محمد اعرابیان

جزوه درس الکترونیک کاربردی

جلسه هفدهم

برای جزئیات بیشتر **اسکن کنید**

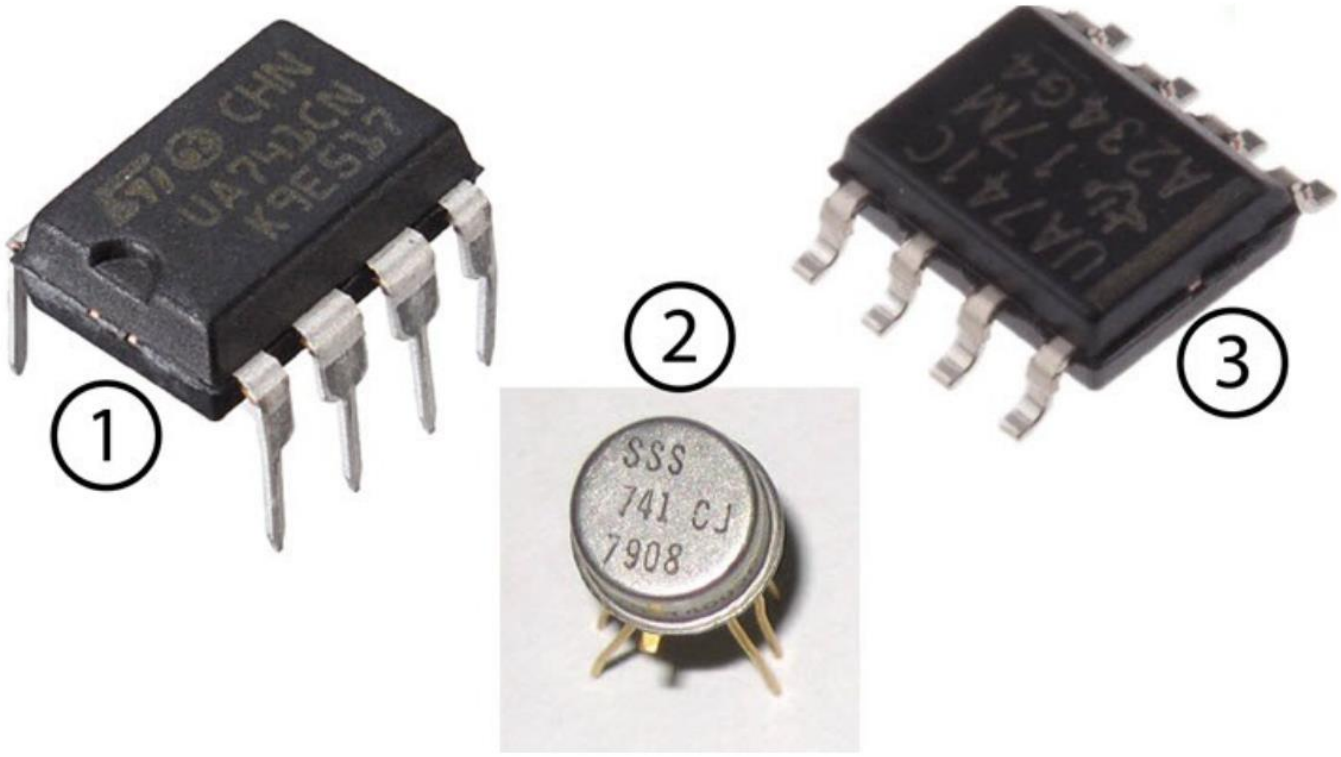
نسخه ۱.۱ | تهیه شده در بهمن ۱۴۰۰

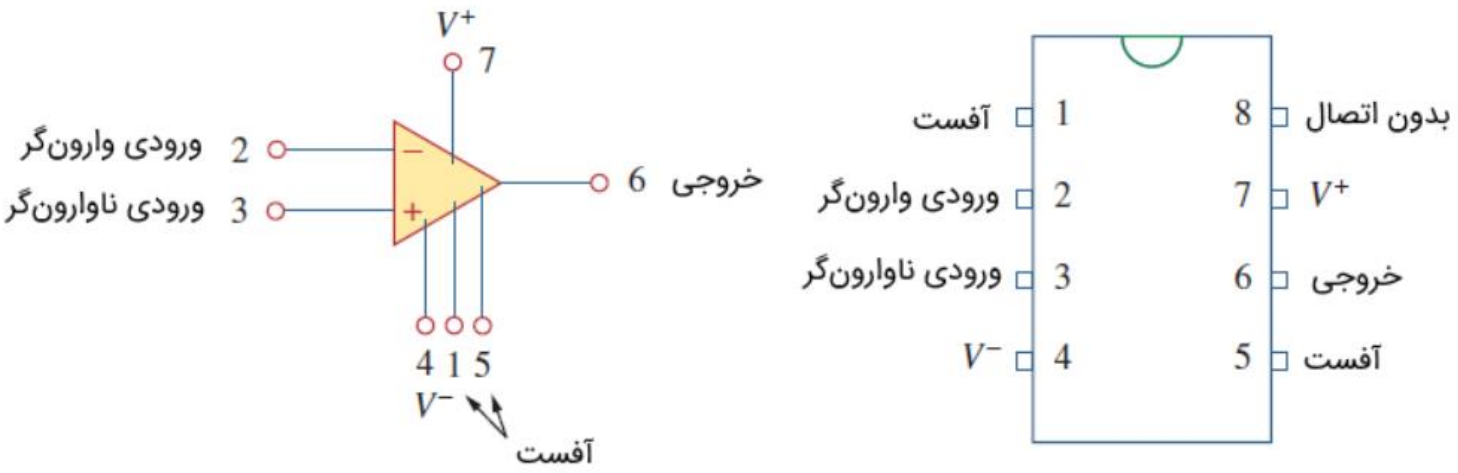
تمامی حقوق این جزوه برای **محمد اعرابیان** محفوظ است.

تقویت‌کننده عملیاتی:

«تقویت‌کننده عملیاتی» (Operational Amplifier) یا آپ امپ (Op amp)، یک مدار الکترونیکی است که مانند منبع ولتاژ کنترل‌شده با ولتاژ عمل می‌کند.

از تقویت‌کننده عملیاتی برای ساخت منبع جریان کنترل شده با جریان یا ولتاژ نیز استفاده می‌شود. همان‌گونه که گفتیم، یک تقویت‌کننده عملیاتی، قابلیت جمع کردن، تقویت، انتگرال‌گیری و مشتق‌گیری سیگنال‌ها را دارد. به دلیل همین قابلیت‌های انجام عملیات ریاضی است که این مدارها را تقویت‌کننده عملیاتی می‌نامند. تقویت‌کننده‌های عملیاتی، کاربرد زیادی در طراحی مدارهای آنالوگ دارند. تقویت‌کننده‌های عملیاتی، قطعاتی الکترونیکی هستند که از ترکیب پیچیده مقاومت، خازن، دیود و ترانزیستور ساخته شده‌اند. در ادامه، تقویت‌کننده عملیاتی را به عنوان یک بلوک آماده در نظر می‌گیریم.





آفست خروجي به مقدار ولتاژ خروجي که به ازاي صفر شدن ورودي هاي آي سي مي باشد را گويند.

آفست ورودي به مقدار ولتاژ ورودي که مقدار ولتاژ خروجي را صفر کندرا مي گويند.

آفست فقط سطح DC خروجي رو جابجا ميکنه اونهم در حدود چند ميلي ولت

Offset خروجي رو با بستن يک پتانسيومتر (ولوم) مناسب بين پايه هاي افست [پين ۱و۵] و اتصال $V_{CC}-$ به سر وسط و تنظيم ولوم صفر ميشه ،

پایه ۲ : ورودی وارون‌گر یا منفی

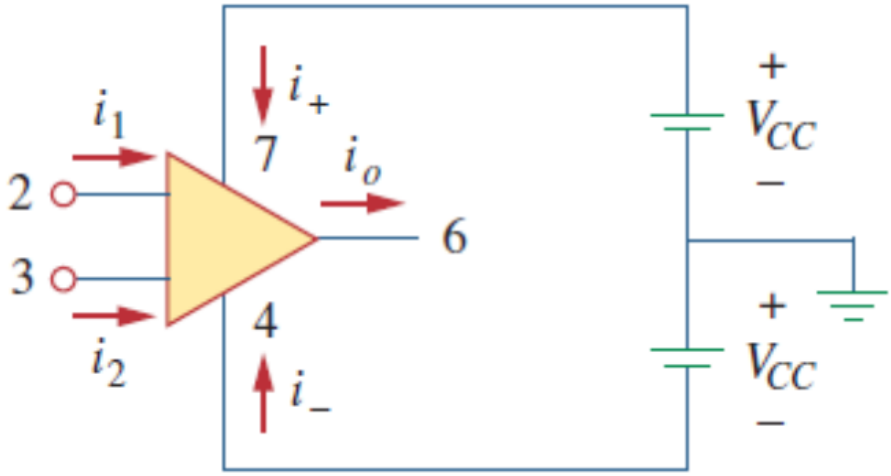
پایه ۳ : ورودی ناوارون‌گر یا مثبت

پایه ۴ : تغذیه منفی V^-

پایه ۶ : خروجی

پایه ۷ : تغذیه مثبت V^+

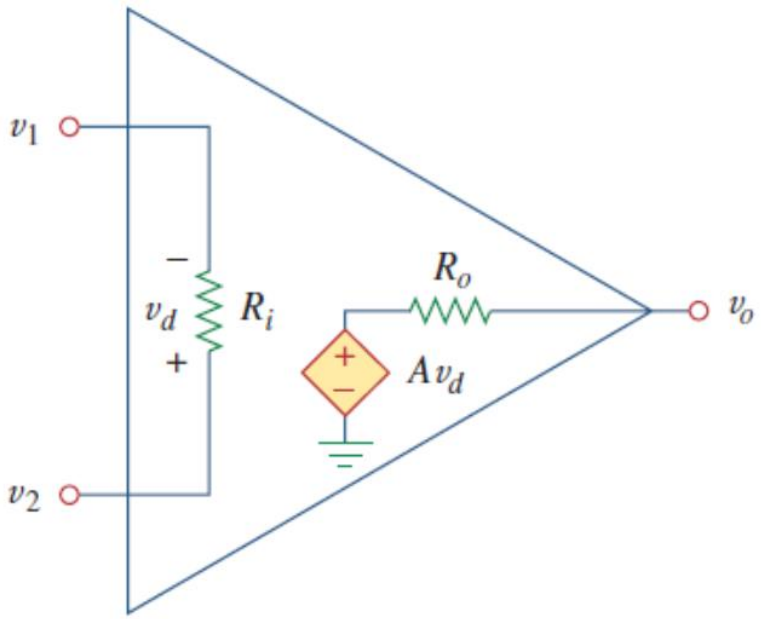
نماد مداری آپ امپ با یک مثلث نشان داده می‌شود تقویت‌کننده عملیاتی دو ورودی و یک خروجی دارد. ورودی‌ها، به‌ترتیب با علامت منفی (−) و مثبت (+) برای ورودی‌های وارون‌گر یا منفی و مثبت یا ناوارون‌گر نشان داده می‌شوند. اگر یک ورودی به ترمینال مثبت اعمال شود، با پلاریته مشابه در خروجی ظاهر می‌شود، درحالی که اگر ورودی به ترمینال منفی وارد شود، با پلاریته معکوس به خروجی منتقل خواهد شد.



مانند همه عناصر فعال، باید تقویت‌کننده عملیاتی را مطابق شکل بالا با یک منبع ولتاژ تغذیه کرد. هرچند، منابع تغذیه تقویت‌کننده‌های عملیاتی، اغلب برای سادگی، در نماد مداری آن‌ها آورده نمی‌شوند، اما جریان‌ها را نمی‌توان نادیده گرفت.

$$i_o = i_1 + i_2 + i_+ + i_-$$

مدل مدار معادل یک تقویت‌کننده عملیاتی در شکل زیر نشان داده شده است. بخش خروجی، از یک منبع کنترل‌شده با ولتاژ سری با مقاومت خروجی R_o تشکیل شده است. مقاومت R_i مقاومت معادل تونن دیده شده از ترمینال ورودی است، در حالی که مقاومت خروجی R_o مقاومت معادل تونن خروجی است.



اختلاف ولتاژ ورودی V_d: $V_d = V_2 - V_1$

که در آن، V_1 ولتاژ بین ترمینال منفی و زمین، و V_2 ولتاژ بین ترمینال مثبت و زمین است. آپ امپ، اختلاف بین دو ورودی را در بهره A ضرب می‌کند و سبب ایجاد ولتاژ در خروجی می‌شود.

$$v_o = Av_d = A(v_2 - v_1)$$

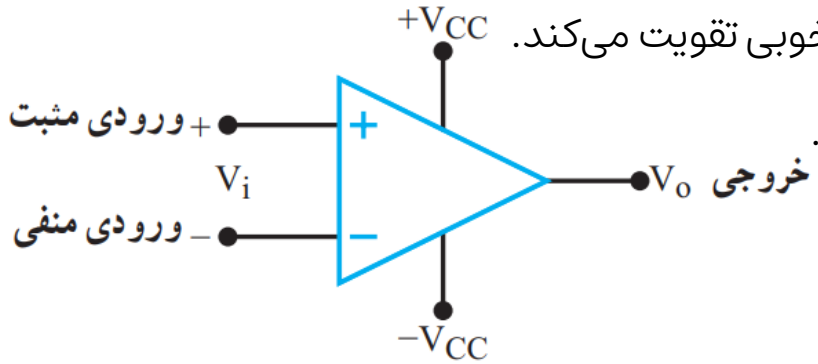
پارمتر A بهره ولتاژ حلقه‌باز نامیده می‌شود، زیرا بهره آپ امپ بدون هرگونه فیدبک (بازخورد) از خروجی به ورودی است.

محدوده رایج پارامترهای آپ امپ		
پارامتر	**محدوده متداول**	**مقادیر ایده‌آل**
بهره حلقه‌باز، A	10^5 تا 10^8	∞
مقاومت ورودی، R_i	10^5 تا 10^{13} اهم	$\infty\Omega$
مقاومت خروجی، R_o	10 تا 100 اهم	0Ω
ولتاژ تغذیه، V_{CC}	5 تا 24 ولت	

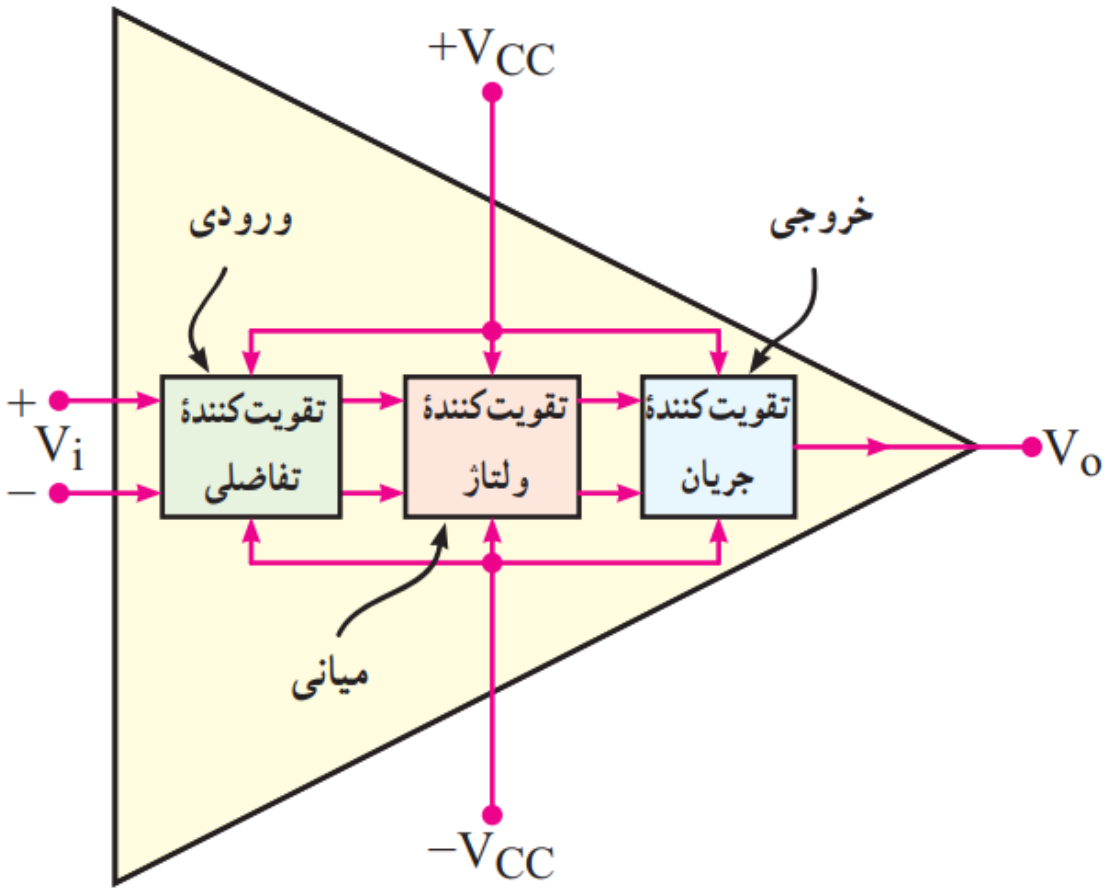
مزیت تقویت کننده‌های عملیاتی

سیگنال‌هایی با فرکانس پایین را به خوبی تقویت می‌کند.

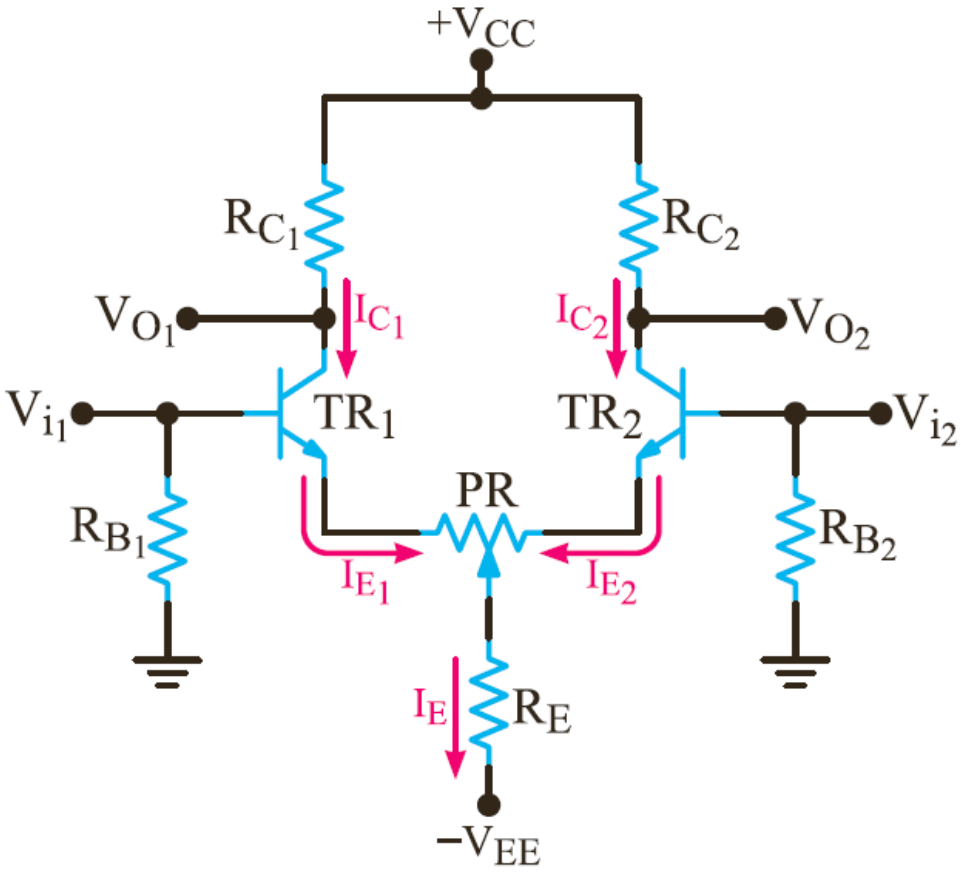
قابلیت تفکیک سیگنال از نویز را دارد.



بلوک دیاگرام مدار داخلی تقویت کنندهٔ عملیاتی



مدار تقویت کننده تفاضلی



بررسی رفتار DC تقویت کننده تفاضلی

اساس مدار: اجزا هر دو طرف مدار از نظر تعداد و مقدار با هم برابر هستند. یعنی

$$T_{R_1} = T_{R_2} \quad , \quad R_{B_1} = R_{B_2} \quad , \quad R_{C_1} = R_{C_2}$$

حال روبط جریان: چون β زیاد است می‌توان از جریان بیس صرف نظر کرد.

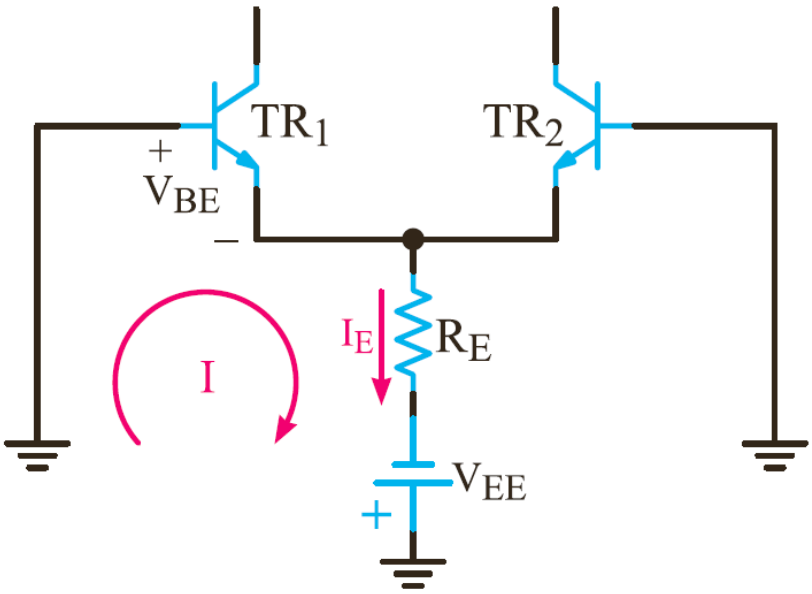
$$I_{E_1} = I_{E_2} = \frac{I_E}{2}$$

$$I_{C_1} = I_{C_2} = I_{E_1} = I_{E_2}$$

روبط ولتاژ: با شرایط β بزرگ

$$V_{C_1} = V_{C_2} = V_{CC} - R_{C_1} I_{C_1} = V_{CC} - R_{C_2} I_{C_2}$$

با زمین کردن ورودی ها می‌توانیم kvl های زیر را بنویسیم



$$kvl: +V_{BE} + R_E(I_E) - V_{EE} = 0$$

$$\Rightarrow I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E}$$

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

با اعمال ولتاژ $+V_{B_1}$ فرایند زیر اتفاق می‌افتد.

$$V_{B_1}^{\uparrow} \Rightarrow I_{B_1}^{\uparrow} \Rightarrow I_{C_1}^{\uparrow} \Rightarrow I_{E_1}^{\uparrow} \Rightarrow V_{E_1}^{\uparrow} \Rightarrow V_{BE_1}^{\downarrow} \Rightarrow I_{B_2}^{\downarrow} \Rightarrow I_{C_2}^{\downarrow} \Rightarrow V_{C_1}^{\uparrow}$$

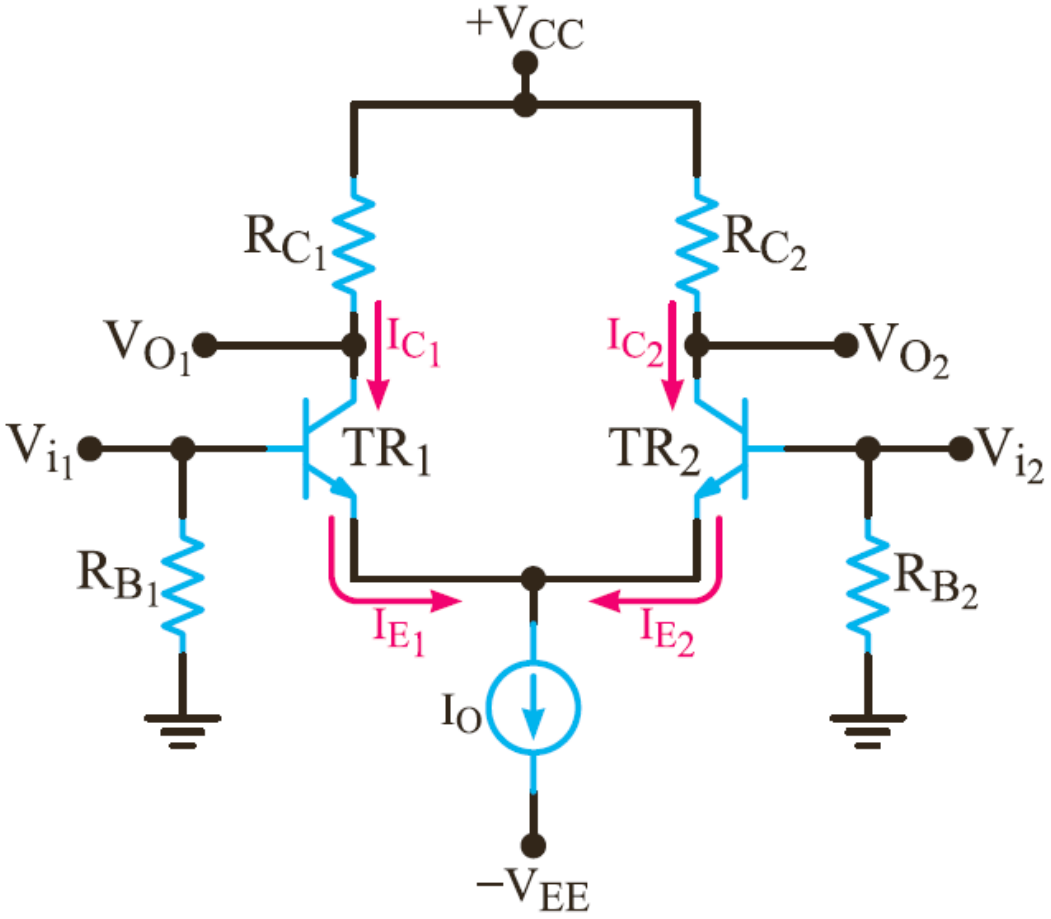
هدایت T_{R_2} سبب کاهش هدایت T_{R_1} می‌شود.

با زیاد شدن V_{B_1} مقدار V_{C_1} کم شده و V_{C_2} زیاد می‌شود. (بین خروجی‌های V_{C_1} و V_{C_2} اختلاف فازی برابر با ۱۸۰ درجه وجود دارد)

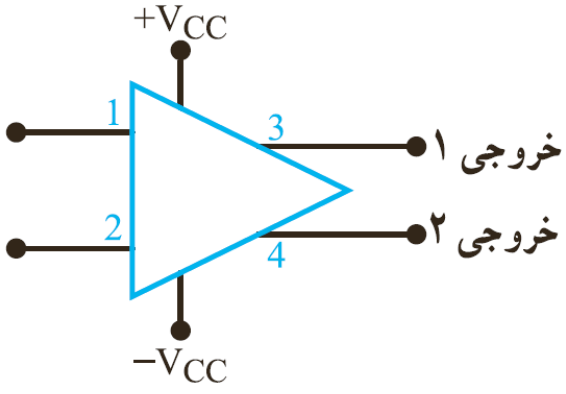
با قرار دادن پتانسیومتری در مدار می‌توان با تغییر R_P مدار را به حالت تعادل درآورد.

پس در نتیجه با زیاد کردن V_{B_1} مقدار V_{C_1} کم شده و V_{C_2} زیاد می‌شود.

به دلیل اختلاف ذاتی موجود در h_{f_e} ترانزیستورها، عدم تقارن بین دو قسمت مدار وجود دارد.در بعضی مدارات به جای R_E از یک منبع جریان استفاده می‌کنند.

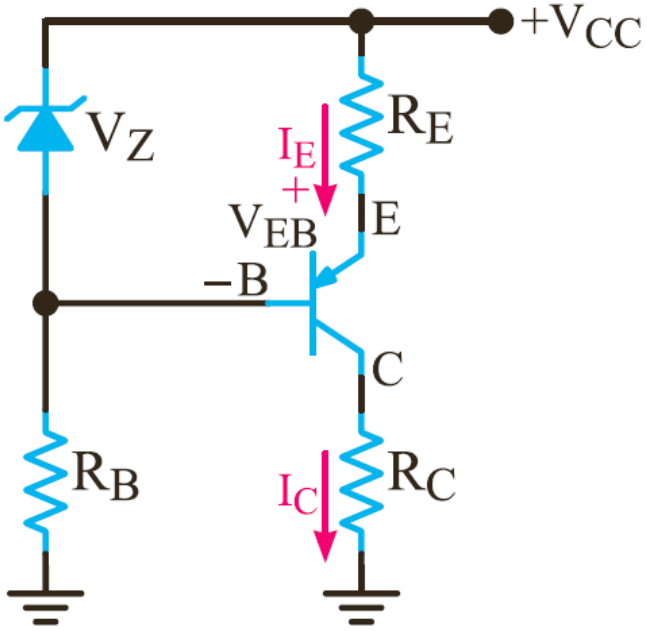


شمای فنی تقویت کننده تفضلی:



مدار منبع جریان

منبع جریان مداری است که در آن جریان خروجی به مقاومت بار بستگی ندارد و تحت شرایطی، جریان بار همواره ثابت است. شکل زیر مدار یک منبع ساده ترانزیستوری است.

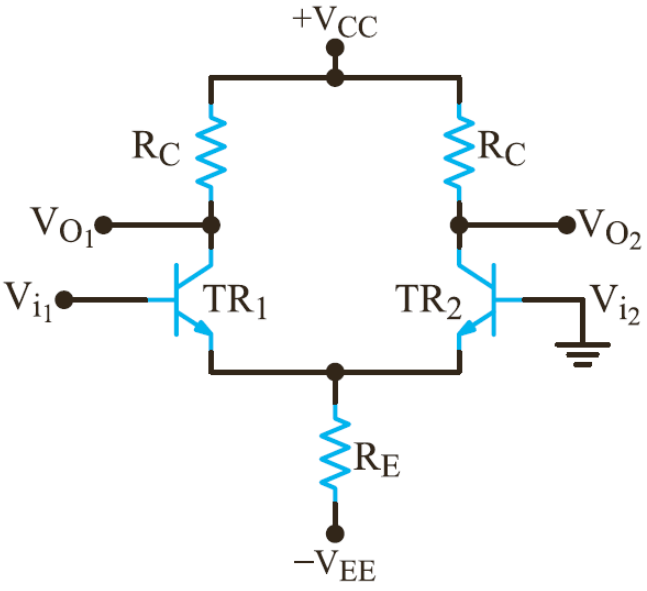


$$V_{R_E} = R_E I_E = V_Z - V_{EB}$$

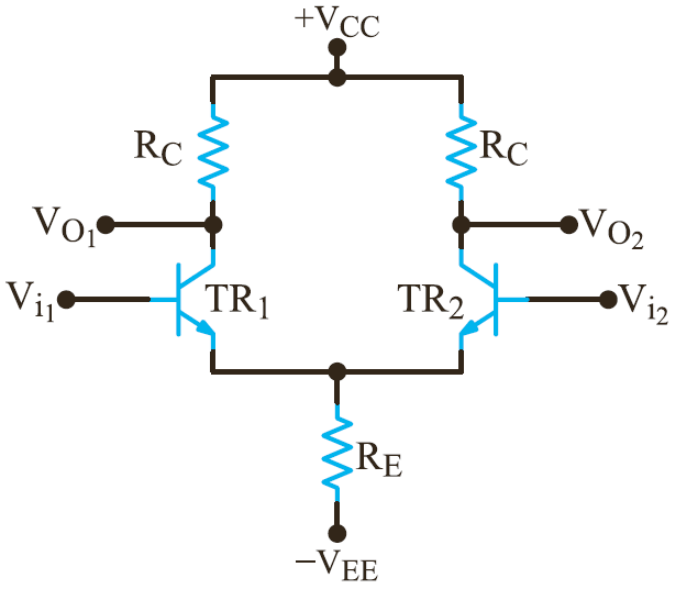
بررسی تقویت کننده تفاضلی

یک تقویت کننده تفاضلی در چهار حالت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

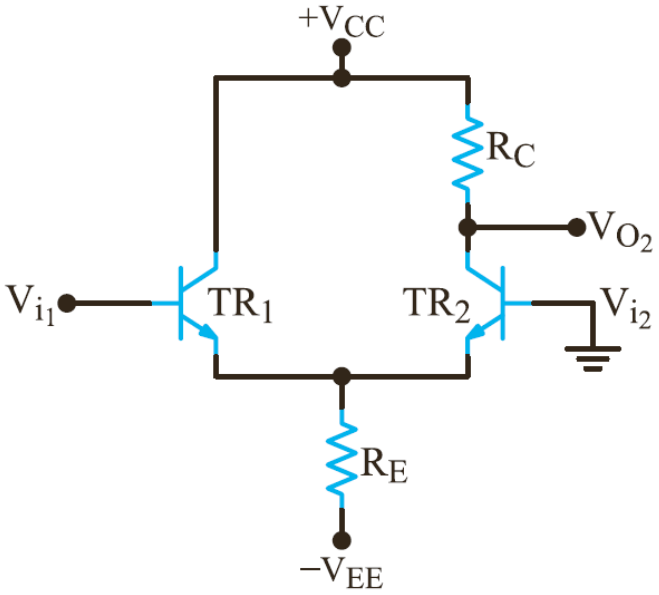
الف) یک ورودی دو خروجی ،



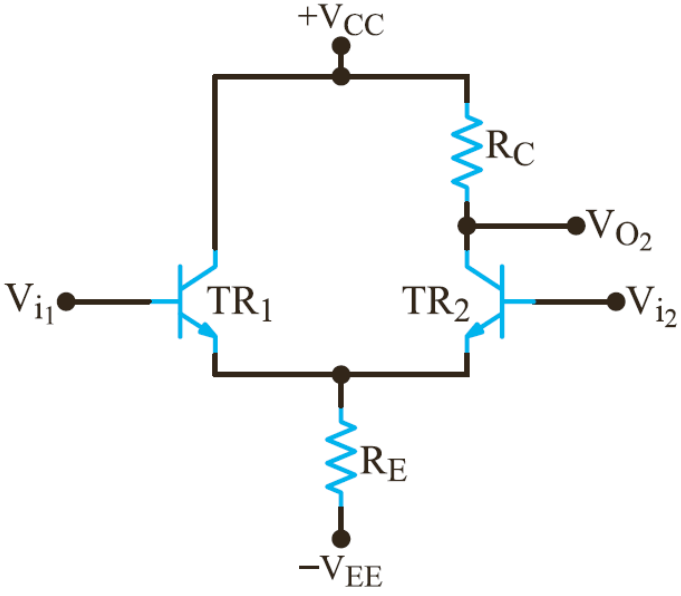
ب) دو ورودی دو خروجی



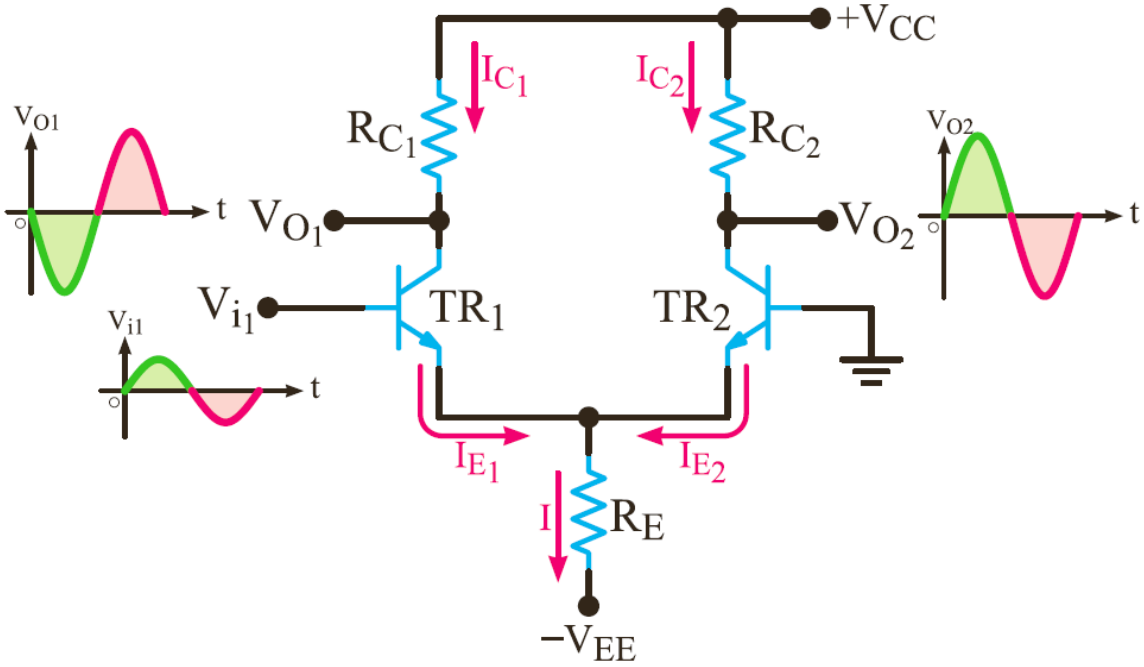
ج) یک ورودی یک خروجی

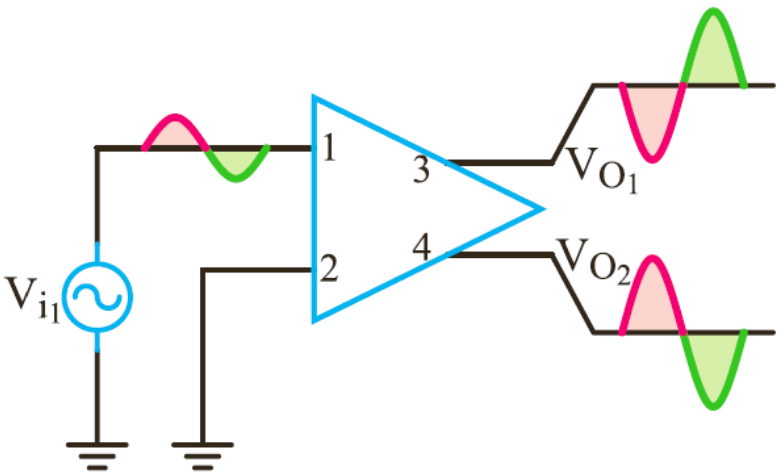


د) دو ورودی ویک خروجی



تقویت کننده تفاضلی با یک ورودی و دو خروجی





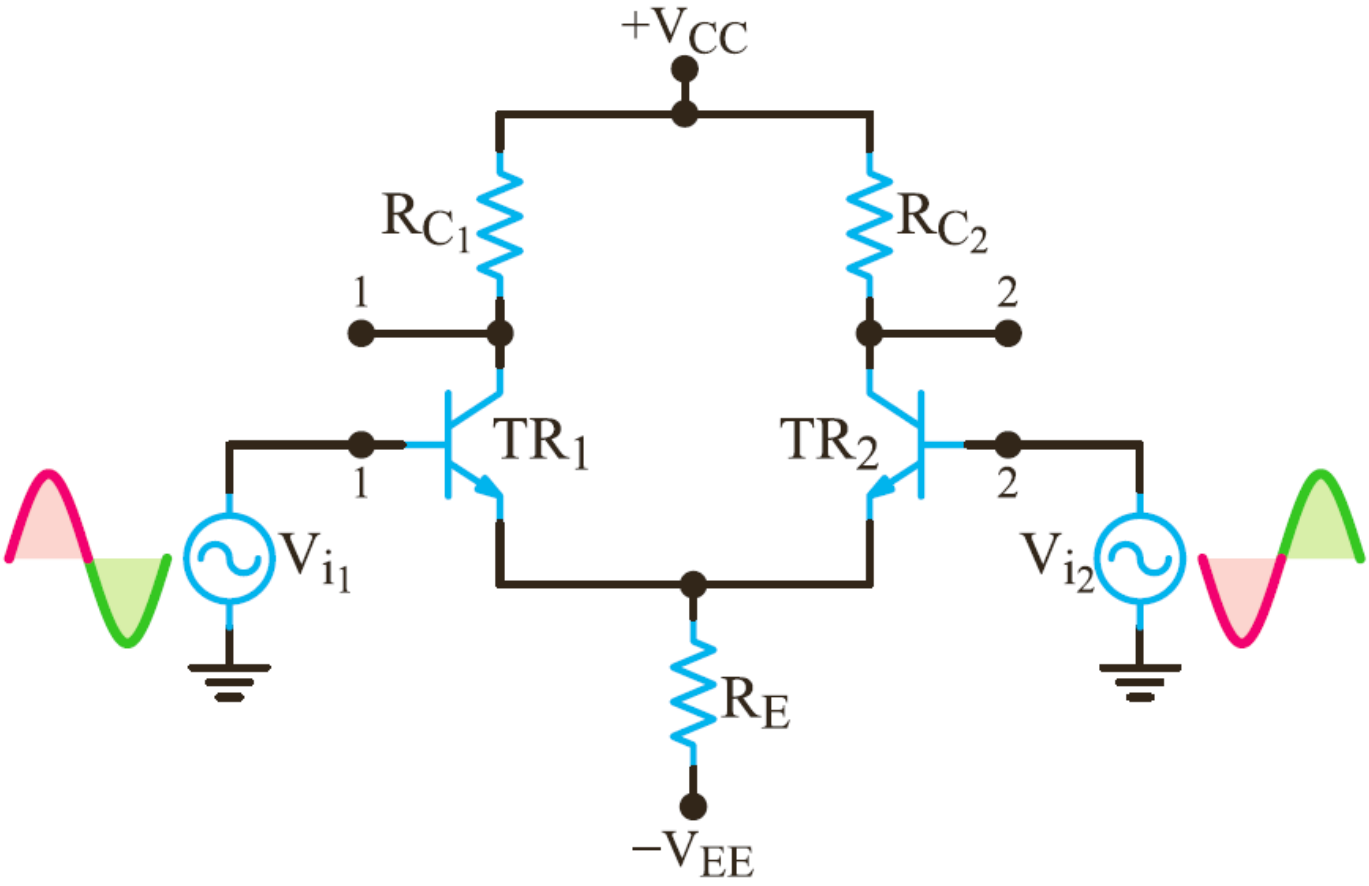
چون خروجی (۱) از کلکتور T_{R_1} دریافت شده است، T_{R_1} به صورت امیتر مشترک عمل می‌کند، پس خروجی V_{O_1} با سیگنال V_{i_1} ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارند

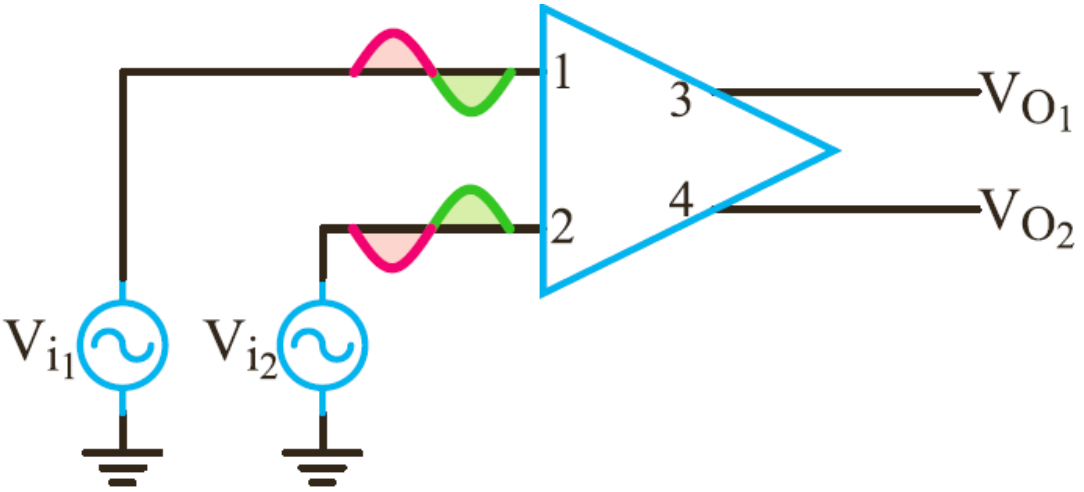
چون بیس T_{R_2} به زمین متصل است، سیگنال روی T_{R_2} به عنوان ورودی عمل می‌کند و از طرفی چون خروجی V_{O_2} را از کلکتور T_{R_2} در یافت می‌کنیم این ترانزیستور حالت بیس مشترک را به خود می‌گیرد پس سیگنال V_{O_2} و V_{i_1} هم فاز هستند.

از مدار تقویت کننده تفاضلی با یک ورودی و دو خروجی می‌توان به عنوان مدار جد اکننده فاز استفاده کرد.

تقویت کننده تفاضلی با دو ورودی و دو خروجی با عملکرد ورودی تفاضلی

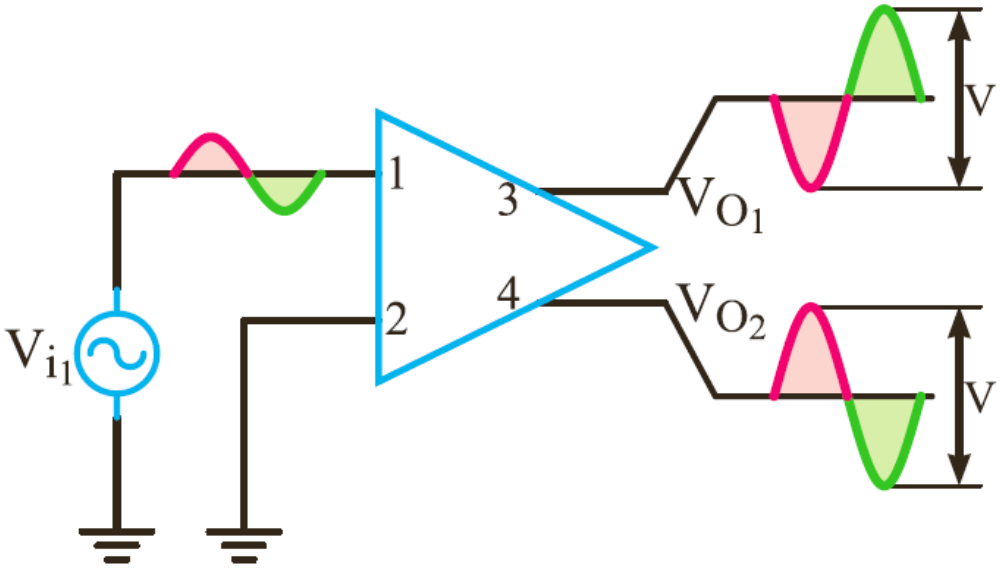
کاربرد معمول حالت دو ورودی وقتی است که دو سیگنال ورودی در فاز مخالف نسبت به هم و با دامنه مساوی باشند.



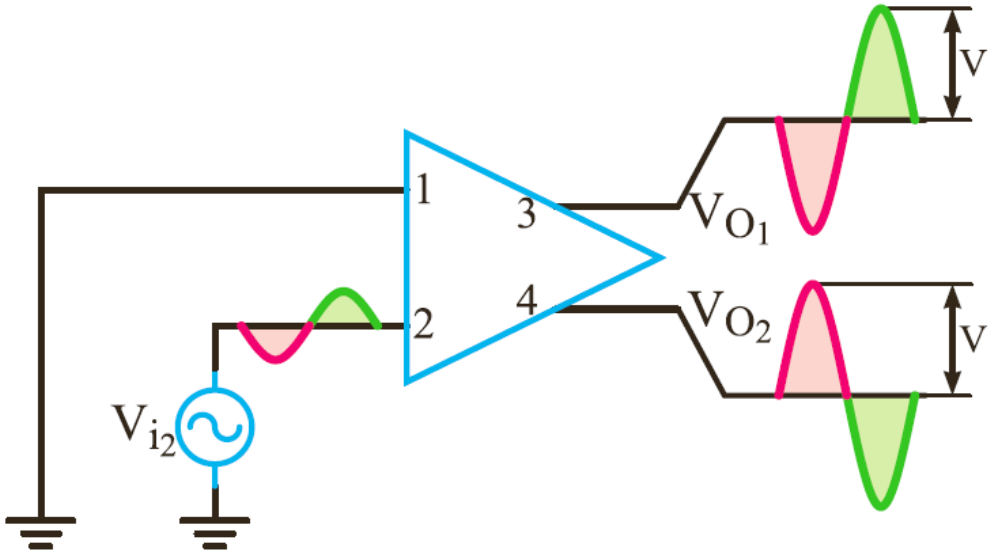


نحوه تاثیر هر یک از ورودی ها رو خروجی در شکل زیر نشان داده شده است.

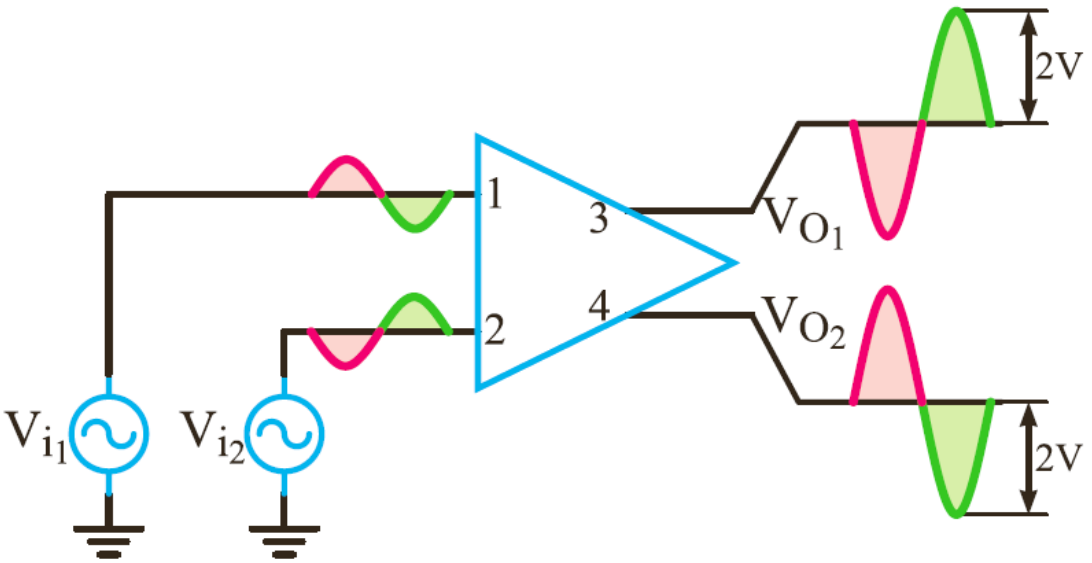
سیگنال به ورودی یک اعمال شود



سیگنال به ورودی دو اعمال شود.



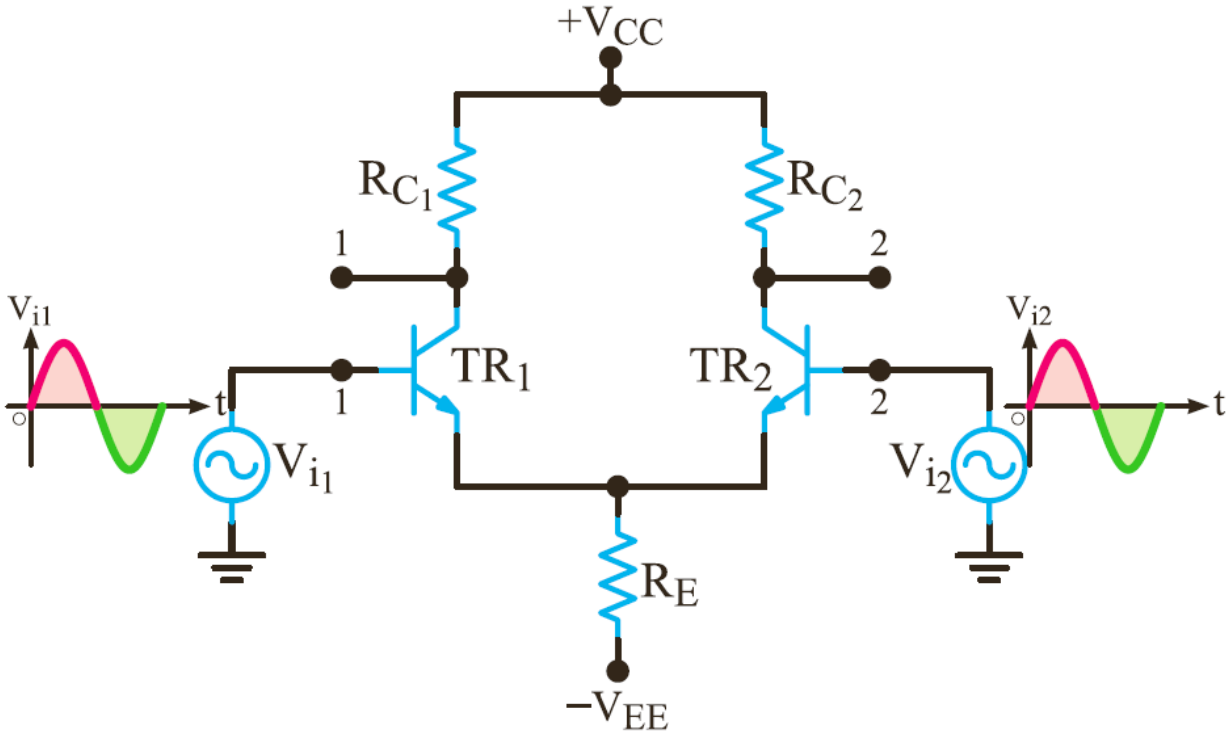
تقویت کننده تفاضلی با عملکرد ورودی تفاضلی

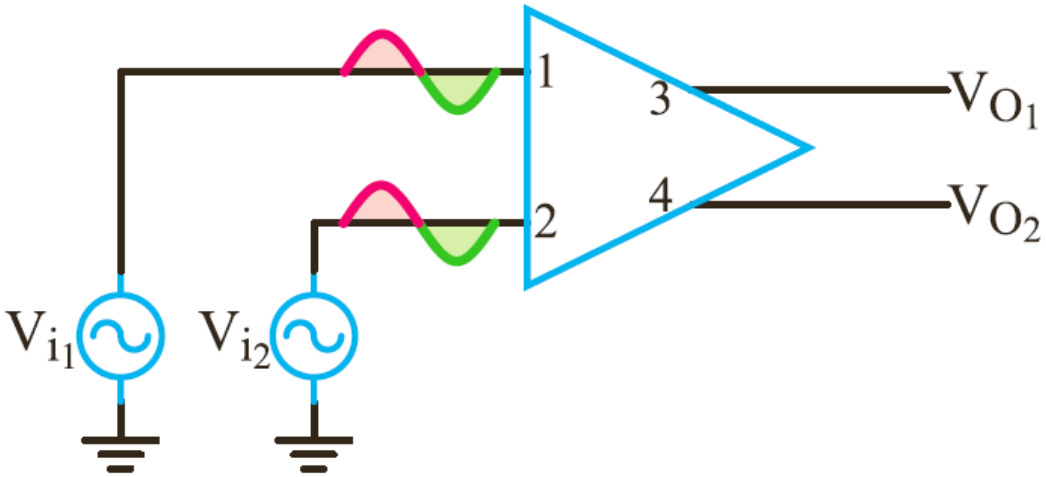


در صورتی که ورودی V_{i_1} و V_{i_2} با دامنه برابر و فاز مخالف باشند سیگنال‌های خروجی مربوط به دو ورودی با یکدیگر جمع می‌شوند و خروجی های V_{O_1} و V_{O_2} دو سیگنال با فاز مخالف نسبت به هم و دامنه مشخص مثلا ۲ ولت دریافت خواهد شد که این حالت را حالت تفاضلی می‌نامند. مقدار دامنه خروجی ها بستگی به مقدار دامنه ورودی‌ها دارد.

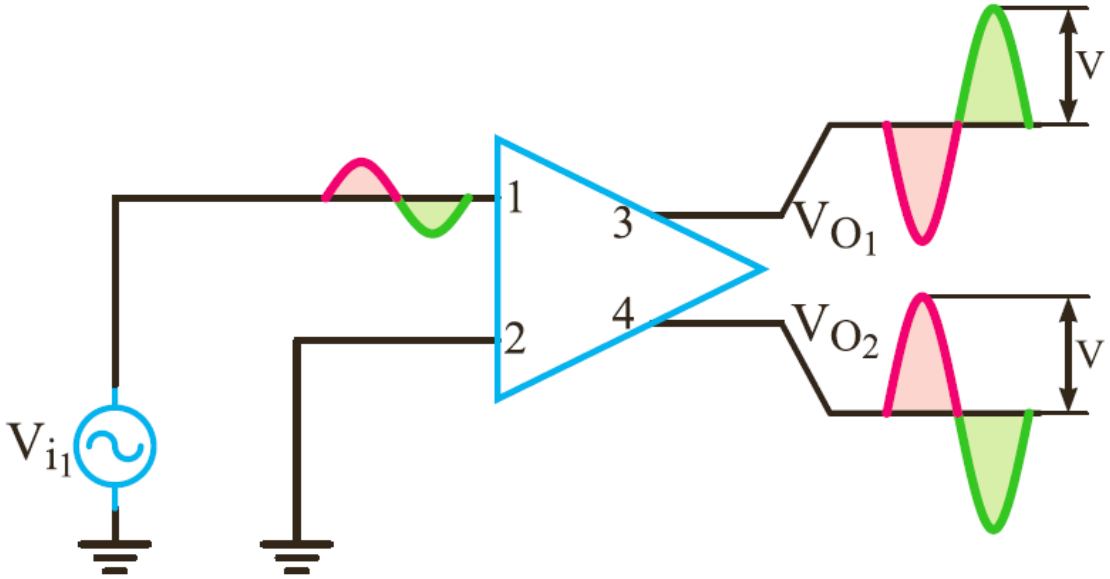
تقویت کننده تفاضلی در حالت سیگنال مشترک

در این حالت دو سیگنال با فاز، دامنه و فرکانس یکسان مساوی به دو ورودی تقویت کننده داده می‌شود.

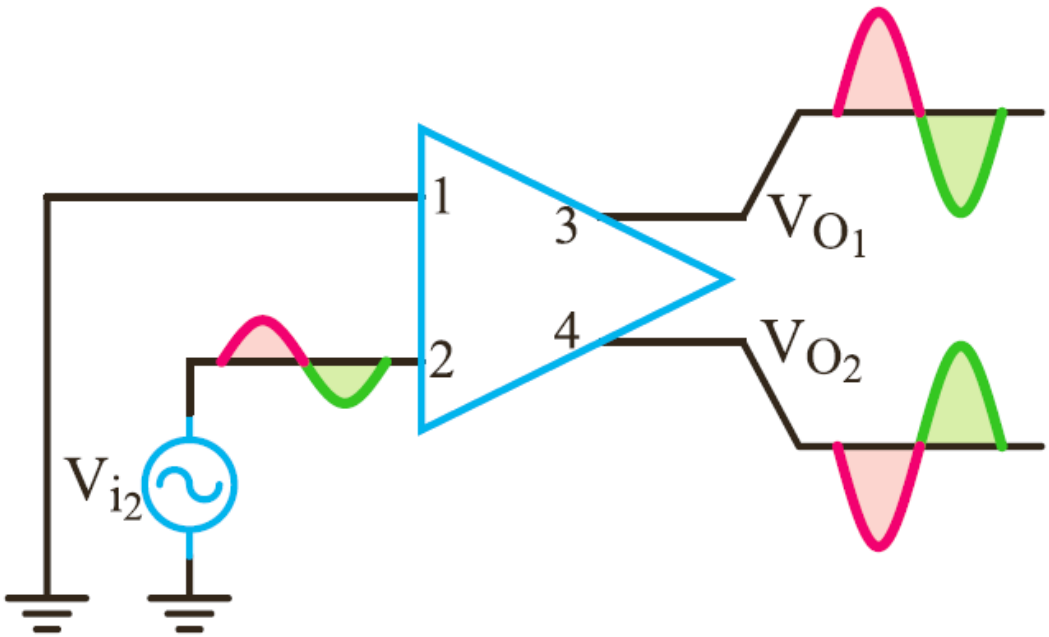




شکل موج خروجی‌ها به ازای ورودی (۱)



شکل موج خروجی‌ها به ازای ورودی(۲)

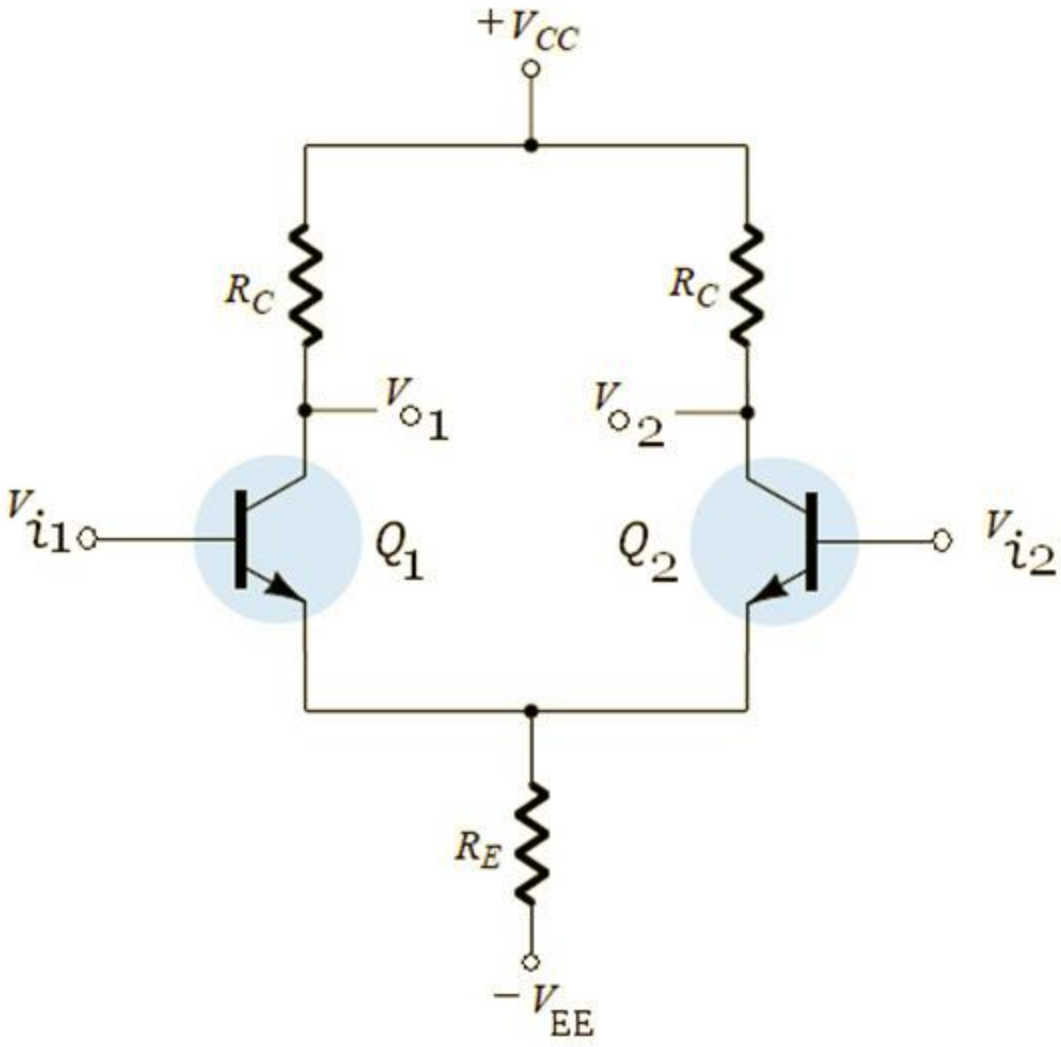


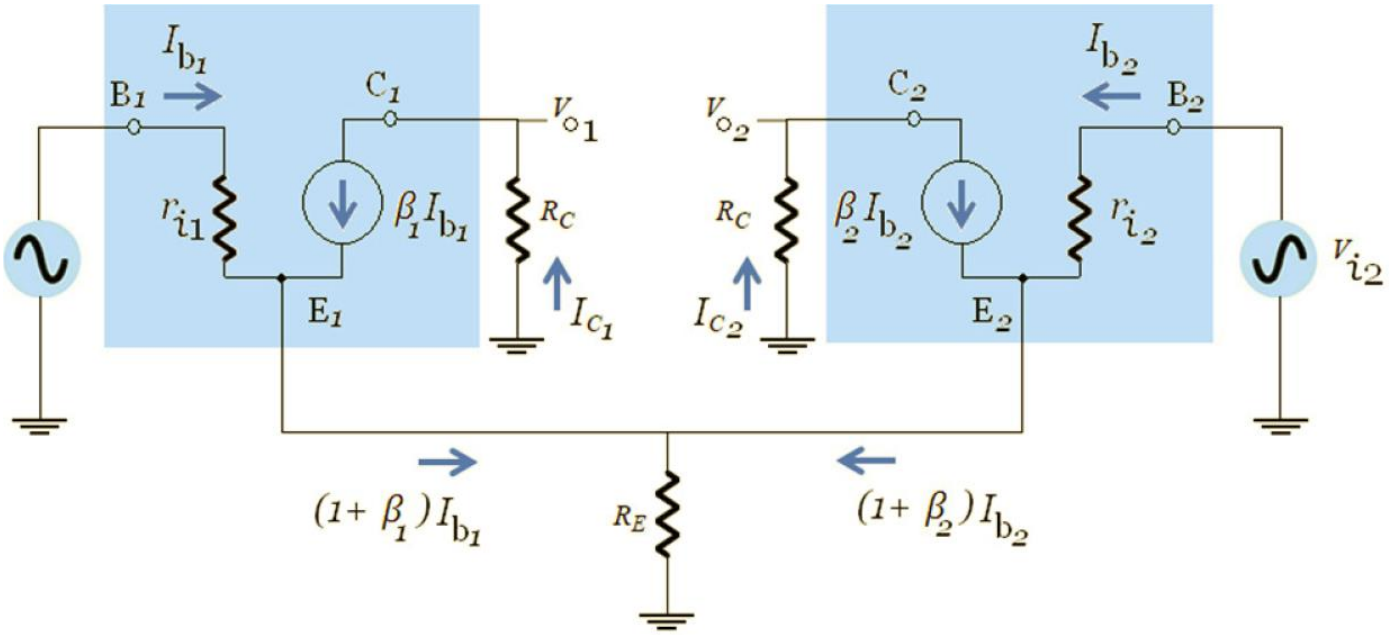
همانگونه که مشاهده می‌کنید سیگنال‌های V_{o_1} و V_{o_2} هر یک جمع دو سیگنال قرینه است، که هر یک در اثر ولتاژ های V_{i_1} و V_{i_2} حاصل می‌شود، لذا V_{o_1} و V_{o_2} مساوی صفر است.

حالت سیگنال مشترک یکی از موارد کاربردی و محاسن تقویت کننده دیفرانسیلی به شمار می‌آید زیرا سیگنال های مشترک که به وسیله پارازیت، تغییرات ولتاژ منبع تغذیه و درجه حرارت پدید می‌آیند و تغییرات آن‌ها در هر دو ترانزیستور یکی است، کاملا حذف می‌شود.

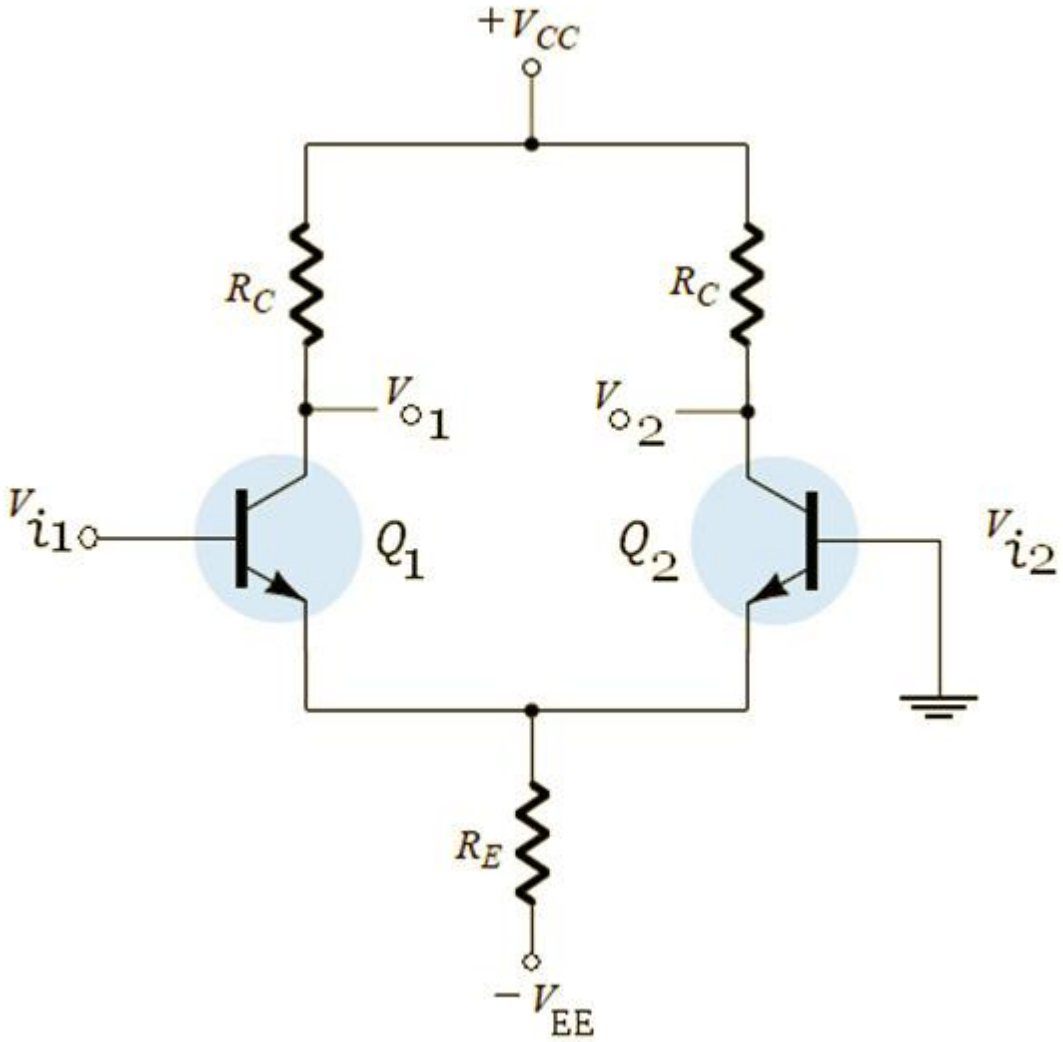
نسبت بهره حالت تفاضلی به حالت مد مشترک را ضریب حذف سیگنال مشترک CMRR می‌نامند، که هر قدر CMRR بزرگتر باشد بهره حالت تفاضلی بیشتر و بهره حالت مد مشترک کم‌تر است. در این حالت تقویت کننده تفاضلی به حالت ایده‌آل نزدیکتر می‌شود.

مدل سیگنال کوچک تقویت کننده تفاضلی:



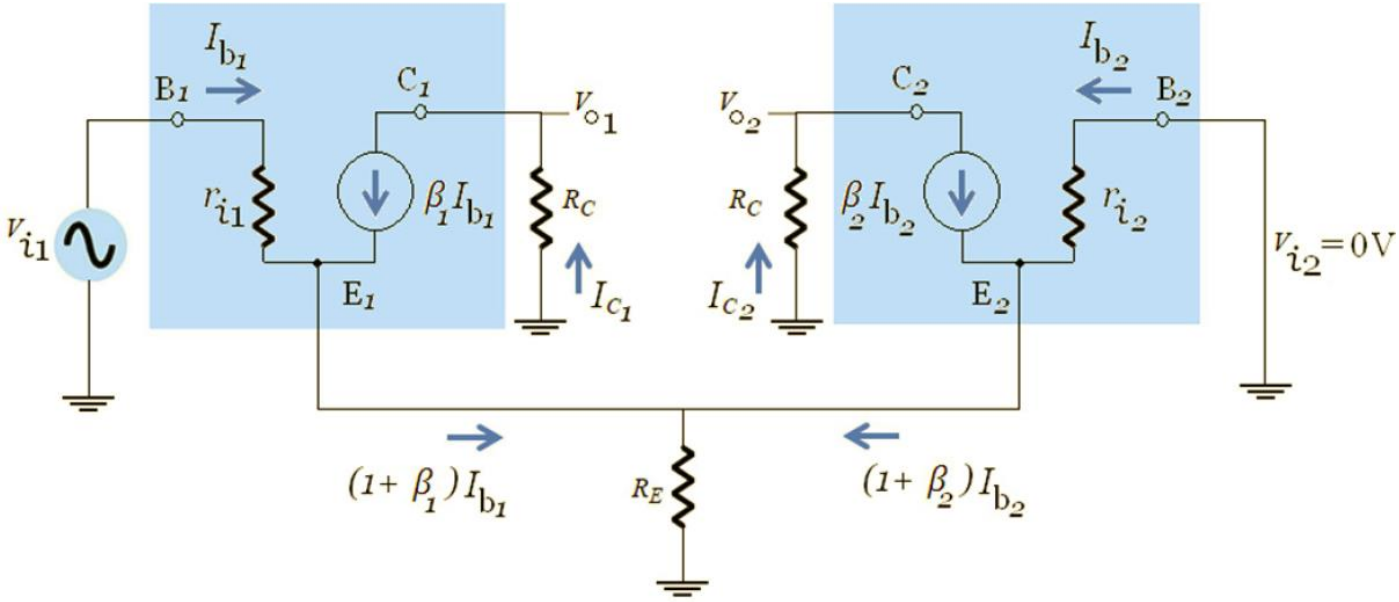


بهره ولتاژ AC با ورودی V_{i_1}



$$I_{b_1} = I_{b_2} = I_b$$

$$r_{i_1} = r_{i_2} = r_i = \beta r_e \quad , \quad R_E \approx \infty$$

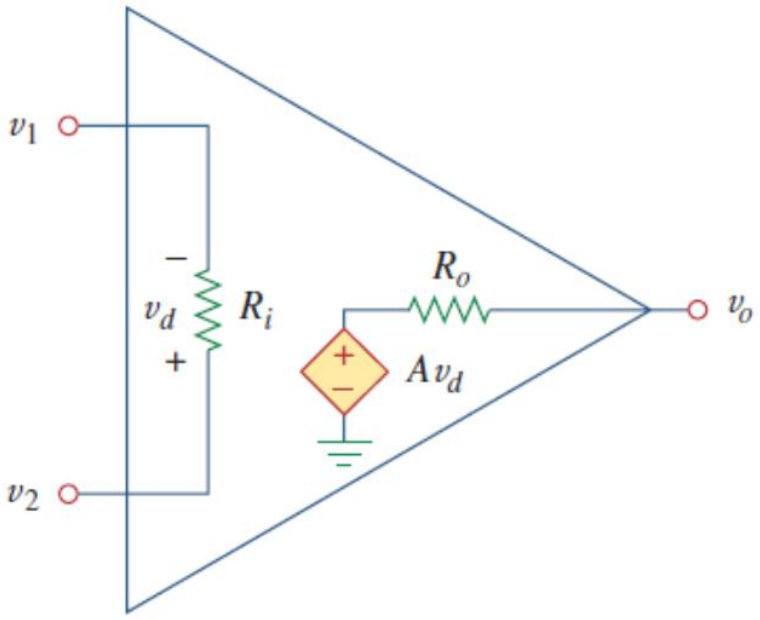


$$I_b = \frac{V_i}{2\beta r_e} \quad , \quad I_c = \frac{V_i}{2r_e} \quad , \quad V_o = \frac{R_C}{2r_e} V_i$$

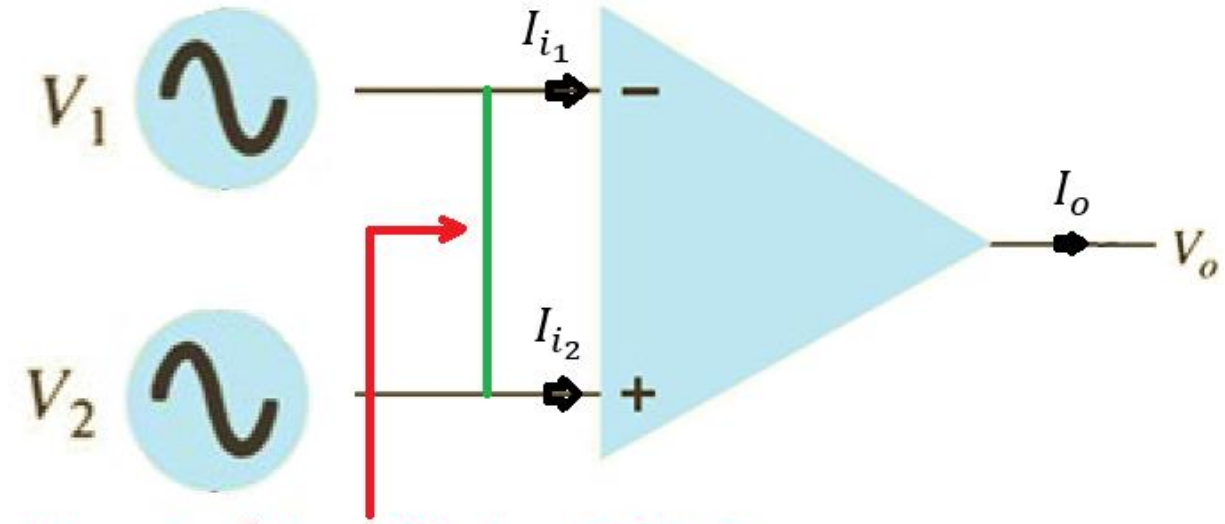
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_C}{2r_e} \quad , \quad (V_{i_1}) \text{ بهره یک ورودی}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_d} = \frac{R_C}{r_e} \quad , \quad (V_{i_1}, V_{i_2}) \text{ بهره دو ورودی}$$

حال به تقویت کننده عملیاتی می‌پردازیم.



$$V_d = V_+ - V_- \quad , \quad R_i = \infty$$

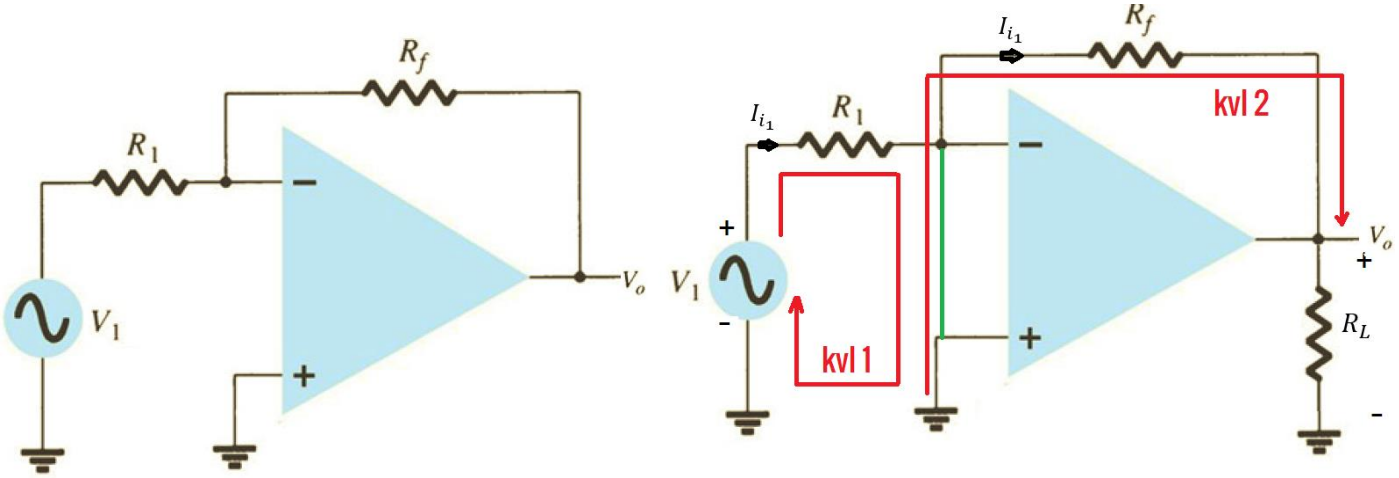


$$I_{i_1} = I_{i_2} = 0$$

جریان خروجی آپ امپ I_o می‌تواند هر مقداری یا هر جهتی داشته باشد که مدار بستگی دارد.

۱) مدار وارون گر

یعنی در خروجی ضریبی منفی از V_i خواهیم داشت.



$$kvl1:\ -V_i + I_{i_1}R_1 = 0 \Longrightarrow I_{i_1} = \frac{V_i}{R_1}$$

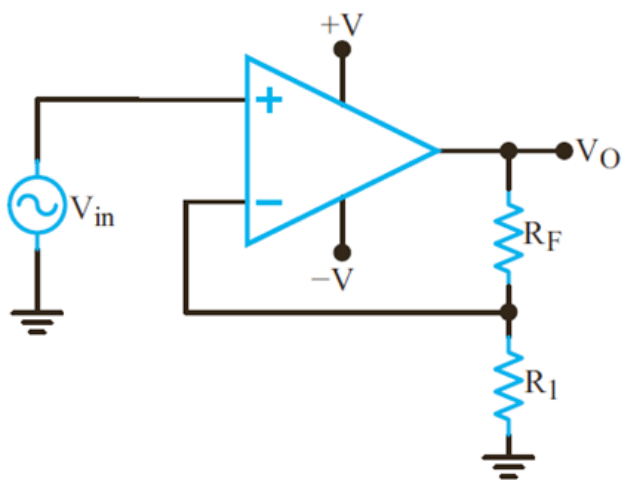
$$kvl2: R_f I_{i_1} + V_o = 0 \Longrightarrow R_f\left(\frac{V_i}{R_1}\right) + V_o = 0$$

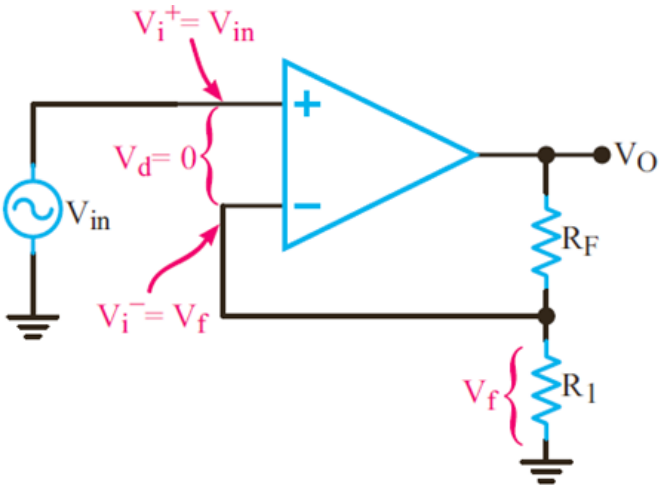
$$\Longrightarrow V_o = -R_f\left(\frac{V_i}{R_1}\right)$$

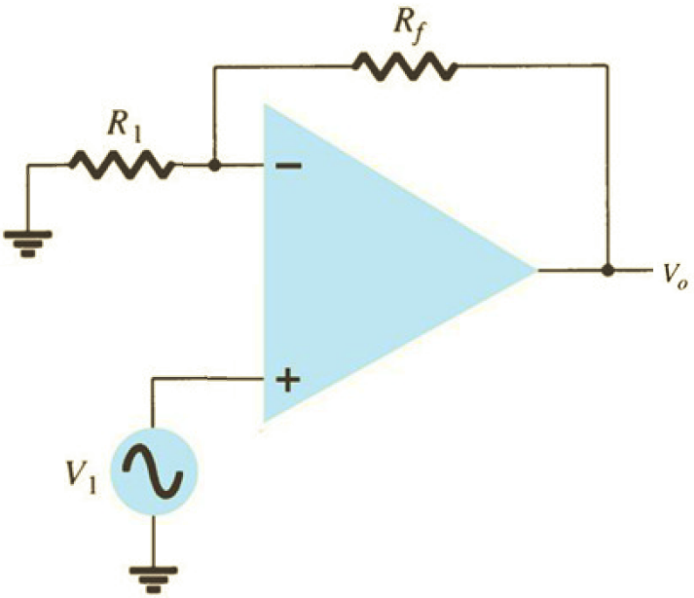
$$\Longrightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_f\left(\frac{V_i}{R_1}\right)}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

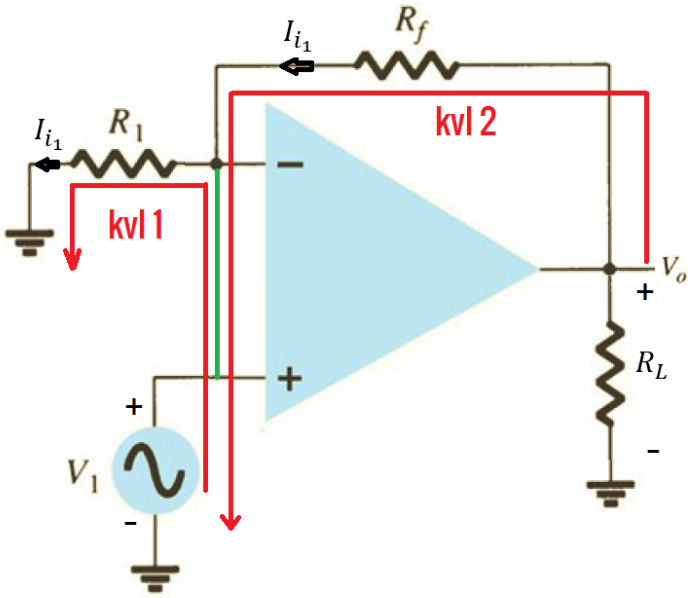
۲) مدار ناوارون گر

ولتاژ فیدبک همان ولتاژ دو سر R_1 است که از رابطه زیر بدست می‌آید.







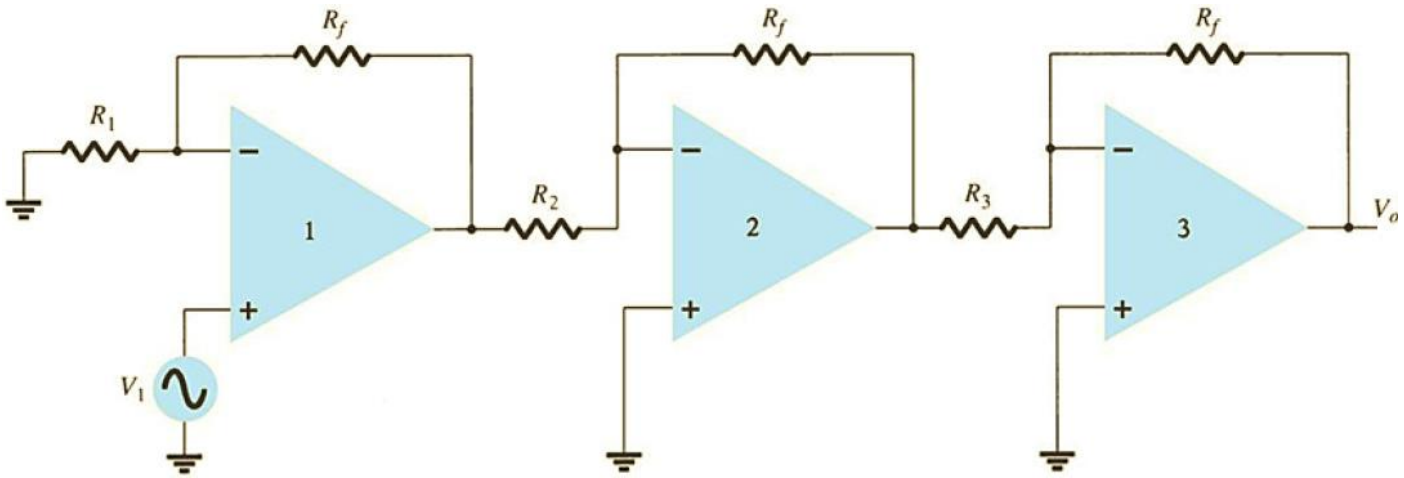


$$kvl1:\ -V_i + I_{i_1}R_1 = 0 \Longrightarrow I_{i_1} = \frac{V_i}{R_1}$$

$$kvl2:\ -V_o + R_f I_{i_1} + R_1 I_{i_1} = 0 \Longrightarrow -V_o + R_f\left(\frac{V_i}{R_1}\right) + V_i = 0$$

$$\Longrightarrow V_o = R_f\left(\frac{V_i}{R_1}\right) + V_i \Longrightarrow V_o = V_i\left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right)$$

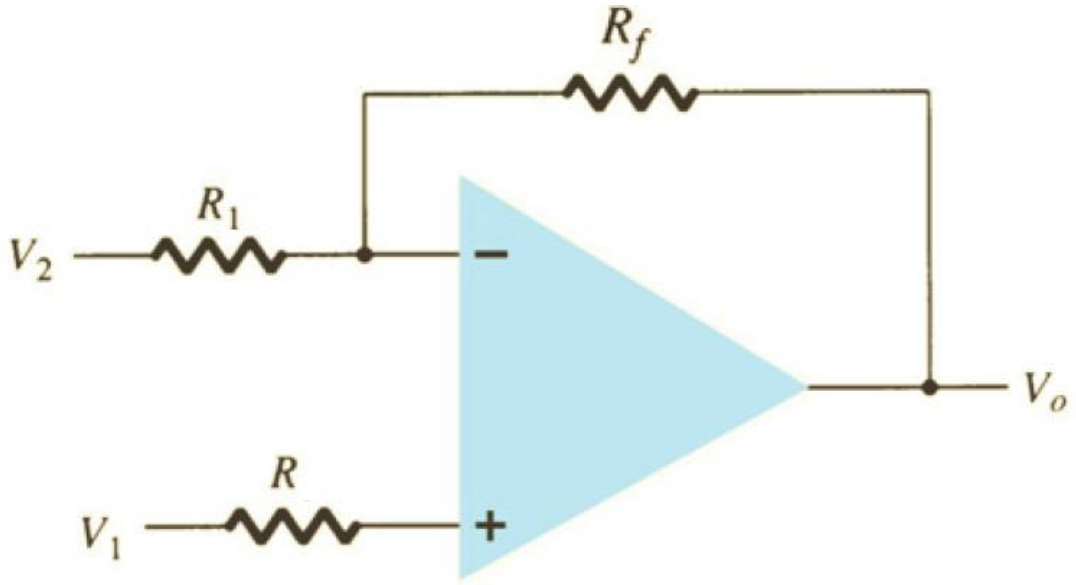
$$\Longrightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_i\left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right)}{V_i} = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right)$$



$$\Longrightarrow A_v = A_1 A_2 A_3$$

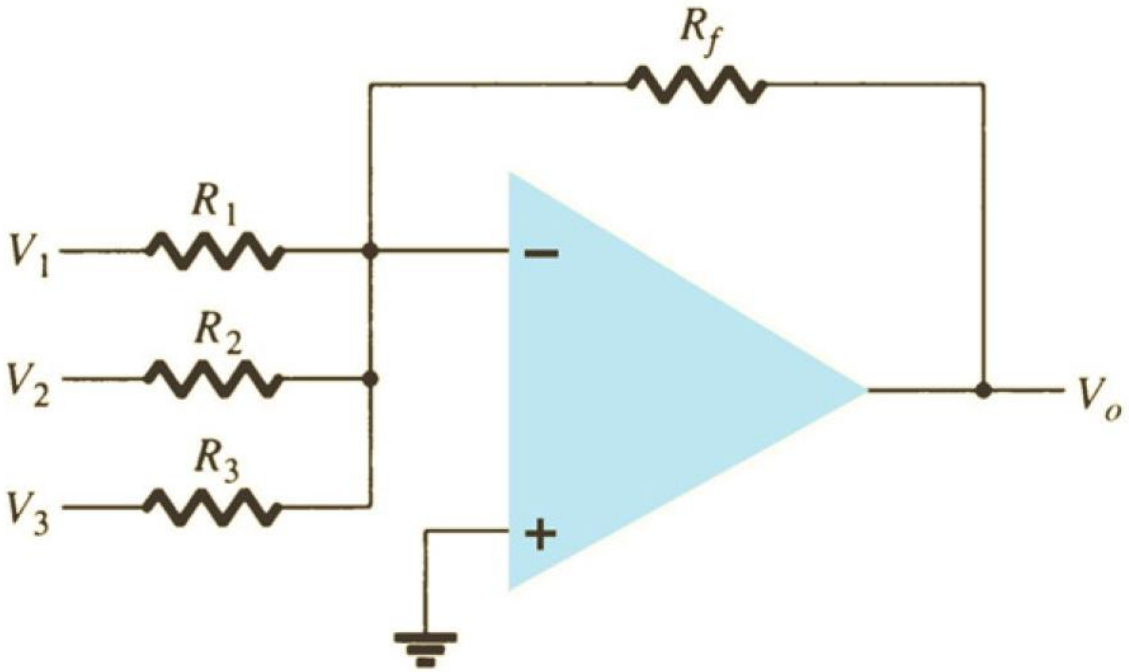
$$\Longrightarrow A_v = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right)\left(-\frac{R_f}{R_2}\right)\left(-\frac{R_f}{R_3}\right)$$

۳) مدار تفریق کننده

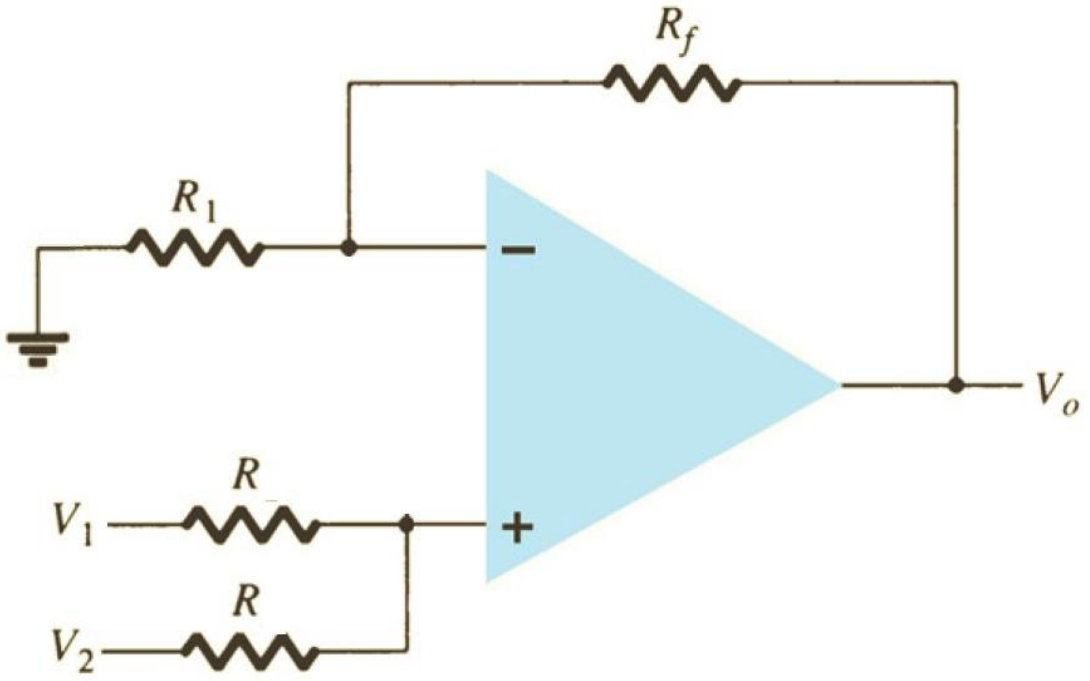


$$V_o = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right) V_1 + \left(-\frac{R_f}{R_1}\right) V_2$$

۴) مدار جمع کننده

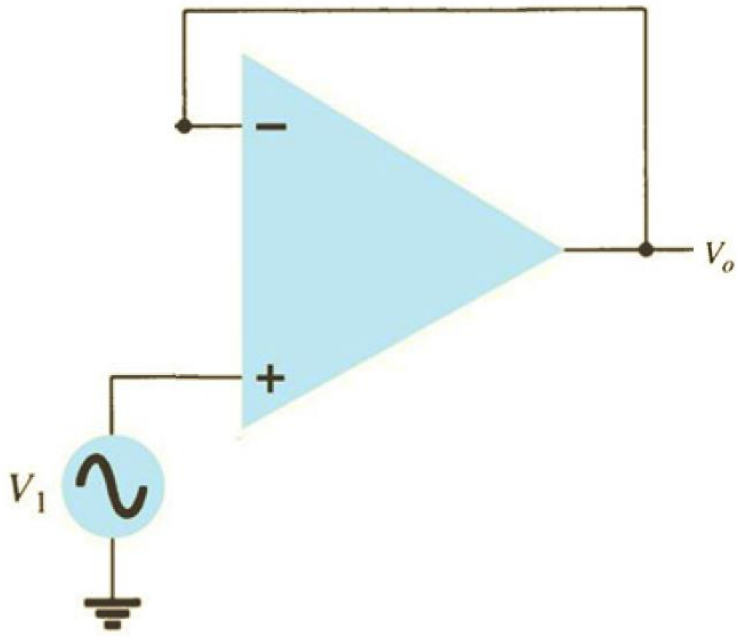


$$V_o = -\left(\left(\frac{R_f}{R_1}\right)V_1 + \left(\frac{R_f}{R_2}\right)V_2 + \left(\frac{R_f}{R_3}\right)V_3\right)$$



$$V_o = \frac{1}{2}\left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right)(V_1 + V_2)$$

۵) بافر

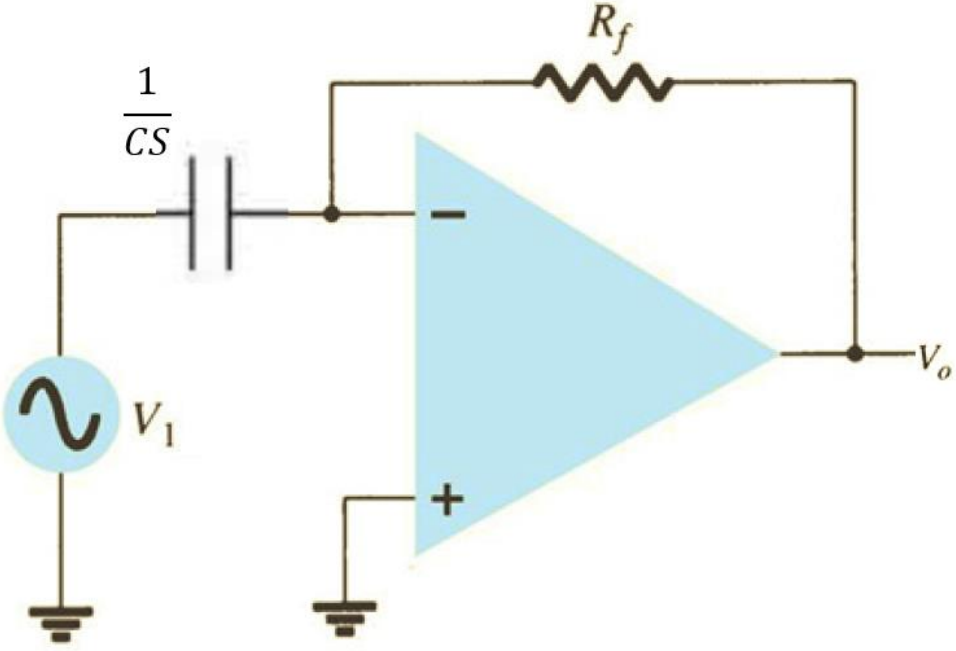


ولتاژ ورودی به خروجی منتقل می‌شود.

$$V_i = V_o$$

مدار تقسیم ولتاژ این عیب را داردکه قسمتی از ولتاژ ورودی به V_o منتقل نمی‌شود.

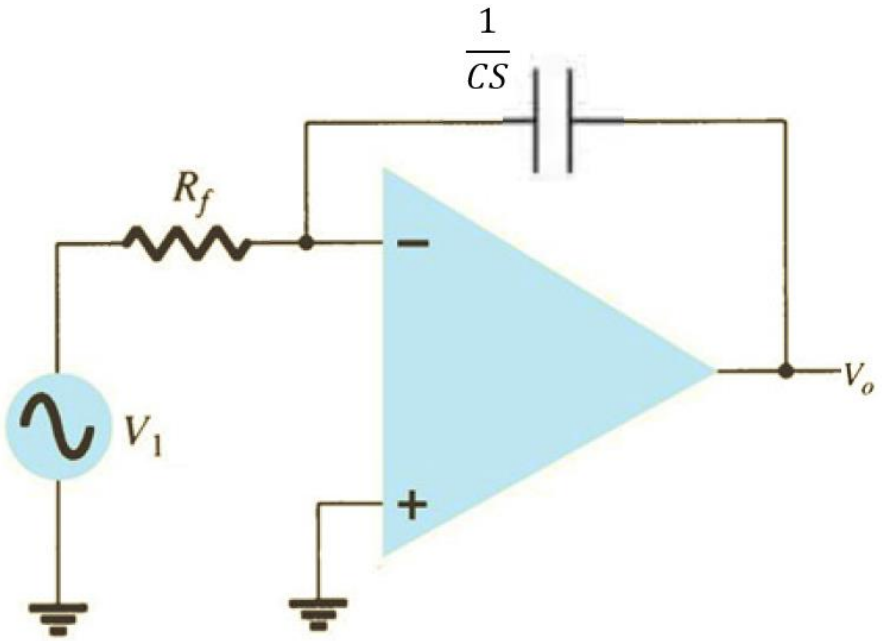
۶) مشتق گیر



$$\Longrightarrow V_o = -R_f \cdot CS \cdot V_i$$

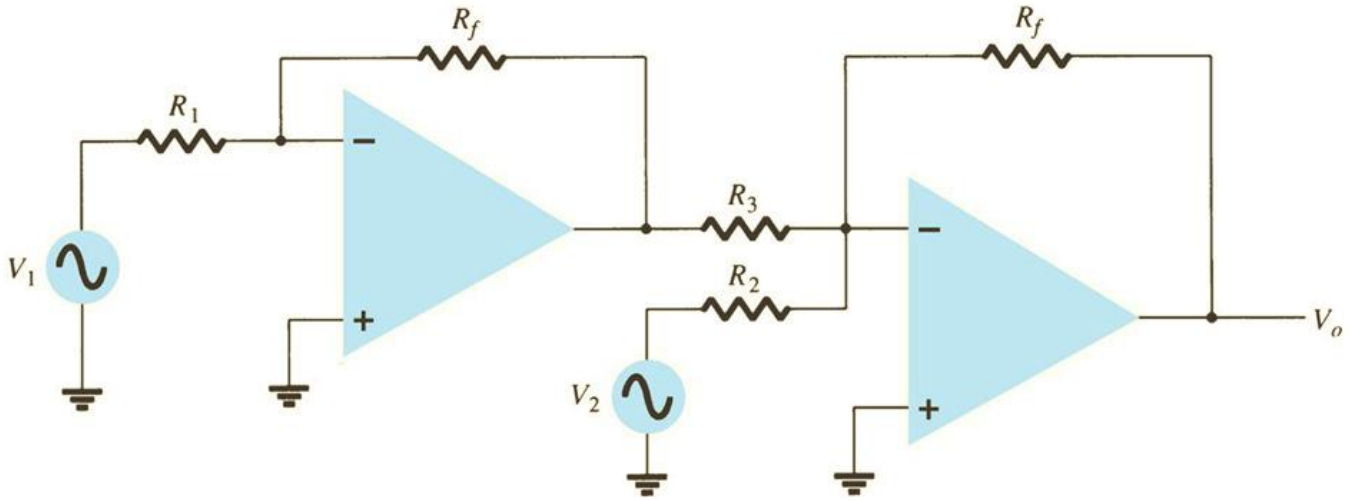
$$\Longrightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{\frac{1}{CS}} = -R_f \cdot CS$$

۷) انتگرال گیر

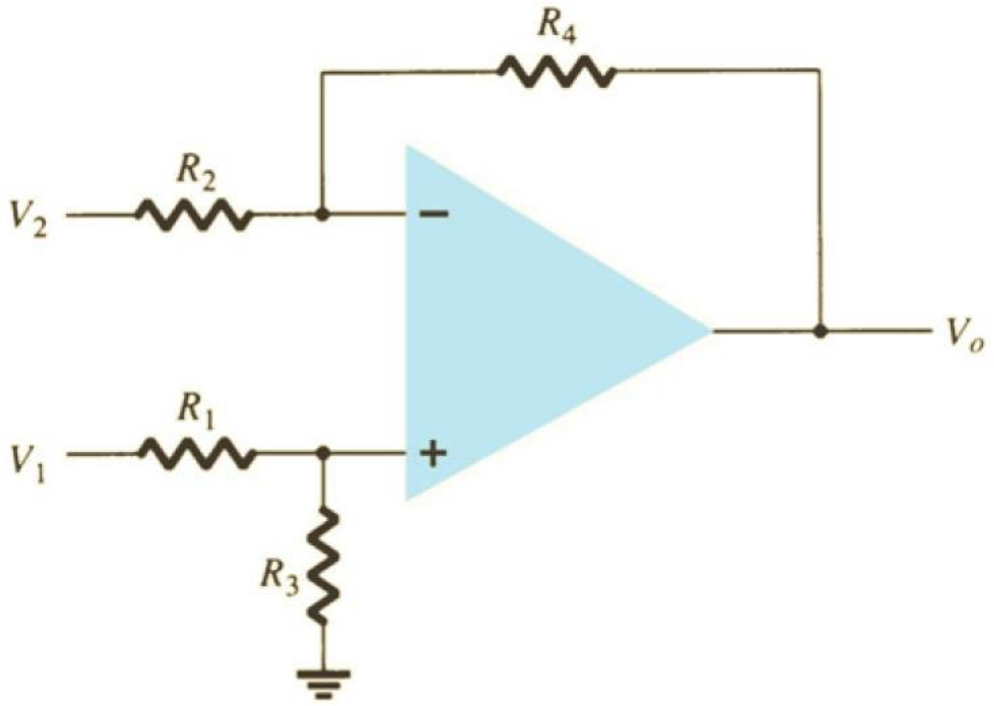


$$\Longrightarrow V_o = \frac{R_f}{CS} V_i = \frac{R_f}{CS} \times \frac{1}{S} \times V_i$$

$$\Longrightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{R_f}{CS} V_i}{V_i} = \frac{R_f}{CS} = \frac{R_f}{CS} \times \frac{1}{S}$$



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



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

پایان جلسه هفدهم

روزگار خوشی را برای شما آرزومندم.

محمد اعرابیان