

"به نام یگانه هستی بخش بی همتا"

"آشنایی با تقویت کننده عملیاتی (op-amp) و کاربرد آن"

نویسنده :

عاطفه سکاکی (عضو گروه الکترونیک)

ویرایش شده توسط : سید محسن طباطبایی فر



"آشنایی با تقویت کننده عملیاتی"

یک تقویت کننده عملیاتی یا آپ امپ به مجموعه ای از یک یا چند تقویت کننده تفاضلی و چند تقویت کننده دیگر و سایر مدارهایی که برای بهبود مشخصات تقویت کننده تفاضلی به کار می روند گفته می شود.

آپ امپ دارای دو ورودی و یک خروجی و دوپایه تغذیه می باشد.

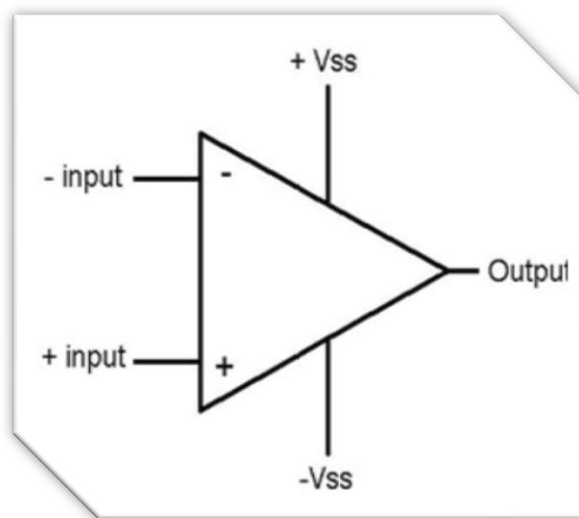
یک ورودی با علامت منفی مشخص می شود که به آن ورودی معکوس کننده گفته می شود. اگر سیگنالی به این بلیه داده شود با اختلاف فاز 180 درجه در خروجی تقویت کننده ظاهر می شود. ورودی دیگر که با علامت مثبت مشخص شده است ورودی غیر معکوس کننده نامیده می شود که خروجی بدون اختلاف فاز نسبت به سیگنال ورودی ظاهر می شود.

یک تقویت کننده عملیاتی دارای بهره تقویت بالایی (می توان گفت بینهایت) می باشد البته میزان این تقویت کنندگی را میتوان کنترل کرد. برای این منظور از مقاومت به اصطلاح فیدبک استفاده می شود یک تقویت کننده عملیاتی دارای پایداری زیادی می باشد. در شرایط ایده ال (کتابی) یک تقویت کننده عملیاتی باید دارای مقاومت ورودی بینهایت و بالعکس در خروجی دارای مقاومت صفر باشد و زمانی که اختلاف ولتاژ صفر به آن اعمال شود ولتاژ در خروجی صفر شود. همچنین دارای عرض باند بی نهایت باشد.

به دلیل تاثیر پذیری قطعات حساس آپ امپ از شرایط محیطی مثل رطوبت، دما و ... تقویت کننده های عملیاتی در اغلب موارد به صورت مدار مجتمع ساخته می شوند

در صورتی که بخواهیم مانند استفاده کتابی از آپ امپ استفاده کنیم می بایست از منبع تغذیه ای استفاده کنیم که علاوه بر خروجی زمین یا 0 ولت و $V_{SS}+$ (برای مثال 5 یا 12 ولت) خروجی $V_{SS}-$ (برای مثال 5- یا 12- ولت) داشته باشد یعنی اختلاف پتانسیل بین V_{SS} و $V_{SS}-$ (برای مثال 10 یا 24 ولت) تغذیه ی آپ امپ را تامین می کند که به

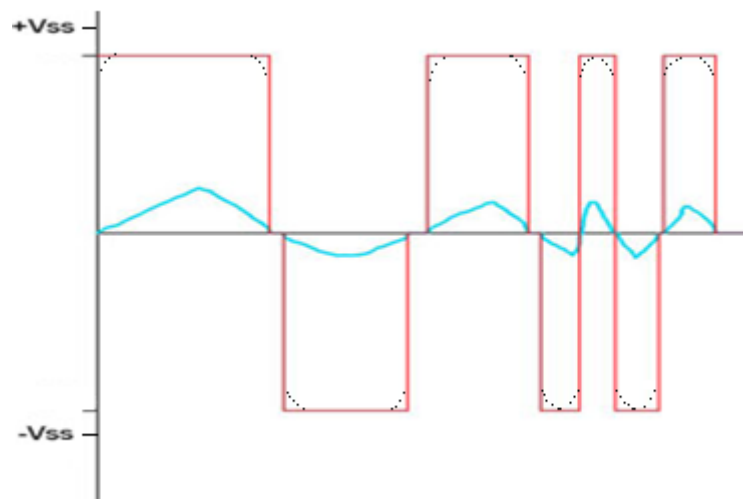
چنین تغذیه ای تغذیه مقارن گوییم . نکته قابل ذکر این است که آپ امپ به زمین مدار وصل نمی شود و فقط به منابع تغذیه متقارن وصل می شود. اگر بخواهیم از خروجی مثبت آپ امپ استفاده کنیم باید $-V_{SS}$ را به زمین متصل کنیم در ضمن اگر تغذیه مثبت و منفی آپ امپ را به طور معکوس وصل کنیم می سوزد.



تعریف عملی آپ امپ این است که : قطعه ای که در صورت اتصال صحیح , اختلاف ولتاژ میان دو ورودی را با توجه به بهره تقویت در خروجی ظاهر می کند . که این بهره تقویت از مشخصه های آپ امپ است و در آپ امپ های مختلف متفاوت است ولی می توان با اتصال چند مقاومت این بهره را به عدد مورد نظر منتقل کرد.

در آپ امپ ها در صورتی که ولتاژ پایه ورودی مثبت (NONINVERTING) از ولتاژ پایه ورودی منفی (INVERTING) بیش تر باشد خروجی به $+V_{SS}$ می رود به طور مثال در صورتی که ولتاژ تغذیه آپ امپ برابر 5 ولت باشد و پایه مثبت دارای ولتاژ بالاتری نسبت به پایه منفی باشد خروجی به سمت 5 ولت می رود و با توجه به مشخصه های آپ امپ در فاصله ای از V_{SS} متوقف می شود (معمولا حدود 1 ولت مانده به V_{SS}) و همین طور اگر ولتاژ ورودی منفی بیشتر از ولتاژ ورودی مثبت باشد در این صورت خروجی به سمت ولتاژ

پایه ی $-V_{SS}$ میل می کند. در صورتی که از فیدبک از خروجی به ورودی استفاده نشود با داشتن کمترین مقدار اختلاف ولتاژ، ماکزیمم اشباع در خروجی به وجود می آید واضح است به دلیل حساسیت بالای ورودی این مدار می تواند حتی نویزهای رادیویی را به راحتی در خروجی نشان دهد پس به شدت نویز پذیر است .



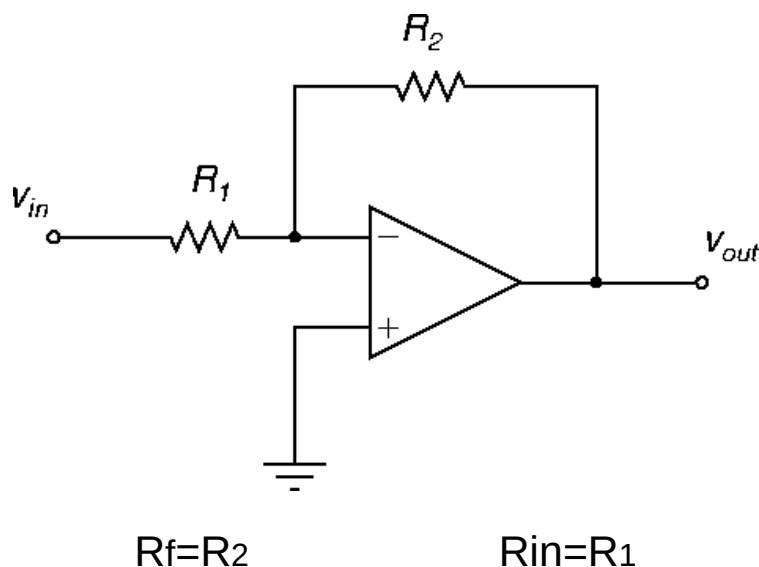
البته این خطوط قرمز برای آپ امپ هایی با سرعت عکس العمل بالا و ضریب تقویت بسیار بالا هستند که اعمال هر دوی این موارد خروجی را به سمت نقطه چین می برد.
مهم : بین پایه های ورودی و خروجی آپ امپ هیچ جریانی وجود ندارد.

“فیدبک در آپ امپ:”

در حالت واقعی بهره تقویت فقط از ولتاژهای پایه های مثبت و منفی ورودی تاثیرپذیر است و تنها ولتاژ ورودی است که خروجی را تعیین می کند و معمولاً این بهره تقویت بسیار بیشتر از مقداری است که کارایی لازم را داشته باشد لذا جهت کنترل بهره آپ امپ از فیدبک استفاده می کنیم . (یا پسخورد یا گین)

با استفاده از فیدبک می توان میزان بهره ولتاژ را تعیین کنیم . فیدبک میتواند از خروجی به هر یک از پایه های ورودی صورت بگیرد اگر فید بک از خروجی به پایه منفی صورت بگیرد آن را فیدبک منفی می نامند. که در این حالت میزان تقویت در آپ امپ از رابطه زیر محاسبه می شود :

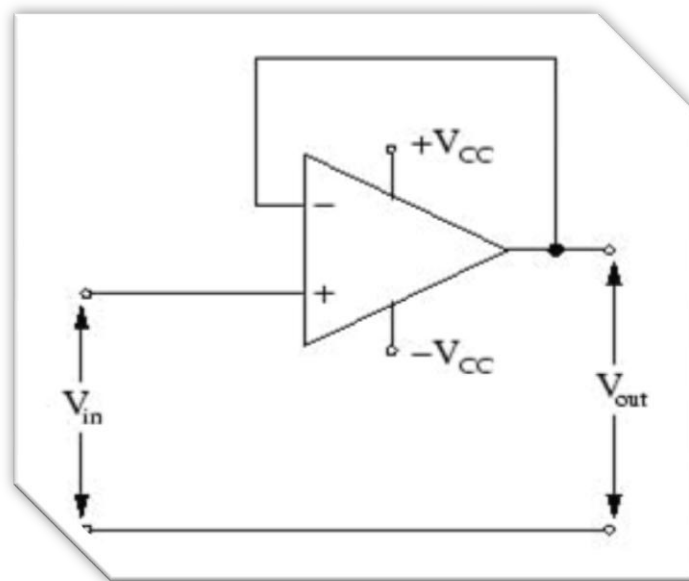
$$GAIN = 1 + R_f / R_{in}$$



اگر مقدار R_f برابر صفر باشد تقویت کنندگی وجود ندارد . در این صورت ولتاژ ورودی و خروجی با هم برابرند و آپ امپ به صورت یک بافر مجزا کننده جریان ورودی از خروجی به

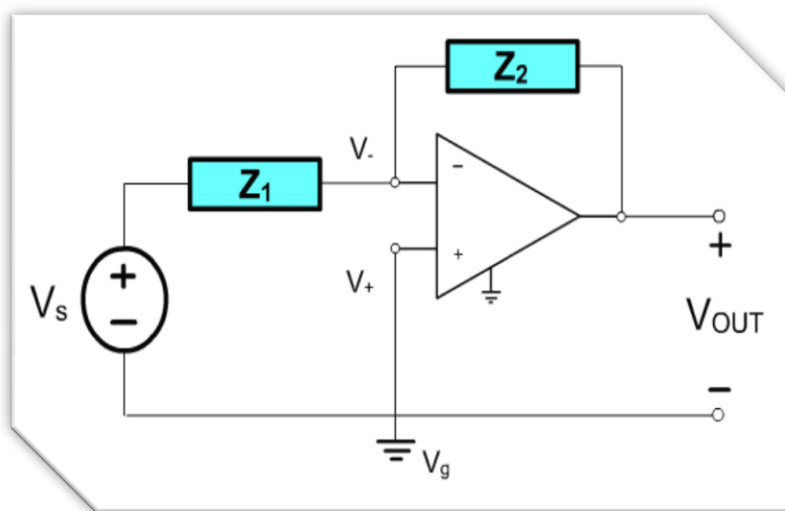
کار می رود. در شکل زیر خروجی بدون استفاده از مقاومت به پایه منفی ورودی فیدبک شده است.

نکته : برای کاهش اثر نویز می توان ورودی را با یک خازن یا یک مقاومت و خازن پایدارتر کنیم .



"چند مدار با آپ امپ"

1. تقویت کننده معکوس : (Inverting Amplifier)



با توجه به اینکه V_+ زمین شده است. بنابراین $V_+ = 0$ است. در حالت ایده آل $V_- = V_+$ است. در نتیجه $V_- = 0$ می شود.

با توجه به قوانین گره و نیز بالا بودن مقاومت ورودی آپ امپ در پایه منفی می توان نتیجه گرفت :

$$IZ1 = IZ2$$

(منظور از $IZ1$ جریان امپدانس یا مقاومت $Z1$ می باشد)

در واقع در اینجا فرض کردیم $IZ1$ جریان وارد شونده به گره موجود در پایه منفی آپ امپ است و $IZ2$ جریان خارج شونده از این گره است.

با توجه به قانون اهم و جهت جریان و صفر بودن جریان ورودی در آپ امپ رابطه زیر را برای $IZ1$ و $IZ2$ داریم:

$$I_{Z2} = (V_S/Z_1)$$

$$I_{Z2} = -(V_{out}/Z_2)$$

$$V_S/Z_1 = -V_{out}/Z_2$$

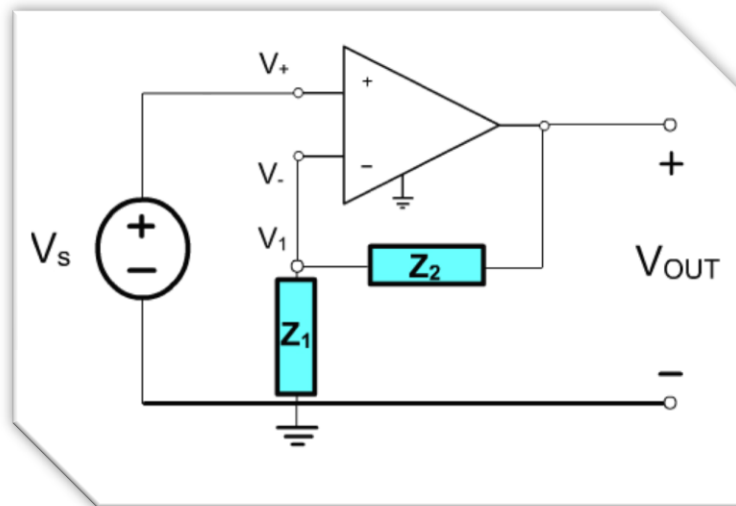
با توجه به فرمول فوق و تساوی I_{Z1} و I_{Z2} رابطه زیر بدست می آید:

$$V_{out} = -(Z_2/Z_1 V_S)$$

در این فرمول خروجی ، ضریب منفی یا برعکس شده ورودی است .

اگر مقاومت فیدبک و مقاومت ورودی یکسان باشند . بهره تقویت برابر منفی یک می شود. در این حالت آپ امپ به صورت یک بافر NOT یا معکوس عمل می کند.

2. تقویت کننده مستقیم :



در این حالت برعکس حالت قبلی تحریک آپ امپ از پایه مثبت صورت می گیرد

همانطور که در شکل زیر مشخص است $V_+ = V_S$ با توجه به هم پتانسیل بودن پایه

های ورودی منفی و مثبت در حالت ایده آل داریم:

$$V_- = V_S$$

با در نظر گرفتن قانون اهم $I = V/R$ در مورد جریان I_{Z2} رابطه زیر را داریم:

$$I_{Z2} = (V_{out} - V_1)/Z_2$$

همانطور که دیدید $V_- = V_1 = V_S$ می باشد. در نتیجه فرمول فوق به صورت زیر ساده می شود:

$$I_{Z2} = (V_{out} - V_S)/Z_2$$

$$I_{Z1} = (V_1 - 0)/Z_1$$

با توجه به قوانین گره و صفر بودن جریان ورودی آپ امپ در حالت ایده آل و روابط فوق رابطه زیر را داریم:

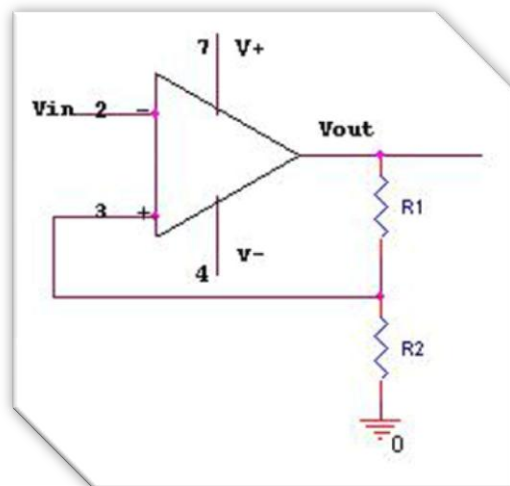
$$(V_{out} - V_S)/Z_2 = V_S/Z_1$$

با ساده کردن رابطه فوق داریم:

$$V_{out} = (1 + Z_2/Z_1)V_S$$

(در این حالت خروجی مضرب مثبتی از ورودی است.)

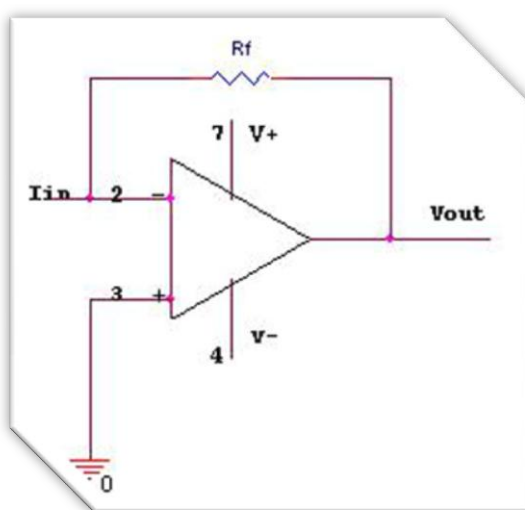
3. تقویت کننده ولتاژ به جریان :



در این حالت جریان ایجاد شده در بار مقاومتی متناسب با ولتاژ ورودی است. به دلیل مقاومت ورودی بسیار بالا در آپ امپ ها می توان از جریان ورودی صرف نظر کرد. بنابراین جریان خروجی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$I_{out} = V_{in}/R_2$$

4. تقویت کننده جریان به ولتاژ :

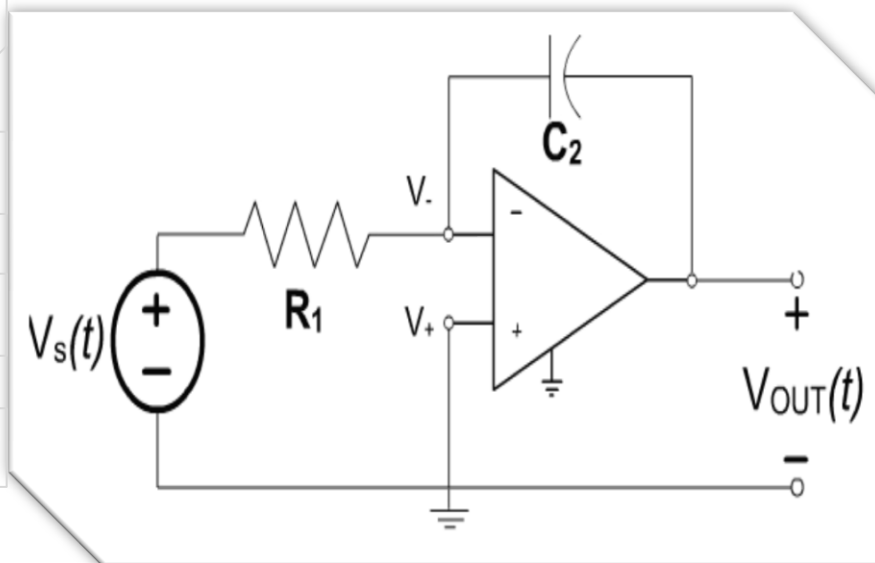


از این مدار جهت تقویت جریانهای خیلی کوچک در حد میکرو آمپر و تبدیل آن ها به ولتاژ های مناسب و خیلی بیشتر از میکرو استفاده می شود .

با استفاده از فرمول زیر می توانید مقدار ولتاژ خروجی را محاسبه کنید :

$$V_{out} = -I_{in} * R_f$$

5. مدار انتگرال گیر :



همانطور که در شکل مشاهده می کنید. زمانیکه لبه بالارونده پالس را در ورودی منفی این آی سی داشته باشیم، ولتاژ در پایه منفی برای چند لحظه بیشتر از ولتاژ در پایه مثبت زمین می شود. در این حالت آپ امپ به صورت معکوس کننده عمل می کند.

همانطور که می دانید انتگرال شکل موج مربعی معکوس به صورت مثلثی بوده شیب این شکل موج مثلثی در لبه بالا رونده منفی و در لبه پایین رونده مثبت است.

می توانید شکل موج مربعی را توسط آی سی 555 یا میکرو کنترلر ایجاد کنید. و شکل موج مثلثی را در اسیلوسکوپ ببینید.

در حالت ایده آل همانطور که می دانید

$$V_- = V_+$$

با توجه به قانون تساوی جریان های ورودی و خروجی به یک گره خواهیم داشت :

$$IR_1 = I_- + I_{C2}$$

همانطور که گفته شد به دلیل مقاومت ورودی بالا در آپ امپ می توانید از جریان I_- صرف نظر کنید .

بنابراین رابطه بالا به صورت زیر ساده می شود :

$$IR_1 = I_{c2}$$

$$IR_1 = (V_S - V_-)/R_1 \quad \text{و می دانیم :}$$

و با توجه به اینکه در حالت ایده آل $V_- = V_+$ و V_+ برابر صفر است $V_- = 0$ می شود .

و رابطه مربوط به جریان در بالا به این صورت ساده می شود $IR_1 = V_S/R_1$.

رابطه مربوط به جریان خازن به صورت زیر می باشد. در این رابطه جریان خازن با حاصلضرب ظرفیت خازن بر حسب فاراد در مشتق زمانی ولتاژ خازن بدست می آید .

$$I_C(t) = C \frac{d}{dt} V_C(t)$$

بر اساس این رابطه و جهت جریان عبارت مربوط به جریان خازن به صورت زیر به دست می آید :

$$I_C(t) = C \frac{d}{dt} (V_- - V_{out})$$

با توجه به صفر بودن V_- رابطه بالا به صورت زیر ساده می شود:

$$I_C(t) = -C \frac{d}{dt} V_{out}$$

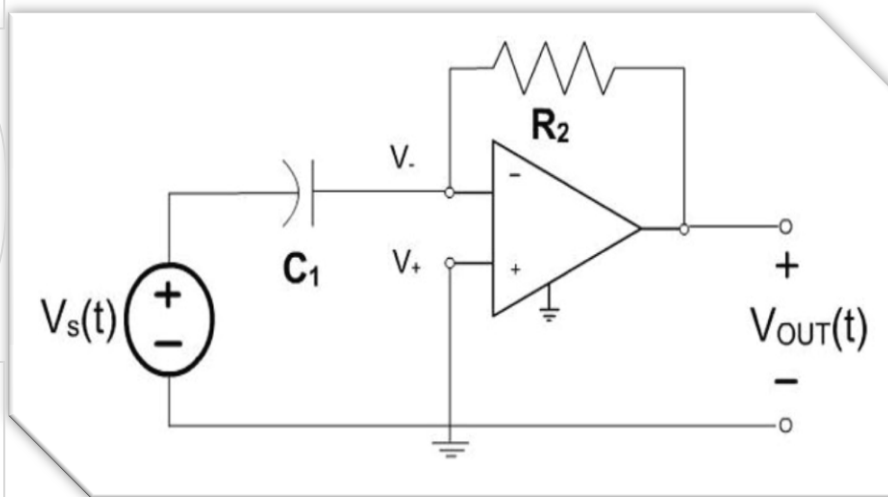
باتوجه به تساوی جریان ورودی و خروجی به یک گره رابطه زیر را خواهیم داشت :

$$V_S(t)/R_1 = -C \frac{d}{dt} V_{out}$$

با ساده کردن این رابطه خواهیم داشت $\frac{d}{dt}V_{out} = VS(t)/(R1C2)$

با توجه به اینکه انتگرال از مشتق ، برابر خود عبارت می شود. پس برای بدست آوردن خروجی از دو طرف تساوی انتگرال می گیریم . در این حالت خروجی برابر انتگرال حاصل تقسیم ورودی بر حاصلضرب مقاومت در ظرفیت خازن خواهد شد پس اگر شکل موج ورودی به صورت مربعی باشد شکل موج خروجی به صورت مثلثی خواهد بود.

6. مدار مشتق گیر:



اگر در محل اتصال خازن به پایه 2 آپ امپ مطابق شکل از قوانین مربوط به KCL استفاده کنید. همانطور که می دانید بر اساس قوانین KCL جریان های وارد شونده به یک گره با جریان های خارج شونده از گره برابرند. در این گره ای که مطرح شد، 3 جریان وجود دارد. یک جریان را جریانی که وارد خازن در نظر بگیرید، که به گره وارد می شود. دو جریانی دیگر از گره خارج می شوند. یک جریانی که وارد پایه منفی آپ امپ می شود. و جریانی که وارد مقاومت R2 در خروجی می شود. بنابراین فرمول زیر را خواهیم داشت .

$$I_c = I - +IR_2$$

به دلیل مقاومت ورودی بالا در آپ امپ و در حالت ایده آل می توانیم از جریانی در پایه منفی آپ امپ صرف نظر کنیم بنابراین داریم:

در واقع بنابر فرمول زیر همان جریانی که از خازن در ورودی می گذرد وارد خروجی نیز می شود .

$$I_c = I_{R2}$$

فرمولی که در مورد جریان خازن وجود دارد به صورت زیر است .

در این فرمول C ظرفیت خازن بر حسب فاراد است . t نیز در این عبارات بیانگر این است که این فرمول بر حسب زمان می باشد d/dt نیز همانطور که می دانید علامت مشتق گیری است. بنابراین جریان گذرنده از خازن از حاصلضرب ظرفیت خازن در مشتق زمانی ولتاژ بدست می آید .

$$I_c(t) = C \frac{dV_c(t)}{dt}$$

جریان گذرنده از مقاومت فیدبکی $R2$ نیز از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$I_{R2} = (V - V_{out}) / R2$$

در حالت ایده آل $V - = 0$ می باشد. بنابراین $I_{R2} = -V_{out} / R2$

بنابر روابط فوق رابطه زیر را خواهیم داشت :

$$-V_{out} / R2 = C \frac{dV_c(t)}{dt}$$

با ساده کردن عبارت فوق خواهیم داشت. همانطور که می بینید خروجی از مشتق ورودی حاصل می شود :

$$-V_{out} = R2 C \frac{dV_c(t)}{dt}$$

در شکل مثلثی ورودی مربوط به مشتق گیر ، هر جا که شیب خط مثلثی شکل زاویه ای حاده باشد لبه بالا رونده پالس را خواهیم داشت . و هر جا که این زاویه منفرجه یا باز باشد لبه پایین رونده پالس را خواهیم داشت .

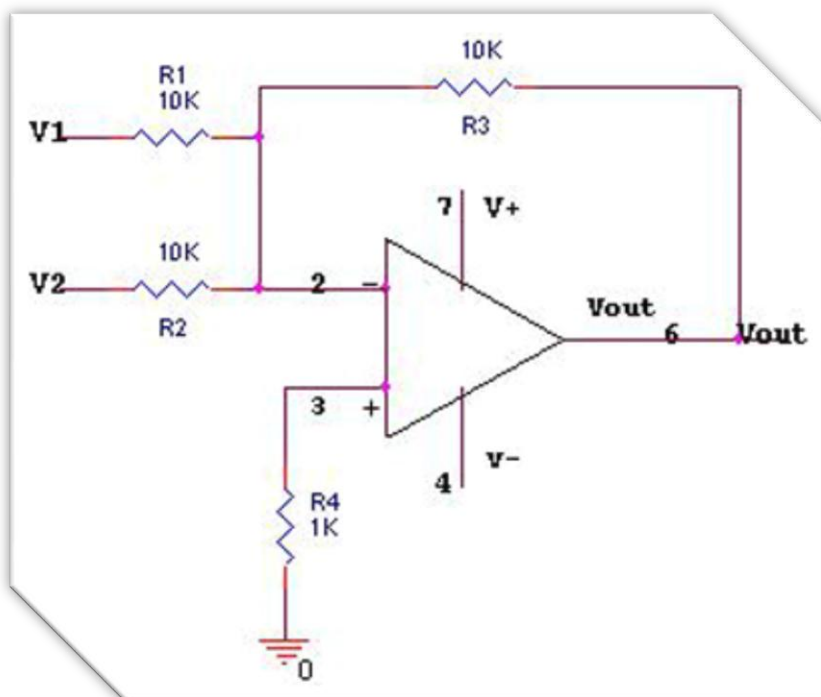
اگر شکل موج ورودی سینوسی باشد مشتق آنرا در نظر بگیرید. و سپس به خاطر علامت منفی که در فرمول بدست آوردید آنرا معکوس کنید .

$$d/dt \sin(at) = -a \cos(at)$$

علامت منفی این عبارت با منفی فرمول بالا مثبت می شود . بنابراین در این حالت شکل موج خروجی همسان با شکل موج ورودی و جلوتر از آن ایجاد می شود. علت جلوتر بودن آن ضریب a است. که در مشتق مشاهده می کنید. این شکل موج ها را براحتی می توانید در اسیلسکوپ مشاهده کنید .

اگر شکل موج ورودی مربعی باشد ، همانطور که می دانید مشتق تابع پله تابع ضربه می شود. بنابراین در خروجی هنگامیکه لبه بالا رونده پالس وجود داشته باشد، یک پالس نوک تیز به سمت بالا خواهیم داشت. و هنگامیکه لبه پایین رونده پالس را داشته باشیم. این پالس نوک تیز به سمت پایین خواهد بود.

7. مدار جمع کننده :



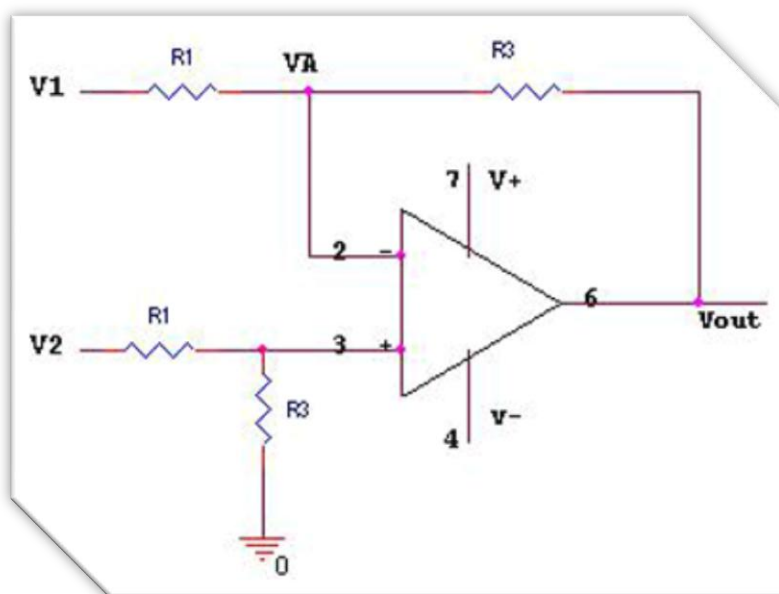
با توجه به مقاومت ورودی بالا در آپ امپ جریان هر یک از مقاومت ها در ورودی و جریان خروجی از رابطه زیر بدست می آید. علامت منفی نیز به خاطر این است که تحریک ولتاژ از پایه منفی صورت گرفته است.

$$(V1/R1 + V2/R2 = -V_{out}/R3)$$

اگر مقاومت های $R1$ ، $R2$ و $R3$ با یکدیگر برابر باشند. فرمول بالا به صورت زیر محاسبه می شود :

$$-(V_{out} = (V1 + V2))$$

8. مدار تفریق کننده :



اگر آپ آمپ را ایده آل فرض کنید. در واقع مقاومت ورودی آنرا بی نهایت و ولتاژ در دو پایه مثبت و منفی آنرا یکسان در نظر بگیرید . روابط زیر را جهت محاسبه ولتاژ خروجی خواهیم داشت .

$$V- = V+$$

مقدار ولتاژ در مقاومت $R3$ به صورت زیر محاسبه می گردد. در اینجا از قانون تقسیم ولتاژ در مقاومت های سری استفاده شده است . اگر به شکل نگاه کنید. این دو مقاومت سری نیستند. اما به دلیل بالا بودن مقاومت ورودی آپ آمپ و صفر بودن جریان ورودی می توان دو مقاومت را سری در نظر گرفت .

$$VR3 = (V2 * R3 / (R1 + R3))$$

همانطور که در شکل می بینید $VR3 = V+$.

و همانطور که گفته شد در حالت ایده آل $V- = V+$ است. بنابراین همانطور که در شکل می بینید $VA = V-$ است .

از روابط گفته شده می توان نتیجه گرفت. که $VA = VR3$ است .

با توجه به اینکه جریان های وارد شده به یک گره با جریان خارج شونده از آن گره برابر است، بنابراین اگر شما در شکل زیر گره V_A را در نظر بگیرید. جریان خارج شونده از آن به سمت ورودی منفی آپ امپ به دلیل مقاومت بالا ورودی آپ امپ نزدیک به صفر خواهد بود، که در محاسبات صفر در نظر می گیرند. این کاهش جریان و نزدیکی آن به صفر را می توان با رابطه قانون اهم به راحتی فهمید .

$$V = R * I$$

بر اساس این قانون هر چ قدر جریان بیشتر شود. مقاومت کمتر خواهد شد. چرا که همانطور که در فرمول می بینید . می توانید مقاومت را در کسر در زیر ولتاژ بیاورید و جریان را به صورت مجزا در یک طرف تساوی داشته باشید . حال هر چ قدر مقاومت را بیشتر کنید این کسر کوچکتر می شود و جریان کمتر می شود .

با توجه به مسایل گفته شده جریان در مقاومت R_1 برابر $(V_1 - V_A)/R_1$

جریان در مقاومت R_3 نیز از رابطه زیر بدست می آید :

$$(V_{out} - V_A)/R_3$$

با توجه به قوانین مربوط به گره اگر هر دو جریان را وارد شونده به گره V_A در نظر بگیرید. رابطه زیر را خواهیم داشت :

$$(V_1 - V_A)/R_1 = -(V_{out} - V_A)/R_3$$

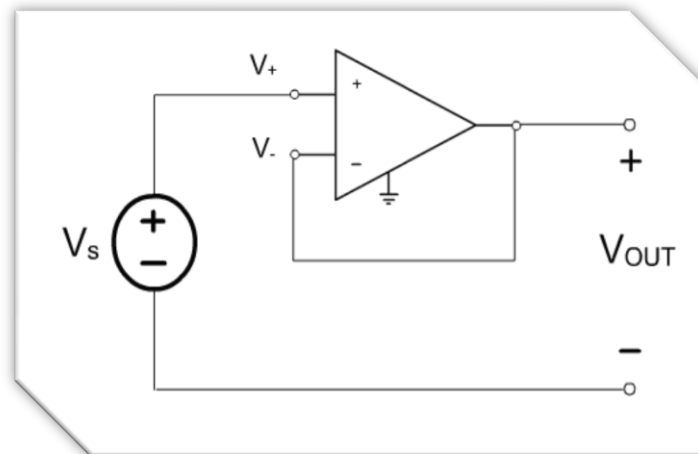
با ساده کردن این رابطه و جاگذاری V_A با عبارت مربوط به V_{R3} که مساوی V_A بدست آمد. رابطه نهایی زیر را خواهیم داشت .

$$1/R_1 * (V_1 - V_2) = -V_{out}/R_3$$

اگر دو مقاومت $R1$ و $R3$ با یکدیگر مساوی باشند رابطه زیر را خواهیم داشت، که بیانگر عمل تفریق است.

$$V_{out} = V_2 - V_1$$

9. دنبال کننده و ولتاژ :



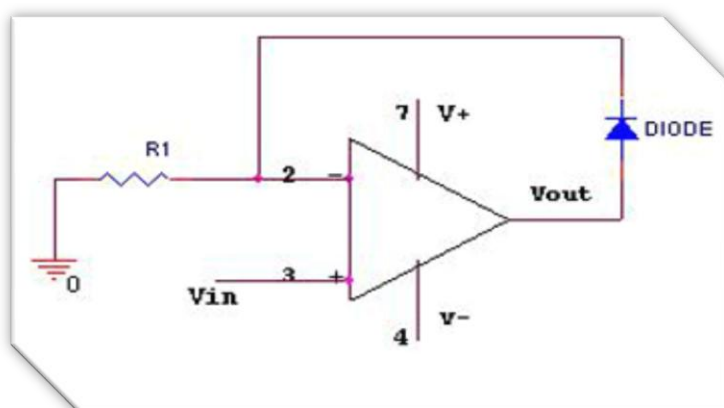
در یک آپ امپ ایده آل که به صورت زیر بسته شود. ولتاژ ورودی V_S با ولتاژ خروجی برابر می شود. در این حالت به دلیل امپدانس بالای ورودی در آپ امپ ها، ولتاژ خروجی با وجود برابری با ولتاژ ورودی ولی کاملاً از جریان ورودی مجزا یا ایزوله شده است. مقدار ولتاژ خروجی از فرمول زیر تبعیت می کند.

$$V_- = V_+ \text{ آل آپ امپ ایده آل}$$

همانطور که در نقشه ملاحظه می کنید $V_+ = V_S$. در این حالت جریان از پایه مثبت به پایه منفی می رود. و از آنجا به خروجی می رود. در این حالت $V_- = V_{out}$ می شود و در نهایت

$$V_S = V_{out}$$

10. مدار نمونه با استفاده از دیود :



همانطور که در شکل زیر مشاهده می کنید مسیر فیدبک توسط دیود ایجاد می شود. اگر شکل موج ورودی سینوسی باشد این شکل موج را می توانید با عبارت V_{in} در کنار شکل بالا مشاهده کنید. خروجی این آپ امپ در حالتی که ولتاژ ورودی در سیکل منفی باشد، نزدیک به صفر است. که با صرف نظر کردن از این مقدار نزدیک به صفر، آنرا صفر در نظر می گیرند.

در این صورت در حالت عملی ولتاژهای کمتر از ولتاژ هدایت دیود از سیگنال ورودی را در خروجی نخواهیم داشت.