3. Referenzquellen.

$$I_C(U_{BE},T) = I_S(T)\exp\left[\frac{U_{BE}}{U_T(T)}\right]$$

其中 $I_S(T) = I_S(T_0)\left(\frac{T}{T_0}\right)^{XT1}\cdot\exp\left[\left(\frac{T}{T_0}-1\right)\frac{U_G(T)}{U_T(T)}\right]$ ← meist 1.12V.

$$U_{BE}(T) = U_T(T)\ln\frac{I_C(T)}{I_S(T)} \qquad I_s = bT^{4+m}\exp\frac{-E_g}{kT}$$

Entwicklung von Taylor.

I_C 为常数.

$$\frac{\partial U_{BE}}{\partial T} = \frac{\partial V_T}{\partial T}\ln\frac{I_c}{I_s} - V_T\cdot\frac{I_S(T)}{\boxed{I_C(T)}}\cdot -I_C(T)\cdot\frac{1}{I_S(T)^2}\frac{\partial I_s}{\partial T}$$

$$\frac{\partial U_{BE}}{\partial T} = \cancel{\frac{V_T}{T}\ln\frac{I_c}{I_s} - (4+m)\frac{V_T}{T}} = \frac{\partial V_T}{\partial T}\ln\frac{I_c}{I_s} - \frac{V_T}{I_s}\frac{\partial I_s}{\partial T}$$ 常数.

$$\frac{V_{BE}-(4+m)V_T - E_g/q}{T}$$

其中 $(4+m) = XT1$. $U_G = \frac{E_g}{q}$ 定值.

$$= -\frac{U_G - U_{BE}(T_0) + XT1\,U_{T0}}{T_0} \approx -1.66\,mV/K.$$ (可取一般 $-1.5\,mV$)

线性近似

$$\cancel{U_{BE}(T) = U_{BE}(T_0) + \frac{\partial U_{BE}}{\partial T}\cdot T}$$

$$\cancel{= U_{BE}(T_0) - \left[\frac{U_G - U_{BE}(T_0) + XT1\,U_{T0}}{T_0}\right]T.}$$

$$\cancel{U_{BE}(T_0) = bT^{4+m}\exp\frac{-E_g}{kT}\cdot U_T(T)\ln\frac{I_C(T)}{I_S(T)} - U_T(T)\ln bT^{(4+m)}\exp\frac{-E_g}{kT}}$$

$$U_{BE}(T) = U_T\cdot\ln\frac{I_C}{I_S(T)}$$

$$U_{BE}(T_0) = \frac{\partial U_{BE}}{\partial T_0}\cdot T_0 + (4+m)V_{T0} + \frac{E_g}{q}$$

$$U_{BE} = U_{BE}(T_0) + \frac{\partial U}{\partial T}\Big|_{T=T_0}(T-T_0)$$

$$= U_{BE}(T_0) + \frac{\partial U_T}{\partial T}\Big|_{T=T_0}\cdot T - \frac{\partial U_T}{\partial T}\Big|_{T=T_0}\cdot T_0$$

$$= (4+m)V_{T0} + \frac{E_g}{q} + -\frac{U_G - U_{BE}(T_0) + XT1\,U_{T0}}{T_0}\cdot T$$

$(4+m)$, E_g

$$= U_{BE}(T_0)\frac{T}{T_0} - U_G\left(\frac{T}{T_0}-1\right) - XT1\,U_{T0}\left(\frac{T}{T_0}-1\right)$$

未近似则为 $\ln\frac{T}{T_0}$

这是线性近似. $\ln x \sim x-1$.

考虑 I_C 为温度为正比

则推导后为 $$\frac{\partial V_{BE}}{\partial T} = \frac{V_{BE} - (3+m)V_T - E_g/q}{T}$$

$$= \frac{V_{BE} - (XTI-1)V_T - U_G}{T}$$, 通常为 $-1.57\,mV/K$.

带隙基准. 用负温度系数 + 正温度系数, 使其 $\frac{\partial U}{\partial T} = 0$.

正温度. $V_{BE1} - V_{BE2} = V_T\ln\frac{nI_0}{I_{C1}} - V_T\ln\frac{I_0}{I_{C2}} = V_T\ln n \Rightarrow \frac{\partial U_{BE}}{\partial T} = \frac{k}{q}\cdot\ln n$

若 $I_C = \dfrac{V_{BE1} - V_{BE2}}{R}$ 则 $I_C \propto V_T \ln n$ 与温度成正比

带隙基准中

$V_{REF} = a_1 V_{BE} + a_2 (V_T \ln n)$

若取 $a_1 = 1$. $\left.\dfrac{\partial V_{BE}}{\partial T}\right|_{T=300K}$ 时约为 $-1.6\,\mathrm{mV/K}$. $\Rightarrow a_2 \ln n \approx 17.2$.

$V_{REF} \approx V_{BE} + 17.2 \cdot V_T \approx 1.25V$. 而由 $\dfrac{\partial V_{REF}}{\partial T} = \dfrac{\partial V_{BE}}{\partial T} + \dfrac{V_T}{T}\ln n$

$\Rightarrow V_{REF} = \dfrac{E_g}{q} + (4+m) V_T$. 所以称为带隙基准 (忽略了 I_C/T. 若考虑 I_C. 则为 $(x\,T[-1])$

对于 $I_C \propto V_{BE}$.

$$\left.\frac{dU_{BE}}{dT}\right|_{T=T_0} = -U_{BE}(T_0)\frac{U_g - U_{BE}(T_0) + X T_1 U_{T_0}}{T_0\,[U_{BE}(T_0) - U_{T_0}]} = -1.724\,\mathrm{mV/K}.$$

$$\frac{1}{U_{BE}(T)} \cdot \left.\frac{\partial U_{BE}}{\partial T}\right|_{T=0} = -2460\,\frac{\mathrm{ppm}}{K}.$$

$U_{BE}(0) = 1.25V \pm 100mV$

电流源·电压源

$$I_0 = \frac{U_{BE}}{R}.$$

$$\frac{\partial I_0}{\partial T} = \frac{1}{R}\cdot\frac{\partial U_{BE}}{\partial T} - \frac{1}{R^2}\frac{\partial R}{\partial T}U_{BE}.$$

$$\frac{1}{I_0}\frac{\partial I_0}{\partial T} = \frac{1}{U_{BE}}\frac{\partial U_{BE}}{\partial T} - \frac{1}{R}\frac{\partial R}{\partial T}.$$

Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik — Dr.-Ing. Stefan Schumann

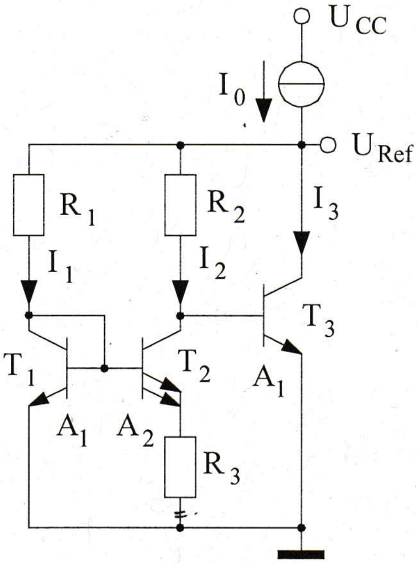
Probeklausur "Integrierte Analogschaltungen" — 18.12.2019

Name, Vorname ....Jiakang Weng....

Punkte: 1 / 7 Note: 5

Für alle Lösungen muss die Formel und der Zahlenwert (falls gegeben) angegeben werden.

Aufgabe: Widlar-Bandgap-Referenz (7 Punkte)



$A_2 = 16\,A_1$, XTI = 3, $U_G = 1{,}12$ V,

$T_0 = 300$ K, $U_{T0} = 25{,}86$ mV, $U_{BE10} = 650$ mV,

$I_0 = 100\ \mu A$, $R_1 = R_2$, $R_3 = 2{,}4\ k\Omega$

$R_{1,2,3}$ temperaturunabhängig, $B_F >> 1$, $U_Y >> U_{CB}$

$$\left.\frac{1}{I_1}\frac{dI_1}{dT}\right|_{T=T_0} = \frac{1}{T_0} = 3{,}33 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

$$\left.\frac{dU_{BE1}(T)}{dT}\right|_{T=T_0} = -\frac{U_G - U_{BE10} + (XTI-1)\cdot U_{T0}}{T_0}$$

Die Schaltung realisiert gleiche und konstante Ströme durch die Widerstände in guter Näherung ohne Operationsverstärker oder Stromspiegel.

1. Berechnen Sie den Strom I_{R30} und runden Sie auf ganze µA-Werte.
2. Berechnen Sie den linearen Temperaturkoeffizienten der Spannung U_{BE1} zahlenmäßig.
3. Geben Sie eine Gleichung für U_{Ref} an (Masche über T_1).
4. Berechnen Sie mit der Bedingung eines verschwindenden Temperaturkoeffizienten für U_{Ref} die Größen R_1 und U_{Ref}.

1. Ansatz: $I_2 \cdot R_3 + U_{BE20} = U_{BE10}$ ✓, $I_2 = I_s \exp(\frac{U_{BE}}{U_T} - 1)$

$\Rightarrow U_{BE20} = U_T \ln \frac{I_2}{I_S}$ $\Rightarrow$ $U_{BE20} = 2U_{BE10}$. $I_1 = I_s \exp(\frac{U_{BE}}{U_T} - 1)$

$I_1 =$ $I_2 =$, $I_{R30} = I_0 - I_1 - I_2$.

$I_{R30} =$ 1 / 2 P

2. $\frac{dU_{BE1}}{dT} =$ 0 / 1 P

3. $U_{Ref} =$ 0 / 1 P

Probeklausur.

1. $\boxed{U_{BE1} = U_{BE2} + I_{R30} R_3 \quad , \quad I_1 = I_2}$

$\cancel{I_3 \Rightarrow V_T \ln \frac{A}{A} = U_{T0} \cdot \ln \frac{1}{16} =}$

$$I_{R30} = \frac{V_T}{R_3} \ln \frac{A_2}{A_1} = \frac{25.86\,mV}{2.4\,k\Omega} \cdot \ln 16 = 29.87\,\mu A.$$

2. $$\left.\frac{dU_{BE}}{dT}\right|_{T=T_0} = -\frac{U_G - U_{BE10} + (XTI - 1) U_{T0}}{T_0}$$

$$= -\frac{1.12V - 650mV + 2 \times 25.86mV}{300K}$$

$$= -1.73\,mV/K.$$

3. $$\boxed{\begin{aligned} U_{REF1} &= \frac{E_g}{q} + (4+m) V_T \quad U_{REF} \\ &= U_g + XTI \cdot V_T \\ &= 1.178V \end{aligned}}$$

$(4+m-1)$

$U_{REF} = U_{BE1} + R_1 I_1$

4. $$\left.\frac{dU_{REF}(T)}{dT}\right|_{T=0} = \left.\frac{dU_{BE1}}{dT}\right|_{T=T_0} + R_1 \frac{dI_1}{dT}$$

$$= -\frac{U_G - U_{BE10} + (XT1 - 1) U_{T0}}{T_0} + R_1 \cdot \frac{I_1}{T_0} \leftarrow \frac{k}{qR_3} \ln \frac{A_2}{A_1}$$

$$R_1 = \frac{-U_{BE10} + U_g + (XTI - 1) U_{T0}}{I_1}.$$

$$\Rightarrow I_1 R_1 + U_{BE10} = U_g + (XTI - 1) U_{T0}$$

$$= 1.12V + 2 \cdot 25.86mV.$$

$$= 1.171V.$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{U_{REF} - U_{BE10}}{I_1}$$

$$= 174.7\,k\Omega$$

Aufgabe RE-01.

1. $I_1 = I_2 = \frac{I_{cc}}{2} = 75\,uA$.

$R_1 = \frac{V_T}{I_1} \ln \frac{A_2}{A_1} = 857\,\Omega$.

2.

$$\frac{1}{I_{1.2}} \frac{dI_{1.2}}{dT}\Big|_{T=T_0} = \frac{1}{U_{BE1}} \frac{dU_{BE1}}{dT}\Big|_{T=T_0} - \frac{1}{R_3}\frac{dR_3}{dT}\Big|_{T=T_0}$$
$$= \frac{1}{T_0}$$

Nachweis für 1.

$$I_1R_1 = U_{BE1} - U_{BE2} = U_{T_0}\ln\frac{I_1}{I_{S1}} - U_{T_0}\ln\frac{I_2}{I_{S2}} = U_{T_0}\ln\frac{I_{S2}}{I_{S1}} = U_{T_0}\ln\frac{A_2}{A_1}$$

Nachweis für 2.

$$\frac{dI_{1.2}}{dT}\Big|_{T=T_0} = \frac{dU_{T_0}}{dT}\cdot\ln\frac{A_2}{A_1}.$$ R_1 ist unabhängig von Temp.

$$= \frac{k}{q}\ln\frac{A_2}{A_1}\cdot\frac{T_0}{T_0} = \frac{I_{1.2}}{T_0} \Rightarrow \frac{1}{I_{1.2}}\frac{dI_{1.1}}{dT} = \frac{1}{T_0}$$

RE-02.

1) T_7, T_8, T_3 ist die Anlaufschaltung. Geben T_3 eine Spannung.
danach ideal Situation will die T_8 gesperrt sein. und die Schaltung ganz funktionieren.

2. ~~ΔU_{DD}~~ wenn nicht, würde die U_{DD} eine Wirklung für ~~Spr~~ Stromquelle.
~~ΔU_{DD}~~ die Strom ist abhänig von ΔU_{DD}.

3. $R_1 = \frac{U_{T_0}}{I_1}\ln\frac{A_2}{A_1} = \frac{25.86\,mV}{20\,uA}\ln 16 = 3.58\,k\Omega$.

RE-03.

1. $I_{1,2}$ ist abhängig von ~~U_{BE} und I_C und I_S~~ U_T und R_1.

$$U_{BE} = U_T \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right) = U_T(T)\left[\ln I_C(T) - \ln I_S(T)\right].$$

$$I_S(T) = I_S(T_0)\left(\frac{T}{T_0}\right)^{XTI}\exp\left[\left(\frac{T}{T_0}-1\right)\frac{U_G(T)}{U_T}\right].$$

$$\Rightarrow I_S(T) = bT^{4+m}\exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)$$

$$\frac{\partial V_{BE}}{\partial T} = \frac{\partial V_T}{\partial T}\ln\frac{I_C}{I_S} + U_T\frac{\partial I_C}{\partial T}\frac{1}{I_C} - U_T\frac{1}{I_S}\frac{\partial I_S}{\partial T}$$

$$= \frac{U_T}{T}\ln\frac{I_C}{I_S} + U_T\cdot\frac{1}{T} - U_T\cdot\frac{(4+m)bT^{4+m}\exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)/T + bT^{4+m}\exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)\cdot\frac{-E_g}{kT^2}}{bT^{4+m}\exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)}$$

$$= \frac{U_{BE}(T)}{T} + \frac{U_T}{T} - \frac{U_T\cdot(4+m)}{T} + \frac{U_T}{T}\cdot\frac{U_g}{U_T}$$

$$= \frac{U_{BE}(T) - (4+m-1)U_T + U_g}{T}, \quad XTI = 4+m.$$

$$U_{BE}(T) = (XTI-1)U_T - U_g + T\cdot\frac{\partial U_{BE}}{\partial T}$$

2. ~~I_{REF}~~

$$U_{REF} = 2I_1\cdot R_2 + U_{BE1}$$

$$= 2\frac{R_2}{R_1}U_T\ln\frac{A_2}{A_1} + U_{BE1} \qquad \left.\frac{\partial U_{REF}}{\partial T}\right|_{T=T_0} = 0.$$

$$\Rightarrow \frac{U_{BE10}-(XTI-1)U_{T_0}+U_g}{T_0} + 2\frac{R_2}{R_1}\frac{U_{T0}}{T_0} = 0.$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{-U_{BE10}+(XTI-1)U_{T0}-U_g}{2U_{T0}}.$$

3. $U_{REF} = U_g + (XTI-1)U_T$

RE-04.

1. $I_1 \approx I_3$, ~~gleiche U_{BE}~~ und $T_1 \approx T_3$. $U_{BE1} \approx U_{BE3}$.
   $U_{C1} = U_{B1}$, $U_{C2} = U_{B3}$. $\Rightarrow U_{C1} \approx U_{C2}$. $\Rightarrow I_1 = I_2 = \frac{U_{CC}-U_C}{R}$.
2. Probeklausur 1.
3. $\left.\frac{\partial U_{BE1}}{\partial T_1}\right|_{T=T_0} = \frac{U_{BE10}-(XT1-1)U_{T0}+U_g}{T_0}$
4. $\frac{\partial I_1}{\partial T} = \frac{I_1}{T_0}$
5. Probeklausur 3.
6. Probeklausur 4.
7. $I_0 = I_{REF} + I_{R1} + I_{R2} + I_3$
   $I_{R1} = I_{R2}$. $\Rightarrow I_0 = 2I_{R1} + I_3 + I_{REF}$.

$$\frac{U_{R20}-U_{R10}}{U_{R10}} = \frac{U_{BE3}-U_{BE1}}{\cancel{U_{R10}}\,U_{BE1}} = \frac{U_T\ln\frac{I_3}{I_S} - U_T\ln\frac{I_1}{I_S}}{U_{R10}}$$

$$= \frac{U_T\ln\frac{I_3}{I_1}}{U_{R10}} = -\frac{U_T}{U_{R10}}\cdot\ln\frac{I_{10}}{I_0-2I_{10}-I_{REF}}$$