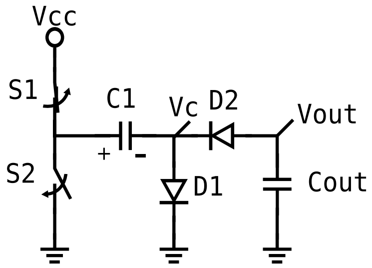
Problema 4

El siguiente problema explica un elevador de voltaje, denominado Charge Pump. Este esquema es la base de diversos circuitos conversores de niveles de voltaje, entre ellos el circuito integrado MAX232. El siguiente circuito obtiene un voltaje negativo a partir de uno positivo:



Inicialmente, S1 se encuentra cerrado y S2 abierto. Luego de un instante dt, S1 se abre y S2 se cierra. El ciclo de trabajo es de 50% para ambos switches.

Suponga que los condensadores C1 y C2 se encuentran inicialmente descargados. Suponga siempre que la caída en los diodos es pequeña si se compara con Vcc.

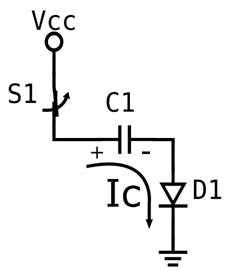
a) Explique cualitativamente cómo funciona el circuito. Determine el valor Vout suponiendo que los componentes son ideales y que C1 es mucho mayor que Cout.

b) Si C1 = 100nF, Cout = 5nF y suponiendo que los diodos al encenderse se comportan como una resistencia Rd = 10Ω, dibuje el voltaje vout para una frecuencia de conmutación de 1KHz.

c) Si la caída de tensión en los diodos es comparable a Vcc, ¿Cuál es el valor máximo que puede alcanzar Vout con los valores dados en b)?

SOLUCIÓN:

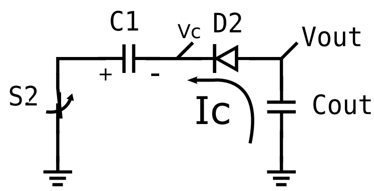
a)



a. S1 cerrado, S2 abierto: D1 comienza a conducir y C1 se carga. Debido a esto, D2 queda con un voltaje inverso, por lo que queda en corte.

C1 se puede cargar hasta que iguale al voltaje Vcc o hasta que S1 se cierre, dependiendo de qué ocurra antes. Para términos de análisis supondremos que se queda con un voltaje Vc_0.

b. S1 abierto, S2 abierto: Debido a que el C1 tiene un terminal "al aire", no circula corriente por él, y por lo tanto no se descarga. Como Cout no tiene carga acumulada, no hay forma que D1 y D2 conduzcan. Se puede asumir que C1 queda "al aire" completamente, análogo a una batería sin conectar.



c. S1 abierto, S2 cerrado: Se le da una referencia a tierra a C2 por el lado de S2, por lo que el voltaje en el ánodo de D1 es $-Vc_0$ (no hay descarga rápida del condensador al realizar esta maniobra). Esto permite que D2 conduzca, y por lo tanto Cout comience a cargarse negativamente (pues la corriente fluye en el sentido de D2) y C1 se descarga. Con esto, Vout se hace negativo. Cout se carga hasta que iguale al voltaje de C1 o hasta que S2 se abra.

La proporción en que C1 se descarga y C2 se carga es la siguiente:

Como la corriente es la misma para ambos, se usa la relación corriente/voltaje de los condensadores:

$$I_{C1} = I_{Cout} \Rightarrow C1\frac{dV_{C1}}{dt} = C2\frac{dV_{Cout}}{dt}$$

Desde acá se puede deducir que si C1 >> C2, cambios en V_{Cout} producen pequeñas diferencias en V_{C1}, que incluso podrían despreciarse.

En la práctica, desde el punto de vista de Cout, C1 es como una fuente de voltaje.

d. S1 abierto, S2 abierto: D2 se corta pues Vout < 0 y D1 y D2 no pueden conducir, y C1 queda nuevamente flotando.

Siguiendo este ciclo, se puede deducir que Vout converge a –Vcc puesto que a medida que pasan los ciclos, la descarga de C1 se hace cada vez menor.

b) Cuando **S1 cerrado, S2 abierto**, la ecuación diferencial queda:

$$Vcc = V_{C1} + RsC1\frac{V_{C1}}{dt} \Rightarrow V_{C1} = Vcc\left(1 - e^{\frac{-t}{RsC1}}\right) \quad (1)$$

Para un tiempo t = 0.5ms, con los valores indicados, el exponente queda:

-t/RsC1 = -0.5m/(0.1u*10) = -0.5m/1u = -0.5k = -500.

Por lo que se puede despreciar la exponencial y queda que V_{C1}= Vcc (ojo en el sentido de la corriente para la siguiente parte).

Cuando **S1 abierto, S2 cerrado**, se usa la expresión de corrientes iguales: $C1\frac{dV_{C1}}{dt} = C_{out}\frac{dV_{Cout}}{dt}$ (2)

La ecuación de voltajes en el bucle es: 0 = V_{C1} + RsI_{Cout} + V_{Cout}

Como C1 >> C2, se puede decir que V_{C1} varía poco respecto a V_{Cout} (viene de la expresión de corrientes iguales) por lo que se puede resolver sólo con respecto a V_{Cout}. El resultado es:

$$V_{Cout} = -V_{C1}\left(1 - e^{\frac{-t}{RsCout}}\right) \quad (3)$$

Como Cout << C1, el exponente es menor a -500, por lo que se puede también despreciar la exponencial.

C_{out} se carga mientras D2 conduzca. Como por enunciado se supone que Vcc >> V_{diodo}, se puede simplificar a que D2 conduce hasta que V_{Cout} = V_{C1}. Utilizando diferenciales, (2) se transforma en:

$C1\frac{\Delta V_{C1}}{\Delta t_{C1}} = C_{out}\frac{\Delta V_{Cout}}{\Delta t_{Cout}}$ Además, Δt_{C1} = Δt_{Cout}. ΔV_{C1} se despeja y queda:

$\Delta V_{C1} = \frac{C_{out}}{C1}\Delta V_{Cout} = \frac{5}{100}\Delta V_{Cout} = 0.05\Delta V_{Cout}$. Lo que confirma la suposición que V_{C1} cambia poco respecto a V_{Cout}.

Considerando signos, a medida que C1 se descarga, V_{C1}, incialmente negativo, aumenta, y Cout se carga negativamente, por lo que V_{Cout}, negativo, disminuye. Por lo tanto en C1 la diferencia se suma y en Cout se resta. Para que ambos voltajes sean iguales:

$$V_{C1}^{ini} + \Delta V_{C1} = V_{Cout}^{ini} - \Delta V_{Cout} \Rightarrow V_{C1}^{ini} + 0.05\Delta V_{Cout} = 0 - \Delta V_{Cout} \Rightarrow \Delta V_{Cout} = \frac{V_{C1}^{ini}}{1.05} = 0.958V_{C1}^{ini} = 0.958V_{CC}$$

Para los siguientes pasos el análisis es similar. Queda:

$$V_{C1}^{ini} - \Delta V_{C1} = V_{Cout}^{ini} + \Delta V_{Cout} \Rightarrow V_{C1}^{ini} - 0.05\Delta V_{Cout} = \frac{V_{C1}^{ini}}{1.05} + \Delta V_{Cout} \Rightarrow \Delta V_{Cout} = \frac{V_{C1}^{ini}}{1.05} - \frac{V_{C1}^{ini}}{1.05^2}$$

Si se itera, se puede notar que los factores 1/1.05 van apareciendo al cuadrado, cubo, etc, por lo que aparece una serie geométrica que comienza con el exponente 2. Se se calcula la expresión tendiendo a infinito, ΔV_{Cout} queda:

$$\Delta V_{Cout} = V_{C1}^{ini}0.95 - \sum_{n=2}^{\infty} V_{C1}^{ini}0.95^n = V_{C1}^{ini}\left(0.95 - \frac{0.95}{1-0.95} + 0.95\right) = -17.1V_{C1}^{ini}$$

Sin embargo, ΔV_{Cout} no puede ser negativo pues indicaría que C_{out} comienza a cargar a C1, y esto no puede ocurrir pues D2 quedaría en inversa. Como al principio ΔV_{Cout} es positivo, en algún momento pasa por cero y se queda ahí, haciendo que V_{Cout} finalmente llegue a V_{CC}.

c) Si Se considera la caída de tensión en los diodos, la única diferencia es que en C1 no se llega a Vcc sino que a Vcc – V_{d1}, y C_{out} se puede cargar negativamente hasta que V_{C1}-V_{d2}+V_{Cout}=0. Esto significa que:

$V_{CoutMax}=Vcc-2V_{diodo}$

Un bosquejo de las curvas en el tiempo para C1, Vc y Vout (suponiendo que la caída en el diodo es despreciable) son las siguientes (es posible que no esté en escala la carga de los condensadores):