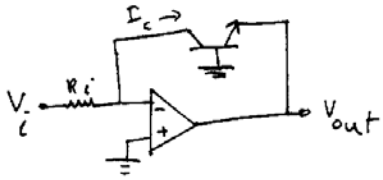
کننده با بهره مثبت می‌شود و چون D_4 هدایت نمی‌کند ، آپ امپ B دخالتی در خروجی ندارد . وقتی V_i منفی می‌شود ، دیودهای D_1 و D_4 هدایت می‌کنند در حالیکه D_2 و D_3 قطع هستند .

۱۲ـ تقویت کننده لگاریتمی



$V_{BE} \propto \log I_c$ $\quad V_{BE} = 0.06 \log \frac{I_c}{I_S}$

$I_c = \frac{V_i}{R_i}$ $\quad V_{out} = V_{BE} = 0.06 \log \frac{V_i}{I_S R_i}$

$10^{-7}_{A} < I_c < 10^{-2}_{A}$ $\quad -0.36_{V} < V_{out} < 0.66\ v$

آپ ـ امپ واقعی

در تجزیه و تحلیل مدارات آپ ـ امپ ، فرض شد که آپ ـ امپ ایده‌آل است . از آنجا که آپ امپ از به هم پیوستن چند طبقه تقویت‌کننده ترانزیستوری بوجود آمده ، ناگزیر دارای محدودیتهایی در بهره ولتاژ ، مقاومت ورودی ، جریان خروجی و ... می‌باشد . این گونه محدودیت‌ها اساس طراحی‌های انجام شده بر مبنای حالت ایده‌آل را بر هم نمی‌زنند و تنها نتایج را تقریبی می‌کنند . آپ ـ امپ‌هایی در بازار وجود دارند که مشخصات آنها به مشخصات آپ ـ امپ ایده‌آل بسیار نزدیک است . مهمترین مشخصات آپ ـ امپ واقعی (انحراف از مشخصات ایده‌آل) به ترتیب زیر توضیح داده می‌شود :

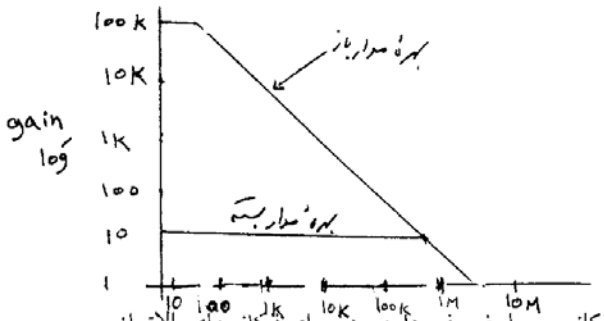
الف ـ پاسخ فرکانسی — ب ـ ولتاژ افست (انحراف از میزان ورودی)

ج ـ جریان باياس — د ـ مقاومتهای ورودی و خروجی

الف ـ پاسخ فرکانسی

۱ـ بهره مدار باز Open - loop Gain ، برابر است با :

هر طبقه از تقویت‌کننده‌های درون آپ ـ امپ ، پاسخ فرکانس را محدود می‌کنند . (شبیه یک فیلتر ساده RC که بهره فرکانس بالا را کاهش می‌دهد) .



۲ـ بهره مدار بسته Closed - Loop gain

با توجه به موارد فوق به نظر می‌رسد که آپ ـ امپ پاسخ فرکانس بسیار ضعیفی دارد یعنی برای فرکانسهای بالاتر از حدود 40 HZ ، بهره کاهش پیدا می‌کند . اما مدار تقویت کننده هیچ وقت بصورت مدار باز بسته نمی‌شود ؛ بنابراین می‌بایست پاسخ فرکانس مدار بسته را مورد مطالعه قرار داد . با توجه به شکل بالا، برای بهره ۱۰ ، پاسخ فرکانس تا حدود 400 KHZ افزایش پیدا می‌کند لذا سودمندی استفاده از فیدبک منفی در اینجا مشهود می‌گردد .

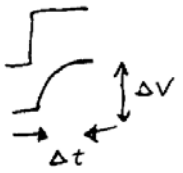
۳- GBP - Gain - Bandwidth product GBP = Gain (مدار بسته) × BW (مدار بسته)

GBP برابر است با حاصل ضرب بهره در پهنای باند مدار بسته ، که مقدار ثابتی است . بنابراین برای پیدا کردن پهنای باند مدار بسته می‌بایست GBP را بر بهره مدار تقسیم کرد. GBP همان پهنای باند مدار باز می‌باشد .(فرکانسی که در آن بهره برابر با یک می‌شود)

۴- Slew rate

برای سیگنالهای بزرگ ، تغییرات سریعی در خروجی مورد نیاز می‌باشد. Slew rate تغییرات ولتاژ خروجی در زمان میکروثانیه می‌باشد .

$SR = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ V/ms



$f_p = \frac{SR}{2\pi V_s}$

V_s = ولتاژ خروجی

حداکثر فرکانس سینوسی که بدون خراب شدن اعوجاج op-amp می‌تواند

ب - ولتاژ افست

۱- در آپ - امپ واقعی وقتی دو سر ورودی را زمین کنیم ، ولتاژ خروجی صفر نمی‌شود . برای صفر شدن خروجی لازم است که ولتاژی برابر V_{os} به دو سر ورودی اعمال گردد . این ولتاژ را ولتاژ انحراف از میزان ورودی یا ولتاژ افست می‌نامند ، برای سیگنالهای بزرگتر از یک ولت این مسئله مشکلی ایجاد نمی‌کند ؛ ولی برای سیگنالهای کوچک ، (حدود چند میلی‌ولت ، مانند سیگنال کرنش سنج یا ترموکوپل) می‌بایست ولتاژ افست در نظر گرفته و جبران شود .

۲- در آپ - امپ پایه‌هایی برای جبران کردن V_{os} وجود دارند . می‌توان با قرار دادن پتانسیومتر بر روی آن پایه‌ها و تغییر مقدار پتانسیومتر ، خروجی را به ازای ورودیهای زمین شده ، صفر نمود .

۳- رانش حرارتی ولتاژ انحراف از میزان Offset Voltage drift وقتی V_{os} را جبران نموده و به صفر می‌رسانیم با تغییر دما ، مجدداً V_{os} زیاد می‌شود تغییرات V_{os} را نسبت به دما ، رانش حرارتی V_{os} می‌نامند .

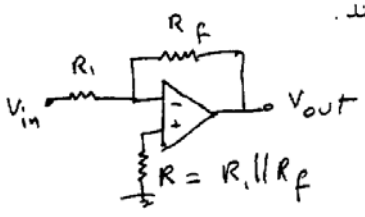
$\frac{\Delta V_{os}}{\Delta T}$ = drift μV/°C

۴- نویز - تمامی اتصالات نیمه هادیها نویز ایجاد می‌کنند و این نویز برای دریافت سیگنالهای کوچک تولید اشکال می‌کند .

ج - جریان بایاس

در مدار داخلی op-amp سرهای ورودی به طور مستقیم به بیس یا گیت متصل است و بنابراین جریانهای dc مربوط به بایاس از آنها عبور می‌کند . متوسط این جریانها را جریان بایاس ورودی می‌نامند . خطای ایجاد شده در مدار متناسب با مقاومت فیدبک می‌باشد . بنابراین مقاومتهای حدود ۱۰ K در فیدبک برای این منظور مناسب‌تر هستند . تفاوت جریانهای بایاس ورودی ، جریان بایاس دیفرانسیلی می‌باشد . برای جبران سازی و ایجاد توازن بهتر است که ورودیها مقاومتهای معادلی داشته باشند .

جریان بایاس با تغییر دما، تغییر می‌کند که آن را ***رانش حرارتی جریان بایاس*** می‌نامند .



د ـ مقاومتهای ورودی و خروجی

آپ ـ امپ واقعی دارای یک مقاومت خروجی در حدود ۱۰۰ اهم می‌باشد . مقاومت ورودی معمولاً بصورت دیفرانسیلی آن مورد نظر بوده و ذکر می‌گردد و مشکلی هم ایجاد نمی‌کند زیرا مقدار آن در مدار بسته بسیار افزایش پیدا می‌کند :

$$R_{out}^{\text{مدار بسته}} = A R_d^{\text{مدار باز}}$$

مشخصات مهم تقویت کننده‌های ابزار دقیق

این تقویت کننده می‌بایست دارای مشخصات ذیل باشد :

۱ـ امپدانس ورودی بسیار زیاد داشته باشد تا خروجی مبدلها را تغییر ندهد .

مثال : یک نوع میکروالکترود سلولی برای مطالعه سیستم عصبی دارای مقاومت خروجی 1000 -10 مگااهم می‌باشد . بنابراین تقویت کننده‌ای که این الکترود به آن وصل می‌شود می‌بایست امپدانس ورودی آن حدود صد برابر این مقدار باشد .

۲ـ بهره بالا و پایدار داشته باشد . دامنه سیگنالهای برانگیخته مغزی 50-1 میکرو ولت می‌باشد . بنابراین تقویت کننده می‌بایست بهره بسیار بالایی برای اندازه‌گیری این سیگنال داشته باشد .

۳ـ CMRR بالا داشته باشد .

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}}$$

مشخصه مهم CMRR نسبت بهره تفاضلی به بهره مد مشترک می‌باشد و برای هر تقویت کننده در برگه مشخصات ذکر می‌شود . بنابراین با داشتن بهره تفاضلی هر مدار (از طریق فرمول)، و CMRR از برگه مشخصات ، می‌توان بهره مد مشترک را بدست آورد . هر چه CMRR بیشتر باشد ، یعنی A_{cm} کمتر و مطلوب‌تر است ؛ زیرا باعث حذف و کم اثر کردن سیگنالهای مد مشترک می‌شوند

سیگنالهای مد مشترک Common mode Signals

بیشتر سیگنالهای مورد نظر در پزشکی دامنه بسیار کوچکی دارند و اکثراً شامل نویز زیادی هم می‌باشند . به عنوان مثال هنگام اندازه‌گیری سیگنال الکتروکاردیوگرام ECG ، در اتاق ، نویز برق شهر بر روی بدن بیمار موجود می‌باشد . بنابراین از روش دیفرانسیلی برای تقویت این سیگنال استفاده می‌شود . این نویز که بر روی هر دو ورودی وجود دارد ***سیگنال مد مشترک*** نامیده می‌شود . چنانچه بهره مد مشترک صفر یا ناچیز باشد، باعث حذف این نویز می‌شود.

انتخاب آپ ـ امپ برای مدار

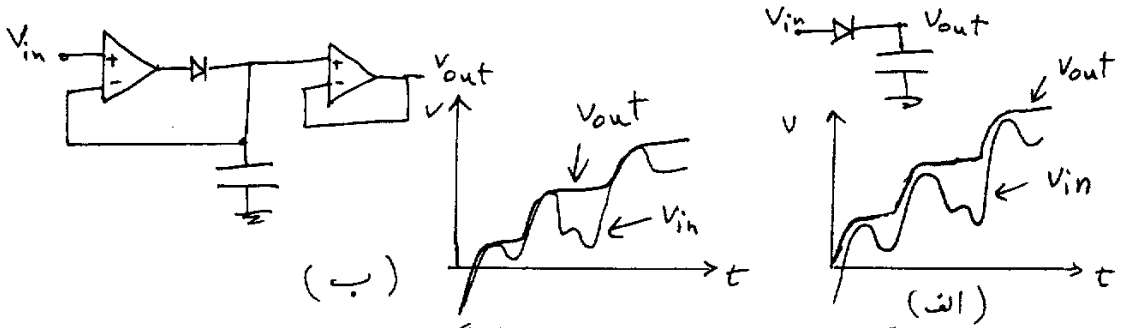
پس از طراحی مدار ، مشخصات واقعی آپ ـ امپ‌ها را با محدودیت‌هایی که در مدار مورد نظر وجود دارد ، تطبیق داده و آپ امپ مورد نظر را انتخاب می‌کنیم . مشخصات مهم معمولاً شامل امپدانس ورودی ، جریان بایاس ورودی ، ولتاژ افست و drift و Slew rate , CMRR و پهنای باند می‌باشد.

نکته : در برگه مشخصات آپ ـ امپ‌ها، علاوه بر مشخصات محدوده عملکرد آپ ـ امپ، حداکثر مجاز بعضی از پارامترهای مهم مانند تغذیه، حرارت و ... نیز ذکر می‌شود و رعایت نکردن این حداکثر مجاز باعث خراب شدن «آی‌سی» می‌شود .

آشکارساز حداکثر دامنه Active peak detector

در بسیاری از موارد لازم است که مقدار حداکثر دامنه یک سیگنال تعیین شود . ساده‌ترین روش استفاده از دیود و یک خازن مانند شکل الف میباشد . وقتی مقدار V_{in} از V_{out} بیشتر باشد ، دیود هدایت می‌کند و خروجی همانند سیگنال ورودی می‌شود (کمتر از افت یک دیود) . وقتی V_{in} از V_{out} کوچکتر شود ، دیود معکوس می‌شود و هدایت نمی‌کند ؛ در حالیکه خازن مقدار حداکثر دامنه را نگه می‌دارد .

مشکل این مدار ساده ، امپدانس ورودی متغیر و کم و همچنین افت ولتاژ دیود می‌باشد . آشکارساز حداکثر دامنه فعال مدار بهتری می‌باشد و مشکلات فوق را برطرف می‌کند (شکل ب) وقتی V_{in} از V_{out} بیشتر است دیود هدایت می‌کند و آپ ـامپ فیدبک منفی داشته و V_{out} برابر V_{in} می‌شود . وقتی V_{in} کمتر از V_{out} شود ، خروجی آپ ـامپ به سمت اشباع منفی می‌رود و دیود قطع می‌شود . V_{out} (ولتاژ دو سر خازن) حداکثر دامنه را نگه می‌دارد (وقتی دیود هدایت می‌کند ، V_{out} دقیقاً برابر V_{in} است ولی خروجی آپ ـامپ به اندازه افت دیود بیشتر از V_{out} می‌شود)



چنانچه محدودیت‌های آپ ـامپ واقعی را برای مدار فوق در نظر بگیریم می‌بایست نکات زیر رعایت شوند :

۱ـ SR آپ ـامپ زیاد باشد زیرا خروجی آپ ـامپ از اشباع منفی (قطع دیود) تا مقدار $V_{out} + V_D$ (هدایت دیود) باید در زمان کوتاهی تغییر کند .

۲ـ جریان بایاس ورودی موجب دشارژ آهسته خازن می‌گردد (یا شارژ شدن خازن) .این پایین افتادن ولتاژ را droop می‌نامند و بهترین راه برای اجتناب از این مسئله استفاده از آپ ـامپ‌هایی با جریان بایاس خیلی کم می‌باشد . به همین دلیل دیودی باید انتخاب شود که جریان نشتی کمی داشته باشد .

۳ـ بافر بهتر است آپ ـامپ با ورودی FET باشد تا دارای امپدانس زیادی باشد .

۴ـ حداکثر جریان خروجی آپ امپ ، نرخ تغییر ولتاژ دو سر خازن را محدود می‌کند ، یعنی نرخی که در آن خروجی می‌تواند بالا رفتن ورودی را دنبال کند . بنابراین انتخاب خازن مصالحه‌ای است بین droop و slew rate زیاد خروجی . اگر مقدار C زیاد باشد droop کمتر (مناسب‌تر) ولی SR کمتر می‌شود . اگر مقدار C کم باشد SR بیشتر و مناسب‌تر ولی droop زیادتر می‌شود :

$I_C = C\frac{dv}{dt}$ $\quad \frac{dv}{dt} = \frac{I}{C}$

I_b جریان بایاس $droop = \frac{I_b}{C}$ V/sec

I_{out} حداکثر خروجی آپ‌امپ $SR = \frac{I_{out}}{C}$ V/μs

مثال : $I_b = 80\,nA$ $C = 1\mu F$ 741

$I_{out} = 25\,mA$

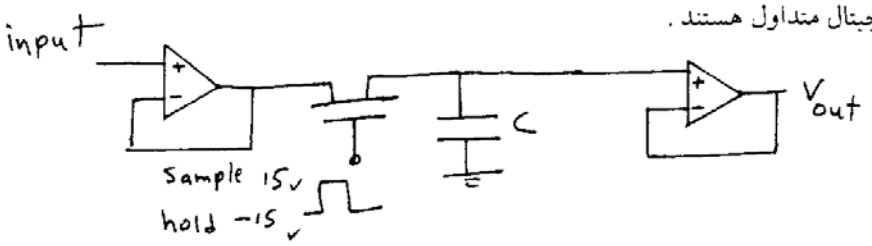
$droop = (80\times10^{-9})/(1\times10^{-6}) = .08$ V/s

$SR = (25\times10^{-3})/(10^{-6}\times10^{6}\,\mu s/s) = .025$ V/μs

بنابراین SR این مدار از SR 741 کمتر است و باید از خازن کوچکتری استفاده شود و برای حل مشکل droop،به جای 741 از آپ ـامپ با جریان بایاس کمتری استفاده شود.

نمونه بردار و نگه‌دار Sample and Hold - S/H

مدار S/H در سیستم‌های دیجیتال متداول هستند .



مدار S/H از دو آپ ـ امپ و یک کلید FET و خازن تشکیل می‌شود . وقتی FET روشن است (Sample) سیگنال ورودی عبور کرده و بر روی خازن و خروجی بافر قرار می‌گیرد . وقتی FET خاموش است (Hold) سیگنال ورودی عبور نمی‌کند و مقدار قبلی سیگنال بر روی خازن نگه داشته می‌شود .

مقدر C یک مصالحه است . جریان نشتی در FET و بافر موجب می‌شود که ولتاژ خازن کم شود (droop) . بنابراین برای کم کردن droop می‌بایست مقدار C بزرگ باشد . اما مقاومت FET با خازن یک فیلتر پایین گذر را تشکیل می‌دهند (وقتی FET روشن است) . بنابراین در صورتی که قرار باشد سیگنال‌های سرعت بالا عبور کنند باید C کوچک باشد . آپ ـ امپ اولی می‌بایست قادر به تغذیه جریان شارژ خازن باشد و برای دنبال کردن سیگنال ورودی می‌بایست دارای SR کافی باشد . SR کلی مدار معمولاً توسط جریان خروجی و مقاومت روشن FET محدود می‌شود.