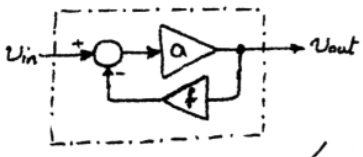
در جلسه پنجم اصول فیدبک و مزایای آن مرور شد از آنجاکه در بررسی فیدبک همواره به تجسم ساختار فیدبک نیاز مندیم. یکبار دیگر آنرا مرور می کنیم.

شکل (۱)

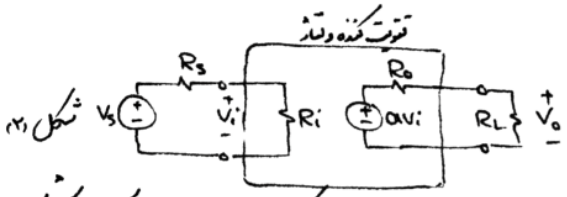


$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{a}{1+af} \simeq \frac{1}{f} \qquad (af \gg 1)$$

a نشانگر مدار حلقه باز و f نشانگر شبکه فیدبک و خطاچین نشانگر کل مداری می باشد. در این مداری گوییم، شبکه فیدبک در خروجی از ولتاژ نمونه برداری می کند و در ورودی با ولتاژ جمع (در واقع تفریق) می کند. ورودی یا خروجی مداری توانند بجای ولتاژ جریان نیز باشد. برای آنکه فیدبک منفی بماند بهره حاصلضرب $T=af$ باید مثبت بماند. یعنی a و f هردو مثبت یا هردو منفی باشند. بسته به آنکه کدامیک از کمیتهای موجود در مدار (ولتاژ یا جریان) به عنوان ورودی و کدامیک به عنوان خروجی تقویت کننده در نظر گرفته شوند، تقویت کننده ها را می توان به چهار نوع تقسیم نمود.

۱- تقویت کننده های ولتاژ (فیدبک سری- موازی)

شکل (۲)

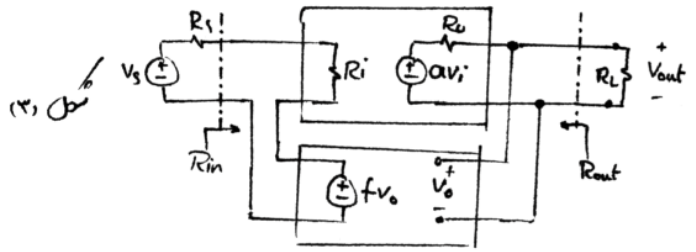


در این تقویت کننده ها ورودی و خروجی هردو ولتاژ هستند.

$$\frac{V_o}{V_s} = a \cdot \frac{R_i'}{R_i'+R_s} \cdot \frac{R_L}{R_L+R_o}$$

تقویت کننده ایده آل به تقویت کننده ای گفته می شود که بهره آن مستقل از مقاومتهای بار و منبع باشد. در اینصورت تقویت کننده ولتاژ در صورتی ایده آل می باشد که $R_i=\infty$ و $R_o=0$ باشد. در این حالت چنانچه مداری (شبکه فیدبک) بخواهد از ولتاژ خروجی نمونه برداری کند باید در خروجی موازی بسته شود و چنانچه بخواهد با ولتاژ ورودی جمع شود باید با ورودی سری گردد. (مطابق شکل ۳). حالتی را در نظر بگیرید که در آن $R_s=0$ و $R_L=\infty$ است در این صورت داریم:

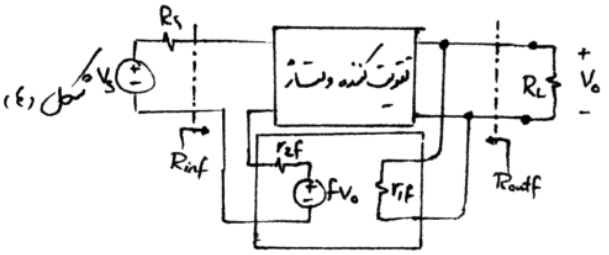
شکل (۳)



$$A_f = V_{out}/V_s = \frac{a}{1+af}$$
$$R_{inf} = R_i(1+T)$$
$$R_{outf} = \frac{R_o}{1+T}$$

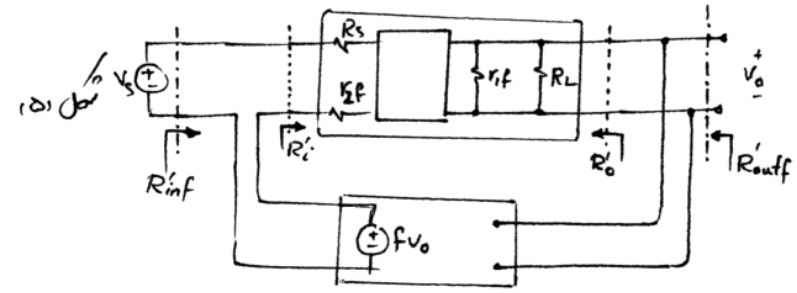
مشاهده می شود تغییرات مقاومت خروجی و ورودی در جهتی است که با بستن فیدبک به تقویت کننده ایده آل نزدیک می شویم.

شکل (۴)



جعبه فیدبک در نظر گرفته شده در شکل ۳، ایده آل بود در حقیقت نمودار بلوکی تقویت کننده ولتاژ عملی با فیدبک مطابق شکل ۴ خواهد بود. مطابق قضایای مدار بدون آنکه معادلات KVL، KCL مدار تغییری کند، می توان مقاومتهای مدار را مطابق شکل (۵) جابجا نمود تا به آرایشی مطابق شکل ۳، با مقاومت منبع صفر و مقاومت بار بی نهایت رسید. مجدداً می توان نوشت.

شکل (۵)



$$a' = a \cdot \frac{R_i}{R_i+R_s+r_{2f}} \cdot \frac{R_L \parallel r_{if}}{(R_L \parallel r_{if}) + R_o}$$

$$R_i' = R_s + R_i + r_{2f}$$
$$R_o' = R_L \parallel r_{if} \parallel R_o$$

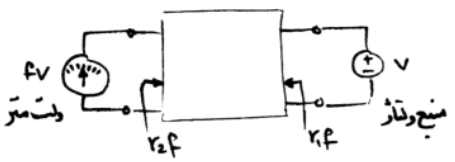
a'، R_i'، R_o' بهره ولتاژ، مقاومت ورودی و مقاومت خروجی مدار حلقه باز با اثر بارگذاری منبع، بار و جعبه فیدبک می باشد. با توجه به آنکه در شکل ۳، مشاهده می شود.

$$A_f = \frac{a'}{1+a'f} \quad ; \quad R_{inf}' = R_i'(1+a'f) = R_{inf} + R_s \quad ; \quad R_{outf}' = \frac{R_o'}{1+T} = R_{outf} \parallel R_L$$

بدین ترتیب A_f ، R_{inf} و R_{outf} محاسبه می شوند. مشاهده می شود همواره تغییرات مقاومت ها در جهتی است که به تقویت کننده های ایده آل نزدیک می شویم.

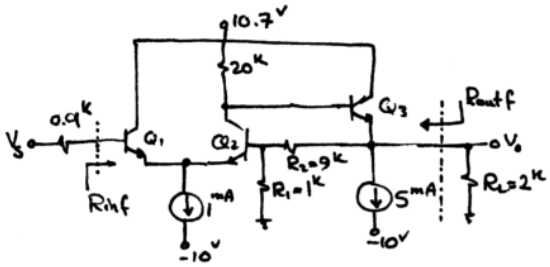
برای محاسبه r_{1f} ، r_{2f} و β مربوط به شبکه فیدبک می توان هم زیر را بخاطر سپرد. از آنجا که در این نوع مدار ولتاژ خروجی به عنوان ورودی شبکه فیدبک منظور می گردد و خروجی شبکه فیدبک خوانده شده ولی در ورودی کل مدار گم می شود، در ورودی شبکه یک منبع ولتاژ و در خروجی آن یک ولت متر تصور کنید. f نسبت ولتاژ نشان داده شده توسط ولت متر به ولتاژ ورودی است ، r_{1f} و r_{2f} به ترتیب مقاومتهای مشاهده شده توسط منبع ولتاژ و ولت متری باشد. واضح است مقاومت منبع ولتاژ ، صفر (اتصال کوتاه) و ولت متر بی نهایت (اتصال مدار باز) در نظر گرفته می شود.

شکل (۶)



مثال: در مدار شکل روبرو $\beta=100$ و h_{fe} مطلوبست الف) محاسبه نقاط کار مدار

ب) محاسبه a ، f ، T ، A_f ، R_{inf} ، R_{outf}

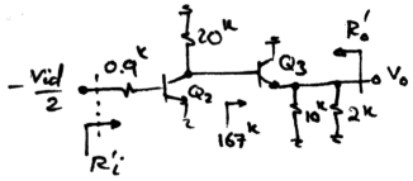


	I_c	V_{CE}	r_π
Q_1	0.5mA	11.4	5K
Q_2	0.5m	1.4	5K
Q_3	5m	10.7	0.5K

حل: با صرف نظر کردن از جریانهای بیس ولتاژ بیس Q_3 صفر است لذا در حالت بایاس ولتاژ بیس Q_2 نیز صفر است و جریان بیس Q_2 نیز صفر است لذا افت ولتاژی در سر مقاومت R_2 در این حالت نداریم یعنی ولتاژ خروجی در حالت بایاس صفر خواهد بود. این نوع فیدبک خصوصاً برای صفر نگهداشتن ولتاژ خروجی در حالت بایاس در تقویت کننده های عملیاتی کاربرد فراوان دارد.

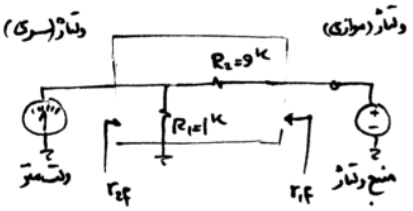
در شکل به جای تأمین جریان فیدبک همین مسیری از خروجی به ورودی. مقاومتهای R_1 و R_2 در شکل نخستی ولتاژ خروجی را به ورودی دیفرانسیل می دهند در واقع چون طبقه دیفرانسیل اختلاف دو ورودی را تقویت می کند ، فیدبک منفی است.

مدار حلقه باز:



$$a' = \left(\frac{-1}{2}\right)\left(\frac{167^K \| 20^K}{\frac{r_\pi + 0.9^K}{\beta}}\right)\left(\frac{1.67}{1.67+\frac{0.5}{\beta}}\right) = 151$$

$$R_i' = 5.9^K \quad , \quad R_o' = 1.67^K$$



$$f = \frac{1}{1+9} = \frac{1}{10}$$

$$r_{2f} = 1^K \| 9^K = 900^\Omega$$

$$r_{1f} = 9^K + 1^K = 10^K$$

لذا $A = \frac{a'}{1+a'f} = 9.4$ $\quad T = a'f = 15.1$

$R_{inf}' = R_i'(1+T) = 95^K = 0.9^K + R_{inf} \longrightarrow R_{inf} = 94^K$

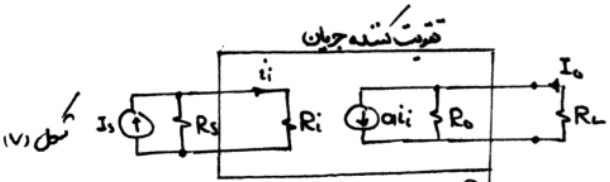
$R_{outf}' = \frac{R_o'}{1+T} = 103^\Omega = R_{outf} \| 2^K \longrightarrow R_{outf} = 108^\Omega$

۲- تقویت کننده های جریان (فیدبک موازی - سری)

همانگونه که در قسمت (۱) گفته شد، در شکل (۷) داریم،

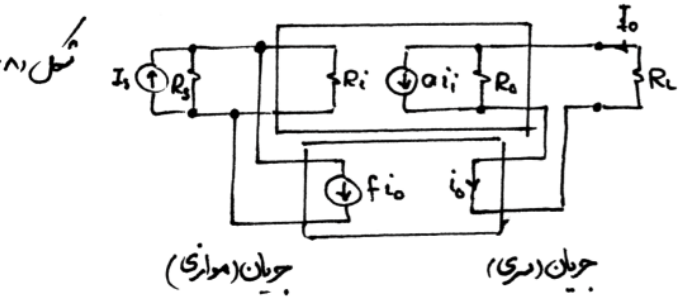
$R_o \to \infty$, $R_i \to 0$ ← در تقویت کننده جریان ایده آل

شکل (۷)



$$\frac{I_o}{I_s} = a \cdot \frac{R_s}{R_s+R_i} \cdot \frac{R_o}{R_o+R_L}$$

شکل (۸) نمایش تقویت کننده جریان به همراه شبکه فیدبک ایده آل ، شبکه فیدبک در خروجی سری و با ورودی موازی است.



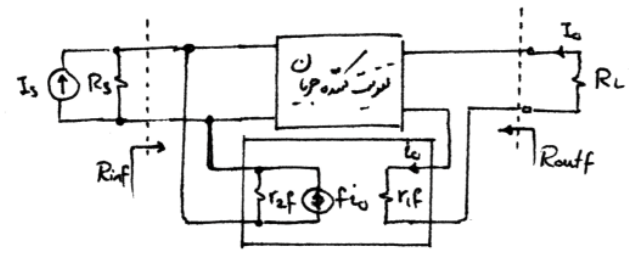
اگر $R_L=0$ و $R_s=\infty$ باشد داریم،

$$A_f = \frac{I_o}{I_s} = \frac{a}{1+af} \quad ; \quad R_{inf} = \frac{R_i}{1+af} = \frac{R_i}{1+T}$$

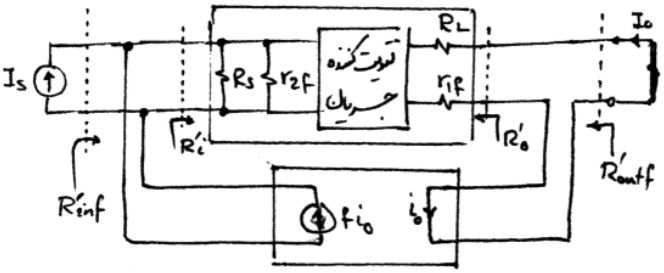
$$R_{outf} = R_o(1+T)$$

شکل (۹)، نمودار بلوکی چنین تقویت کننده‌ای با حلقه فیدبک عملی را نشان می‌دهد و شکل (۱۰) چگونگی تبدیل شکل (۹) به حالت موجود در شکل (۸) مداری با حلقه فیدبک ایده‌آل و مقاومت بار و منبع صفر. مدار حلقه باز با تعمیم‌دهنده مفهوم مدار حلقه باز با اثر بارگذاری حلقه فیدبک و مقاومتهای بار و منبع را نداعی می‌کند. با صرف نظر از فیدبک بهره و مقاومت ورودی و خروجی را بدست می‌آوریم.

شکل (۹)



شکل (۱۰)



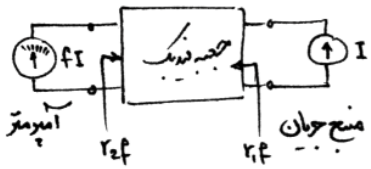
$f=0 \longrightarrow \left(a'=\frac{I_o}{I_s}\ ;\ R_i'\ ;\ R_o'\right)$

در خصوص حلقه فیدبک باز از لم زیر استفاده می‌کنیم. (شکل (۱۱))

منبع جریان معادل مقاومت بینهایت و آمپرمتر اتصال کوتاه می‌باشد.

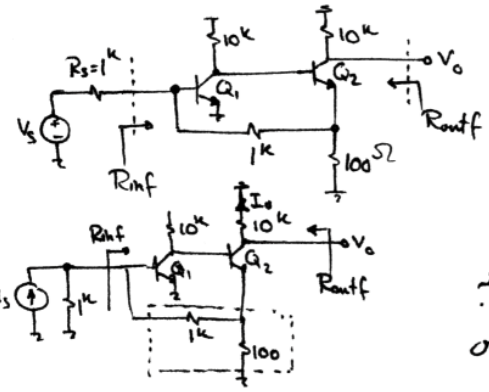
در اینصورت برای مدار حلقه بسته داریم.

شکل (۱۱)



$$A_f = \frac{a'}{1+a'f}$$
$$R'_{inf} = R'_i/(1+T) = R_{inf} \parallel R_s$$
$$R'_{outf} = R'_o \cdot (1+T) = R_{outf} + R_L$$

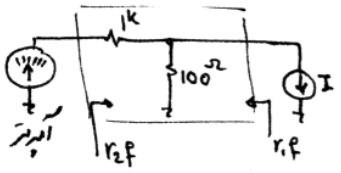
مثال: مطلوب است محاسبه a' ، f ، T ، A_f ، R_{inf} ، R_{outf} برای تقویت کننده فیدبک نشان داده شده در شکل. ($\beta=100$, $I_{CQ}=1^{mA}$ = جریان بایاس ترانزیستورها).



مقاومتهای 100^Ω ، 1^K شکل حلقه فیدبک را تشکیل می‌دهند. از آنجا که جریان ورودی به حلقه برابر I_{E_2} می‌باشد، $I_{E_2}=\frac{I_{C_2}}{\alpha}$ ($\alpha\approx 1$). لذا جریان ورودی به حلقه فیدبک همان جریان خروجی مدار است و حلقه فیدبک در ورودی موازی است. لذا تقویت کننده بصورت تقویت کننده جریان در نظر گرفته می‌شود. پس بجای V_s و مقاومت 1^K معادل نورتن می‌گذاریم

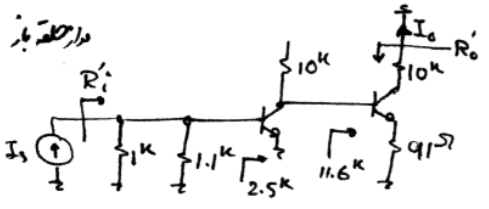
$$I_s = \frac{V_s}{1^K}\ ,\quad R_s = 1^K$$

فیدبک باید به نحوی منفی اختیار گردد. جهت‌های نشان داده شده در شکل این گونه‌اند.



$$f = \frac{0.1}{1.1} = +0.091$$
$$r_{1f} = 1^K \parallel 100^\Omega = 91^\Omega$$
$$r_{2f} = 1.1^K\Omega$$

مدار حلقه باز



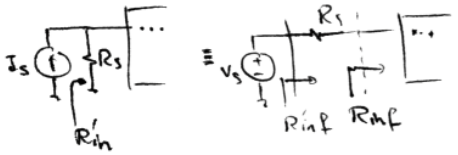
$$a' = \frac{I_o}{I_s} = \left(\frac{-0.5^K}{0.5^K+2.5^K}\right)\times(100)\times\left(\frac{-10^K}{10^K+11.6^K}\right)\times 100 = 772$$
$$R'_i = 1^K \parallel 1.1^K \parallel 2.5^K = 417^\Omega$$
$$R'_o = 10^K + \infty = \infty$$

لذا $T=70$

$$A_f = \frac{a'}{1+a'f} = +10.8\ ;\ R'_{inf} = \frac{R'_i}{1+T} = 6^\Omega\ ;\ R'_{outf} = \infty$$

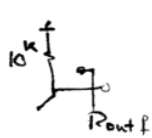
حال باید محکومین اصلاحاتی را که برای تبدیل تقویت کننده ولتاژ به جریان انجام دادیم را اعمال کنیم.

$$A = \frac{I_o}{I_s} = 10.8 = \frac{\left(\frac{V_o}{10^K}\right)}{\left(\frac{V_s}{1^K}\right)} \longrightarrow \frac{V_o}{V_s} = 108$$



$R_{inf} \parallel R_s = R'_{inf} = 6^\Omega \longrightarrow R_{inf} \approx 6^\Omega$

مداری که R_{outf} را نشان می‌دهد



$R_{outf} = 10^K \parallel \infty = 10^K$

مداری که R'_{outf} را نشان می‌دهد. چرا؟!

۳- تقویت کننده‌های ریسانس انتقالی (transconductance) (فیدبک سری - سری)

مطابق شکل (۱۳)،

$$\frac{I_o}{V_s} = a \cdot \frac{R_i}{R_i + R_S} \cdot \frac{R_o}{R_o + R_L}$$

ریسانسوس a_i، $(\frac{1}{\Omega})$ می‌باشد.

در تقویت کننده رسانایی انتقالی ایده‌آل:

$$R_{in} \to \infty \quad , \quad R_{out} \to \infty$$

شکل (۱۳)، نمایش تقویت کننده رسانایی انتقالی با حلقه فیدبک ایده‌آل می‌باشد.

بازخورد برای $R_S = 0$ و $R_L = 0$ خواهیم داشت.

$$A_f = \frac{I_o}{V_s} = \frac{a_i}{1 + a_i f} \; ; \; R_{inf} = R_i(1+T)$$

$$R_{outf} = R_o(1+T)$$

شکل (۱۴)، نمودار بلوکی چنین تقویت کننده ای با حلقه فیدبک عملی را نشان می دهد. و در شکل (۱۵)، نحوهٔ رساندن حلقه فیدبک عملی به حالت موجود در شکل (۱۳)، نمایش داده شده است.

$a' = \frac{I_o}{V_s}$ ، R'_i ، R'_o از روی مدار حلقه باز ($f = 0$) بدست می‌آیند و پس از آن

$$A_f = \frac{a'}{1 + a' f}$$

$$R'_{inf} = R'_i(1+T) = R_S + R_{inf}$$

$$R'_{outf} = R'_o(1+T) = R_L + R_{outf}$$

R_{inf} ، R_{outf} بدست می‌آیند در خصوص حلقه فیدبک بازار فرمان داده شده در شکل (۱۶)، استفاده می‌کنیم. در این حالت منبع جریان مدار باز و ولت متر نیز مدار باز در نظر گرفته می‌شوند.

مثال: مدار ac تقویت کننده ای نشان داده شده است. ابتدا نوع حلقه فیدبک را تشخیص داده سپس $\frac{V_o}{V_{ih}}$ و مقاومت ورودی و خروجی مدار را محاسبه کنید.

($\beta = 100$ ، با بایس $I_C = 1^{mA}$)

با انتخاب سه مقاومت 100، 900، 100 به عنوان حلقه فیدبک، این حلقه جریانی معادل جریان خروجی را خوانده و از ولتاژ ورودی کم می‌کند. فیدبک هم در ورودی و هم در خروجی سری می‌باشد. لذا

$$f = \frac{100}{1000+100} \times 100^{\Omega} = 10^{\Omega} \quad ; \quad r_{if} = 100^{\Omega} \parallel 1^{k} = 91^{\Omega}$$

$$r_{2f} = 100^{\Omega} \parallel 1^{k} = 91^{\Omega}$$

$$a' = \frac{I_o}{V_s'} = \frac{-(10^{k} \parallel 2.5^{k})}{91 + \frac{1^{k} + 2.5^{k}}{100}} \times \frac{(-10^{k} \parallel 11.6^{k})}{(\frac{2.5^{k}}{100})} \times \frac{1}{91 + \frac{2.5^{k}}{100}} = 29.4^{\upsilon}$$

$R'_i = 1.6^{k}$ ، $R'_o = \infty$ لذا $T = 294$

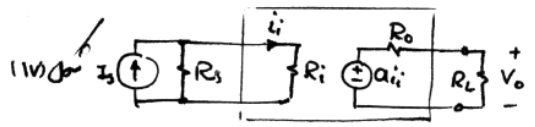
$$A = \frac{a'}{1 + a' f} = 0.1^{\upsilon} \; ; \; R'_{inf} = R'_i(1+T) = 3.4^{M} \; ; \; R'_{out} = \infty$$

$$A = \frac{I_o}{V_s} = 0.1^{\upsilon} = \frac{(-\frac{V_o}{10^{k}})}{V_s'} \longrightarrow \frac{V_o}{V_s'} = -1000 \; , \; R_{inf} = R'_{inf} - 1^{k} \cong 3.4^{M}$$

$$R_{outf} = 10^{k} \parallel \infty = 10^{k}$$

۴- تقویت‌کننده مقاومت انتقالی (transresistance) (فیدبک موازی - موازی)

شکل (۱۷)



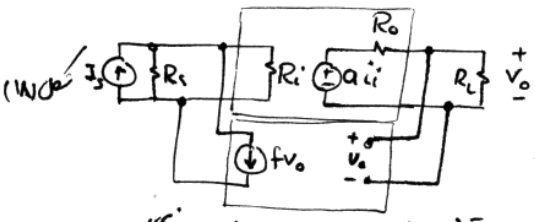
مطابق شکل (۱۷).

$$\frac{V_o}{I_s} = a \cdot \frac{R_s}{R_s+R_i} \cdot \frac{R_L}{R_L+R_o}$$

(دیمانسیون a (Ω) می‌باشد)

در تقویت کننده مقاومت انتقالی ایده‌آل $R_{in} \to 0$ ، $R_{out} \to \infty$.

شکل (۱۸)



جریان (موازی) دنباله (موازی)

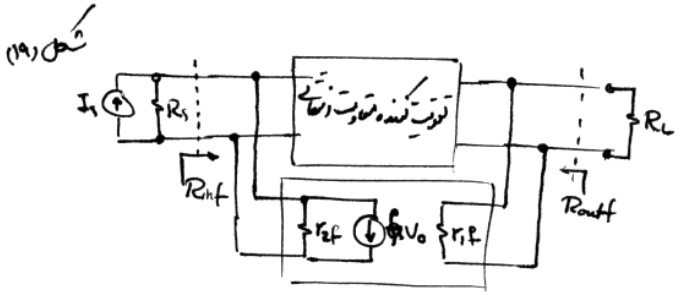
چنین تقویت کننده‌ای با حلقه فیدبک ایده‌آل در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

حال برای $R_s=\infty$ و $R_L=\infty$ داریم.

$$A_f = \frac{V_o}{I_s} = \frac{a}{1+af}$$

$$R_{inf} = \frac{R_i'}{1+T} \quad ; \quad R_{outf} = \frac{R_o'}{1+T}$$

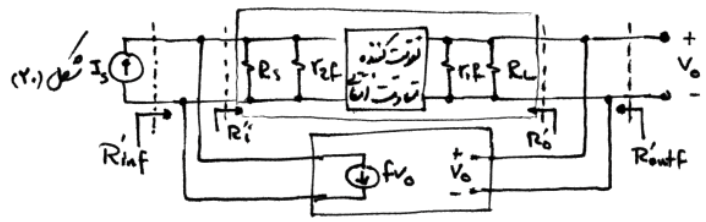
شکل (۱۹)



شکل (۱۹) نمودار بلوکی تقویت کننده مقاومت انتقالی با حلقه فیدبک عملی را نشان می‌دهد.

این مدار برای آنکه به حالت ایده‌آل شکل (۱۸) تبدیل شود تغییراتی مشابه شکل (۲۰) در آن اعمال می‌کنیم. a' ، R_i' و R_o' از روی مدار حلقه باز ($f=0$) بدست می‌آیند و پس از آن،

شکل (۲۰)



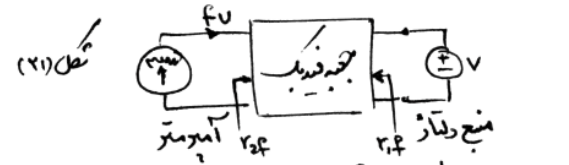
$$A_f = \frac{a'}{1+a'f}$$

$$R'_{inf} = \frac{R_i'}{1+T} = R_{inf} \parallel R_s$$

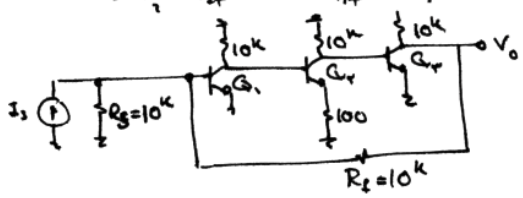
$$R'_{outf} = \frac{R_o'}{1+T} = R_{outf} \parallel R_L$$

لذا R_{inf} ، R_{outf} بدست می‌آیند. در خصوص حلقه فیدبک باز لازم است نشان داده شده در شکل (۲۱) استفاده می‌کنیم. در اینجا منبع ولتاژ اتصال کوتاه و آمپرمتر نیز اتصال کوتاه در نظر گرفته می‌شود.

شکل (۲۱)

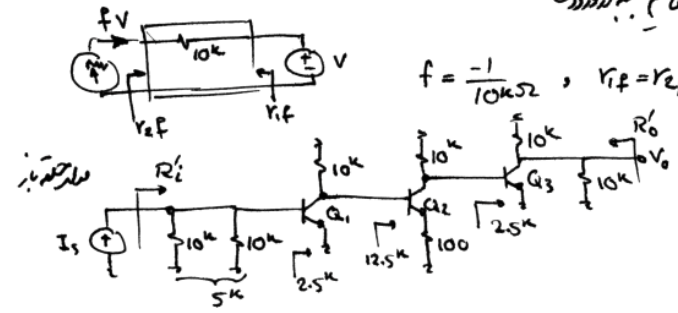


مثال: مطلوب است ac یک مدار در شکل زیر نشان داده شده است. نشان دهید فیدبک منفی است، با انتخاب حلقه فیدبک مناسب مدار را حل کنید ($\beta=100$, $I_C=1^{mA}$)



$I_s \uparrow \to I_{B1} \uparrow \to I_{C1} \uparrow \to V_{C1} \downarrow \to V_{C2} \uparrow \to V_{C3} \downarrow \to I_{Rf} \downarrow \to I_{B1} \downarrow$ (−)

با انتخاب مقاومت R_f به عنوان حلقه فیدبک از دنباله خروجی نمونه‌برداری و با جریان ورودی جمع می‌کنیم. حلقه دوورودی و خروجی جریان موازی است.



$f = \frac{-1}{10^k\Omega}$ ، $r_{1f} = r_{2f} = 10^k\Omega$

$$a' = \frac{V_o}{I_s} = \left(\frac{5}{5+2.5}\right) \times (100) \times \left(-10^k \parallel 12.5^k\right) \times \left(\frac{-10^k \parallel 12.5^k}{100+\frac{2.5^k}{100}}\right) \times \frac{-(10^k \parallel 10^k)}{\frac{2.5^k}{100}}$$

$$\to a' = 1.185^{G\Omega}$$

$R_i' = 5^k \parallel 2.5^k = 1.67^k$ $\quad R_o' = 5^k$

لذا

$T = a'f = 118500$ $\quad A = \frac{a'}{1+a'f} = -10^k\Omega$

$R'_{inf} = 14^{m\Omega} = 10^k \parallel R_{inf} \longrightarrow R_{inf} = 14^{m\Omega}$

$R'_{outf} = \frac{5^k}{1+T} = 42^{m\Omega} = 10^k \parallel R_{outf} \longrightarrow R_{outf} = 42^{m\Omega}$

مراحل زیر در حل هر مدار فیدبک دار کاربرد دارد.

(۱) انتخاب جعبه فیدبک مناسب و تعیین نوع فیدبک از میان چهار نوع ممکن. در خروجی از این که از چه چیزی نمونه برداری می شود و در ورودی از موازی یا سری بودن جعبه فیدبک در تشخیص خود استفاده کنید (گاهی اوقات با انتخاب جعبه فیدبک های متفاوتی انواع متفاوتی از فیدبک را می توان برای یک مدار در نظر گرفت.) نکته ای که مهم است، این است که فیدبک حواره باید منفی باشد.

(۲) تبدیل جعبه فیدبک از حالت عملی به ایده آل. تبدیل تونن یا نورتن مناسب برای منبع ورودی و انتخاب تقویت کننده مناسب در خروجی مدار با توجه به نوع تقویت کننده

(۳) محاسبه a' ، R'_i ، R'_o با توجه به اثر بارگذاری جعبه فیدبک و مقاومتهای بار و منبع

(۴) محاسبه A ، R'_{inf} ، R'_{outf} با استفاده از روابط $A=\frac{a'}{1+a'f}$ ، $R'_{inf}=R'_i\times(1+T)$ ، $R'_{outf}=R'_o\times(1+T)$. R'_o و R'_i برای تبدیل به R'_{outf} و R'_{inf} در $(1+T)$ ضرب یا بر آن تقسیم می شوند. بدون آنکه نیازی به حفظ کردن باشد می دانیم که جهت تغییرات مقاومتهای ورودی و خروجی در جهت نزدیک شدن تقویت کننده به تقویت کننده ایده آل می باشد.

(۵) محاسبه بهره خواسته شده در مدار به کمک A و تعیین R_{inf} و R_{outf} به کمک R'_{inf} و R'_{outf}. برای این کار حتماً به شکل مدار مراجعه شود.

در تمامی این مراحل در نظر داشتن بلوک دیاگرامهای کشیده شده بیشترین کمک را خواهد کرد.