منابع تغذیهٔ تثبیت شده :

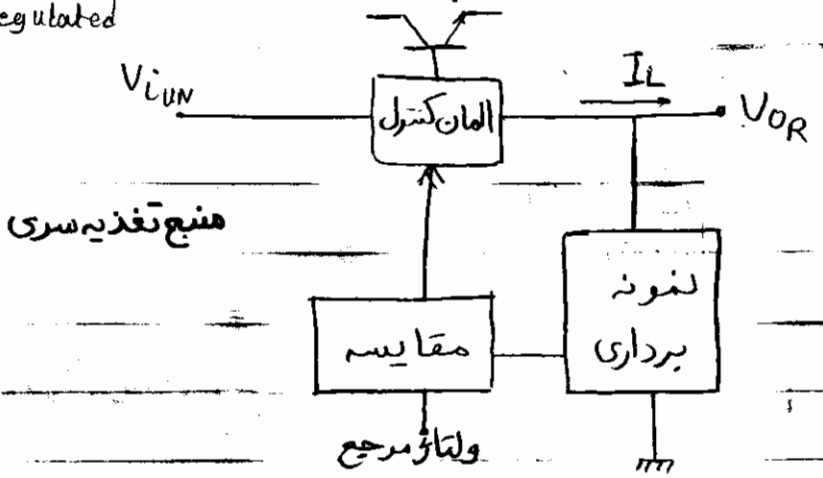
منابع تغذیه ← خطی
← غیرخطی (سوئیچینگ)

منبع تغذیه خطی :

وقتی می گوییم یک Op-Amp خطی کار می کند منظور این است که المان های داخلی آن در ناحیهٔ خطی کار می کنند و المان های بیرونی Op-Amp نیز المان های در ناحیهٔ خطی هستند.

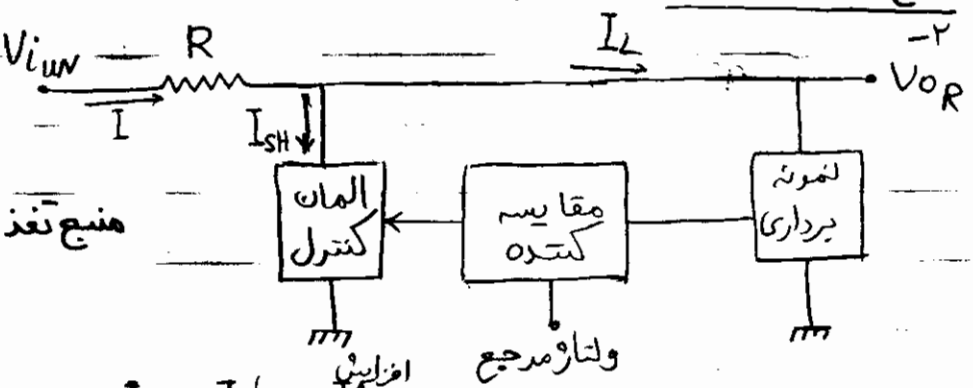
در منبع تغذیه غیرخطی المان های غیرخطی داریم (مانند دیود)

UN = Unregulated
R = Regulated



۱- بسته به اینکه المان کنترل در شاخه سری باشد منبع تغذیه سری و اگر در شاخهٔ موازی باشد منبع تغذیه موازی خواهد بود.

۲-



$I_L = I_{SH} + I$ (I: افزایش، I_{SH}: کاهش)

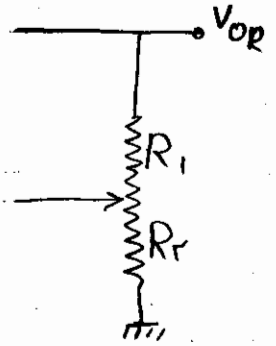
تذکر: معمولاً جریان شاخهٔ نمونه‌برداری قابل مقایسه با جریان خروجی نیست.

یک رگولاتور سری خوب باید ۱- مصرف آن کم باشد و ۲- تفاوت ولتاژ ورودی و خروجی آن زیاد نباشد. در رگولاتور سری:

$$\text{تلفات ترانزیستور} = V_{CE} \cdot I_C = (V_i - V_o)\, I_L$$

در رگولاتور سری تلاش بر این است که ولتاژ نمونه‌برداری برابر ولتاژ مرجع شود.

المان نمونه‌برداری یک پتانسیومتر است که با تنظیم آن ولتاژ نمونه‌برداری با ولتاژ مرجع برابر می‌شود.



$$\frac{R_2}{R_1+R_2} V_o = V_R \longrightarrow V_o = \left(1+\frac{R_1}{R_2}\right) \underbrace{V_R}_{\text{مرجع}}$$

معمولاً استفاده از رگولاتور سری وقتی مناسب است که Range ولتاژ دریافتی کم باشد چون مثلاً در Range ۰ تا ۳۰ ولت که زیاد است چون V_i حدود ۳۰ است اگر V_o کم بگیریم و جریان زیاد بکشیم تلفات ترانزیستور زیاد بوده و گرم می‌شود.

اگر بخواهیم جریان بالا داشته باشیم از رگولاتور موازی استفاده می‌کنیم:

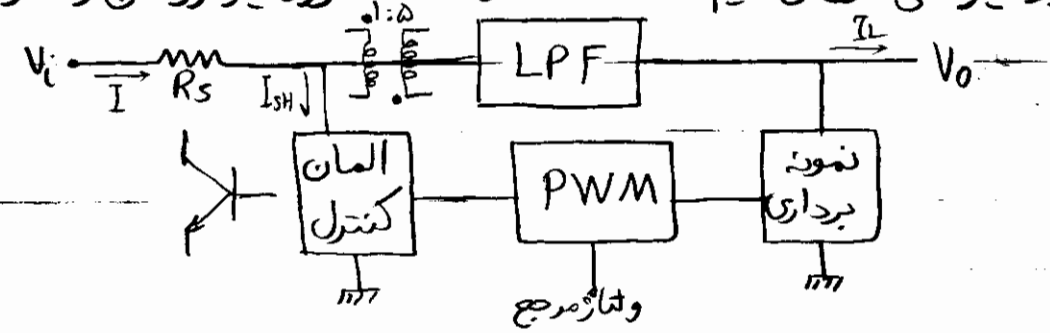
به عنوان مثال اگر $I_L=100$ و $I=105$ باشد با تغییرات I_L ، دامنه تغییرات I_{SH} حدود 1^{A} است و درنتیجه جریان کمی از المان کنترل عبور کرده و تلفات کمی داریم، در صورتیکه اگر از رگولاتور سری استفاده می کردیم تمام 105^{A} از المان کنترل می گذشت.

البته در رگولاتور موازی هم تلفات در خروجی خواهیم داشت یعنی در هر دو نوع رگولاتور تلفات کلی برابر است، امّا مهم این است که تلفات المان کنترل کم باشد.

درنتیجه کاربرد رگولاتور موازی مواقعی است که جریان خروجی بالایی می خواهیم، امّا دامنه تغییرات جریان خروجی کم است.

رگولاتور غیرخطی :

در رگولاتور خطی راندمان از رابطهٔ $\eta=\frac{P_o}{P_i}=\frac{P_i-P_d}{P_i}$ بدست می آید که بست به انتخاب i می توان η را ماکزیمم کرده، امّا درنهایت در این رگولاتور راندمان بالایی نمی توانیم بگیریم چون تمام المان های مدار همواره روشن هستند. در رگولاتور غیرخطی کاری می کنیم که المان ها در لحظات موردنیاز روشن و خاموش شوند.



LPF = Low Pass Filter.

در این رگولاتور المان کنترل به صورت on و off کار می‌کند که فرمان روشن و خاموش شدن آن توسط PWM صادر می‌شود. با انتخاب مناسب المان‌های مدار می‌توان تا ۹۰٪ راندمان گرفت. المان PWM با توجه به دامنه ولتاژ نمونه برداری مقدار Duration جریان عبوری از المان کنترل را تعیین می‌کند. غیر از مزایای بالا بودن راندمان از مزیت‌های مهم رگولاتور غیرخطی این است که می‌توان خروجی منفی گرفت. در رگولاتور خطی اگر می خواستیم خروجی منفی داشته باشیم باید جریان در جهت عکس عبور می‌کرد که غیرممکن بود (به علت عبور از ترانزیستور) (فقط به عنوان ایده) (روشهای دیگری هم وجود دارد)
امّا در رگولاتور غیرخطی می‌توان با ایدهٔ قرار دادن یک ترانس قبل از LPF می‌توان هم ولتاژ را منفی کرد هم می‌توان با دامنه مناسبی ولتاژ خروجی را زیاد کرد.

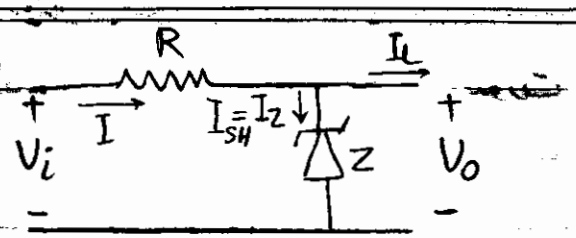
در رگولاتور خطی : سه نوع ضریب تثبیت تعریف می‌شود.

$$S_V = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i}\Big|_{\substack{\Delta T=0 \\ \Delta I_L=0}} \quad , \quad S_I = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L}\Big|_{\substack{\Delta T=0 \\ \Delta V_i=0}}$$

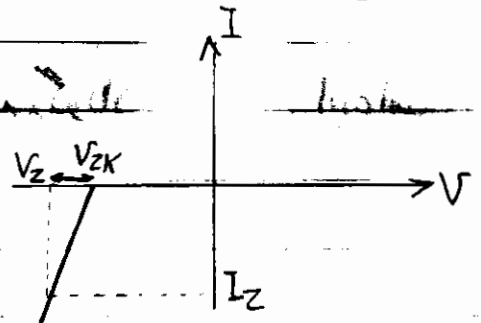
مقاومت خروجی را نشان می‌دهد

$$S_T = \frac{\Delta V_o}{\Delta T}\Big|_{\substack{\Delta I_L=0 \\ \Delta V_i=0}}$$

مثال :



اگر زنر ایده آل باشد همه چیز ایده آل بوده و r_z و S_I و ... صفر می شوند که نهایتاً ما را به جایی نمی رساند. لذا از زنری با مشخصه زیر استفاده می کنیم:



$$V_Z = V_{ZK} + r_Z I_Z$$

در مشخصه بالا $I_{Z_{min}}$ برابر صفر است که گاهی اوقات اینگونه نخواهد بود و

$$I_{Z_{min}} = I_{ZK}$$

در مثال بالا :

$$V_o = V_i - RI = V_i - R(I_L + I_Z) \quad *$$

$$V_o = V_Z = V_{ZK} + r_Z I_Z$$

اگر پارامترهای V_i ، V_o ، I_L ، R ، r_Z و V_{ZK} معلوم باشند :

با جایگزینی رابطهٔ $\frac{V_o - V_{ZK}}{r_Z} = I_Z$ در رابطهٔ * خواهیم داشت :

$$\longrightarrow V_o = \underbrace{\frac{r_Z}{R+r_Z} V_i}_{①} - \underbrace{\frac{R \cdot r_Z}{r_Z+R} I_L}_{②} + \underbrace{\frac{R}{R+r_Z} V_{ZK}}_{③}$$

رابطهٔ بالا نشان می دهد ① اگر V_i زیاد شود، V_o زیاد خواهد شد، ② اگر جریان خروجی زیاد بکشیم، V_o کاهش می یابد و ③ تغییرات V_{ZK} باعث تغییر V_o خواهد شد.

$$\longrightarrow \quad S_V = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = \frac{r_z}{R + r_z} = \frac{10^{-1}}{1 + 10^{-1}} \simeq 10^{-1}$$

$$S_I = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} = \frac{-R \cdot r_z}{r_z + R} = -r_z \| R \simeq 10^{-1}$$

$$S_T = \frac{\Delta V_o}{\Delta T} = \frac{R}{R + r_z} \cdot \frac{\Delta V_{zk}}{\Delta T} \simeq \frac{\Delta V_{zk}}{\Delta T}$$

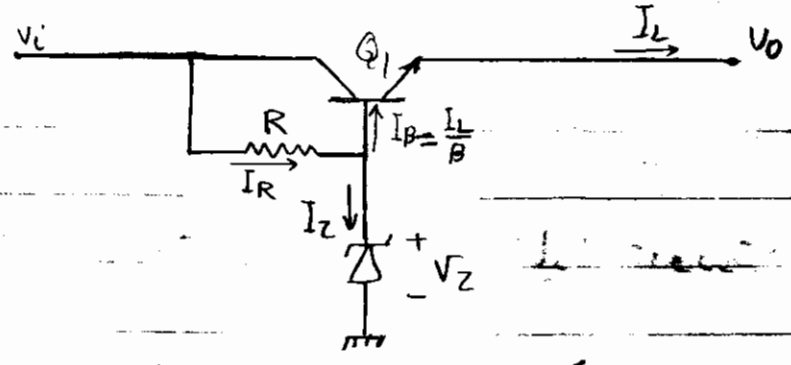
در کاتالوگ ذکر می‌شود (کالانتما)

$S_I = 10^{-1}$ بیان می‌کند که تغییرات ولتاژ با تغییرات امپدانس 10^{-1} منتقل می‌شود.

در این مدار می‌بینیم که مقادیر خوبی بدست نمی‌آید. دلیل این است که همهٔ بلوک‌های رگولاتور سری را زنر انجام می‌دهد و در نتیجه ضریب تثبیت خوبی نخواهیم داشت.

$$P_d = RI^2 + V_Z I_Z$$

نکته: چه در رگولاتور سری و چه در رگولاتور شنت المانی که در شاخه سری قرار می‌گیرد تعیین کننده تلفات کلی مدار خواهد بود



در طرح بالا نمونه‌ای از ولتاژ ۷۰ با ۶٪ کمتر در دو سر زنر ظاهر می‌شود:

$$V_Z = V_{Zk} + r_z I_Z \quad , \quad V_o = V_Z - V_{BE}$$

$$I_Z = I_R - I_B = I_R - \frac{I_L}{\beta} = \frac{V_i - (V_0 + V_{BE})}{R} + \frac{I_L}{\beta}$$

$$\longrightarrow V_0 = \underbrace{\frac{r_Z}{R+r_Z}V_i + \frac{R}{r_Z+R}V_{ZK} - \frac{\frac{R\cdot r_Z}{\beta}}{R+r_Z}I_L}_{V_Z} - V_{BE}$$

$$\longrightarrow S_V = \left.\frac{\Delta V_0}{\Delta V_i}\right| = \frac{r_Z}{R+r_Z} \simeq \frac{r_Z}{R}$$

درحالت قبل هم که یک مقاومت ونر داشتیم نیز همان رابطهٔ بالا بدست آمده بود. امّا یک تفاوت وجود دارد. درحالت اول جریانی که از مقاومت می گذشت $I_Z + I_L$ بود ولی دراین حالت جریان کمتری برابر با $I_Z + \frac{I_L}{\beta}$ ازمقاومت می گذرد. لذا مقاومتی درحد کیلواهم خواهیم داشت و درنتیجه S_V درحدود 10^{-4} خواهدبود:

$$S_V = \frac{r_Z}{R} = \frac{10^{-1}}{10^{3}} = 10^{-4}$$

$$S_I = \left.\frac{\Delta V_0}{\Delta I_L}\right| = -\frac{R \parallel r_Z}{\beta} \simeq \frac{-r_Z}{\beta} \simeq -\frac{10^{-1}}{10^{2}\text{تا}10} \simeq -10^{-3}\text{تا}-10^{-2}$$

$$S_T = \left.\frac{\Delta V_0}{\Delta T}\right|_{\substack{\Delta I_L=0 \\ \Delta V_i=0}} = \frac{R}{R+r_Z}\cdot\frac{\Delta V_{ZK}}{\Delta T} - \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T} + \frac{(R\parallel r_Z)I_L}{\beta^2}\frac{\Delta\beta}{\Delta T}$$

در رابطه بالا چون تغییرات β با دما خیلی زیاد نیست و درترم آخر ضریب $\frac{1}{\beta^2}$ وجود دارد نهایتاً با اعمال تقریب مناسب خواهیم داشت:

$$S_T \simeq \frac{\Delta V_{ZK}}{\Delta T} - \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T}$$

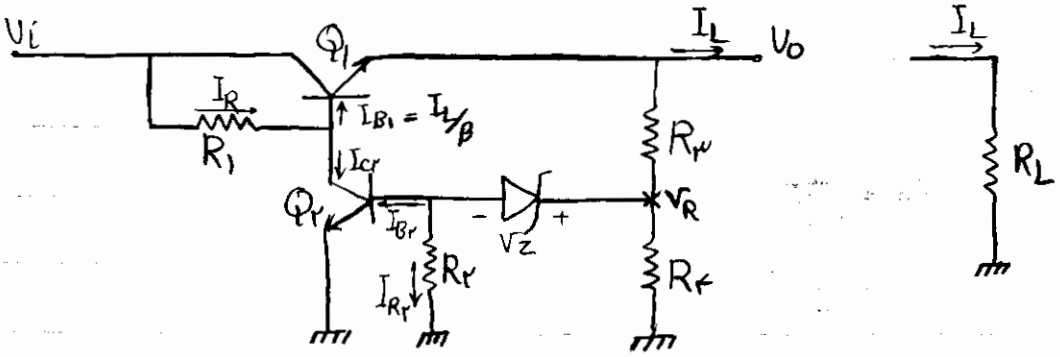
اگر زنری با تغییرات حرارتی مثبت انتخاب کنیم، T_K مقدار کمی خواهد بود.

$$P_D = R I_R^2 + \underbrace{V_{CE} \cdot I_C}_{(V_i - V_o) I_L} + V_Z I_Z = \underset{mW}{R I_R^2} + \underbrace{(V_i - V_o)}_{W} \underbrace{I_L}_{A} + \underset{mW}{V_Z \cdot I_Z}$$

همانطور که گفته بودیم در رگولاتور سری آلمانی که در شاخهٔ سری قرار دارد بیشترین تلفات را ایجاد می کند که در رابطهٔ بالا نیز می بینیم.

در طرح بالا دیدیم که با اضافه کردن یک آلمان کنترل مجزا نسبت به رگولاتور قبلی ضرایب تثبیت را با بهبودی مناسبی بدست آوردیم.

این بار واحد نمونه بردار مدار را نیز مجزا می کنیم و زنر دیگر نمونه بردار نخواهد بود:



در طرح بالا زنر هم نقش مقایسه کننده دارد و هم نقش ولتاژ مرجع را دارد. ولتاژ مرجع همان V_{ZK} خواهد بود که با ولتاژ دوسر R_4 مقایسه خواهد شد.

با فرض تثبیت شدن ولتاژ V_o می توانیم فرض کنیم که I_{R_1} ثابت است (البته تغییرات خیلی کمی با تغییرات V_o خواهد داشت) حال اگر V_o کم شود، V_{R_4} کاهش خواهد یافت.

زنر با مقایسه کردن ولتاژ های فرمان کاهش ولتاژ بیس Q_2 را می‌دهد. درنتیجه I_{C_2} کم می‌شود. چون I_R تقریباً ثابت است لذا I_{B_1} و درنتیجه I_{L_1} زیادشده و V_o زیادمی‌شود. وجود مقاومت R_2، مسیری برای بایاس زنر خواهد بود. چون اگر R_2 وجود نداشته باشد با صفرشدن I_{C_2}، I_{B_2} به سمت صفر رفته و دیود را خاموش می‌کند که مطلوب نیست.

با فرض صرفنظرکردن جریان زنر درمقابل جریان R_3 و R_4 خواهیم داشت:

$$V_R = \frac{R_4}{R_3+R_4} V_o \longrightarrow V_o = \left(\frac{R_4}{R_3}+1\right) V_R$$

$$V_R = V_Z + V_{BE_2} \quad , \quad V_Z = V_{ZK} + r_Z I_Z$$

$$I_Z = I_{R_2} + I_{B_2} = \frac{V_{BE_2}}{R_2} + \frac{I_{C_2}}{\beta_2}$$

$$I_R = I_{C_2} + \frac{I_L}{\beta_1} \longrightarrow I_{C_2} = I_R - \frac{I_L}{\beta_1}$$

$$, \quad I_R = \frac{V_i - (V_o + V_{BE_1})}{R_1} \quad (V_{B_1})$$

$$\longrightarrow V_o = \frac{1}{1+\frac{\beta_2 R_1}{r_Z}\cdot\frac{R_4}{R_3+R_4}} V_i - \frac{\frac{R_1}{\beta_1}}{1+\frac{\beta_2 R_1}{r_Z}\cdot\frac{R_4}{R_3+R_4}} I_L$$

$$+ \frac{\beta_2 \frac{R_1}{r_Z}}{1+\frac{\beta_2 R_1}{r_Z}\cdot\frac{R_4}{R_3+R_4}} V_{ZK} - \frac{\beta_2 \frac{R_1}{r_Z \,||\, R_2}}{1+\frac{\beta_2 R_1}{r_Z}\cdot\frac{R_4}{R_3+R_4}} V_{BE_2}$$

$$+ \frac{V_{BE_1}}{1+\frac{\beta_2 R_1}{r_Z}\cdot\frac{R_4}{R_3+R_4}}$$

$$S_V = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i}\Big|_{\substack{\Delta T=0\\ \Delta I_L=0}} = \frac{1}{1+\frac{\beta_2 R_1}{r_{z2}}\cdot\frac{R_4}{R_3+R_4}} \simeq \frac{1}{\frac{10^2\times 10^3}{10^{-1}}} = 10^{-6}$$

ترانزیستور Q_1 چون جریان آمپری از آن می گذرد باید β پائین داشته باشد امّا Q_2 ترانزیستور با توان بالائی خواهد بود چون جریان میلی آمپری از آن می گذرد و درنتیجه β آن حدود ۱۰۰ خواهد بود.

با توجه به اعداد بالائی بینیم که S_V بهبودی بهتری یافته است که به علت وجود β_2 یا همان Q_2 خواهد بود. به Q_2 الان فرمان می گوئیم.

$$S_I = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L}\Big|_{\substack{\Delta T=0\\ \Delta V_i=0}} = -\frac{R_1/\beta_1}{(\quad)} \simeq \frac{10^1 \text{ تا } 10^2}{10^6} \simeq 10^{-5} \text{ تا } 10^{-6}$$

در اینجا نیز تأثیر Q_2 را در بهبودی S_I می بینیم.

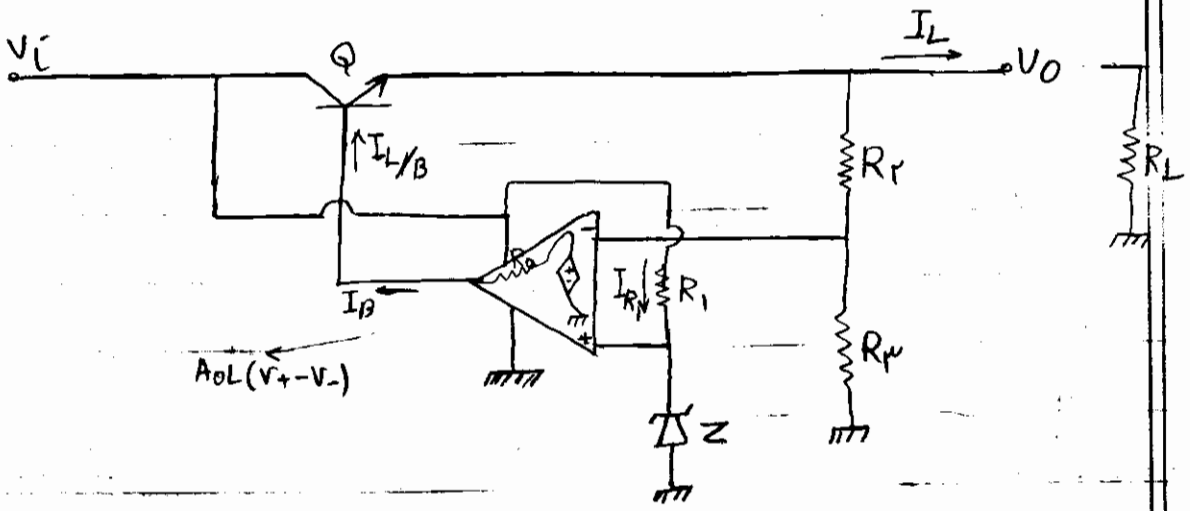
$$S_T = \frac{\Delta V_o}{\Delta T}\Big|_{\substack{\Delta I_L=0\\ \Delta V_i=0}} = \frac{\beta_2 R_{f2}}{(\quad)}\cdot\frac{\Delta V_{ZK}}{\Delta T} - \frac{\beta_2 R_1/r_{z2}\|R_1}{(\quad)}\cdot\frac{\Delta V_{BE_2}}{\Delta T} + \frac{1}{(\quad)}\cdot\frac{\Delta V_{BE_1}}{\Delta T}$$

با توجه به رابطه بالا می بینیم که ضرایب صورت $\frac{\Delta V_{BE_2}}{\Delta T}$ و $\frac{\Delta V_{ZK}}{\Delta T}$ تقریباً برابر بوده و همدیگر را می توانند خنثی کنند. با توجه به اعداد خواهیم دید که تغییرات حرارتی Q_1 تقریباً بی تأثیر بوده و S_T توسط دو ترم اول تعیین می شود که با نزدیک کردن آنها به یکدیگر می توان S_T را کاهش داد. در طرح بالا Q_1 گرمای بیشتری تولید خواهد

کرد ولی گرمای آن تأثیری در $\frac{\Delta V_{BE_1}}{\Delta T}$ ندارد.

$$P_D = \underset{mW}{R_1 I_R^2} + \underset{mW}{R_2 I_R^2} + \underset{mW}{\frac{V_O^2}{(R_3+R_f)}} + \underset{mW}{V_Z I_Z} + \underset{mW}{V_{CE_2} I_{C_2}} + \underset{W}{V_{CE_1} I_{C_1}}$$

درطرح بالادیدیم که با اضافه‌شدن یک المان کنترل اضافی نیز بهبودی بهتری در ضرایب تثبیت بوجودمی‌آید. حال طرح نهایی را ارائه می‌کنیم که در آن نمونه‌برداری با گین بالا بکار رفته‌است که یک Op-Amp خواهد بود:



چون افت ولتاژ V_{R_3} باید معادل با افزایش I_B باشد باتوجه به $A_{OL}(V_+ - V_-)$ می‌فهمیم که سر R_3 باید به ترمینال منفی Op-Amp متصل شود.

پارامترهای معلوم مدار عبارتند از: $A_{OL} - R_O - V_{ZK} - r_Z - V_{BE} - \beta$

همانند موارد قبل برای نوشتن روابط از خروجی شروع می‌کنیم:

$$V_- = \frac{R_3}{R_2+R_3} V_O \quad , \quad V_+ = V_Z = V_{ZK} + r_Z I_Z \quad ①$$

$$I_Z = I_{R_1} = \frac{V_i - V_Z}{R_1} \quad (۳)$$

$$(۱), (۳) \longrightarrow V_+ = V_Z = \frac{R_1}{R_1 + r_Z} V_{Zk} + \frac{r_Z}{R_1 + r_Z} V_i$$

$$V_{O_{op-Amp}} = A_{OL}(V_+ - V_-) \blacklozenge - R_O \cdot \frac{I_L}{\beta} \quad , \quad V_O = V_{O_{op-Amp}} - V_{BE}$$

$$\longrightarrow V_O = \frac{R_2 + R_3}{R_2 + (1+A_{OL})R_3} \times \frac{A_{OL} \cdot R_1}{R_1 + r_Z} V_{Zk} + \frac{R_2 + R_3}{R_2 + (1+A_{OL})R_3} \times \frac{A_{OL} \cdot r_Z}{R_1 + r_Z} V_i$$

$$\blacklozenge - \frac{R_2 + R_3}{R_2 + (1+A_{OL})R_3} V_{BE} - \frac{R_2 + R_3}{R_2 + (1+A_{OL})R_3} \cdot \frac{R_O}{\beta} \cdot I_L$$

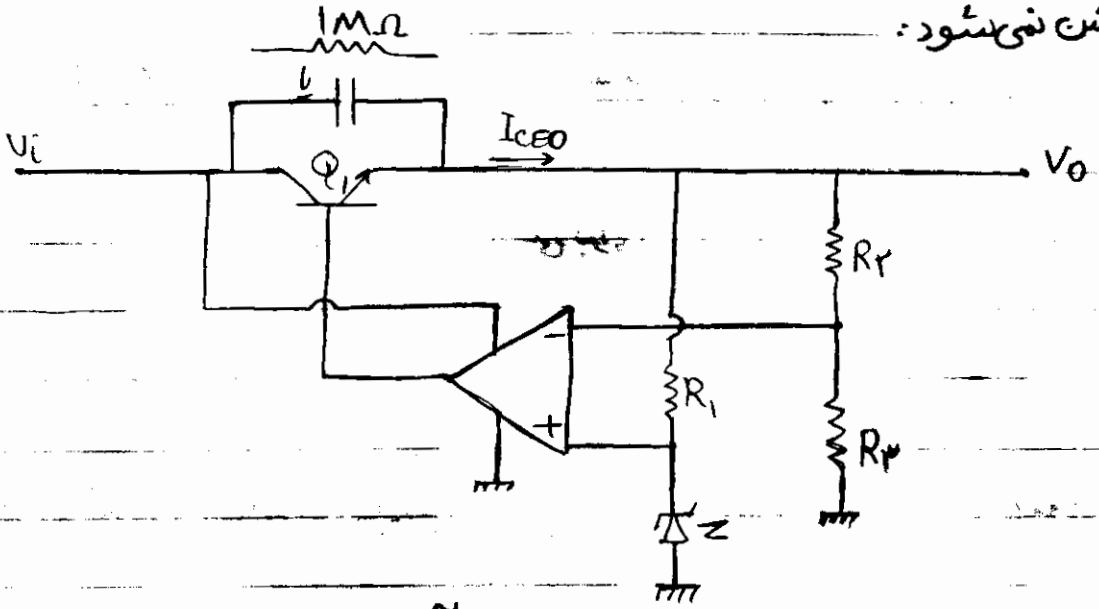
$$\longrightarrow S_V = \left.\frac{\Delta V_O}{\Delta V_i}\right|_{\substack{\Delta T = 0 \\ \Delta I_L = 0}} = \frac{R_2 + R_3}{R_2 + (1+A_{OL})R_3} \cdot \frac{A_{OL} \cdot r_Z}{R_1 + r_Z} \simeq \frac{r_Z (R_2 + R_3)}{R_3 R_1}$$

برای تقسیم ولتاژ کردن مقادیر کیلواهمی برای R_2 و R_3 مناسب است. برای بایاس کردن زنر نیز مقدار کیلواهمی برای R_1 مطلوب است:

$$\longrightarrow S_V \simeq \frac{r_Z (R_2 + R_3)}{R_3 \cdot R_1}$$

انتظار داشتیم نسبت به حالت قبلی S_V بهتری داشته باشیم که می بینیم بهبودی چندانی بدست نیاورده ایم. چون می خواستیم با افزایش گین نمونه برداری S_V که با بهبودی بهتری داشته باشیم. دلیل: حتی اگر گین نمونه برداری ∞ باشد، ایده آل این است که نهایتاً V_{R_3} و V_Z که باهم مقایسه می شوند باهم برابر شوند در این حالت V_O مقداری از V_Z خواهد بود که مثل همان مدار اولیه است.

برای حل این مشکل سر R_1 را به V_o وصل می‌کنیم. اما در این حالت ایرادی وجود دارد که در لحظهٔ اول زنر روشن نخواهد شد و نیاز به یک راه انداز دارد. لذا از یک مقاومت یا یک خازن برای راه اندازی زنر استفاده می‌کنیم. البته در عمل در مواردی که جریان بالا داریم، جریان I_{CEO} ترانزیستور کافی خواهد بود که زنر را راه اندازی کند و نیازی به مقاومت و یا خازن نخواهیم داشت. در لحظهٔ اول چون V_o صفر است زنر روشن نمی‌شود:



در همان مدار قبل بقیهٔ ضرایب تثبیت را بدست می‌آوریم:

$$S_I = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} = -\frac{R_2+R_3}{R_2+(1+A_{OL})R_1}\cdot\frac{R}{\beta} \simeq -\frac{10^3}{15\times10^3}\times\frac{10}{10^2} = -10^{-2}$$

در این مورد نیز اگر از ترانزیستور فرمان استفاده می‌کردیم بهبودی بهتری در S_I داشتیم.

$$S_T = \frac{\Delta V_o}{\Delta T} = \frac{R_2+R_3}{R_2+(1+A_{OL})R_1}\cdot\frac{A_{OL}\cdot R_1}{r_Z+R_1}\cdot\frac{\Delta V_{ZK}}{\Delta T} - \frac{R_2+R_3}{R_2+(1+A_{OL})R_3}\cdot\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T}$$

$$\longrightarrow S_T \simeq \frac{R_2+R_3}{R_3}\cdot\frac{\Delta V_{ZK}}{\Delta T} - \frac{R_2+R_3}{(A_{OL})\,R_3}\cdot\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T}$$

(A_OL: خیلی بزرگ)

درمقایسه با مدلی که یک زنر و یک ترانزیستور داشت در اینجا S_T بهبودی بهتری یافته است.

در مدار با یک زنر و ترانزیستور تأثیرات حرارتی زنر و ترانزیستور هر دو موثر بوده و در مقابل هم قرار می گرفتند امّا در اینجا با استفاده از op-Amp، فقط تأثیرات حرارتی زنر مؤثر است.

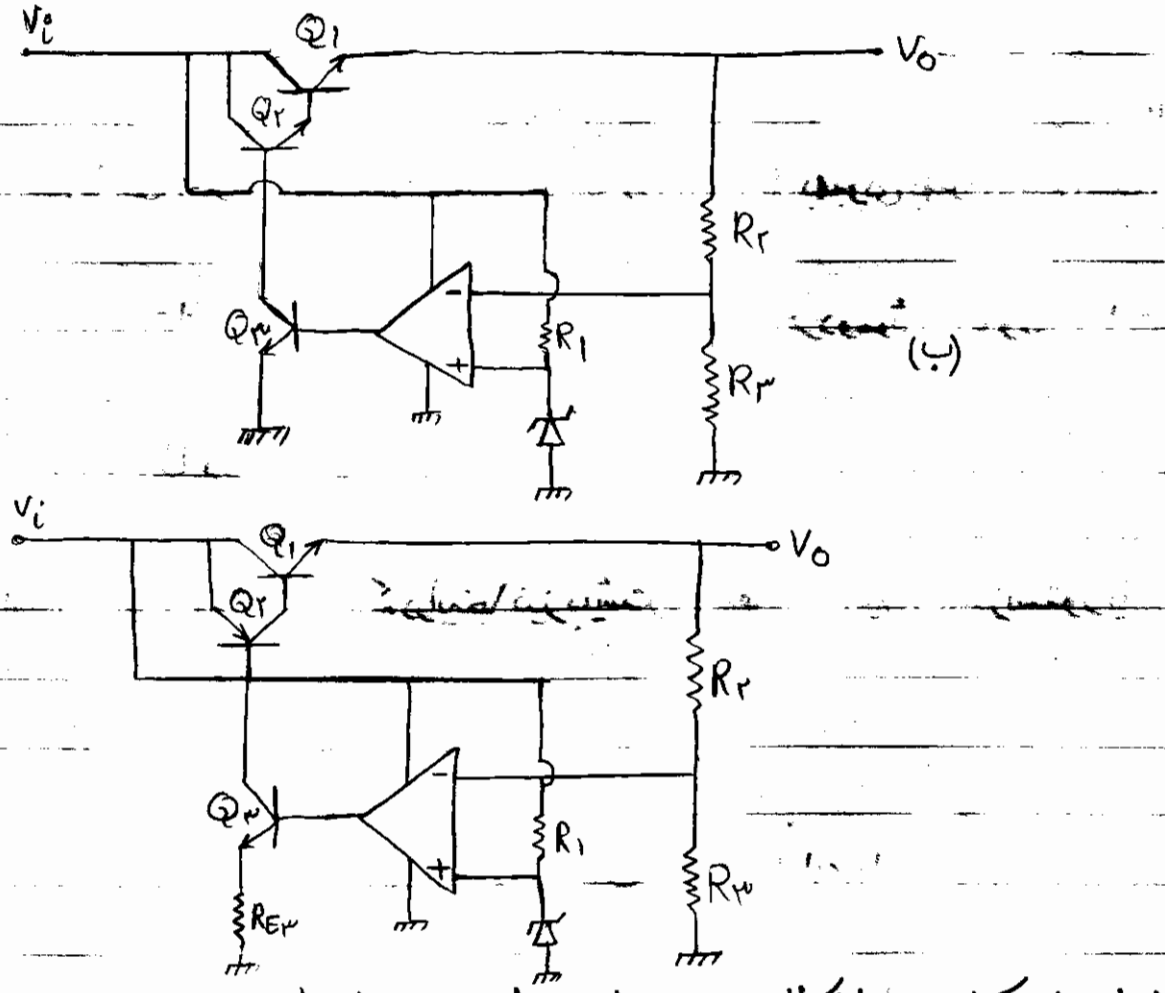
با محاسبهٔ P_d خواهیم دید که در اینجا نیز بیشترین تلفات حرارتی را ترانزیستور یا همان المان شاخه سری دارد.

مدار فوق کاملترین تثبیت کنندهٔ ولتاژ است که تمام المان های یک رگولاتور ولتاژ در آن به صورت مجزا بکار رفته است. امّا محدودیت هایی را هم دارد. مانند محدودیت جریان I_L که از رابطهٔ مقابل ($\beta_1\beta_2$: دارلینگتون) بدست می آید. می توان برای بالا بردن I_L از ترکیب دارلینگتون استفاده کرد (به جای Q_1).

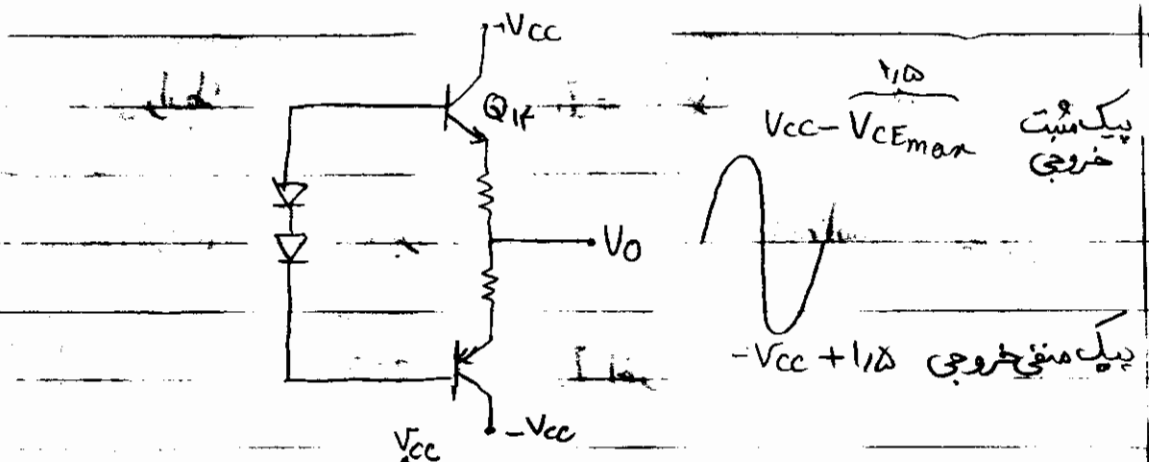
$$I_{O_{max_{op-Amp}}} \times \beta = I_L$$

$$۲۰ \times ۵۰ = 1A$$

به هرحال با بالا بردن gain loop مقدار I_L افزایش می یابد. یکی از راههای افزایش gain loop قرار دادن یک ترانزیستور (Q_3) در خروجی op-Amp است. اما چون جریان بیس Q_2 رو به بالا و کلکتور Q_3 رو به پائین است لذا ترکیب دارلینگتون را به شکل زیر می بندیم:



امّا مدار شکل(ب) اشکالی در Q_3 دارد. باتوجه به مدار داخلی Op-Amp :



لذا امیتر Q_3 تا ۱٫۵ و کلکتور آن تا $V_i - 1.5$ می تواند بالا می رود. دراین حالت اتفاقی که برای Q_1 می افتد این است که بیس آن جریان بسیار زیادتری از کلکتورش خواهد داشت و در ترانزیستوری که در آن رابطه $I_B \neq \frac{1}{\beta} I_C$ برقرار نباشد

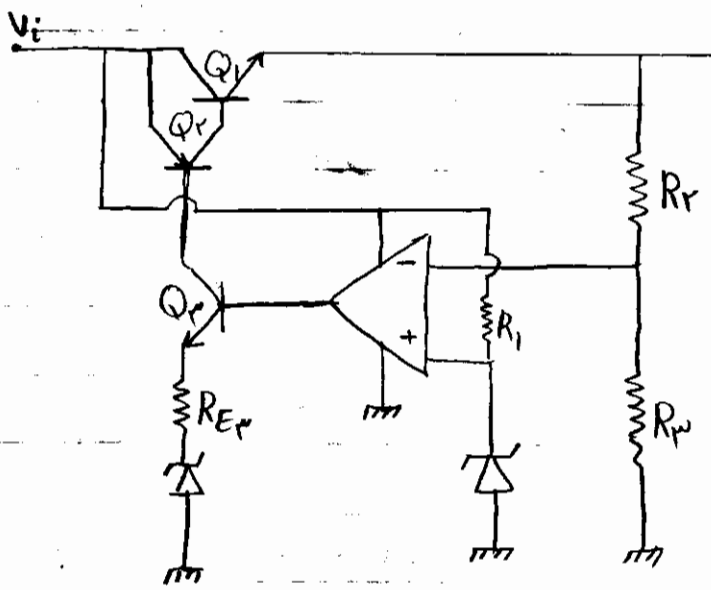
V_{CE} آن صفر بوده و اشباع می‌شود. لذا به محض وصل کردن مدار Q_1 اشباع می‌شود برای حل این مشکل جریان Q_3 را باید پائین بیاوریم به طوری که $\frac{1}{\beta}$ جریان کلکتور Q_1 شود، لذا از یک مقاومت R در امیتر Q_3 استفاده می‌کنیم، در این حالت:

$$V_{O_{op-Amp}} = R_{E_3}(I_{C_3}) + V_{BE}$$

$$I_L/\beta_1\beta_2$$

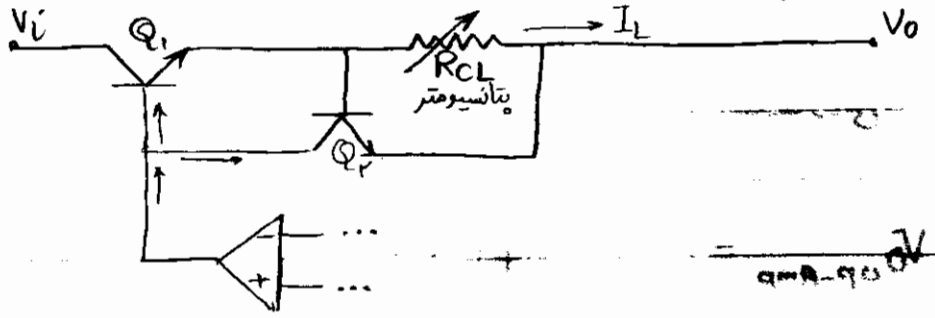
با انتخاب مناسب R_{E_3} می‌توان ولتاژ خروجی op-Amp را در حدی تنظیم کنیم که بیشترین سوئینگ را داشته باشد.

در مدار فوق Q_3 نقش یک تقویت کننده امیتر مشترک را بازی می‌کند البته می‌توان برای اینکه حساسیت Q_3 را بسیار بالا ببریم از یک زنر استفاده کنیم که در این حالت نیازی به R_{E_3} زیاد نداریم.



می‌خواهیم درمدارفوق بتوانیم جریان خروجی I_L راکنترل بکنیم. لذا باید از یک

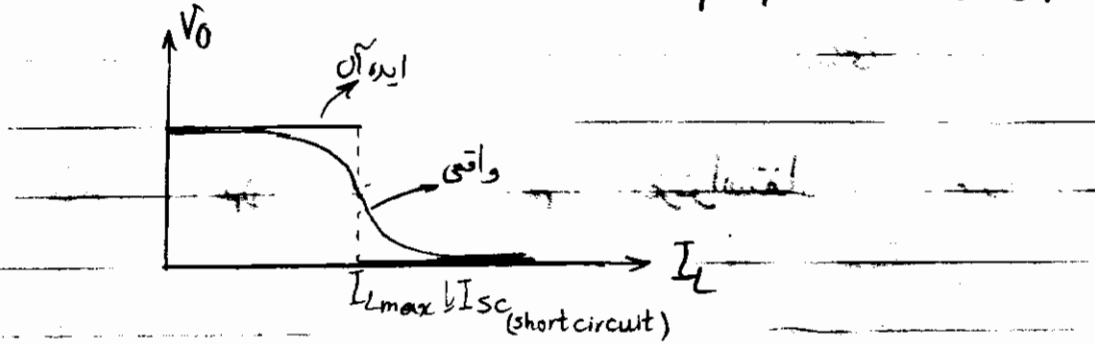
نمونه‌برداز استفاده کنیم که درشکل زیر نشان داده شده است:



درمحدودکنندهٔ جریان بالا تا زمانی که $R_{CL} < V_{BE}$ است Q_2 خاموش است، امّا

وقتی‌که $R_{CL} = V_{BE_{ON}}$ ، Q_2 روشن شده وجریان رامحدودی کند. مقاومت

R_{CL} باید یک مقاومت کم اهم ولی باتوان بالا باشد.



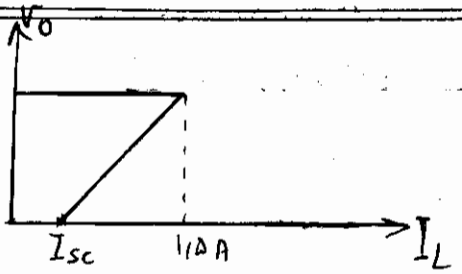
به مدار بالا، مدار محدودکننده جریان می گوئیم.

به فرض مدار بالا را در $1/5^A$ تنظیم کنیم حال اگر I_L بیشتر از $1/5^A$ شود حتماً در

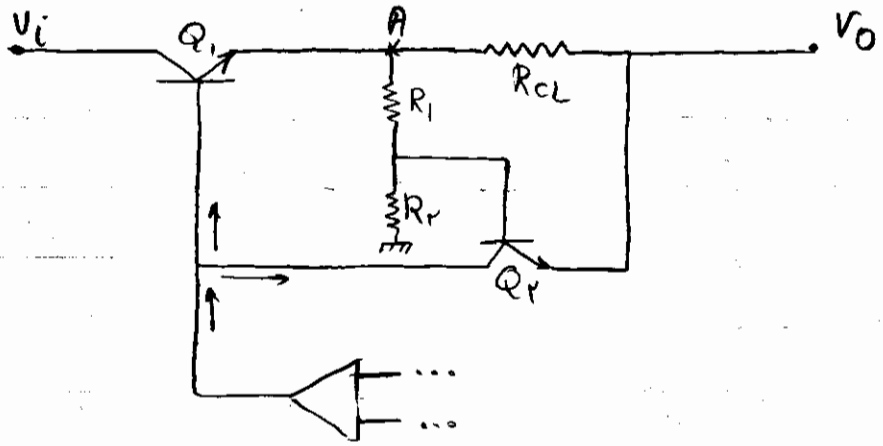
خروجی (دربار) مشکلی بوجود آمده است. حال می خواهیم دراین حالت جریان به

جای اینکه ثابت بماند کم شود تا به بار آسیبی نرسد و از آن محافظت کرده باشیم

لذا مدلری با مشخصهٔ زیر می خواهیم:



به چنین مداری Fold back می‌گوییم که در شکل زیر نشان داده شده است:



$$V_{BE_2} = V_{BE_{ON}}$$

$$V_{B_2} - V_{E_2} = V_A \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2} - V_o = (V_o + R_{CL} I_L) \frac{R_2}{R_1+R_2} - V_o = V_{BE}$$

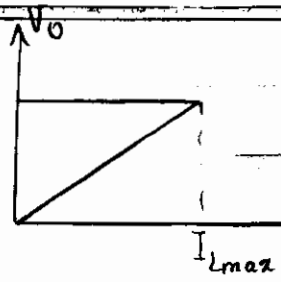
$$\longrightarrow V_o \left(\frac{R_2}{R_1+R_2} - 1\right) + R_{CL} I_L \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2} = V_{BE_2}$$

$$\longrightarrow I_L = \frac{V_{BE} - V_o \left(\frac{R_2}{R_1+R_2} - 1\right)}{R_{CL} \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2}}$$

$$\longrightarrow I_{L_{max}} = \frac{(R_1+R_2) V_{BE_{ON}} + \overset{\text{۱۲ ولت}}{(V_o)} \cdot R_1}{R_{CL} \cdot R_2}$$

if $V_o = 0 \longrightarrow I_L = I_{sc} < I_{L_{max}}$

نوع دیگری از محدودکننده‌ها وجود دارند که به مدار قطع کننده موسوم هستند

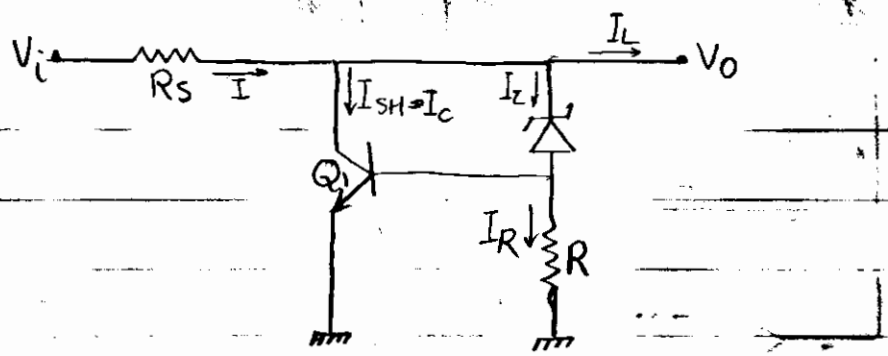


که مشخصه $V_O - I_L$ در آنها بصورت مقابل است :

برای ساخت چنین مدارهای نیاز به المان های غیرخطی

خواهیم داشت که خواهیم دید با JT ها می توانیم چنین مدارهای ~~stabilizer~~ بسازیم.

رگولاتور شنت :



$$V_O = V_i - R_S I \quad , \quad I = I_L + I_Z + I_{SH}$$

$$V_Z = V_{ZK} + R_Z I_Z = V_O - V_{BE} \longrightarrow I_Z = \frac{V_O - V_{BE} - V_{ZK}}{r_Z}$$

$$I_B = I_Z - I_R = I_Z - \frac{V_{BE}}{R} \quad , \quad I_{SH} = \beta I_B$$

بعد از جایگزینی $\longrightarrow$

$$V_O = \frac{r_Z}{r_Z + \beta R_S} V_i - \frac{R_S r_Z}{r_Z + \beta R_S} I_L + \frac{\beta R_S}{r_Z + \beta R_S} (V_{ZK} + V_{BE})$$

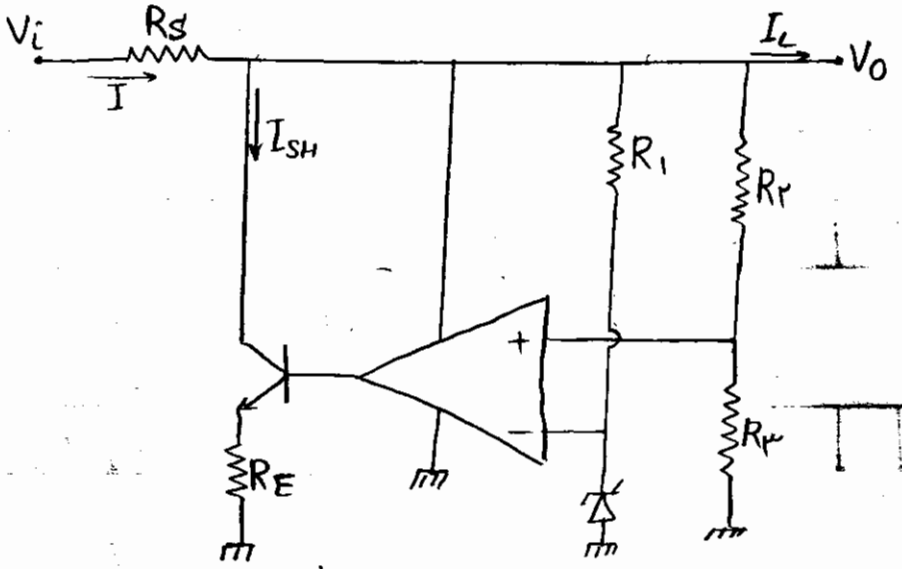
$$\longrightarrow S_V = \left|\frac{\Delta V_O}{\Delta V_i}\right| = \frac{r_Z}{r_Z + \beta R_S} \simeq \frac{r_Z}{\beta R_S}$$

$$S_I = \left|\frac{\Delta V_O}{\Delta I_L}\right| = -\frac{R_S r_Z}{r_Z + R_S \beta} \simeq -\frac{r_Z}{\beta}$$

$$S_T = \left|\frac{\Delta V_O}{\Delta T}\right| = \frac{\beta \cdot R_S}{r_Z + \beta \cdot R_S} \left(\frac{\Delta V_{ZK}}{\Delta T} + \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T}\right)$$

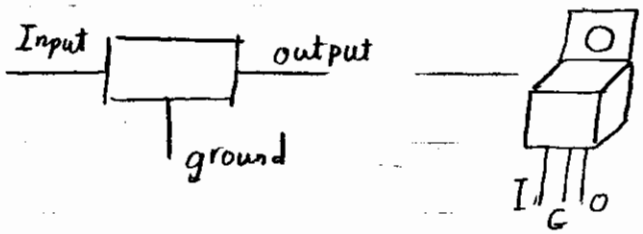
که ضرایب تثبیت بالا در مقایسه با اولین مدار که شامل زنر و مقاومت بود بهبودی

یافته اند. البته در این مدار فقط المان کنترل به صورت مجزا بکار رفته است. اگر تمام المان های یک رگولاتور را به طور مجزا به کار ببریم با الطبع، کاملترین رگولاتور شنت را خواهیم داشت:

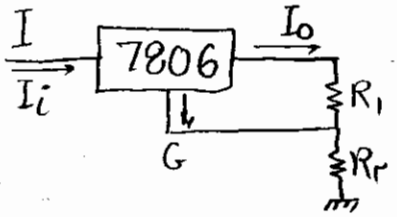


تمرین: ضرایب S_V، S_I و S_T را برای مدار بالا بدست آورید.

رگولاتورهای ذکر شده عموماً به صورت مدارهای مجتمع ساخته می‌شوند که دارای سه پایه هستند:



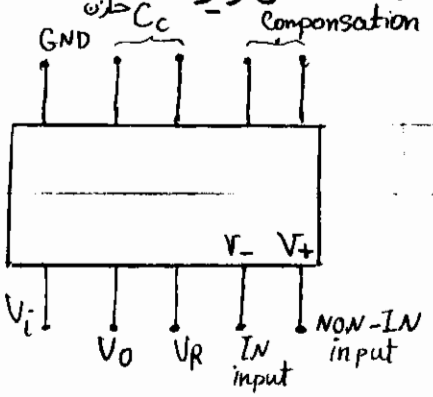
چنین IC هایی با نام LM78XX هستند که XX نشان دهندهٔ ولتاژ خروجی خواهد بود که مقادیر استاندارد آن ۰۵، ۰۶، ۰۸، ۰۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۴ است. عدد ۷۸ نشان دهنده رگولاتور مثبت است یعنی ورودی مثبت، خروجی مثبت.



نوع دیگر رگولاتورها ، Ic های با نام LM79 هستند که به عنوان رگولاتورهای منفی به کار می روند. یعنی ورودی منفی ، خروجی منفی .

مداری که در صفحهٔ قبل دیده می شود برای تنظیم خروجی به کاری رود.

رگولاتورهایی وجود دارند که تنظیم ولتاژ در آنها به شکل زیر است:



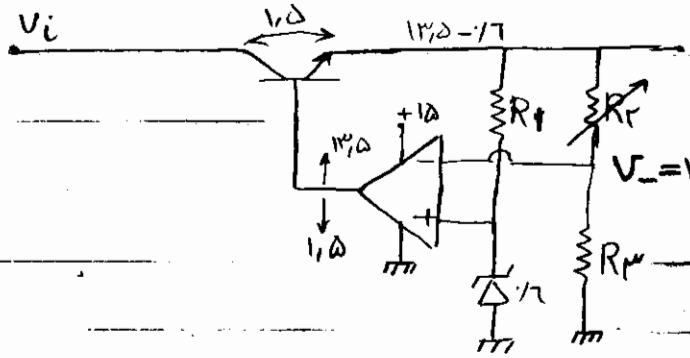
۱٫۷ ~ ۴۰ ^{V}

Ic های LM۱۰۵ مثبت

LM۱۰۴ منفی

که از نوع رگولاتورهای سری هستند.

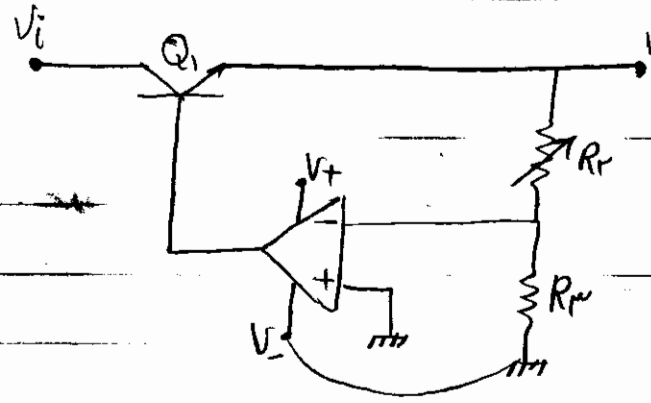
(عنوان جا افتاده) :



درحالت ایده آل : $V_- = V_+ = V_Z$

$$V_2 = V_- = \frac{R_3}{R_2+R_3} V_O \longrightarrow V_O = V_2\left(1+\frac{R_2}{R_3}\right)$$

برای اینکه V_O صفر شود، R_2 را صفر می کنیم و زنر را برقی داریم که در این صورت R_1 نیز حذف می شود،



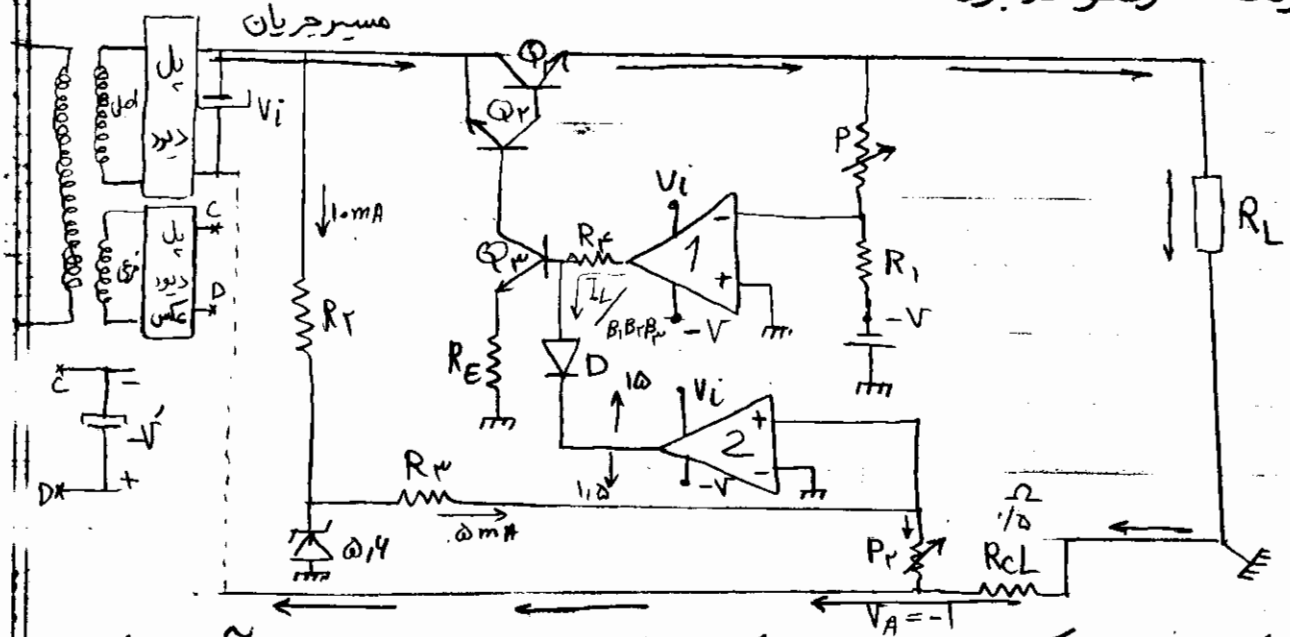
در این صورت ناچاراً باید تغذیه منفی نیز داشته باشیم. چون Op-Amp ایده آل است و $V_- = V_+$ و برابر صفر هستند با توجه به اینکه V_o مقدار دارد جریانی از R_2 رو به پائین سرازیر می‌شود. برای اینکه این جریان وارد Op-Amp نشود و آن را به حالت غیر خطی نبرد باید R_3 را به $-V$ وصل کنیم. تا جریان به R_3 وارد شود

در این حالت :

$$I_{R_2} = I_{R_3}$$

$$\frac{V_o}{R_2} = \frac{V}{R_3} \longrightarrow V_o = V \cdot \frac{R_2}{R_3}$$

لذا برای اینکه در خروجی ولتاژ صفر داشته باشیم باید تغذیه منفی داشته باشیم. در نتیجه در خروجی I_c های LM105 و LM104 مقدار خروجی مینیمم هیچ وقت صفر نخواهد بود.



در شکل بالا محدود کننده جریانی را می‌بینیم که قابل تنظیم بوده و جریان مدار وارد آن نمی‌شود.

مقاومت R_{CL} نمونه‌برداری جریان می‌کند. چون سر سمت چپ R_{CL} منفی است و باید وارد ترمینال منفی Op-Amp شده و با ترمینال مثبت مقایسه شود لذا طراحی باید به گونه‌ای باشد که وقتی I_L از مقدار ماکزیمم بیشتر شد V_+ هم از V_- بیشتر شود. (V_- هم که صفر است).

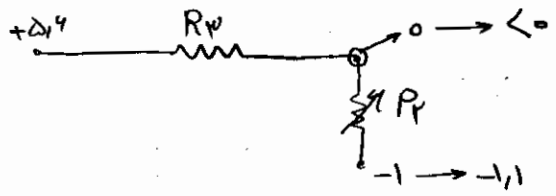
پس باید در $I_{L_{max}}$، ولتاژ V_+ را به صفر برسانیم. برای این کار از یک پتانسیومتر P_2 و دیود زنر استفاده کنیم.

وقتی که I_L از $I_{L_{max}}$ کمتر است Op-Amp۲ به اشباع مثبت می‌رود و دیود D هم خاموش خواهد بود و جریان مسیر خود را طی می‌کند. زمانی که I_L کمی از $I_{L_{max}}$ بیشتر شود V_+ از صفر به طرف منفی رفته و Op-Amp به اشباع منفی می‌رود. در نتیجه دیود D روشن می‌شود و جریان از Op-Amp1 به Op-Amp2 سرازیر می‌شود. جریان Q_3 در این حالت مینیمم می‌شود ولی صفر نخواهد شد چون در این صورت جریان شاخهٔ اصلی مدار صفر خواهد شد. وجود مقاومت R_4 بین دو Op-Amp برای این است که اگر از Op-Amp بیش از حد جریان بکشیم ولتاژ آن افت پیدا نکند. جریانی که از P_2 می‌گذرد در حد میلی آمپر است.

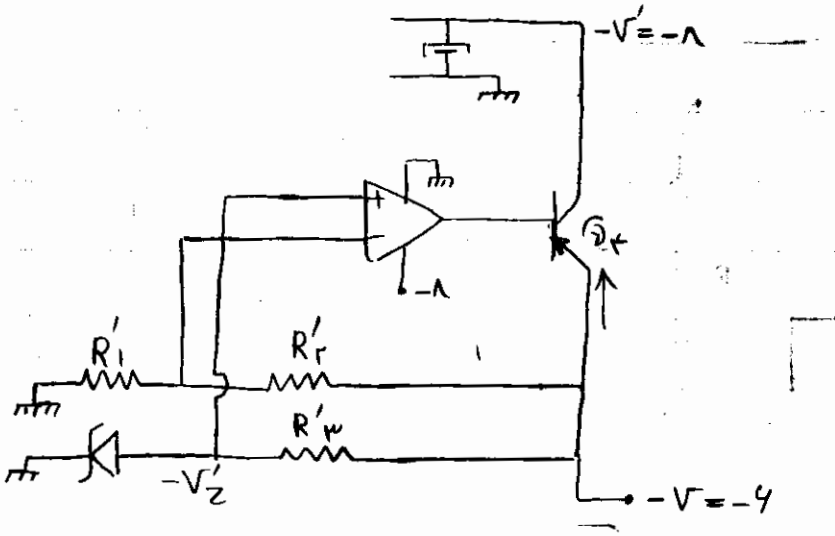
نکته: زمینی که مدار دارد با زمینی که V_i دارد متفاوت است.

V_A را نسبت به صفر مدار ۱ـ ولت انتخاب کردیم که در این حالت V_+ صفر است. حال اگر I_L ...

از I_{max} بیشتر شود V_A مثلاً ۱٫۱- شده و +V کوچکتر از صفر می‌شود.



برای اینکه ولتاژ -V (تغذیه منفی و ولتاژ مرجع) را تولید کنیم از قسمت پل دیود فری استفاده می‌کنیم که -V' تولید می‌کند. -V' کمی بیشتر از -V است. مثلاً اگر -V برابر ۶- باشد آن گاه -V' برابر ۸- است. -V' را مطابق شکل زیر به یک رگولاتور دیگری دهیم تا -V را بگیریم:



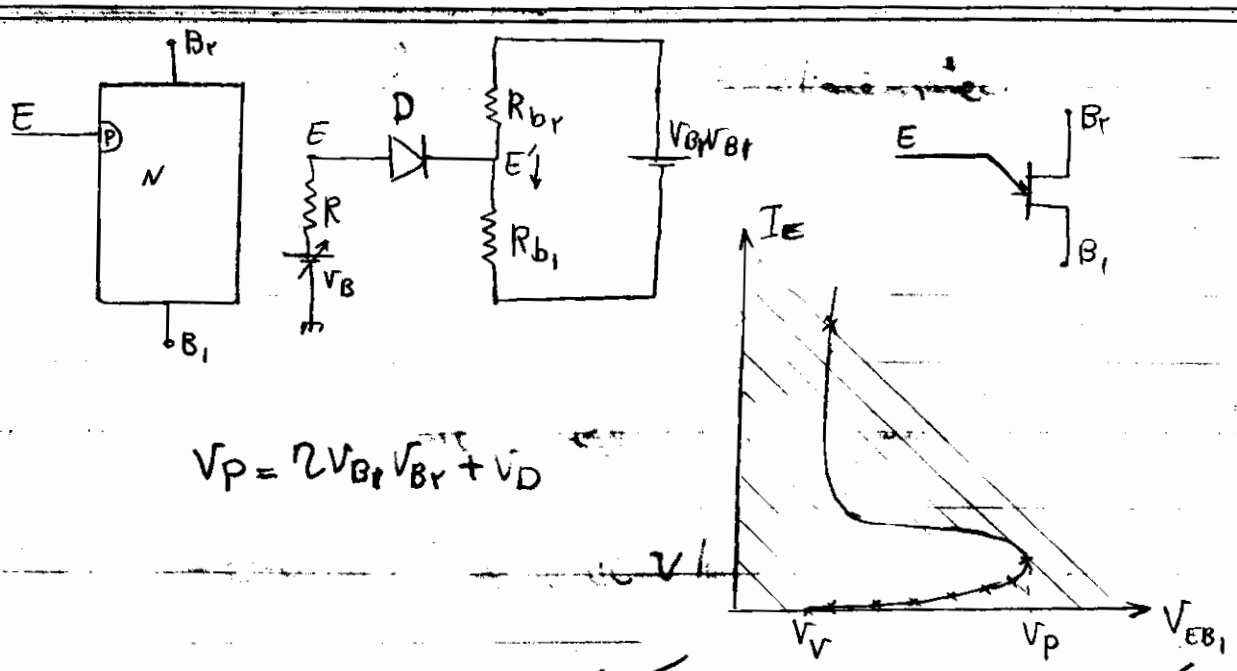
لذا باطری مدار را برداشته و آن را به -V' با لا وصل می‌کنیم.

مقاومت های R۲ و R۳ در مدار اصلی برای بایاس کردن دیود زنر مدار اصلی است.

قطع کننده جریان:

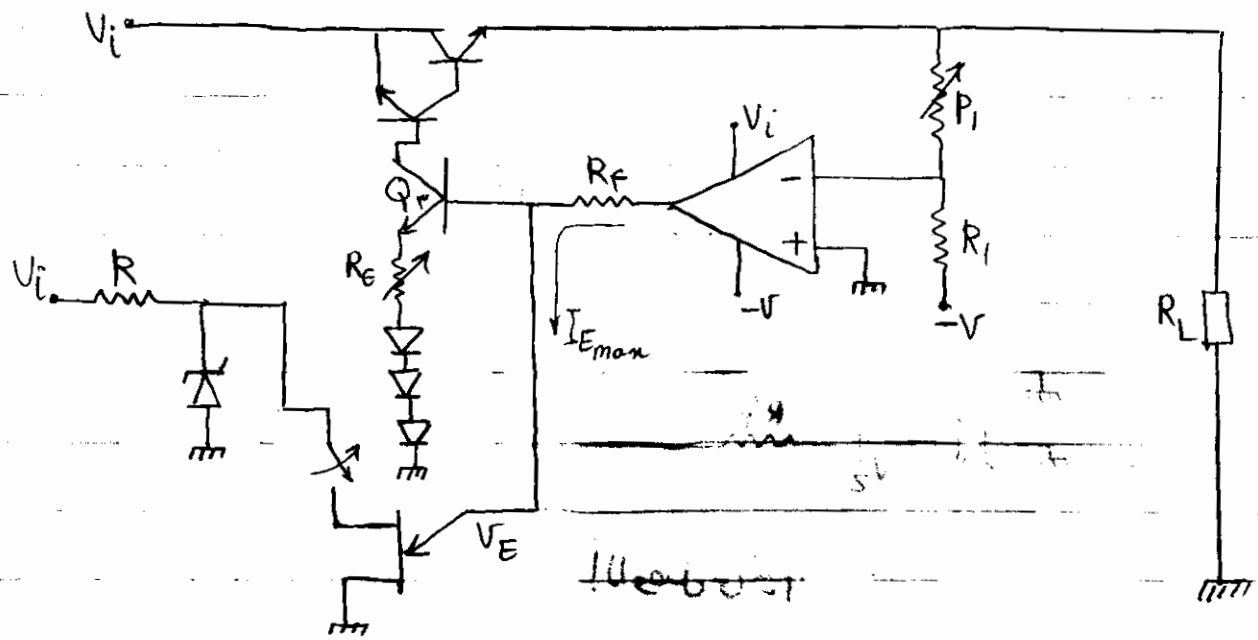
(ان شاء ا...) که UJT را فراموش نکرده اید.

یادآوری UJT از الکترونیک I:



$$V_P = \eta V_{B1} V_{B2} + V_D$$

قطع کننده جریان : باز هم فرمان قطع کنندگی را در خروجی op-Amp قرار می دهیم.



فرض می کنیم وقتی جریان A ۲ شد باید قطع شود. با توجه به شکل ولتاژ روشن شدن آن را بدست می آوریم:

$$V_{B2} = R_E I_{E2} + V_{BE2}$$

$$\rightarrow \begin{cases} V_{B2} = R_E \dfrac{I_{Lmax}}{\beta_1 \beta_2} + V_{BE2} \\ V_P = \eta V_i + V_D \end{cases}$$

بعد از روشن شدن UJT ما می خواهیم جریان مدار صفر شود. (برخلاف محدود کننده جریان)

لذا جریان Q_3 باید صفر شود. برای این کار از سه دیود در امیتر Q_3 استفاده می کنیم.

حال جریان صفر شد مقدار R_4 را انتخاب می کنیم. به این ترتیب که جریان R_4 باید از $I_{E_{max}}$ المان UJT تجاوز نکند تا UJT نسوزد.

چون دیودها را در امیتر Q_3 قرار دادیم لذا ولتاژ روشن شدن UJT به صورت زیر تغییر می کند:

$$V_{B_3} = R_E \cdot I_{E_3} + V_{BE_3} + 3V_D \quad \longrightarrow$$

وقتی که جریان از $I_{L_{max}}$ بیشتر می شود $-V$ از $+V$ بیشتر شده و Op-Amp ما اشباع مثبت می رود و UJT روشن خواهد ماند. حال بار را از خروجی برداشتیم و می خواهیم دوباره مدار کار کند. در این حالت باز هم Op-Amp ما اشباع مثبت خواهد ماند، (با اینکه I_L صفر است). برای اینکه مدار کار کند باید UJT به نحوی خاموش شود که راههای متفاوتی برای خاموش کردن آن وجود دارد:

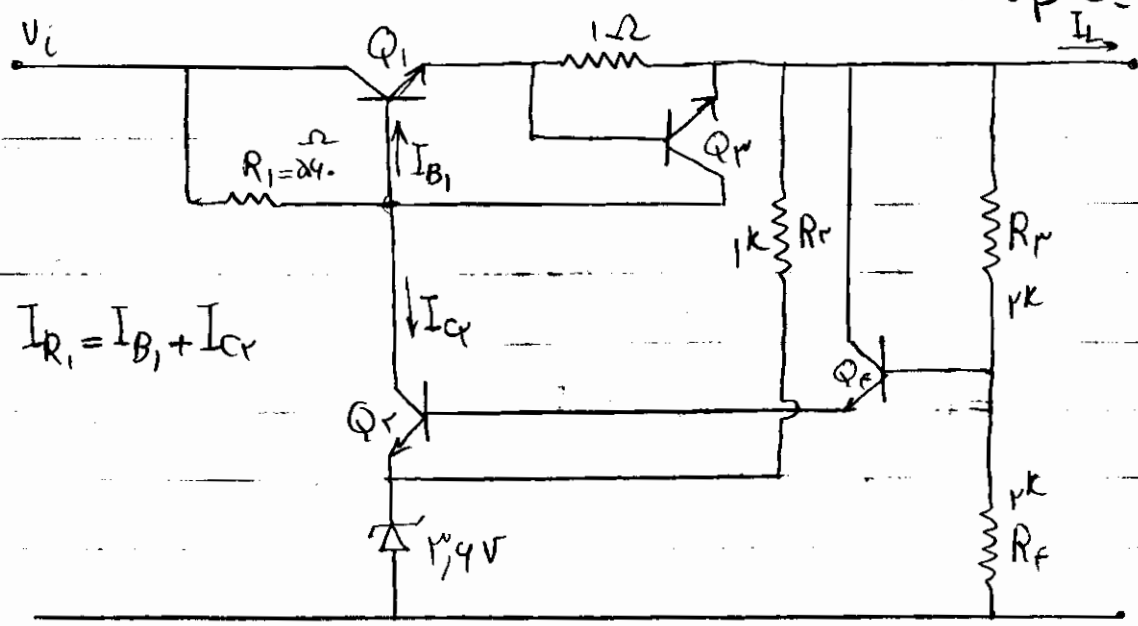
یک راه این است که یک کلید در امیتر UJT قرار دهیم و آن را باز کنیم که این راه مرسوم نیست. راه دیگر این است که V_{in} UJT را قطع کنیم.

برای تنظیم کردن مقدار $I_{L_{max}}$ (مثلاً به جای 2^A، 3^A) باید R_E را تغییر دهیم و برای اینکه UJT

هم در I_L جدید مثلاً 3^A قطع کند از ترکیب زنر و مقاومت استفاده می‌کنیم.

برای تولید V_i و V_- هم همانند محدود کننده جریان از ترانس و... استفاده می‌کنیم.

سوال پایان ترم: ...



الف- طرز کار مدار ... ب- ولتاژ V_o ... ج- جریان خروجی ماکزیمم $I_{L_{max}}$

$\beta = h_{fe} = 100$ ، $V_{BE} = 1V$ ... $I_{L_{max}}$ ⟵ $V_{i_{min}}$ ⟶

$V_{CE_{sat}} = 1/3$

وقتی می‌گوییم طرز کار مدار را توضیح دهید یعنی عاملی ولتاژ را از تثبیت خارج کند حال

توضیح می‌دهید که مدار چگونه ولتاژ را تثبیت می‌کند. R_3 و R_4 نمونه بردار و ولتاژ مرجع

زنر و Q_2 و Q_4 مقایسه کننده هستند R_2 برای بایاس زنر است. چون وقتی I_{C_2}

صفر می‌شود برای اینکه زنر روشن بماند از بایاس R_2 استفاده می‌کنیم. وقتی V_o کاهش

می‌یابد، V_{BE_4} کاهش می‌یابد و در نتیجه I_{B_2} کاهش خواهد یافت. کاهش I_{B_2} باعث کاهش

I_{C_2} می‌شود. با فرض ثابت بودن I_{R_1} درنتیجه I_{B_1} افزایش می‌یابد و نهایتاً I_L

افزایش و V_0 زیاد می‌شود. $V_{B_4} = V_0 \cdot \frac{R_4}{R_3+R_4} \longrightarrow V_0 = 10^V$

جریان خروجی ماکزیمم وقتی است که I_{C_2} صفر شود. اگر V_i را داده بود باید I_{R_1} را محاسبه و I_{B_1} را بدست می‌آوردیم. در اینجا محدودکننده جریان وجود دارد (Q_3) و لذا ماکزیمم جریان خروجی را Q_3 تعیین می‌کند. اگر به فرض V_{BE_3} برابر ۰/۷ باشد :

$$V_{BE_3} = I_{L_{max}} \times 1^{\Omega} \longrightarrow I_{L_{max}} = 0/7\,A$$

$$V_{E_1} = V_0 + 0/7 = 10/7V \quad (1)$$

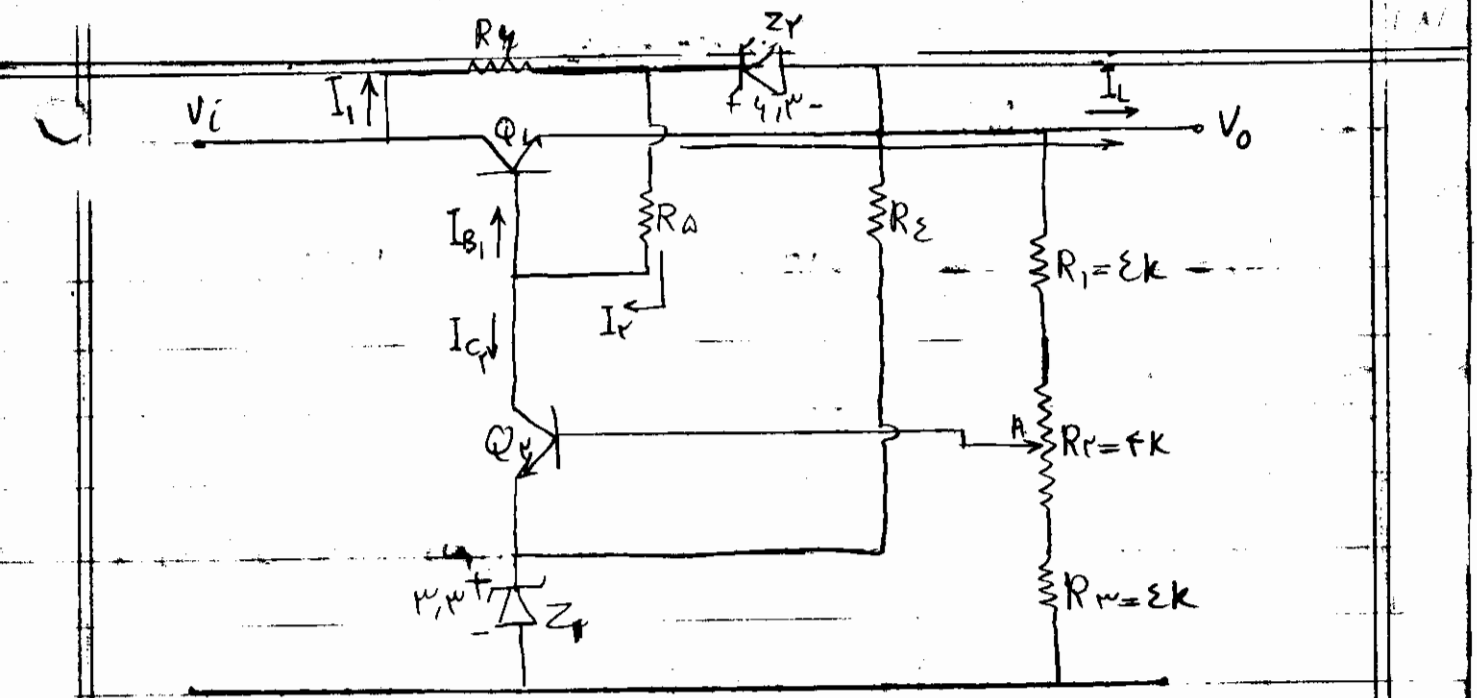
برای اینکه Q_1 وارد اشباع نشود پس V_i باید حداقل $\overbrace{10/7 + 0/3}^{(1)}{}^{V}$ باشد.

$$V_i = R_1 I_{R_1} + V_{BE_1} + 10/7V \quad \text{---------}$$

وقتی که $I_{L_{max}}$ از مدار می‌گذرد با فرض اینکه Q_2 عمل کرده و I_{C_2} صفر شده :

$$V_{i_{min}} = R_1 \cdot \frac{I_{L_{max}}}{\beta_1} + V_{BE_1} + 10/7V = 15/32^{V} \quad (2)$$

از (1) و (2) نتیجه می‌گیریم که : $V_{i_{min}} = 15/32^{V}$



الف) ثابت کنید مقدار I_2 ثابت است. با تغییرات ولتاژ خروجی ولتاژ ورودی ثابت است.

ب) با فرض I_2 ثابت طرز کار مدار را تعیین کنید. ج) محدوده تغییرات V_o را تعیین کنید.
با تغییر R_2

د) $I_{Zmax}=20^{mA}$ ، $I_{Zmin}=5^{mA}$ ، $R_5=5/6^{K}$ ، $25<V_i<30$

$?<R_1, R_2, R_3<?$

$$I_2=\frac{V_{R5}}{R_5}=\frac{(V_o+V_{Z2})-(V_o+V_{BE_1})}{R_5}=\frac{V_{Z2}-V_{BE_1}}{R_5}=ctte$$

اگر فرض کنیم که جریان شاخه‌های R_1، R_2، Z_2 ناچیز هستند. اگر V_o کاهش یابد نتیجه می‌گیریم که I_L کاهش یافته است. کاهش V_o باعث کاهش V_{B_2} و در نتیجه کاهش I_{C_2} می‌شود. چون I_2 ثابت است در نتیجه I_{B_1} افزایش می‌یابد. افزایش I_{B_1} افزایش I_L را به همراه خواهد داشت و در نتیجه V_o افزایش می‌یابد.

برای تعیین محدوده V_o، پتانسیومتر را از صفر تا مقدار ماکزیمم آن تغییر دهیم

در این صورت تغییرات ناچیزی در V_{B_2} اعمال می‌شود که قابل صرفنظرکردن است و عملاً V_{B_2} را ثابت می‌گیریم.

$$V_{B_2} = V_{Z_2} + V_{BE_2} = 4\ V$$

if $R_2 \rightsquigarrow max$:

$$V_A = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} V_O \quad (V_A = 4\ V)$$

$$\longrightarrow V_O = 6\ V$$

if $R_2 \rightsquigarrow min$:

$$V_A = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} V_O \longrightarrow V_O = 12\ V$$

د) درشرایط بحرانی باید حداقل جریان از R_4 گذشته وزنر را روشن نگه دارد :

$$\longrightarrow \begin{cases} I_{1min} = I_2 + I_{Z_2 min} \\ V_{R_4 min} = V_{i min} - (V_{O max} + V_{Z_2}) \end{cases}$$

$$I_2 = \frac{V_{Z_2} - V_{BE_2}}{R_5} = 1\ mA \longrightarrow I_{1min} = 6\ mA$$

دلیل اینکه در رابطه بالا $V_{O max}$ قرار می‌دهیم این است که : برای اینکه I_1 مینیمم شود باید V_{R_4} مینیمم شود یعنی ولتاژ سر راست آن ماکزیمم و ولتاژ سر چپ آن می‌نیمم شود.

$$\longrightarrow R_{4_{max}} = \frac{V_{R_4 min}}{I_{1\ min}} = 1{,}111\ k\Omega$$

$$\begin{cases} I_{1max} = I_2 + I_{Z_2 max} = 21\ mA \\ V_{R_4 max} = V_{i max} - (V_{O min} + V_{Z_2}) \end{cases}$$

$$\longrightarrow R_{4_{min}} = \frac{V_{R_4 max}}{I_{R_4 max}} = 843\ \Omega \longrightarrow 843\ \Omega < R_4 < 1111\ \Omega$$

شرایط بحرانی برای R_f وقتی است که مجموع جریان R_f و I_{C_2} به حد روشن شدن زنر برسند. لذا اگر I_{C_2} را صفر بگیریم می‌بینیم I_{R_f} بدست می‌آید:

for $R_{f\,max}$:

$$\begin{cases} V_{R_f\,min} = V_{O\,min} - V_{Z_1} \\ I_{Z_1\,min} = I_{C_2}^{\,0} + I_{R_f\,min} = 5\,mA \end{cases}$$

$$\longrightarrow R_{f\,max} = \frac{V_{R_f\,min}}{I_{R_f\,min}} = 540\ \Omega$$

for $R_{f\,min}$:

می‌بینیم R_f وقتی است که بیشترین جریان از زنر بگذرد. شرایط بحرانی وقتی است که هم I_{C_2} و هم I_{R_f} ماکزیمم باشند:

$$\begin{cases} V_{R_f\,max} = V_{O\,max} - V_{Z_1} \\ I_{Z_1\,max} = I_{C_2\,max} + I_{R_f\,max} \end{cases}$$

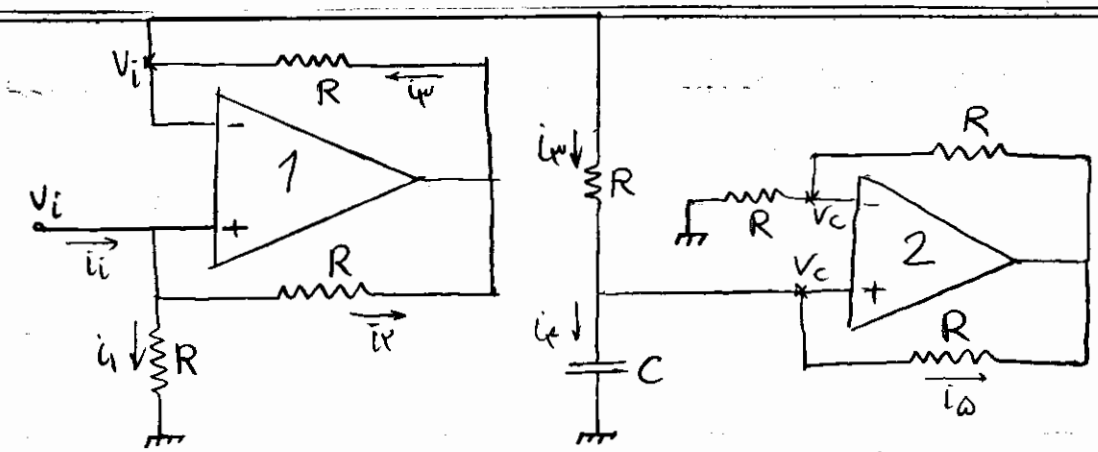
$I_{Z_1\,max} = 20\,mA$, $I_{C_2\,max} = 1\,mA$

اگر β ترانزیستورها را داشتیم باید I_{R_1} و I_{R_f} را جمع زده و بر β تقسیم می‌کردیم.

در این حالت I_{C_2} ماکزیمم بدست می‌آمد. امّا در اینجا با صرفنظر کردن از I_{R_1} و I_{R_f} فرض می‌کنیم ماکزیمم I_{C_2} با صفر شدن I_L اتفاق می‌افتد.

$$R_{f\,min} = \frac{V_{R_f\,max}}{I_{R_f\,max}} = 458\ \Omega$$

$$\longrightarrow 458\ \Omega \leq R_f \leq 540\ \Omega$$



Z_i رابیست آورده وثابت کنید مدار به عنوان یک ژیراتور عمل می کند .

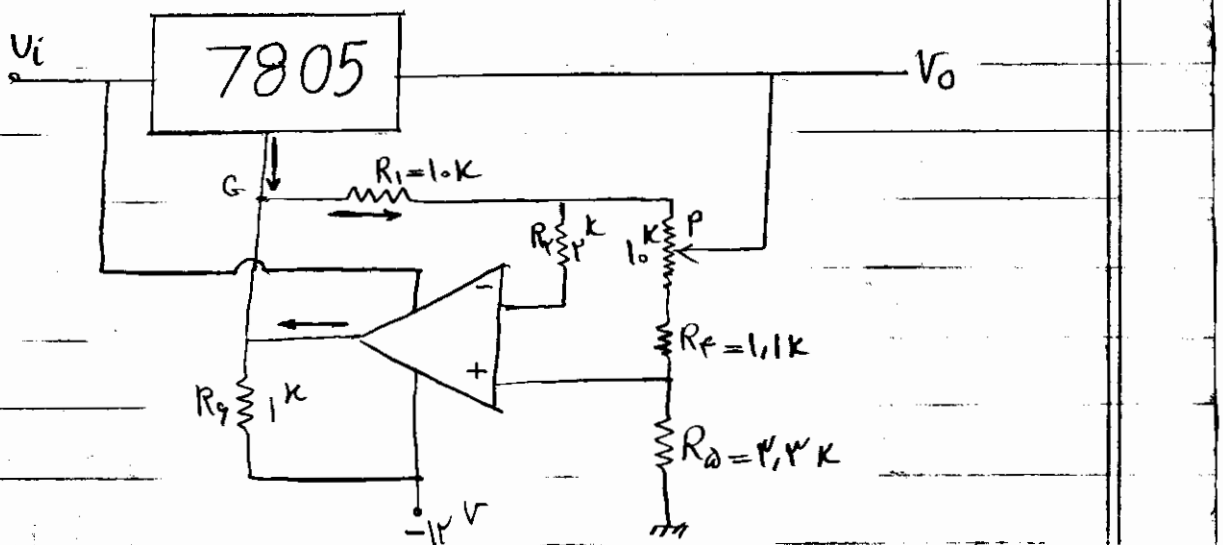
$$Z_i = \frac{V_i}{i_i} = \frac{V_i}{i_1 + i_2} \quad , \quad V_{O2} = (1 + \frac{R}{R})V_C = 2V_C$$

$$i_3 = i_4 + i_5 \quad , \quad \frac{V_i - V_C}{R} = i_3 = \frac{V_C}{\frac{1}{CS}} + \frac{V_C - 2V_C}{R}$$

$$\longrightarrow \quad V_C = \frac{V_i}{RCS} \quad , \quad i_3 = \frac{V_i - V_C}{R} = \frac{V_i - \frac{V_i}{RCS}}{R}$$

$$V_{O1} = R i_3 + V_i \quad , \quad i_2 = \frac{V_i - V_{O1}}{R} \quad , \quad i_1 = \frac{V_i}{R}$$

$$\longrightarrow \quad Z_i = \frac{V_i}{i_i} = R^2 CS \quad \longrightarrow \quad L = R^2 C$$



در مدار رگولاتور شکل بالا، مینیمم و ماکزیمم V_o را به ازاء تغییرات P بدست آورید.

(تمام المان های مدار در ناحیه خطی کار می کنند)

اگر P در وضعیت مینیمم باشد:

$$V_o = V_G + 5^V$$

$$V_G = V_o\left(-\frac{R_1}{P}\right) + V_+\left(1+\frac{R_1}{P}\right)$$

$$V_+ = V_o\left(\frac{R_5}{R_4+R_5}\right), \quad V_G = V_o - 5$$

$$\longrightarrow V_o = 10{,}75^V$$

اگر P در وضعیت ماکزیمم باشد:

المان ها در ناحیه خطی هستند $\longrightarrow V_- = V_+$

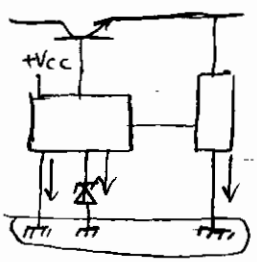
$$\longrightarrow V_o = V_o\frac{R_5}{R_5+R_4+P} \longrightarrow V_o = 0$$

$$V_G = -5^V$$

$$\longrightarrow 0 \leq V_o \leq 10{,}75$$

برای اینکه V_o صفر شود باید V_G برابر -5 باشد. لذا وجود تغذیه منفی ضروری است. سوال: مقاومت R_6 چرا حتماً نیاز است؟

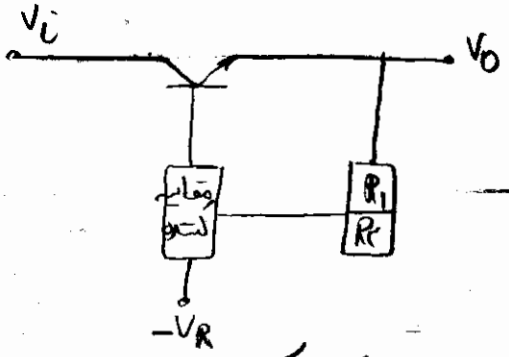
با توجه به ساختمان داخلی 7805:



با توجه به اینکه سه جریان همواره وارد G می‌شوند، پس همیشه جریانی از G

رو به پائین سرازیر می‌شود. از طرفی یک جریان هم از خروجی Op-Amp به سمت خارج می‌آید. جریان R_1 هم با اینکه به سمت راست است ولی ثابت و تعیین شده است لذا نیاز به یک مسیر جریان داریم که توسط R_f بوجود می‌آید. لذا R_f برای بایاس کردن مدار ضرورت دارد.

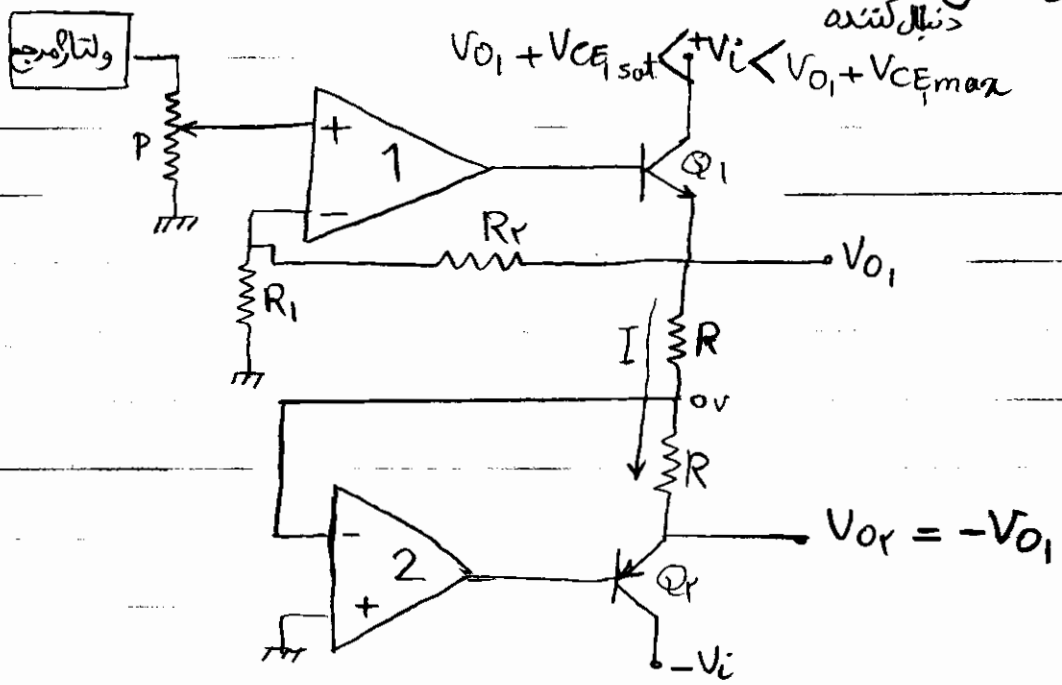
باتوجه به ساختار رگولاتور ولتاژ:



$$V_R = V_O \frac{R_2}{R_1+R_2}$$

با تغییر R_1 یا V_R می‌توان V_O را تنظیم کرد. در مدارهایی که تاکنون دیدیم R_1 را تغییر می‌دادیم حال با تغییر V_R خروجی را تنظیم می‌کنیم.

رگولاتور Tracking: دنبال کننده

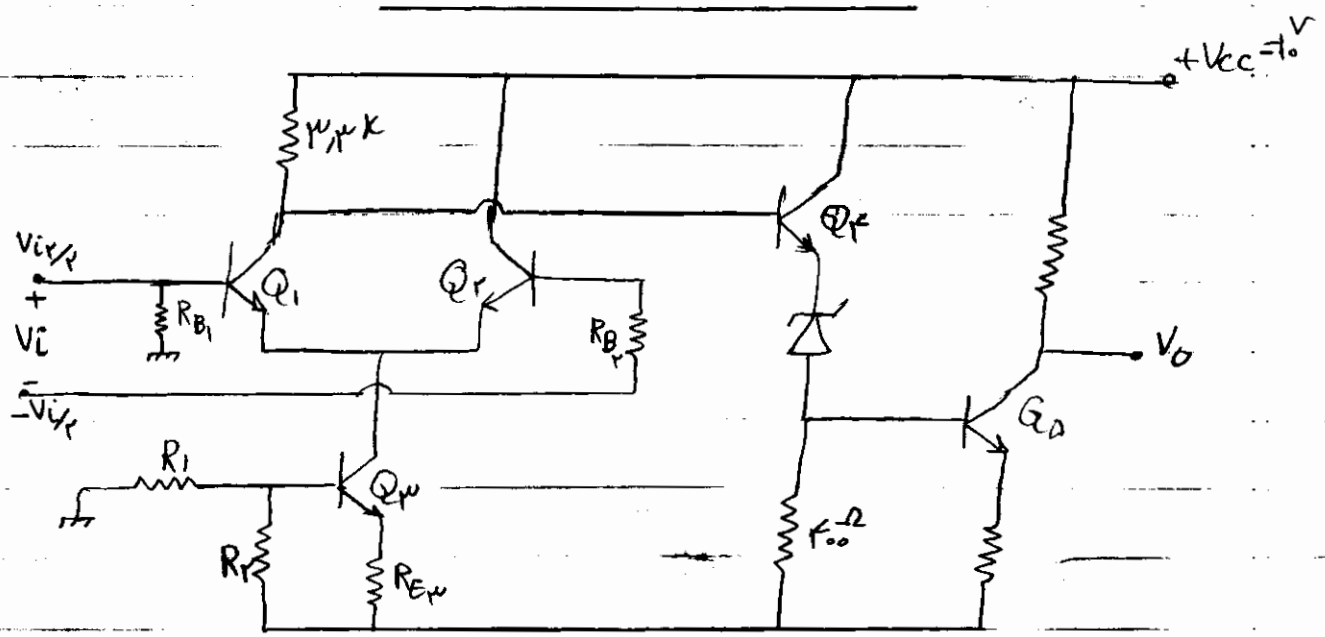


if $R_1 = R_2$, $V_R = 5\,V$

به این دلیل به آن دنبال‌کننده می‌گوئیم که V_{O2} دقیقاً V_{O1} را دنبال می‌کند. یعنی هر تغییری که در V_{O1} بوجود آید به همان شکل در V_{O2} بوجود خواهد آمد.

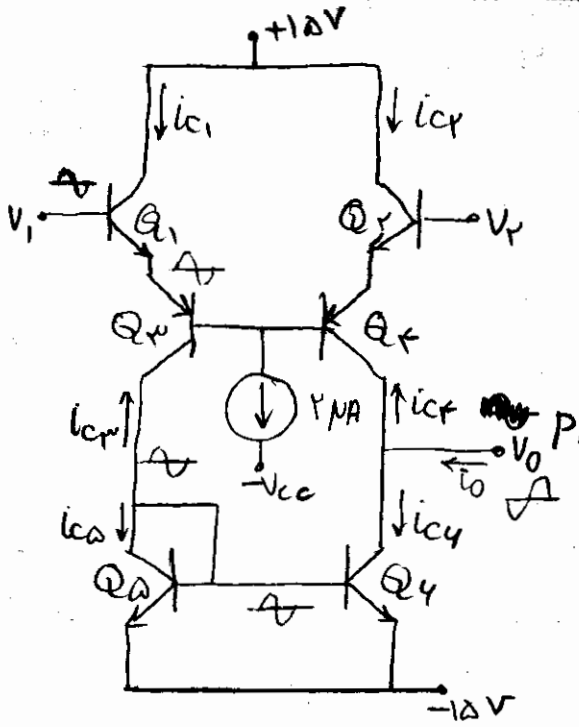
$$V_- = \frac{R_1}{R_1+R_2} \times V_O = 5 \quad \begin{cases} V_i > V_{O1} \\ |-V_i| > |V_{O2}| \end{cases}$$

$$\longrightarrow V_{O1} = 10^V = V_O$$



$$\frac{h_{fe} \cdot R_c}{R_{id} = 2h_{ie} + R_{B2}}$$

پایان ترم سال ۷۲ :



NPN : $\beta = h_{fe} = ۲۵۰$
$\eta V_T = ۲۵\ mV$
$h_{oe} = \frac{I_C}{۲۰۰}$

PNP : $h_{fe} = \beta = ۱۵۰$
$\eta V_T = ۲۵\ mV$
$h_{oe} = \frac{I_C}{۱۰۰}$

$A_d = \frac{V_o}{V_1 - V_2} = ?$

if $V_1 = -V_2 = V$:

$\longrightarrow I_{B_3} = I_{B_4} = ۱\ \mu A \longrightarrow I_{C_3} \simeq I_{C_1} \simeq I_{C_5} = ۲۵۰\ \mu A$

$\longrightarrow h_{ie_1} = \frac{\eta V_T \beta_1}{I_{C_1}}$, $h_{ie_3} = \frac{\eta V_T \beta_3}{I_{C_3}}$

$i_o = i_{C_4} + i_{C_4}$, $i_{C_1} = -i_{C_3} = i_{C_5} = i_{C_4}$

$\longrightarrow i_o = i_{C_4} + i_{C_1}$; بعلت تقارن : $i_{C_4} = -i_{C_2}$

$\longrightarrow i_o = i_{C_1} - i_{C_2}$

$A_d = \frac{V_o}{V_{i_1} - V_{i_2}} = \frac{V_o}{۲V}$, $i_{b_1} = \frac{V}{h_{ie_1} + h_{ie_2}}$

$\longrightarrow i_{C_1} = \frac{h_{fe_1} \cdot V}{h_{ie_1} + h_{ie_2}} = \frac{h_{fe_1} \cdot V}{۲ h_{ie_1}}$

$R_{i_{b_1}} = \left(h_{ie_1} + \frac{h_{ie_3}}{\beta_3} \cdot \beta_1\right) = \left(h_{ie_1} + \frac{\eta V_T \beta_3}{I_{C_3} \beta_3} \cdot \beta_1\right) = ۱ h_{ie_1}$

$R_{ib_2} = R_{ib_1} \longrightarrow i_{b_2} = \frac{-}{h_{ie_1}}$

$\longrightarrow i_{C_2} = -\frac{h_{fe_1} v}{h_{ie_1}}$

$\longrightarrow i_o = \frac{h_{fe_1} v}{h_{ie_1}} + \frac{h_{fe_1} v}{h_{ie_1}} \longrightarrow i_o = \left(\frac{h_{fe_1}}{h_{ie_1}}\right) g_m v$

$V_o = -R_o i_o = -R_o g_m v$

$A_d = \frac{V_o}{v} = \frac{-R_o g_m v}{v} = \frac{-R_o g_m}{2} \longrightarrow \boxed{A_d = \frac{-R_o g_m}{2}}$

با تست کردن فازسنگینالها (با توجه بمشکل) به درستی علامت منفی در A_d پی می بریم

با فرض صفر شدن منابع :

$R_o = R_{C_2} \parallel R_{Q_4}$

$R_{Q_4} = \frac{1}{r_{oer}} \left[1 + \frac{h_{ie_4} \cdot \frac{h_{ier}}{1+h_{fer}}}{h_{ie_4} + \frac{h_{ier}}{1+h_{fer}} + 0} \right]$

$R_{C_2} = \frac{1}{r_{oe_2}}$