

فصل سوم - فیدبک

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) ارائه دهد، معمولاً بازده کلاس، آموزش محصلین (خروجی) کامل نخواهد بود. چه ممکن است مطالب ارائه شده، در سطح خیلی پایینتری از قوه درک مستمعین باشد و افراد چیز تازه ای یاد نگیرند و کلاس خسته کننده باشد یا بالعکس مطالب خیلی مشکل و غیر قابل جذب باشند.

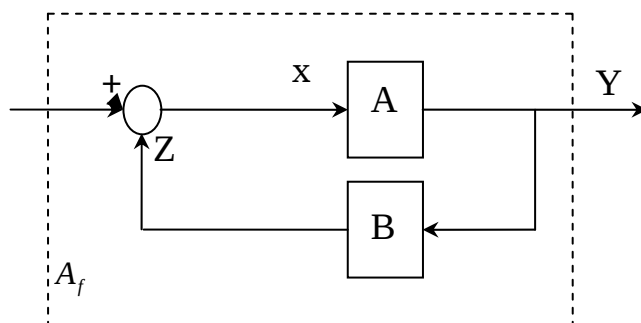
در صورتیکه اگر در سر کلاس، مدرس از شاگردان سؤال کند (نمونه برداری معلومات، خروجی سیستم) و پس از ارزیابی و تلفیق اشکالات کلاس و مطالب برنامه (منبع) موضوعات درس بصورت دیگری ارائه می شوند (سیگنال ورودی) و در این حالت اغلب راندمان خیلی بالاتر است. البته در سیستمهای ناپایدار (نامتجانس) عمل فیدبک می تواند 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 ارائه دهد، هر کس به فراخور حال خود کمابیش بهره ای از کلاس خواهد برد. در صورتیکه اگر معلم از 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 اینگونه شاگردان را بپرسد و بخواهد در برنامه خود دخالت دهد، بناگاه باید سطح و حجم مطالب را بالا برد و این تغییر حالت از یک موضوع به موضوع دیگر، باعث ناپایداری و نوسان شده، راندمان سیستم از حالت قبل نیز کمتر خواهد شد.

از این مثال نتیجه میگیریم با وجود اینکه خاصیت فیدبک دارای مزایای 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 عبارت دیگر غیر قابل استفاده خواهد شد. حال می پردازیم به بررسی کلی یک سیستم فیدبک دار.

۳-۱ بررسی سیستمهای با فیدبک

شکل (۱-۳) بلوک دیاگرام کلی یک سیستم را نشان می دهد. در این شکل S سیگنال منبع X سیگنال ورودی به سیستم بدون فیدبک، A تابع تبدیل (ضریب تبدیل) سیستم بدون فیدبک، Y سیگنال خروجی شبکه فیدبک کننده و Z مقدار فیدبک شده و A_f تابع تبدیل سیستم با فیدبک می باشد. طبیعتاً اگر حلقه فیدبک قطع شود: $Z=0$, $X=S$, $A_f=A$ خواهد شد. بنا به تعریف:



شکل (۱-۳)

$A = \frac{Y}{X}$	ضریب	(۱-۳)
		تبدیل بدون فیدبک
$A_f = \frac{Y}{S}$	ضریب	(۲-۳)
		تبدیل با فیدبک
$B = \frac{Z}{Y}$	نسبت	(۳-۳)
		فیدبک

حال بکمک تعاریف فوق و شکل (۱-۳) رابطه بین A و A_f را بدست می آوریم:

$$Y = A.X \quad \text{از (۱-۳):}$$

(۳-۳)

$$X = S + Z \quad \text{شکل}$$

از روی

(۴-۳)

$$Z = B.Y \quad \text{از (۳-۳)}$$

(۵-۳)

$$Y = A(S + B.Y)$$

$$Y = AS + ABY$$

$$Y = \frac{A.S}{1 - AB} \quad (۷-۳)$$

$$A_f = \frac{A}{1-AB} \quad (۸-۳)$$

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

۲-۳ - فیدبک منفی و مثبت

در صورتیکه در سیستمی $A \cdot B > 0$ باشد، فیدبک مثبت است و در صورتیکه $A \cdot B < 0$ باشد، فیدبک منفی خواهد بود. در حالتی که $A \cdot B = 0$ باشد، در مدار فیدبک نخواهیم داشت!

مطالب مربوط به فیدبک کلی است (در مورد سیستمهای مکانیکی، طبیعی، نیز صادق است) ولی برای اینکه مطالب گفته شده ملموس تر باشد، از این به بعد مثالها را درباره مدارهای الکتریکی می زنیم.

از رابطه (۸-۳) نتیجه می شود که در فیدبک مثبت $|A_f| > |A|$ و در فیدبک منفی $|A_f| < |A|$ می باشد. در فیدبک مثبت در صورتیکه $A \cdot B < 1$ باشد، مدار تقویت کننده به عنوان یک تقویت کننده خطی عمل می کند. در صورتیکه بازاء $A \cdot B \geq 1$ سیستم غیرخطی شده یا نوسان می کند. (نوسان سازها: آستابل، فلیپ فلاپ، اشیت تریگر،).

در این فصل خواص فیدبک را بررسی می کنیم:

۳-۳ - خواص فیدبک منفی

چنانکه از رابطه (۸-۳) برمیآید، 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

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

خواهد شد. این عیب فیدبک حسن های زیادی با خود به همراه می آورد که در ذیل، آنها را بررسی می کنیم. البته خود این عیب را نیز می توان با زیاد کردن A جبران کرد. مثلاً اگر $A = 1000$ شود، $A_f = 100$ خواهد شد و عیب برطرف شده است. البته واضح است که مدار مفصلتر خواهد شد. ($B \approx 0.009$)

حسن های فیدبک منفی

الف - پایداری ضریب تقویت مدار (با فیدبک) نسبت به تغییرات ضریب تقویت تقویت کننده (بدون فیدبک) زیاد خواهد شد. از رابطه (۸-۳):

$$\frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{(1-AB)^2} \quad (9-3)$$

یعنی مقدار A_f خیلی کم وابسته به مقدار A می باشد. (در صورتیکه $|AB| \gg 1$ باشد) به عبارت دیگر (۸-۳) در (۹-۳):

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1-AB} \cdot \frac{dA}{A} \quad (10-3)$$

یعنی تغییرات A_f خیلی کمتر از تغییرات A می باشد.

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

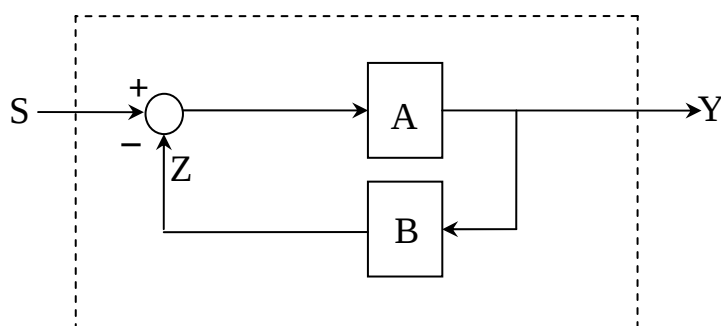
$$A_{f1} = \frac{A_1}{1-A_1B} = \frac{-100}{1-(-100) \times 0.2} = -4.762$$

$$A_{f2} = \frac{A_2}{1-A_2B} = \frac{-200}{1-(-200) \times 0.2} = -4.878$$

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

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

تذکر: در صورتیکه از قبل بدانیم فیدبک منفی است. برای اینکه دائما "علامت منفی را بدنبال خود نکشیم، قدر مطلق A , B را در نظر گرفته و در شکل (۱-۳) Z را از S کم می کنیم (شکل ۲-۳) برای تشخیص اینکه فیدبک مدار، منفی است یا مثبت، باید حلقه فیدبک را قطع کنیم و ببینیم سیگنال برگشتی با سیگنال اصلی همفاز است یا 180° اختلاف فاز دارد. برای این منظور می توان مثلا "از رسم فلش هایی استفاده کرد همجهت بودن یا نبودن سیگنال در حلقه فیدبک را بررسی کرد.



شکل (۳-)

مثلاً" در شکل (۳-۳) مدارهای (الف) و (ب) دارای فیدبک منفی و مدارهای (ج) و (د) دارای فیدبک مثبت می باشد. در صورتیکه فیدبک منفی باشد و به ازاء A و B قدمطلقیهای آنها را قرار دهیم رابطه (۳-۸) بصورت رابطه (۳-۱۱) در می آید:

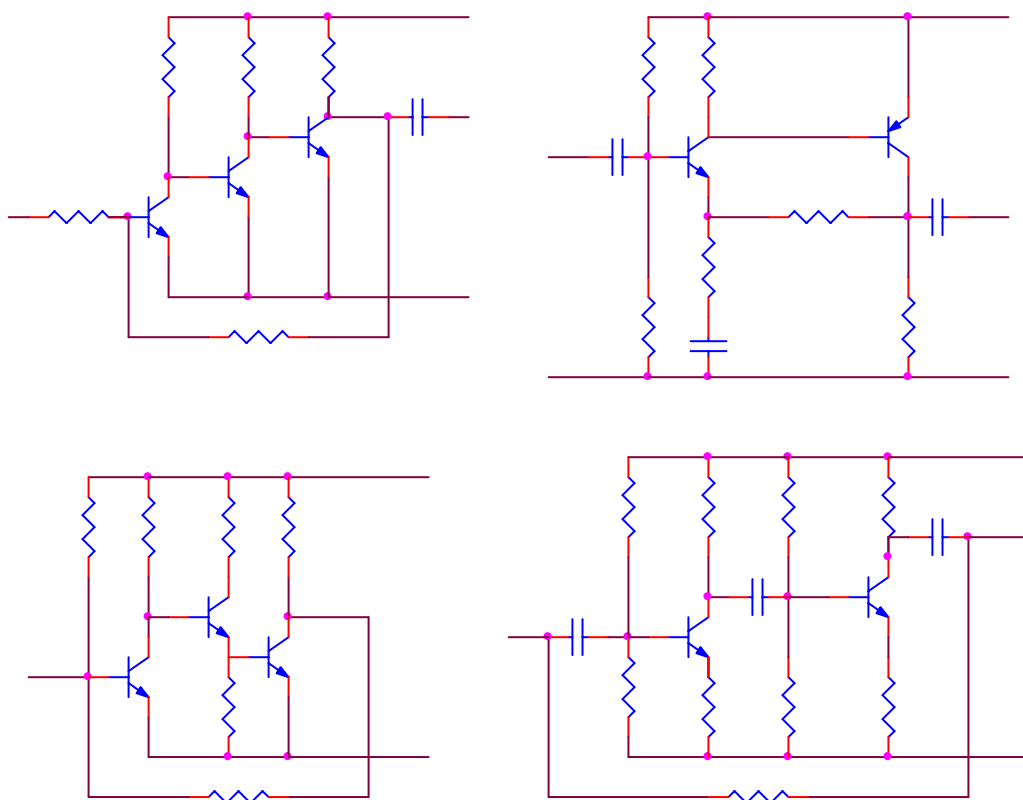
$$A_f = \frac{A}{1+AB} \quad (۳-۱۱)$$

در ضمن از رابطه (۳-۱۰) نتیجه می شودکه ضریب تقویت به اندازه $(1+AB)$ کم می شود. این ضریب را که در تغییر سایر مشخصات تقویت کننده فیدبک شده، تأثیری می نماید، ضریب فیدبک می نامیم.

$$K = 1 + AB \quad (۳-۱۲)$$

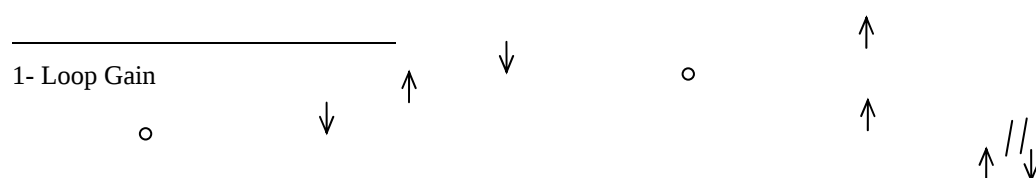
از طرف دیگر چون ضریب بهره در حلقه در حلقه فیدبک AB می باشد، به این مقدار، "بهره حلقه" گویند.

$$K' = A.B \quad (۳-۱۳)$$



(شکل ۳-۳)

در صورتیکه $K' \gg 1$ باشد، $K = K'$ شده :



$$A_f = \frac{A}{K} = \frac{A}{K'} = \frac{A}{AB} = \frac{1}{B} \quad (۱۴-۳)$$

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

ب- نویز و اعوجاج به نسبت ضریب فیدبک کم خواهد شد: هعوجاج در یک سیستم به علت غیر خطی بودن آن سیستم بوجود می آید. بنابراین مثلاً "اگر یک تقویت کننده کاملاً" خطی نباشد (ضریب تقویت 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 شود، که بسته به مقدار غیرخطی بودن، مؤلفه های هارمونیها نیز بیشتر خواهد شد. بنابر تعریف مقدار مؤثر مؤلفه های ناخواسته به موج اصلی را اعوجاج^۱ گویند.

$$d = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots A_n^2}}{A_1} \quad (۱۵-۳)$$

که در این رابطه A_1 دامنه موج اصلی خروجی و $A_2, \dots, A_n$ دامنه هارمونیهای آن خواهد بود. برای مثال اگر اعوجاج تقویت کننده ای % و ضریب تقویت ۱۰ باشد، در خروجی ممکن است بجای 10V ، 11V مؤثر داشته باشیم. در شکل (۳-۴) تقویت کننده ای با در نظرگرفتن اعوجاج بررسی می شود. در این شکل اعوجاج (v_d) بصورت یک ولتاژ اضافی نمایش داده شده است.

برای بررسی تأثیر فیدبک بر روی نویز کافی است بجای v_n, v_d به عنوان ولتاژ نویز در نظر گرفته شود. در صورتیکه مدار فیدبک نداشته باشد (حلقه فیدبک قطع باشد) :

$$v_o = Av_s + v_d \quad (۱۶-۳)$$

$$v_i = v_s - v_f$$

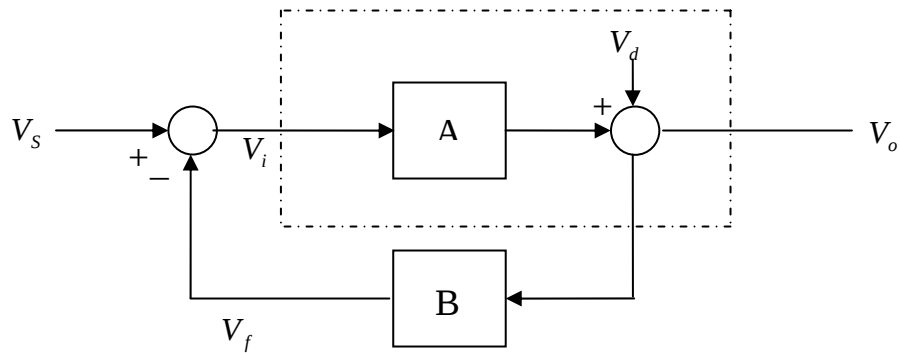
$$v_s = Bv_o$$

$$v_o = Av_i + v_d$$

$$v_o = \frac{Av_s + v_d}{1 + AB} = \frac{Av_s}{K} + \frac{v_d}{K} \quad \text{نتیجه :}$$

در
(۱۷-۳)

$$v_o = A_f v_s + \frac{v_d}{K} \quad \text{به عبارت دیگر:} \quad (۱۸-۳)$$



شکل (۳-۳)

برای مثال اگر یک تقویت کننده با ضریب تقویت 100 به ازاء دامنه خروجی 10 ولت 10% اعوجاج داشته باشد، $v_d = 1V$ خواهد شد. حال اگر این تقویت کننده را با مداری فیدبک کنیم که $B = 0.09$ شود: $K = 10$ بوده و $v_{d_f} = 0.1V$ به عبارت دیگر $d' = 1\%$ خواهد شد. واضح است که ضریب تقویت مدار 10 بوده، دامنه ورودی بجای 0.1V در مدار بدون فیدبک، باید 1V باشد که این عیب با یک طبقه دیگر برطرف می شود. توجه شود که اعوجاج در دامنه های زیاد، بیشتر است تا دامنه های کم. این مطلب در شکل (۳-۵) توضیح داده شده است. خط پر رابطه واقعی v_o از v_i و خط چین حالت ایده ال را نمایش می دهد.

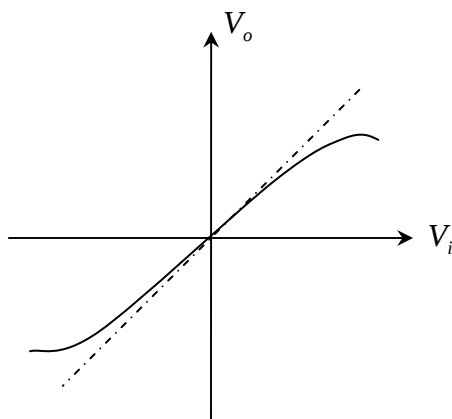
ج - پهنای باند تقویت زیاد می شود: (۳-۱۹)

$$f_{ef} = \frac{f_e}{K}$$

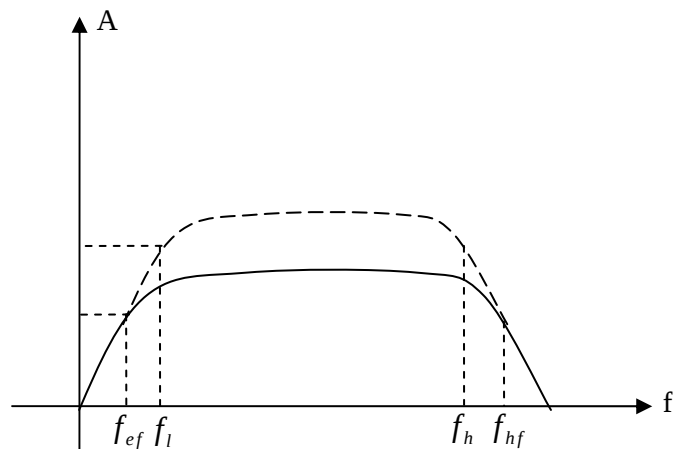
$$f_{hf} = f_h \cdot K$$

(۳-۲۰)

مطالب فوق در شکل (۳-۵) نمایش داده شده است.



شکل (۳-۳)



شکل (۳-۶)

ج - پهنای باند تقویت زیاد می شود:

$$f_{ef} = \frac{f_l}{K}$$

(۳-۱۹)

$$f_{hf} = f_h \cdot K$$

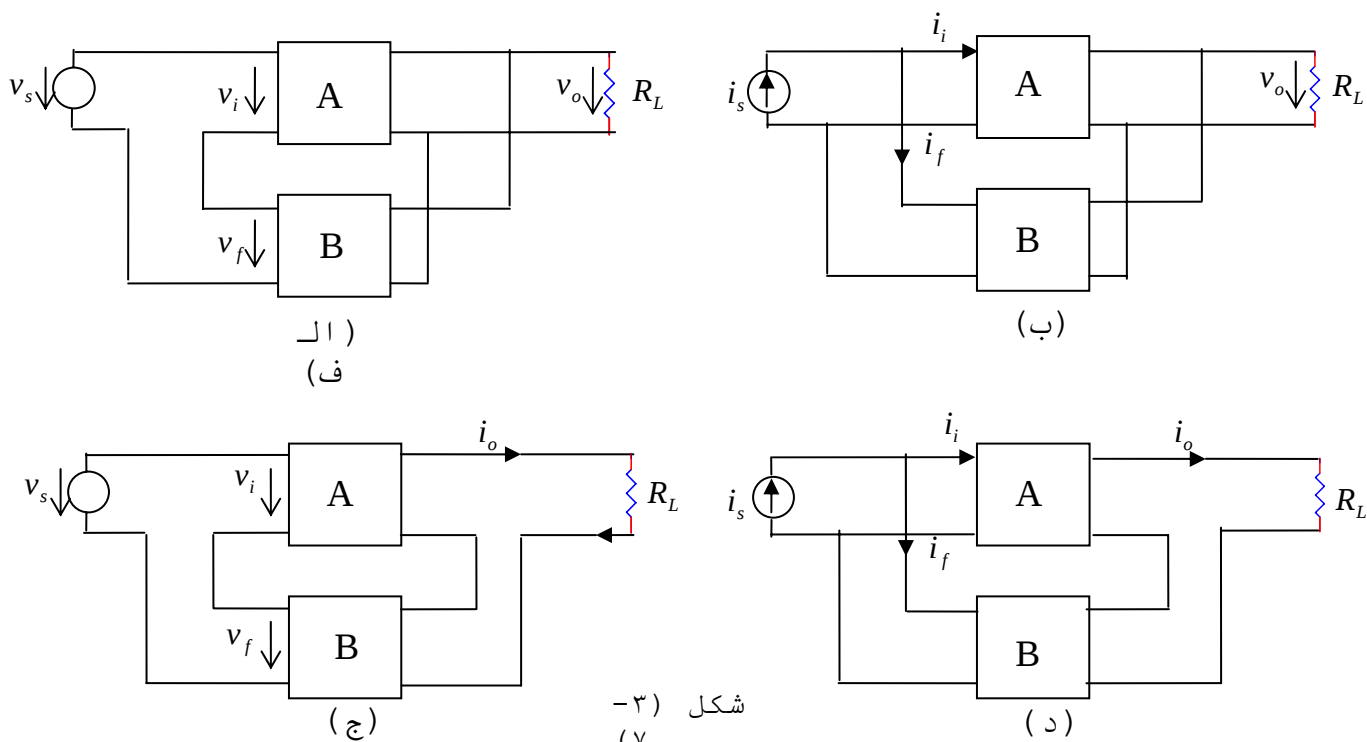
(۳-۲۰)

اثبات این مطلب نیز مانند حالت قبل است. با این تفاوت که برای بررسی باید برای مقادیر A, B مقادیر مختلط در نظر گرفته شود.

د - تغییر مقاومت ورودی و خروجی :
 بسته به چگونگی فیدبک (که بعداً" بطور مفصل درباره آن بحث خواهد شد) مقاومت ورودی و خروجی به نسبت K کم یا زیاد خواهد شد.

۳-۴- انواع فیدبک منفی

بسته به اینکه سیگنال نمونه برداری خروجی، در یک مدار فیدبک دار، ولتاژ باشد یا جریان دو نوع فیدبک بوجود می آید. و بسته به اینکه 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 نوع فیدبک منفی خواهیم داشت:



- الف - فیدبک ولتاژ - سری یا فیدبک گره - حلقه^۱
 ب - فیدبک ولتاژ - موازی یا فیدبک گره - گره^۲
 ج - فیدبک جریان - سری یا فیدبک حلقه - حلقه^۳
 د - فیدبک جریان - موازی یا فیدبک حلقه - گره^۴

1- Voltage – Series	Feedback (Node – Loop)
2- Voltage – Parallel	Feedback (Node – Node)
3- Current – Series	Feedback (Loop – Loop)
4- Current – Parallel	Feedback (Loop – Node)

البته در کتابهای مختلف، اسامی دیگری نیز متداول می باشد که مفهوم همه یکی است. شکل (۷-۳) این چهار نوع امکان را نمایش می دهد. چنانکه از شکلها مشاهده می شود، در فیدبک:

ولتاژ سری: سیگنالهای خروجی، فیدبک، ورودی و منبع باید ماهیت ولتاژ داشته باشند. به عبارت دیگر:

$$Z = v_f, \quad Y = v_o, \quad X = v_i, \quad S = v_s$$

در نتیجه مدار معادل منبع سیگنال باید مدار معادل تونن (منبع ولتاژ) باشد. در این حالت چون $A = \frac{v_o}{v_i}$ نسبت دو ولتاژ را

دارد، به آن ضریب تقویت ولتاژ، به عبارت دیگر A_v نیز 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 می گردد.

ولتاژ موازی: سیگنال خروجی، ولتاژ و سیگنالهای فیدبک شده، ورودی و منبع جریان می باشند. یعنی:

$$Z = i_f, \quad Y = v_o, \quad S = i_s, \quad X = i_i$$

در نتیجه منبع سیگنال باید یک منبع جریان (مدار معادل نورتن) در نظر گرفته شود. در این حالت چون $A = \frac{Y}{X} = \frac{v_o}{i_i}$ نسبت یک

ولتاژ به جریان به عبارت دیگر ماهیت یک مقاومت را دارد، به آن مقاومت انتقالی^۱ نیز گویند. $A = R_m$

$B = \frac{i_f}{v_o}$ ماهیت هدایت را داشته، واحد آن mA/V خواهد بود. این

نوع فیدبک باعث کم شدن مقاومت خروجی و ورودی می گردد.

جریان سری: در این نوع فیدبک $Y = i_o$, $Z = v_f$, $X = v_i$, $S = v_s$ بوده، مدار معادل منبع ولتاژ، مدار تونن $A = \frac{i_o}{v_i} = G_m$ دارای کمیت هدایت بوده، به آن تقویت کننده هدایت انتقالی^۱ گویند. $B = \frac{i_o}{i_i}$ دارای کمیت مقاومت می باشد. این فیدبک باعث ازدیاد مقاومت ورودی و خروجی می شود.

جریان موازی: در این فیدبک تمام سیگنالها جریان بوده، مدار معادل منبع، مدار نورتن می باشد. $A = \frac{i_o}{i_i} = A_I$

$B = \frac{i_f}{i_o}$ بدون واحد می باشد. این فیدبک باعث زیاد شدن مقاومت ورودی می گردد. جدول (۱) مطالب ذکر شده را بطور خلاصه نمایش می دهد.

محاسبه مدارهای فیدبک شده

برای محاسبه مشخصات مدارهای فیدبک شده، به ترتیب مراحل زیر را اعمال می کنیم:

- ۱- تقویت کننده اصلی و مدار فیدبک کننده را تشخیص می دهیم.
- ۲- نوع فیدبک را مشخص می کنیم.
- ۳- نوع تقویت کننده را مشخص و ضریب تقویت (ضریب تبدیل) آنرا

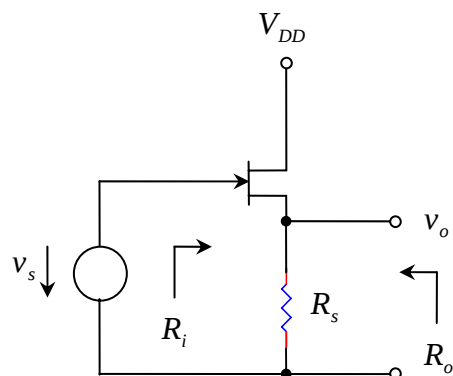
نوع فیدبک مشخصات	ولتاژ سری	ولتاژ موازی	جریان سری	جریان موازی
A تقویت کننده	A_v ولتاژ	R_m مقاومت انتقالی	G_m هدایت انتقالی	A_I جریان
B نسبت فیدبک	$\frac{v_f}{v_o}$	$\frac{i_f}{v_o}$	$\frac{v_f}{v_o}$	$\frac{i_f}{i_o}$
Y سیگنال خروجی	ولتاژ	ولتاژ	جریان	جریان
Z.X.Y	ولتاژ	جریان	ولتاژ	جریان
R_i مقاومت ورودی	زیاد	کم	زیاد	کم
R_o مقاومت خروجی	کم	کم	زیاد	زیاد

- محاسبه می کنیم
- ۴- نسبت فیدبک را محاسبه می کنیم.

- ۵- ضریب فیدبک را بدست می آوریم.
- ۶- مشخصات تقویت کننده بدون فیدبک را، بسته به نوع فیدبک (طبق جدول (۱)) در ضریب فیدبک ضرب یا به آن تقسیم می کنیم.
- ۷- تأثیر مقاومتهای خارجی را اضافه می کنیم.
- مطالب گفته شده را با چند مثال روشن می کنیم. توجه شود که برای محاسبه مشخصات تقویت کننده اثر بارگذاری مقاومتهای شبکه فیدبک باید در نظر گرفته شود ولی خاصیت فیدبک در نظر گرفته نمی شود.

مثال ۲-۳ : مطلوب است محاسبه مدار درین مشترک شکل زیر

حل: ۱- تقویت کننده اصلی FET و مدار فیدبک کننده R_s است. (شکل



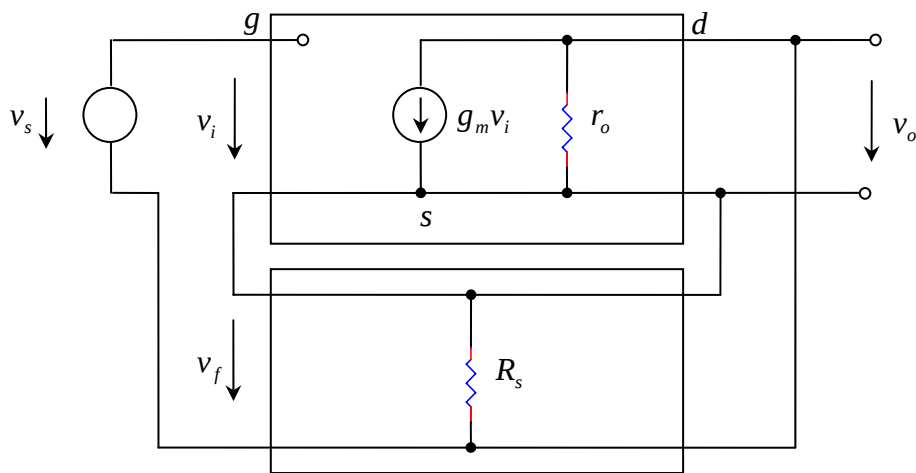
شکل (۸-۳ الف)

- ۲- از شکل (۸-۳ ب) نوع فیدبک ولتاژ سری است.
- ۳- نوع تقویت کننده، تقویت کننده ولتاژ است.
- بنابراین A_v باید محاسبه شود
- برای محاسبه A_v باید ضریب تقویت با در نظر گرفتن اثر بارگذاری شبکه فیدبک R_s در ورودی و خروجی در نظر گرفته شود. بدون آنکه خاصیت فیدبک کنندگی آن تأثیر داده شود. این ضریب تقویت را A_{v_o} ضریب تقویت حلقه باز گویند. (شکل ۸-۳ ج)

در حالت بدون فیدبک $v_s = v_{gs}$ در نتیجه :

$$A = A_{v_o} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{g_m v_{gs} (r_o \parallel R_s)}{v_s} = g_m (r_o \parallel R_s)$$

- ۴- از شکل (۷-۳ ب)
- $$B = \frac{v_f}{v_s} = 1$$



شکل (۳-۸ ب)

$$K = 1 + A \cdot B = 1 + g_m (r_o \parallel R_s)$$

-۵

$$A_{v_f} = \frac{A_{v_o}}{K} = \frac{g_m (r_o \parallel R_s)}{1 + g_m (r_o \parallel R_s)}$$

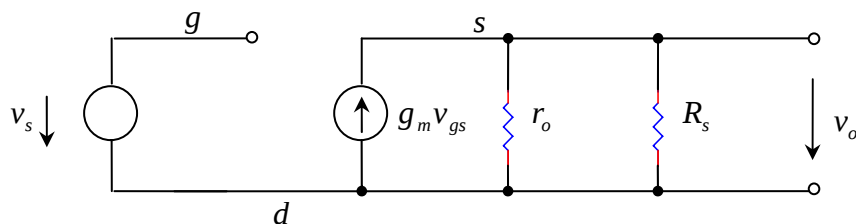
-۶

$$R_i' = r_{gs} \rightarrow \infty$$

$$R_{i_f} = K \cdot r_{gs} \rightarrow \infty$$

$$R_o' = r_o \parallel R_s$$

$$R_o = R_{o_f} = \frac{r_o \parallel R_s}{1 + g_m (r_o \parallel R_s)}$$



شکل (۳-۸ ب)

$$R_i = R_{i_f} \rightarrow \infty$$

۷- مدار فاقد مقاومتهای خارجی است. در نتیجه:

$$R_o = R_{o_f} = \frac{r_o \parallel R_s}{1 + g_m (r_o \parallel R_s)}$$

توجه: اگر $r_o \gg R_s$ باشد:

$$A_{v_f} = \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s}$$

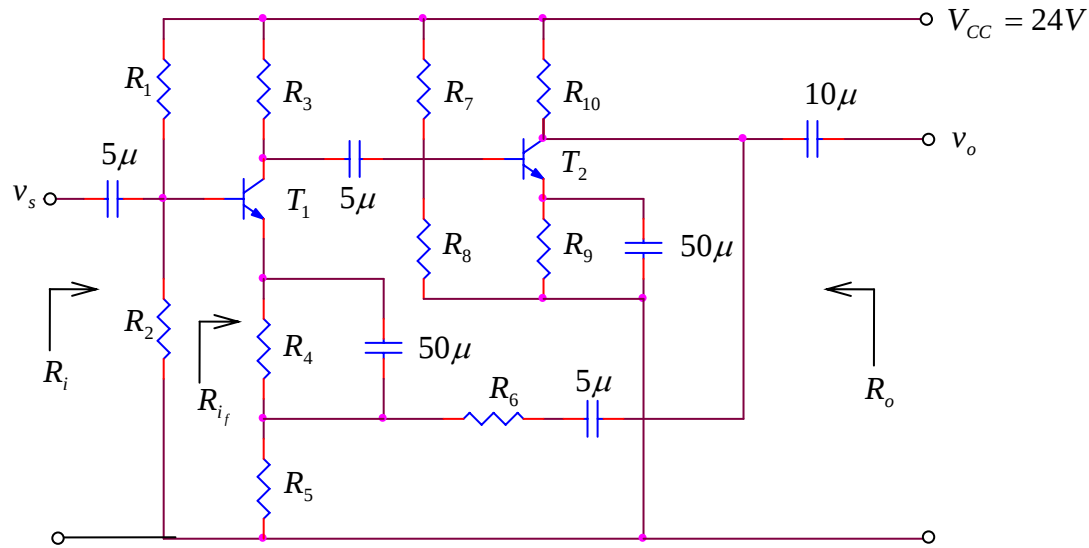
$$A_{v_f} = A_v = \frac{R_s}{1/g_m + R_s} = \frac{R_s}{r_s + R_s}$$

$$R_o = \frac{R_s}{1 + g_m R_s} = \frac{R_s \times 1/g_m}{1/g_m + R_s} = R_s \parallel \frac{1}{g_m} = R_s \parallel r_s$$

مثال ۳-۳: در مدار شکل (۹-۳) مطلوبست محاسبه $R_o, R_i, A_v = \frac{v_o}{v_s}$

مقاومتها: $R_1 = 150k$, $R_2 = R_7 = 47k$, $R_3 = 10k$, $R_5 = 100\Omega$, $R_8 = 33k$
 $R_6 = R_{10} = 4.7k$, $R_4 = 3.3k$, $R_9 = 6.8k$

مشخصات ترانزیستورها:
 $r_\pi = 1.1k$, $\beta = 50$



(شکل ۹-۳)

حل: ۱- تقویت کننده از دو ترانزیستور امیتر مشترک و المانهای مربوطه و مدار فیدبک کننده R_5, R_6 تشکیل شده است.

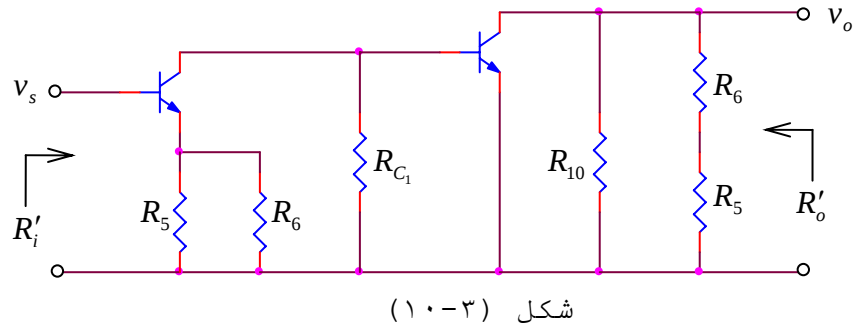
۲- چون R_6 مستقیماً به خروجی وصل شده است، ولتاژ بار را نمونه برداری می کند و تقسیم این ولتاژ توسط R_5, R_6 به امیتر T_1 وصل می شود. (سری با منبع ولتاژ) پس فیدبک ولتاژ سری است.

۳- تقویت کننده، تقویت کننده ولتاژ است. برای محاسبه مقدار آن حلقه فیدبک را باز می کنیم بدین معنی که در ورودی R_5 موازی R_6 در امیتر T_1 قرار دارند و در خروجی R_5 سری R_6 در کلکتور T_2 قرار گرفته اند

با معلوم بودن r_π نیازی به محاسبه نقطه کار نداریم. در شکل (۹-۳) مدار معادل AC تقویت کننده با در نظر گرفتن اثر بارگذاری مقاوت های فیدبک و بدون در نظر گرفتن اثر فیدبک طبق توضیح داده شده در بالا، نمایش داده

شده است. خازنها در فرکانس میانی اتصال کوتاه در نظر گرفته می شوند. R_1 و R_2 چون موازی منبع (ولتاژ)

سیگنال قرار گرفته اند، در خواص تقویت کننده تأثیری نمی کنند. بنابراین در محاسبه، مشخصات آن در نظر گرفته نمی شوند.



برای سادگی محاسبات:

$$r_{e_1} = r_{e_2} = r_{\pi} / \beta = 1.1k / 50 = 22\Omega$$

$$R_{E_1} = R_5 \parallel R_6 = 100\Omega \parallel 4.7k = 98\Omega$$

$$R_{C_1} = R_3 \parallel R_7 \parallel R_8 = 10k \parallel 47k \parallel 33k = 6.6k$$

$$R_{C_2} = R_{10} \parallel (R_5 + R_6) = 4.7k \parallel (100\Omega + 4.7k) = 2.37k$$

$$A_{v_o} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{R_{C_1}}{R_{E_1} + r_{e_1}} \cdot \frac{r_{\pi_2}}{r_{\pi_2} + R_{C_1}} \cdot \frac{R_{C_2}}{r_{e_2}}$$

$$A_{v_o} = \frac{6.6k}{98\Omega + 22\Omega} \times \frac{1.1k}{1.1k + 6.6k} \times \frac{2.37k}{22\Omega} = 846$$

$$R'_i = (\beta_1 + 1)(r_{e_1} + R_{E_1}) \approx r_{\pi} + \beta R_{E_1} = 1.1k + 50 \times 98\Omega = 6k$$

$$R'_o = R_{C_2} = 2.37k$$

$$R_{o_f} = \frac{R'_o}{K} = \frac{2.37k}{18.6} = 127.5\Omega$$

$$B = \frac{v_f}{v_o} = \frac{R_s}{R_s + R_6} = \frac{100\Omega}{100\Omega + 4.7k} = \frac{1}{48} \quad -۴$$

$$K = 1 + AB = 1 + A_{v_o} \cdot B = 1 + 846 \times 1/48 = 18.6 \quad -۵$$

$$A_{v_f} = \frac{A_{v_o}}{K} = \frac{846}{18.6} = 45.5 \quad -۶$$

$$R_{i_f} = R'_i \cdot K = 6k \times 18.6 = 111.6k$$

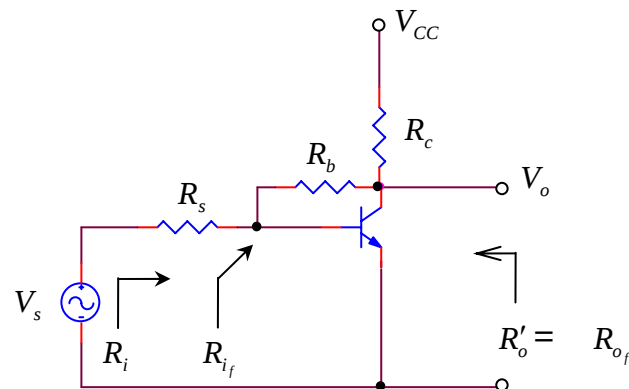
$$R_{o_f} = \frac{R'_o}{K} = \frac{2.37k}{18.6} = 127.5\Omega$$

$$R_i = R_{i_f} \parallel R_1 \parallel R_2 = 112k \parallel 150k \parallel 47k = 27.12k$$

$$R_o = R_{o_f} = 127.5\Omega$$

$$A_{V_s} = \frac{v_o}{v_s} = A_{v_f} = 45.5$$

مثال ۳-۴: مطلوبست محاسبه مشخصات مدار شکل (۱۱-۳).



شکل (۱۱-۳)

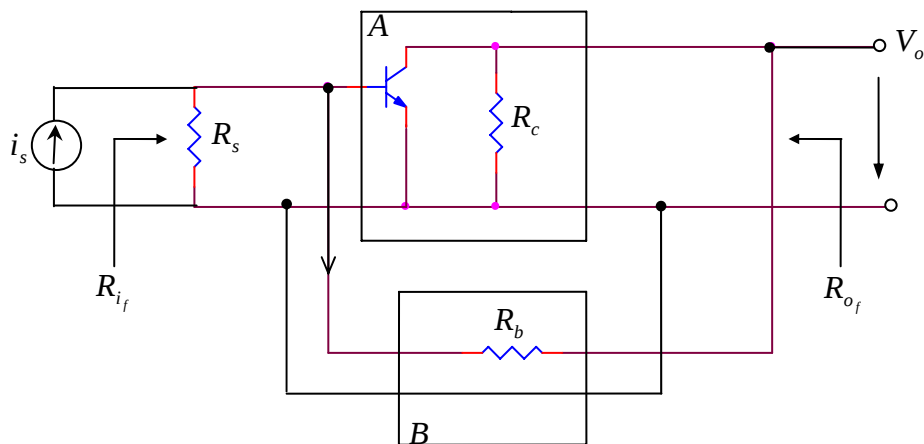
در این شکل مدار AC نمایش داده شده است. فرض کنید مدار طوری بایاس شده باشد که: $r_\pi = 1.1k$ باشد، $\beta = 90$ ، $R_s = 10k$ ، $R_b = 39k$ ، $R_c = 3.9k$ انتخاب شوند.

حل:

۱- تقویت کننده از ترانزیستور و مقاومتها تشکیل شده، مدار فیدبک R_b است.

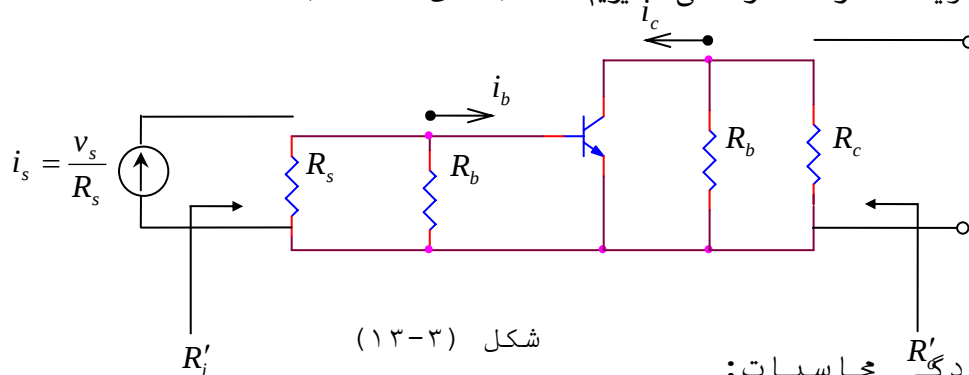
۲- مقاومت فیدبک بصورت موازی در خروجی و در ورودی قرار گرفته، پس نوع فیدبک ولتاژ موازی می باشد. این مطلب در شکل (۱۲-۳) بوضوح نمایش داده شده است.

۳- تقویت کننده از نوع مقاومت متقابل است. $A = \frac{v_o'}{i_s} = R_m$



شکل (۱۲-۳)

به همین دلیل مدار معادل نورتن منبع سیگنال را در نظر گرفته ایم. برای محاسبه R_m حلقه فبک را باز کرده، اثر آنرا بر روی ضریب تقویت در نظر می گیریم. (شکل ۱۳-۳)



شکل (۱۳-۳)

برای سادگی محاسبات:

$$R = R_s \parallel R_b = 10k \parallel 39k = 7.96k$$

$$R_L = R_b \parallel R_c = 39k \parallel 3.9k$$

$$R_m = \frac{v'_o}{i_s}$$

$$v'_o = -i_c R_L$$

$$i_b = i_s \frac{R}{R + r_\pi}$$

$$v_o = -\beta i_b R_L = -\beta R_L \cdot \frac{R}{R + r_\pi} \cdot i_s$$

$$R_m = \frac{v'_o}{i_s} = -\frac{\beta R_L \cdot R}{R + r_\pi} = -\frac{50 \times 3.55 \times 7.96}{7.96 + 1.1} k\Omega = -156k\Omega$$

$$R'_i = R \parallel r_\pi = 7.96k \parallel 1.1k = 966\Omega$$

$$R'_o = R_L = 3.55k$$

$$B = \frac{i_f}{v_o} = -\frac{1}{R_b} = -\frac{1}{39k}$$

$$K = 1 + AB = 1 + R_m B = 1 + \frac{156k}{39k} = 5 \quad -۴$$

$$R_{m_f} = \frac{R_m}{K} = \frac{-156k}{5} = -31.2k \quad -۵$$

$$A_{v_f} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{R_s I_s} = \frac{R_{m_f}}{R_s} = \frac{-31.2k}{10k} = -3.12 \quad -۶$$

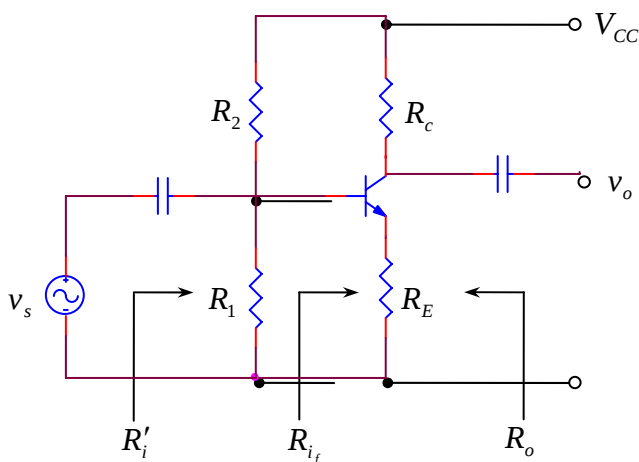
$$R_{i_f} = \frac{R'_i}{K} = \frac{966\Omega}{5} = 193.2\Omega$$

$$R_{o_f} = \frac{R'_o}{K} = \frac{3.55k}{5} = 710\Omega$$

$$R_i = R_{i_f} + R_s = 193.2\Omega + 10k = 10.2k$$

$$R_o = R_{o_f} = 710\Omega$$

مثال ۳-۵ : مشخصات تقویت کننده امیتر مشترک را با مقاومت امیتر

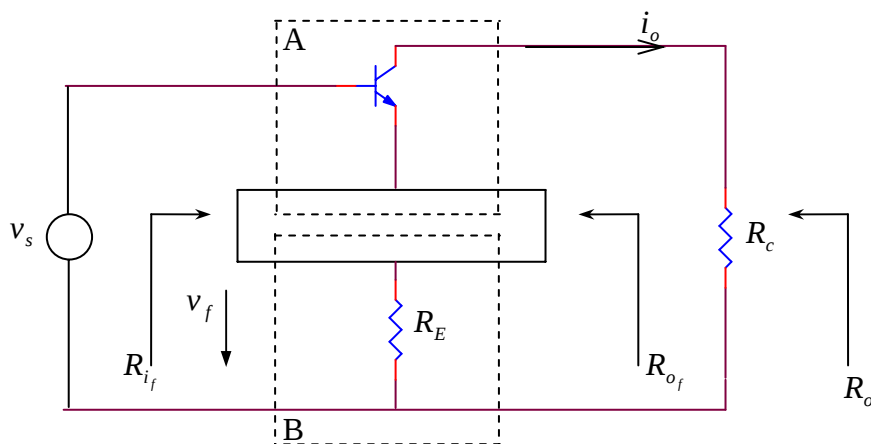


بررسی کنید. (شکل ۳-۱۴)

شکل (۳-۱۴)

حل: فقط برای بایاسینگ مدار و موازی منبع سیگنال بوده، در نتیجه برای AC توسط منبع سیگنال اتصال کوتاه شده اند. برای بررسی دقیق تر مقاومت داخلی ترانزیستور r_o را در نظر می گیریم.

شکل (۳-۱۵) تجزیه مدار را به شبکه تقویت کننده و شبکه فیدبک کننده نمایش می دهد.



شکل (۱۵-۳)

چنانکه از شکل بر می آید نوع فیدبک، جریان سری بوده R_E مقاومت فیدبک می باشد.

برای محاسبه $A = \frac{i_o}{v_s} = G_m$ مدار معادل ترانزیستور را با در نظر گرفتن مقاومت‌های بالا و فیدبک، بدون در نظر گرفتن اثر فیدبک رسم می کنیم. شکل (۱۵-۳). از روی شکل و رابطه تقسیم جریان:

$$i_o = i_c \frac{r_o}{r_o + R_c + R_E}$$

$$v_s = i_b (r_\pi + R_E)$$

$$G_m = \frac{-\beta i_b r_o / (r_o + R_c + R_E)}{i_b (r_\pi + R_E)} = - \frac{\beta r_o}{(r_o + R_c + R_E)(r_\pi + R_E)} \quad : (۲۱-۳)$$

$$B = \frac{v_f}{i_o} = -R_E$$

برای محاسبه از شکل (۳-۳) : (۱۴)

: (۲۲-۳)

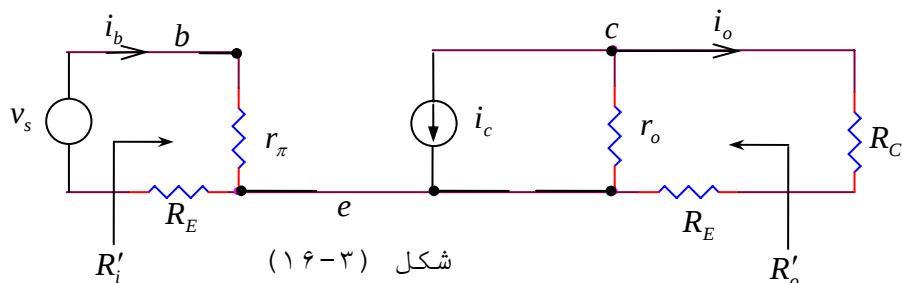
$$K = 1 + G_m B = 1 + \frac{\beta \cdot r_o \cdot R_E}{(r_o + R_c + R_E)(r_\pi + R_E)} \quad : (۲۳-۳)$$

$$G_{m_f} = \frac{G_m}{K} \quad , \quad R_{i_f} = K R'_i \quad , \quad R_{o_f} = K R'_o$$

از شکل (۱۵-۳) :

$$R'_i = R_E + r_\pi$$

$$R'_o = R_E + r_o$$



توجه: همانطور که می دانیم مهمترین کمیت در حل مسائل فیدبک، ضریب فیدبک می باشد. رابطه (۳-۲۳) این ضریب را برای حالت کلی ارائه می دهد. برای حالت خاص که اکثراً" نیز در عمل پیش می آید:

$$r_o \gg R_c + R_E \quad K = 1 + \frac{\beta R_E}{\left(1 + \frac{R_c + R_E}{r_o}\right)(r_\pi + R_E)}$$

بعبارت (۳-۲۳ الف) دیگر:

$$K \approx 1 + \frac{\beta R_E}{r_\pi + R_E}$$

و در صورتیکه $\frac{R_E}{\beta} \ll r_e$ باشد:

$$K \approx 1 + \frac{R_E}{r_e}$$

(۳-۲۳ ب)

اگر $\frac{R_E}{\beta} \gg r_e$ باشد:

$$K \approx \beta$$

(۳-۲۳ ج)

برای محاسبه A_{v_f} :

$$A_{v_f} = \frac{-\beta r_o R_c / (r_o + R_c + R_E)(r_\pi + R_E)}{1 + (\beta r_o R_E) / (r_o + R_c + R_E)(r_\pi + R_E)}$$

از (۳-۲۱) و (۳-۲۲):

بعبارت (۳-۲۴) دیگر:

$$A_{v_f} = \frac{-\beta \cdot r_o \cdot R_c}{(r_o + R_c + R_E)(r_\pi + R_E) + \beta r_o R_E}$$

و با توجه به اینکه در مدارهای واقعی $r_o \gg R_c \gg R_E$:

$$A_{v_f} = \frac{-\beta R_c}{\left(1 + \frac{R_c + R_E}{r_o}\right)(r_\pi + R_E) + \beta R_E}$$

(۳-۲۴ الف):

$$A_{v_f} \approx \frac{-\beta R_c}{r_\pi + (1 + \beta) R_E}$$

و از آنجائیکه برای ترانزیستورهای معمولی: $\beta \gg 1$ بعبارت دیگر $\beta \approx \beta + 1$

(۳-۲۴ ب):

$$A_{v_f} = \frac{-R_c}{\frac{r_\pi}{\beta} + \frac{1 + \beta}{\beta} R_E} \approx -\frac{R_c}{r_e + R_E}$$

برای مثال طبق کاتالوگ برای ترانزیستورهای مشابه BC107 به ازاء $r_\pi = 2.7k$, $\beta = 220$, $I_c = 2mA$ و $r_o = 50k$ می باشد. از آنجائیکه برای این ترانزیستور $V_{CE_{max}} = 45V$ است، پس همیشه باید:

$$R_c + R_E < \frac{45V}{2mA} = 22k$$

که در اکثر موارد عادی به ازاء این جریان نقطه کار: $R_c \leq 10k$ و $R_E \leq 1k$ خواهد بود.

حال با این مفروضات مقادیر دقیق و تقریبی را محاسبه می کنیم:

$$K = 1 + \frac{220 \times 50k \times 1k}{(50k + 10k + 1k)(2.7k + 1k)} = 49.74 \approx 50 \quad \text{از (۲۲-۳):}$$

$$A_{v_f} = \frac{-220 \times 50k \times 10k}{(50k + 10k + 1k)(2.7k + 1k) + 220 \times 50k \times 1k} = -9.8 \quad \text{از (۲۴-۳):}$$

$$R'_i = 1k + 2.7k = 3.7k$$

$$R'_o = 1k + 50k = 51k$$

$$R_{i_f} = 50 \times 3.7k = 185k$$

$$R_{o_f} = 50 \times 51 = 2550k$$

$$R_i = R_{i_f} \parallel R_1 \parallel R_2 = 9.49k$$

$$R_o = R_{o_f} \parallel R_c = 9.954k$$

مقادیر تقریبی:

$$R_i \approx R_1 \parallel R_2 = 10k, \quad R_o \approx R_c = 10k$$

$$A_v \approx \frac{R_c}{R_E} = 10$$

$$A_v = \frac{R_c}{R_E + r_e} = \frac{10k}{1k + \frac{2.7k}{220}} \approx 9.88$$

یا حتی:

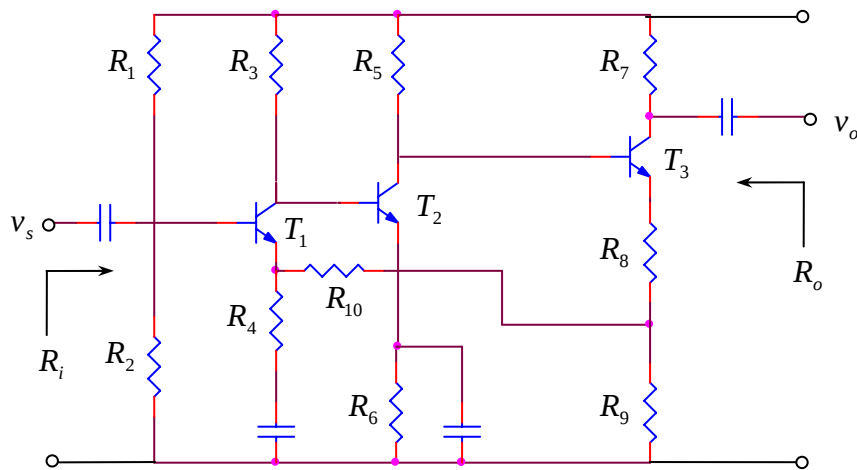
$$R_o = 10k$$

$$R_i \approx R_1 \parallel R_2 \parallel \beta R_E = 10k \parallel 220k = 9.56k$$

بنابراین مشاهده می شود دقت مقادیر تقریبی خیلی بیشتر از دقت المانهای بکاربرده می باشند. (خطا کمتر از 0.5% برای R_o و کمتر از 2% برای A_v !)

مثال ۳-۶ : مطلوبست محاسبه R_o , R_i با $A_v = \frac{v_o}{v_s}$ فرض

$$\beta_2 = \beta_3 = 200, \beta_1 = 100$$



شکل (۳-۱۷)

$$V_{BE_1} = V_{BE_2} = V_{BE_3} = 0.6V, \quad R_1 = 560k, \quad R_2 = 100k, \quad R_3 = 180k, \quad R_4 = R_9 = 1k, \quad R_5 = 27k, \\ R_6 = R_{10} = 10k, \quad R_7 = 4.7k, \quad R_8 = 3.9k$$

حل: در این مثال می خواهیم بایاسینگ مدارهای فیدبک دار را نیز بررسی کنیم. در حالت کلی چون تمام جریانها و ولتاژها بهم وابسته هستند، برای پیدا کردن مقادیر جریانها از روش کلاسیک احتیاج به تشکیل یک سیستم چند معادله، چند مجهول است که کاری بسیار طولانی و پر اشتباه خواهد بود.

راه حلی را در چنین مواقع با دقت خوب و نسبتاً سریع به جواب میرسد. روش سعی و خطا است.^۱ بدین معنی که با توجه به فیزیکی بودن مسئله با استفاده از اصولی که به احتمال زیاد طراح مسئله در نظر گرفته است، یک مقدار اولیه ای تخمین می زنیم و جوابی بر این اساس بدست می آوریم که این جواب، در صورتی که طرح مسئله و مفروضات ما صحیح پایه گذاری شده باشند، به مقدار واقعی نسبت به تخمین اولیه نزدیکتر است. اگر بار دیگر مقدار بدست آمده را بکار بریم، جواب دوم به مقدار واقعی نزدیکتر خواهد بود، الی آخر.

معمولاً با یک یا دوبار بکاربردن این روش مقداری خیلی نزدیک به مقدار واقعی بدست خواهد آمد. در مورد این مسئله، اولین فرض اصولی این است که $I_{B_1} \ll I_{R_1}$ باشد. در این صورت:

$$V_{B_1} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx 3.6V$$

$$V_{E_1} = V_{B_1} - V_{BE} = 3V$$

حلقه فیدبک DC توسط R_{10} بسته می شود و دومین فرض اصولی این است که افت ولتاژ دو سر این مقاومت کم باشد. حتی برای مثال فرض می کنیم:

$$V_{R_{10}} = 0V \rightarrow V_{R_9} = V_{E_1} = 3V$$

$$I_{C_3} \approx I_{R_3} = \frac{V_{R_9}}{R_9} = \frac{3V}{1k} = 3mA$$

با این فرض، پس:

$$V_{B_3} = V_{BE_3} + I_{C_3}(R_8 + R_9) = 0.6V + 3mA(3.9k + 1k) = 15.3V$$

$$I_{C_2} \approx I_{R_5} = \frac{V_{CC} - V_{B_3}}{R_5} = \frac{24V - 15.3V}{27k} = 322\mu A$$

$$V_{E_2} \approx I_{C_2} \cdot R_6 = 322\mu A \times 10k = 3.22V$$

$$V_{B_2} = V_{E_2} + V_{BE} = 3.22V + 0.6V = 3.82V$$

$$I_{C_1} \approx I_{R_3} = \frac{V_{R_3}}{R_3} = \frac{V_{CC} - V_{B_2}}{R_3} = \frac{(24 - 3.82)V}{180k} = 112\mu A$$

$$I_{B_1} = \frac{I_{C_1}}{\beta} = \frac{112\mu A}{100} = 1.1\mu A$$

$$I_{R_1} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} = \frac{24V}{560k + 100k} = 36.4\mu A \gg I_{B_1}$$

پس فرض اولی درست بود!

$$V_{R_{10}} = I_{C_1} \cdot R_{10} = 112\mu A \times 10k = 1.12V$$

پس فرض دوم زیاد صحیح نبود و باید آنرا اصلاح کرد. یعنی:

$$V_{R_9} = V_{E_1} - V_{R_{10}} = 3V - 1.12V = 1.88V$$

$$I_{R_9} = \frac{V_{R_9}}{R_9} = \frac{1.88V}{1k} = 1.88mA$$

$$I_{C_3} \approx I_{R_9} = 1.88mA$$

و اگر با این فرض جدید، مسئله را یکبار دیگر حل کنیم به $I_{C_3} = 1.88mA$ که جواب واقعی است خواهیم رسید (با فرض $I_{C_3} = 1.88mA$ نیز خطا فقط حدود 5% و قابل اغماض خواهد بود!)

$$V_{E_3} = 2mA(1 + 3.9)k = 9.8V \quad : I_{C_3} = 2mA \text{ با در نظر گرفتن}$$

$$V_{B_3} = 10.4V, \quad I_{C_2} = 0.5mA, \quad V_{E_2} = 5V$$

$$V_{B_2} = 5.6V, \quad I_{C_1} = 100\mu A, \quad I_{B_1} = 1\mu A$$

و از آنجا:

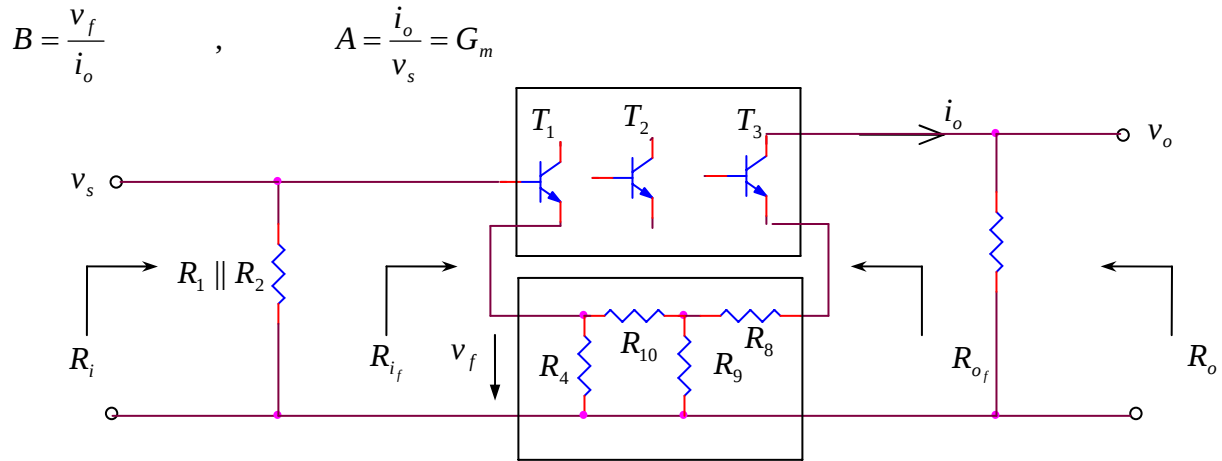
$$r_{e_3} = 13\Omega, \quad r_{\pi_3} = 2.5k$$

$$r_{e_2} = 50\Omega, \quad r_{\pi_2} = 10k$$

$$r_{e_1} = 250\Omega, \quad r_{\pi_1} = 25k$$

بدست می آید. برای بررسی مشخصات AC مدار مطابق شکل (۳-۱۸) مدل فیدبک را بررسی می کنیم:

همانطور که مشاهده می شود، شبکه فیدبک شامل مقاومتهای R_{10}, R_9, R_8, R_4 می باشد. نوع فیدبک نیز جریان - سری است. پس:



شکل (۳-۱۸)

با علم بر اینکه فیدبک منفی است، برای سادگی محاسبات قدر مطلق مقادیر را در نظر می گیریم:

داریم:

$$v_f = i_{R_4} \cdot R_4$$

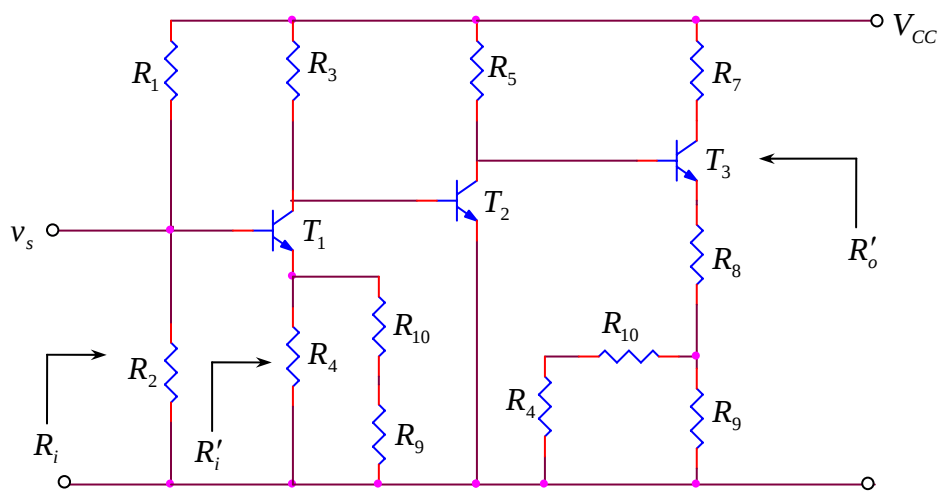
و از رابطه تقسیم جریان:

$$i_{R_4} = i_o \frac{R_9}{(R_{10} + R_4)} + R_9$$

پس:

$$B = \frac{v_f}{i_o} = \frac{R_4 \cdot R_9}{R_4 + R_9 + R_{10}} = \frac{1k \times 1k}{1k + 1k + 10k} = \frac{1}{12} k\Omega$$

برای محاسبه G_m مدار تقویت کننده را بدون در نظر گرفتن اثر فیدبک ولی اثر بارگذاری مقاومتهای آن از شکل (۳-۱۶) بدست می آوریم. (شکل ۳-۱۹)



شکل (۳-۱۹)

$$R = R_4 \parallel (R_9 + R_{10}) = 1k \parallel (1k + 10k) \approx 9.7\Omega$$

$$R' = R_8 + (R_9 \parallel (R_4 + R_{10})) = 3.9k + (1k \parallel (1k + 10k)) \approx 4.8k$$

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

$$i_o = i_{c_3} = \beta_3 i_{b_3} = 200 i_{b_3}$$

$$i_{b_3} = i_{c_2} \frac{R_5}{R_5 + \beta_3(R' + r_{e_3})} = \frac{27k}{27k + 200 \times 4.8k} i_{c_2} = \frac{9}{329} i_{c_2}$$

$$i_{c_2} = \beta_2 i_{b_2} = 200 i_{b_2}$$

$$i_{b_2} = i_{c_1} \frac{R_3}{R_3 + r_{\pi_2}} = \frac{180k}{180k + 10k} i_{c_1} = \frac{18}{19} i_{c_1}$$

$$i_{c_1} = \beta_1 i_{b_1} = 100 i_{b_1} \quad i_{b_1} = \frac{v_s}{R'_i}$$

$$R'_i = r_{\pi_1} + \beta_1 R = 25k + 100 \times 917\Omega = 116.7k$$

از روابط فوق:

$$G_m = 200 \times \frac{9}{329} \times 200 \times \frac{18}{19} \times 100 \times \frac{1}{116.7k} \approx 890 \text{ mA/V}$$

$$K = 1 + G_m B = 1 + 890 \text{ mA/V} \times \frac{1}{12} k\Omega \approx 75$$

$$G_{m_f} = \frac{G_m}{K} = \frac{890 \text{ mA/V}}{75} \approx 11.87 \text{ mA/V}$$

$$A_{v_f} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{i_o R_7}{v_s} = G_{m_f} R_7 = 11.87 \text{ mA/V} \times 4.7k \approx 55.8$$

$$R'_i = 116.7k \rightarrow R_{i_f} = 116.7k \times 75 \approx 8.75 M\Omega$$

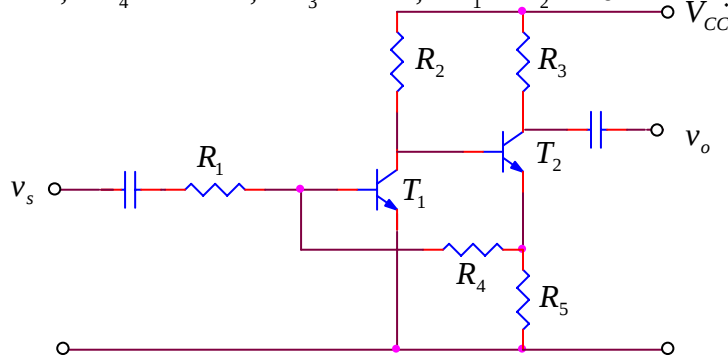
$$R_i = R_{i_f} \parallel R_1 \parallel R_2 = 100k \parallel 560k \parallel 8.75M \approx 84k$$

$$R'_o = r_o + R' \rightarrow \infty, \quad R_{o_f} = K R_o \rightarrow \infty$$

$$R_o = R_7 \parallel R_{o_f} = R_7 = 4.7k$$

مثال ۷-۳ : مطلوبست محاسبه مشخصات مدار شکل (۳-۱۹). با فرض: $\beta = 200$, $V_{CC} = 12V$, $V_{BE} = 0.6V$

ترانزیستورها مشابه، $R_5 = 220\Omega$, $R_4 = 47k$, $R_3 = 1k$, $R_1 = R_2 = 10k$



شکل (۳-۲۰)

حل: برای پیدا کردن جریان کلکتورها چون شبکه نسبتاً ساده است، می‌خواهیم از راه حل دقیق استفاده کنیم. در ضمن برای مقایسه راه‌های تقریبی سعی و خطا را نیز ارائه می‌دهیم.

الف - برای پیدا کردن I_{C_1} و I_{C_2} دو رابطه اصلی زیر را در نظر می گیریم:

$$\begin{cases} V_{R_2} + V_{BE_2} + V_{E_2} = V_{CC} \\ V_{E_2} = V_{BE_1} + V_{R_4} \end{cases}$$

با جانشین کردن:

$$V_{R_2} = R_2 (I_{C_1} + I_{B_2})$$

$$V_{E_2} = R_5 (I_{E_2} - I_{B_1})$$

$$V_{R_4} = I_{B_1} \cdot R_4$$

$$I_{E_2} = (\beta_2 + 1) I_{B_2}$$

$$I_{C_1} = \beta_1 I_{B_1}$$

دو معادله زیر بدست می آید:

$$\begin{cases} (\beta_2 R_2 - R_5) I_{B_1} + [R_2 + (\beta_2 + 1) R_5] I_{B_2} = V_{CC} - V_{BE_2} \\ -(R_4 + R_5) I_{B_1} + (\beta_2 + 1) R_5 I_{B_2} = V_{BE_1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} (200 \times 10k - 0.22k) I_{B_1} + (10k + 201 \times 0.22k) I_{B_2} = (12 - 0.6)V \\ -(47k + 0.22k) I_{B_1} + 201 \times 0.22k \times I_{B_2} = 0.6V \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{B_1} = 5.182 \mu A \rightarrow I_{C_1} = 1.0364 mA \\ I_{B_2} = 19.1 \mu A \rightarrow I_{C_2} = 3.82 mA \end{cases}$$

ب: با در نظر گرفتن اینکه در عمل $I_{B_1} \ll I_{C_1}$ و $I_{B_2} \ll I_{C_2}$ و $I_E \approx I_C$:

$$\begin{cases} I_{C_1} R_2 + V_{BE_2} + I_{C_2} R_5 = V_{CC} \\ I_{C_2} R_5 = I_{B_1} \cdot R_4 + V_{BE_1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 10 I_{C_1} + 0.22 I_{C_2} = 11.4 \\ 0.22 I_{C_2} + 47 / 200 I_{C_1} + 0.6 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_{C_1} = 1.0764 mA \\ I_{C_2} = 3.875 mA \end{cases}$$

ج: در روش سعی و خطا با فرض اولیه $V_{R_4} \approx 0$:

$$\begin{cases} I_{C_1} = \frac{V_{CC} - V_{BE_1} - V_{BE_2} - V_{R_4}}{R_2} = \frac{12 - 0.6 - 0.6 - 0}{10} = 0.08 mA \\ I_{C_2} = \frac{V_{BE_1} - V_{R_4}}{R_5} = \frac{0.6 - 0}{0.22} mA = 2.73 mA \end{cases}$$

با اصلاح V_{R_4} :

$$V_{R_4} = \frac{I_{C_1}}{\beta_1} \cdot R_4 = \frac{1.08 mA}{200} \times 47k = 0.2538 V$$

$$\begin{cases} I_{C_1} = \frac{12 - 0.6 - 0.6 - 0.2538}{10} mA = 1.055 mA \\ I_{C_2} = \frac{0.6 - 0.2538}{0.22} mA = 3.88 mA \end{cases}$$

$$V_{R_4} = \frac{1.055 \text{ mA}}{200} \times 47 \text{ k} = 0.248 \text{ V}$$

$$\begin{cases} I_{C_1} = \frac{12 - 0.6 - 0.6 - 0.248}{10} \text{ mA} = 1.055 \text{ mA} \\ I_{C_2} = \frac{0.6 + 0.248}{0.22} \text{ mA} = 3.85 \text{ mA} \end{cases}$$

چنانکه ملاحظه می شود در مرحله اول I_{C_1} نسبتاً دقیق بدست می آید و I_{C_2} در مرحله دوم جواب نسبتاً دقیق می دهد و عملاً محاسبه مرحله سوم الزامی نبود! مقایسه مقادیر تقریبی با مقدار واقعی:
حالات تقریبی:

$$\frac{\Delta I_{C_1}}{I_{C_1}} = \frac{1.0746 - 1.0364}{1.0764} \approx 3.8\%$$

$$\frac{\Delta I_{C_2}}{I_{C_2}} = \frac{3.875 - 3.82}{3.82} = 1.44\%$$

روش سعی و خطا :
مرحله اول:

$$\frac{\Delta I_{C_1}}{I_{C_1}} = \frac{1.08 - 1.0364}{1.0364} = 4.2\%$$

$$\frac{\Delta I_{C_2}}{I_{C_2}} = \frac{2.73 - 3.82}{3.82} = -28.5\%$$

$$\frac{\Delta I_{C_1}}{I_{C_1}} = \frac{1.055 - 1.0364}{1.0364} = 1.8\%$$

مرحله دوم:

$$\frac{\Delta I_{C_2}}{I_{C_2}} = \frac{3.88 - 3.82}{3.82} = 1.57\%$$

$$\frac{\Delta I_{C_1}}{I_{C_1}} = \frac{1.055 - 1.0364}{1.0364} = 1.8\%$$

مرحله سوم:

$$\frac{\Delta I_{C_2}}{I_{C_2}} = \frac{3.85 - 3.82}{3.82} = 0.78\%$$

توجه شود که در عمل احتیاجی به چنین محاسباتی نمی باشد. هدف از این مثال فقط یک اثبات عینی بود که در صورت لزوم بخصوص برای مدارهای مفصلتر، روش سعی و خطا، بخصوص برای تخمین زدن، یک روش ساده و مناسبی می باشد. توجه کنید که اهمیت I_{C_1} در این مدار از I_{C_2} بیشتر است. زیرا T_1 فیدبک جزئی ندارد و ضریب تقویت آن به r_{e_1} به عبارت دیگر به I_{C_1} بستگی دارد. در صورتیکه T_2 دارای فیدبک جزئی (R_s) بوده ضریب تقویت به $R_s + r_{e_2}$ بستگی دارد که چون $R_s \gg r_{e_2}$ است عملاً به r_{e_2} به عبارت دیگر I_{C_2} وابسته نیست. با تمام این تفصیلات:

$$I_{C_1} = 1mA \rightarrow r_{e_1} = 25\Omega, \quad r_{\pi_1} = 5k\Omega$$

$$I_{C_2} = 4mA \rightarrow r_{e_2} = 7\Omega, \quad r_{\pi_2} = 1.4k\Omega$$

در نظر گرفته می شوند. نوع فیدبک جریان موازی است.

$$B = \frac{i_f}{i_o} = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \quad \text{برای محاسبه B : (رابطه تقسیم جریان)}$$

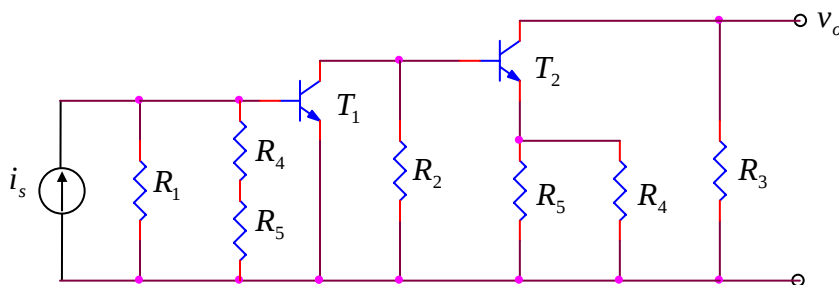
$$B = \frac{0.22}{47 + 0.22} = 4.66 \times 10^{-3}$$

برای محاسبه A از شکل (۳-۲۱) کمک می گیریم:

$$A = \frac{i_o}{i_s} = \frac{i_{c_2}}{i_s} = \frac{i_{c_2}}{i_{b_2}} \cdot \frac{i_{b_2}}{i_{c_1}} \cdot \frac{i_{c_1}}{i_{b_1}} \cdot \frac{i_{b_1}}{i_s}$$

$$\frac{i_{c_2}}{i_{b_2}} = \beta_2 = 200$$

$$R_a = R_1 \parallel (R_4 + R_5) = 10k \parallel (47k + 220\Omega) \approx 8.25k\Omega$$



شکل (۳-۲۱)

$$R_b = R_4 \parallel R_5 = 220\Omega \parallel 47k \approx 220\Omega$$

$$\frac{i_{b_2}}{i_{c_1}} = \frac{R_2}{R_2 + (r_{\pi_2} + \beta_2 R_b)} = \frac{10k}{10k + 1.4k + 200 \times 0.22k} \approx 0.18k$$

$$\frac{i_{b_1}}{i_s} = \frac{R_a}{R_a + r_{\pi_1}} = \frac{8.25k}{8.25k + 5k} \approx 0.62$$

$$A = A_I = 200 \times 0.18 \times 200 \times 0.62 \approx 4500$$

$$K = 1 + A_I B = 1 + 4500 \times 4.66 \times 10^{-3} \approx 22$$

$$R'_i = R_a \parallel r_{\pi_1} = 8.25k \parallel 5k \approx 3.1k$$

$$R'_o = r_o + R_b + R_3 \rightarrow \infty$$

$$A_{I_f} = \frac{A_I}{K} = \frac{4500}{22} = 204.5$$

$$R_{i_f} = \frac{R'_i}{K} = \frac{3.1k}{22} = 141\Omega$$

$$R_{o_f} = R'_o \cdot K \rightarrow \infty$$

$$A_{v_s} = A_{v_f} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{i_o R_c}{i_s R_s} = A_{i_f} \frac{R_3}{R_5} = 204.5 \frac{1k}{10k} \approx 20.5$$

$$R_{i_f} = R_s \parallel R''_i \quad , \quad R''_i = \frac{R_s \cdot R_{i_f}}{R_s - R_{i_f}} = \frac{10k \times 0.141k}{10k - 0.141k} = 143\Omega$$

$$R_i = R_s + R''_i = 10k + 143\Omega \approx 10k$$

$$R_o = R_{o_f} \parallel R_c = \infty \parallel 1k = 1k$$