

مدارهای الکتریکی و الکترونیکی

فصل سیزدهم: تقویت کننده عملیاتی

استاد درس: محمود ممتازپور

ceit.aut.ac.ir/~momtazpour

فهرست مطالب

□ معرفی تقویت کننده عملیاتی

□ مدل دقیق آپامپ

□ مدل ایده آل

□ کاربردهای آپامپ

■ تقویت کننده معکوس کننده

■ تقویت کننده غیر معکوس کننده

■ دنبال کننده ولتاژ (بافر)

■ تقویت کننده چند طبقه

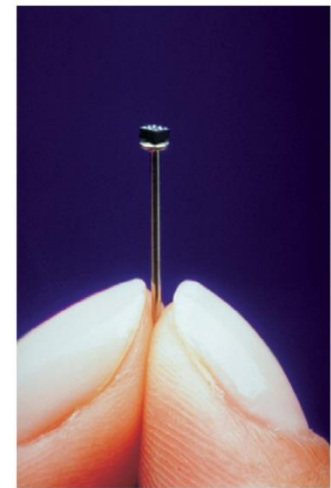
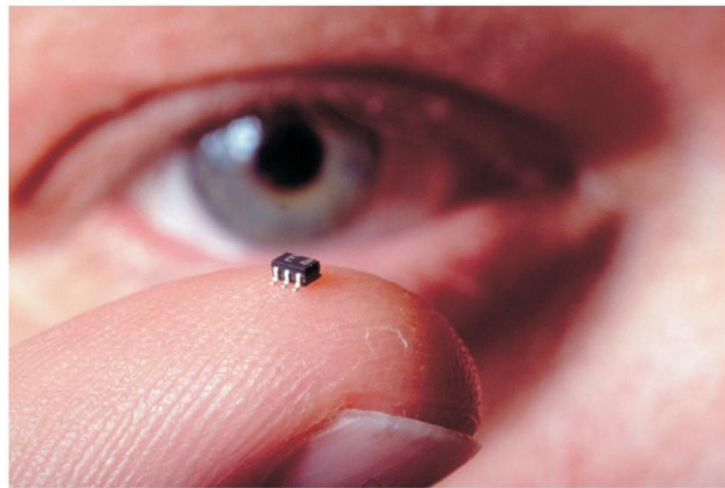
■ منبع ولتاژ و منبع جریان ایده آل

□ مدار مقایسه کننده

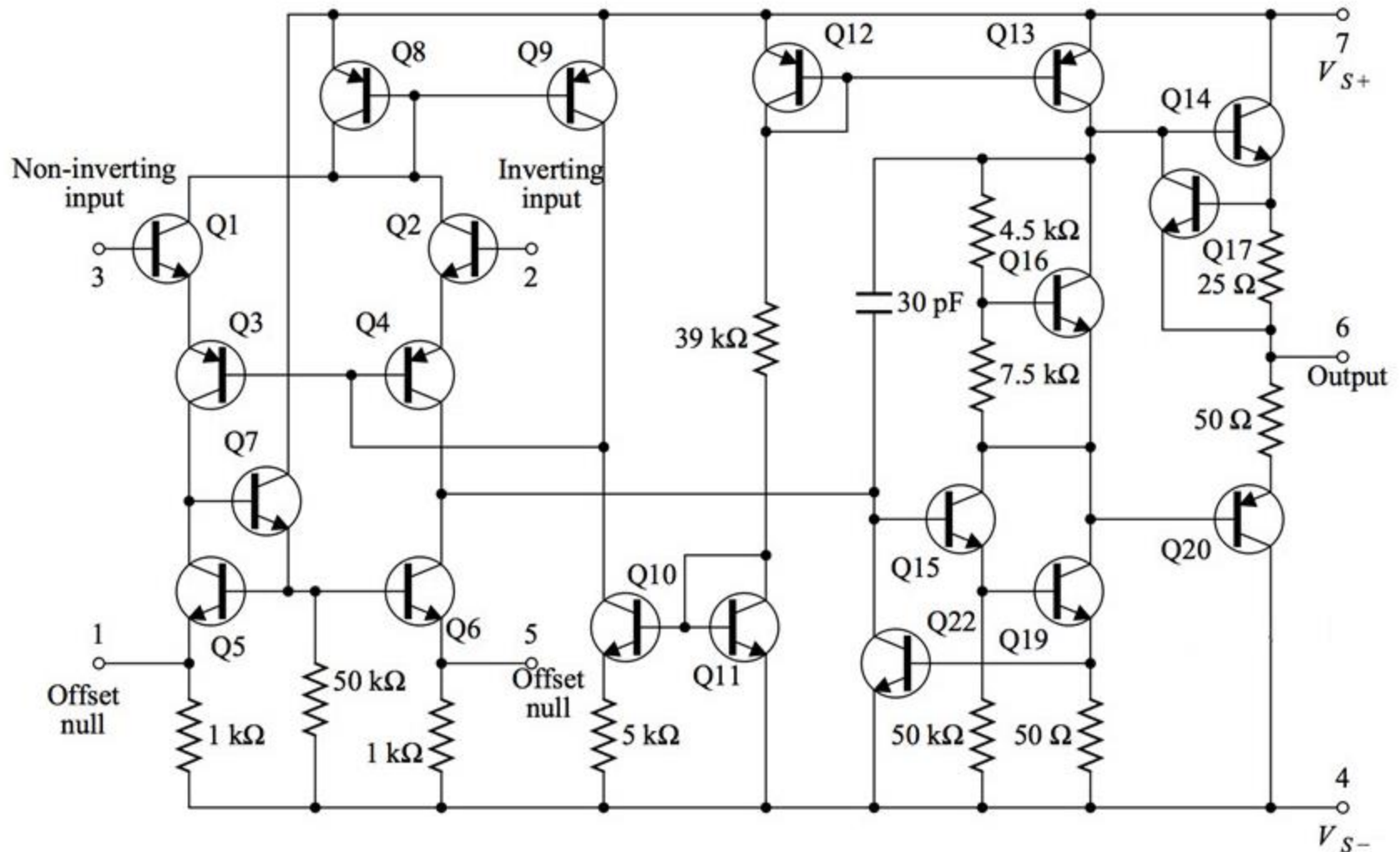
□ چند مثال

□ تقویت‌کننده عملیاتی یا آپ‌امپ، یک مدار مجتمع (IC) است که از آن در کاربردهای متنوع به عنوان یک تقویت‌کننده استفاده می‌شود.

□ قدمت آن به سال 1940 برمی‌گردد، زمانی که از آن در مدارهای محاسباتی آنالوگ برای ساخت جمع‌کننده، تفریق‌کننده، ضرب‌کننده



مدار داخلی یک آپامپ نمونه



سمبل المان آپامپ

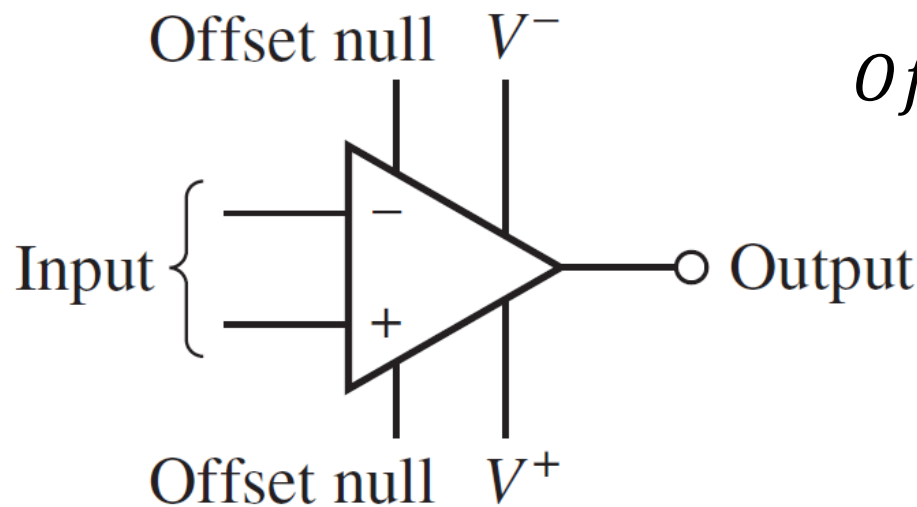
□ یک آپامپ به طور کلی با سمبل زیر نمایش داده می‌شود و دارای پایه‌های زیر است:

□ پایه‌های ورودی: *Input*

□ پایه خروجی: *Output*

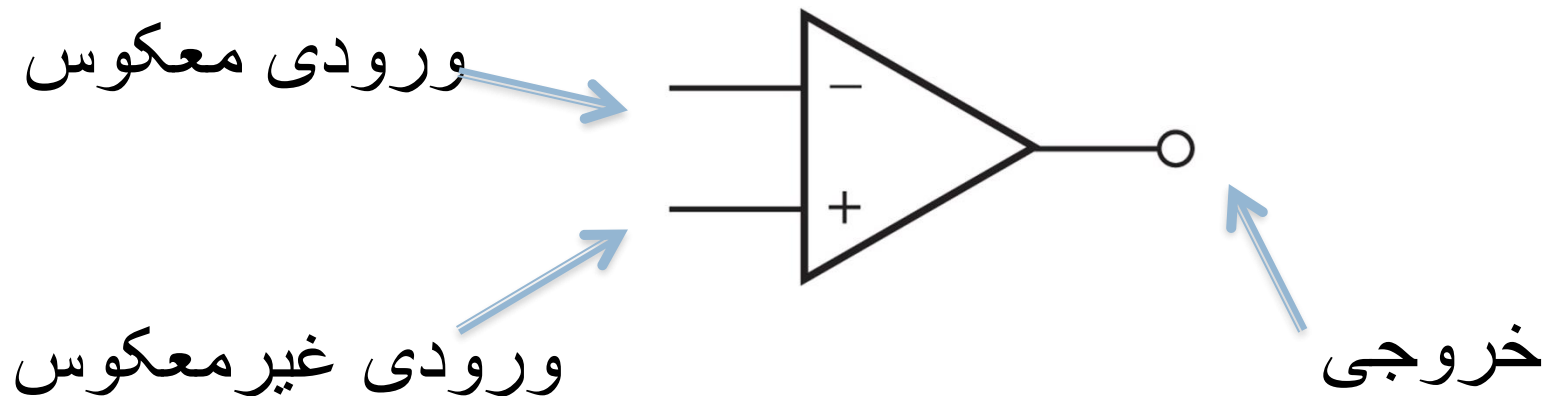
□ پایه‌های منبع تغذیه: V^+ , V^-

□ پایه‌های تنظیم آفست: *Offset*



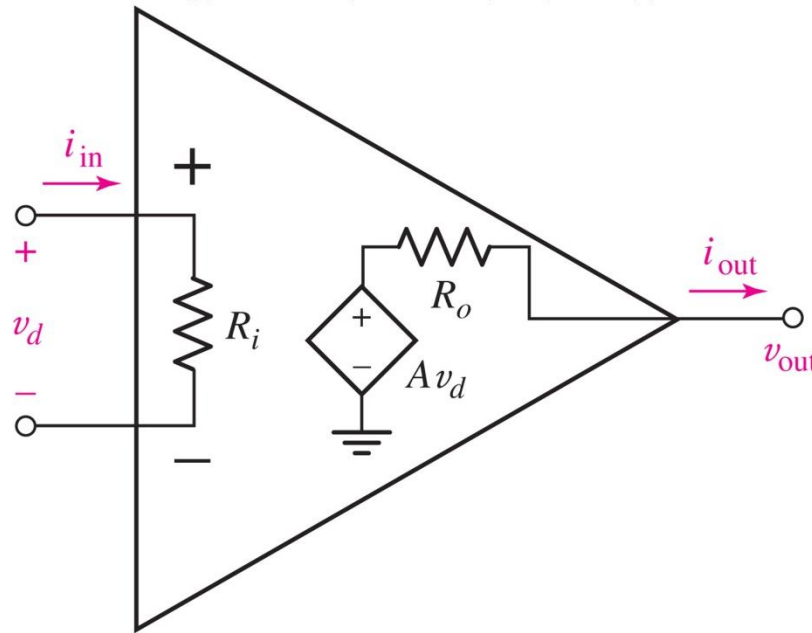
سمبل آپامپ

- بیایید فعلاً تمرکز را بر روی پایه‌های ورودی و خروجی بگذاریم و فرض کنیم پایه‌های دیگر به ولتاژ مناسب وصل شده‌اند.
- آپامپ یک **تقویت‌کننده تفاضلی** است، یعنی تفاضل ورودی‌ها را تقویت می‌کند.



مدل دقیق آپامپ

- یک مدار که به عنوان **تقویت کننده ولتاژ** عمل می کند را می توان با **مدار معادل** زیر مدل کرد.
- این مدل شامل:



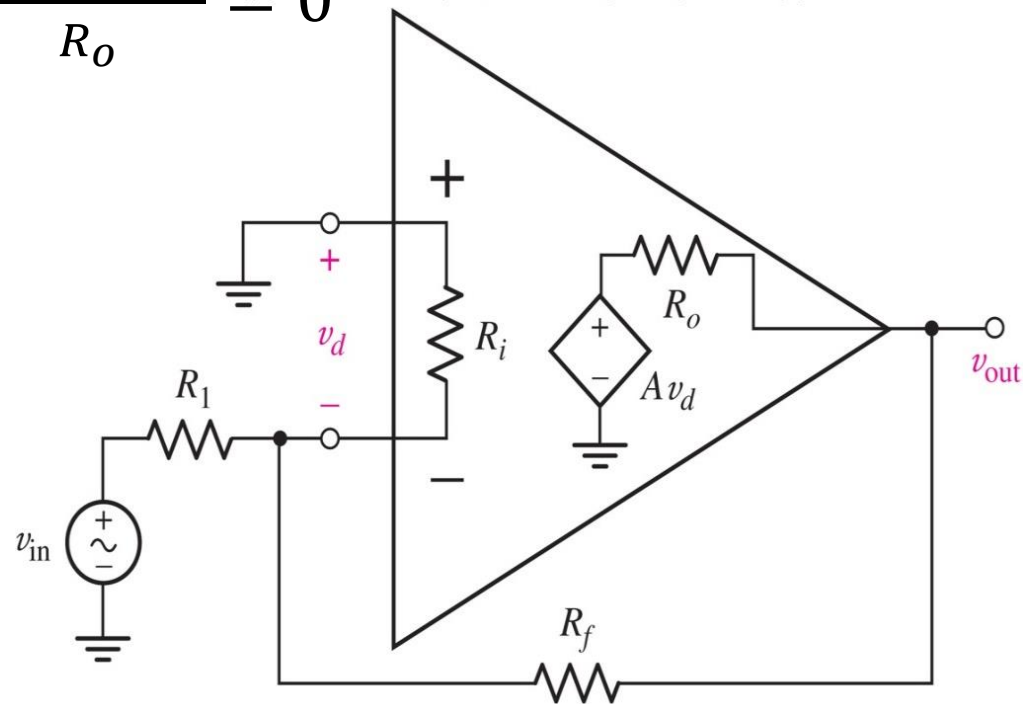
- مقاومت ورودی (R_i)
- مقاومت خروجی (R_o)
- بهره مدار باز (A)

مثال: استفاده از مدل دقیق برای تحلیل تقویت‌کننده معکوس‌کننده

□ در مدار زیر، بهره تقویت‌کننده چقدر است؟

□ $KCL_1: \frac{-v_d - v_{in}}{R_1} + \frac{-v_d - v_{out}}{R_f} + \frac{-v_d}{R_i} = 0$

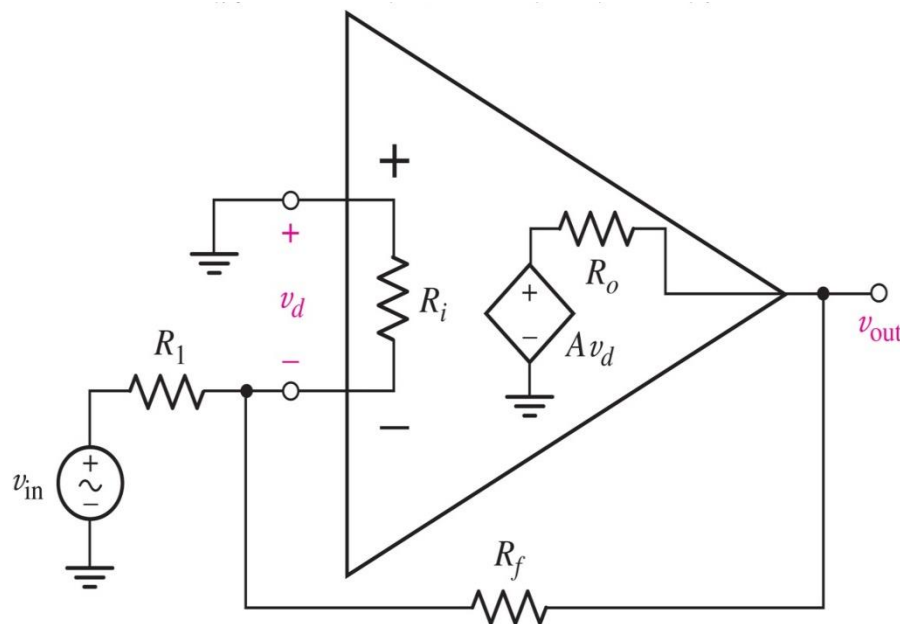
□ $KCL_2: \frac{v_{out} + v_d}{R_f} + \frac{v_{out} - Av_d}{R_o} = 0$



مثال: استفاده از مدل دقیق برای تحلیل تقویت کننده معکوس کننده

□ با حل دستگاه معادلات و حذف v_d داریم:

$$\square A_v = \frac{v_{out}}{v_i} = \left[\frac{R_o + R_f}{R_o - AR_f} \left(1 + \frac{R_1}{R_f} + \frac{R_1}{R_i} \right) - \frac{R_1}{R_f} \right]^{-1}$$



□ مشخصات آپامپ LM741:

$$A = 200000 \quad \blacksquare$$

$$R_i = 2M\Omega \quad \blacksquare$$

$$R_o = 75\Omega \quad \blacksquare$$

□ اگر $R_f = 47$ و $R_1 = 4.7$

داریم: $A_v = -9.999$

مزایای آپ‌امپ به عنوان تقویت‌کننده ولتاژ

□ مقاومت ورودی زیاد (در حد مگا اهم تا ترا اهم)

□ تا بیشینه ولتاژ منبع بر روی ورودی آن بیفتد.

□ مقاومت خروجی کم (در حد چند اهم تا چند ده اهم)

□ تا همه ولتاژ خروجی تقویت‌کننده بر روی بار بیفتد.

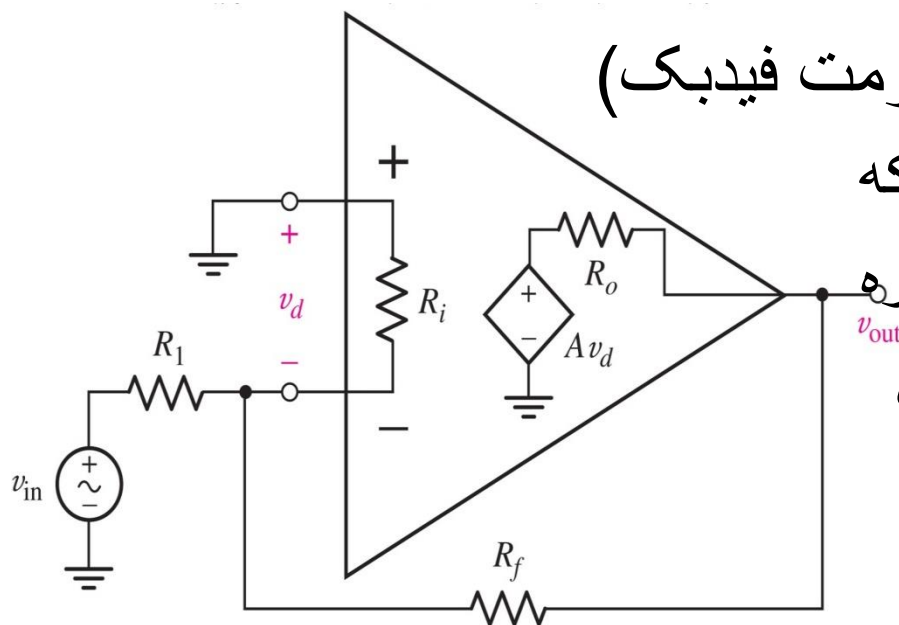
□ بهره قابل تنظیم! (با اعمال مقاومت فیدبک)

□ دیدیم در مدار روبرو، مادامی که

A به اندازه کافی بزرگ باشد، بهره

تقویت‌کننده با تقریب بسیار خوبی

$$-\frac{R_f}{R_1} \text{ است.}$$



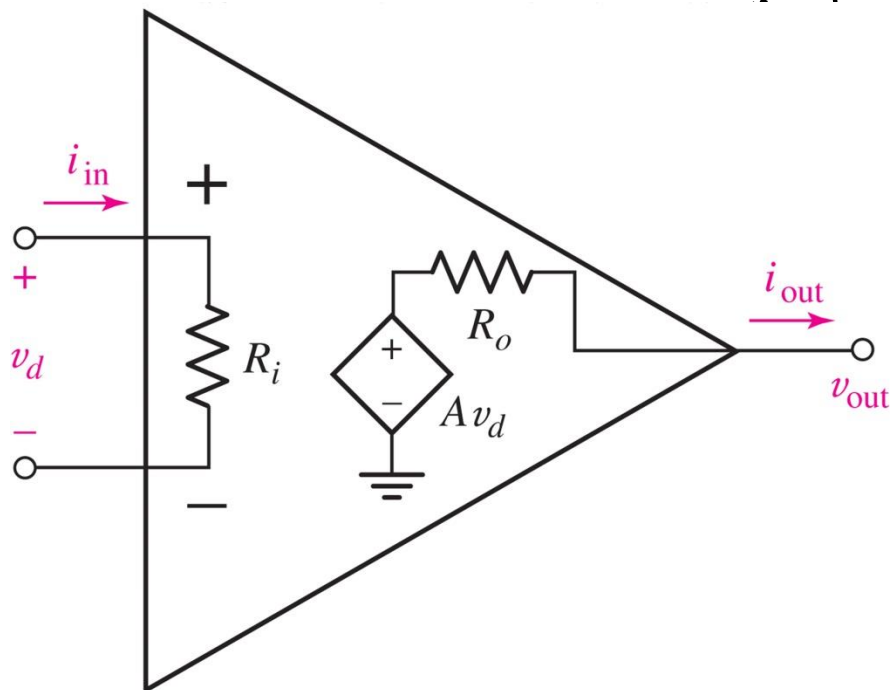
مدل ایده‌آل

□ وقتی $A = \infty$ ، $R_i = \infty$ و $R_o = 0$ باشد، رفتار آپ‌امپ تقریباً به صورت زیر است:

□ چون v_{out} یک مقدار متناهی دارد (از منبع تغذیه نمی‌تواند

بیشتر شود)، $v_d = \frac{v_{out}}{A} \approx 0$

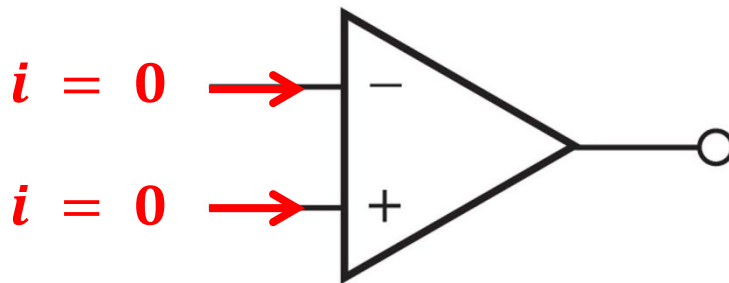
□ بنابراین $i_{in} \approx 0$ است.



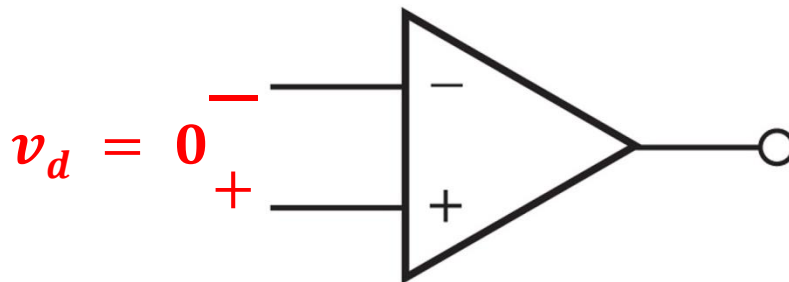
مدل ایده‌آل آپ‌امپ

□ قوانین مدل ایده‌آل:

□ جریانی از ورودی‌ها نمی‌گذرد.



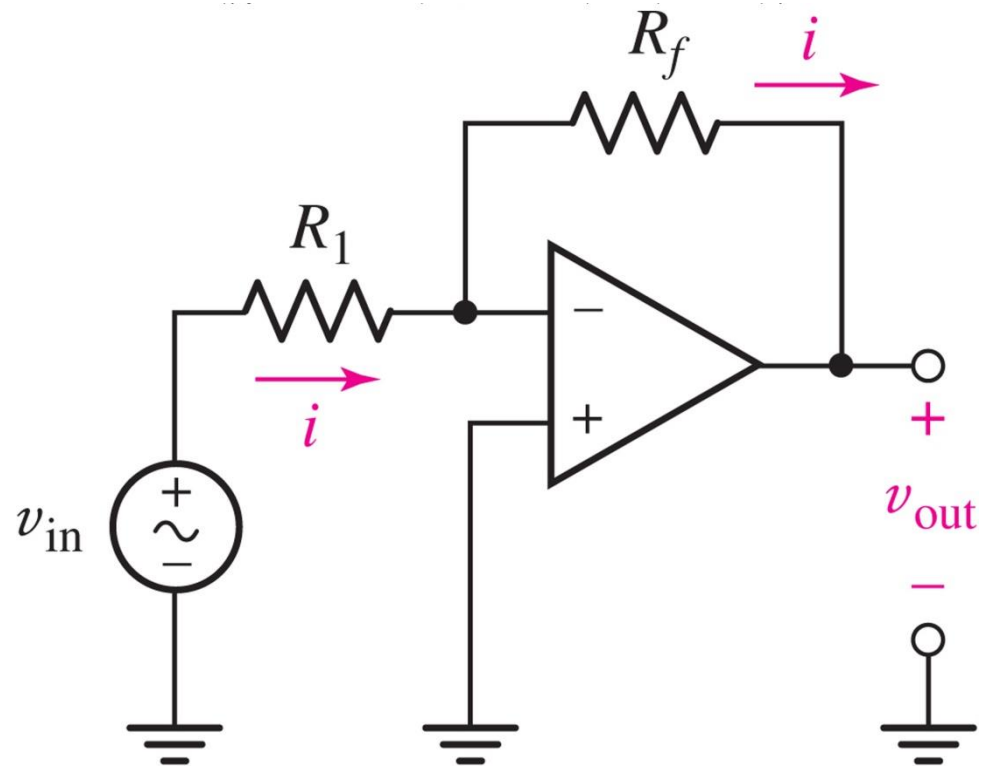
□ اختلاف ولتاژ بین دو پایه ورودی صفر است.



تقویت‌کننده معکوس‌کننده

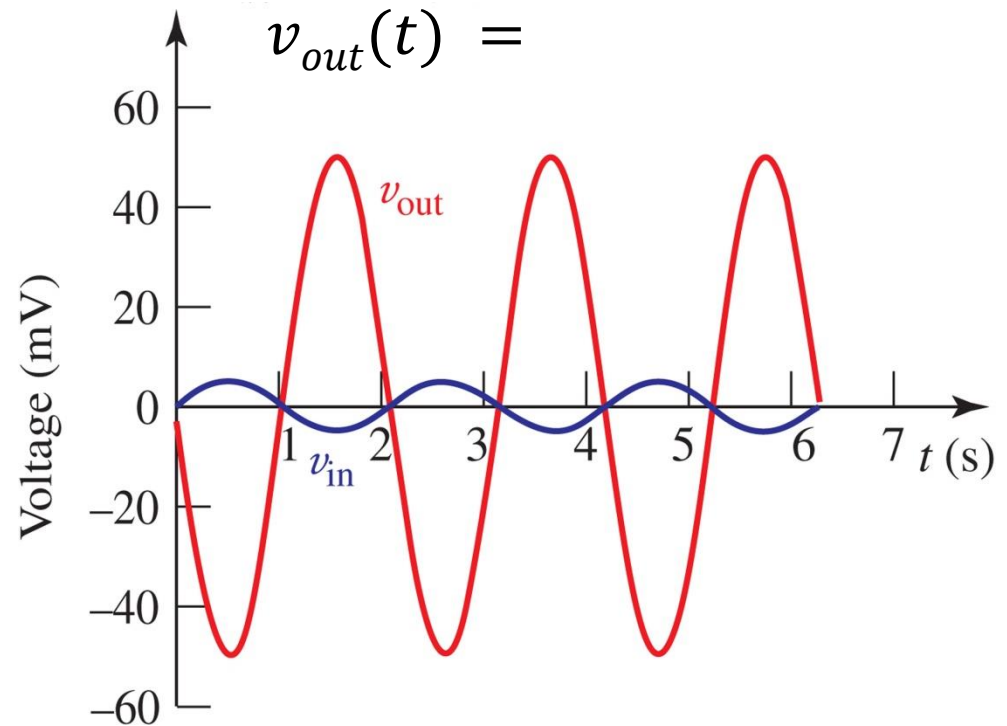
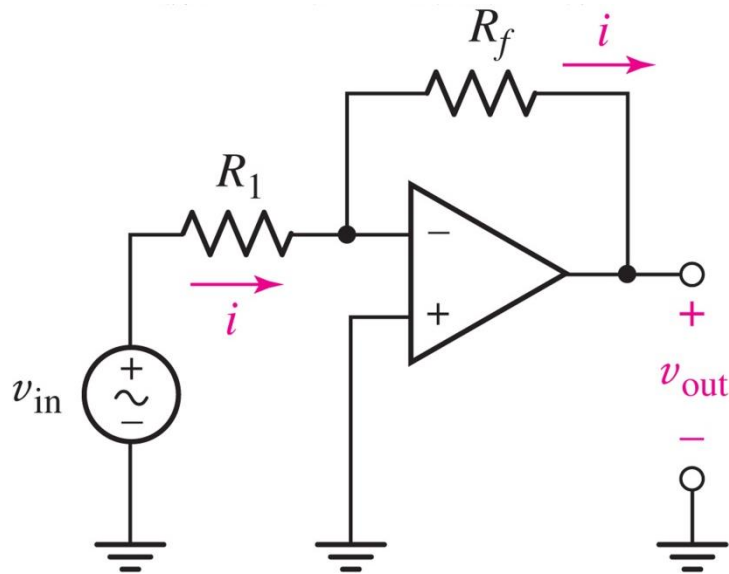
□ با اعمال KVL و استفاده از قوانین آپامپ ایده‌آل داریم:

□ $v_{out} =$

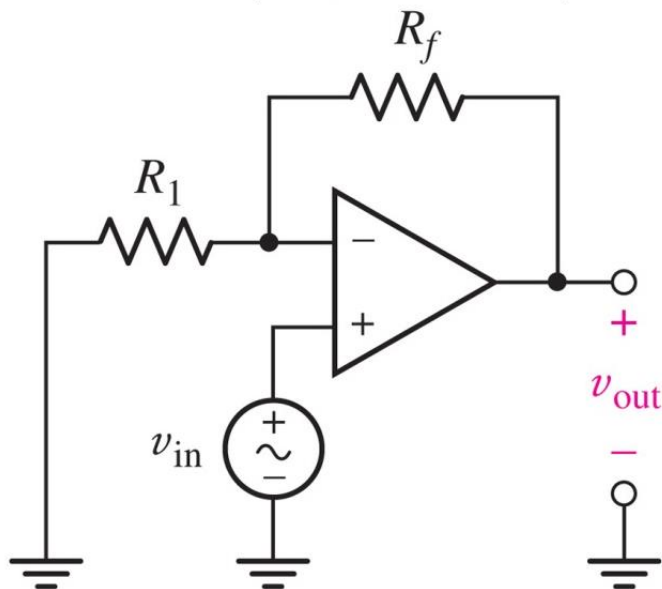


مثال:

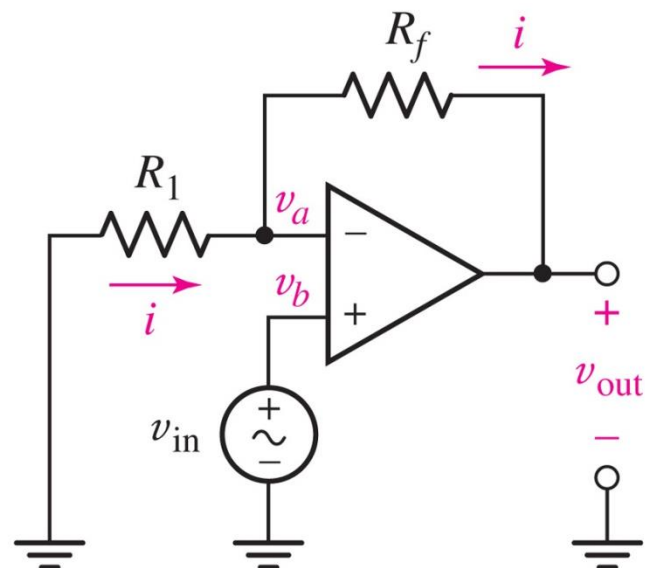
□ $v_{in}(t) = 5\sin 3t \text{ mV}, R_f = 47\text{K}\Omega, R_1 = 4.7\text{K}\Omega$



تقویت‌کننده غیر معکوس‌کننده

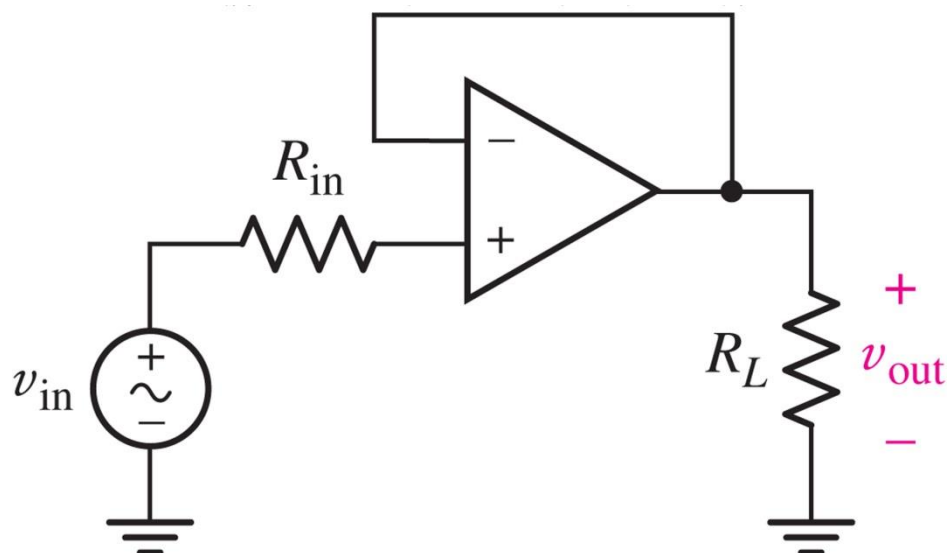


$$v_{out} =$$



دنبال‌کننده ولتاژ (بافر ولتاژ)

$$v_{out}(t) =$$

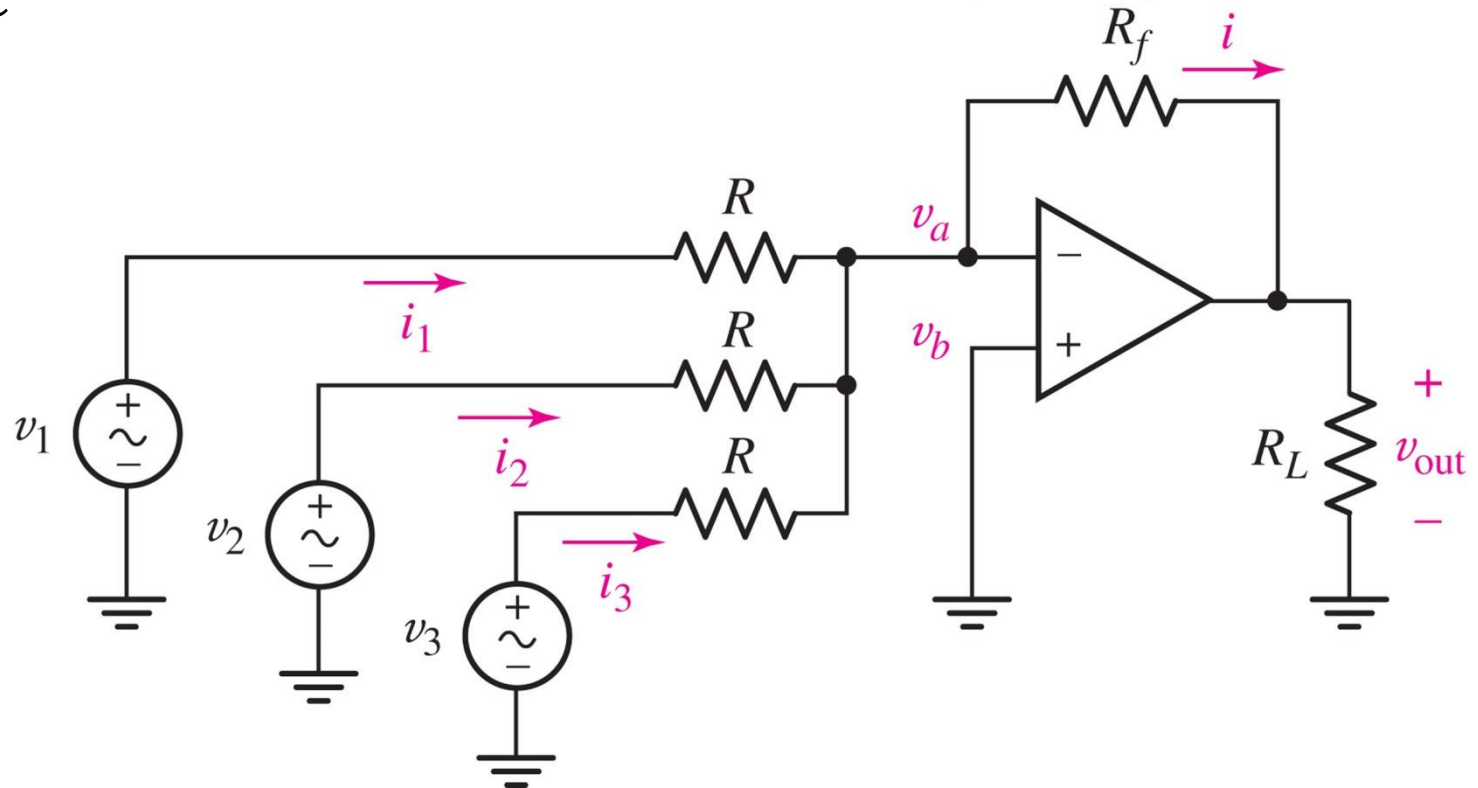


□ خروجی به مقاومت R_L بستگی ندارد! بافر با تغییر R_L می‌تواند جریان لازم برای ثابت نگه داشتن ولتاژ خروجی را تأمین کند.

□ همچنین این مدار، اثر مقاومت ورودی منبع را نیز از بین می‌برد!

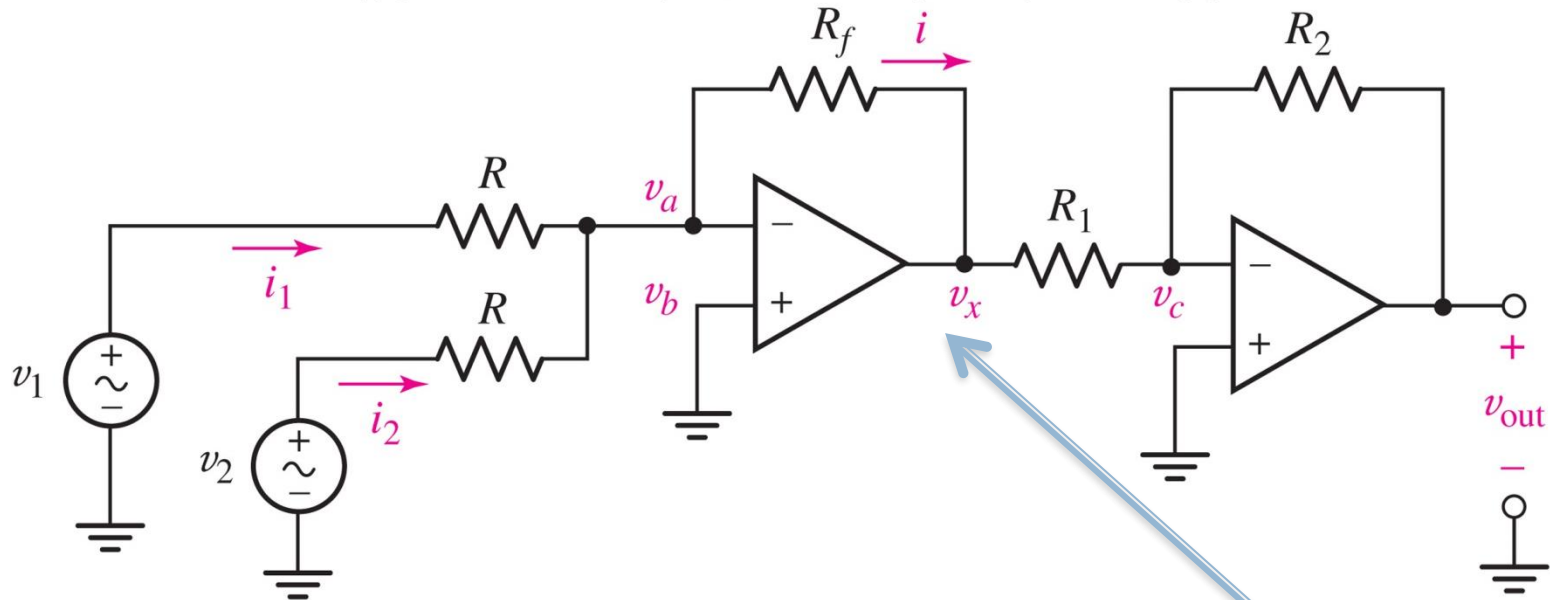
مدار جمع‌کننده آنالوگ

□ $v_{out} =$



این مدار عملیات جمع را انجام می‌دهد، همچنین حاصل را به اندازه $-\frac{R_f}{R_1}$ تقویت می‌کند.

اتصال پشت سر هم چند آپ امپ

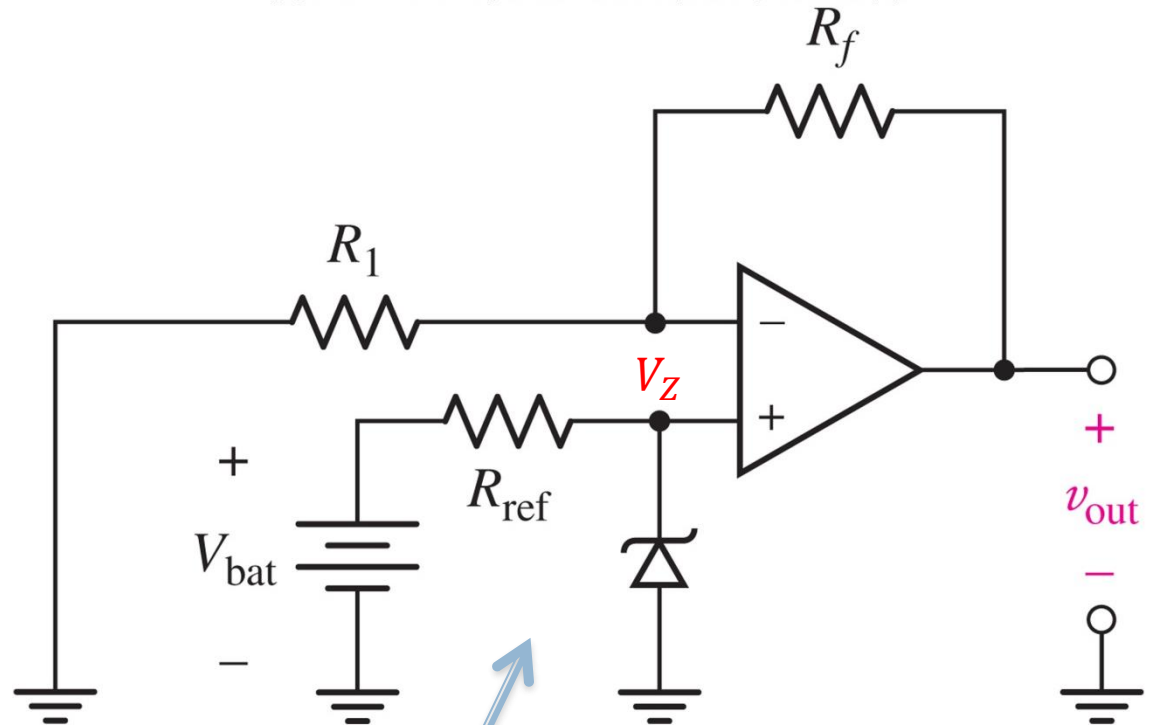


$$v_{out} =$$

این ولتاژ مستقل از طبقه بعدی است! (چرا؟)
پس می‌توان آپ‌امپ‌ها را پشت سر هم متصل کرد بدون اینکه بهره آنها تغییری کند.

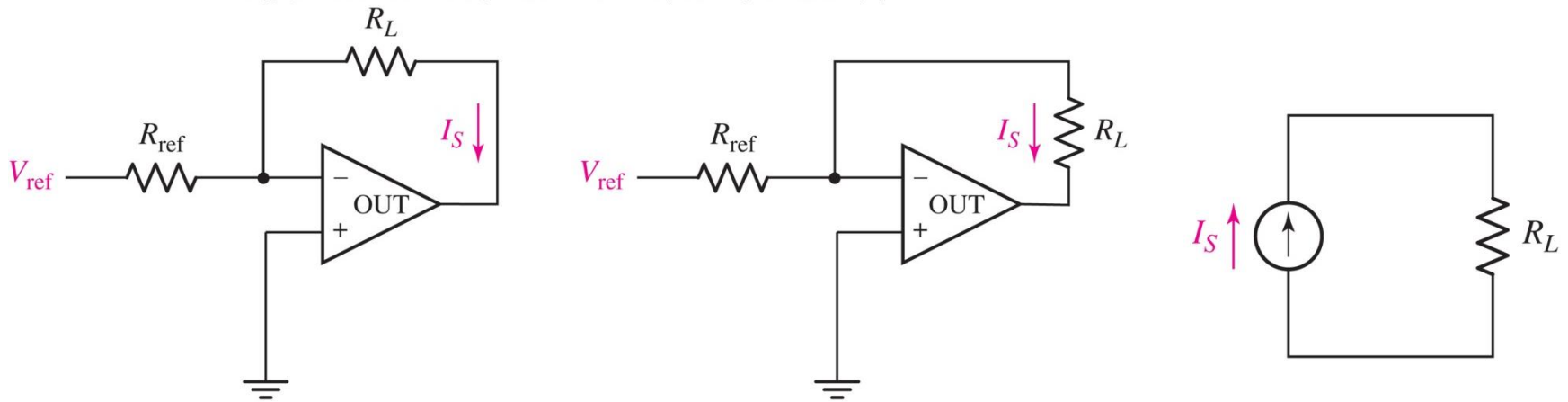
آپ‌امپ به عنوان منبع ولتاژ ایده‌آل

$$v_{out} =$$



این مدار رگولاتور با دیود زنر را قبلاً دیده بودیم. نقش آپ‌امپ تقویت کردن ولتاژ زنر است.

آپ‌امپ به عنوان منبع جریان ایده‌آل



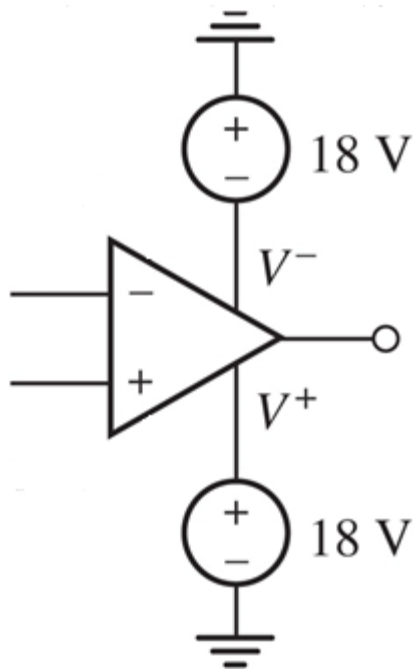
با استفاده از یک منبع ولتاژ V_{ref} و یک مقاومت R_{ref} می‌توان یک منبع جریان $I_S = \frac{V_{ref}}{R_{ref}}$ ساخت. این جریان مستقل از بار R_L است.

منابع تغذیه آپ‌آمپ

□ آپ‌آمپ برای اینکه بتواند تقویت کند باید روشن شود! بنابراین به منبع تغذیه نیاز دارد.

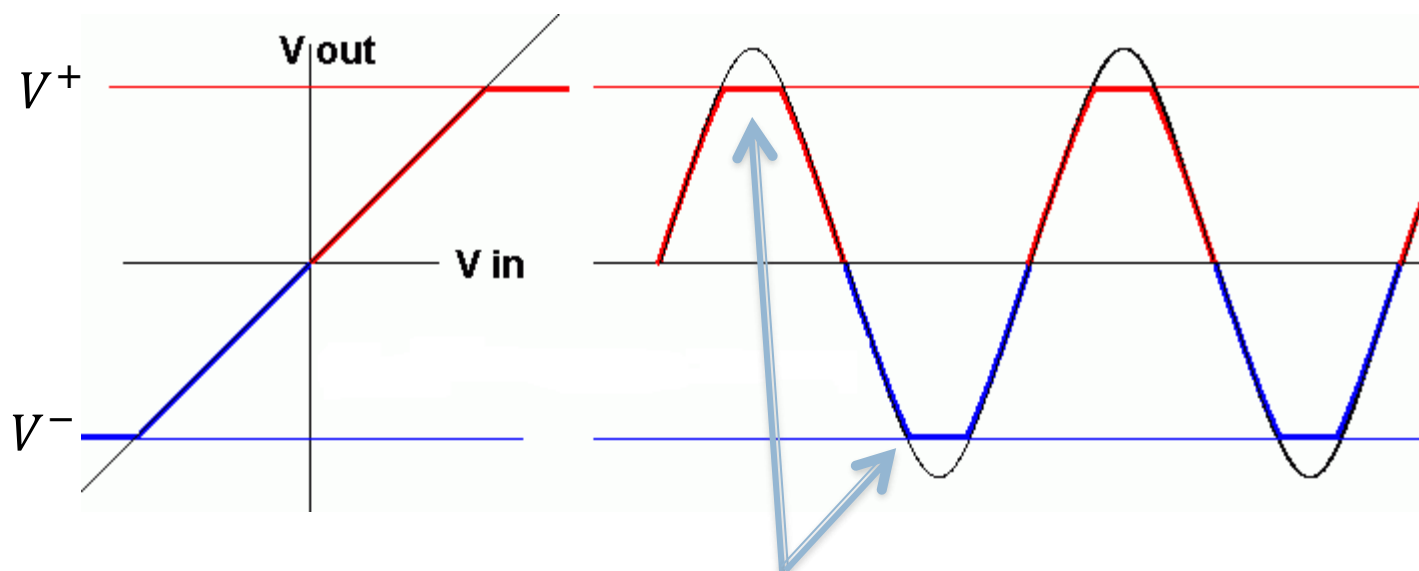
□ معمولاً مقادیر ولتاژ یکسان و معکوس به دو سر V^- و V^+ وصل می‌کنیم. مقداری بین 5 تا 24 ولت.

□ زمین منابع تغذیه باید به زمین ورودی و خروجی نیز متصل باشد.



به اشباع رفتن خروجی

□ اگر مقدار ورودی به گونه‌ای باشد که مقدار خروجی بعد از تقویت‌شدن بخواهد بیشتر از V^+ یا کمتر از V^- شود، خروجی به اشباع می‌رود و همان V^+ یا V^- می‌ماند.



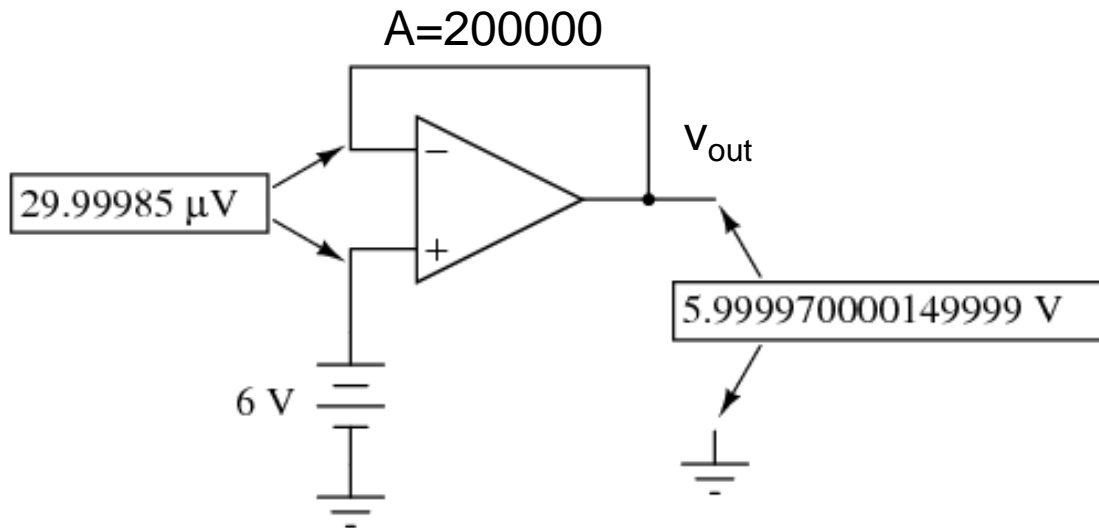
سیگنال خروجی به اشباع رفته و بریده شده است.

نقش فیدبک منفی

- نقش فیدبک منفی: تبدیل یک بهره بزرگ و نامعلوم به یک بهره مشخص
- چرا فیدبک را روی پایه مثبت نمی‌بندیم؟

$$v_+ \uparrow \rightarrow v_d \uparrow \xrightarrow{v_{out} = Av_d} v_{out} \uparrow \rightarrow v_- \uparrow \rightarrow v_d \downarrow \dots \square$$

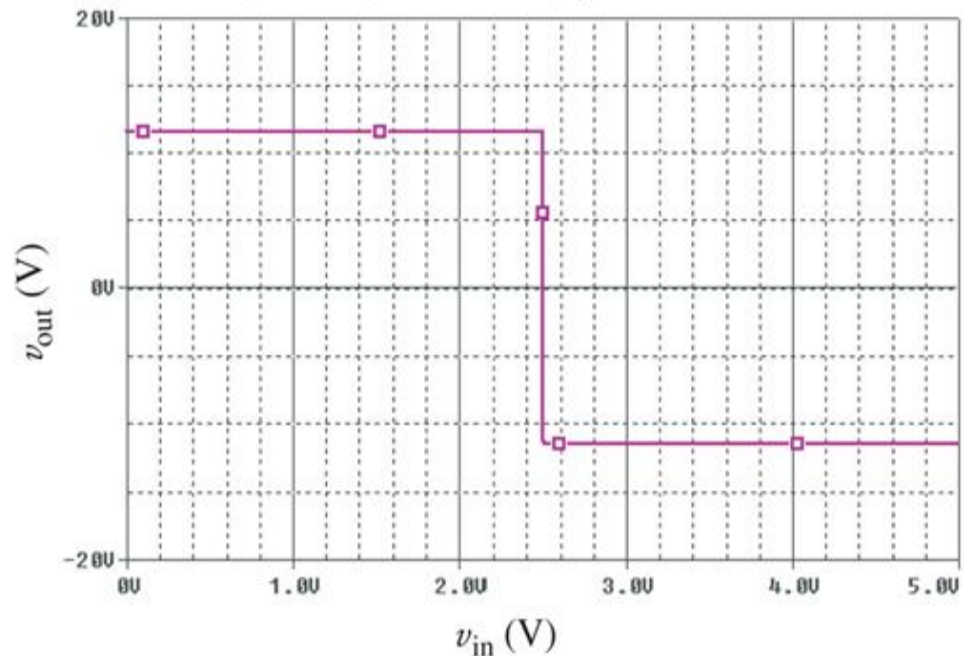
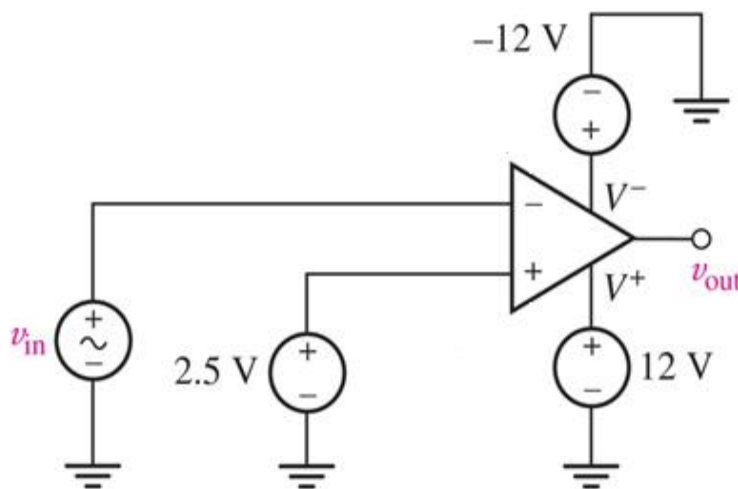
- فیدبک منفی باعث می‌شود ولتاژ v_d نزدیک صفر باقی بماند.



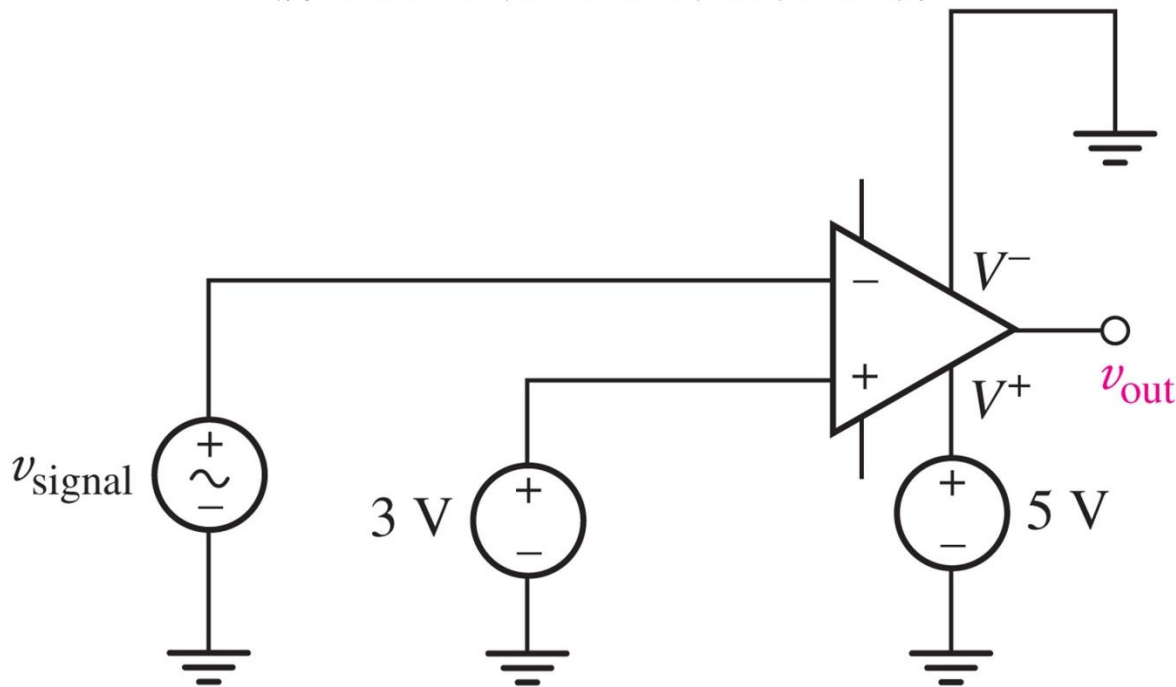
مقایسه‌کننده ولتاژ

□ از آپامپ در حالت مدار باز (بدون فیدبک) می‌توان به عنوان مقایسه‌کننده استفاده کرد.

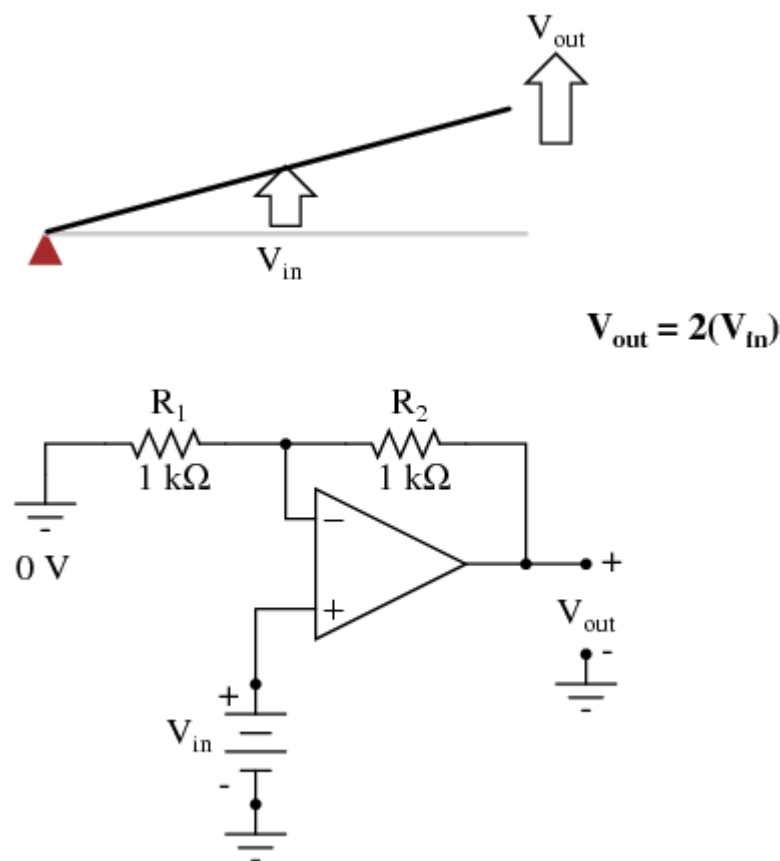
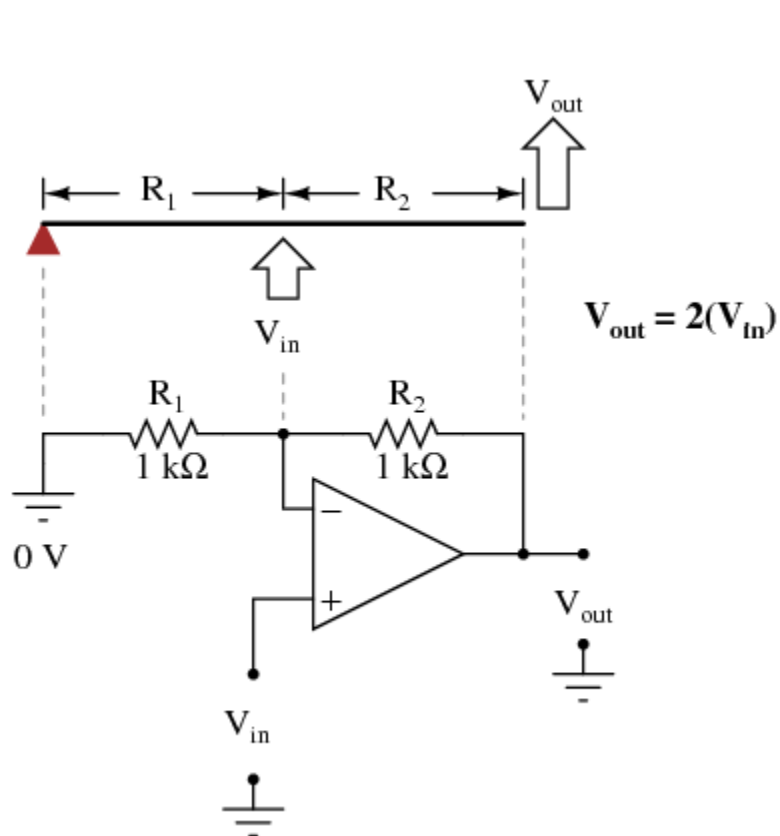
$$\square v_{out} = \begin{cases} 12 & v_{in} < 2.5 \\ -12 & v_{in} > 2.5 \end{cases}$$



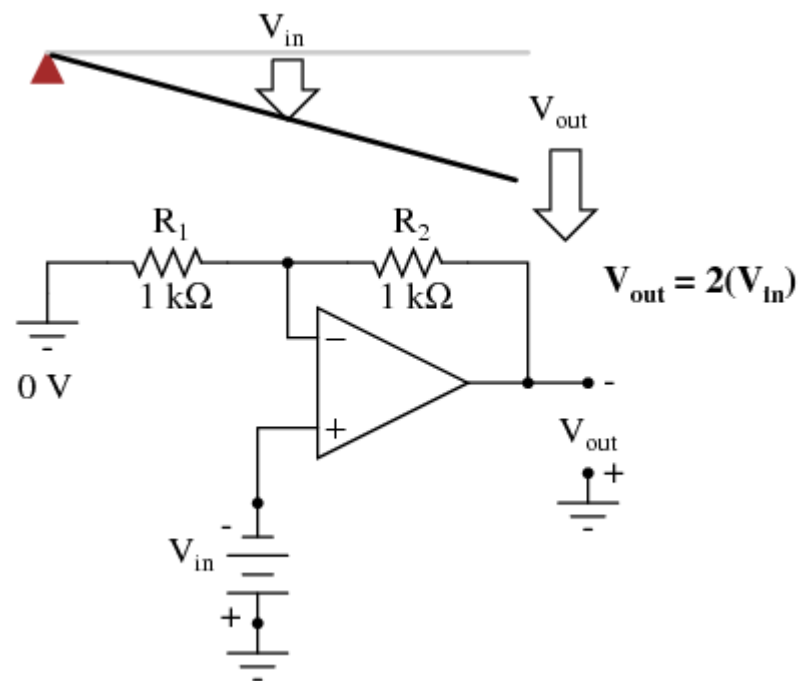
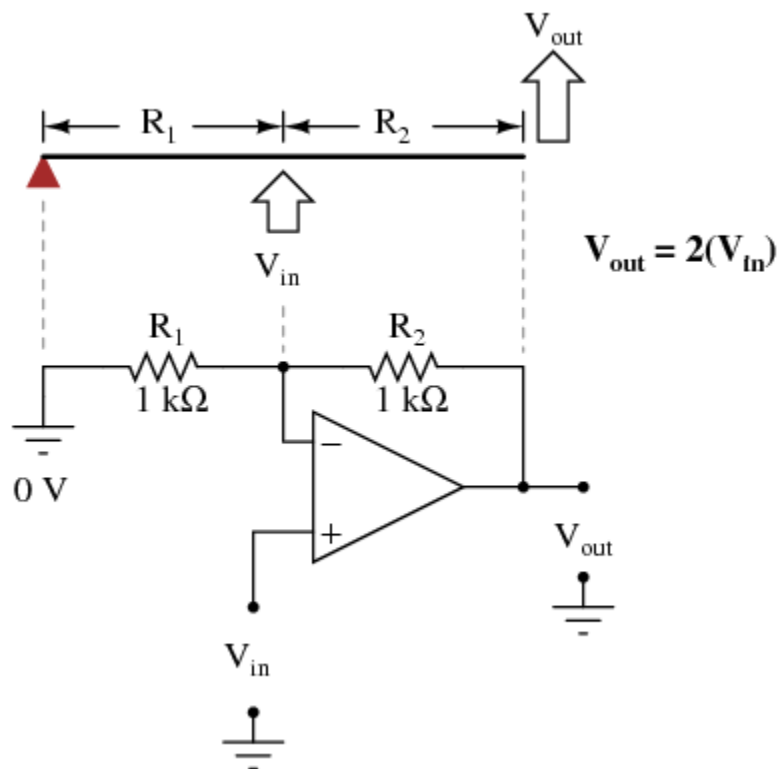
□ فرض کنید یک سنسور دما داریم که به ازای دمای بین 0 تا 100 درجه، ولتاژ 0 تا 5 ولت تولید می‌کند. مداری طراحی کنید که اگر دما کمتر از 60 درجه بود، خروجی منطقی 1 بدهد.



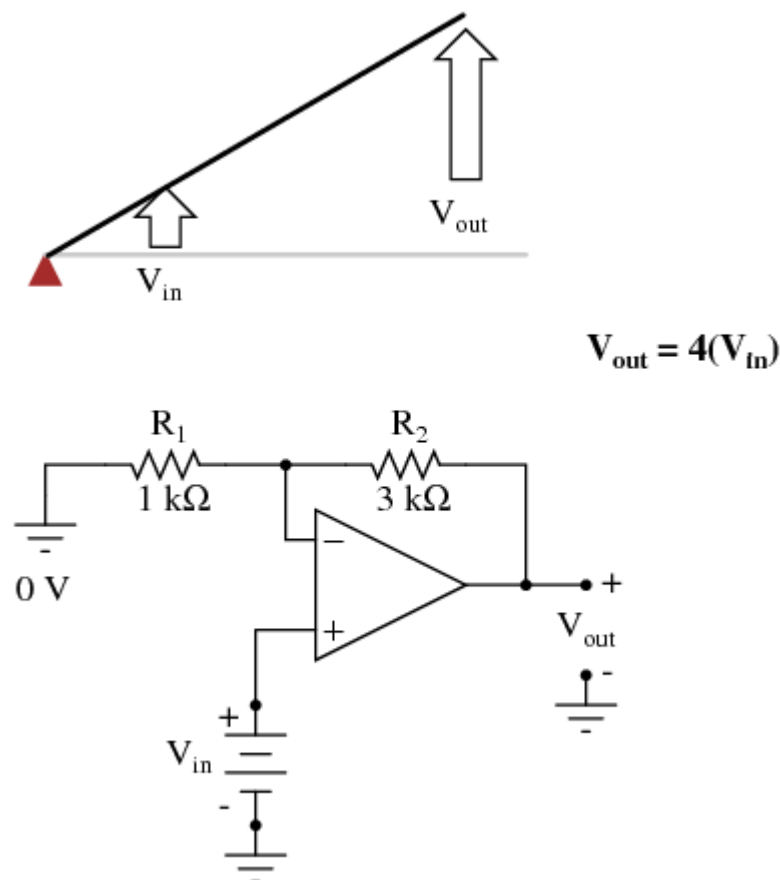
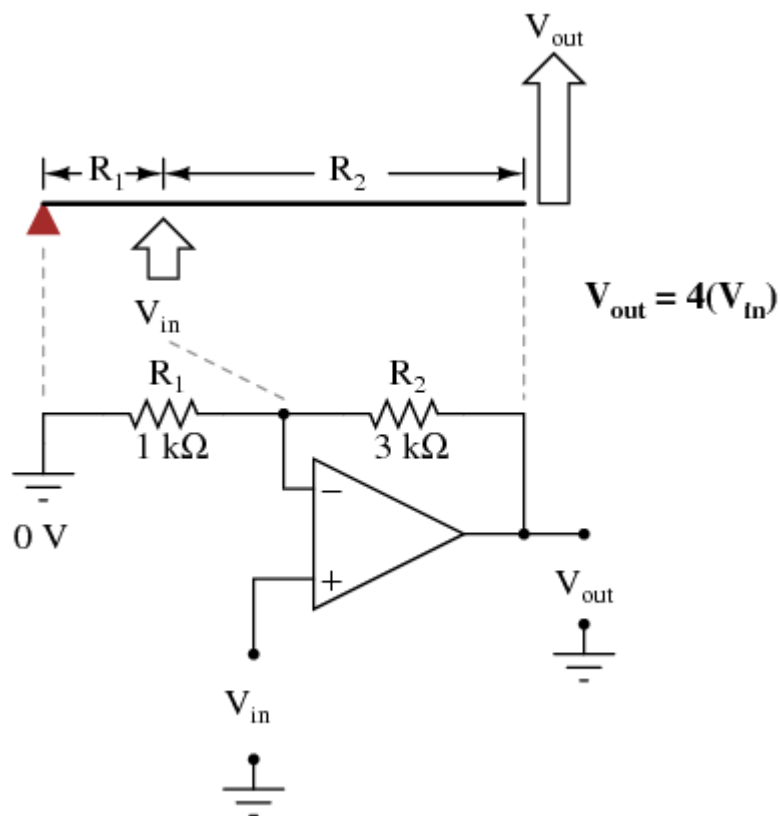
شباهت تقویت‌کننده غیر معکوس‌کننده به اهرم



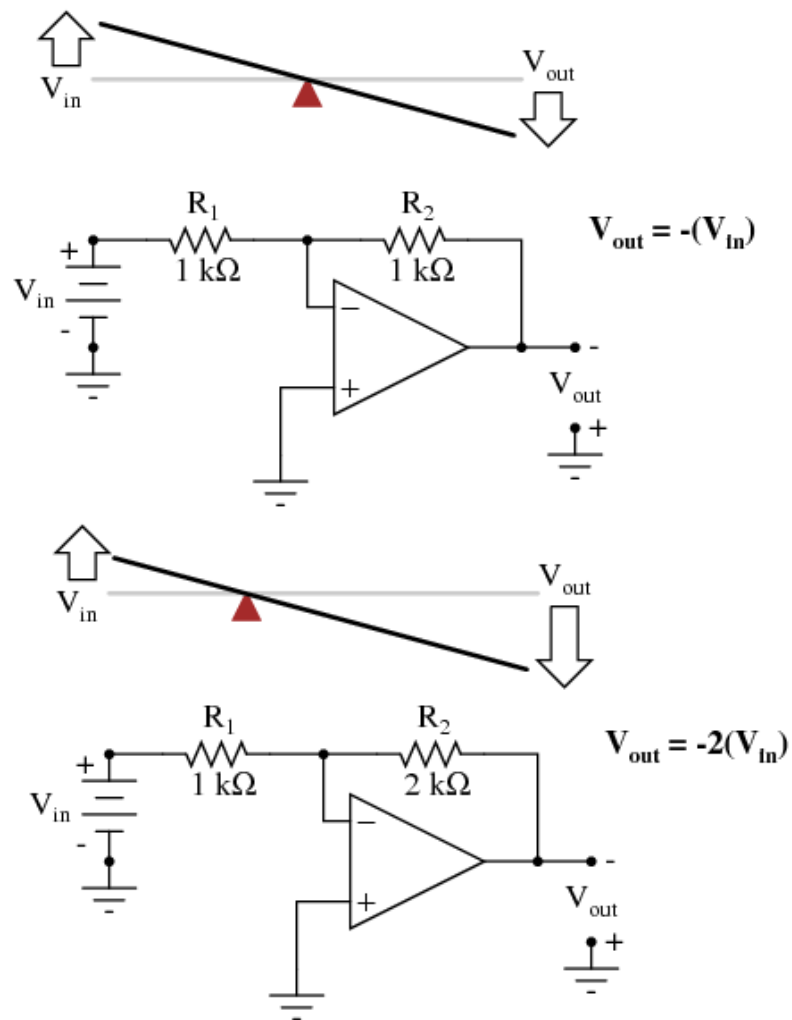
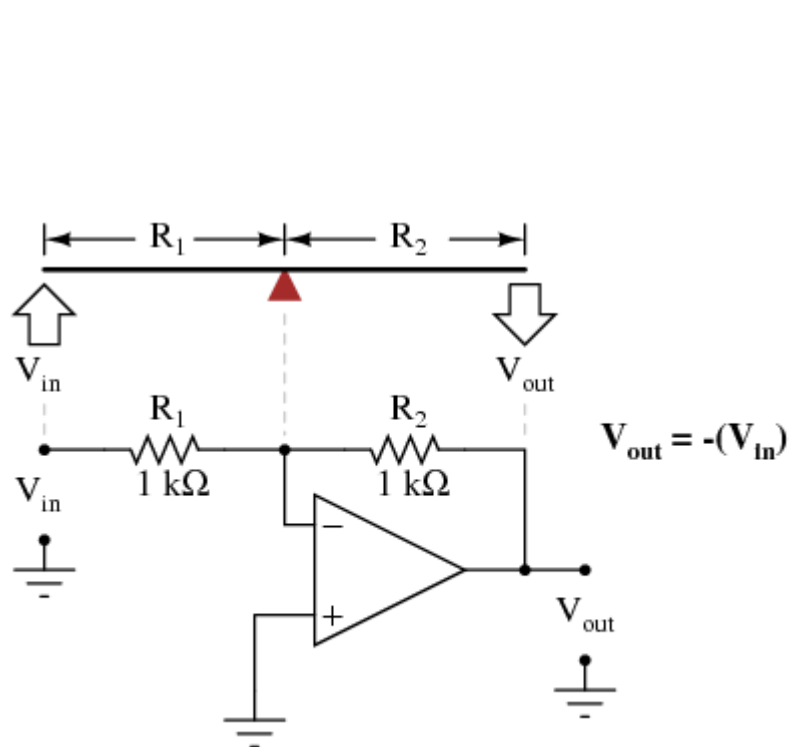
شباهت تقویت‌کننده غیر معکوس‌کننده به اهرم



شباهت تقویت‌کننده غیر معکوس‌کننده به اهرم

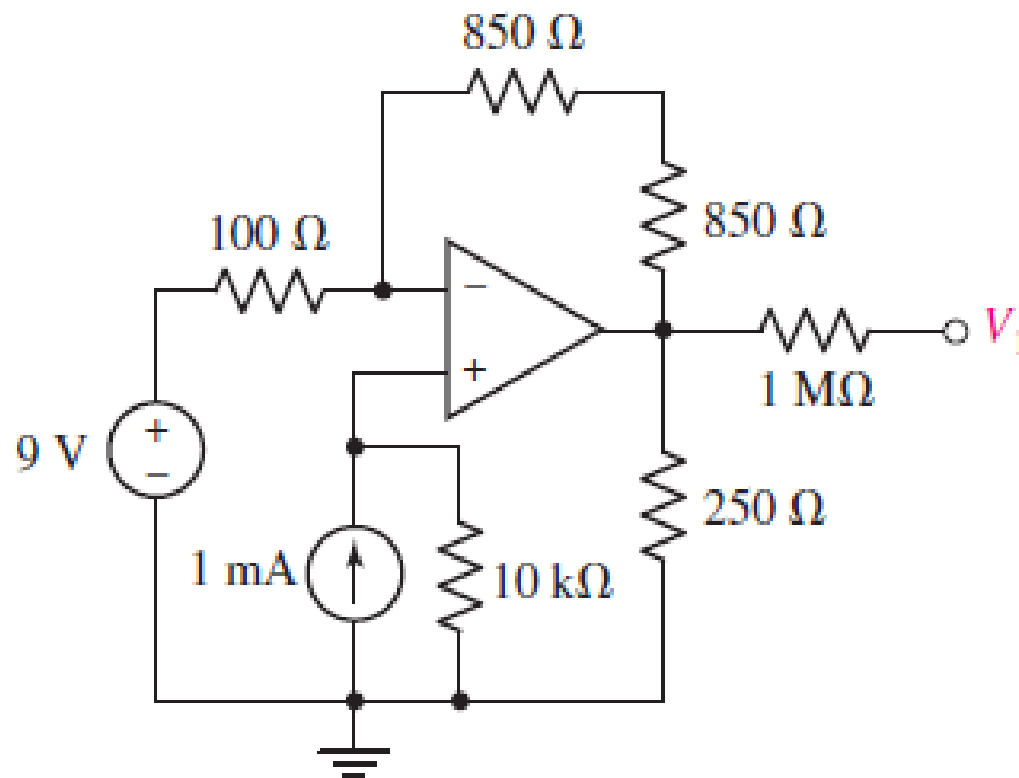


شباهت تقویت‌کننده معکوس‌کننده به اهرم



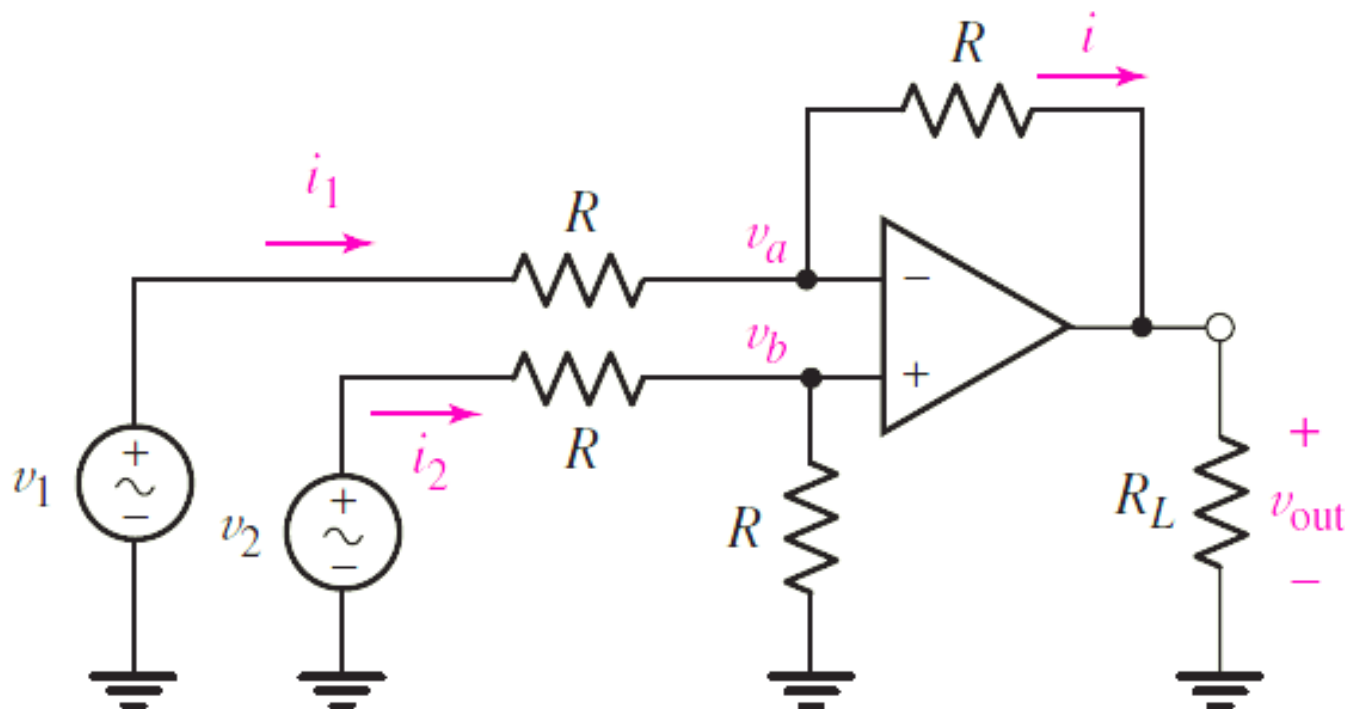
تمرین کلاسی 1

$$V_1 = ? \quad \square$$



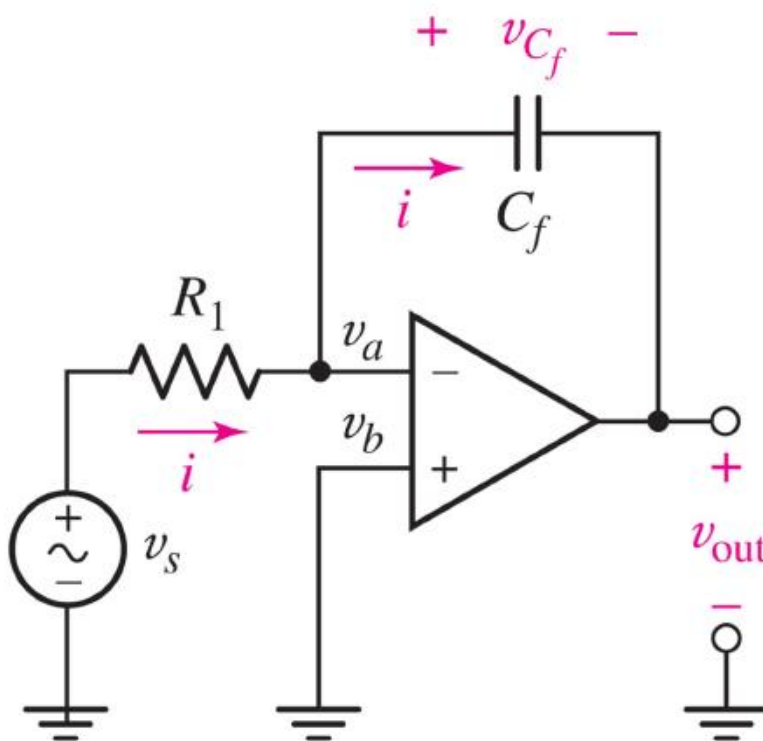
تمرین کلاسی 2

$$V_{out} = ? \quad \square$$



تمرین کلاسی 3

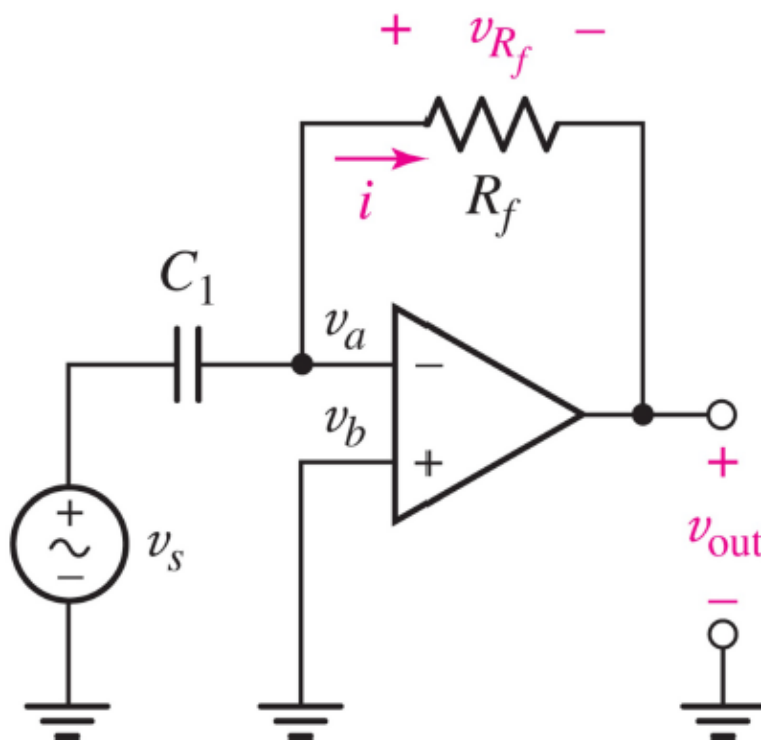
$$V_{out} = ? \quad \square$$



$$v_{out} =$$

تمرین کلاسی 4

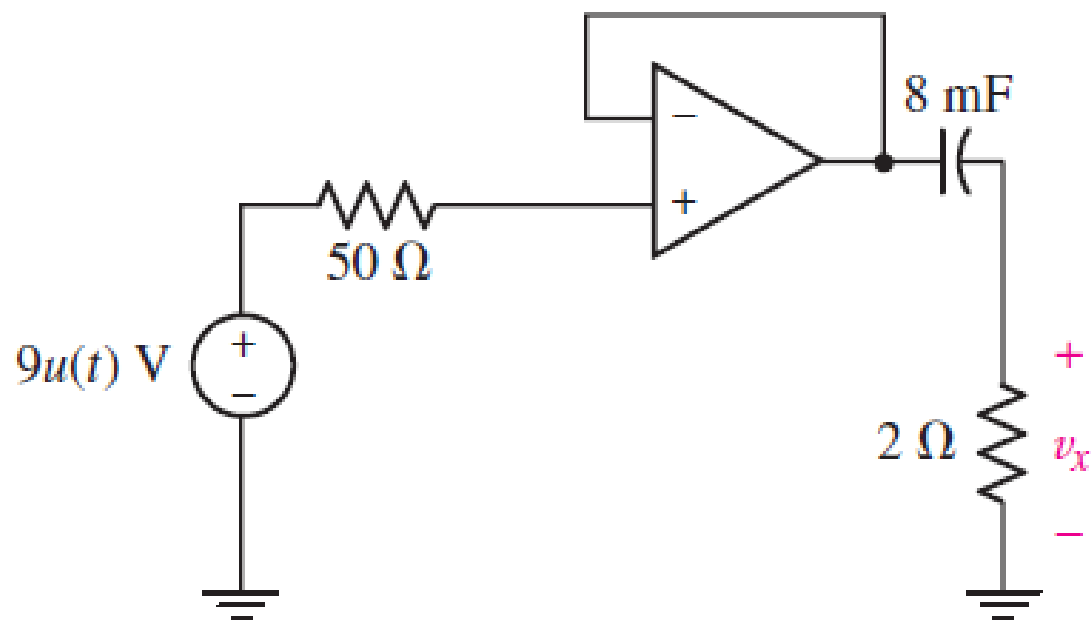
$$V_{out} = ? \quad \square$$



$$v_{out} =$$

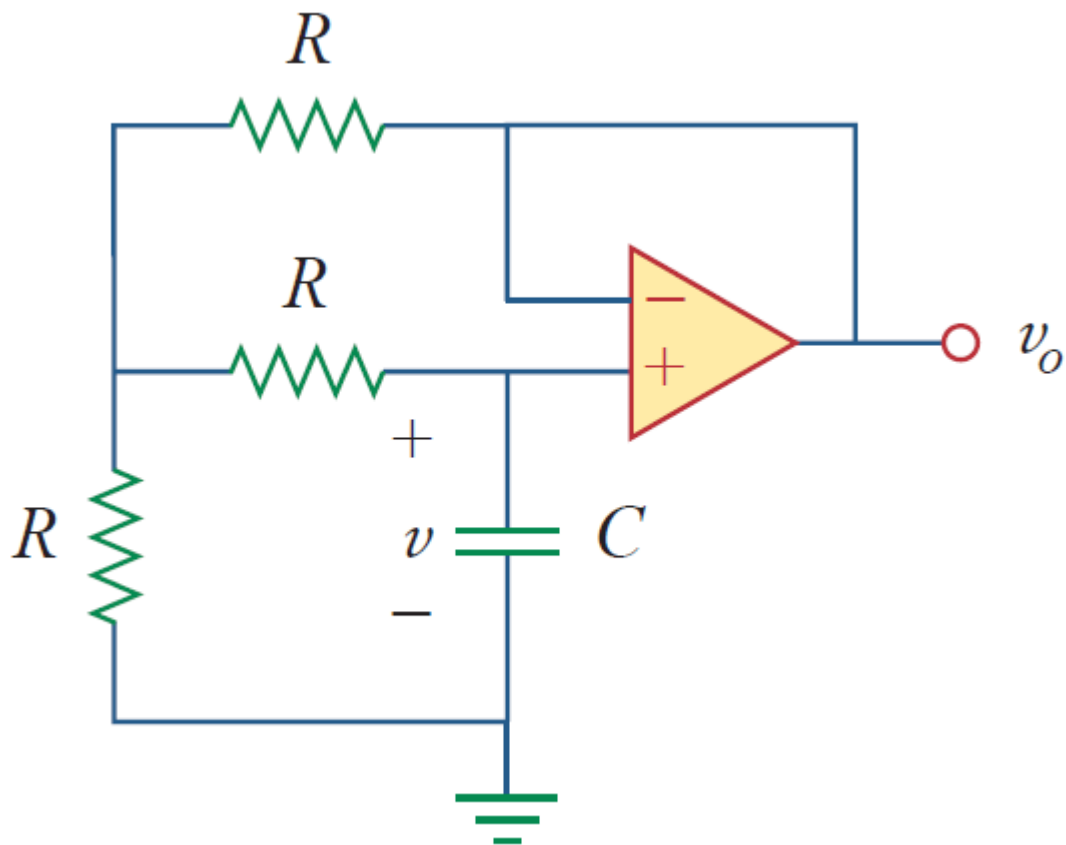
تمرین کلاسی 5

□ v_x را بیابید.



تمرین کلاسی 6

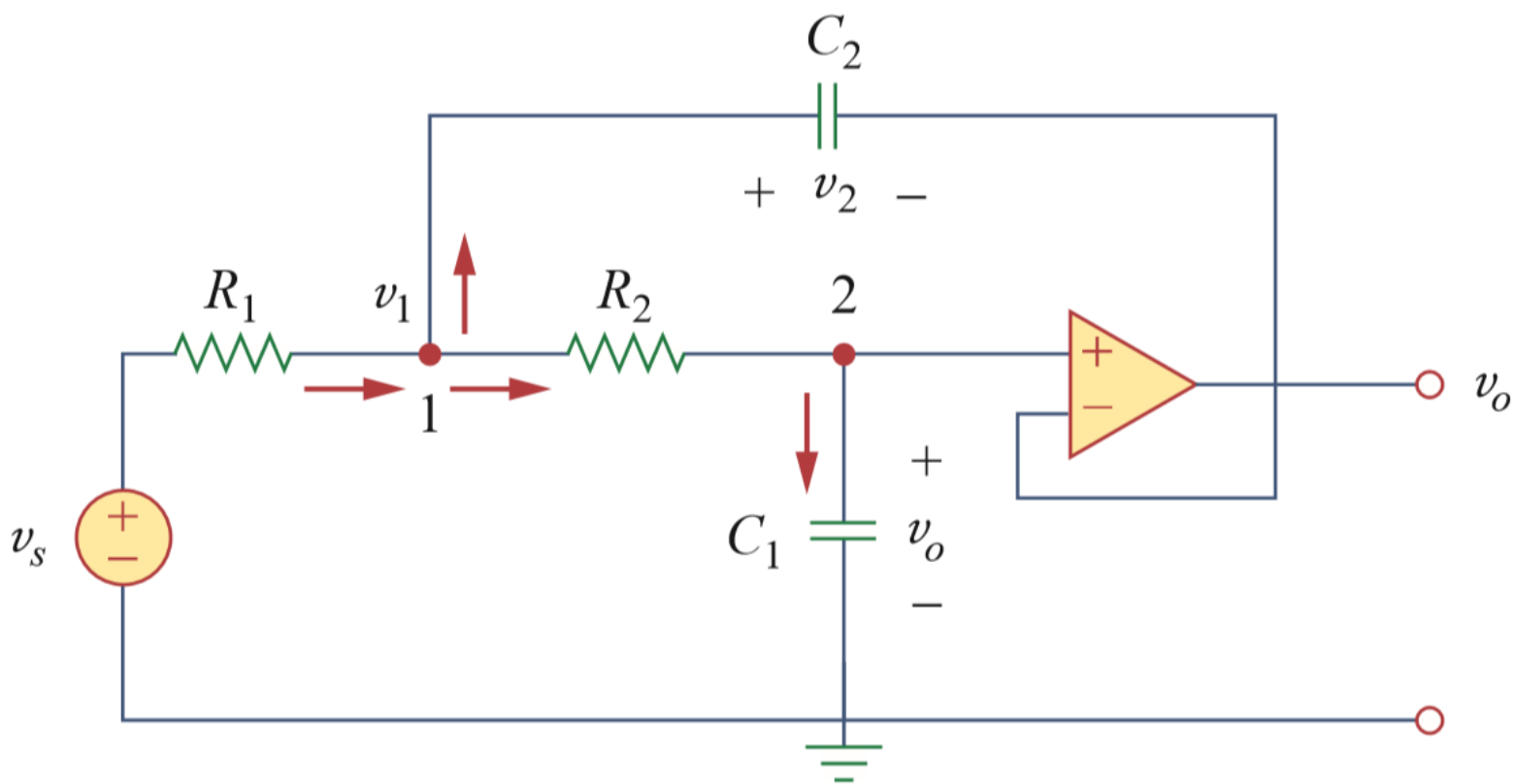
□ اگر ولتاژ اولیه خازن در لحظه $t = 0$ برابر 10 ولت باشد، ولتاژ v_o را بیابید



تمرین کلاسی 7

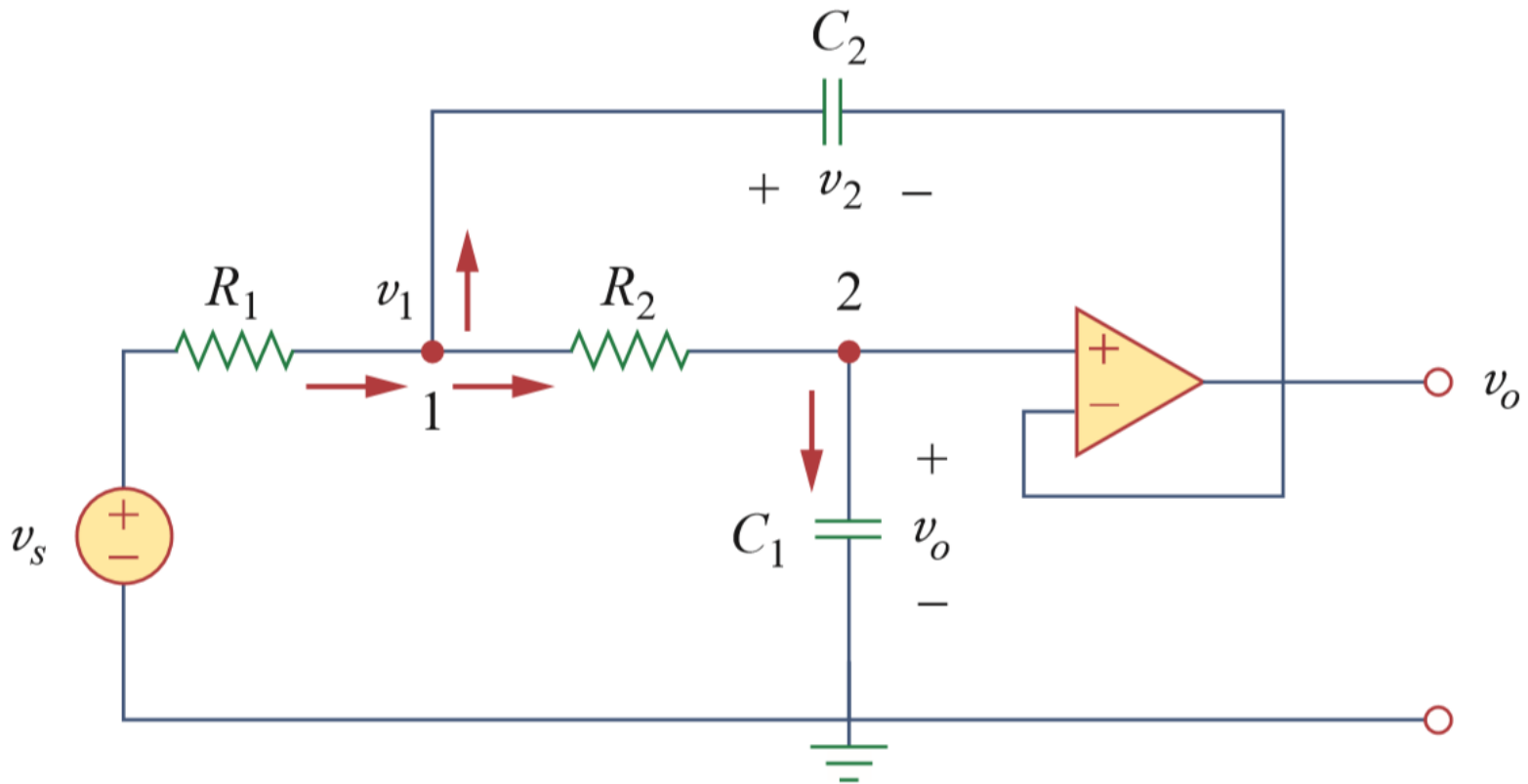
$$v_s = 10u(t)mV, R_1 = R_2 = 10K\Omega, C_1 = 20\mu F, C_2 = 100\mu F \quad \square$$

$$v_o = ? \quad \square$$



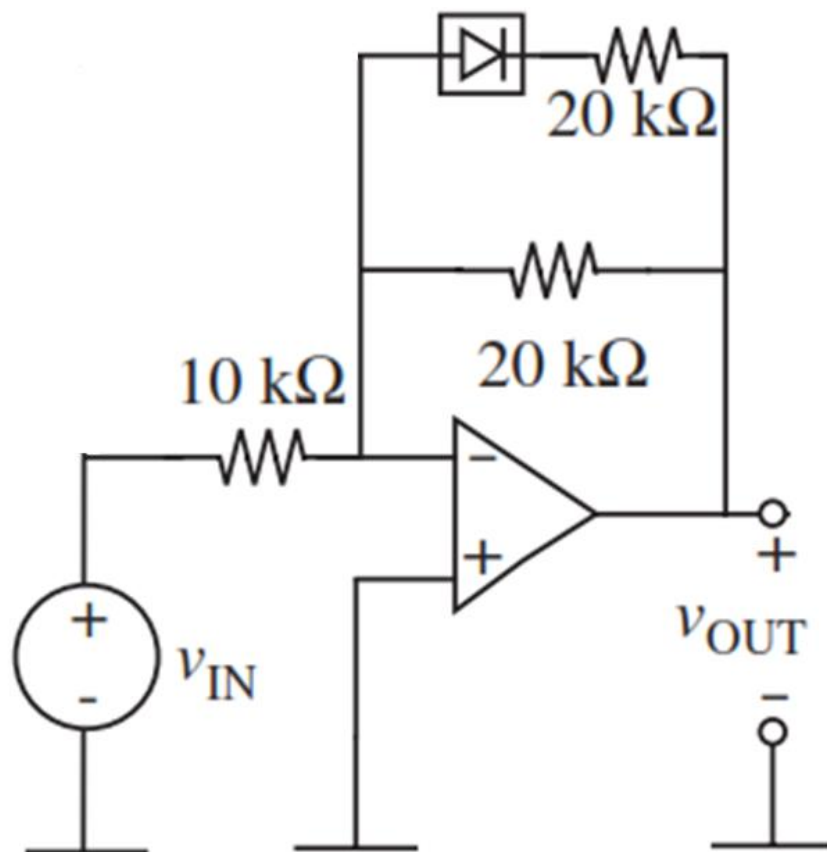
تمرین کلاسی 8

$v_s = \cos(t)mV$, $R_1 = R_2 = 10K\Omega$, $C_1 = 20\mu F$, $C_2 = 100\mu F$ □
 $v_o = ?$ (از فازور استفاده کنید) □



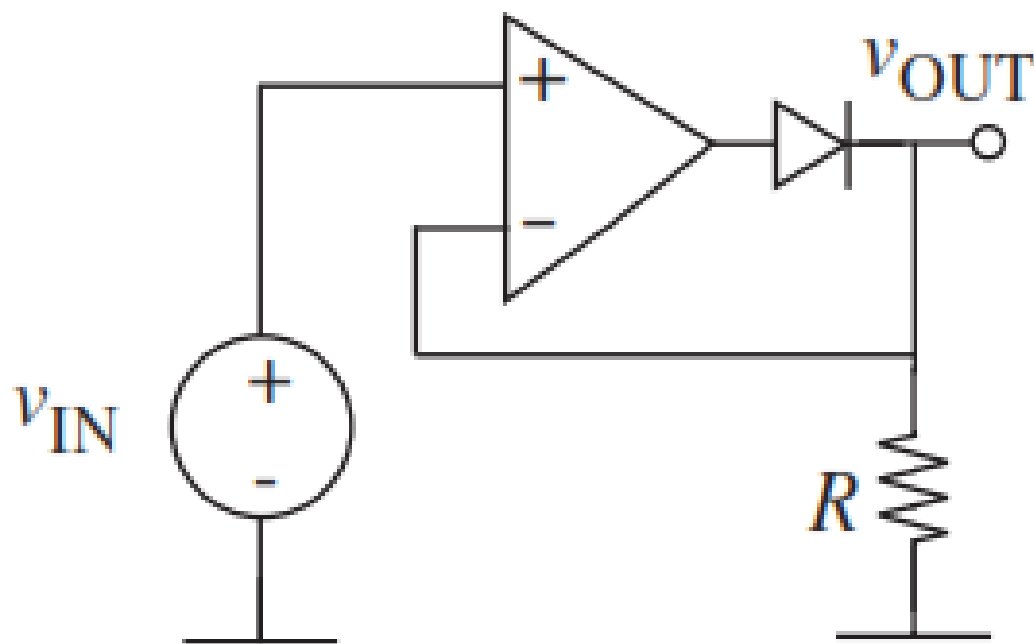
تمرین کلاسی 9

□ اگر $v_{in} = \sin(200\pi t)$ ، ولتاژ v_{out} را رسم کنید.



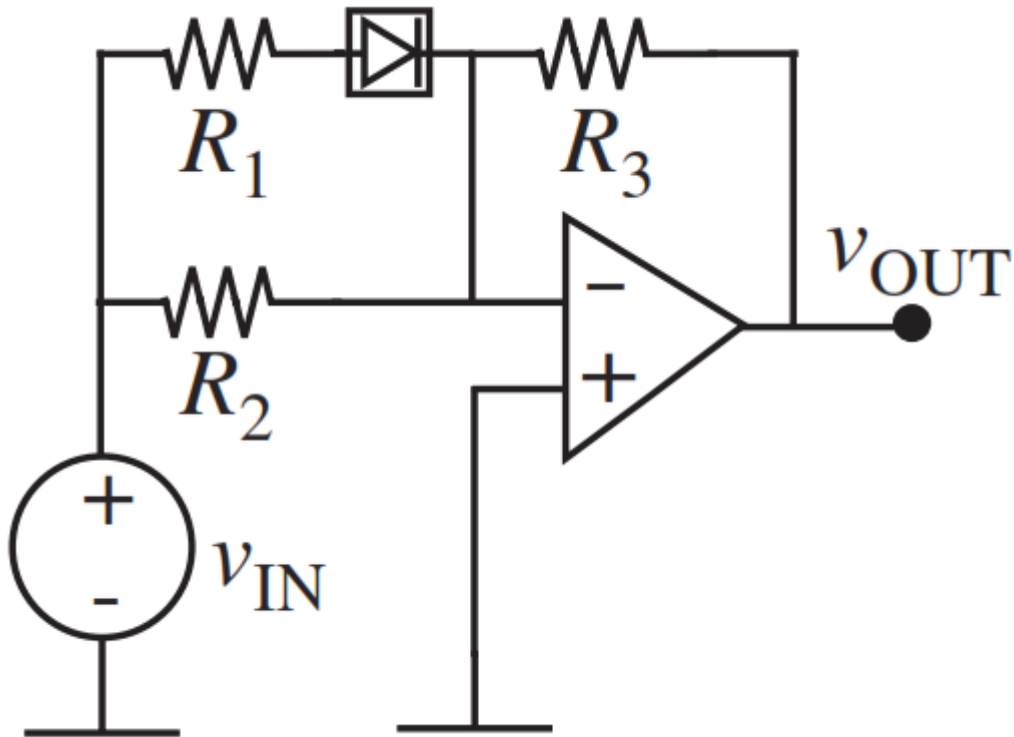
تمرین کلاسی 10

□ نمودار v_{out} را بر حسب v_{in} رسم کنید.



تمرین کلاسی 11

□ نمودار v_{out} را بر حسب v_{in} رسم کنید.



تمرین کلاسی 12

این یک **فیلتر اکتیو** است (استفاده از آپ امپ در فیلتر فرکانس)

حساب کنید:

نوع فیلتر

بهره فیلتر

فرکانس قطع

