

Exercícios Sedra Ed. 3

D.8.66 – Um amplificador com múltiplos pólos, sendo o primeiro em 2 MHz, e ganho em malha aberta, em DC, de 80 dB deve ser compensado para em ganho unitário em malha fechada, pela introdução de um novo pólo dominante. Em que frequência deve ser posicionado este novo pólo?

D.8.67 – Para o amplificador do problema 8.66, em vez de introduzir um novo pólo dominante, vamos usar uma capacitância adicional no nó onde o primeiro pólo é formado, para reduzir a frequência do primeiro pólo. Se a frequência do segundo pólo é 10 MHz e se mantém inalterada com a introdução do capacitor, encontre a frequência onde deve ser posicionado o primeiro pólo de modo que o amplificador seja estável com ganho em malha fechada unitário. Qual é o fator de incremento do capacitor?

8.68 – Analise os efeitos do “pole splitting” considerando as equações 8.58 e 8.59 (para ω'_{p1} e ω'_{p2}) sob as seguintes condições: $R_1 \approx R_2 = R$, $C_2 \approx C_1/10 = C$, $C_f \gg C_{eq}$ e $g_m = 100/R$. Calcule ω'_{p1} , ω'_{p2} , ω_{p1} , e ω_{p2} .

D.8.69 – Um amp-op com ganho de tensão em malha aberta de 10^4 e pólos em 10^5 , 10^6 e 10^7 Hz, deve ser compensado com a adição de um quarto pólo dominante para operar de modo estável com realimentação unitária ($\beta=1$). Qual a frequência de posicionamento do pólo dominante? O circuito de compensação consiste de um passa-baixas RC colocado no caminho de realimentação negativa. As condições de polarização são tais que pode ser tolerado um resistor de $1M\Omega$ em série com cada um dos terminais de entrada. Qual o capacitor necessário entre a entrada negativa e terra para implementar o quarto pólo?

D.8.70 – Um amp-op com ganho de tensão em malha aberta de 80 dB e pólos em 10^5 , 10^6 e 2×10^6 Hz deve ser compensado para que fique estável para β unitário. Assuma que o amp-op incorpora um amplificador equivalente ao da fig. 8.40, com $C_1=150$ pF, $C_2=5$ pF e $g_m=40$ mA/V; f_{p1} é causado pelo circuito de entrada e f_{p2} pelo circuito de saída do amplificador. Encontre o valor da capacitância Miller de compensação e a nova frequência do pólo de saída.

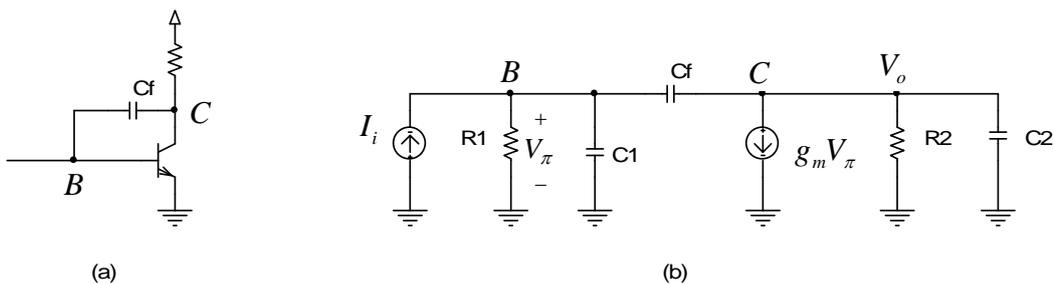
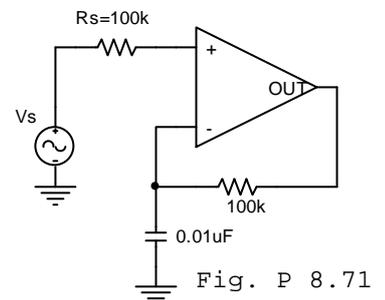


Fig.8.40 (a) Um estágio com ganho em um amplificador de múltiplos estágios com um capacitor de compensação conectado no elo de realimentação e (b) circuito equivalente.

8.71 – O amp-op do circuito da fig. 8.71 tem ganho de tensão em malha aberta de 10^5 e apenas um pólo em $\omega=10$ rad/s.

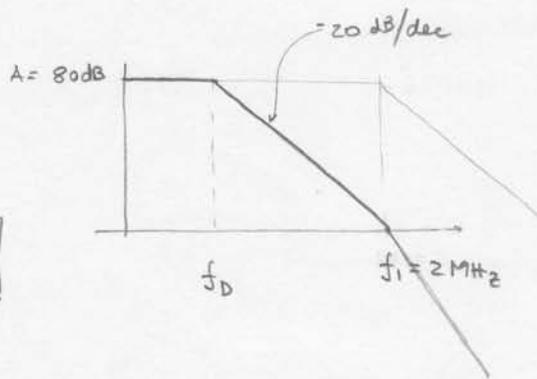
- Esboce o gráfico de Bode do “loop gain” (βA);
- Encontre a frequência na qual $|\beta A|=1$ e encontre a margem de fase;
- Encontre a função de transferência, incluindo pólos e zeros. Esboce o gráfico de pólos e zeros e o gráfico de Bode marcando os parâmetros importantes.



D.8.66

$$f_D = \frac{f_1}{10^{\frac{A_s}{20} \text{ dB}}} = \frac{2 \text{ MHz}}{10^{\frac{20}{20}}}$$

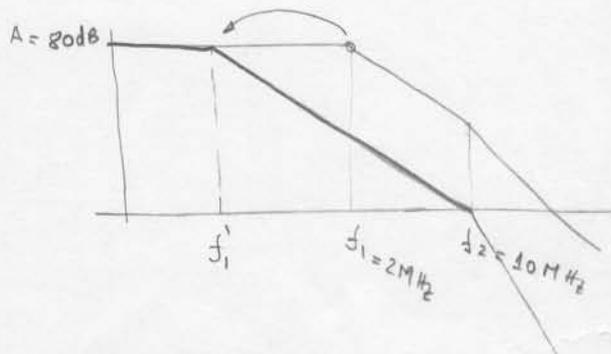
$$f_D = \frac{2 \times 10^6}{10^4} \Rightarrow \boxed{f_D = 200 \text{ Hz}}$$



D.8.67

$$f_1' = \frac{f_2}{10^{\frac{A}{20}}} = \frac{10 \times 10^6}{10^4}$$

$$\boxed{f_1' = 1000 \text{ Hz}}$$



$$\frac{f_1}{f_1'} = \frac{\frac{1}{2\pi RC}}{\frac{1}{2\pi RC'}} = \frac{C'}{C} = \frac{2 \times 10^6}{10^3}$$

$$\boxed{C' = 2000 C}$$

8.68

$$R_1 = R_2 = R$$

$$\omega_1 = \frac{1}{R_1 C_1} = \frac{1}{10 RC}$$

$$C_2 = \frac{C_1}{10} = C$$

$$\omega_2 = \frac{1}{R_2 C_2} = \frac{1}{RC}$$

$$C_f \gg C$$

$$g_m = \frac{100}{R}$$

$$\omega_1' = \frac{1}{g_m R_2 C_f R_1} = \frac{1}{\frac{100}{R} \cdot R \cdot C_f \cdot R} = \frac{1}{100 C_f R}$$

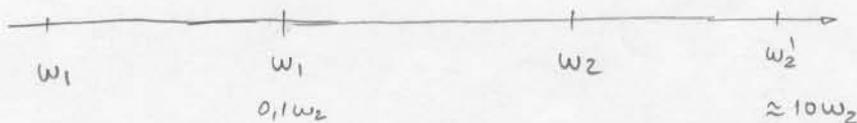
$$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 \frac{C_1}{10}}{C_1 + \frac{C_1}{10}}$$

$$\omega_2' = \frac{1}{\frac{1}{g_m} (C_1 + C_2) \left[1 + \frac{C_{eq}}{C_f} \right]} = \frac{1}{\frac{R}{100} (10C + C) \left[1 + \frac{10C}{11 C_f} \right]}$$

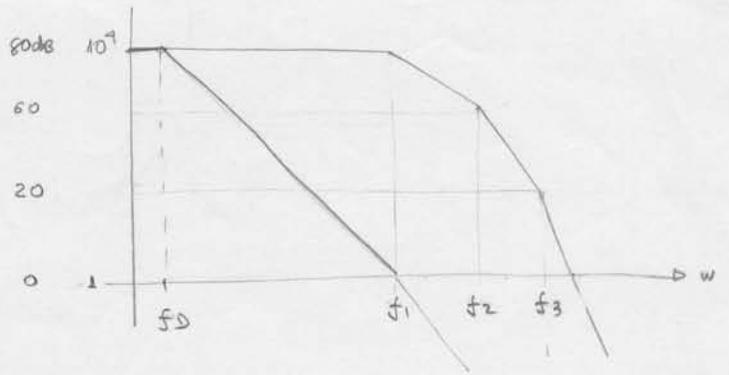
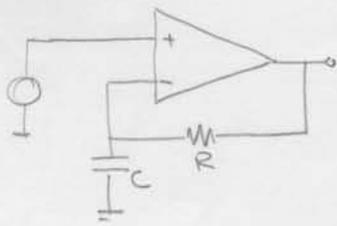
$$C_{eq} = \frac{1}{11} C_1 =$$

$$C_{eq} = \frac{10}{11} C$$

$$\omega_2' \approx \frac{1}{\frac{11}{100} RC} = \frac{100}{11 RC} = \frac{9.1}{RC}$$



D.8.69



$A = 10^4 \Rightarrow A = 20 \log 10^4 = 80 \text{ dB}$

$$f_0 = \frac{f_1}{10 \frac{A}{20}} = \frac{10^5}{10 \frac{80}{20}} = \frac{10^5}{10^4} \Rightarrow \boxed{f_0 = 10 \text{ Hz}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = 10 \text{ Hz} \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi R f_0} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^6 \cdot 10} = 159 \times 10^{-3} \times 10^{-7}$$

$\boxed{C = 159 \text{ nF}}$

D.8.70

$C_1 = 150 \text{ pF}$
 $C_2 = 5 \text{ pF}$
 $g_m = 40 \text{ mA/V}$

$f_1 = 10^5 \text{ Hz}$
 $f_2 = 10^6 \text{ Hz}$
 $f_3 = 2 \times 10^6 \text{ Hz}$

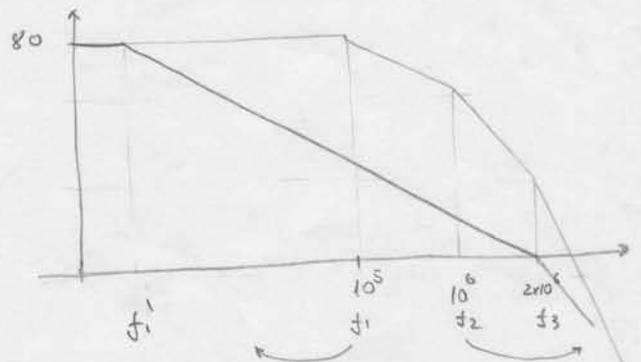
$$f_1' = \frac{f_3}{10 \frac{A_V}{20}} = \frac{2 \times 10^6}{10 \frac{80}{20}} = \frac{2 \times 10^6}{10^4}$$

$\boxed{f_1' = 200 \text{ Hz}}$

$$f_1' = \frac{1}{2\pi g_m R_2 C_f R_1}$$

$$C_f = \frac{1}{2\pi \cdot 40 \times 10^{-3} \times 31,8 \times 10^3 \times 200 \times 10,6 \times 10^3}$$

$\boxed{C_f = 59 \text{ pF}}$



$$R_1 = \frac{1}{2\pi C_1 f_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 150 \times 10^{-12} \times 10^5} = 1,06 \times 10^4 = 10,6 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi C_2 f_2} = \frac{1}{2\pi \times 5 \times 10^{-12} \times 10^6} = 31,8 \text{ k}\Omega$$

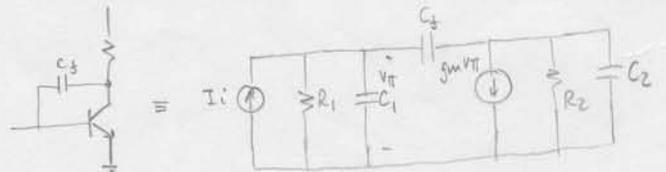
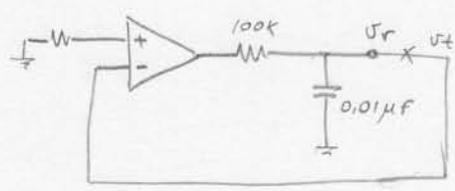
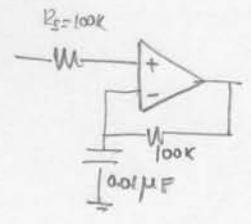


Fig. 8.40

$$f_2' = \frac{1}{2\pi \frac{1}{g_m} (C_1 + C_2) \left[1 + \frac{C_{eq}}{C_f} \right]} = 38,23 \text{ MHz} \gg f_3$$

$$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = 4,83 \text{ pF}$$

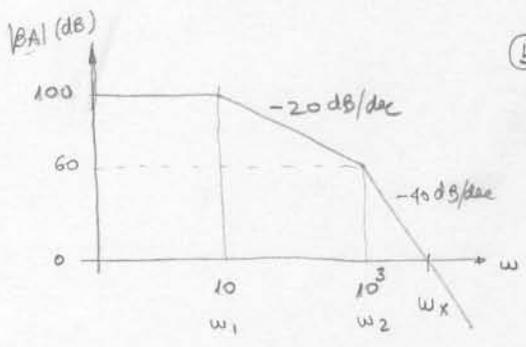
8.71



$$A(s) = \frac{10^5}{1 + \frac{s}{10}}$$

$$\beta(s) = \frac{1}{sRC + 1} = \frac{1}{1 + 10^{-3}s}$$

a)
$$\beta A(s) = \frac{10^5}{1 + \frac{s}{10}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{10^3}} = \frac{10^5}{\left(1 + \frac{s}{10}\right)\left(1 + \frac{s}{10^3}\right)}$$



b) $|BA| = 1$

relaçã entre ω_x e ω_2
 40 dB — 1 dec
 60 dB — $\log \frac{\omega_x}{\omega_2}$

$$\log \frac{\omega_x}{\omega_2} = \frac{60}{40} = 1,5 \text{ dec} \Rightarrow \omega_x = 10^{1,5} \omega_2$$

$$\omega_x = 31,6 \omega_2 \Rightarrow \boxed{\omega_x = 31,6 \text{ K rad/s}}$$

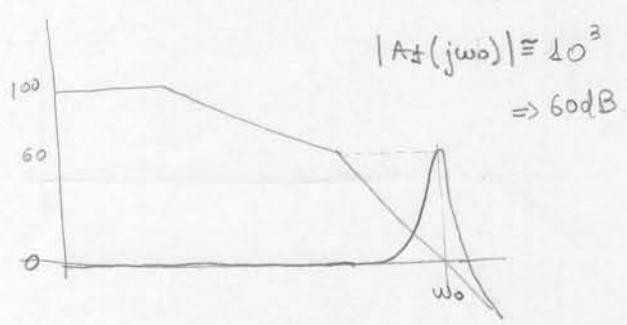
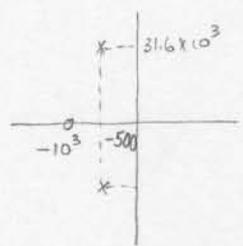
c)
$$A_f(s) = \frac{\frac{10^5}{1 + \frac{s}{10}}}{1 + \frac{10^5}{\left(1 + \frac{s}{10}\right)\left(1 + \frac{s}{10^3}\right)}} = \frac{10^5 \left(1 + \frac{s}{10^3}\right)}{\left(1 + \frac{s}{10}\right)\left(1 + \frac{s}{10^3}\right) + 10^5} \Rightarrow A_f(s) \approx \frac{1 + \frac{s}{10^3}}{1 + \frac{s}{10^6} + \frac{s^2}{10^9}} =$$

$$A_f(s) = \frac{10^6 s + 10^9}{s^2 + 10^3 s + 10^9} = \frac{10^6 (s + 10^3)}{s^2 + 10^3 s + 10^9}$$

zero: $s = -10^3 \text{ rad/s}$
 polos: $s = \frac{-10^3 \pm \sqrt{10^6 - 4 \cdot 10^9}}{2}$
 $s \approx \frac{10^3 \pm j 63,2 \cdot 10^3}{2}$
 $s = -500 \pm j 31,6 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$

identificando com $s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2$

$\omega_0 = 31,6 \text{ K rad/s}$
 $Q = 31,6$



$MF = 180 - \left(\angle \frac{\omega_x}{\omega_1}\right) - \left(\angle \frac{\omega_x}{\omega_2}\right)$
 $MF = 180 - \left(\angle \frac{31,6 \cdot 10^3}{10}\right) - \left(\angle \frac{31,6 \cdot 10^3}{10^3}\right)$
 $MF = 180 - \left(\angle 31,6 \cdot 10^2\right) - \left(\angle 31,6\right)$
 $MF = 180 - 89,98 - 88,19$

$MF = 1,83^\circ$

ou $MF = 2 \left(90 - \cos^{-1} \frac{1}{2Q}\right) = 2 \left(90 - \cos^{-1} \frac{1}{2 \cdot 31,6}\right) =$

$MF = 1,81^\circ$

COMPENSAÇÃO

P2-1P / 00

1- Um amplificador com ganho de tensão em malha aberta de 90 dB e com pólos em 100kHz e 10MHz é realimentado de forma a estabelecer um ganho de 20dB.

- () 1a) Esboce, num mesmo gráfico, a resposta em frequência do amplificador com e sem realimentação, indicando os pontos importantes;
- () 1b) Calcule o ganho que deve ser ajustado no amplificador realimentado para que se obtenha a resposta maximamente plana ($Q=0,707$);
- () 1c) Sabendo que o 1º pólo é determinado por uma capacitância parasita $C_p=50\text{pF}$, que capacitor deve ser adicionado em paralelo com C_p para permitir que o amplificador seja utilizado como “buffer” ($A_v=1$) ? Assuma que o capacitor adicionado só interfere no posicionamento do 1º pólo;

P2-1P / 01

2- Um amplificador com ganho de tensão em malha aberta de 93 dB e com pólos em $f_1=100\text{kHz}$ e $f_2=8\text{MHz}$ é realimentado de forma a estabelecer um ganho de 15dB.

- (1,5) 2a) Esboce, num mesmo gráfico, a resposta em frequência do amplificador com e sem realimentação. A resposta em frequência do amplificador realimentado apresenta um pico na frequência f_0 com largura de banda BW . Determine f_0 e a amplitude do pico. Sabe-se que $BW=f_1+f_2$;
- (1,5) 2b) Calcule o ganho que deve ser ajustado no amplificador realimentado para que se obtenha a resposta maximamente plana ($Q=0,707$);
- (1,5) 2c) Sabendo que o 1º pólo é determinado por uma capacitância parasita $C_p=5\text{pF}$, que capacitor deve ser adicionado em paralelo com C_p para permitir que o amplificador seja utilizado como “buffer” ($A_v=1$) ? Assuma que o capacitor adicionado só interfere no posicionamento do 1º pólo;

P2-1P / 03

1- Um amplificador em malha aberta apresenta ganho de de 85 dB e com pólos em 200kHz e 9MHz.

- (1,0) 1a) Quando realimentado, qual o menor ganho que é possível ajustar sem necessidade de compensação? (considere $MF=45^\circ$).
- (1,5) 1b) Para $\beta=0,125$, esboce, num mesmo gráfico, as respostas em frequência do amplificador com e sem realimentação, calculando e assinalando os ganhos e frequências importantes. Qual a margem de fase neste caso?
- (1,0) 1c) Para que o amplificador seja usado com ganho unitário (“buffer”), faça a compensação usando a técnica de pólo dominante com deslocamento de pólo existente. Calcule a frequência para onde foi deslocado o pólo e ilustre graficamente a técnica utilizada.

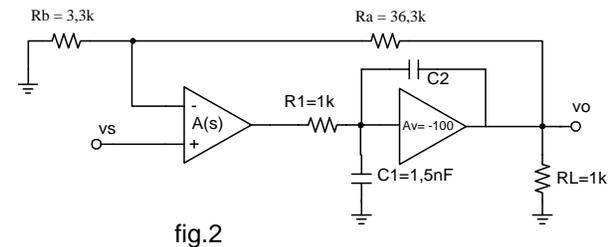
(0,5) 1d) Qual o GB do amplificador compensado?

P2-2P / 03

1- Um amplificador com três pólos e ganho total (DC) de 90 dB pode ser modelado conforme mostrado na fig.1. O estágio representado por $A(s)$ engloba os pólos das freqüências 6MHz e 60MHz. O estágio de saída ($A_v = -100$), com $Z_i = \infty$ e $Z_o = 0$, contribui com pólos em freqüências tão elevadas que podem ser desconsiderados. Para estabilizar o amplificador realimentado com $MF=60^\circ$, foi acrescentado o capacitor C_2 .

(1,5) 1a) Esboce num único diagrama de Bode de amplitude, a resposta em freqüência do amplificador com e sem realimentação, indicando o esquema de compensação utilizado e as coordenadas importantes .

(1,5) 1b) Determine C_2 .



P2CH-1P / 01

2- Um amplificador com ganho (DC) de 95dB pode ser modelado conforme mostrado na fig.2 . O estágio representado por $A(s)$ engloba os pólos das freqüências 5MHz e 50MHz. O estágio de saída , com $Z_i = \infty$ e $Z_o=0$, contribui com pólos em freqüências tão elevadas que podem ser desconsiderados. Para estabilizar o amplificador realimentado com $MF=45^\circ$, foi acrescentado o capacitor C_2 .

(1,5) 2a) Esboce num único diagrama de Bode de amplitude, a resposta em freqüência do amplificador em malha aberta e o esquema de compensação utilizado, indicando as coordenadas importantes.

(1,0) 2b) Determine C_2 .

P2CH-1P / 03

(2,0) 4- Um amplificador com ganho em malha aberta de 95dB e pólos em 200kHz, 7MHz e 80MHz. Faça a compensação do amplificador de modo que fique com $MF=60^\circ$.

Esboce num único diagrama de Bode de amplitude, a resposta em freqüência do amplificador em malha aberta e explique o esquema de compensação utilizado, indicando as coordenadas importantes. Determine o

GB do amplificador considerando que a variação de fase de cada pólo pode ser aproximada por uma reta com inclinação de $-45^\circ/\text{década}$ com centro na frequência do pólo.

P2CH-1P / 04

3- Um amplificador com ganho DC de 90 dB e pólos em 80kHz e 7,92MHz foi realimentado com “buffer” (ganho=1).

(1,0) 3a) Calcule o ganho na frequência de ressonância (f_0) e esboce a resposta em frequência do amplificador realimentado.

(1,5) 3b) Faça a compensação por deslocamento do primeiro pólo, garantindo margem de fase $MF=55^\circ$. Determine a frequência do primeiro pólo (f_b) e o GB do amplificador compensado.

P2CH-2P / 03

(3,5) 3- Um amplificador com ganho em malha aberta de 95dB e pólos em 200kHz, 7MHz e 80MHz será utilizado como “buffer”. Faça a compensação do amplificador de modo que fique com $MF=60^\circ$.

Esboce num único diagrama de Bode de amplitude, a resposta em frequência do amplificador em malha aberta e explique o esquema de compensação utilizado, indicando as coordenadas importantes. Determine o GB do amplificador considerando que a variação de fase de cada pólo pode ser aproximada por uma reta com inclinação de $-45^\circ/\text{década}$ com centro na frequência do pólo.

P2CH-2P / 04

3- Um amplificador com ganho em malha aberta de 90dB e pólos em 250kHz, 8MHz e 85MHz será utilizado como “buffer”.

(1,0) 3a) Faça a compensação do amplificador de modo que fique com $MF=55^\circ$. Esboce num único diagrama de Bode de amplitude, a resposta em frequência do amplificador em malha aberta e explique o esquema de compensação utilizado, indicando as coordenadas importantes.

(1,0) 3b) Determine o GB do amplificador considerando que a variação de fase de cada pólo pode ser aproximada por uma reta com inclinação de $-45^\circ/\text{década}$ com centro na frequência do pólo.

P3CH-1P / 03

4- Um amplificador com pólos em malha aberta em 300kHz, 6MHz e 70MHz, foi compensado e realimentado ficando com as seguintes características: ganho $A_f=6\text{dB}$, margem de fase $MF=75^\circ$ e fator $(1+\beta A) = 6000$. Para o amplificador compensado responda:

- (1,0) a) Qual a frequência do 1º pólo ?
(1,0) b) Qual o GB?
(1,0) c) Qual a MF se o amplificador for realimentado para ganho unitário?

P3CH-1P / 04

1- Um amplificador com 2 pólos, realimentado para ganho unitário e compensado com margem de fase $MF=55^\circ$, apresenta resposta linear para entrada degrau de até 2,2V de amplitude. O ganho DC e o *slew-rate* deste amplificador são, respectivamente, $A_o=85\text{ dB}$ e $SR=55,3\text{V}/\mu\text{s}$.

(2,0) 3a) Determine as frequências dos pólos do amplificador em malha aberta. Sabe-se que para fazer a compensação o 1º pólo foi deslocado 2,3 décadas.

P3CH-2P / 04

- () 2- Um amplificador com ganho em malha aberta de 95dB e pólos em 250kHz, 8MHz e 90MHz será utilizado como "buffer". Faça a compensação do amplificador de modo que fique com $MF=58^\circ$.

Esboce num único diagrama de Bode de amplitude, a resposta em frequência do amplificador em malha aberta e explique o esquema de compensação utilizado, indicando as coordenadas importantes. Determine o GB do amplificador considerando que a variação de fase de cada pólo pode ser aproximada por uma reta com inclinação de $-45^\circ/\text{década}$ com centro na frequência do pólo.

PF-1P / 03

- (1,0) 6- Um amplificador com ganho em malha aberta de 90dB e pólos em 100kHz, 5MHz e 50MHz. Faça a compensação do amplificador de modo que fique com $GB=3\text{MHz}$.

Esboce num único diagrama de Bode de amplitude, a resposta em frequência do amplificador em malha aberta e explique o esquema de compensação utilizado, indicando as coordenadas importantes. Estime a MF

considerando que a variação de fase de cada pólo pode ser aproximada por uma reta com inclinação de -45° /década com centro na frequência do pólo.

PF-1P / 04

2- Um amplificador com três pólos e ganho (DC) de 95dB pode ser modelado conforme mostrado na fig.2 . O estágio representado por $A(s)$ engloba os pólos das frequências 5MHz e 50MHz. O estágio de saída ($A_v = -100$), com $Z_i = \infty$ e $Z_o = 0$, contribui com pólos em frequências tão elevadas que podem ser desconsiderados. Para estabilizar o amplificador realimentado com $MF=45^\circ$ e considerando que R_a é um curto-circuito, foi acrescentado o capacitor C_2 .

OBS: a variação de fase de cada pólo pode ser aproximada por uma reta com inclinação de -45° /década com centro na frequência do pólo.

- (1,0) 2a) Determine C_2 .
Removendo o curto circuito de R_a :
- (1,0) 2b) Calcule a margem de fase do amplificador.
- (1,0) 2c) Determine a frequência de corte do amplificador .

PF-2P / 03

5- Um amplificador com pólos em malha aberta em 300kHz, 6MHz e 70MHz, foi realimentado e compensado (deslocamento do pólo de frequência mais baixa), ficando com as seguintes características: ganho $A_f=0$ dB, margem de fase $MF= 45^\circ$ e fator $(1+\beta A) = 11971$. Para o amplificador compensado responda:

- (0,5) d) Esboce num gráfico de Bode, o esquema de compensação utilizado, indicando o ganho (dB) do amplificador para cada pólo.
- (1,5) a) Qual a frequência do 1º pólo ?
- (0,5) b) Qual o GB?
- (1,0) c) Qual a MF se o amplificador for realimentado para ganho $A_f=6$ dB?

PF-2P / 04

4- Um amplificador em malha aberta apresenta ganho de 95 dB e com pólos em 300kHz e 10MHz.

- (1,0) 4a) Para $\beta=0,1$, esboce, num mesmo gráfico, as respostas em frequência do amplificador com e sem realimentação, calculando e assinalando as amplitudes e frequências importantes.

(1,0) **4b)** Para que o amplificador seja usado com ganho unitário (“buffer”), faça a compensação usando a técnica de pólo dominante com deslocamento de pólo existente, de modo a garantir $GB=9,5\text{MHz}$. Calcule a frequência para onde foi deslocado o pólo e ilustre graficamente a técnica utilizada.

(1,0) **4d)** Qual MF do amplificador compensado?

T#5-2P / 05

1- Um amplificador em malha aberta, sem compensação, apresenta um ganho de 70dB na frequência do 2º pólo ($f_2=50\text{MHz}$). As frequências dos dois primeiros pólos deste amplificador estão afastadas de 1,25 décadas. Sendo compensado para ganho unitário e margem de fase $MF=45^\circ$,

(0,4) 1a) Determine a frequência de corte f_b do amplificador em malha aberta. Indique, graficamente, o esquema de compensação utilizado.

(0,4) 1b) Determine o GB do amplificador compensado.

(0,4) 1c) Com esta mesma compensação, determine que ganho deve ser ajustado para $MF=60^\circ$.

2- Um amplificador em malha aberta com ganho $A_o=5000$ tem 2 pólos posicionados, respectivamente, nas frequências $f_1=100\text{kHz}$ e $f_2=3\text{MHz}$.

(0,4) 2a) É possível ocorrer oscilação se o amplificador for realimentado para $A=1$? Em que frequência? Justifique.

(0,4) 2b) Esboce, num mesmo gráfico, as respostas em frequência do amplificador em malha aberta e realimentado com $A=1$, indicando as amplitudes e frequências importantes.

T#8-2P / 01

1- Um amplificador com três pólos e ganho DC (v_o / v_s) de 95dB pode ser modelado conforme mostrado na fig.1 . O estágio $A(s)$, com $Z_i = \infty$ e $Z_o=0$, contribui com pólos nas frequências 5MHz e 50MHz. O estágio de saída, com $A_v = -100$, $Z_i = \infty$ e $Z_o=0$, contribui com pólos em frequências tão elevadas que podem ser desconsiderados. Ao ser realimentado com R_a e R_b , o amplificador se tornou instável. Para estabilizá-lo com $MF=45^\circ$, foi acrescentado o capacitor C_2 .

(3,0) 1a) Esboce num único diagrama de Bode de amplitude, a resposta em frequência do amplificador em malha aberta e o esquema de compensação utilizado, indicando as coordenadas importantes.

(2,0) 1b) Determine C_2 .

