

**Instituto Tecnológico de Massachussets**  
**Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática**

**6.002 – Circuitos Electrónicos**  
**Otoño 2000**

**Práctica 2: Amplificadores inversores MOSFET y circuitos de primer orden**  
**Boletín F00-37**

### **Introducción**

El objetivo de esta práctica es proporcionarle experiencia con redes de segundo orden y demostrar que los elementos reales de red no se comportan siempre de manera ideal. Todos los ejercicios de la práctica se centran en el comportamiento de la red y en los elementos de red de la figura 1. Debe completar los ejercicios pre-práctica en su cuaderno de prácticas antes de asistir al laboratorio y, a continuación, realizar los ejercicios de laboratorio entre el 13 y el 17 de noviembre. Una vez completados, entréguelos al TA para que los revise y firme el cuaderno de prácticas. Por último, complete los ejercicios post-práctica en su cuaderno y entréguelo el 22 de noviembre, o antes de esa fecha.

Tráigase su CD de música favorito para el ejercicio de laboratorio 3-5. Realizará un divertido experimento, aunque no necesitará los resultados para los ejercicios post-práctica.

### **Ejercicios pre-práctica**

Le recomendamos encarecidamente que utilice Matlab para generar los gráficos de los ejercicios 3-2 y 3-5. No sólo le ahorrará tiempo, sino que también le ayudará a generar gráficos con extrema precisión y exactitud. Consulte el apéndice para obtener información acerca de Matlab.

- (3-1) Suponga que la red de la figura 1 está inicialmente en reposo. En  $t = 0$ , la tensión de entrada  $v_{IN}(t)$  pasa de 0 V a  $V_{TI}$ . Dada esta entrada, determine la respuesta transitoria de  $v_{OUT}(t)$ . Observe que  $v_{OUT}(t)$  toma la forma de  $v_{OUT}(t) = V_{TO}e^{-\alpha t} \sin(\omega_T t + \phi_T)$ . Sugerencia: para este ejercicio puede utilizar también los resultados del problema 9-2 de la fotocopia de tareas para casa.
- (3-2) Sea  $L = 47$  mH,  $C = 0.0047$   $\mu$ F,  $R = 220$   $\Omega$  y  $V_{TI} = 10$  V. Bajo estas condiciones, realice el gráfico de la respuesta transitoria de  $v_{OUT}(t)$  para  $0 \leq t \leq 0.3$  ms. Debería ser suficiente con realizar el gráfico de los picos y los cruces cero de la respuesta y de algunos puntos entre cada pico y cada cruce cero. Repita el ejercicio en otro gráfico para  $R = 1000$   $\Omega$ . Sugerencia: consulte el apéndice de Matlab.

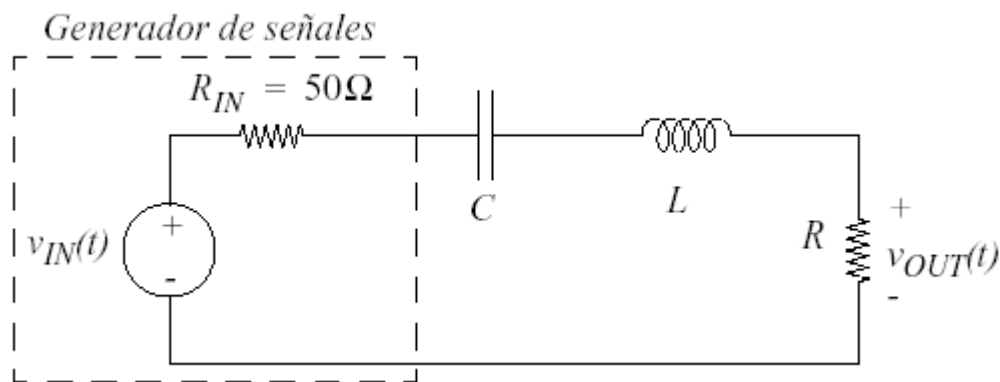


Figura 1: red de segundo orden.

- (3-3) Para los dos valores de  $R$ , calcule la tensión  $V_{TP}$  en el primer pico de la respuesta transitoria, la frecuencia  $\omega_T$  en la que oscila la respuesta transitoria y la velocidad  $\alpha_T$  a la que decae la respuesta transitoria. Observe que los picos de la respuesta transitoria tienen lugar en periodos en los que  $\tan(\omega_T t + \phi_T)$ . Sería conveniente que comprobase este dato.
- (3-4) Suponga que la red está en estado estacionario sinusoidal. Determine la respuesta de  $v_{OUT}(t)$  a la entrada  $v_{IN}(t) = V_{SI} \cos(\omega_s t)$ . Observe que  $v_{OUT}(t)$  tomará la forma de  $v_{OUT}(t) = V_{SO}(\omega_s) \cos(\omega_s t + \phi_s(\omega_s))$ . Sugerencia: para este ejercicio puede utilizar también los resultados del problema 10-1 del boletín de tareas para casa.
- (3-5) Sea  $L = 47$  mH,  $C = 0.0047$   $\mu$ F y  $R = 220$   $\Omega$ . Realice distintos gráficos de  $\log|H_S(\omega_s)|$  y  $\phi_s(\omega_s)$  frente a  $\log(\omega_s/(2\pi \times 10 \text{ kHz}))$  para  $2\pi \times 1 \text{ kHz} \leq \omega_s \leq 2\pi \times 100 \text{ kHz}$ , donde  $H_S(\omega_s) \equiv V_{SO}(\omega_s)/V_{SI}$ . Si reduce el espacio entre los puntos cerca del pico de  $H_S$ , deberían bastar 10 ó 15 puntos por gráfico para esbozar  $H_S$ . Repita de nuevo este ejercicio en un gráfico distinto para  $R = 1000$   $\Omega$ . Es posible que le resulte más fácil utilizar un papel logarítmico para el gráfico de  $H_S$  y un papel semilogarítmico para el gráfico de  $\phi_s$ . Sugerencia: consulte el apéndice de Matlab.
- (3-6) Para los dos valores de  $R$ , calcule el valor de pico  $H_{SP}$  de  $H_S$ , la frecuencia  $\omega_{SP}$  en la que tiene lugar el pico y  $Q$ . Observe que  $Q$  se define como  $Q \equiv \omega_{SP}/2\alpha_T$  y que  $H_S(\omega_s)$  habrá caído desde su valor de pico de  $H_{SP}$  por un factor de  $\sqrt{2}$  en  $\omega_s \approx \omega_{SP} \pm \alpha_T$ .

### Ejercicios de laboratorio

Los ejercicios de laboratorio requieren la medición de la respuesta a escalón y la respuesta sinusoidal de la red de la figura 1 para dos valores de  $R$ . A continuación, utilizará esa misma red para filtrar una señal desde un reproductor de CD.

Los elementos reales de la red no se comportan siempre de la forma que los modelamos en el curso 6.002. Por ejemplo, sería mejor modelar una bobina real como una bobina ideal en serie con una resistencia, tal y como se indica en la figura 2. La resistencia es un elemento parásito,

lo que significa que aunque no se desee es inevitable. La resistencia representa la resistencia del cable utilizado para enrollar la bobina. Otros modelos aún más complejos podrían representar las pérdidas del núcleo y la capacitancia entre las vueltas de bobinado. Por esta razón, el modelo de la figura 2 no es el único posible. Igualmente, sería mejor modelar un condensador real como un condensador ideal en paralelo con una conductancia parásita que modelar la fuga a través del dieléctrico del condensador (también se muestra en la figura 2).

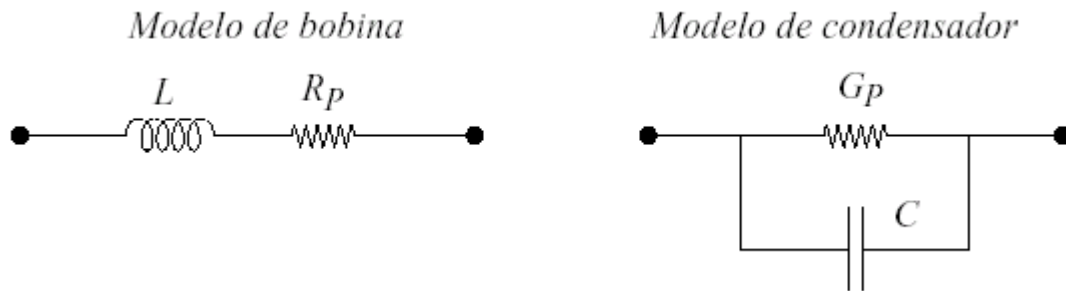


Figura 2: modelos mejorados para una bobina y un condensador reales.

En los siguientes ejercicios, se expondrá la red de la figura 1 a entradas que varían en frecuencias lo suficientemente altas como para poder ignorar la conductancia parásita paralela del condensador. Por lo tanto, sólo es necesario que nos preocupemos de la resistencia parásita en serie de la bobina.

- (3-1) Tome una bobina de 47 mH, un condensador de 0.0047  $\mu$ F, una resistencia de 220  $\Omega$  y otra de 1000  $\Omega$  de su kit de prácticas y llévelos al pupitre de instrumentos. Utilice el medidor de impedancia GenRad para medir estos elementos y determinar la resistencia y la conductancia parásitas de la bobina y el condensador, respectivamente.

Para medir la bobina, ajuste el medidor para 1 kHz, el modelo de serie y el tipo adecuado de elemento y el rango de valores. El medidor leerá directamente el valor de la bobina, además de leer  $Q$ , a partir del cual puede determinar  $R_p$  a partir de  $Q = \omega L / R_p$ , donde  $\omega = 2\pi \times 1$  kHz.

Para medir el condensador, ajuste el medidor para 1 kHz, el modelo en paralelo y el tipo adecuado de elemento y el rango de valores. El medidor leerá directamente el valor del condensador, además de leer  $D$ , a partir del cual puede determinar  $G_p$  a partir de  $D = G_p / \omega C$ , donde  $\omega = 2\pi \times 1$  kHz.

- (3-2) Construya la red de segundo orden de la figura 1 utilizando la bobina, el condensador y la resistencia de 220  $\Omega$  medidos.
- (3-3) Ajuste el generador de señales para producir una onda cuadrada de 10 V pico a pico en 50 Hz con un offset de 5 V, de forma que su tensión de salida de circuito abierto pase entre 0 y 10 V. Mida con el osciloscopio la respuesta transitoria de la tensión  $v_{OUT}(t)$  de la resistencia al paso de transición positiva y compare la respuesta con la trazada en los ejercicios pre-práctica. Basta con medir los datos en los tiempos correspondientes a los puntos dibujados en el ejercicio pre-práctica 3-2. Mida también la tensión  $V_{TP}$ , la frecuencia de oscilación  $\omega_T$  y la velocidad de disminución  $\alpha_T$ . La forma más fácil de

medir  $\alpha_T$  es midiendo el tiempo  $\tau_T$  durante el cual disminuye la respuesta transitoria en  $1/e$  y, a continuación, calcular  $\alpha_T = 1/\tau_T$ .

Sustituya la resistencia de  $220 \Omega$  por la de  $1000 \Omega$  medida, y repita el ejercicio. Para el siguiente ejercicio, sustituya la resistencia de  $1000 \Omega$  por la de  $220 \Omega$ .

- (3-4) Ajuste el generador de señales de forma que produzca una tensión sinusoidal pico a pico de circuito abierto de  $10 \text{ V}$  con un offset cero. La tensión de circuito abierto es  $v_{IN}(t)$ . Conecte la salida SYNC del generador a un canal del osciloscopio y ponga en marcha el osciloscopio en ese canal. Utilice el otro canal del osciloscopio para medir la tensión de la resistencia  $v_{OUT}(t)$  sobre la gama de frecuencias de  $1$  a  $100 \text{ kHz}$ . En concreto, mida la amplitud pico a pico de  $v_{OUT}$  y la diferencia de tiempo entre el cruce cero cercano de la salida del SYNC y  $v_{OUT}$ . Observe que la salida de SYNC tiene los mismos cruces cero que  $v_{IN}$ . En los ejercicios post-práctica tendrá que determinar  $H_S$  y  $\phi_S$  a partir de esos datos. Bastará con medir los datos en las frecuencias correspondientes a los puntos dibujados en el ejercicio pre-práctica 3-5. Mida también el ratio de tensión de pico  $H_{SP}$  de  $H_S$ , la frecuencia  $\omega_{SP}$  en la que tiene lugar el pico y  $Q$ . La medición de este último resulta más fácil si se mide la diferencia entre las dos frecuencias en las que cae el ratio  $H_S$  desde su valor de pico de  $H_{SP}$  por un factor  $\sqrt{2}$ . Esta diferencia de frecuencia debería ser  $2\alpha_T$ . Por consiguiente,  $Q$  viene dado por  $Q = \omega_{SP}/2\alpha_T$ .

Es importante observar que  $\phi_S(\omega_S)$  es el desplazamiento de fase de  $v_{OUT}$  en relación a  $v_{IN}$ . La forma más conveniente de medir  $\phi_S$  es midiendo el retardo de tiempo desde los cruces cero de  $v_{IN}$  a los cruces cero de  $v_{OUT}$  y convertirlo, posteriormente, en un desplazamiento de fase. Desafortunadamente,  $v_{IN}$  se encuentra dentro del generador de señales y, por consiguiente, no se puede medir. Sin embargo, la salida SYNC del generador y  $v_{IN}$  tienen los mismos cruces cero, razón por la cual en este ejercicio se utiliza dicha salida como referente para medir el desplazamiento de fase.

Sustituya la resistencia de  $220 \Omega$  por la de  $1000 \Omega$  medida y repita el ejercicio. Para el siguiente ejercicio, sustituya la resistencia de  $1000 \Omega$  por la de  $220 \Omega$ .

- (3-5) En este ejercicio tendrá que utilizar la red de la figura 1 para filtrar una señal musical.

Consiga un reproductor de CD, un altavoz de potencia, una caja de condensador a década de  $0.1$ - $1.1 \mu\text{F}$  del pupitre de instrumentos. Conecte la caja de condensador a década de  $0.1$ - $1.1 \mu\text{F}$  en el lugar de condensador de  $0.0047 \mu\text{F}$  de su circuito del ejercicio anterior. Utilice los mandos de la caja del condensador para ajustar la capacitancia a  $0.5 \mu\text{F}$ . Conecte el altavoz a través de la resistencia, de forma que pueda escuchar  $v_{OUT}$ . Encienda el reproductor de CD y el altavoz potenciado y ajuste el volumen para poder escuchar la música.

Escuche la música y observe la señal  $v_{OUT}$  en el osciloscopio al tiempo que ajusta los mandos de la caja del condensador de 0.1 a 1.1  $\mu F$ . ¿Qué sucede con la música cuando varía la capacitancia? ¿Por qué?

- (3-6) **OPCIONAL.** En el ejercicio anterior utilizó una red de segundo orden como filtro pasa banda utilizando la tensión a través de la resistencia de 220  $\Omega$  como la señal de salida al altavoz. En esta ocasión utilizará las tensiones a través de la bobina y el condensador como salida. Primero ajuste la capacitancia de la caja de condensador en 0.5  $\mu F$ .

Conecte el altavoz y el osciloscopio a través de la bobina. Observe la señal que aparece en el osciloscopio y escuche la música.

A continuación, intente conectar el altavoz y el osciloscopio a través del condensador. ¿En qué difiere esta señal de la producida anteriormente a través de la bobina? Razone su respuesta.

### Ejercicios post-práctica

Complete estos ejercicios en su cuaderno de prácticas utilizando las respuestas que calculó en los ejercicios pre-práctica y los datos medidos durante los ejercicios de laboratorio. El objetivo principal de los ejercicios post-práctica es explicar las discrepancias que puedan existir entre las respuestas que calculó en los ejercicios pre-práctica y aquellas medidas durante los ejercicios de laboratorio.

- (3-1) Trace los datos registrados de la respuesta transitoria en el gráfico que preparó en los ejercicios pre-práctica. ¿Cuál es la correspondencia de los datos medidos con el gráfico teórico? Es decir, ¿en qué difieren?
- (3-2) Considere de nuevo la respuesta transitoria. En forma de gráfica para los dos casos de  $R$ , compare la tensión calculada y medida de  $v_{TP}$ , la frecuencia  $\omega_T$  y la velocidad de disminución  $\alpha_T$ . ¿Cómo son los parámetros calculados y medidos en comparación? A continuación, utilice los valores calibrados de los elementos de red, incluida la resistencia parásita de la bobina, para calcular de nuevo los parámetros e inclúyalos en la gráfica. ¿Son estos últimos valores más acertados que los parámetros medidos? ¿Explican estos nuevos parámetros las diferencias observadas en el ejercicio post-práctica 3-1?
- (3-3) En primer lugar, convierta las amplitudes de  $v_{OUT}$  medidas en estado estacionario sinusoidal a medidas de  $H_S(\omega_S)$ , dividiendo las amplitudes medidas por la amplitud de 10 V de  $v_{IN}$ . En segundo lugar, convierta las diferencias de tiempo del cruce cero medidas en estado estacionario sinusoidal a medidas de  $\phi_S(\omega_S)$ , dividiendo las diferencias de tiempo por el periodo de forma de onda correspondiente y, a continuación, multiplicándolo por 360 grados. Por último, trace los datos de respuesta de frecuencia en el gráfico correspondiente realizado durante los ejercicios pre-práctica. ¿En qué medida se corresponden los datos medidos con el gráfico teórico? Es decir, ¿en qué difieren?

- (3-4) Considere de nuevo la respuesta de frecuencia. En forma de gráfica para los dos casos de  $R$ , compare el ratio  $H_{SP}$  de tensión de pico, la frecuencia  $\omega_{sp}$  y  $Q$  calculados y medidos. ¿Cómo son los parámetros calculados y medidos en comparación? A continuación, utilice los valores calibrados de los elementos de red, incluida la resistencia parásita de la bobina, para calcular de nuevo los parámetros e inclúyalos en la gráfica. ¿Son estos últimos valores más acertados que los parámetros medidos? ¿Explican estos nuevos parámetros las diferencias observadas en el ejercicio post-práctica 3-3?

## Cómo utilizar MATLAB en la práctica 2

No es necesario utilizar Matlab, pero les animamos a que lo hagan cuando tracen el gráfico del ejercicio post-práctica 2-1. *Nota: este documento es específico para este ejercicio. En Athena existen distintos recursos de ayuda general para Matlab. Consulte la página web: <http://web.mit.edu/olh/Matlab/>. Para utilizar Matlab, primero debe teclear “add matlab” (añadir matlab) en el aviso de Athena y, a continuación, recurrir a Matlab tecleando la orden “matlab” en el aviso de Athena.*

### Ejercicio pre-práctica (3-2)

Introduzca los valores para  $L$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $R_{IN}$  y  $V_{TI}$  en el *prompt* (aviso) de matlab.

```
L = 47e-3;  
C = 0.0047e-6;  
R = 220;  
RIN = 50;  
VTI = 10;
```

Su objetivo final es trazar la respuesta transitoria de  $v_{OUT}(t)$  para  $0 \leq t \leq 0.3$  ms y para ello debe generar un vector de tiempo  $t$  y un vector de tensión  $v_{OUT}$ . Comience utilizando el comando “`linspace`” para generar un vector de tiempo  $t$  de valores de tiempo entre 0 y 0.34 ms a igual distancia.

```
t = linspace(0,0.3e-3,1000);
```

Teclee “`help linspace`” en el aviso de matlab para obtener más detalles sobre el comando “`linspace`”. En el ejercicio de pre-práctica 3-1, obtuvo una expresión de la forma  $v_{OUT}(t) = V_{TO} e^{-\alpha_T t} \sin(\omega_T t + \phi_T)$ . Tendrá que utilizar esta expresión para generar el vector de tensión  $v_{OUT}$ . Introduzca los parámetros  $V_{TO}$ ,  $\alpha_T$ ,  $\omega_T$  y  $\phi_T$  en matlab en términos de  $L$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $CIN$  y  $VTI$ . Una vez introducidos, ya está listo para generar el vector de tensión  $v_{OUT}$ .

```
vOUT = VTO * exp(-1 * alphaT * t) .* sin(omegaT * t + phiT) ;
```

En este momento debería tener dos vectores,  $t$  y  $v_{OUT}$ , que podrá utilizar para trazar la respuesta transitoria. Utilice el comando “`plot`” para generar un diagrama.

```
plot(t, vOUT) ;
```

Si desea utilizar otros comandos para formatear mejor el diagrama, pruebe con los siguientes comandos: “`title`”, “`xlabel`”, “`ylabel`”, “`axis`” y “`grid`”. Si necesita ayuda sobre cualquier comando de matlab, teclee “`help command`” en el aviso de Matlab.

Repita lo mismo para  $R = 1000$ .

### Ejercicio pre-práctica (3-5)

En este ejercicio se le pide que cree un gráfico logarítmico de  $H_S$  y un gráfico semilogarítmico de  $\phi_s$ , lo cual le resultará muy fácil con la ayuda de matlab. Comience por crear dos vectores de fila en los que se listen los coeficientes de numerador y denominador de  $s$  en potencias descendentes. Por ejemplo, considere la función de transferencia  $H_S(s) = \frac{sR}{s^2L + s(R + R_{IN}) + \frac{1}{C}}$ .

El comando que se indica a continuación crea un vector de fila `num` en el que se listan los coeficientes del numerador de  $s$  en potencias descendentes.

```
num = [R 0];
```

Observe el coeficiente cero correspondiente a  $s^0$ . A continuación, cree un vector de fila `den` para el denominador.

```
den = [L (R+RIN) (1/C)];
```

Ahora puede utilizar el comando de matlab “`tf`” para crear una función de transferencia de los vectores de fila `num` y `den`.

```
HS = tf(num,den);
```

Posteriormente, desea generar un vector de frecuencias para el eje  $x$  de los diagramas de magnitud y fase. En el ejercicio pre-práctica 3-5 se le pide que cree gráficos por encima del rango  $2\pi \times 1 \text{ kHz} \leq \omega_s \leq 2\pi \times 100 \text{ kHz}$ . En este rango, cree un vector de frecuencia cuyas frecuencias estén a distancias iguales desde el punto de vista logarítmico.

```
omegaS = logspace(log10(2*pi*10e3).MAG(:), log10(2*pi*100e3), 100);
```

Para obtener más información, teclee “`help logspace`” en el aviso de matlab. Ahora, puede utilizar el comando “`bode`” para calcular la magnitud y la fase en cada una de las frecuencias que se especifican en el vector `omegaS`.

```
[MAG,PHASE] = bode(HS, omegaS);
```

En el ejercicio pre-práctica 3-5 se le pide que realice el gráfico de la magnitud en una gráfica logarítmica, lo cual puede realizar en matlab utilizando el comando “`log-log`”.

```
loglog(omegaS/(2*pi*10e3),MAG(:));
```

Ya tiene el gráfico de magnitud. Observe que el eje  $x$  está normalizado en 10 kHz, tal y como se especificaba en el ejercicio pre-práctica 3-5. En cuanto al ejercicio anterior, puede formatear el gráfico con los comandos “`grid`”, “`title`”, “`ylabel`”, “`xlabel`”, etc. En el ejercicio pre-práctica se pide un gráfico semilogarítmico de la fase. Utilice el comando “`semilog`” para generarlo.

```
semilogx(omegaS/(2*pi*10e3),PHASE(:));
```

Ya ha terminado. Una vez formateado el gráfico, repita el ejercicio para  $R = 1000$ .