

EXAMEN DE ELECTRÓNICA FUNDAMENTAL

Resolver cada **problema en hojas separadas** y **escribiendo de un solo lado de la hoja**.

Duración de la prueba: 3 horas 30 minutos.

En todas las partes se deberá fundamentar claramente la deducción que conduce al resultado para que el mismo sea considerado.

La prueba es **sin** material.

Los puntajes de los problemas se indican sobre un total de 100 puntos.

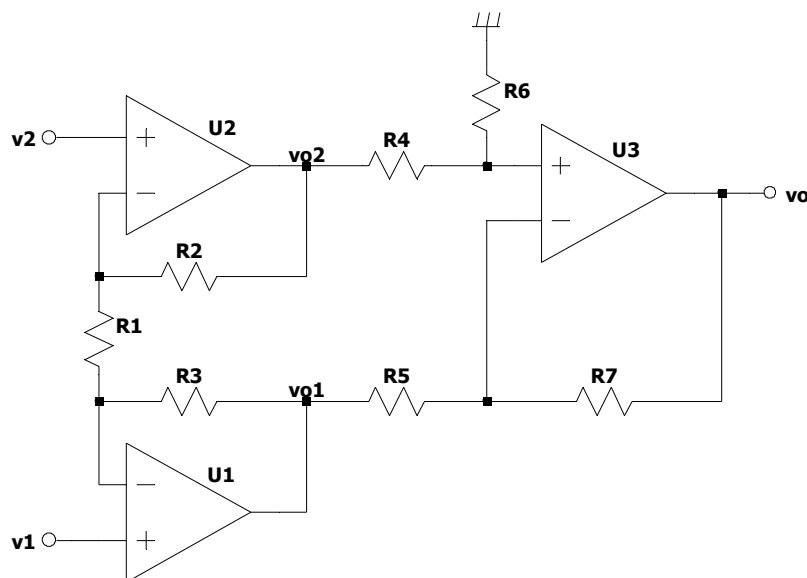
PROBLEMA 1 (40 puntos)

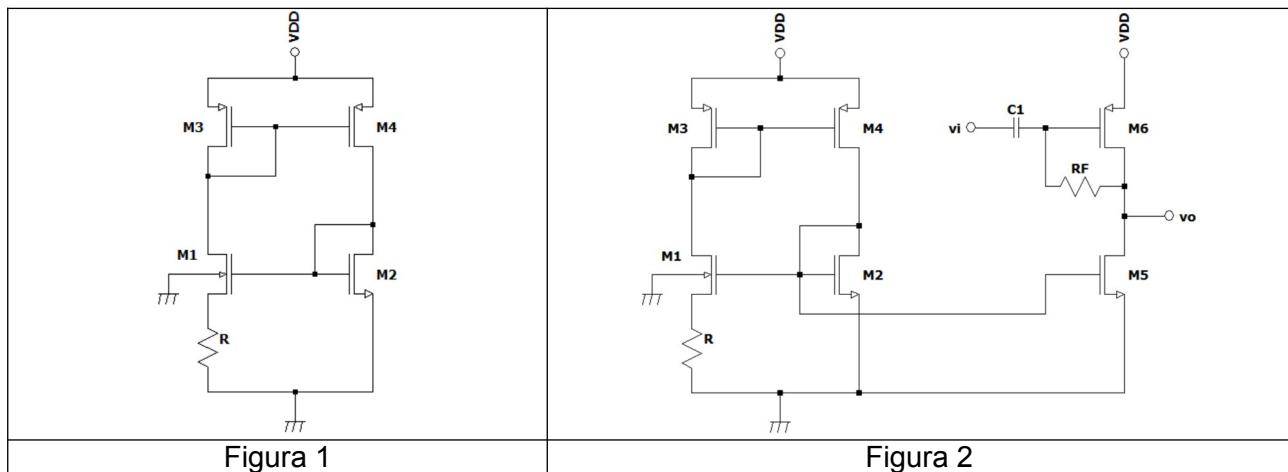
Se considera el amplificador de instrumentación de la figura. Los operacionales son ideales salvo donde se indique lo contrario.

- a) Calcular la ganancia diferencial, ganancia en modo común y relación de rechazo al modo común.
- b) En esta parte se supondrá que a la entrada se tiene una señal diferencial sinusoidal v_{id} con amplitud de pico A_p de 30 mV y frecuencia 10 kHz superpuesta a una componente en modo común de continua V_{incm} que puede variar entre $-V_{incmmax}$ y $+V_{incmmax}$ con $V_{incmmax}=1$ V.
 - i) Determinar en qué rango de tensión varían las entradas y salidas de cada uno de los amplificadores operacionales.
 - ii) Si se utiliza el mismo modelo de amplificador operacional para los tres amplificadores, ¿qué debe cumplir el rango de entrada de modo común y la excursión de salida del modelo de operacional que se seleccione para que el circuito funcione correctamente?
 - iii) ¿Qué debe cumplir el slew rate del modelo de amplificador seleccionado para que el circuito funcione correctamente?
- c) Si el modelo de operacional elegido tiene f_T de 10 MHz, determinar la frecuencia de -3 dB de la ganancia diferencial del amplificador de instrumentación.

Datos:

$R_1=5\text{ k}\Omega$, $R_2=R_3=200\text{ k}\Omega$, $R_4=R_5=10\text{ k}\Omega$, $R_6=R_7=30\text{ k}\Omega$



PROBLEMA 2 (40 puntos)

El circuito de la Figura 1 fija una corriente dc de referencia que luego se usará para polarizar una etapa amplificadora (Figura 2).

a) Calcular las corrientes por los transistores de la Figura 1. Observar que por la conexión de M3 y M4 las corrientes de estos dos transistores son iguales.

En la Figura 2, que muestra el circuito completo, calcular:

- b) Tensión de continua en la salida V_o .
- c) Ganancia v_o/v_i en banda pasante.
- d) Excursión máxima a la salida

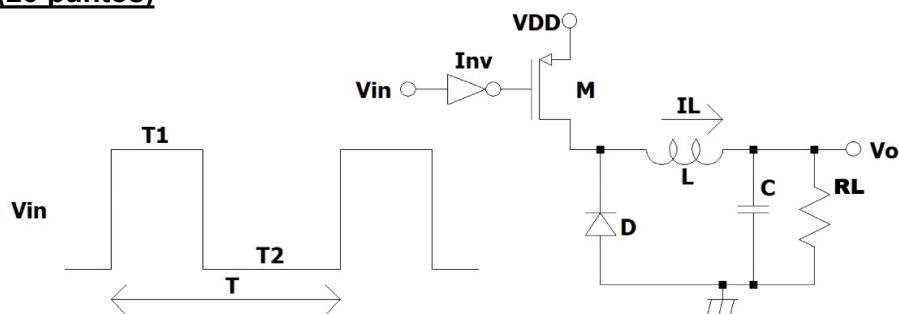
Datos:

$V_{DD} = 5V$, $R = 200 \Omega$, $R_F = 10 M\Omega$, $C_1 = \infty$

M2, M3, M4: $\beta = 15 \text{ mA/V}^2$, $V_{t0} = 1V$, $V_A = \infty$, $\delta = 0.3$

M1 es igual a 16 transistores M2 en paralelo, es decir que $\beta_{M1} = 16 \beta_{M2}$

M5, M6 : $\beta = 15 \text{ mA/V}^2$, $V_{t0} = 1V$, $V_A = 100V$, $\delta = 0.3$

PREGUNTA (20 puntos)

El circuito de la Figura es un tipo sencillo de conversor dc-dc del tipo Step-Down. Con éste se obtiene una tensión dc regulada a la salida de valor inferior a la de entrada. En este caso se desea tener a la salida $V_o = V_{DD}/3$.

- a) Grafique qué forma tendrá la onda de corriente por el inductor en régimen en un período.
- b) Justificando, calcule el ciclo de trabajo $D = T_1/T$ para que la salida tenga el valor deseado de $V_{DD}/3$.

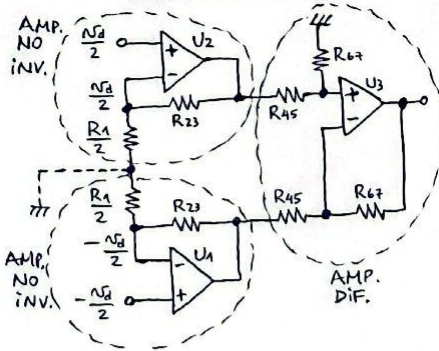
Se supone que la inductancia es ideal y que el transistor funciona como llave. V_{in} varía entre 0 y V_{DD} , el inversor Inv está alimentado entre 0 y V_{DD} .

Datos: M: $R_{DS(on)} = 0 \Omega$, $R_{DS(off)} = \infty$, D: $V_\gamma = 0.7V$, $C = \infty$, $V_{DD} = 15V$.

Asuma que la bobina siempre tiene una corriente I_L siempre positiva entre sus bornes.

EXAMEN DE ELECTRONICA FUNDAMENTAL

a) GANANCIA DIFERENCIAL



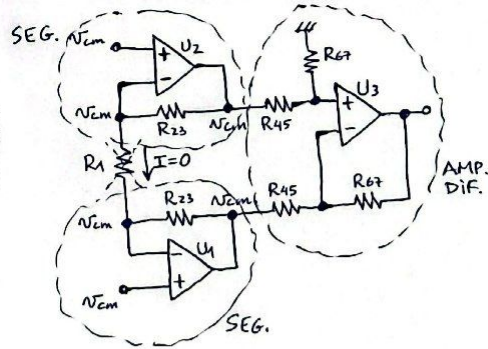
$$V_{o1} = \left(-\frac{N_d}{2}\right) \left(1 + \frac{2R_{23}}{R_1}\right) = -\frac{81 N_d}{2}$$

$$V_{o2} = \left(\frac{N_d}{2}\right) \left(1 + \frac{2R_{23}}{R_1}\right) = \frac{81 N_d}{2}$$

$$V_o = (V_{o2} - V_{o1}) \frac{R_{67}}{R_{45}}$$

$$A_d = \frac{V_o}{N_d} = \left(1 + \frac{2R_{23}}{R_1}\right) \left(\frac{R_{67}}{R_{45}}\right) = \boxed{243 \text{ V/V}}$$

GANANCIA EN MODO COMÚN



$$V_{o1} = V_{cm}$$

$$V_{o2} = V_{cm}$$

$$V_o = (V_{o2} - V_{o1}) \frac{R_{67}}{R_{45}}$$

$$A_{cm} = \frac{V_o}{V_{cm}} = \boxed{0 \text{ V/V}}$$

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}} = \boxed{+\infty}$$

$$b) i) \quad U_1: \begin{cases} V_{i+} = V_{i-} = V_{cm} - \frac{N_d}{2} \\ V_o = V_{cm} + \left(-\frac{N_d}{2}\right) \left(1 + \frac{2R_{23}}{R_1}\right) = V_{cm} - \frac{81 N_d}{2} \end{cases}$$

$$U_2: \begin{cases} V_{i+} = V_{i-} = V_{cm} + \frac{N_d}{2} \\ V_o = V_{cm} + \left(\frac{N_d}{2}\right) \left(1 + \frac{2R_{23}}{R_1}\right) = V_{cm} + \frac{81 N_d}{2} \end{cases}$$

$$U_3: \begin{cases} V_{i+} = V_{i-} = \left(V_{cm} + \left(-\frac{N_d}{2}\right) \left(1 + \frac{2R_{23}}{R_1}\right)\right) \frac{R_{67}}{R_{45} + R_{67}} = \frac{3}{4} V_{cm} - \frac{243 N_d}{8} \\ V_o = N_d \left(1 + \frac{2R_{23}}{R_1}\right) \left(\frac{R_{67}}{R_{45}}\right) = 243 N_d \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} U_1, U_2: \begin{cases} V_i \in [-1,02 \text{ V}; 1,02 \text{ V}] \\ V_o \in [-2,22 \text{ V}; 2,22 \text{ V}] \end{cases} \\ U_3: \begin{cases} V_i \in [-1,66 \text{ V}; 1,66 \text{ V}] \\ V_o \in [-7,29 \text{ V}; 7,29 \text{ V}] \end{cases} \end{cases}$$

$$ii) \quad \begin{aligned} [-1,66 \text{ V}; 1,66 \text{ V}] &\subseteq \text{ICMR} \quad (\text{restringe } U_3) \\ [-7,29 \text{ V}; 7,29 \text{ V}] &\subseteq \text{OSW} \quad (\text{restringe } U_3) \end{aligned}$$

$$iii) \quad SR \geq 2\pi f V_p$$

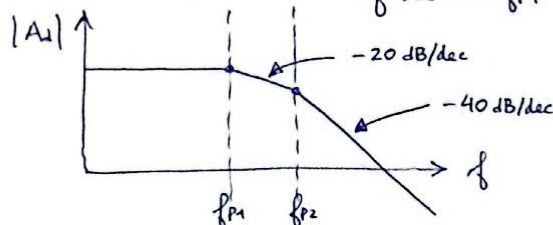
$$\begin{cases} U_1 \text{ y } U_2: V_p = (30 \text{ mV}) \left(\frac{81}{2}\right) = 1,22 \text{ V} \\ U_3: V_p = (30 \text{ mV}) (243) = 7,29 \text{ V} \Rightarrow \text{restringe } U_3 \end{cases}$$

$$SR \geq 2\pi (10 \text{ kHz}) (7,29 \text{ V}) = \boxed{0,458 \text{ V}/\mu\text{s}}$$

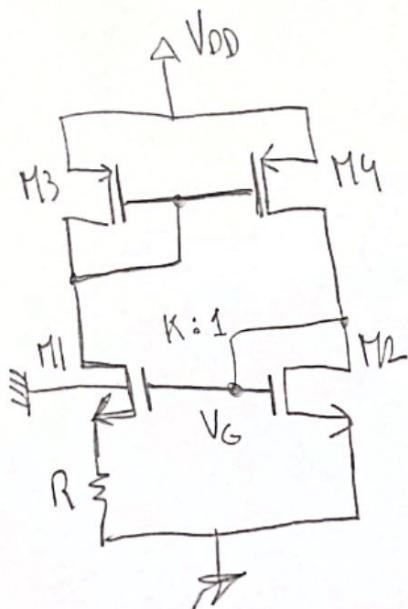
$$c) \quad A_d = \frac{V_{o2} - V_{o1}}{V_2 - V_1} \frac{V_o}{V_{o2} - V_{o1}} = \left(\frac{1 + \frac{2R_{23}}{R_1}}{1 + \frac{\Delta}{f_T} \left(1 + \frac{2R_{23}}{R_1}\right)}\right) \left(\frac{\frac{R_{67}}{R_{45}}}{1 + \frac{\Delta}{f_T} \left(1 + \frac{R_{67}}{R_{45}}\right)}\right)$$

$$\text{DOS POLOS: } \begin{cases} f_{p1} = \frac{f_T}{1 + \frac{2R_{23}}{R_1}} = \frac{f_T}{81} = 123 \text{ kHz} \\ f_{p2} = \frac{f_T}{1 + \frac{R_{67}}{R_{45}}} = \frac{f_T}{4} = 2,5 \text{ MHz} \end{cases}$$

$$\Rightarrow f_{p1} \ll f_{p2} \Rightarrow f_{-3dB} = f_{p1} = \boxed{123 \text{ kHz}}$$



2)



Asumo todos los transistores saturados:

$$I_{D11} = I_{D13} = I_{D14} = I_{D12} = I_D \rightarrow$$

espejo
↓
conexión en serie

$$I_{D11} = \frac{K \cdot \beta}{2(1+s)} (V_G - V_{to} - (1+s)V_s)^2 \rightarrow$$

↑ $I_{D11} \cdot R$

$$I_{D12} = \frac{\beta}{2(1+s)} (V_G - V_{to})^2 \rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\beta}{2(1+s)} (V_G - V_{to})^2 = \frac{K \beta}{2(1+s)} \left[V_G - V_{to} - (1+s) \frac{\beta R (V_G - V_{to})^2}{2(1+s)} \right]^2$$

$$|V_G - V_{to}| = \sqrt{K} \left| V_G - V_{to} - \frac{\beta R (V_G - V_{to})^2}{2} \right| \Rightarrow$$

Este término viene de $V_G - V_{to} - (1+s)V_s$, por lo tanto, tiene que ser positivo para cumplir

$$V_p = \frac{V_G - V_{to}}{(1+s)} > V_s \Rightarrow \text{seco valor absoluto sin cambiar el signo.}$$

$$\frac{\beta R (V_G - V_{to})^2}{2} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{K}}\right) (V_G - V_{to}) \Rightarrow$$

$$V_G = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{K}}\right) \frac{2}{\beta R} + V_{to} = 1.5V$$

$$I_D = \frac{\beta}{2(1+s)} \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{K}}\right) \frac{2}{\beta R} + V_{to} - V_{to} \right]^2$$

$$I_D = \frac{1}{(1+s)} \cdot \frac{2}{\beta} \cdot \frac{1}{R^2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{K}}\right)^2 = 1.44 \text{ mA}$$

Verifico zona:

$V_{GS} \text{ de } M_1 = V_{GS} \text{ de } M_2 \text{ por conexión}$

$V_{GS} \text{ de } M_2 = V_{GS} \text{ de } M_3 \text{ y } M_4$, ya que son idénticos con la misma corriente y el mismo $V_{SB} = V_{BS} = 0$.

$\Rightarrow V_{GS} \text{ de } M_1 \text{ y } M_2 = V_{GS} \text{ de } M_3 \text{ y } M_4 = V_G = 1,5 \text{ V}$

todos tienen el mismo $V_p = \frac{V_G - V_{to}}{(1+S)} = 385 \text{ mV}$

$$V_{SBM2} = V_{BSM3} = V_{BSM4} = 0 < V_p \quad \checkmark$$

$$V_{SBM1} = I \cdot R = 289 \text{ mV} < V_p \quad \checkmark$$

$$V_{BSM3} = V_{BSM4} = V_G = 1,5 \text{ V} > V_p \quad \checkmark$$

$$V_{BSM1} = V_{DD} - V_{BSM3} = 3,5 \text{ V} > V_p \quad \checkmark$$

$$V_{BSM2} = V_{BSM4} = V_G = 1,5 \text{ V} > V_p \quad \checkmark$$

$$V_{BSM4} = V_{DD} - V_G = 3,5 \text{ V} > V_p \quad \checkmark$$

b) $V_{OOL} = V_{DD} - V_{BSM6}$

mismo I_D , mismo $V_{SB} = V_{BS} = 0$ y transistores idénticos

$\Rightarrow V_{BSM2} = V_G \text{ de parte 2}$

$\Rightarrow V_{OOL} = V_{DD} - V_G = 3,5 \text{ V}$

Zona M_5 y M_6 :

$$V_{BSM5} = V_{BSM6} = V_G = 1,5 \text{ V}$$

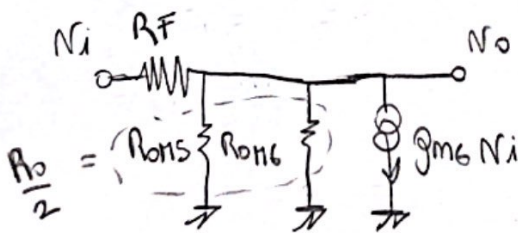
$$\Rightarrow V_{pM5} = V_{pM6} = V_p = 385 \text{ mV}$$

$$V_{SBM5} = V_{BSM6} = 0 < V_p$$

$$V_{BSM5} = V_{DD} - V_G = 3,5 \text{ V} > V_p$$

$$V_{BSM6} = V_G = 1,5 > V_p$$

c)



$$\frac{N_i - N_o}{R_F} = \frac{N_o}{R_o/2} + g_{m6} N_i$$

$$N_i \left(\frac{1}{R_F} - g_{m6} \right) = N_o \left(\frac{1}{R_o/2} + \frac{1}{R_F} \right)$$

$$\frac{N_o}{N_i} = \frac{\frac{1}{R_F} - g_{m6}}{\frac{1}{R_o/2} + \frac{1}{R_F}} = \frac{\frac{R_o/2}{R_F} - g_{m6} R_o/2}{1 + \frac{R_o/2}{R_F}}$$

$$R_o = R_{on5} = R_{on6} = \frac{V_A}{I_D} = 69 \text{ k}\Omega$$

$$g_{m6} = \sqrt{\frac{2 I_D \beta}{(1+S)}}$$

$$G = \frac{N_o}{N_i} \approx -g_{m6} R_o/2 = -200 \text{ V/V}$$

$\frac{R_o/2}{R_F} \ll 1 \ll g_{m6} R_o/2 = G$

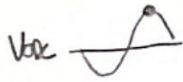
PP

d)



$$V_{DS15} = V_{DD} - N_0 > V_{P15} = \frac{V_G - V_{th}}{1 + \delta}$$

$$N_0 < V_{DD} - \frac{V_G - V_{th}}{1 + \delta} = 3,12 \text{ V}$$



$$V_{DS16} = V_{DD} - (V_{ovc} + N_0) > V_{P16} = \frac{V_{B16} - V_{th}}{1 + \delta} = \frac{V_B - V_{GDC} - N_0 - V_{th}}{1 + \delta} \Rightarrow$$

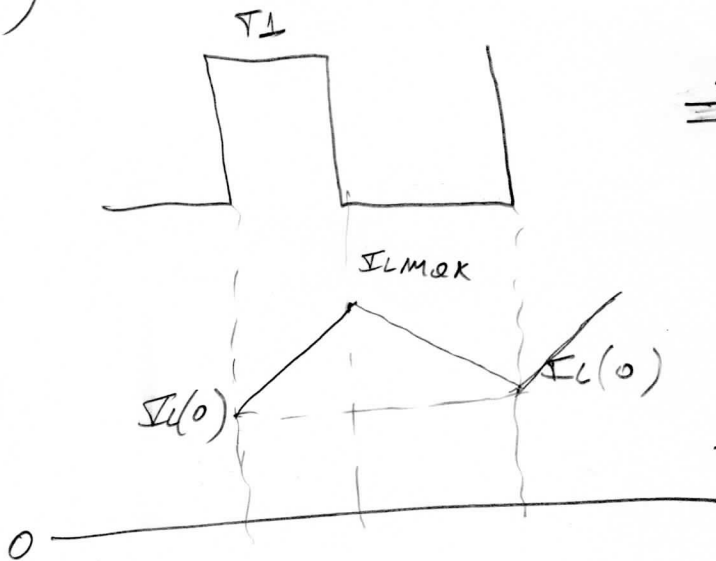
$V_{B16} = V_G - N_0/G$
 $V_{GDC} = V_G$

$$N_0 \left(1 + \frac{1}{G(1 + \delta)} \right) < V_{DD} - \frac{V_G - V_{th}}{1 + \delta} - V_{ovc} = 1,12 \text{ V}$$

$G \gg 1$
 ≈ 1

$$\Rightarrow N_{opmax} = 1,12 \text{ V}$$

pp

PREGUNTA:a) Forma de onda de I_L : T_1 : π conduce. $\Rightarrow A$ D OFF. $\Rightarrow$ D OFF.

$$V_D = -V_{DD} < 0$$

$$V_0 = \frac{V_{DD}}{3} \Rightarrow V_L = \frac{2}{3} V_{DD}$$

$$\Rightarrow I_L = \left| \frac{V_L}{L} \right| dt$$

crece linealmente

 T_2 : π OFF $\Rightarrow$ (H) D ON $\Rightarrow$

$$\Rightarrow V_L = -V_X - V_0 = -\left(V_X + \frac{V_{DD}}{3}\right)$$

 $\Rightarrow I_L$ decrece linealmente.

$$i_D > 0 \Rightarrow i_D = I_L > 0$$

$\hookrightarrow$ porque π OFF

b) T_1, T_2 tales que valor final de I_L sea igual a valor inicial

$$\Rightarrow I_{Lmax} = I_L(0) + \frac{1}{L} \left(\frac{2}{3} V_{DD} \right) \cdot T_1 \quad \textcircled{I}$$

$$\text{valor final} = I_{Lmax} - \frac{1}{L} \left(V_X + \frac{V_{DD}}{3} \right) \cdot T_2 \quad \textcircled{II}$$

$$\Rightarrow \text{valor final} = \text{valor inicial} \Leftrightarrow (\textcircled{I} \oplus \textcircled{II})$$

$$\Rightarrow \cancel{I_L(0)} + \frac{1}{L} \frac{2}{3} V_{DD} T_1 - \frac{1}{L} \left(V_X + \frac{V_{DD}}{3} \right) \cdot T_2 = \cancel{I_L(0)}$$

(2)

$$\Rightarrow \frac{2}{3} V_{DD} \tau_1 = \left(V_{th} + \frac{V_{DD}}{3} \right) \tau_2$$

$$\Rightarrow \left[D = \frac{\tau_1}{\tau} = \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} = \frac{\cancel{\tau_1}}{\cancel{\tau_1} \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)} = \right.$$

$$= \frac{1}{\left(1 + \frac{2/3 V_{DD}}{\left(V_{th} + \frac{V_{DD}}{3} \right)} \right)} \Rightarrow D = \frac{1}{1 + \frac{10}{(0.7) + 5}} =$$

$$= \underline{0.363}$$