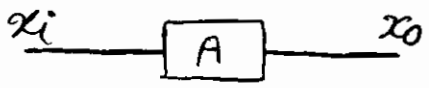
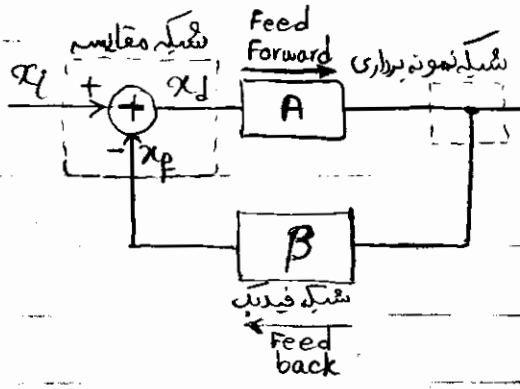
فیدبک منفی در تقویت کننده :



در ترانزیستورهای بدون فیدبک اگر در خروجی اعوجاج بدست آید (در اثر اشباع یا قطع) ، خروجی تصحیح نخواهد شد. برای تصحیح خروجی از یک شبکهٔ نمونه برداری استفاده می‌کنیم که از خروجی نمونه برمی دارد و توسط شبکه فیدبک به شبکه مقایسه کننده می‌رود تا با ورودی مقایسه شود.



$$x_o = A x_d \quad , \quad x_d = x_i - x_f \quad , \quad x_f = \beta x_o$$

$$\longrightarrow x_o = A(x_i - \beta x_o) \quad , \quad A_f = \frac{x_o}{x_i} = \frac{A}{1+\beta A}$$

فیدبک منفی $\longrightarrow 1+\beta A > 1$ ، $\longrightarrow A_f < A$ فیدبک منفی

فیدبک مثبت $1+\beta A < 1$

تشخیص نوع فیدبک مدار :

مقایسه	A	β	علامت فیدبک	
−	+	+	→ −	منفی
+	+	+	→ +	مثبت
⋮	⋮	⋮	⋮	

در فیدبک مثبت :

$|\beta A| = 1 - \varepsilon \longrightarrow A_f \longrightarrow \infty$

$|\beta A| = 1 \longrightarrow A_f = \infty$

$|\beta A| > 1 \longrightarrow$ مدار ناپایدار

مثال: فرض کنیم $A=۱۰۰$, $\beta=٪۰۵$ باشد آن‌گاه:

x_i	x_f (βx_o)	x_d (x_i+x_f)	x_o	
۱	۰	۱	۱۰۰	۵۰
۱	۰/۵	۱/۵	۱۵۰	↓
۱	۰/۷۵	۱/۷۵	۱۷۵	۲۵
			⋮	
۱	۱	۲	۲۰۰ همگرا به	

اگر $A=۱۰۰$, $\beta=٪۰۲$

x_i	x_f	x_d	x_o	
۱	۰	۱	۱۰۰	۲۰۰
۱	۲	۳	۳۰۰	↓
۱	۴	۷	۷۰۰	۴۰۰

در تقویت کننده با شبکه فیدبک در ازای از دست دادن گین به یک سری بهبودی های کلی و یک سری بهبودی های جزئی (در تقویت کننده های خاص) می رسیم.

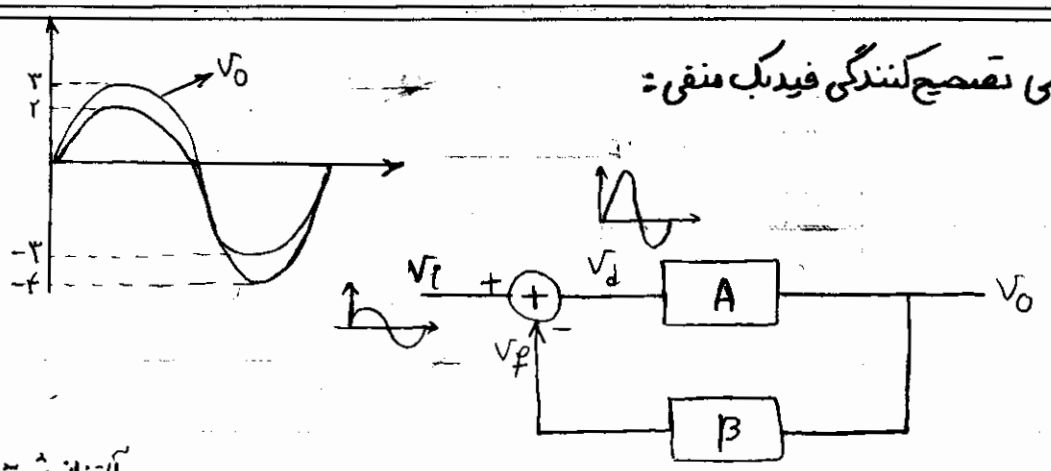
۱- تأثیر فیدبک منفی بر تغییر گین تقویت کننده:

$$\frac{dA}{A} \quad \text{بدون فیدبک} \qquad , \qquad \frac{dA_f}{A_f} \quad \text{با وصل فیدبک}$$

$$A_f=\frac{A}{1+\beta A} \longrightarrow dA_f=\frac{dA(1+\beta A)-A(\beta dA)}{(1+\beta A)^2}=\frac{dA}{(1+\beta A)^2}$$

$$\longrightarrow dA_f=\frac{dA/A \times A}{(1+\beta A)(1+\beta A)} \longrightarrow \frac{dA_f}{A_f}=\frac{dA/A}{1+\beta A}$$

بررسی تصحیح کنندگی فیدبک منفی :



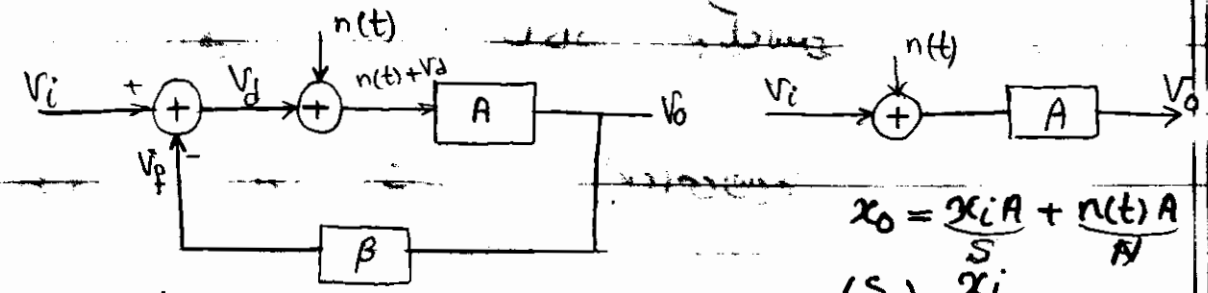
آلترنانس مثبت

$$V_0^+ = A^+ V_d^+ = 2 \times (V_i - V_f^+) \qquad V_0^- = A^- V_d^- = 4 \times (V_i - V_f^-)$$

$$V_{0_f}^+ = 2 \times (V_i - \beta V_0^+) \qquad V_{0_f}^- = 4 \times (V_i - \beta V_0^-)$$

۲- تأثیر فیدبک منفی بر نویز (noise) :

در تقویت کننده ها مقدار سیگنال به نویز است $(\frac{S}{N})$ که از اهمیت زیادی برخوردار است.



$$V_0 = A(n(t) + V_d)$$

$$V_0 = A(n(t) + V_i - \beta V_0)$$

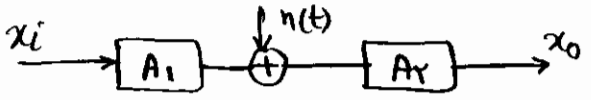
$$V_0 = \underbrace{\frac{A}{1+\beta A} V_i}_{S} + \underbrace{n(t) \frac{A}{1+\beta A}}_{N}$$

$$\longrightarrow \left(\frac{S}{N}\right)_{0_f} = \frac{V_i}{n(t)}$$

$$x_0 = \underbrace{x_i A}_{S} + \underbrace{n(t) A}_{N}$$

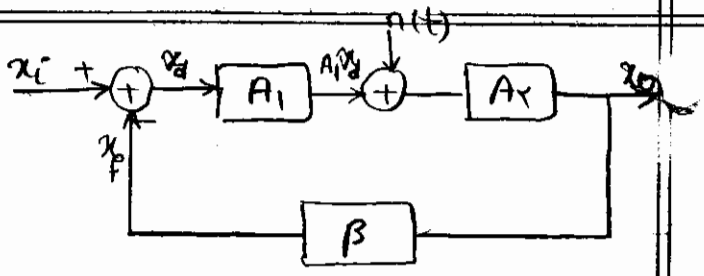
$$\longrightarrow \left(\frac{S}{N}\right)_0 = \frac{x_i}{n(t)}$$

اگر نویز در طبقات میانی بر تقویت کننده وارد شود آنگاه :



$$x_o = \underbrace{x_i A_1 A_2}_{S} + \underbrace{n(t) A_2}_{N}$$

$$\rightarrow \left(\frac{S}{N}\right)_o = \frac{x_i}{n(t)} \cdot A_1$$



$$x_o = A_2 (A_1 x_d + n(t))$$

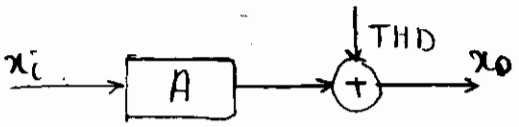
$$x_o = A_2 \left[A_1 (x_i - x_f) + n(t)\right]$$

$$x_o = A_2 \left[A_1 (x_i - \beta x_o) + n(t)\right]$$

$$x_o = \underbrace{\frac{A_1 A_2}{1+\beta A_1 A_2} x_i}_{S} + \underbrace{\frac{A_2}{1+\beta A_1 A_2} n(t)}_{N}$$

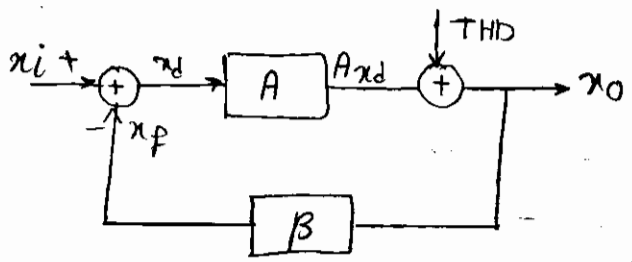
$$\rightarrow \left(\frac{S}{N}\right)_{of} = A_1 \frac{x_i}{n(t)}$$

۳- تأثیر فیدبک منفی بر THD : (total harmonic distortion)



$$x_o = x_i A + THD$$

$$\rightarrow \frac{S}{N} = \frac{x_i}{THD} A$$



$$x_o = A x_d + THD = \left[A(x_i - x_f) + THD\right]$$

$$x_o = \left[A(x_i - \beta x_o) + THD\right]$$

$$x_o = \underbrace{\frac{A}{1+\beta A} x_i}_{S} + \underbrace{\frac{THD}{1+\beta A}}_{N} \rightarrow \left(\frac{S}{N}\right)_f = \frac{A x_i}{THD}$$

۴- اثر فیدبک منفی بر فرکانس قطع پایین ؛

$$A(S) = A_0 \frac{S}{S+\omega_L} \quad , \quad A_f = \frac{A(S)}{1+\beta A(S)}$$

$$\rightarrow A_f = \frac{A_0 \frac{S}{S+\omega_L}}{1+\beta A_0 \frac{S}{S+\omega_L}} = \frac{A_0 S}{(1+\beta A_0) S + \omega_L} = \underbrace{\frac{A_0}{1+\beta A_0}}_{A_{f_0}} \times \frac{S}{S + \underbrace{\frac{\omega_L}{1+\beta A_0}}_{\omega_{Lf} = \frac{\omega_L}{1+\beta A_0}}}$$

$$\rightarrow A_f = A_{f_0} \times \frac{S}{S + \omega_{Lf}}$$

۵- اثر فیدبک منفی بر فرکانس قطع بالا :

$$A(S) = A_0 \times \frac{\omega_H}{\omega_H + S}$$

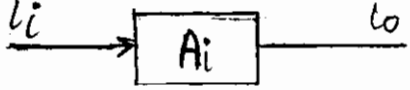
$$A_f = \frac{A(S)}{1+\beta A(S)} = \frac{A_0 \frac{\omega_H}{S+\omega_H}}{1+\beta A_0 \frac{\omega_H}{S+\omega_H}} = \frac{A_0 \omega_H}{(1+\beta A_0)\omega_H + S} = \frac{A_0}{1+\beta A_0} \times \frac{\omega_H (1+\beta A_0)}{S + (1+\beta A_0)\omega_H}$$

ω_{Hf}

$$\longrightarrow \quad A_f = \frac{A_0}{1+\beta A_0} \times \frac{\omega_H (1+\beta A_0)}{S + (1+\beta A_0)\omega_H}$$

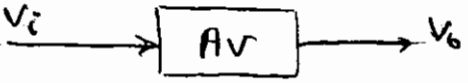
انواع تقویت کننده ها :

تقویت کننده جریان



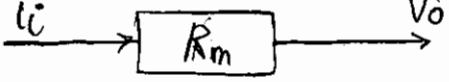
$$A_i = \frac{i_o}{i_i}$$

تقویت کننده ولتاژ



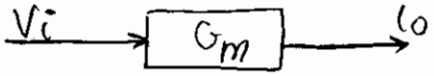
$$A_V = \frac{V_o}{V_i}$$

تقویت کنندهٔ ترانس رزیستانس



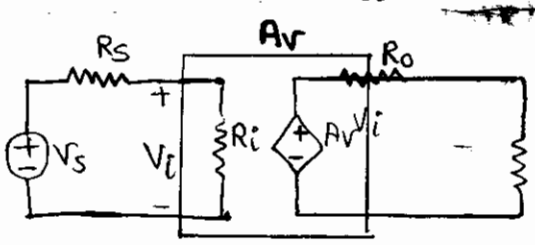
$$R_m = \frac{V_o}{i_i}$$

تقویت کننده ترانس کندوکتانس



$$G_m = \frac{i_o}{V_i}$$

تقویت کنندهٔ ولتاژ ایده آل :
(R_o اتصال کوتاه و R_i مدار باز)



$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{A_V V_i}{V_i} = A_V$$

$$A_{V_S} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o}{V_i} \cdot \frac{V_i}{V_s} = A_V$$

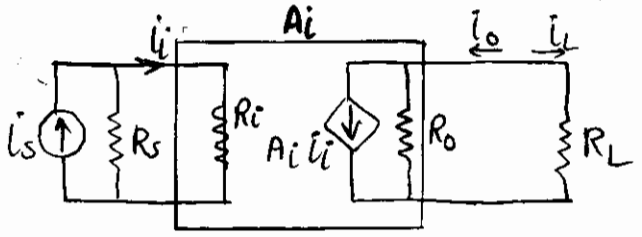
در تقویت کنندهٔ ولتاژی R_o و R_i اضافه می شوند که خواهیم داشت :

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{A_V V_i \frac{R_L}{R_L + R_o}}{V_i} = A_V \times \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$A_{V_S} = \frac{V_o}{V_i} \cdot \frac{V_i}{V_S} = \frac{R_i}{R_i + R_S} \times \frac{R_L}{R_L + R_o} \times A_V$$

تقویت کنندهٔ جریان ایده آل :

(R_o مدار باز و R_i اتصال کوتاه)



$$\frac{i_o}{i_i} = \frac{A_i \cdot i_i}{i_i} = A_i$$

$$A_{is} = \frac{i_o}{i_s} \neq \frac{i_o}{i_i} \cdot \frac{i_i}{i_s} = A_i$$

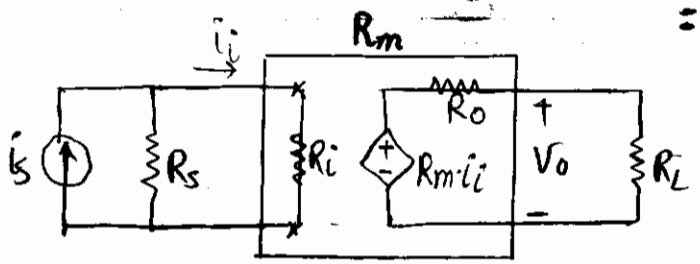
در تقویت کنندهٔ جریان واقعی امپدانسهای R_o , R_i اضافه می شوند:

$$\frac{i_o}{i_i} = \frac{A_i \cdot i_i \frac{R_o}{R_o+R_L}}{i_i} = A_i \times \frac{R_o}{R_o+R_L} \longleftarrow A_{is} = \frac{i_o}{i_s} = \frac{i_o}{i_i} = \frac{i_i}{i_s}$$

$$\longrightarrow A_{is} = A_i \frac{R_s}{R_s+R_i} \times \frac{R_o}{R_o+R_L}$$

تقویت کنندهٔ ترانس رزیستانس ایده آل :

(R_i , R_o اتصال کوتاه)



$$\frac{V_o}{i_i} = \frac{R_m i_i}{i_i} = R_m$$

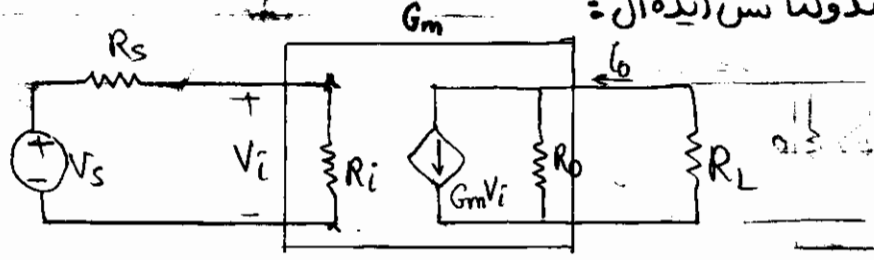
$$R_{ms} = \frac{V_o}{i_s} = \frac{V_o}{i_i} \times \frac{i_i}{i_s} = R_m$$

در تقویت کنندهٔ واقعی مقاومتهای R_o , R_i اضافه می شوند :

$$\frac{V_o}{i_i} = \frac{R_m i_i \frac{R_L}{R_L+R_o}}{i_i} = R_m \cdot \frac{R_L}{R_L+R_o}$$

$$R_{ms} = \frac{V_o}{i_s} = \frac{V_o}{i_i} \times \frac{i_i}{i_s} \longrightarrow R_{ms} = R_m \times \frac{R_L}{R_L+R_o} \times \frac{R_s}{R_s+R_i}$$

تقویت کنندهٔ ترانس کندوکتانس ایده‌آل:



(R_i و R_o مقدار نباز)

$$G_m = \frac{i_o}{V_i} = \frac{G_m V_i}{V_i} \quad , \quad G_{ms} = \frac{i_o}{V_s} = \frac{i_o}{V_i} \times \frac{V_i}{V_s} = G_m$$

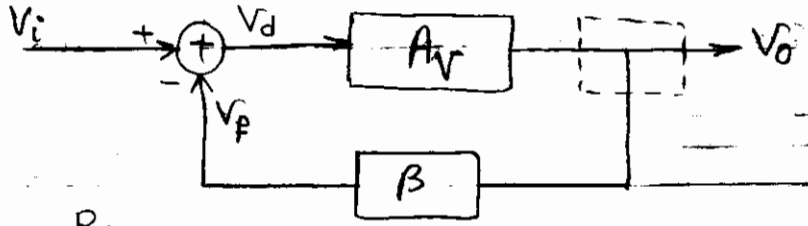
در تقویت‌کنندهٔ واقعی مقاومتهای R_o و R_i اضافه می‌شوند:

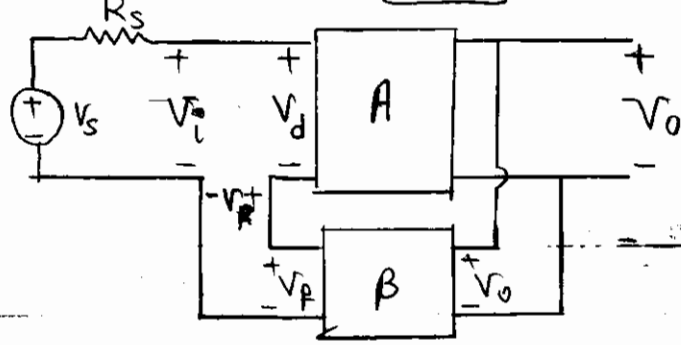
$$\frac{i_o}{V_i} = \frac{G_m V_i \times \frac{R_o}{R_o + R_L}}{V_i} = G_m \times \frac{R_o}{R_o + R_L}$$

$$G_{ms} = \frac{i_o}{V_s} = \frac{i_o}{V_i} \cdot \frac{V_i}{V_s} \longrightarrow G_{ms} = G_m \times \frac{R_o}{R_o + R_L} \times \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

فیدبک و انواع آن:

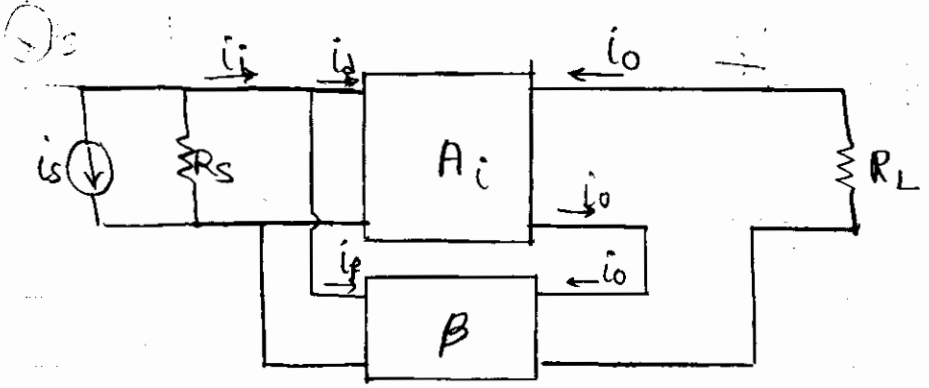
۱- فیدبک ولتاژ- ولتاژ یا شنت-سری یا شنت ولتاژ یا سری ولتاژ-سری:





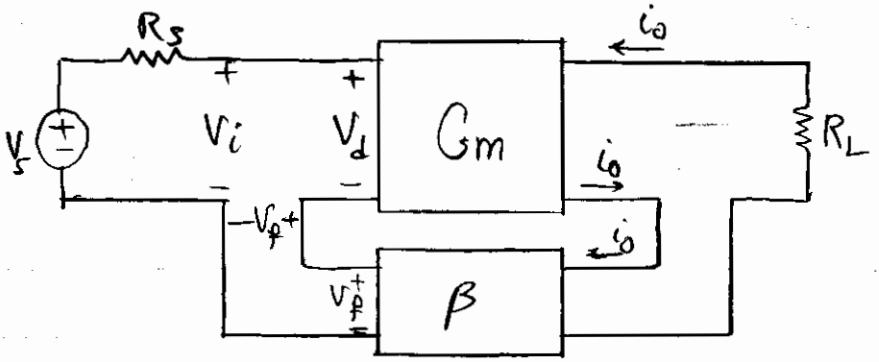
$$\beta = \frac{V_f}{V_o}$$

۲- فیدبک جریان-جریان یا سری-شنت یا سری-جریان یا جریان-شنت:



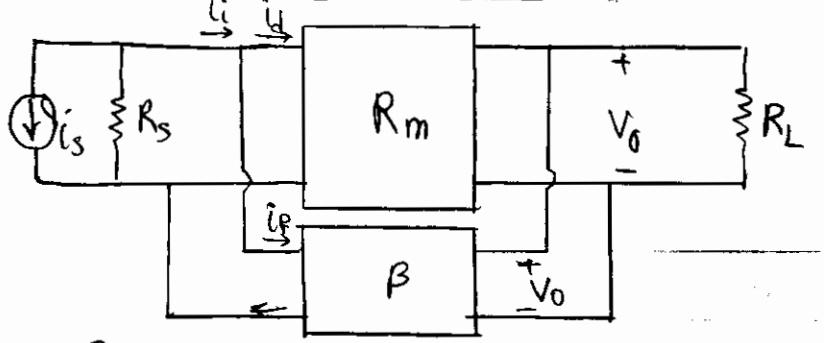
$$\beta = \frac{i_f}{i_o}$$

۳- فیدبک جریان - ولتاژ یا سری-سری یا سری-ولتاژ یا جریان-سری:



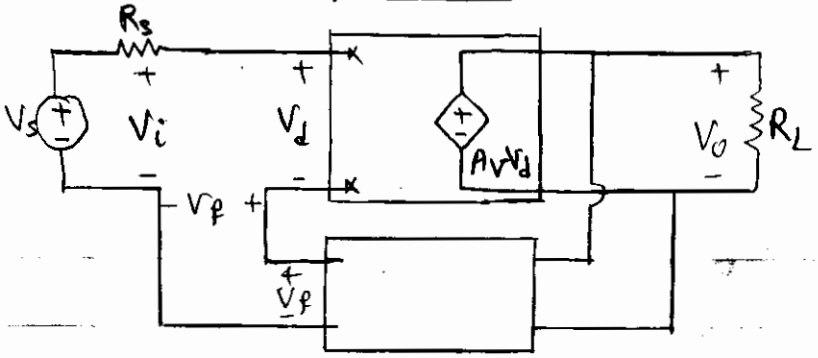
$$\beta = \frac{V_f}{i_o}$$

۴- فیدبک ولتاژ-جریان یا شنت-شنت یا شنت-جریان یا ولتاژ-شنت:

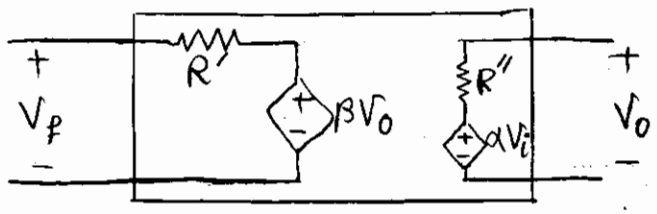


$$\beta = \frac{i_f}{V_o}$$

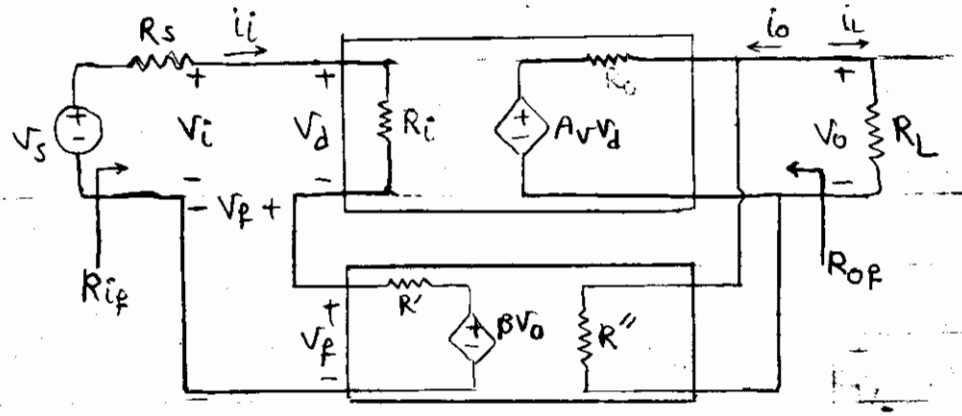
فیدبک ولتاژ-سری:



شکل فیدبک :



در محاسبات از منبع αV_i صرفنظر می‌کنیم که تقریب خوبی است.



درحالت ایده آل :

$$A_{Vf} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A_V}{1+\beta A_V}$$

$$V_o = A_V \cdot V_d = A_V (V_i - V_f)$$

$$V_o = A_V (V_i - \beta V_o)$$

$$A_{V_f} = A_{V_{f_s}}$$

درحالت واقعی :

$$A_{Vf} = \frac{V_o}{V_i}$$

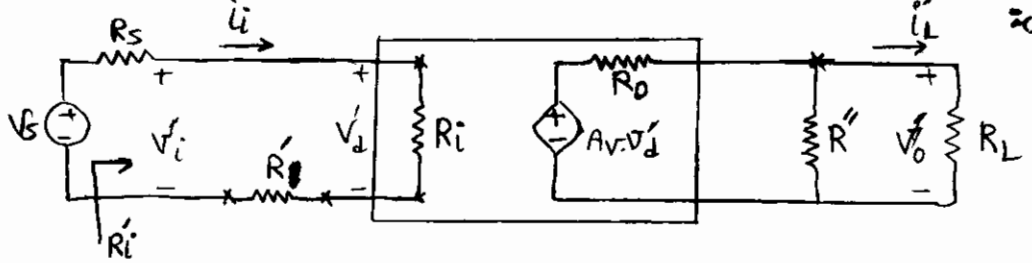
$$V_o = A_V \cdot V_d \cong \frac{R_L \| R''}{(R_L \| R'') + R_o} \quad , \quad V_d = V_i - V_f = V_i - (i_i R' + \beta V_o)$$

$$V_d = V_i - \left(\frac{V_d}{R_i} R' + \beta V_o\right)$$

$$\longrightarrow V_d = (V_i - \beta V_o) \frac{R_i}{R_i + R'}$$

$$\longrightarrow V_o = \left(A_V \cdot \frac{R_i}{R_i + R'} \times \frac{R_L \| R''}{(R_L \| R'') + R_o}\right)(V_i - \beta V_o)$$

تقویت کننده کلی:

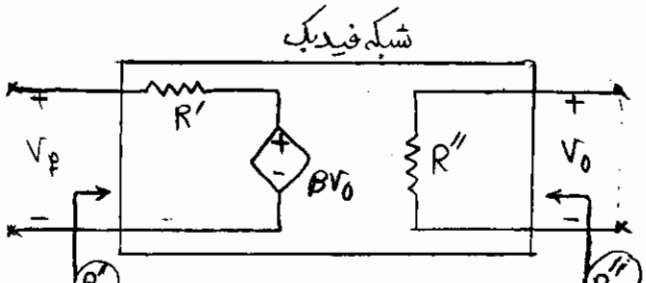


$$A_V = \frac{V_o}{V_i}$$

$R', R_i \longrightarrow A'_V = \frac{V'_o}{V'_i} = \frac{V'_o}{V'_d} \times \frac{V'_d}{V'_i} = A_V \frac{R_i}{R' + R_i}$

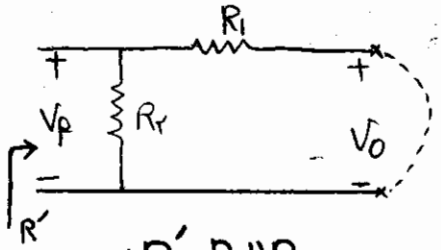
در این مرحله فقط R' و R_i را داریم و R'' و R_o در مرحله بعد اضافه می‌شوند.

$\hookrightarrow R'', R_o \longrightarrow A'_V = \frac{V'_o}{V'_i} = A'_V \frac{R_i}{R' + R_i} \times \frac{R_L \| R''}{(R_L \| R'') + R_o}$



امپدانس خروجی با فرض اتصال کوتاه در طرف اولیه

امپدانس ورودی با فرض اتصال باز در طرف ثانویه



$$\begin{cases} R' = R_1 \| R_2 \\ R'' = R_1 + R_2 \\ \beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

با فرض اتصال باز در ثانویه

$R_{if} = \frac{V_i}{i_i}$, $V_i = V_d + V_f = R_i i_i + R' i_i + \beta V_o \rightarrow A_{Vf} \times V_i$

$\longrightarrow V_i (1 - \beta A_{Vf}) = i_i (R_i + R')$

$\longrightarrow R_{if} = \frac{R_i + R'}{1 - \beta A_{Vf}} > R_i$

$R_{if} = \frac{R_i + R'}{1 - \beta \frac{A'_V}{1 + \beta A'_V}} = (1 + \beta A'_V)(R_i + R') = (1 + \beta A'_V)(R'_i)$

$\longrightarrow R_{if} = (1 + \beta A'_V)(R'_i)$

$R_{of} = \left. \frac{V_o}{V_i} \right|_{V_s = 0}$, $i_o = i_{R_o} + i_{R''} = \frac{(V_o - A_V V_d)}{R_o} + \frac{V_o}{R''}$

$$V_d = V_i - V_f = \frac{R_i}{R_i + R' + R_s}(-\beta V_o) \quad \text{با فرض } V_s = 0$$

$A'_{V_{SNL}}$: نسبت ولتاژ خروجی بدون بار به منبع سیگنال ورودی

$$\rightarrow i_o = V_o\left[\frac{1}{R_o}\left(1 + \beta A_V \times \frac{R_i}{R_i + R' + R_s}\right) + \frac{1}{R'}\right]$$

$$\rightarrow \frac{V_o}{i_o} = \frac{1}{\frac{1+\beta A'_{V_{SNL}}}{R_o} + \frac{1}{R''}} = \frac{R_o}{1+\beta A'_{V_{SNL}}} \parallel R''$$

$$\rightarrow R_{of} = \frac{R_o}{1+\beta A'_{V_{SNL}}} \parallel R''$$

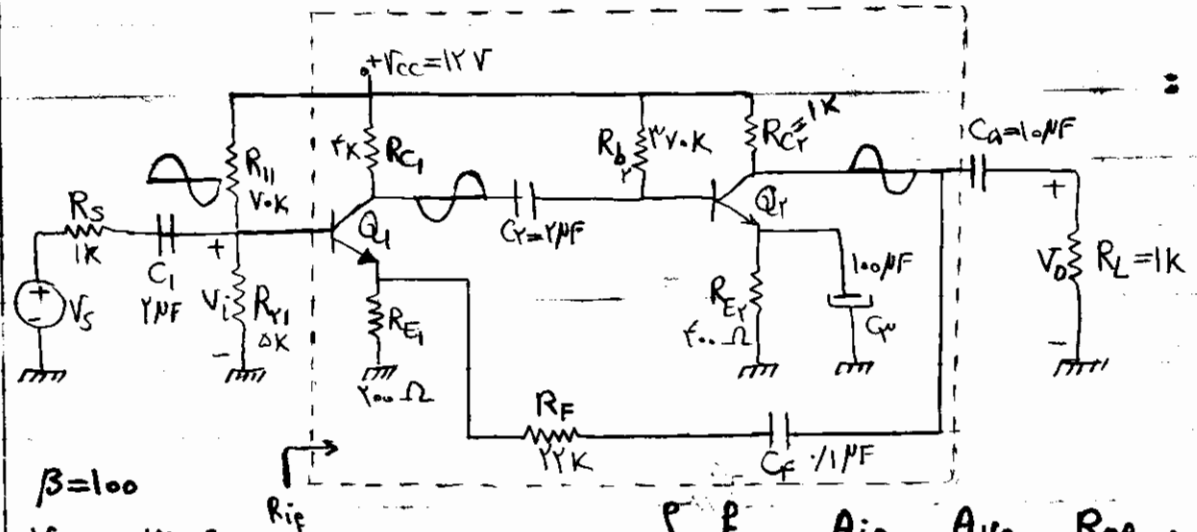
$$A_{if} = \frac{i_L}{i_i}, \quad A_{Vf} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{i_L \cdot R_L}{i_i \cdot R_{if}} \rightarrow A_{if} = A_{Vf} \times \frac{R_{if}}{R_L}$$

$$\rightarrow A_{if} = \frac{A'_V}{1+\beta A'_V} \cdot \frac{(1+\beta A'_V) R'_i}{R_L} \rightarrow A_{if} = A'_V \times \frac{R'_i}{R_L}$$

$$\rightarrow A_{if} = \frac{V'_o}{V'_i} \times \frac{R'_i}{R_L} = \frac{i'_L \cdot R_L}{i'_i \cdot R'_i} \times \frac{R'_i}{R_L} = A'_i \rightarrow A_{if} = A'_i$$

چون در ورودی مقایسه‌ای انجام نمی‌دهیم لذا گین جریان تغییری نمی‌کند.

مثال :

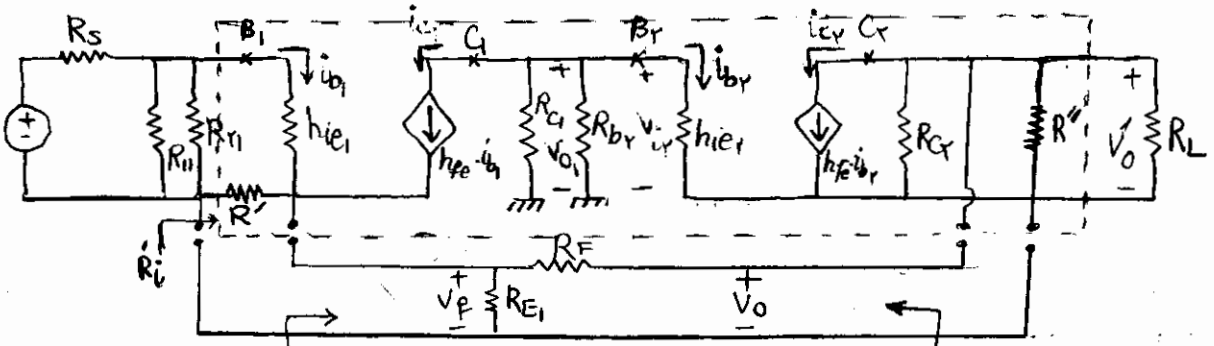


$\beta = 100$

$V_{BE} = 0/7$ V

؟ f_{Lf} , A_{if} , A_{Vf} , R_{of} , R_{if}

$$Q_1 \begin{cases} I_{C_1} = 1\,mA \\ V_{CE_1} = 9/8\,V \\ h_{ie_1} = 2/5\,k\Omega \end{cases} \quad Q_2 = \begin{cases} I_{C_2} = 2/8\,mA \\ V_{CE_2} = 8\,V \\ h_{ie_2} = 4/8\,k\Omega \end{cases}$$



$R' = R_{E1} \parallel R_F \simeq R_{E1}$ $\qquad$ $R'' = R_{E1} + R_F \simeq R_F$

$$\beta = \frac{V_f}{V_o} = \frac{R_{E1}}{R_{E1}+R_F} = 9\times10^{-3}$$

$$A_{Vf} = \frac{A'_V}{1+\beta A'_V} \quad , \quad A'_V = A_{V1} \times A_{V2}$$

$$A_{V2} = \frac{V_{o2}}{V_{i2}} = \frac{-h_{fe} \times i_{b2} (R_L \parallel R'' \parallel R_{c2})}{i_{b2} \times h_{ie2}} \simeq -2V$$

$$A_{V1} = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = \frac{-h_{fe} i_{b1} (R_{c1} \parallel R_{b2} \parallel h_{ie2})}{i_{b1} \times h_{ie1} + R'(1+h_{fe}) i_{b1}} = -4,1V$$

$$\longrightarrow A'_V = 1\text{۳۷},1\Omega \longrightarrow A_{Vf} = 40,22$$

$$R_{if} = R'_i(1+\beta A'_V) = \left[h_{ie1} + (1+h_{fe})R'\right](1+\beta A'_V) = \text{۵۵},\text{۳۸} \ K\Omega$$

$$, \ R_i = R_{if} \parallel R_{11} \parallel R_{12} = 4,3\text{۳} \ K\Omega$$

$$R_{of} = \frac{R_o}{1+\beta A_{V_{SNL}}} \parallel R''$$

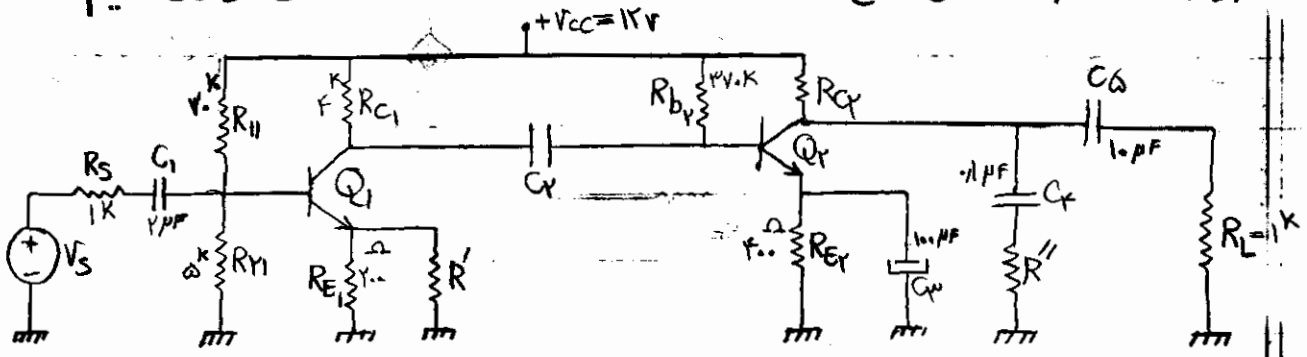
$$A_{V_{SNL}} = A_{V_{2NL}} \times A_{V_{1S}} = \frac{-h_{fe} R_{c2}}{h_{ie2}} \times \underbrace{\frac{V_{o1}}{V_{i1}}}_{A_{V1}} \cdot \underbrace{\frac{V_{i1}}{V_s}}_{\frac{R_{11} \parallel R_{12} \parallel R'_i}{(R_{11} \parallel R_{12} \parallel R'_i) + R_s}}$$

$$\longrightarrow A_{V_{SNL}} = \frac{-h_{fe} R_c}{h_{ie2}} \times A_{V1} \cdot \frac{R_{11} \parallel R_{12} \parallel R'_i}{(R_{11} \parallel R_{12} \parallel R'_i) + R_s} = 21V$$

$$\longrightarrow R_{of} = \text{۳۳۳}\ \Omega$$

$$, \ A_{if} = A_{Vf} \frac{R_{if}}{R_L} = 29\text{۸}$$

برای محاسبهٔ فرکانس قطع مقاومتهای معادل را در تقویت‌کنندهٔ اصلی قرار می‌دهیم :



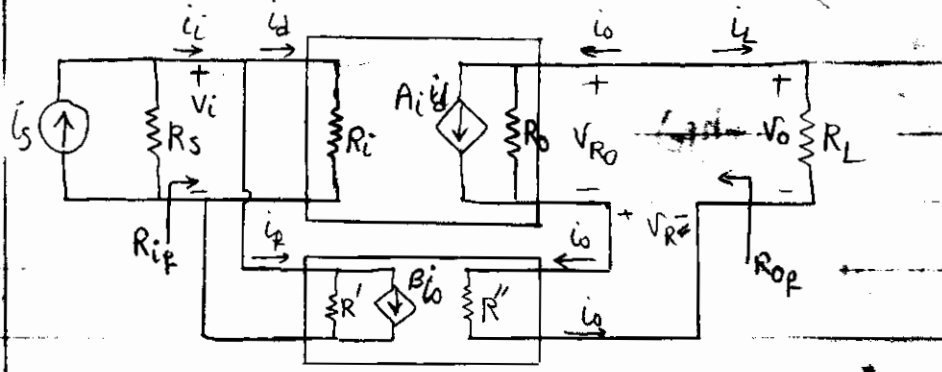
$$\longrightarrow R_{Cf} = \left[R'' + (R_L \,\|\, R_{C2})\right] \;,\; R_{C1}, R_{C2}, R_{C3}, \dots$$

$$\longrightarrow f_1 = ۲۳\,Hz \;,\; f_2 = ۱۴\,Hz \;,\; f_3 = ۳۲\,Hz \;,\; f_4 = ۷۱\,Hz$$

$$, \; f_5 = ۸\,Hz$$

$$f_{Lf} = \frac{f'_L}{1+\beta A'_V} = \frac{۱۵۰}{۲/۱۸} \approx \longrightarrow f'_{L_f} \simeq ۱۵۰\,Hz$$

فیدبک جریان-شنت :



$$A_{if} = \frac{i_o}{i_i}$$

$$i_o = A_i \cdot i_d = A_i(i_i - i_f) = A_i(i_i - \beta i_o) \longrightarrow A_{if} = \frac{A_i}{1+\beta A_i}$$

درحالت واقعی خواهیم داشت :

$$A_{if} = \frac{i_o}{i_i}$$

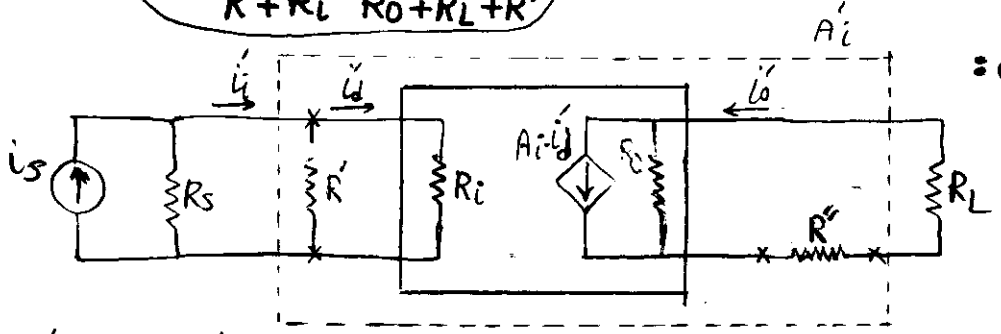
$$i_o = A_i . i_d = \left(\frac{R_o}{R_o + R_L + R''}\right)$$

$$i_d = i_i - i_f = i_i - (i_{R'} + \beta i_o) = i_i - \left(\frac{\overbrace{i_d R_i}^{V_i}}{R'} + \beta i_o\right)$$

$$\longrightarrow i_d = (i_i - \beta i_o)\frac{R'}{R' + R_i}$$

$$\longrightarrow i_o = \left(A_i \cdot \frac{R'}{R' + R_i} \cdot \frac{R_o}{R_o + R_L + R''}\right)(i_i - \beta i_o)$$

تقویت‌کنندهٔ کمکی : A'_i



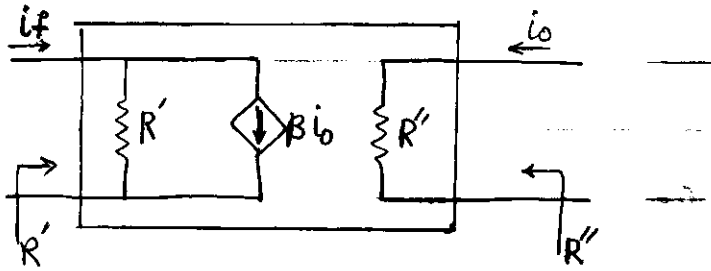
با قرار دادن R_i و R' :

$$\frac{i'_o}{i'_i} = \frac{i'_o}{i'_d} \cdot \frac{i'_d}{i'_i} = \frac{A_i . i'_d}{i'_d} \cdot \frac{i'_d}{i'_i} = A_i \frac{R'}{R' + R_i}$$

بعد از قرار دادن R_o و R'' :

$$\frac{i''_o}{i'_i} = A_i \cdot \frac{R'}{R' + R_i} \cdot \frac{R_o}{R_o + R_L + R''}$$

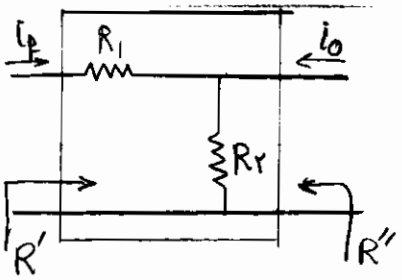
$$\longrightarrow A'_i = \frac{i''_o}{i'_i} = A_i \frac{R'}{R' + R_i} \times \frac{R_o}{R_o + R_L + R''}$$



R'' = امپدانس ورودی فیدبک با فرض اتصال کوتاه در طرف ثانویه

R' = امپدانس خروجی فیدبک با فرض اولیه باز

$$\beta = \frac{i_f}{i_o} = \frac{\beta i_o}{i_o} = \beta$$ با فرض اتصال کوتاه خروجی



$$R'' = R_1 \| R_2 \quad , \quad R' = R_1 + R_2 \quad , \quad \beta = \frac{-R_2}{R_1 + R_2}$$

محاسبهٔ امپدانسهای تقویت‌کننده:

$$R_{if} = \frac{V_i}{i_i}$$

$$i_i = i_d + i_f = \frac{V_i}{R_i} + i_{R'} + \beta i_o = \frac{V_i}{R_i} + \frac{V_i}{R'} + \beta A_{if} \cdot i_i$$

$$\longrightarrow V_i\left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R'}\right) = i_i\left(1 - \beta A_{if}\right)$$

$$\longrightarrow \frac{V_i}{i_i} = \frac{1 - \beta A_{if}}{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R'}} = (1 - \beta A_{if})(R_i \| R') \longrightarrow R_{if} = (1 - \beta A_{if})(R_i \| R') < R_i$$

$$R_{if} = \left(1 - \beta \frac{A'_i}{1 + \beta A'_i}\right)(R_i \| R') = \frac{R'_i}{1 + \beta A'_i} \longrightarrow R_{if} = \frac{R'_i}{1 + \beta A'_i} < R_i$$

$$R_{of} = \frac{V_o}{i_o}\Big|_{i_s = 0}$$

$$V_o = V_{R_o} + V_{R''} = R_o\left(i_o - A_i \cdot i_d\right) + R'' i_o$$

$$i_d = i_i - i_f = -\beta i_o \left(\frac{R_s \| R'}{R_s \| R' + R_i}\right)$$

$$V_o = i_o \left[R_o\left(1 + \beta A_i \left(\frac{R_s \| R'}{R_s \| R' + R_i}\right)\right) + R''\right]$$

گین جریان تقویت کننده کلی
بدون بار در خروجی

$$A'_{is_{NL}} = \frac{i_o}{i_s} = \frac{i'_o}{i'_d} \cdot \frac{i'_d}{i_s} = A'_i \cdot \frac{R' \| R_s}{R' \| R_s + R_i}$$

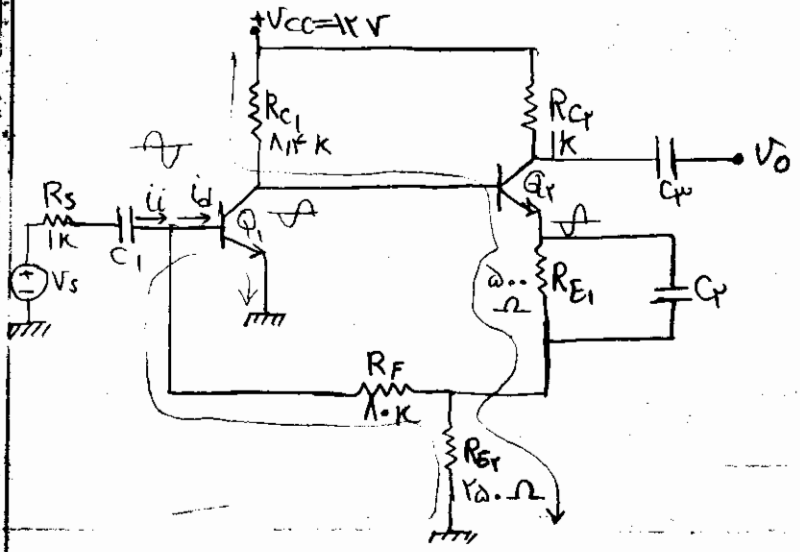
$$R_{of} = R_o(1+\beta A'_{is_{NL}}) + R''$$

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-i_o R_L}{i_i R_{if}} = -A_{if} \cdot \frac{R_L}{R_{if}} \longrightarrow A_{vf} = -A_{if}\frac{R_L}{R_{if}}$$

$$A_{vf} = \frac{-A'_i}{1+\beta A'_i} \cdot \frac{R_L}{R'_i/1+\beta A'_i} = -A'_i \cdot \frac{R_L}{R'_i} = -\frac{i'_o}{i_i}\cdot\frac{R_L}{R'_i} = \frac{v'_o}{v'_i} = A'_v$$

$$\longrightarrow A_{vf} = A'_v$$

مثال:

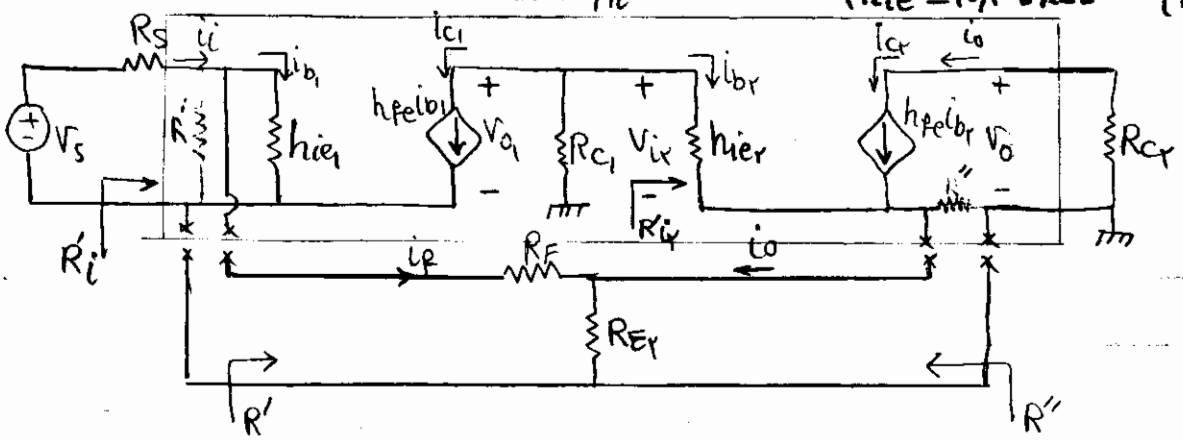


$\beta = h_{fe} = ۲۰۰$

$V_{BE} = ۰/۷$ V

$$\begin{cases} V_{CC} = R_{C_1}(I_{C_1} + I_{B_2}) + V_{BE_2} + (R_{E_1} + R_{E_2}) I_{E_2} \\ R_{E_2} I_{E_2} = R_F I_{B_1} + V_{BE_1} \end{cases} \longrightarrow Q_1 \begin{cases} I_C = 1\ mA \\ V_{CE} = ۲/۷\ V \\ h_{ie} = ۱.۲۶\ K\Omega \end{cases}, \quad Q_2 \begin{cases} I_C = ۴\ mA \\ V_{CE} = ۵V \\ h_{ie} = ۲/۷\ K\Omega \end{cases}$$

A'_i



نکته: در تقویت کننده با فیدبک جریانی مقاومت R_{C_2} را جداو مستقل از تقویت کننده درنظر می گیریم

$$R'' = R_F \parallel R_{E_2} \simeq R_{E_2} \quad , \quad R' = R_F + R_{E_2} \simeq R_F$$

$$\beta = \frac{i_F}{i_O} = \frac{-R_{E_2}}{R_{E_2}+R_F} = -۳٫۱\times۱۰^{-۳} \qquad R'_{i_2} = h_{ie_2} + (1+h_{fe})R''$$

$$A'_i = \frac{i'_O}{i'_i} = \frac{i'_O}{i_{b_2}} \cdot \frac{i_{b_2}}{i_{C_1}} \cdot \frac{i_{C_1}}{i_{b_1}} \cdot \frac{i_{b_1}}{i'_i}$$

$$= h_{fe} \cdot \frac{-R_{C_1}}{R_{C_1}+R'_{i_2}} \cdot h_{fe} \cdot \frac{R'}{R'+h_{ie_1}} = -۴۸۵۵$$

$$R_{if} = \frac{R'_i}{1+\beta A'_i} = \frac{R' \parallel h_{ie_1}}{1+\beta A'_i} = ۵٫۷۵\ \Omega$$

$$R_{Of} = \underbrace{R_O}_{h_{oe}}(1+\beta A'_{i_{S_{NL}}}) + R'' = \infty$$

$A'_{i_{S_{NL}}}$ با تبدیل منبع ولتاژ V_S به منبع جریان:

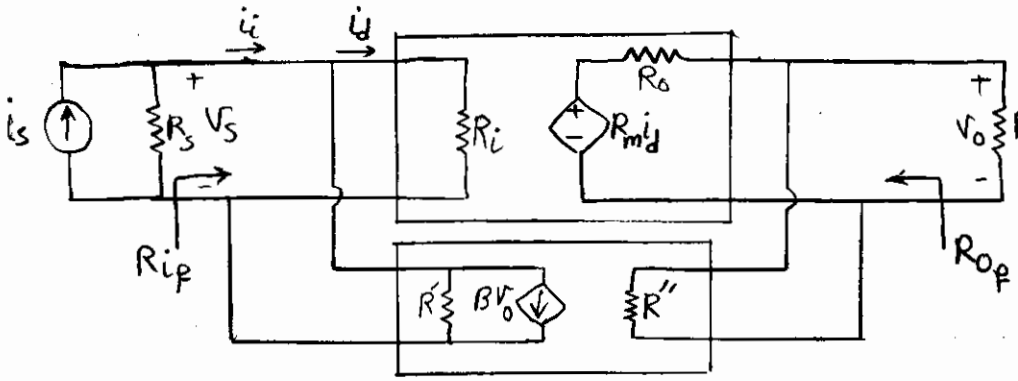
$$A'_{i_{S_{NL}}} \overset{\infty}{=} \frac{i'_O}{i_S} = \frac{i'_O}{i_{b_2}} \underbrace{\left(\frac{i_{b_2}}{i_{C_1}}\right)}_{\frac{-R_{C_1}}{R_{C_1}+h_{ie}}} \frac{i_{C_1}}{i_{b_1}} \cdot \underbrace{\left(\frac{i_{b_1}}{i_S}\right)}_{\frac{R'\parallel R_S}{R'\parallel R_S + h_{ie}}}$$

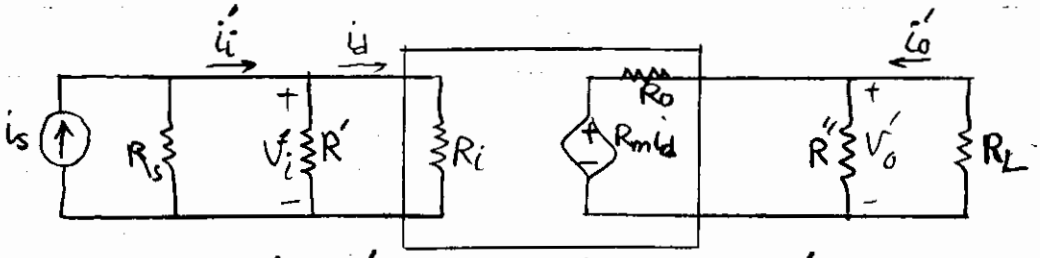
چون $R_O=\infty$ نیازی به محاسبهٔ $A'_{i_{S_{NL}}}$ نیست.

$$A_{if} = \frac{i_O}{i_i} = \frac{A'_i}{1+\beta A'_i} = -۳۰۳$$

$$A_{V_f} = -A_{if} \cdot \underbrace{\frac{R_L}{R_{if}}}_{\to R_{C_2}} = ۵۲۷\,V \qquad R'_{O_1} = R_{C_2} \parallel R_{Of} \simeq R_{C_2}$$

فیدبک ولتاژ- شنت :





$$R_m' = \frac{V_o'}{i_i'} = R_m \cdot \frac{R'' \parallel R_L}{R'' \parallel R_L + R_o} \times \frac{R'}{R' + R_i}$$

$$\frac{V_o}{i_i} = R_{mf} = \frac{R_m'}{1 + \beta R_m'}$$

$$R_{if} = \frac{V_i}{i_i} = \frac{1 - \beta R_{mf}}{1/R_i + 1/R'} = (1 - \beta R_{mf})(R_i \parallel R') \longrightarrow R_{if} = (1 - \beta R_{mf})(R_i \parallel R') < R_i$$

$$i_i = i_d + i_f$$

$$i_i = \frac{V_i}{R_i} + i_{R'} + \beta V_o = \frac{V_i}{R_i} + \frac{V_i}{R'} + \beta R_{mf} i_i \longrightarrow i_i(1 - \beta R_{mf}) = V_i\left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R'}\right)$$

$$\longrightarrow R_{if} = \left(1 - \beta \frac{R_m'}{1 + \beta R_m'}\right)(R_i \parallel R') \longrightarrow R_{if} = \frac{R_i'}{1 + \beta R_m}$$

$$R_{of} = \left.\frac{V_o}{i_o}\right|_{i_s = 0}$$

$$i_o = i_{R_o} + i_{R'} = \frac{V_o - R_m i_d}{R_o} + \frac{V_o}{R''} \quad , \quad i_d = i_i - i_f = -\beta V_o \frac{R' \parallel R_s}{(R' \parallel R_s) + R_i}$$

$$\longrightarrow i_o = V_o\left[\frac{1}{R_o}\left(1 + \beta R_m \frac{R' \parallel R_s}{R' \parallel R_s + R_i}\right) + \frac{1}{R''}\right]$$

$$\frac{v'_o}{i_s} = \frac{v'_o}{i_d} \cdot \frac{i_d}{i_s} \quad , \quad R'_{m_{SNL}} = \frac{v'_o}{i_s} = \frac{R_m i_d}{i_d} \times \frac{R_s \| R'}{R_s \| R' + R_i}$$

$$\longrightarrow \quad i_o = V_o \left[\frac{1+\beta R'_{m_{SNL}}}{R_o} + \frac{1}{R''} \right]$$

$$\longrightarrow R_{o_f} = \frac{1}{\frac{1+\beta R'_{m_{SNL}}}{R_o} + \frac{1}{R''}} \longrightarrow R_{o_f} = \frac{R_o}{1+\beta R'_{m_{SNL}}} \| R''$$

$$A_{V_f} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{R_{i_f} \times i_i} = \frac{R_{m_f}}{R_{i_f}} \longrightarrow A_{V_f} = \frac{R_{m_f}}{R_{i_f}}$$

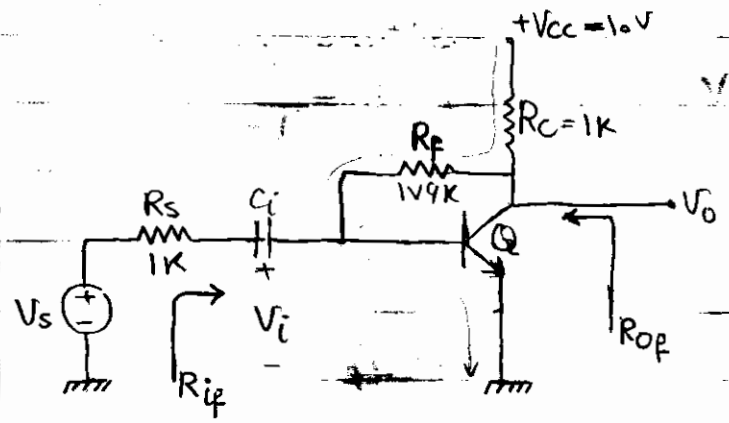
$$A_{V_f} = \frac{\frac{R'_m}{1+\beta R'_m}}{\frac{R'_i}{1+\beta R'_m}} = \frac{R'_m}{R'_i} = \frac{V'_o / i'_i}{R'_i} = \frac{V'_o}{V'_i} = A'_V \longrightarrow A_{V_f} = A'_V$$

$$A_{i_f} = \frac{i_o}{i_i}_{x=R_L} \overset{x=R_L}{=} - \frac{V_o}{i_i \times R_L} = \frac{-R_{m_f}}{R_L} \longrightarrow A_{i_f} = -\frac{R_{m_f}}{R_L}$$

$$A_{i_f} = -\frac{R'_m}{(1+\beta R'_m) R_L} = \frac{-V'_o / i'_i}{(1+\beta R'_m) R_L} = \frac{+\frac{R_L \times i'_o}{i'_i}}{(1+\beta R'_m) R_L} = \frac{A'_i}{1+\beta R'_m}$$

$$\longrightarrow A_{i_f} = \frac{A'_i}{1+\beta R'_m}$$

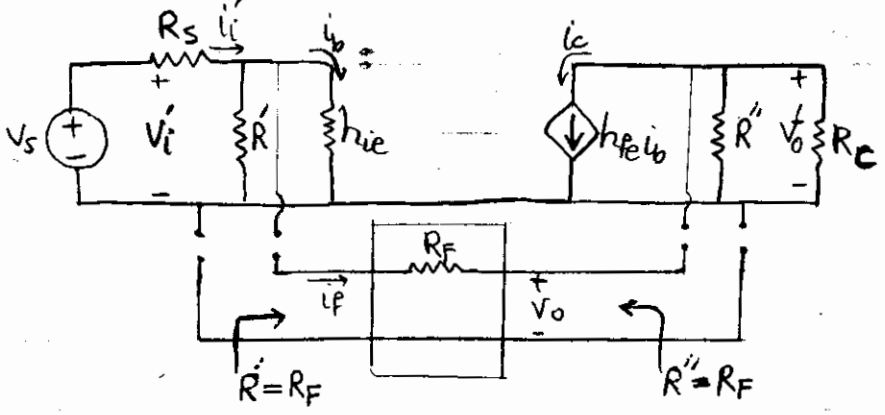
مثال:



$\beta = h_{fe} = 200$

$V_{BE} = 0.7\ V$

$$V_{CC} = R_C (I_B + I_C) + R_F I_B + V_{BE} \longrightarrow \begin{cases} I_C = 5\ mA \\ V_{CE} = 5\ V \\ h_{ie} = 2K\Omega \end{cases}$$



$$\beta = \frac{i_f}{V_o} = \frac{i_f}{-i_f R_F} = \frac{-1}{R_F}$$

$$R'_m = \frac{V'_o}{i_i} = \frac{-h_{fe} i_b (R_C \| R'')}{i_i'} \quad , \quad i_b = i_i' \cdot \frac{R'}{R' + h_{ie}}$$

$$\longrightarrow R'_m = \frac{-h_{fe} \cdot i_b (R_C \| R'')}{i_b \times \frac{R' + h_{ie}}{R'}} \simeq -h_{fe} R_C = -۲۰۰\ K\Omega$$

$$R_{mf} = \frac{R'_m}{1+\beta R'_m} = \frac{-h_{fe} \cdot R_C}{1 + \frac{h_{fe} R_C}{R_F}} = \frac{-h_{fe} R_C R_F}{R_F + h_{fe} R_C} = -۹۳\ K\Omega$$

$$R_{if} = \frac{R'_i}{1+\beta R'_m} = \frac{R' \| h_{ie}}{1+\beta R'_m} \simeq \frac{h_{ie} \times R_F}{R_F + h_{fe} R_C} = ۹۳۵\ \Omega$$

$$R_{of} = \frac{R_C}{1+\beta R'_{mSNL}} \| R''$$

$$R'_{m_{SNL}} = \frac{V'_o}{i_s} = \frac{V'_o}{i_b} \cdot \frac{i_b}{i_s}$$

معادل نورتن منبع را قرار می‌دهیم و R'' را حذف می‌کنیم.
ولی R_C را حذف نمی‌کنیم چون در تقویت‌کننده‌های از نوع ولتاژی R_C جزو تقویت کننده محسوب می‌شود.

$$= \frac{-h_{fe} i_b R_C}{i_b} * \frac{R_S \| R'}{R_S \| R' + h_{ie}} = -۹۷\ K\Omega$$

$$\longrightarrow R_{of} \simeq ۷۱۵\ \Omega$$

$$= -۴۸$$

$$A_{Vf} = \frac{R'_m}{R_i} \simeq \frac{-h_{fe} R_C}{h_{ie}} = -۱۰۰ \quad , \quad A_{V_{fs}} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o}{V_i} \times \frac{V_i}{V_s} = A_{Vf} \times \frac{R_{if}}{R_s + R_{if}}$$

$$A_{if} = \frac{A'_i}{1+\beta R'_m} = ۹۳{,}۱$$

بررسی پایداری در فیدبک منفی:

$$A_f = \frac{A}{1+\beta A}$$

if $\beta A < -1$ ⟶ فیدبک مثبت و ناپایدار

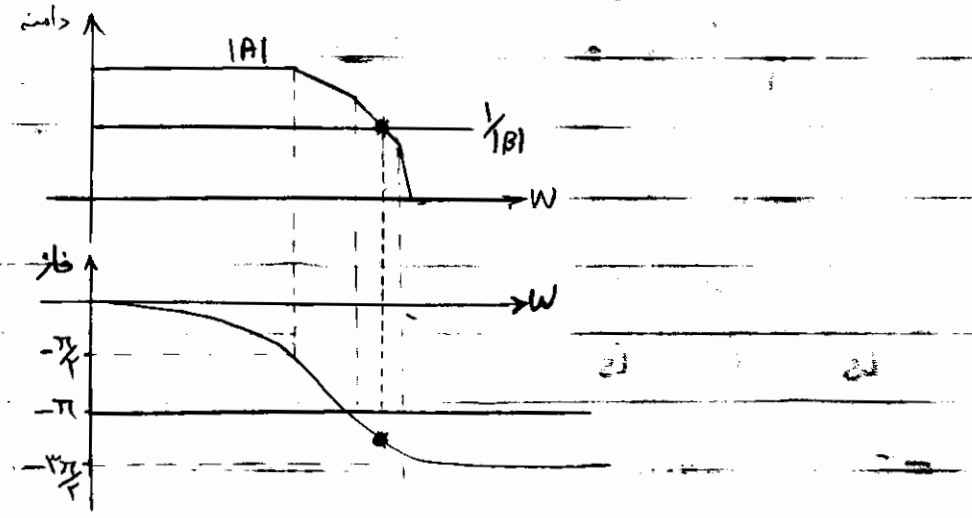
if $\beta A > -1$ ⟶ پایدار

$1+\beta A = 0$ ⟶ $\beta A = -1$ مرز پایداری

$$\beta A = -1 \equiv \begin{cases} |\beta||A| = 1 \\ \angle\beta + \angle A = \pi \text{ یا } -\pi \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} |A| = \frac{1}{|\beta|} \\ \angle A = -\pi - \angle\beta \end{cases}$$

چون عموماً شبکه‌های فیدبک مقاومتی هستند درنتیجه $\angle\beta = 0$

$$\longrightarrow \begin{cases} |A| = \frac{1}{|\beta|} \\ \angle A = -\pi \end{cases}$$ مرز پایداری

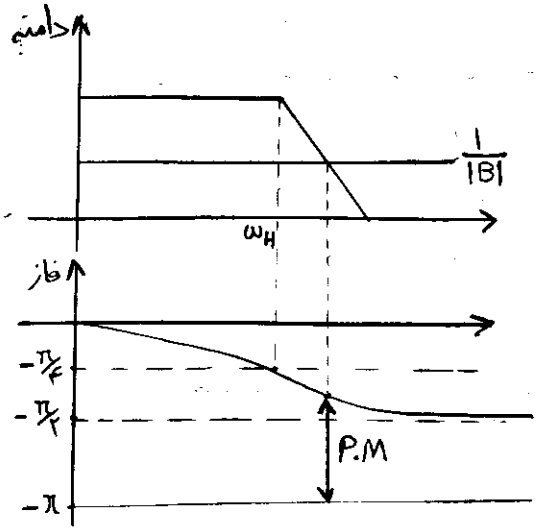


مدار تک قطب:

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + s/\omega_H}$$

$$, A_f(s) = \frac{A(s)}{1+\beta A(s)} = \frac{A_0/(1+s/\omega_H)}{1+\frac{\beta A_0}{1+s/\omega_H}} = \frac{A_0}{1+\beta A_0} \times \frac{1}{1+\frac{s}{\underbrace{(1+\beta)\omega_H}_{\omega_{Hf}}}}$$

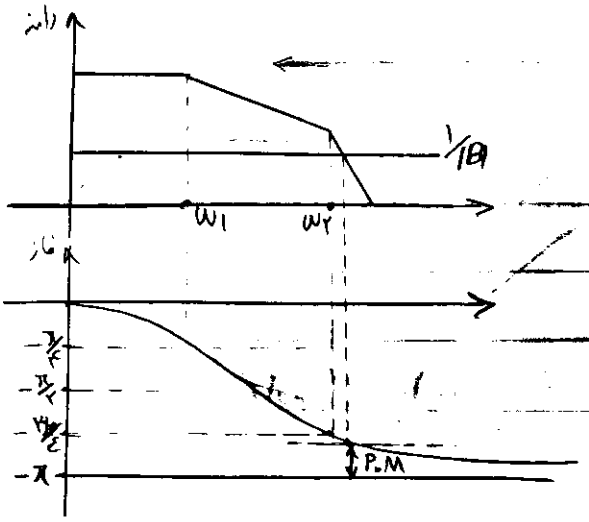
$$\longrightarrow A_f(s) = \frac{A_0}{1+\beta A_0} \times \frac{1}{1+\frac{s}{(1+\beta)\omega_H}}$$



۲- مدار دو قطبی:

$$A(s) = A_0 \frac{b}{s^2+as+b}$$

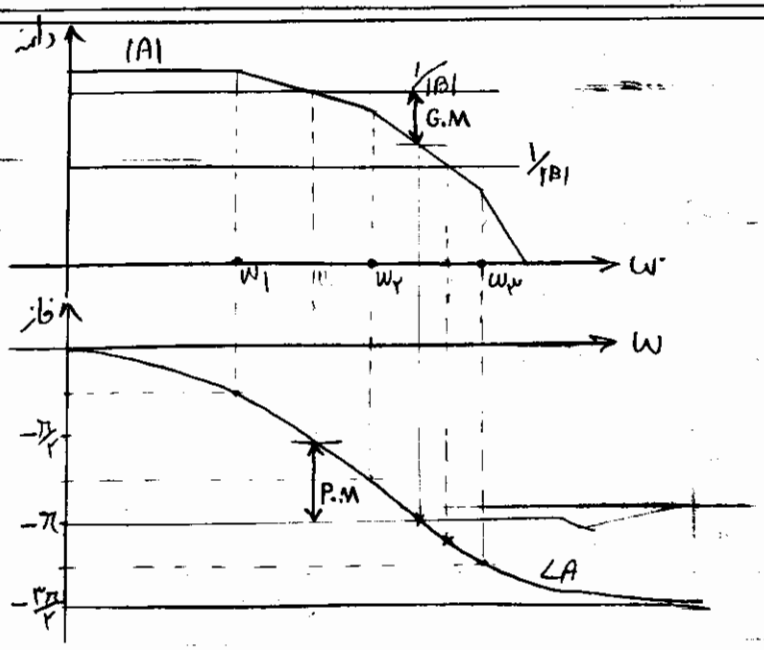
$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1+\beta A(s)} = \frac{A_0 \frac{b}{s^2+as+b}}{1+\beta A_0 \frac{b}{s^2+as+b}} \longrightarrow A_f(s) = \frac{A_0}{1+\beta A_0} \times \frac{(1+\beta A_0)b}{s^2+as+b(1+\beta A_0)}$$



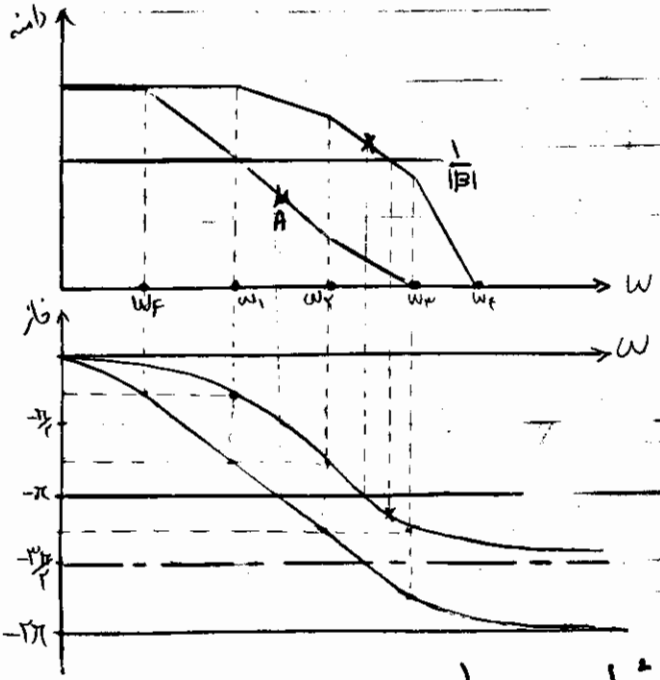
۳- مدار سه قطبی:

$$A(s) = A_0 \frac{c}{s^3+as^2+bs+c}$$

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1+\beta A(s)} \xrightarrow{\text{جایگزینی}} A_f(s) = \frac{A_0}{1+\beta A_0} \times \frac{(1+\beta A_0)c}{s^3+as^2+bs+(1+\beta A_0)c}$$

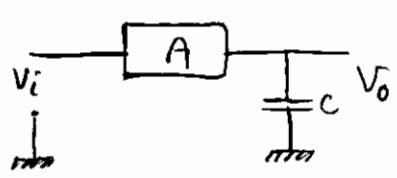


جبران مشخصهٔ فرکانسی :



برای جبران مشخصهٔ فرکانسی روشهایی وجود دارد:

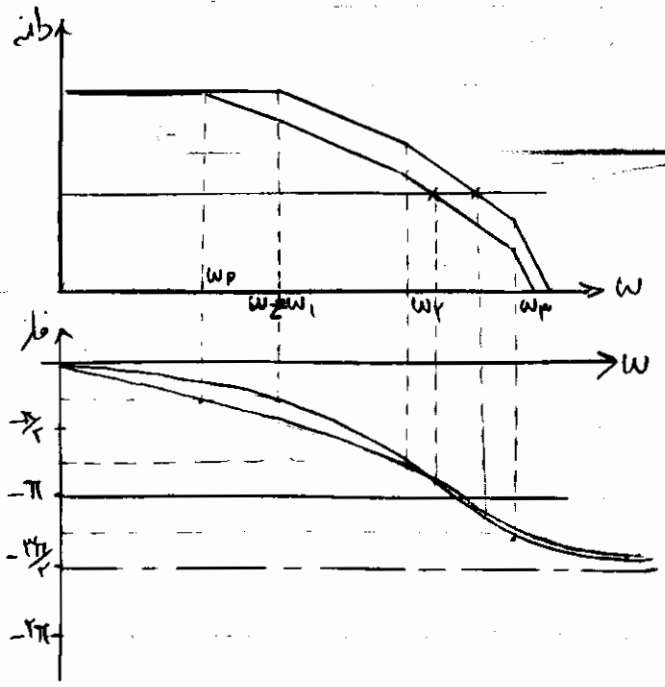
۱- روش قطب مسلط : در این روش یک قطب به سیستم اضافه می‌کنیم (ωF) به طوری که به عنوان قطب مسلط عمل کند (با گذاشتن یک خازن در خروجی) . در شکل بالا این عمل با رنگ سبز نشان داده شده است.



البته در مشخصه فرکانس جدید اگر $\frac{1}{|B|}$ از نقطهٔ A پائین تر باشد باز هم مدار ناپایدار خواهد بود

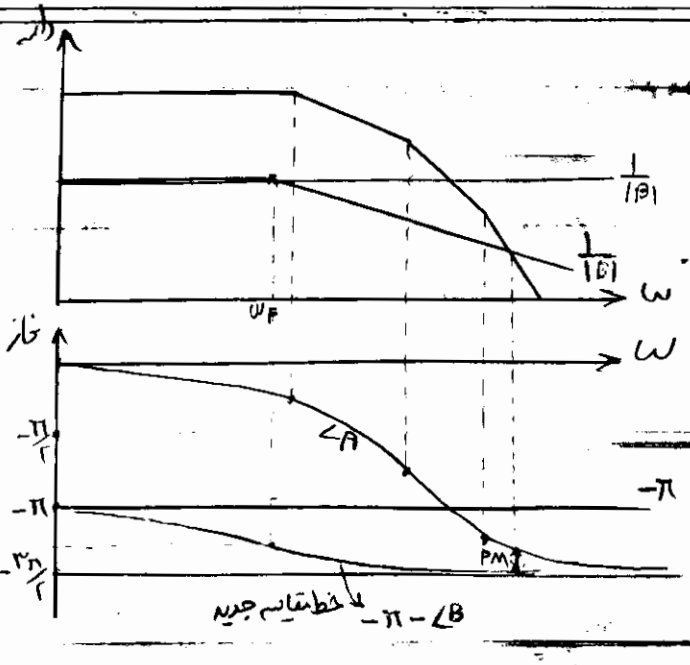
امّا اگر قطب مسلط را درست انتخاب کنیم می توان قسمت ناپایداری را بسیار کوچکتر کرد.

۲- ایجاد صفر و قطب با هم:



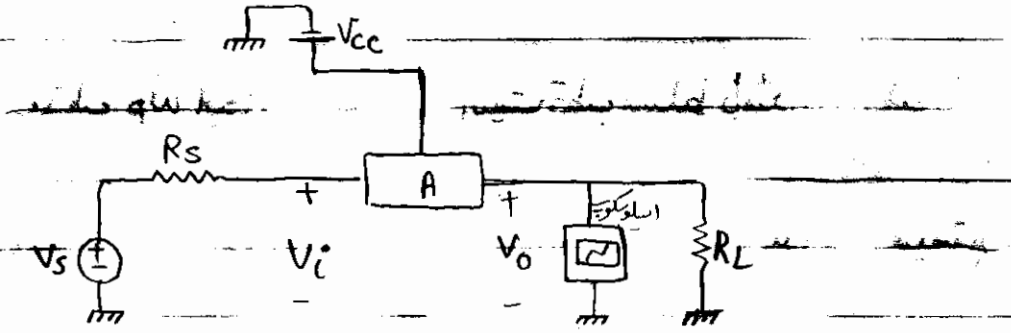
در این حالت یک قطب ω_4 ایجاد می کنیم که لازم نیست قطب مسلط باشد. این قطب پائین تر از کمترین فرکانس سیستم(ω_1) است امانه خیلی زیاد. سپس یک صفر(ω_3) در اولین قطب سیستم(ω_2) ایجاد می کنیم. در این حالت شیب دامنه از ω_1 به بعد همان شیب مشخصهٔ راسته قبلی خواهد بود. چون در ω_1 یک صفر ایجاد کرده ایم.

۳- ایجاد قطب در شبکهٔ فیدبک:



در این روش یک قطب ω_F در شبکهٔ فیدبک $\frac{1}{|\beta|}$ ایجاد می‌کنیم که باعث تغییر خط مقایسه از $-\pi$ به $-\pi - \angle\beta$ می‌گردد.

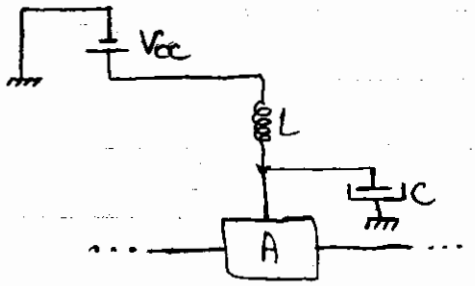
تقویت‌کنندهٔ A در شکل زیر بدون فیدبک و پایدار است امّا مجموعه نوسان می‌کند.



عوامل نوسان عوامل خارجی هستند که شامل اسیلوسکوپ و V_{cc} و V_s است. همچنین سیمهای بلند باعث ورود noise به مدار می‌شود. اگر نوسان از اسیلوسکوپ باشد ایرادی ندارد چون نهایتاً از مدار خارج خواهد شد و فقط در آزمایش از این دستگاه استفاده می‌کنیم. اگر نوسان از منبع تغذیهٔ dc باشد باید آن را با یک خازن بای‌پس کنیم. همچنین در فرکانسهای

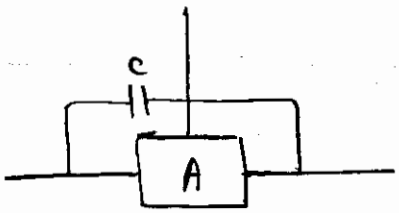
با لا می توانیم از فیلتر LC استفاده کنیم.

سلف RFC سلفی است با L بالا و R پائین که بین طبقات تقویت کننده ها قرار می گیرد و از نظر ac مدار باز و از نظر dc سیگنال را عبور می دهد که از این سلف در فرکانسهای بالا استفاده می شود.



اگر این روش موثر واقع نشد باید از سه روشی که برای جبران مشخصهٔ فرکانسی گفتیم باید استفاده کرد.

روش دیگر استفاده از یک خازن کوچک (حدود ۲۰pf) به شکل زیر است.



این خازن باعث می شود که پهنای باند محدود شود و از ناحیهٔ نوسان خارج گردد.