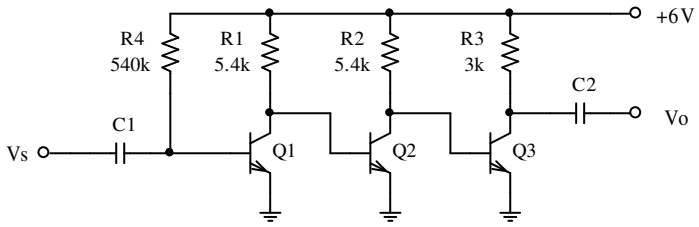
فصل سوم

فیدبک

۳-۱ مقدمه

شکل ۳-۱ را در نظر بگیرید. با فرض $V_{BE} = 0.6V$، $\beta = 99$ و $nV_T = 25mV$؛ مشخصات مدار: $I_{C1} = I_{C2} = I_{C3} = 0.99mA$، $V_{CE3} = 3.03V$، $A_v = 543944$، $R_i = 2.488k\Omega$ و $R_o = 2.983k\Omega$ بدست می آید.

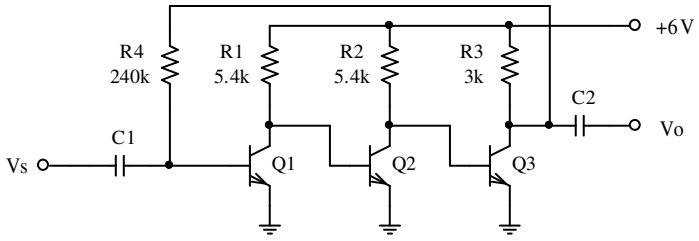


کل ۳۳-۱ تقویت کننده با بهره زیاد

طبیعتاً این مدار به این صورت کار نخواهد کرد. زیرا در دنیای واقعی نه مقاومت ها مقدار مفروض را خواهند داشت و نه ترانزیستورها (چرا؟). با فرض این که چنین مداری با این مشخصات ساخته شود

و بر اثر تغییر دما یا هر عامل دیگر فقط βی ترانزیستورها اندکی تغییر نماید، به ازای $\beta < 98.95$ ترانزیستور $Q3$ قطع، و به ازای $\beta > 99.02$ اشباع خواهد شد!

پس راه حل مسئله چیست؟ با اندکی تغییر در مدار، شکل ۳-۲ حاصل می شود. برای این که نقطه کار این مدار با مدار شکل ۳-۱ یکسان باشد، باید مقدار مقاومت $R4$ به ۲٤۰ کیلو اهم تغییر کند (چرا؟).



شکل ۳-۲ تغییر مدار شکل ۳-۱

در این صورت مشخصات مدار: $I_{C1} = I_{C2} = I_{C3} = 0.99mA$، $V_{CE3} = 3.03V$، $A_v = 537230$، $R_i = 447m\Omega$ و $R_o = 2.963k\Omega$ بدست می آید.

تفاوت این مدار با مدار قبل در این است که وابستگی نقطه کار به βی ترانزیستورها بسیار کمتر خواهد بود. با بررسی این مدار به این نتیجه میرسیم که $Q3$ به ازای $\beta < 45$ قطع و به ازای βهای بزرگ هرگز اشباع نخواهد شد! (چرا؟). توضیح کیفی این امر از این قرار است: اگر با کاهش β جریان I_{C3} بخواهد کم و در نتیجه ترانزیستور بخواهد قطع شود، V_{C3} و در نتیجه I_{B1} زیاد شده، در نهایت در مقابل کاهش I_{C3} به عبارت دیگر قطع شدن ترانزیستور مقاومت خواهد کرد. طبیعتاً اگر β از حدی کمتر شود بالاخره $I_{C3} \to 0$ به عبارت دیگر ترانزیستور قطع خواهد شد. از سوی دیگر اگر با افزایش β جریان I_{C3} بخواهد زیاد و در نتیجه ترانزیستور بخواهد اشباع شود، V_{C3} و در نتیجه I_{B1} کم شده، در نهایت در مقابل افزایش I_{C3} به عبارت دیگر اشباع شدن ترانزیستور مقاومت خواهد کرد. حتی اگر $\beta \to \infty$ و در نتیجه $I_{B1} \to 0$، $V_{CE3} \approx V_{BE1} > V_{CE_{sat}}$. بنابراین $Q3$ هیچگاه اشباع نمی شود.

این امر، یعنی کنترل یک سیستم، توسط نمونه برداری از خروجی و اعمال آن به ورودی سیستم، فیدبک[1] نامیده می شود. در این مثال فیدبک باعث کاهش وابستگی نقطه کار به β شده است. به طوری که با تغییر $\beta = 70 \cdots 170$ ولتاژ خروجی در محدوده $V_O = (3 \pm 1)\,V$ باقی می ماند.

با خواص فیدبک و نحوه محاسبه مشخصات تقویت کننده های فیدبک شده در این فصل آشنا می شوید.

تعریف: منظور از فیدبک کردن در یک سیستم این است که مقداری از سیگنال خروجی را با سیگنال منبع ترکیب کرده، به ورودی سیستم اعمال کنیم. در این حالت چون سیگنال ورودی تابعی از سیگنال خروجی خواهد بود، کنترل مشخصات سیستم، راحت تر و دقیق تر انجام خواهد شد.

برای مثال اگر در سر یک کلاس، مدرس (منبع سیگنال) مطالب درسی را بدون توجه به قوه جذب و معلومات اولیه افراد کلاس (سیستم) ارایه دهد، معمولاً بازده کلاس، آموزش محصلین (خروجی) کامل نخواهد بود. چه ممکن است مطالب ارایه شده، در سطح خیلی پایینتری از قوه درک مستمعین باشد و افراد چیز تازه ای یاد نگیرند و کلاس خسته کننده باشد. یا بر عکس، مطالب خیلی مشکل و غیر قابل جذب باشند.

در صورتی که اگر در سر کلاس، مدرس از شاگردان سؤال کند (نمونه برداری معلومات، خروجی سیستم) و پس از ارزیابی و تلفیق اشکالات کلاس و مطالب برنامه (منبع) موضوعات درس بصورت دیگری ارایه شوند (سیگنال ورودی)، در این حالت اغلب راندمان خیلی بالاتر است. البته در سیستمهای ناپایدار (نامتجانس) عمل فیدبک ممکن است باعث ناپایدارتر شدن سیستم نیز گردد. برای مثال اگر افراد کلاس دارای معلومات در سطوح متفاوت باشند و مدرس بدون توجه به کلاس، برنامه خود را ارایه دهد، هر کس به فراخور حال خود کم یا بیش بهره ای از کلاس خواهد برد. در صورتی که اگر معلم از

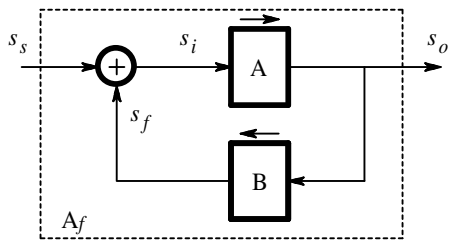
[1] پسخور، پسخورد، باز خور، Feedback

یک شاگرد ضعیف سؤال کند و فرض را بر این مبنا قرار دهد که همه افراد کلاس در این سطح هستند، مطالب را بشدت ساده کرده، از موضوعات ابتدایی تری شروع خواهد کرد. این امر باعث خستگی اکثریت شده و بخصوص افراد با معلومات بیشتر، باعث ناآرامی کلاس خواهند شد. حال اگر مدرس، نظر این گونه شاگردان را بپرسد و بخواهد در برنامه خود دخالت دهد، به ناگاه باید سطح و حجم مطالب را بالا ببرد و این تغییر حالت از یک موضوع به موضوع دیگر، باعث ناپایداری و نوسان شده، راندمان سیستم از حالت قبل نیز کمتر خواهد بود.

از این مثال نتیجه میگیریم که با وجود این که خاصیت فیدبک دارای مزایی زیاد است ولی عیب آن در این است که اگر محل نمونه برداری و یا اثر دادن آن در سیگنال منبع درست انجام نشود، سیستم ناپایدار بعبارت دیگر غیر قابل استفاده خواهد شد. حال می پردازیم به بررسی کلی یک سیستم فیدبک شده.

۳-۲ بررسی سیستمهای با فیدبک

شکل ۳-۳ بلوک دیاگرام کلی یک سیستم فیدبک شده را نشان می دهد. در این شکل: s_s سیگنال منبع، s_i سیگنال ورودی به سیستم بدون فیدبک، A تابع تبدیل (ضریب تبدیل) سیستم بدون فیدبک، s_o سیگنال خروجی، B نسبت فیدبک (شبکه فیدبک کننده)، s_f سیگنال فیدبک شده و A_f تابع تبدیل سیستم با فیدبک می باشد[1]. در بررسی ها فرض بر این است که بلوک ها یک جهته هستند. یعنی مسیر سیگنالها فقط از سمت ورودی یک بلوک به سمت خروجی آن بلوک خواهد بود.



شکل ۳-۳ بلوک دیاگرام یک سیستم فیدبک شده

[1] در نشریات مختلف گاهی بجای A از G و بجای B از β، f، H و غیره استفاده میکنند.

طبیعتاً اگر حلقه (مسیر) فیدبک قطع شود: $s_f = 0$، $s_i = s_s$ و $A_f = A$ خواهد بود. بنا به تعریف:

$$A = \frac{s_o}{s_i} \qquad (۱-۳)$$

$$A_f = \frac{s_o}{s_s} \qquad (۲-۳)$$

$$B = \frac{s_f}{s_o} \qquad (۳-۳)$$

حال به کمک تعاریف فوق و شکل ۳-۳ رابطه بین A_f و A را بدست می آوریم. از (۳-۱):

$$s_o = A \times s_i \qquad (۴-۳)$$

از روی شکل:

$$s_i = s_s + s_f \qquad (۵-۳)$$

از (۳-۳):

$$s_f = B \times s_o \qquad (۶-۳)$$

با جانشینی (۳-۶) و (۳-۵) در (۳-۴):

$$s_o = A(s_s + s_f) = A(s_s + B\,s_o) = A\,s_s + AB\,s_o$$

و در نتیجه:

$$s_o = \frac{A\,s_s}{1 - AB} \qquad (۷-۳)$$

به عبارت دیگر:

$$A_f = \frac{A}{1 - A\,B} \qquad (۸-۳)$$

رابطه (۳-۷) ارتباط سیگنال خروجی با سیگنال منبع را بیان میکند. از آنجایی که در سیستمها معمولاً تابع تبدیل سیستم مهمتر است، اغلب در عمل رابطه (۳-۸) مورد استفاده قرار می گیرد.

۳-۳ فیدبک منفی و مثبت

در صورتی که در سیستمی $A\times B>0$ باشد، فیدبک مثبت است و در صورتی که $A\times B<0$ باشد، فیدبک منفی خواهد بود. در حالتی که $A\times B=0$ باشد، سیستم بدون فیدبک است!

مطالب مربوط به فیدبک کلی است (در مورد سیستمهای مکانیکی، طبیعی، ... نیز صادق است) ولی برای این که مطالب گفته شده ملموس تر باشند، از این به بعد مثالها را در مورد تقویت کننده ها ذکر می کنیم.

از رابطه (۳-۸) نتیجه می شود که در فیدبک مثبت $|A_f|>|A|$ و در فیدبک منفی $|A_f|<|A|$ است. در فیدبک مثبت، در صورتی که $A\times B<1$ باشد، مدار تقویت کننده به عنوان یک تقویت کننده خطی عمل میکند. در صورتی که به ازای $A\times B\geq 1$ سیستم غیرخطی شده یا نوسان میکند (نوسان سازها، مدارهای آستابل، فلیپ فلاپ، اشمیت تریگر، ...). در این فصل فقط خواص فیدبک در حالات خطی را بررسی میکنیم:

خواص فیدبک منفی

چنان که از رابطه (۳-۸) بر میآید، فیدبک منفی همیشه باعث کاهش ضریب تقویت می شود. مثلاً اگر ضریب تقویت $A=-100$ و نسبت فیدبک $B=0.09$ باشد، پس از فیدبک

$$A_f=\frac{-100}{1+100\times 0.09}=-10$$

خواهد شد. این عیب فیدبک حسن های زیادی با خود به همراه می آورد که در زیر، آنها را بررسی میکنیم. البته خود این عیب را نیز می توان با زیاد کردن A جبران نمود. مثلاً اگر $A=-1000$ شود،

$A_f = -100$ خواهد بود (به ازای $B = 0.009$) و عیب برطرف شده است. البته واضح است که مدار تقویت کننده اصلی مفصلتر خواهد شد.

مزایای فیدبک منفی

الف- پایداری بهره مدار (با فیدبک) نسبت به تغییرات بهره تقویت کننده (بدون فیدبک) بهبود خواهد یافت. از رابطه (۳-۸):

$$\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{(1-AB)^2} \qquad (۳-۹)$$

یعنی مقدار A_f خیلی کم وابسته به مقدار A است (در صورتی که $|AB| >> 1$ باشد). به عبارت دیگر (۳-۸) در (۳-۹):

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 - AB}\,\frac{dA}{A} \qquad (۳-۱۰)$$

یعنی تغییرات نسبی A_f (بر اثر تغییر دما، تلرانس المانها یا هر علت دیگر) خیلی کمتر از تغییرات نسبی A خواهد بود.

مثال ۳-۱: در صورتی که $A = -100$، $B = 0.2$ باشد، A_f چقدر خواهد بود؟ در صورتی که $A = -200$ شود A_f چقدر خواهد شد؟ تغییرات A_f بر اثر تغییرات A چگونه است؟

حل:

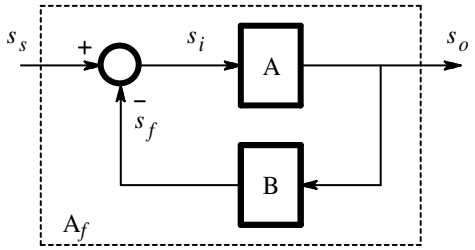
$$A_{f_1} = \frac{A_1}{1 - A_1 B} = \frac{-100}{1 - (-100)\times 0.2} = -4.762$$

$$A_{f_2} = \frac{A_2}{1 - A_2 B} = \frac{-200}{1 - (-200)\times 0.2} = -4.878$$

$$\frac{\Delta A_f}{A_f} = \frac{A_{f_2} - A_{f_1}}{A_{f_1}} = \frac{-4.878 - (-4.762)}{-4.762} \times 100 = 2.44\%$$

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 - AB}\frac{dA}{A} = \frac{1}{1 - (-200) \times 0.2} \times \frac{-200 - (-100)}{-100} \times 100 = 2.44\%$$

تذکر: در صورتی که از قبل بدانیم فیدبک منفی است، برای این که دایماً علامت منفی را بدنبال خود نکشیم، قدر مطلق A و B را در نظر گرفته و در شکل ۳-۳ s_f را از s_s کم میکنیم (شکل ۳-٤) برای تشخیص این که فیدبک مدار، منفی است یا مثبت، باید حلقه فیدبک را قطع کنیم و ببینیم سیگنال برگشتی با



شکل ۳-٤ بلوک دیاگرام یک سیستم با فیدبک منفی

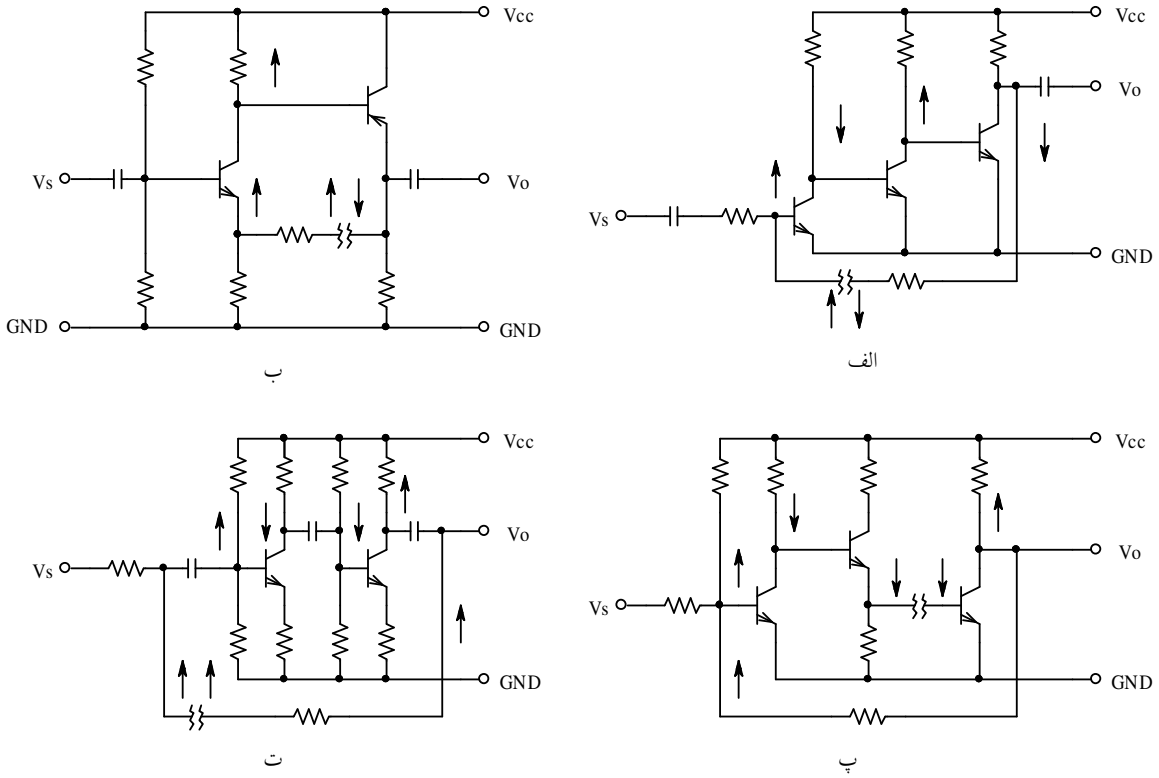
سیگنال اصلی هم فاز است ($\varphi = 0^\circ$) یا با آن به اندازه $\varphi = 180^\circ$ اختلاف فاز دارد. برای این منظور می توان مثلاً از رسم فلش‌هایی استفاده کرده و هم جهت بودن یا نبودن سیگنالها در حلقه فیدبک را بررسی نمود.

برای مثال در شکل ۳-۵ چهار مدار فیدبک دار نمایش داده شده اند. مدارهای الف و ب دارای فیدبک منفی و مدارهای پ و ت دارای فیدبک مثبت هستند. در ضمن تقویت کننده های الف، ب و ت تقویت کننده های AC و مدار پ تقویت کننده DC هستند. علاوه بر آن فیدبک مدارهای الف، ب و پ DC (و AC) و مدار ت AC است. دیگر این که مدار الف یک تقویت کننده معکوس[1] و سه مدار دیگر تقویت کننده های غیر معکوس[2] هستند.

[1] Inverting Amplifier
[2] Non Inverting Amplifier

توجه شود که منفی یا مثبت بودن فیدبک ربطی به معکوس بودن یا غیر معکوس بودن تقویت کننده ندارد. به عبارت دیگر هم تقویت کننده معکوس می تواند فیدبک منفی یا مثبت داشته باشد، هم تقویت کننده غیر معکوس.

هم چنین DC یا AC بودن فیدبک ربطی به DC یا AC بودن تقویت کننده ندارد. به عبارت دیگر هم تقویت کننده DC می تواند فیدبک DC یا AC داشته باشد، هم تقویت کننده AC.



شکل ۳-۵ چند مثال برای فیدبک مثبت و منفی، الف و ب: منفی، پ و ت: مثبت

در صورتی که فیدبک منفی باشد و به ازای A و B قدرمطلقهای آنها را قرار دهیم رابطه (۳-۸) بصورت رابطه (۳-۱۱) در می آید:

$$A_f = \frac{A}{1+AB} \qquad (۱۱-۳)$$

در ضمن از رابطه (۳-۱۰) نتیجه می شود که ضریب تقویت به اندازه $1+AB$ کم می شود. این ضریب را که در تغییر سایر مشخصات تقویت کننده فیدبک شده نیز نقش اساسی بازی میکند، ضریب فیدبک می نامیم و آنرا با K[1] نمایش می دهیم.

$$K = 1 + AB \qquad (۱۲-۳)$$

از طرف دیگر چون ضریب بهره در حلقه فیدبک AB می باشد، به این مقدار "بهره حلقه[2]" گویند.

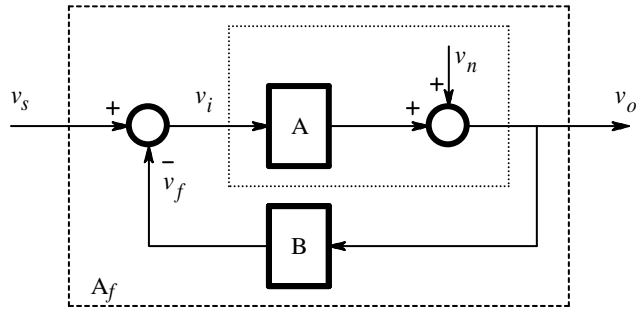
$$K' = AB \qquad (۱۳-۳)$$

در صورتی که $K' >> 1$ باشد، $K \approx K'$ شده:

$$A_f = \frac{A}{K} \approx \frac{A}{K'} = \frac{A}{AB} = \frac{1}{B} \qquad (۱٤-۳)$$

خواهد بود. یعنی اگر بهره حلقه یک مدار فیدبک دار خیلی بزرگ باشد، به عبارت دیگر بهره تقویت کننده و نسبت فیدبک شبکه فیدبک بزرگ باشند، مشخصات مدار فقط تابعی از شبکه فیدبک خواهند بود.

ب- فیدبک باعث کاهش اثر نویز خروجی به عبارت دیگر بهبود S/N در خروجی می شود. به کمک شکل ۳-٦ می توان میزان کاهش اثر نویز را بدست آورد.



شکل ۳-٦ اثر فیدبک بر روی نویز خروجی

یکی از مثال های بارز نویز خروجی، ریپل منبع تغذیه است. بنابراین به کمک فیدبک می توان اثر

[1] در برخی کتب آنرا با D یا حروف دیگر نیز نمایش می دهند.

[2] Loop Gain

تغییرات ولتاژ منبع تغذیه بر روی سیگنال خروجی را کاهش داد.

توجه شود که فیدبک تاثیری بر روی نویز ورودی ندارد، زیرا مسیر سیگنال و نویز یکسان است. از روی شکل ۳-٦:

$$v_o = A \times v_i + v_n \qquad (۱۵-۳)$$

$$v_i = v_s - v_f \qquad (۱٦-۳)$$

$$v_f = B \times v_o \qquad (۱۷-۳)$$

جایگزینی (۳-۱۷) و (۳-۱٦) در (۳-۱۵):

$$v_o = \frac{A v_s + v_n}{1 + AB} = \frac{A v_s}{K} + \frac{v_n}{K} \qquad (۱۸-۳)$$

به عبارت دیگر:

$$v_o = A_f v_s + \frac{v_n}{K} \qquad (۱۹-۳)$$

لذا اثر نویز خروجی در مدار فیدبک شده به اندازه‌ی ضریب فیدبک کم تر از مدار بدون فیدبک است. یعنی:

$$(S/N)_f = \frac{S/N}{K} \qquad (۲۰-۳)$$

پ- اعوجاج سیگنال خروجی به کمک فیدبک کردن کم خواهد شد. اعوجاج در یک سیستم به علت غیر خطی بودن آن سیستم بوجود می آید. بنابراین مثلاً اگر یک تقویت کننده کاملاً خطی نباشد (یعنی بهره نسبت به دامنه خروجی تغییر کند)، هر گاه در ورودی یک موج سینوسی اعمال شود، در خروجی علاوه بر تقویت شده آن موج هارمونیهای آن هم ظاهر می شوند، که بسته به مقدار غیرخطی

بودن، دامنه مؤلفه های هارمونیها نیز بیشتر خواهد شد. بنا بر تعریف مقدار مؤثر مؤلفه های ناخواسته به موج اصلی را اعوجاج دامنه[1] گویند.

$$d = THD = \frac{\sqrt{A_2{}^2 + A_3{}^2 + \cdots + A_n{}^2}}{A_1} \qquad (۲۰-۳)$$

در این رابطه A_1 دامنه موج اصلی خروجی و $A_2 \cdots A_n$ دامنه های هارمونیهای آن هستند. برای مثال اگر اعوجاج تقویت کننده ای ۱۰٪ و ضریب تقویت ۱۰ باشد، در خروجی ممکن است بجای $10V$، مثلاً $11V$ مؤثر داشته باشیم. در صورتی که بتوان سیستم را تقریباً خطی فرض کرد (اعوجاج کم) و اثر مولفه های نا خواسته را به صورت ولتاژ اضافی در خروجی فرض نمود، میتوان اعوجاج را نیز مانند اثر نویز بررسی کرد. برای این منظور کافیست در شکل ۳-٦ و رابطه (۳-۱۵)، به جای v_n، v_d را قرارداد. در این صورت:

$$d_f \approx \frac{d}{K} \qquad (۲۱-۳)$$

تذکر: باید توجه کرد که چون خود تقویت کننده غیر خطی است - یعنی مقدار A تابعی از ولتاژ خروجی است - ولی نسبت فیدبک عملاً ثابت است ($B = Const.$)، ضریب فیدبک مقداری نامشخص بوده ($K \neq Const.$)، محاسبه تحلیلی مقدار اعوجاج به سادگی امکان پذیر نیست!

ت- پهنای باند تقویت کننده زیاد می شود. در صورتی که فرکانس حد بالایی تقویت کننده (بدون فیدبک) را ω_h و بهره در فرکانس میانی را A_m بنامیم، پاسخ فرکانسی تقویت کننده در فرکانس های بالا:

[1] THD: Total Harmonic Distortion

$$A(j\omega) = \frac{A_m}{1 + j\omega/\omega_h} \qquad (۲۲-۳)$$

خواهد بود. در صورتی که شبکه فیدبک غیر وابسته به فرکانس باشد ($B = const.$)، از (۳-۱۱):

$$A_f(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 + B\,A(j\omega)} \qquad (۲۳-۳)$$

با جانشینی (۳-۲۲) در (۳-۲۳):

$$A_f(j\omega) = \frac{\dfrac{A_m}{1 + j\omega/\omega_h}}{1 + B\dfrac{A_m}{1 + j\omega/\omega_h}} = \frac{A_m}{1 + j\omega/\omega_h + BA_m} = \frac{\dfrac{A_m}{1 + BA_m}}{1 + \dfrac{j\omega}{(1 + BA_m)\omega_h}}$$

به عبارت دیگر:

$$A_f(j\omega) = \frac{A_m / K}{1 + j\omega/K\omega_h} \qquad (۲۴-۳)$$

که در این رابطه $K = 1 + BA_m$ ضریب فیدبک در فرکانس های میانی است. از رابطه (۳-۲۴) نتیجه می شود:

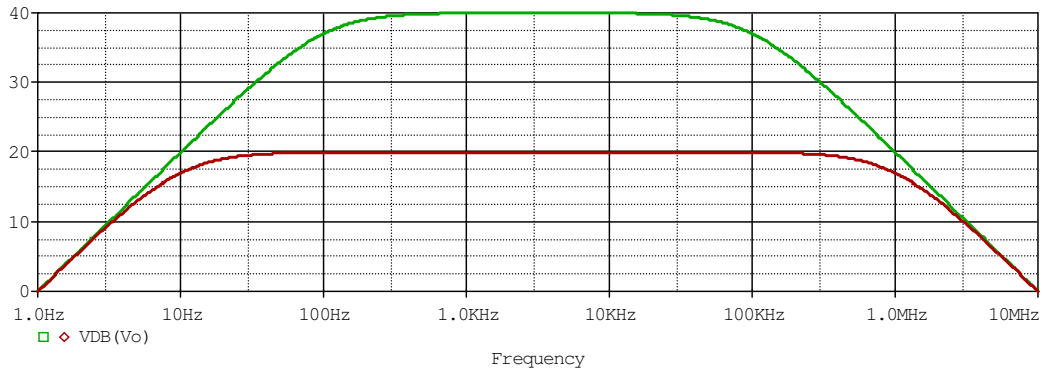
$$A_{m_f} = A_m / K\,, \quad \omega_{h_f} = \omega_{h_f} \times K\,, \quad f_{h_f} = f_{h_f} \times K \qquad (۲۵-۳)$$

یعنی بهره تقویت کننده فیدبک شده در فرکانس های میانی به اندازه ضریب فیدبک کم تر از بهره بدون فیدبک، و فرکانس حد بالایی تقویت کننده فیدبک شده به اندازه ضریب فیدبک بیشتر از فرکانس حد بالایی بدون فیدبک می شود.

به همین ترتیب می توان اثر فیدبک را بر روی فرکانس حد پایینی تقویت کننده بدست آورد. با فیدبک کردن، فرکانس حد پایینی به اندازه ضریب فیدبک در فرکانس های میانی کاهش می یابد.

$$A_{m_f} = A_m / K\,, \quad \omega_{l_f} = \omega_{l_f} / K\,, \quad f_{l_f} = f_{l_f} / K \qquad (۲۶-۳)$$

به عنوان یک مثال در شکل ۳-۷ اثر فیدبک بر روی پاسخ فرکانسی یک تقویت کننده نمایش داده شده است. در این شکل نمودار سبز پاسخ فرکانسی تقویت کننده بدون فیدبک رسم شده است. بهره این تقویت کننده $A_v = 40dB \equiv 100$، فرکانس حد پایین $f_l = f_{3dB} = 100Hz$ و فرکانس حد بالای آن $f_h = f_{3dB} = 100kHz$ است. پس از فیدبک کردن با ضریب فیدبک $K = 10$، بهره این تقویت کننده $A_{v_f} = 20dB \equiv 10$، فرکانس حد پایین $f_{l_f} = 10Hz$ و فرکانس حد بالای آن $f_{h_f} = 1MHz$ می شود.

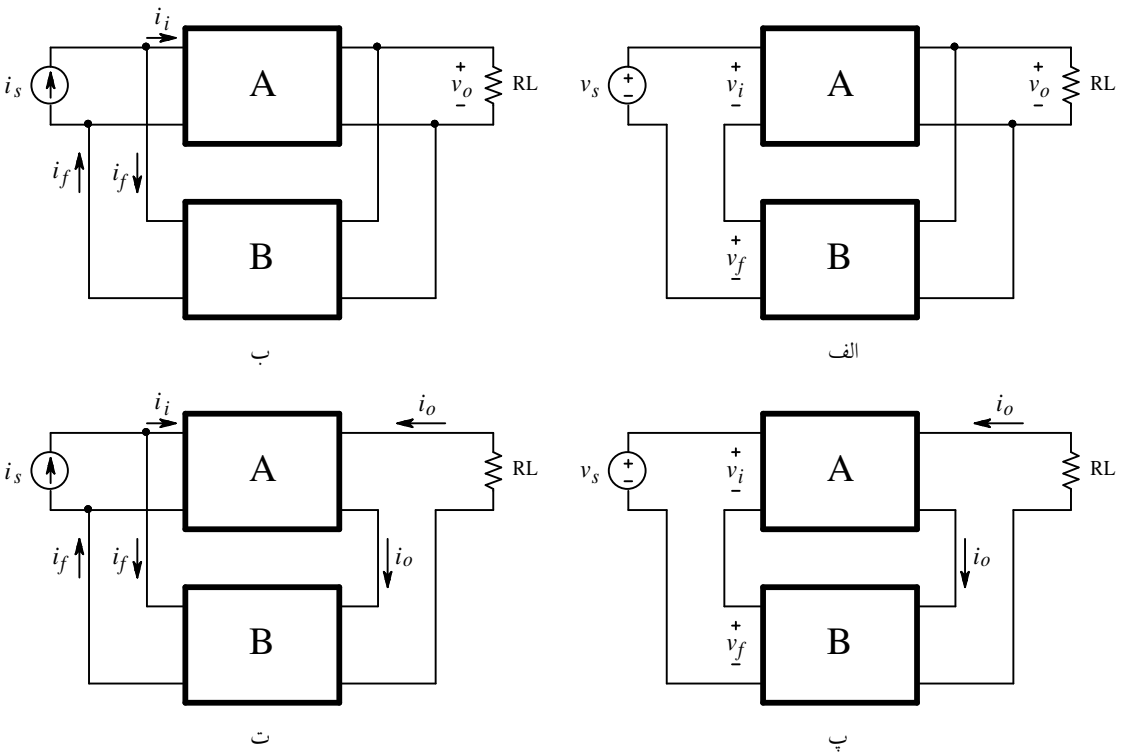


شکل ۳-۷ تغییر پهنای باند به کمک فیدبک. بالا بدون فیدبک، پایین با ضریب فیدبک ۱۰

ث- تغییر مقاومت ورودی و خروجی، بسته به چگونگی فیدبک (که در بخش های بعدی این فصل بطور مفصل درباره آن بحث خواهد شد) مقاومت ورودی و خروجی به نسبت K کم یا زیاد خواهد شد.

۳-٤ توپولوژی های اصلی فیدبک

بسته به این که سیگنال نمونه برداری شده خروجی در یک تقویت کننده فیدبک دار، ولتاژ باشد یا جریان، دو نوع فیدبک بوجود می آید. و بسته به این که سیگنال فیدبک شده بصورت سری یا موازی با سیگنال منبع به ورودی تقویت کننده اعمال شود، هر کدام نیز به دو نوع تقسیم می شوند. بنابراین مجموعاً چهار توپولوژی فیدبک خواهیم داشت. این چهار نوع فیدبک در شکل ۳-۸ نمایش داده شده اند.



شکل ۳-۸ چهار توپولوژی فیدبک

برای نام گذاری این چهار نوع از نحوه فیدبک کردن کمک می گیریم:

- **الف: فیدبک ولتاژ – سری.** در این نوع فیدبک، از ولتاژ خروجی نمونه برداری شده، جزیی از آنرا با ولتاژ ورودی ترکیب می کنند. از آن جایی که ترکیب در اینجا به معنی جمع (کم) کردن دو سیگنال است – و برای جمع کردن دو ولتاژ باید آنها را با هم سری کرد – به همین دلیل در برخی کتب این فیدبک را به همین نام می شناسند[1]. البته در بیشتر مواقع از ساده شده آن استفاده می کنند[2]. ما هم از همین نام استفاده مینماییم[3]؛ یعنی *"فیدبک ولتاژ – سری"*.

در فیدبک ولتاژ – سری، سیگنالهای خروجی، فیدبک، ورودی و منبع ماهیت ولتاژ را دارند. به عبارت دیگر:

$$s_o \equiv v_o\ , \qquad s_f \equiv v_f\ , \qquad s_i \equiv v_i\ , \qquad s_s \equiv v_s$$

در نتیجه مدار معادل منبع سیگنال باید مدار معادل تونن (منبع ولتاژ) در نظر گرفته شود. در این حالت چون $A = \frac{v_o}{v_i}$ نسبت دو ولتاژ است، به آن بهره ولتاژ[4]، به عبارت دیگر A_v گویند. $B = \frac{v_f}{v_o}$ نیز نسبت دو ولتاژ بوده و بدون واحد می باشد (تقسیم کننده ولتاژ). این نوع فیدبک باعث زیاد شدن مقاومت ورودی و کم شدن مقاومت خروجی تقویت کننده می گردد.

---

[1] Voltage Sampled - Series Mixing Feedback

[2] Voltage - Series Feedback

[3] گاهی در نشریات مختلف از نام های دیگری استفاده می شود، نظیر فیدبک: ولتاژ – ولتاژ (Voltage - Voltage)، حلقه – گره (Loop - Node)، سری – موازی (Series - Shunt, Series - Parallel)، ...

[4] Voltage Gain

- **ب: فیدبک ولتاژ – موازی.** در این نوع فیدبک، از ولتاژ خروجی نمونه برداری شده، پس از تبدیل آنرا با جریان ورودی ترکیب می کنند. از آن جایی که ترکیب در اینجا به معنی جمع (کم) کردن دو سیگنال است – و برای جمع کردن دو جریان باید آنها را با هم موازی کرد – به همین دلیل در برخی کتب این فیدبک را به همین نام می شناسند[1]. البته در بیشتر مواقع از ساده شده آن استفاده می کنند[2]. ما هم از همین نام استفاده مینماییم[3]؛ یعنی *"فیدبک ولتاژ – موازی"*.

در فیدبک ولتاژ – موازی، سیگنال خروجی ماهیت ولتاژ، و سیگنالهای فیدبک، ورودی و منبع ماهیت جریان را دارند. به عبارت دیگر:

$$s_o \equiv v_o \,, \qquad s_f \equiv i_f \,, \qquad s_i \equiv i_i \,, \qquad s_s \equiv i_s$$

در نتیجه مدار معادل منبع سیگنال باید مدار معادل نورتن (منبع جریان) در نظر گرفته شود. در این حالت چون $A = \frac{v_o}{i_i}$ نسبت یک ولتاژ به جریان است، به آن مقاومت تقابلی[4]، به عبارت دیگر R_m گویند. $B = \frac{i_f}{v_o}$ نیز نسبت جریان به ولتاژ بوده، دارای واحد رسانایی می باشد (مبدل ولتاژ به جریان). این نوع فیدبک باعث کاهش مقاومت ورودی و مقاومت خروجی تقویت کننده می گردد.

---

[1] Voltage Sampled - (Parallel) Shunt Mixing Feedback

[2] Voltage - (Parallel) Shunt Feedback

[3] گاهی در نشریات مختلف از نام های دیگری استفاده می شود، نظیر فیدبک: ولتاژ – جریان (Voltage - Current)، گره – گره (Node - Node)، موازی – موازی (Parallel - Parallel, Shunt - Shunt)، ...

[4] ترا مقاومتی، Transresistance، Mutual Resistance

- **پ: فیدبک جریان – سری.** در این نوع فیدبک، از جریان خروجی نمونه برداری شده، پس از تبدیل به ولتاژ آنرا با ولتاژ ورودی ترکیب می کنند. از آن جایی که ترکیب در اینجا به معنی جمع (کم) کردن دو سیگنال است – و برای جمع کردن دو ولتاژ باید آنها را با هم سری کرد – به همین دلیل در برخی کتب این فیدبک را به همین نام می شناسند[1]. البته در بیشتر مواقع از ساده شده آن استفاده می کنند[2]. ما هم از همین نام استفاده مینماییم[3]؛ یعنی *"فیدبک جریان – سری"*.

در فیدبک جریان – سری، سیگنال خروجی ماهیت جریان، و سیگنالهای فیدبک، ورودی و منبع ماهیت ولتاژ را دارند. به عبارت دیگر:

$$s_o \equiv i_o \,, \qquad s_f \equiv v_f \,, \qquad s_i \equiv v_i \,, \qquad s_s \equiv v_s$$

در نتیجه مدار معادل منبع سیگنال باید مدار معادل تونن (منبع ولتاژ) در نظر گرفته شود. در این حالت چون $A = \frac{i_o}{v_i}$ نسبت جریان به ولتاژ است، به آن هدایت تقابلی[4]، به عبارت دیگر G_m گویند. $B = \frac{v_f}{i_o}$ نسبت ولتاژ به جریان بوده دارای واحد مقاومت است (مبدل جریان به ولتاژ). این نوع فیدبک باعث زیاد شدن مقاومت ورودی و مقاومت خروجی تقویت کننده می گردد.

---

[1] Current Sampled - Series Mixing Feedback

[2] Current - Series Feedback

[3] گاهی در نشریات مختلف از نام های دیگری استفاده می شود، نظیر فیدبک: جریان – ولتاژ (Current - Voltage)، حلقه – حلقه (Loop - Loop)، سری – سری (Series - Series)، ...

[4] ترا رسانایی، Transconductance، Mutual Conductance

- **ت: فیدبک جریان – موازی.** در این نوع فیدبک، از جریان خروجی نمونه برداری شده، جزیی از آنرا با جریان ورودی ترکیب می کنند. از آن جایی که ترکیب در اینجا به معنی جمع (کم) کردن دو سیگنال است – و برای جمع کردن دو جریان باید آنها را با هم موازی کرد – به همین دلیل در برخی کتب این فیدبک را به همین نام می شناسند[1]. البته در بیشتر مواقع از ساده شده آن استفاده می کنند[2]. ما هم از همین نام استفاده مینماییم[3]؛ یعنی *"فیدبک جریان – موازی"*.

در فیدبک جریان – موازی، سیگنالهای خروجی، فیدبک، ورودی و منبع ماهیت جریان را دارند. به عبارت دیگر:

$$s_o \equiv i_o\ , \qquad s_f \equiv i_f\ , \qquad s_i \equiv i_i\ , \qquad s_s \equiv i_s$$

در نتیجه مدار معادل منبع سیگنال باید مدار معادل نورتن (منبع جریان) در نظر گرفته شود. در این حالت چون $A = \frac{i_o}{i_i}$ نسبت دو جریان است، به آن بهره جریان[4]، به عبارت دیگر A_i گویند. $B = \frac{i_f}{i_o}$ نیز نسبت دو جریان بوده، فاقد واحد است (تقسیم جریان). این نوع فیدبک باعث کاهش مقاومت ورودی و افزایش مقاومت خروجی تقویت کننده می شود.

---

[1] Current Sampled – (Parallel) Shunt Mixing Feedback

[2] Current – (Parallel) Shunt Feedback

[3] گاهی در نشریات مختلف از نام های دیگری استفاده می شود، نظیر فیدبک: جریان – جریان (Current - Current)؛ گره – حلقه (Node - Loop)، موازی – سری (Shunt - Series, Parallel - Series)، ...

[4] Current Gain

مطالب فوق در جدول ۳-۱ خلاصه شده‌اند. در این جدول تعاریف انواع تقویت کننده و شبکه فیدبک، کمیت سیگنال های ورودی و خروجی و اثر فیدبک بر روی مقاومت های ورودی و خروجی برای توپولوژی های مختلف فیدبک ذکر شده است.

جدول ۳-۱ مشخصات کلی انواع چهار گانه فیدبک

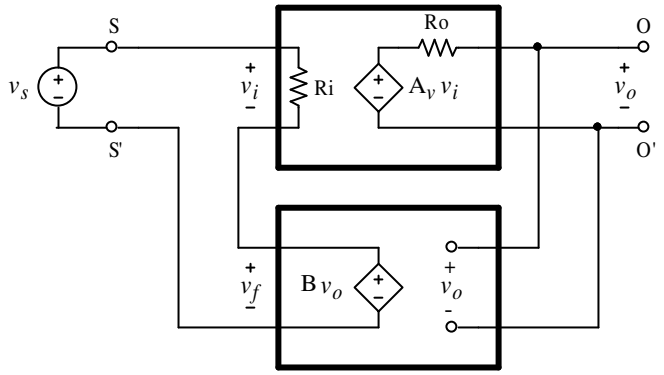
مشخصات	ولتاژ - سری	ولتاژ - موازی	جریان - سری	جریان - موازی
تقویت کننده (A)	$A_v = v_o/v_i$	$R_m = v_o/i_i$	$G_m = i_o/v_i$	$A_i = i_o/i_i$
نسبت فیدبک (B)	$B = v_f/v_o$	$B = i_f/v_o$	$B = v_f/i_o$	$B = i_f/i_o$
سیگنال خروجی (s_o)	ولتاژ	ولتاژ	جریان	جریان
سایر (s_s ، s_i ، s_f)	ولتاژ	جریان	ولتاژ	جریان
مقاومت ورودی(R_{i_f})	زیاد	کم	زیاد	کم
مقاومت خروجی(R_{o_f})	کم	کم	زیاد	زیاد

۳-۵ نحوه محاسبه مشخصات تقویت کننده های فیدبک شده

به علت این که بر اثر فیدبک کردن بهره کم می شود، در بیشتر موارد این اشکال را با افزایش تعداد طبقات تقویت کننده جبران می کنند. در نتیجه مدارهای تقویت کننده های فیدبک شده اغلب مدارهای مفصلی خواهند بود. به همین دلیل بدست آوردن مشخصات این تقویت کننده ها از روش های متداول مداری (KVL، KCL، ...) مفصل و وقت گیر بوده، امکان اشتباه بسیار زیاد است. در این بخش می خواهیم روشی تقریبی را معرفی کنیم، که محاسبه مشخصات تقویت کننده فیدبک شده را نسبتاً ساده، سریع و با دقت خوب، امکان پذیر می سازد.

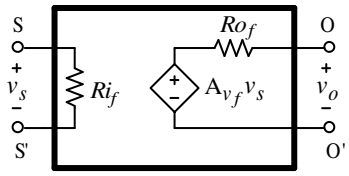
۳-۵-۱ فیدبک ولتاژ - سری

الف- حالت ایده‌آل: شکل ۳-۹ مدار یک تقویت کننده با فیدبک ولتاژ سری را نمایش می دهد. این مدل حالت ایده‌آل را در نظر می گیرد. به این معنی که مقاومت منبع $R_s \to 0$، مقاومت بار $R_L \to \infty$ و مسیر سیگنال در تقویت کننده و شبکه فیدبک یک طرفه هستند (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۹ مدار معادل فیدبک ولتاژ - سری در حالت ایده‌آل

مدار معادل تقویت کننده فیدبک شده در شکل ۳-۱۰ نمایش داده شده است. برای بدست آوردن مشخصات این مدار، یعنی R_{i_f}، R_{o_f} و A_{v_f}، به روال معمول به طریق زیر عمل می کنیم:



شکل ۳-۱۰ مدار معادل تقویت کننده فیدبک شده

محاسبه بهره ولتاژ: از شکل ۳-۹ روابط مداری را به دست می آوریم:

$$\begin{aligned} &v_o = A_v\, v_i \\ &v_f = B\, v_o \qquad \Rightarrow \quad v_o = \frac{A_v}{1 + A_v\, B}\, v_s \\ &v_s = v_i + v_f \end{aligned}$$

به عبارت دیگر:

$$A_{v_s} \equiv \frac{v_o}{v_s} = \frac{A_v}{1 + A_v\, B} \qquad (۲۷-۳)$$

از شکل ۳-۱۰: $A_{v_f} = \dfrac{v_o}{v_s} = A_{v_s}$ و با تعریف $K = 1 + A_v\, B$، از (۳-۲۷):

$$A_{v_f} = \frac{A_v}{1 + A_v\, B} = A_v / K \qquad (۲۸-۳)$$

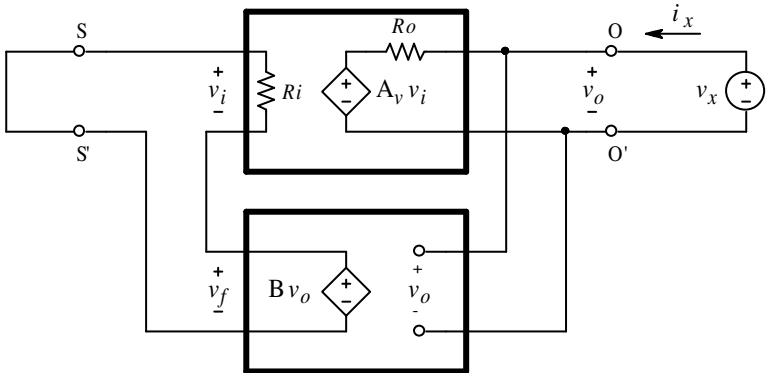
یعنی بهره ولتاژ تقویت کننده، پس از فیدبک کردن، به اندازه ضریب فیدبک کم می شود.

محاسبه مقاومت ورودی: با مقایسه شکل های ۳-۹ و ۳-۱۰ و طبق تعریف:

$$\begin{aligned} &R_{i_f} \equiv \frac{v_s}{i_s} \\ &v_s = v_i + v_f \\ &v_f = A_v\, B\, v_s \qquad \Rightarrow \quad R_{i_f} = R_i \left(1 + A_v\, B\right) = R_i \times K \\ &i_s = i_i = \frac{v_i}{R_i} \end{aligned}$$

یعنی مقاومت ورودی تقویت کننده، پس از فیدبک کردن، به اندازه ضریب فیدبک زیاد می شود.

محاسبه مقاومت خروجی: چون طبق تعریف $R_{o_f} \equiv \left.\frac{v_o}{i_o}\right|_{v_s=0}$ است، برای محاسبه مقاومت خروجی، یک منبع ولتاژ مستقل با نیروی محرکه v_x را به پایانه های خروجی اعمال و ورودی تقویت کننده را اتصال کوتاه کرده جریان تامین شده توسط منبع (i_x) را بدست می آوریم. در این صورت $R_{o_f} = \frac{v_x}{i_x}$.



شکل ۳-۱۱ مدار معادل جهت محاسبه مقاومت خروجی

از روی شکل:

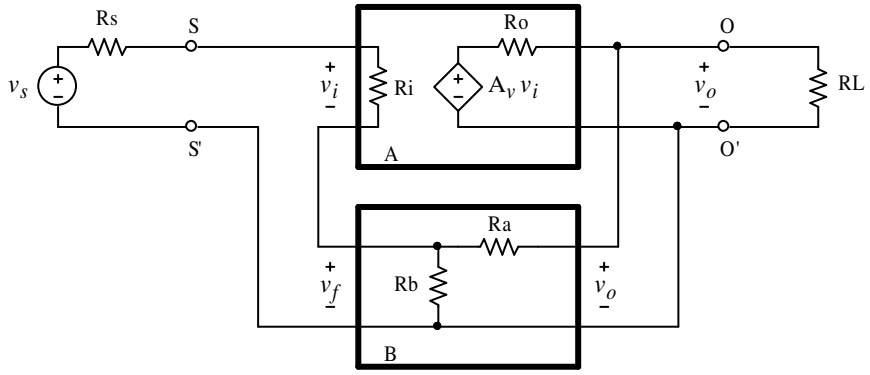
$$\begin{aligned} &v_x = R_o\, i_x + A_v\, v_i \\ &0 = v_i + v_f \qquad\qquad \Rightarrow \quad v_x = R_o\, i_x / (1 + A_v\, B) \\ &v_f = B\, v_x \end{aligned}$$

به عبارت دیگر:

$$R_{o_f} \equiv \frac{v_x}{i_x} = \frac{R_o}{1 + A_v\, B} = R_o / K \qquad (۲۹-۳)$$

یعنی مقاومت خروجی تقویت کننده، پس از فیدبک کردن، به اندازه ضریب فیدبک کم می شود.

ب- حالت واقعی: در مدارهای واقعی، در حالت کلی منبع دارای یک مقاومت R_s است. از طرف دیگر هدف استفاده از تقویت کننده معمولاً این است که انرژی به مقاومت بار منتقل شود. بنابراین در مدار یک R_L نیز وجود دارد. علاوه بر این، شبکه فیدبک تقریباً همیشه متشکل از عناصر غیر فعال است. برای مثال در فیدبک ولتاژ - سری که جزیی از ولتاژ خروجی به ورودی بر گردانیده می شود، شبکه فیدبک، یک مقسم ولتاژ ساده خواهد بود. بنابراین شبکه فیدبک هم در ورودی و هم در خروجی اثر بار گذاری دارد. شکل ۳-۱۲ مدار یک تقویت کننده با فیدبک ولتاژ سری را - که در آن مقاومتهای منبع و بار و اثر بار گذاری شبکه فیدبک در نظر گرفته شده است - نمایش می دهد.



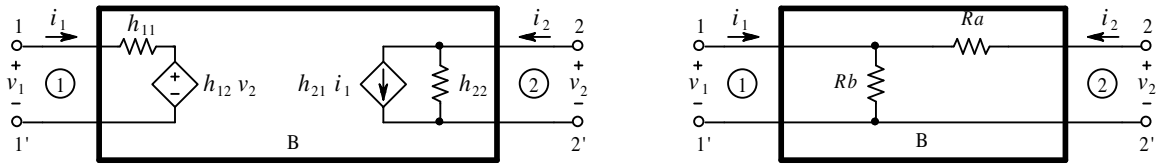
شکل ۳-۱۲ تقویت کننده با فیدبک ولتاژ سری با اثر بار گذاری شبکه فیدبک و مقاومتهای بار و منبع

همانطور در این شکل مشاهده می شود، بر خلاف حالت ایده آل - که سیگنال ها فقط در یک جهت باید منتقل شوند (شکل ۳-۳) - سیگنال منبع از طریق شبکه فیدبک هم بر روی سیگنال خروجی تاثیر گذار خواهد بود!

برای بررسی این تاثیرات و تبدیل مدل واقعی به مدل ایده‌آل، از تئوری چهار قطبی ها (تئوری دو دریچه‌ای ها[1]) کمک می گیریم. چون در این مدار دو شبکه دو دریچه ای (A و B) وجود دارد که در

[1] Two Port Theory

ورودی با هم سری و در خروجی با یک دیگر موازی شده اند، از مدل هایبرید[1] برای شبکه فیدبک (B) استفاده می کنیم.



ب الف

شکل ۳-۱۳ الف- شبکه فیدبک، ب- مدار معادل هایبرید آن

از شکل ۳-۱۳ ب:

$$\begin{aligned} v_1 &= h_{11}\ i_1 + h_{12}\ v_2 \\ i_2 &= h_{21}\ i_1 + h_{22}\ v_2 \end{aligned} \qquad (۳۰-۳)$$

که پارامتر های h این چنین تعریف می شوند:

$$h_{11} = \left.\frac{v_1}{i_1}\right|_{v_2=0}, \quad h_{12} = \left.\frac{v_1}{v_2}\right|_{i_1=0}, \quad h_{21} = \left.\frac{i_2}{i_1}\right|_{v_2=0}, \quad h_{22} = \left.\frac{i_2}{v_2}\right|_{i_1=0} \qquad (۳۱-۳)$$

بنابراین از شکل ۳-۱۳ الف:

$$h_{11} = \left.\frac{v_1}{i_1}\right|_{v_2=0} = R_a \| R_b = R_{11} \qquad (۳۲-۳ \text{ الف})$$

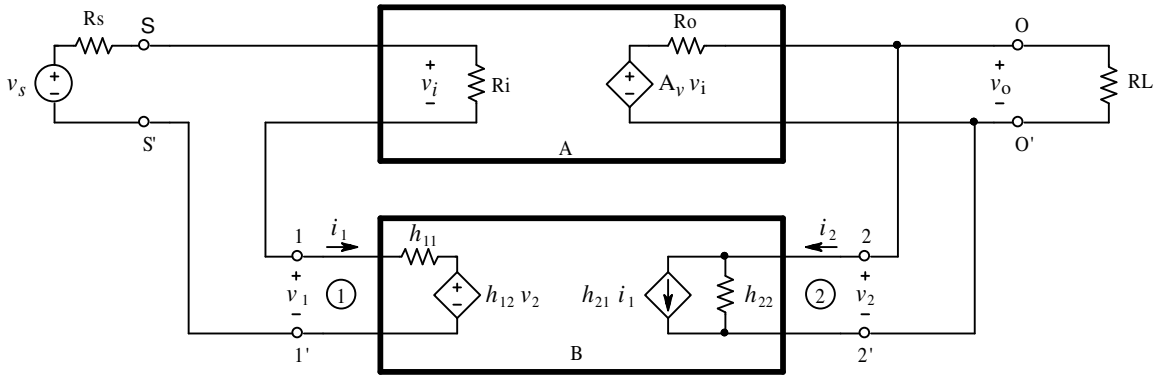
$$h_{12} = \left.\frac{v_1}{v_2}\right|_{i_1=0} = \frac{R_b}{R_a + R_b} = B \qquad (۳۲-۳ \text{ ب})$$

$$h_{21} = \left.\frac{i_2}{i_1}\right|_{v_2=0} = \frac{R_b}{R_a + R_b} \qquad (۳۲-۳ \text{ پ})$$

$$h_{22} = \left.\frac{i_2}{v_2}\right|_{i_1=0} = \frac{1}{R_a + R_b} = \frac{1}{R_{22}} \qquad (۳۲-۳ \text{ ت})$$

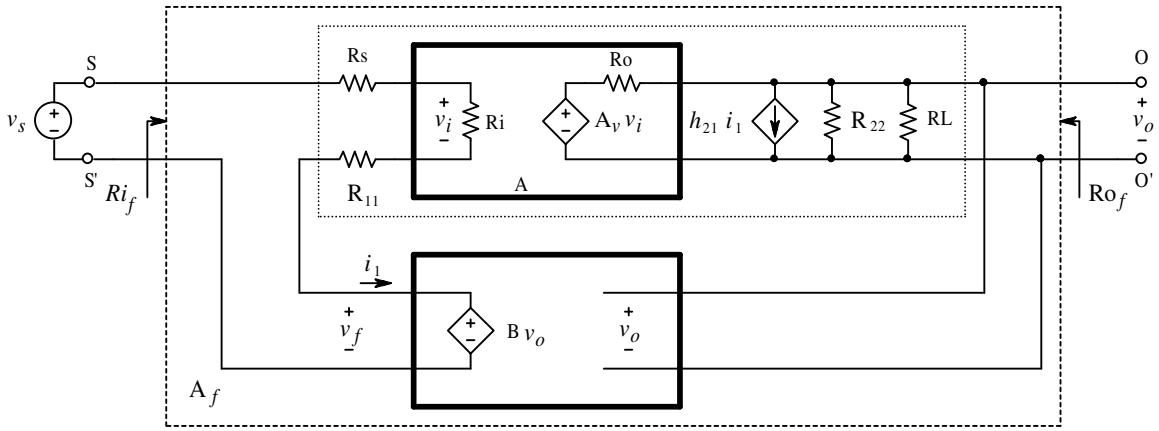
[1] Hybrid

حال اگر در مدار شکل ۳-۱۲ به جای شبکه فیدبک، مدار معادل آن یعنی مدار شکل ۳-۱۳ ب را جایگزین کنیم، مدار شکل ۳-۱٤ حاصل می شود.



شکل ۳-۱٤ جایگزینی مدل هایبرید در شبکه فیدبک

با مقایسه شکل های ۳-۱۲ و ۳-۱٤ با یک دیگر و با استفاده از روابط (۳-۳۲ الف، پ و ت)، شکل زیر بدست می آید.



شکل ۳-۱۵ مدار تغییر فرم یافته شکل ۳-۱٤

در این شکل، مدار محصور در مستطیل خط چین، تقویت کننده فیدبک شده را نمایش می دهد. مقاومت دیده شده از سوی پایانه های S و S' به سمت مدار، مقاومت ورودی تقویت کننده (R_{i_f}) و

مقاومت دیده شده از سوی پایانه های O و O' به سمت مدار، مقاومت خروجی تقویت کننده (R_{o_f}) هستند. بهره مدار عبارت است از: $A_{v_f} = A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s}$.

با مقایسه این مدار با یک تقویت کننده دارای فیدبک ولتاژ – سری در حالت ایده‌آل (شکل ۳–۹)، مشاهده می شود که اگر تقویت کننده اصلی را مدار محصور بین مستطیل نقطه چین در نظر بگیریم، با اندکی تغییر می توان مشخصات یک تقویت کننده فیدبک شده واقعی را به کمک همان روابط استخراج شده در حالت ایده‌آل (روابط (۳–۲۷) تا (۳–۲۹))، محاسبه نمود.

اما این تغییرات کدامند؟ با توجه به رابطه (۳–۳۲ پ) مطمئناً $h_{21} \leq 1$ خواهد بود. برای یک تقویت کننده ولتاژ در شرایط عادی، به خصوص وقتی می خواهیم آنرا فیدبک کنیم $A_v >> 1$ است. از طرف دیگر $R_o << R_i$ و $R_L << R_i$، در نتیجه $h_{21} \times i_1 << i_{R_o}$ (چرا؟). که در اینجا منظور از i_{R_o} جریان گذرنده از R_o است. بنابراین میتوان اثر $h_{21} \times i_1$ را در مدار نا دیده گرفته h_{21} را از مدار حذف نمود. به همین دلیل در آغاز این بخش ذکر شد که این روش یک روش تقریبی است. به عنوان یک مثال اگر $A_v = 10$، $R_i = 10k\Omega$، $R_o = 1k\Omega$، $R_L = 1k\Omega$، $R_a = 10k\Omega$ و $R_b = 10k\Omega$ انتخاب شوند، مشخصات دقیق تقویت کننده از روش مداری (مثلاً به کمک KVL، KCL): $A_{v_f} = 1.241$، $R_{i_f} = 39.51k\Omega$ و $R_{o_f} = 185.2\Omega$ و مقادیر تقریبی از روش ذکر شده برای فیدبک (یعنی حذف اثر h_{21}): $A_{v_f} = 1.238$، $R_{i_f} = 39.39k\Omega$ و $R_{o_f} = 185.8\Omega$ بدست می آید[1]. البته در عمل چون معمولاً A_v خیلی بزرگتر از این مقدار است، خطای محاسباتی به مراتب کمتر خواهد بود. لذا در مدارهای واقعی مجاز به حذف h_{21} از مدار بوده، تقویت کننده های واقعی را به کمک روابط ایده‌آل محاسبه می کنیم.

[1] به عنوان تمرین مقادیر فوق را حساب کنید.

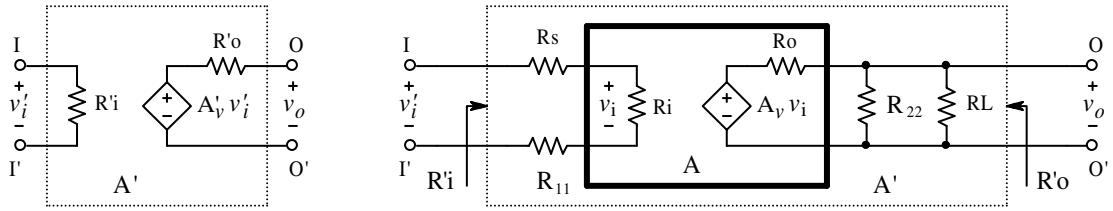
تغییر دیگر اینست که اثر بار گذاری مقاومت های شبکه فیدبک، بار و منبع را در مشخصات تقویت کننده دخالت می دهیم. به این معنی که اگر مشخصات تقویت کننده اصلی (A، مشخص شده توسط مستطیل پر در شکل ۳-۱۵) A_v، R_i و R_o باشند، در تقویت کننده تغییر یافته - که آنرا A' می نامیم (قسمت محصور در مستطیل نقطه چین در شکل ۳-۱۵) - مشخصات تقویت کننده چنین خواهد بود:

$$R'_i = R_s + R_i + R_{11} \qquad (۳۳-۳)$$

$$R'_o = R_L \| R_{22} \| R_o \qquad (۳۴-۳)$$

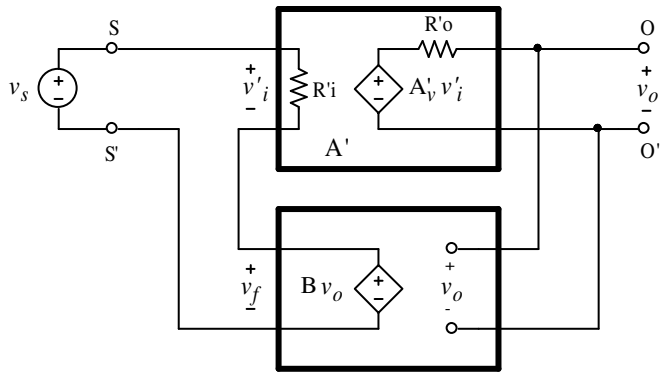
$$A'_v = \frac{v_o}{v'_i} = \frac{R_i}{R'_i} \times A_v \times \frac{R_L \| R_{22}}{(R_L \| R_{22}) + R_o} \qquad (۳۵-۳)$$

مطالب ذکر شده بار دیگر به صورت شکل ۳-۱۶ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۶ الف- تقویت کننده اصلی با اثر بار گذاری مقاومتها، ب- مدار معادل تقویت کننده

با جایگزینی مدار شکل ۳-۱۶ ب در مدار ۳-۱۵ به فرم حالت ایده‌آل (شکل ۳-۹) می رسیم. این مدار در شکل ۳-۱۷ نمایش داده شده است. بنابراین برای بدست آوردن مشخصات یک تقویت کننده فیدبک شده، اول باید شبکه تقویت کننده و شبکه فیدبک را تشخیص داده از هم تفکیک نمود تا مداری مانند شکل ۳-۱۲ بدست آید. سپس به کمک روابط (۳-۳۱) تا (۳-۳۵) پارامترهای تقویت کننده بدون اثر فیدبک ولی با توجه به اثر بار گذاری مقاومتهای شبکه فیدبک، بار و منبع را بدست می آوریم. به این ترتیب شکل ۳-۱۷ حاصل می شود. حال جهت روشن تر شدن مطالب به ذکر چند مثال می پردازیم.



شکل ۳-۱۷ نحوه‌ی تبدیل مشخصات یک تقویت کننده فیدبک شده واقعی به مدل ایده‌آل

مثال ۳-۲ مشخصات مدار شکل ۳-۱۲ را با فرض $R_s = 1k\Omega$، $R_i = 20k\Omega$، $R_b = 5k\Omega$، $R_a = 20k\Omega$، $R_o = 1k\Omega$، $R_L = 10k\Omega$ و $A_v = 100$؛ بدست آورید.

حل: با توجه به مطالب ذکر شده و استفاده از روابط (۳-۳۲) قاعده‌ای برای بدست آوردن A' و B بدست می آوریم، که از این پس از روی شکل - و بدون استفاده مستقیم از مطالب ذکر شده - پارامترهای لازم قابل استخراج باشند.

- برای بدست آوردن مقاومت در ورودی، شبکه فیدبک را از سمت خروجی اتصال کوتاه در نظر می گیریم، بنابراین:

$$\left.\begin{aligned} R_{11} &= R_a \| R_b \\ R_i' &= R_s + R_i + R_{11} \end{aligned}\right\} \Rightarrow R_i' = R_s + R_i + (R_a \| R_b) = (1 + 20 + (5 \| 20))k\Omega = 25k\Omega$$

- برای بدست آوردن مقاومت در خروجی، شبکه فیدبک را از سمت ورودی را اتصال باز در نظر می گیریم، بنابراین:

$$\left.\begin{aligned} R_{22} &= R_a + R_b \\ R_o' &= R_L \| R_{22} \| R_o \end{aligned}\right\} \Rightarrow R_o' = R_L \| (R_a + R_b) \| R_o = (10 \| 25 \| 1)k\Omega = 877\Omega$$

- در نتیجه بهره ولتاژ:

$$A_v' = \frac{R_i}{R_i'} \times A_v \times \frac{R_L \| R_{22}}{(R_L \| R_{22}) + R_o} = \frac{20k\Omega}{25k\Omega} \times 100 \times \frac{7.41k\Omega}{(7.41+1)k\Omega} = 70.174$$

- برای بدست آوردن نسبت فیدبک، شبکه فیدبک را از سمت ورودی اتصال باز در نظر می گیریم، بنابراین:

$$B = \frac{v_f}{v_o} = \frac{R_b}{R_b + R_a} = \frac{5k\Omega}{5k\Omega + 20k\Omega} = 0.2$$

بنابراین از آنجا:

$$K = 1 + A'B = 1 + 70.174 \times 0.2 \approx 15$$

$$A_{v_s} = A_{v_f} = A_v'/K = 70.174/15 \approx 4.678 \qquad (4.667)$$

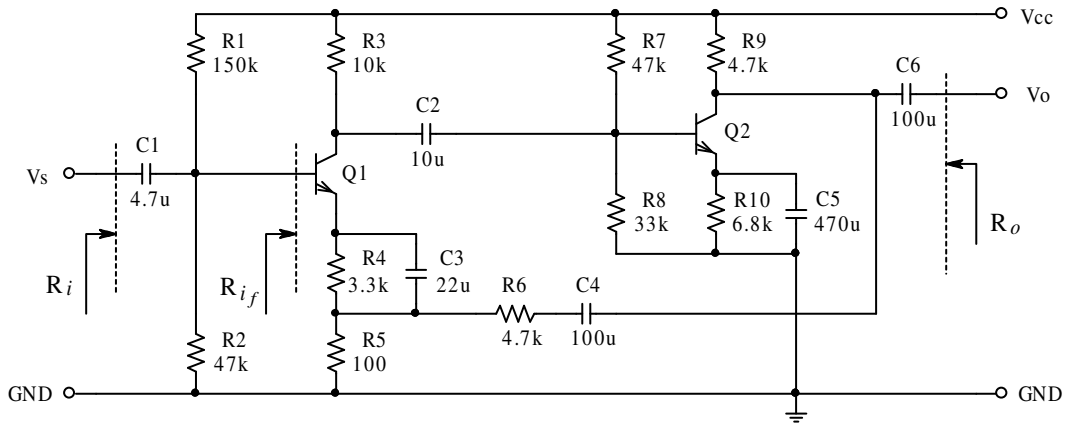
$$R_i = R_{i_f} = R_i' \times K \approx 25k\Omega \times 15 = 375k\Omega \qquad (375.9)$$

$$R_o = R_{o_f} = R_o'/K \approx 877\Omega/15 \approx 58.47\Omega \qquad (58.34)$$

تذکر: با وجود این که بنظر می رسد روش حل تقویت کننده فیدبک شده مفصل باشد (نحوه راه حل توضیح داده شده توسط شکل های ۳-۹ تا ۳-۱۷ و روابط مربوطه)، ولی نتیجه این راه حل روشی را بدست می دهد - که در صورت درک و احاطه به آن - نسبتاً سریع به جوابهای دقیق میرسیم. راه حل مسئله فوق که یک مسئله‌ی واقعی و نمونه است، فقط ۸ سطر بوده، خطای جوابها کمتر از ۰٫۲۵٪ است. جوابهای دقیق (شبیه سازی شده) در داخل پرانتز ذکر شده اند. مجموع خطاهای محاسباتی و ناشی از حذف اثر h_{21} برای مشخصات نهایی عبارتند از:

$$E_{rel}(R_o) \approx +0.22\% \qquad E_{rel}(R_i) \approx -0.24\% \qquad E_{rel}(A_{v_s}) \approx +0.24\%$$

مثال ۳-۳ مشخصات مدار شکل ۳-۱۸ را بدست آورید. $V_{CC} = 24V$، $\beta_1 = \beta_2 = 50$ و $r_{\pi 1} = r_{\pi 2} = 1.1k\Omega$ فرض شوند.

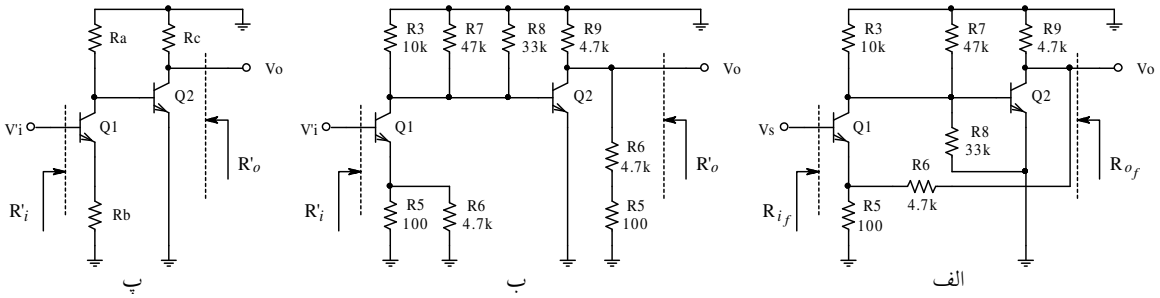


شکل ۳-۱۸ یک تقویت کننده فیدبک شده

حل: در این مسئله چون r_π ترانزیستورها داده شده است، نیاز به محاسبه نقطه کار نیست. این مدار یک تقویت کننده دو طبقه AC با فیدبک ولتاژ - سری است. تقویت کننده اصلی از دو ترانزیستور در مدار امیتر مشترک و مقاومت های مربوطه تشکیل شده است. خازن های $C1$، $C2$، $C6$ خازنهای کوپلاژ، خازنهای $C3$ و $C5$ خازنهای بای پس هستند. شبکه فیدبک از $C4$، $R6$ و $R5$ تشکیل شده است. $R1$ و $R2$ مقاومت های بایاس بوده، چون از دید سیگنال این مقاومتها با منبع موازی هستند، تاثیری بر روی مشخصات مدار نخواهند داشت. بنابراین مدار فوق را می توان برای سیگنالها، به صورت شکل ۳-۱۹ در نظر گرفت.

چون تمام خازنها در مدار اثر بالا گذری دارند، در فرکانس میانی برای سیگنال مانند اتصال کوتاه در نظر گرفته شده، مدار شکل ۳-۱۸ به صورت شکل ۳-۱۹ الف در می آید. برای بدست آوردن مشخصات تقویت کننده اصلی، یعنی: A'_v، R'_i و R'_o، طبق مطالب ذکر شده باید اثر فیدبک را از مدار حذف کرد. ولی با وجود این اثر بارگذاری مقاومتهای شبکه فیدبک باید در نظر گرفته شود. بنابراین

چون نوع فیدبک ولتاژ – سری است (ولتاژ خروجی (v_o در شکل ۳–۱۹ الف) توسط مقاومت $R6$ نمونه برداری شده و جزیی از آن توسط تقسیم ولتاژ $R5, R6$ (شبکه فیدبک) با سیگنال ورودی از طریق امیتر $Q1$ مقایسه می شود) برای دیدن اثر بارگذاری شبکه فیدبک در خروجی، ارتباط شبکه فیدبک را با ورودی قطع می کنیم (جریان ورودی صفر، مدار باز). بنابراین $R6$ و $R5$ از دید خروجی با هم سری شده اند. این مطلب در شکل ۳–۱۹ ب نمایش داده شده است. برای دیدن اثر بارگذاری شبکه فیدبک در ورودی، ارتباط شبکه فیدبک را با خروجی قطع می کنیم (ولتاژ خروجی صفر، مدار اتصال کوتاه). بنابراین $R6$ و $R5$ از دید ورودی با هم موازی شده اند. این مطلب نیز در شکل ۳–۱۹ ب نمایش داده شده است. دقت کنید که با این تغییر v_s تبدیل به v_i'، R_{i_f} تبدیل به R_i' و R_{o_f} تبدیل به R_o' و در نتیجه $A_{v_f} = \frac{v_o}{v_s}$ تبدیل به $A_v' = \frac{v_o}{v_i'}$ شده اند.



شکل ۳–۱۹ مراحل بدست آوردن مشخصات تقویت کننده اصلی: الف– مدار معادل AC تقویت کننده فیدبک شده، ب– حذف اثر فیدبک، با توجه به اثر بار گذاری مقاومتهای شبکه فیدبک بر روی تقویت کننده و پ– مدار ساده شده تقویت کننده اصلی

بالاخره برای ساده تر شدن مدار، در شکل ۳–۱۹ پ به جای مقاومتها، معادل آنها در نظر گرفته شده است، یعنی:

$$R_a = R3 \| R7 \| R8 = 10k\Omega \| 47k\Omega \| 33k\Omega \approx 6.6\text{k}\Omega$$

$$R_b = R5 \| R6 = 100\Omega \| 4.7k\Omega \approx 98\Omega \approx 100\Omega$$

$$R_c = R9 \| (R6 + R5) = 4.7k\Omega \| (4.7k\Omega + 100\Omega) \approx 2.375\text{k}\Omega \approx 2.4\text{k}\Omega$$

بنابراین از شکل ۳-۱۹ پ:

$$R_i' = r_{\pi 1} + (\beta_1 + 1)R_b \approx 1.1k\Omega + 51\times 100\Omega = 6.2k\Omega \qquad (6.094)$$

$$R_o' = R_c \approx 2.4k\Omega \qquad (2.375)$$

$$A_v' = A_1 \times A_2$$

$$A_1 = -\frac{R_a \| r_{\pi 2}}{(r_{e1} + R_b)} = -(\beta_1 + 1)\times \frac{R_a \| r_{\pi 2}}{R_i'} \approx -51\times \frac{6.6k\Omega \| 1.1k\Omega}{6.2k\Omega} \approx -7.76 \qquad (7.736)$$

$$A_2 = -g_{m2} R_c = -\frac{\beta_2}{r_{\pi 2}} \times R_c \approx -\frac{50}{1.1k\Omega} \times 2.4k\Omega \approx -109.1 \approx -110 \qquad (107.94)$$

$$A_v' = A_1 \times A_2 = 7.76\times 110 \approx 853.6 \approx 850 \qquad (835.02)$$

با توجه به مطالب ذکر شده نسبت فیدبک از شکل ۳-۱۹ الف بدست می آید:

$$B = \frac{v_f}{v_o} = \frac{R5}{R5 + R6} = \frac{1}{48}$$

در نتیجه:

$$K = 1 + A_v' B \approx 1 + \frac{850}{48} \approx 18.7$$

و از آنجا:

$$A_{v_f} = A_v' / K \approx \frac{850}{18.7} \approx 45.45$$

$$R_{i_f} = R_i \times K \approx 6.2k\Omega \times 18.7 \approx 116k\Omega$$

$$R_{o_f} = R_o' / K \approx 2.4k\Omega / 18.7 \approx 128\Omega \approx 130\Omega$$

در نتیجه مشخصات تقویت کننده مدار شکل ۳-۱۸ عبارت است از:

$$A_{v_s} = A_{v_f} \approx 45.4 \qquad (45.390)$$

$$R_o = R_{o_f} \approx 130\Omega \qquad (129.112)$$

$$R_i = R_{i_f} \| R1 \| R2 \approx 116k\Omega \| 150k\Omega \| 47k\Omega \approx 27.3k\Omega \qquad (27.127)$$

تذکر ۱: مقادیر داخل پرانتز مقادیر دقیق (شبیه سازی شده) را نمایش می دهد. چنان که ملاحظه میشود، با وجود خطاهای محاسبه دستی و در نظر نگرفتن اثر h_{21} در محاسبات، جوابهای بدست آمده از روش فیدبک، به جوابهای دقیق بسیار نزدیک هستند (خطاهای کمتر از ۱٪).

تذکر ۲: برای درک روش حل تقویت کننده های فیدبک شده، در حل این مسئله، مراحل به دست آوردن مشخصات مدار، قدم به قدم دنبال شده است. پس از تسلط به این روش (در حل تمرینات یا سئوالات امتحان) می توان مشخصات مدار را مستقیماً از روی شکل ۳–۱۸ استخراج نمود.