی داشته باشیم که ولتاژ خروجی مثبت می‌باشد که برابر با ولتاژ خروجی منفی می‌باشد.

### مجموعه تست‌های آزمون سراسری

۱. در صورتی که آپ-امپ ایده‌آل فرض شود، مقاومت ورودی ( مقاومتی که  $V_s$  می‌بیند ) و بهره ولتاژ

(۸۴) ارشد

چه مقدار است؟

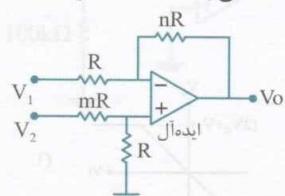
$$(Av_s = 33, R_i = 1M) \quad (۱)$$

$$(Av_s = 100, R_i = 1M) \quad (۲)$$

$$(Av_s = 33, R_i = 30k\Omega) \quad (۳)$$

$$(Av_s = 100, R_i = 20k\Omega) \quad (۴)$$

۲. در مدار شکل مقابل چه رابطه‌ای بین  $m$  و  $n$  برقرار باشد تا تقویت‌کننده به صورت تفاضلی باشد؟



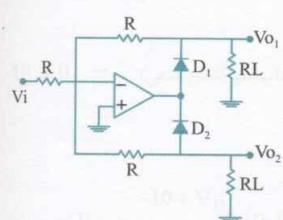
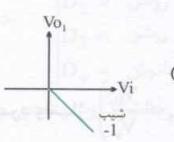
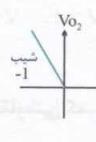
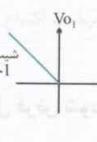
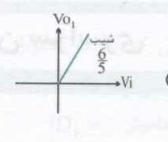
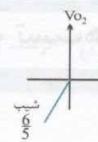
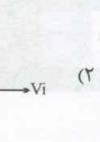
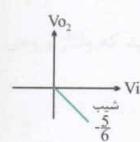
$$m = \frac{1}{n} \quad (۱)$$

$$m = \frac{2}{n} \quad (۲)$$

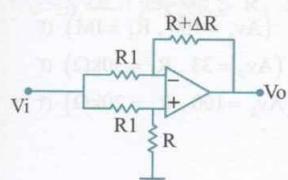
$$m = 2n \quad (۳)$$

$$m = n \quad (۴)$$

(أرشد ٨٧)

(R<sub>L</sub> = 1k, R = 5k) مشخصه انتقالی v<sub>i</sub> به v<sub>o1</sub> و v<sub>o2</sub> را رسم کنید.

(أرشد ٨٧)

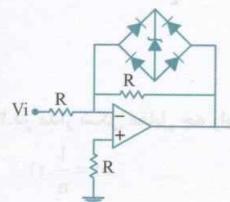
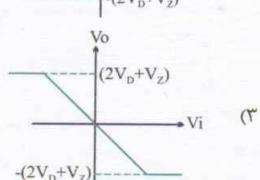
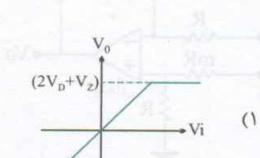
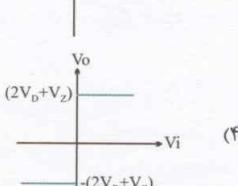
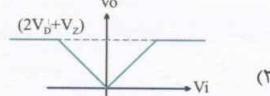
٤. در مدار شکل زیر بهره ولتاژ  $\frac{V_0}{V_i}$  کدام است؟

$$\frac{\Delta R}{2R_1 + R} \quad (١)$$

$$\frac{R + \Delta R}{2R_1 + R} \quad (٢)$$

$$\frac{R + \Delta R}{R_1 + R} \quad (٣)$$

$$\frac{\Delta R}{R_1 + R} \quad (٤)$$

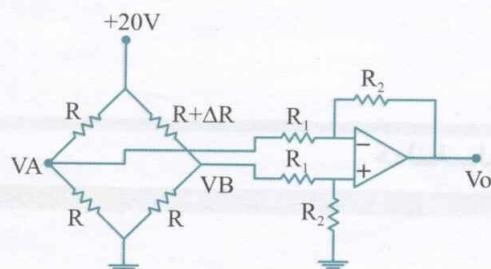
٥. مشخصه انتقالی V<sub>o</sub> به V<sub>i</sub> مدار رو به رو کدام است؟ ولتاژ زنر V<sub>Z</sub> و افت ولتاژ دیودها در بایاس مستقیمV<sub>D</sub> می باشد.

۶. در مدار زیر مقاومت  $R + \Delta R$  مدل یک سنسور حرارتی است که به ازای هر درجه افزایش یا کاهش دما 10 درصد

تغییر در مقاومت آن ایجاد می‌شود  $\left( \frac{\Delta R}{R} = \%10 \right)$ . نسبت  $\frac{R_2}{R_1}$  چقدر باشد تا به ازای هر درجه تغییر دما، ولتاژ

(ارشد ۸۸)

خروجی به اندازه یک ولت تغییر نماید؟



$$\frac{1}{4} \quad (1)$$

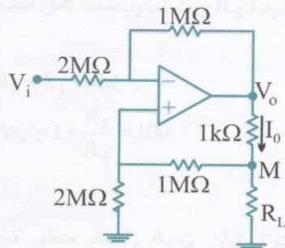
$$\frac{1}{2} \quad (2)$$

$$2 \quad (3)$$

$$4 \quad (4)$$

(ارشد ۸۹)

۷. در مدار مقابل رابطه  $I_o$  و  $V_i$  بر حسب  $\frac{mA}{V}$  کدام است؟



$$-\frac{2V_i}{5} \quad (1)$$

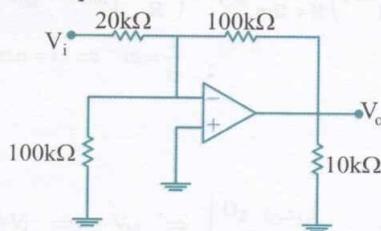
$$-\frac{V_i}{3} \quad (2)$$

$$-\frac{3V_i}{4} \quad (3)$$

$$-\frac{V_i}{2} \quad (4)$$

بهره ولتاژ در تقویت کننده شکل مقابل کدام است؟ (تقویت کننده عملیاتی از هر نظر ایده‌آل است جز اینکه بهره

آن محدود و برابر 100 می‌باشد). (ارشد ۸۹)



$$-5.05 \quad (1)$$

$$-4.65 \quad (2)$$

$$-5.35 \quad (3)$$

$$-4.95 \quad (4)$$

۱. گزینه ۲ درست است.  
با توجه به آپ-امپ ایده‌آل،  $V_{(-)} = V_{(+)}$  است، بنابراین جریان سیگنال از  $R_3$  نمی‌گذرد ( $R_3$  بوت استرپ‌شده کامل است) و  $R_3$  باز است. در این صورت داریم:

$$R_i = R_1 = 1M$$

$$Av_s = 1 + \frac{R_5}{R_4} = 100$$

۲. گزینه ۱ درست است.  
برای داشتن تقویت‌کننده تفاضلی باید  $C_{MRR}$  به سمت زیاد میل کند؛ در این صورت می‌توان  $A_{CM}$  را صفر منظور کرد.

$$V_{0_{CM}} = V_{CM} \left( -\frac{nR}{R} \right) + V_{CM} \frac{R}{mR + R} \left( 1 + \frac{nR}{R} \right) = 0$$

$$m \cdot n = 1 \Rightarrow m = \frac{1}{n}$$

۳. گزینه ۴ درست است.  
اگر خروجی آپ-امپ را  $V_M$  بنویسیم، آن‌گاه داریم:

$$+V_i \Rightarrow -V_M \Rightarrow \begin{cases} D_2 & (\text{روشن}) \\ D_1 & (\text{خاموش}) \end{cases}$$

$$-V_i \Rightarrow +V_M \Rightarrow \begin{cases} D_2 & (\text{خاموش}) \\ D_1 & (\text{روشن}) \end{cases}$$

$$V_{(+)} = \frac{V_i}{R_1 + R} \cdot R$$

### پاسخنامه

$$V_{(+)} = V_{(-)}$$

$$\text{KCL} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_+ - V_i}{R_1} + \frac{V_+ - V_0}{R + \Delta R} = 0$$

با جایگذاری  $V_{(+)} = V_{(-)}$  در رابطه KCL داریم:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{\Delta R}{R_1 + R}$$

۵. گزینه ۳ درست است.

مادامی که زنر هدایت نکند  $V_i = -V_0$  است. هنگامی که دامنه خروجی به اندازه  $V_z + 2V_D$  شود، خروجی در این سطح محدود می‌شود. در این صورت حالت ۳ درست است.

۶. گزینه ۳ درست است.

اگر گره‌های دو طرف پل مقاومتی را  $V_A$  و  $V_B$  (طبق شکل بالا) نام‌گذاری کنیم، در این صورت  $v_0 = (V_B - V_A) \frac{R_2}{R_1}$  است.

$$V_A = \frac{V_{cc}}{2} = 10V$$

$$V_B = \frac{V_{cc}}{R + \Delta R + R} \cdot R = \frac{20}{2R + \Delta R} \cdot R$$

$$V_0 = (V_B - V_A) \frac{R_2}{R_1}$$

$$V_0 = \left( \frac{20}{2R + \Delta R} \cdot R - 10 \right) \frac{R_2}{R_1}$$

با افزایش دما  $\Delta R$  زیاد شده و  $V_B$  کم می‌شود و  $V_0$  کم خواهد شد.

$$-1 = \left( \frac{20}{2 + \frac{\Delta R}{R}} - 10 \right) \frac{R_2}{R_1}$$

$$-1 = \left( \frac{20}{2.1} - 10 \right) \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 2.1$$

۷. گزینه ۴ درست است.

$$V_{(-)} = V_{(+)}$$

$$\text{KCL}(-) \Rightarrow \frac{V_{(-)} - V_i}{2} + \frac{V_{(-)} - V_0}{1} = 0 \Rightarrow V_{(-)} = \frac{V_i + 2V_0}{3} \quad (\text{الف})$$

$$\text{KCL}(+) \Rightarrow \frac{V_{(-)}}{2} + \frac{V_{(-)} - V_M}{1} = 0 \Rightarrow 3V_{(-)} - 2V_M = 0 \quad (\text{ب})$$

$$3 \frac{V_i + 2V_0}{3} - 2V_M = 0 \Rightarrow V_i = 2(-V_0 + V_M)$$

$$I_0 = \frac{V_0 - V_M}{1k} \Rightarrow \frac{I_0}{V_i} = \frac{1k}{2(-V_0 + V_M)} \Rightarrow \frac{I_0}{V_i} = -\frac{1}{2}$$

رابطه (الف) در (ب) جانشین شود

۸. گزینه ۲ درست است.

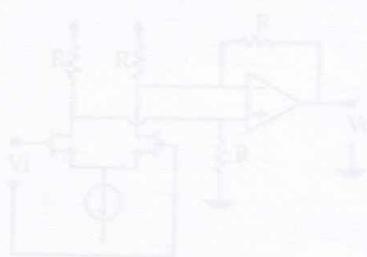
$$V_0 = (V_{(+)} - V_{(-)})A \Rightarrow V_0 = (0 - V_{(-)})100 \Rightarrow V_{(-)} = -\frac{V_0}{100} \quad (\text{الف})$$

$$\frac{V_{(-)}}{100k} + \frac{V_{(-)} - V_0}{100k} + \frac{V_{(-)} - V_i}{20k} = 0 \quad (\text{ب})$$

$$\frac{V_0}{V_i} = -4.67 \quad (\text{الف}) \text{ در } (\text{ب}) \text{ جایگزین شود.}$$

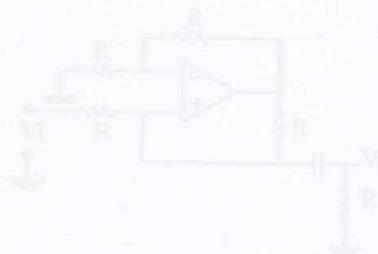
### خودآزمایی

دو شکل (ج) و (د) با فرض آنکه ایندهانوی و متأثرهای یکسان نباشد  $\frac{V_0}{V_i}$  را محاسبه کنید.



شکل (ج)

در شکل (ج) و (د) با فرض متأثرهای یکسان نباشد  $\frac{V_0}{V_i}$  را محاسبه کنید.



شکل (د)