تقویت کننده‌های عملیاتی
OP - AMP

در سال ۱۹۶۰ میلادی ، با عرضه op - amp به صورت مدار مجتمع ، طراحی قسمتهای آنالوگ سیستم‌های ابزار دقیق ، بسیار ساده گردید . تا قبل از آن تمام قسمتهای الکترونیکی را با قطعات مجزا طراحی می‌کردند و طراح می‌بایست اطلاعات جامعی را در مورد قطعات مختلف ترانزیستورها و مدارهای مختلف آن ، منحنی‌های قطب ، صفر و ... بداند .

برای استفاده از op - amp ، دانستن اطلاعات مختصری درباره قوانین ، نحوه کار و محدودیت‌های آن کافی می‌باشد . بنابراین طراح یک سیستم ابتدا فهرستی از مشخصه‌ها و نیازهای سیستم را تهیه کرده و آن سیستم را با استفاده از مدل op - amp ایده‌آل و مقاومت و خازن و منبع تغذیه طراحی می‌کند . سپس از همان op - ampهای موجود در بازار ، op - amp مناسبی که با مشخصات و محدودیت‌های سیستم تطبیق داشته باشد ، انتخاب می‌نماید. قیمت op - ampها متفاوت می‌باشد ، از حدود هزار ریال تا بیش از صد هزار ریال نسبت به ویژگی‌های مخصوص آن می‌باشد .

برخی از کاربردهای op - amp

۱ـ تقویت کننده‌های خطی ـ اصلی‌ترین زمینه استفاده از op - amp در این مورد می‌باشد زیرا بهره‌های بسیار بالا و پایداری دارند . این تقویت کننده‌ها با استفاده از مقاومت‌ها می‌توانند بهره‌های مثبت یا منفی ، کمتر یا بیشتر از یک داشته باشند .

۲ـ تقویت کننده‌های غیرخطی ـ همراه با مدارهای جانبی دیگر با op - ampها می‌توان مدارهای مختلف غیرخطی را برای عملکردهای پیچیده روی سیگنال مانند ضرب یا تقسیم دو سیگنال و خطی کردن سیگنالهای غیرخطی ، طراحی نمود . مانند :

الف ـ لگاریتمی ـ خروجی تقویت کننده متناسب با لگاریتم ولتاژ ورودی می‌باشد .

ب ـ معادلات توانی ـ ولتاژ خروجی متناسب است با $e^{v_{in}}$

ج ـ یکسو سازی دقیق سیگنالهای کوچک

۳ـ مقایسه کننده‌ها ـ op - ampها برای مقایسه دامنه دو سیگنال به کار می‌روند . به عنوان مثال اگر سیگنال A از سیگنال B کوچکتر باشد ، خروجی منفی ، و اگر سیگنال A از سیگنال B بزرگتر باشد ، خروجی مثبت می دهد .
سه دسته مهم از مقایسه کننده به شرح زیر می‌باشد :

الف ـ آشکارساز عبور از صفر

ب ـ مقایسه کننده اشمیت تریگر

ج ـ آشکارساز پنجره‌ای

۴ـ فیلترهای فعال ـ این فیلترها برای بهبود نسبت سیگنال به نویز در سیستم‌های پردازش سیگنال بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند . نحوه کار آنها بدین ترتیب است که فرکانس‌هایی که سیگنال در آن محدود است را عبور می‌دهند ، در حالیکه مانع از عبور فرکانس‌های نویز می‌شوند .همچنین به علت فعال بودن ، سیگنال مورد نظر را می‌توانند تقویت کنند .

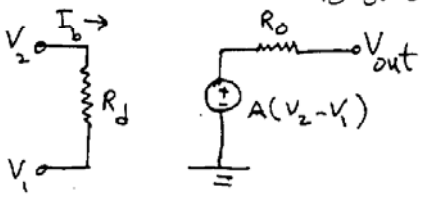
۵ـ اسیلاتورها ـ از op - amp ها برای تولید سیگنالهای پریودیک استفاده می‌شود . از این مدارها برای سیستم‌های زمانی (timing) ، و یا برای تحریک کردن یا راه‌اندازی مدارهای دیگر استفاده می‌شود .

آپ امپ ایده‌آل

آپ امپ ، تقویت کننده دیفرانسیلی dc با بهره بالا می‌باشد و معمولاً با فیدبک منفی استفاده می‌شود . بهترین راه برای طراحی مدار با آپ امپ این است که فرض شود آپ امپ ایده‌آل است و پس از طراحی ، مشخصات غیرایده‌آل آن بررسی شود و در صورت نیاز در مدار تغییراتی داده شود .

مشخصات آپ امپ ایده‌آل

مدار معادل آپ امپ در شکل الف نشان داده شده است و دارای ویژگی‌های ذیل می‌باشد :



(الف)

۱ـ $A = \infty$ ، بهره بی‌نهایت می‌باشد .

۲ـ $V_{out} = 0$ وقتی که $V_1 = V_2$ باشد ؛ یعنی ولتاژ افست ندارد .

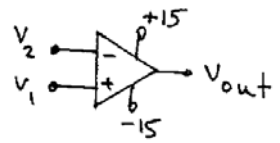
۳ـ $R_d = \infty$ ، امپدانس ورودی بی‌نهایت می‌باشد .

۴ـ $R_o = 0$ ، امپدانس خروجی صفر است .

۵ـ $BW = \infty$ ، پهنای باند بی‌نهایت است .

۶ـ $I_b = 0$ ، جریان بایاس صفر می‌باشد .

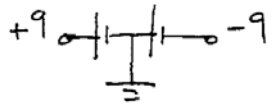
۷ـ $A_{cm} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 0$ وقتی که $V_{in} = V_2 = V_1$ ، بهره مُد مشترک صفر می‌باشد .



(ب)

نمایش شماتیک آپ امپ در (شکل ب) نشان داده شده است .

آپ امپ دارای دو ورودی مستقیم (+) و معکوس (-) و یک خروجی می‌باشد . آپ امپ معمولاً با دو تغذیه ۱۵± یا ۱۲± ولت تغذیه می‌شود . از دو باطری ۹ ولتی برای تغذیه آپ امپ به شکل زیر می‌توان استفاده نمود .



قوانین اصلی

۱ـ هیچ جریانی وارد هیچ کدام از پایه‌های ورودی آپ امپ نمی‌شود .

۲ـ اگر آپ امپ فیدبک منفی داشته باشد ، ولتاژ پایه‌های ورودی برابر خواهد شد .

با استفاده از دو قانون بالا می‌توان مدارهای آپ امپ را طراحی نمود .

مدارات کاربردی op - amp

مدارهای مهم op - amp به شرح زیر است :

۱ـ تقویت کننده با بهره مثبت Noninverting amplifier

۲ـ بافر ـ ولتاژ فالور Buffer - voltage follower

۳ـ تقویت کننده با بهره منفی Inverting amplifier

۴ـ مدار جمع کننده Summing amplifier

۵ـ مبدل جریان به ولتاژ Current - to - voltage converter

۶ـ انتگرال‌گیر Integrator

۷ـ تقویت کننده دیفرانسیل Differential amplifier

۸ـ تقویت کننده ابزار دقیق Instrumentation amplifier

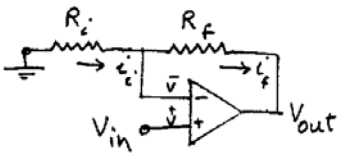
۹ـ مقایسه کننده Comparator

۱۰ـ مقایسه کننده با هیستریس Comparator with hysteresis

۱۱ـ یکسو کننده Rectifiers

۱۲ـ تقویت کننده لگاریتمی Logarithmic amplifier

۱ـ تقویت کننده با بهره مثبت



$$\bar{v} = \dot{v} = V_{in}$$

$$i_i = i_f$$

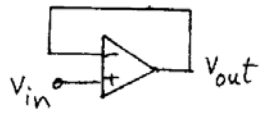
$$\bar{v} = V_{out}\frac{R_i}{R_i + R_f}$$

$$V_{out} = V_{in}\frac{R_i + R_f}{R_i}$$

$$gain = \frac{R_i + R_f}{R_i}$$

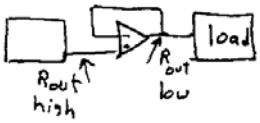
$$Z_{input} = \infty$$

۲ـ بافر

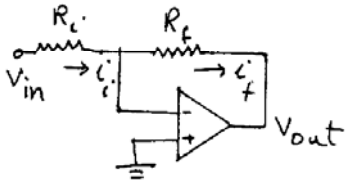


$R_f = 0 \qquad V_{out} = V_{in}$

impedance transformer



۳ـ تقویت کننده با بهره منفی



$$i_i = i_f \qquad i = \frac{V_{in} - V_{out}}{R_i + R_f}$$

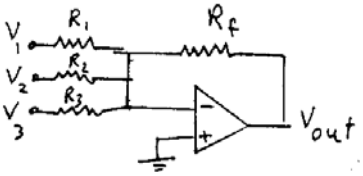
$$\dot{v} = \bar{v} = V_{in} - R_i i = V_{in} - R_i \frac{V_{in} - V_{out}}{R_i + R_f} = 0$$

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_i} V_{in}$$

$$gain = -R_f / R_i$$

$$Z_{input} = R_i$$

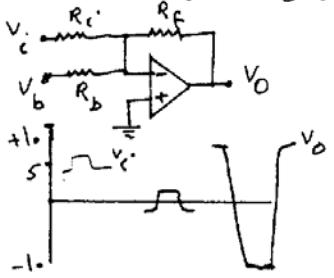
۴ـ مدار جمع کننده



$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_1} V_1 - \frac{R_f}{R_2} V_2 - \frac{R_f}{R_3} V_3$$

مثال ۱ -

برای اندازه‌گیری سیگنال الکتروآکولوگرام ، از یک پیش تقویت کننده استفاده شده است . در خروجی پیش تقویت کننده ، سیگنال مورد نظر (۱ ولت) بر روی یک مؤلفه dc ۵ ولتی قرار دارد . مداری طراحی کنید که مؤلفه dc را حذف کند و بهره ۱۰- برای سیگنال مورد نظر فراهم کند .

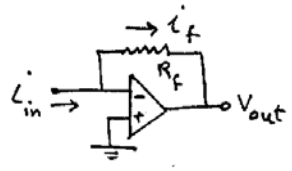


$$V_o = -\frac{R_f}{R_c} V_c - \frac{R_f}{R_b} V_b \qquad \text{let: } \begin{cases} V_b = -10\ V \\ R_c = 10\ K \end{cases}$$

$$\begin{cases} -\frac{R_f}{R_c} = -10 \Rightarrow R_f = 100\,K \\ V_c = 5 \quad V_o = 0 \end{cases} \qquad 0 = -\frac{R_f}{R_c} V_c - \frac{R_f}{R_b} V_b$$

$$\frac{V_c}{R_c} + \frac{V_b}{R_b} = 0 \qquad R_b = -\frac{R_c \cdot V_b}{V_c} = -\frac{(10^4)(-10)}{5} = 20\,K$$

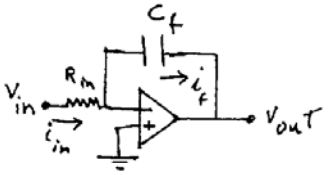
۵- مبدل جریان به ولتاژ



$$\dot{V} = \bar{V} = 0$$

$$i_{in} = i_f = 0 - \frac{V_{out}}{R_f} \qquad V_{out} = -R_f i_{in}$$

۶- انتگرال‌گیر

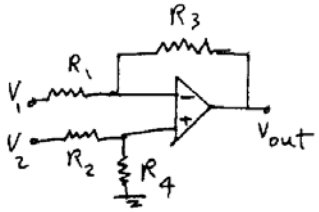


$$\dot{V} = \bar{V} = 0$$

$$i_{in} = i_f = i_c = C\frac{dv}{dt}$$

$$\frac{V_{in}}{R_{in}} = -C\frac{dV_{out}}{dt} \qquad V_{out} = -\frac{1}{R_{in} C_f}\int V_{in}\, dt$$

۷- تقویت کننده دیفرانسیلی



$$\bar{V} = \dot{V} \qquad \dot{V} = V_2 \frac{R_4}{R_2 + R_4}$$

$$i = \frac{V_1 - V_{out}}{R_1 + R_3} \qquad \bar{V} = V_1 - R_1 i = V_1 - R_1 \frac{(V_1 - V_{out})}{R_1 + R_3}$$

$$V_2 \frac{R_4}{R_2 + R_4} = V_1 - R_1 \frac{(V_1 - V_{out})}{R_1 + R_3}$$

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

$$\begin{cases} V_1 = V_2 \\ V_{out} = 0 \end{cases} \checkmark 1$$

$$V_1 = V_2 \Rightarrow V_{out} = 0 \Rightarrow R_3 R_2 = R_1 R_4 \qquad A_{cm} = 0 \text{ مدار}$$

$$R_3 R_2 \neq R_1 R_4 \qquad \checkmark 1$$

$$V_{out} = \frac{R_3}{R_1}(V_2 - V_1)$$

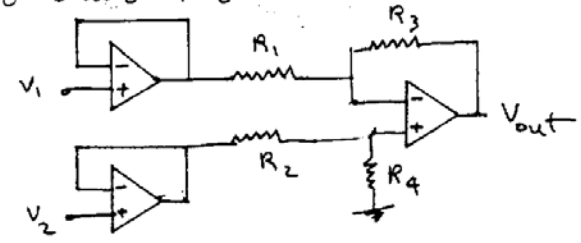
$$A_{cm} = \frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_2 + R_4)}$$

$$Z_{input\,V_1} = R_1$$

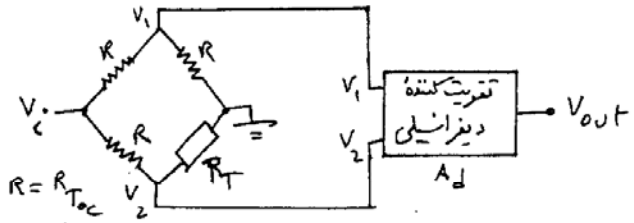
$$Z_{input\,V_2} = R_2 + R_4$$

۳۰

امپدانس ورودی تقویت کننده دیفرانسیلی کم است . با گذاشتن دو بافر در ورودیها مشکل امپدانس ورودی حل می‌شود



مثال ۲ ـ مدار اندازه گیری درجه حرارت



$T \uparrow \Rightarrow R_T \downarrow$

$V_1 = V_i \cdot \frac{R}{R+R} = \frac{V_i}{2}$

$V_2 = V_i \cdot \frac{R_T}{R+R_T}$

$R_T = R - \Delta R$

$\Delta R = k \Delta T$

$V_{out} = A_d (V_1 - V_2)$

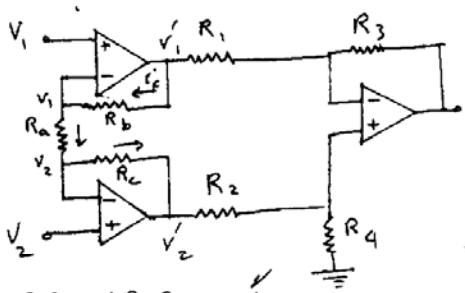
$V_1 - V_2 = \frac{V_i}{2} - V_i \cdot \frac{R-\Delta R}{R+R-\Delta R}$

$V_1 - V_2 = \frac{\Delta R}{2(2R-\Delta R)} V_i \quad \Delta R \ll R$

$V_1 - V_2 = \frac{\Delta R}{4R} V_i = \frac{k \Delta T}{4R} V_i$

$V_{out} = A_d \left(\frac{k \Delta T}{4R} \right) V_i$

۸ـ تقویت کننده ابزار دقیق



$R_1 R_4 = R_2 R_3$

$V_{out} = -\frac{R_3}{R_1} (V_2' - V_1')$

$i_f = \frac{V_1 - V_2}{R_a} \qquad V_1' = V_1 + R_b i_f = V_1 + R_b \frac{V_1 - V_2}{R_a}$

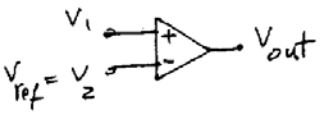
$V_2' = V_2 - R_c i_f = V_2 - R_c \frac{V_1 - V_2}{R_a}$

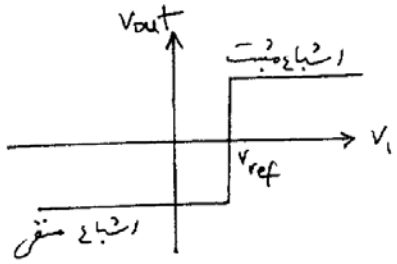
$V_{out} = (V_2' - V_1') \frac{R_3}{R_a R_1} (R_a + R_b + R_c)$

$R_1 R_4 \neq R_2 R_3$ اگر

$A_{cm} = \frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_2 + R_4)}$

۹ـ مقایسه کننده



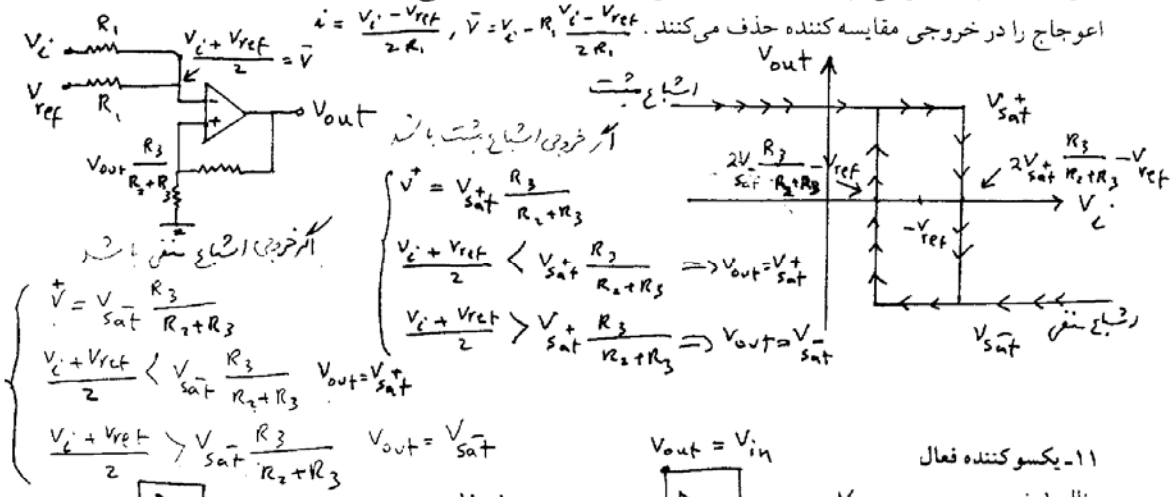


یک مقایسه کننده ساده در شکل نشان داده شده است .

وقتی $V_1 > V_2$ بزرگتر باشد خروجی اشباع مثبت می‌شود و وقتی $V_1 < V_2$، خروجی اشباع منفی می‌شود .

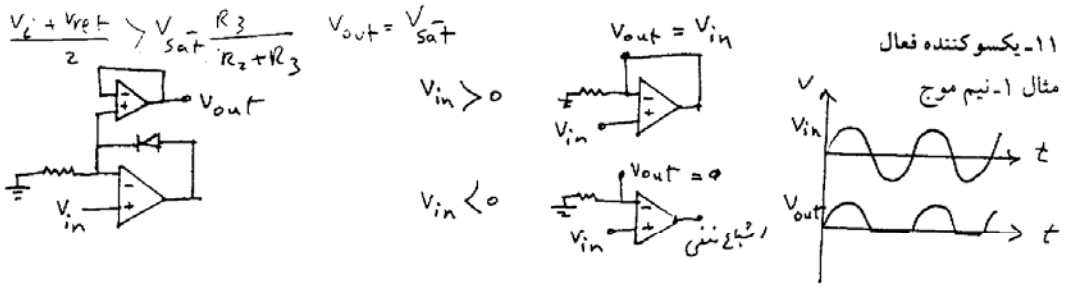
۱۰ـ مقایسه کننده با هیستریس

مقایسه کننده با هیستریس برای مقایسه سیگنالهایی نویز دارند یا به یک سطح سیگنال مشخص، به کار می‌روند و اعوجاج را در خروجی مقایسه کننده حذف می‌کنند.



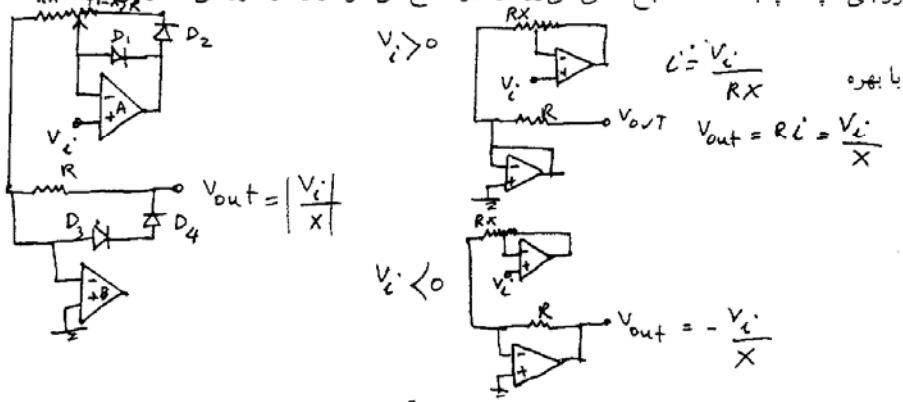
۱۱ـ یکسو کننده فعال

مثال ۱ـ نیم موج



وقتی V_{in} مثبت باشد خروجی آپ امپ به سمت اشباع مثبت می‌رود و دیود هدایت میکند و ولتاژ خروجی برابر ورودی می‌شود. ولتاژ خروجی در جایی قرار دارد که افت ولتاژ مستقیم دیود شامل آن نمی‌شود. بنابراین یکسو کننده فعال برای ولتاژهای کمتر از ۰/۷ ولت نیز خوب کار می‌کند و افت ولتاژ دیود در ولتاژ خروجی ظاهر نمی‌شود. وقتی V_{in} منفی باشد خروجی آپ امپ به سمت اشباع منفی می‌رود و دیود قطع می‌شود و ولتاژ خروجی صفر می‌شود.

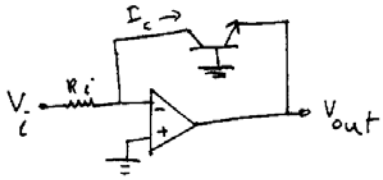
مثال ۲ـ تمام موج با بهره



وقتی V_i مثبت باشد خروجی آپ امپ A به سمت اشباع مثبت و خروجی آپ امپ B به سمت اشباع منفی می‌رود. بنابراین دیودهای D_2 و D_3 هدایت می‌کنند و دیودهای D_1 و D_4 قطع هستند (بایاس معکوس). آپ امپ A، تقویت

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 :

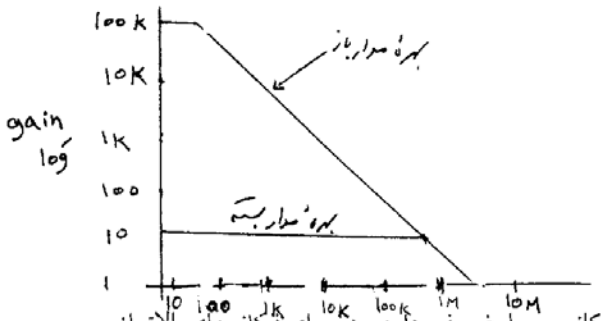
الف ـ پاسخ فرکانسی — ب ـ ولتاژ افست (انحراف از میزان ورودی)

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 .