



Evaluación de un Acelerómetro MEMS en un Péndulo

Curso 2011-2012

José Manuel Quero Reboul
Microsistemas
Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad de Sevilla

INDICE

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| 2. Estudio del péndulo..... | 3 |
| 2.1. Balance de energía..... | 4 |
| 2.2. Aproximación pequeñas oscilaciones..... | 4 |
| 2.3. Observaciones al modelado..... | 5 |
| 3. Instrumentación..... | 6 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 8 |
| 2. DESARROLLO PRÁCTICO..... | 8 |
| 3.1. Modo reposo o estático..... | 8 |
| 3.2. Comportamiento dinámico..... | 13 |
| ANEXO I. Características de Fabricante del Acelerómetro ADXL311..... | 17 |

1. INTRODUCCIÓN

En esta práctica vamos a realizar un estudio sobre el comportamiento tanto dinámico como estático de un acelerómetro diseñado con técnicas de microsistemas (MEMS) e implementado sobre un circuito integrado.

Para dicho estudio vamos a utilizar el modelo ADXL311, cuyas hojas de características de fabricante se adjuntan en el ANEXO I de esta memoria. Para un mayor entendimiento, se recomienda una lectura detallada de sus características técnicas antes de empezar esta práctica.

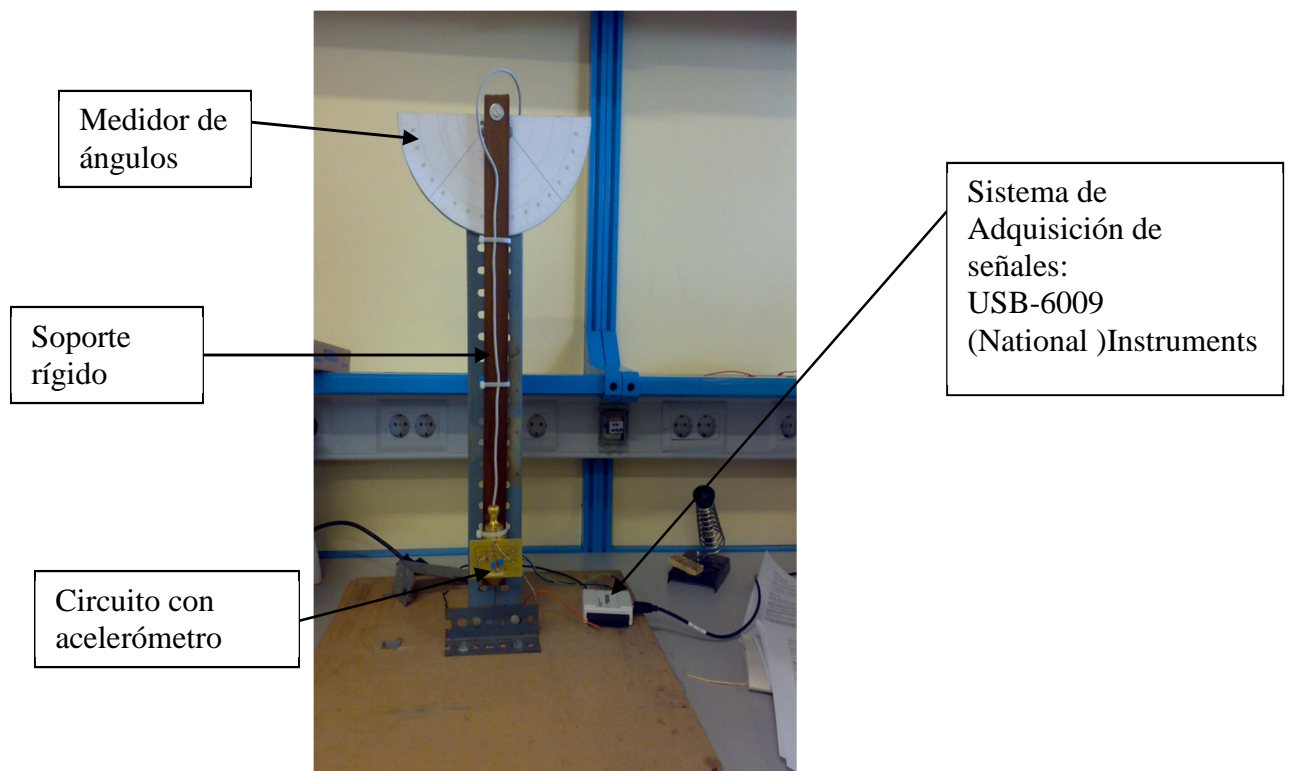


Figura 1. Maqueta de un péndulo empleada para la realización de la práctica

Para el estudio de dicho acelerómetro se ha montado un circuito unido a un eje de oscilación para producirnos oscilaciones periódicas amortiguadas, que nos sirvan para el estudio dinámico del dispositivo MEMS. Dicho circuito no es más que el especificado para su correcto funcionamiento proporcionado por el fabricante, y particularizado para nuestros intereses.

Una foto del diseño del péndulo es el que se muestra en la Figura 1.

Nuestro objetivo va a ser la evaluación y comparación del comportamiento de nuestro acelerómetro con las especificaciones dadas por el fabricante.

Esta maqueta se encuentra a disposición de los alumnos en el Laboratorio de Máster del Dpto. de Ingeniería Electrónica, ubicado en la primera planta del Laboratorio L2.

2. Estudio del péndulo.

Para un mejor entendimiento de los resultados a esperar, y para no perder tiempo en meras ecuaciones de niveles muy inferiores a los que nos encontramos, se proporciona un resumen de las ecuaciones y del comportamiento esperado para un péndulo simple en situación de movimiento armónico subamortiguado.

Un péndulo ideal está formado por una masa puntual m suspendida de un punto fijo por medio de un hilo inextensible y sin peso como se muestra en la siguiente figura. Las fuerzas que actúan sobre la masa m son la tensión de la cuerda y el peso. La fuerza tangencial del peso es una fuerza recuperadora dirigida hacia $\theta = 0$, en dirección opuesta al desplazamiento.

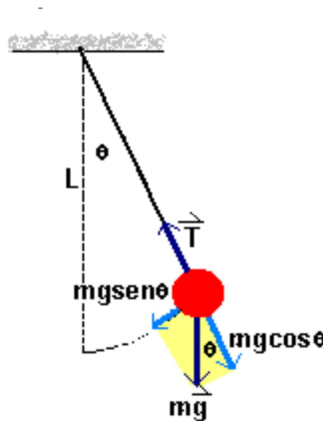


Figura 2. Fuerzas aplicadas a la masa del péndulo.

Por consiguiente, la ecuación de movimiento se puede escribir como:

$$-mg \operatorname{sen} \theta = m \frac{d^2(L\theta)}{dt^2}$$

La ecuación diferencial anterior se puede escribir también como:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{L} \operatorname{sen} \theta = 0. \quad [1]$$

Esta última ecuación corresponde a un movimiento que no es armónico simple debido a que, la función $\text{sen}(\theta)$ no es lineal, y no es posible obtener una resolución analítica.

2.1. Balance de energía.

A la misma ecuación se puede llegar si se considera que la energía se conserva si se desprecia las pérdidas de rozamiento. En este caso, la energía potencial pasa a cinética en el movimiento del péndulo. Tomemos referencia de energía potencial cero el punto en el que la masa se encuentra en reposo y el péndulo en posición vertical. En un punto inicial del péndulo, la energía potencial será

$$E = mg(L - L \cos \theta_0) \quad [2]$$

Siendo θ_0 una posición inicial arbitraria.

En la posición θ , la energía del péndulo es parte cinética y parte potencial

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + mg(L - L \cos \theta) \quad [3]$$

Sin pérdidas, la energía se conserva, por lo que si igualamos [2] y [3] obtenemos una expresión para la velocidad:

$$v^2 = 2gL(\cos \theta - \cos \theta_0) \quad [4]$$

Si dejamos libre el péndulo partiendo de su posición horizontal, la velocidad máxima se obtiene en el punto inferior, siendo su valor:

$$v_{max} = \sqrt{2gL} \quad [5]$$

Y como la velocidad tangencial y la velocidad angular se relacionan por $v = \omega L$, se tiene que

$$\omega_{max} = \sqrt{2g/L} \quad [6]$$

2.2. Aproximación pequeñas oscilaciones.

Como se ha dicho anteriormente, la ecuación [1] que describe el comportamiento del péndulo no puede resolverse analíticamente. Sin embargo, para ángulos pequeños se tiene aproximadamente que $\text{sen}(\theta) \approx \theta$. Por lo tanto la ecuación anterior queda:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{g}{L} \theta = 0. \quad [7]$$

Esta ecuación corresponde a un movimiento armónico simple de frecuencia angular ω dada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad [8]$$

Como bien se puede observar, nuestro péndulo dista bastante de la idealidad, por lo que deberemos aproximarnos un poco más. Para ello, introducimos un factor de amortiguamiento, dado por una fuerza proporcional a la velocidad y opuesta al sentido del movimiento. No vamos a entrar en detalle en el planteamiento de ecuaciones, por lo que damos directamente la solución.

$$x = A_0 e^{-\gamma t} \cos(\omega t + \phi_0)$$

donde

$$\gamma = \frac{b}{2M}$$

y **b** la constante de proporcionalidad entre fuerza de rozamiento o amortiguamiento y velocidad ($F = -b \cdot v$). Y siendo la frecuencia del movimiento del sistema:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$$

donde ω_0 es la frecuencia natural del péndulo en ausencia de amortiguamiento.

En resumen, cabríamos esperar una señal de salida análoga a la siguiente figura:

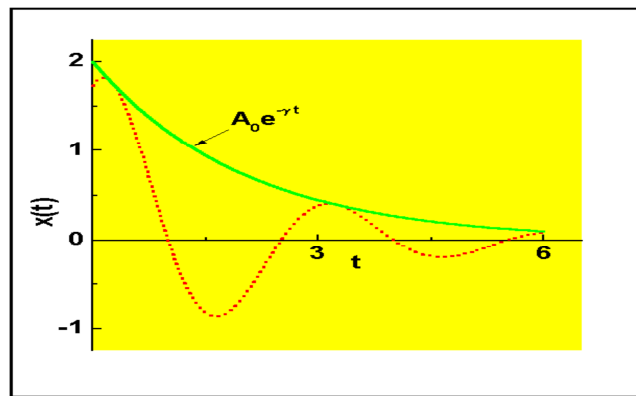


Figura 3. Comportamiento del péndulo considerando amortiguamiento por rozamiento.

2.3. Observaciones al modelado

Para el caso del acelerómetro y el diseño del péndulo que nos ocupa, cabría mencionar algunas particularidades. Para el caso anterior, teníamos una masa **m** del péndulo. En nuestro caso sería una masa **M** del péndulo y otra **m** del acelerómetro. El por qué de esta diferenciación es debido a que nosotros estamos midiendo aceleraciones en un sistema de referencia no inercial, es decir, el sistema está uniformemente acelerado y por tanto estará afectado por fuerzas inerciales que nos estarán falseando nuestras medidas y no obtendremos los valores esperados para el caso de una masa puntual sometida a la fuerza de la gravedad.

El esquema al que nos referimos podría presentarse de la siguiente forma:

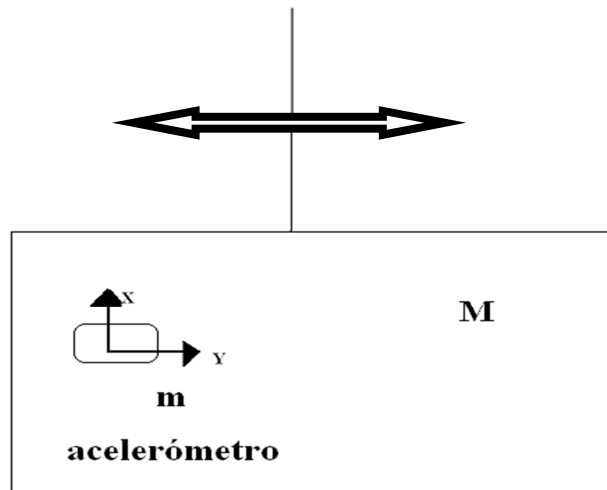


Figura 4. Sistema inercial en el que la pequeña masa del acelerómetro m sufre aceleraciones debido a estar unida mediante anclajes elásticos a la masa M .

Debido a este fenómeno no inercial, los valores de aceleración, tal y como se podrá comprobar en el desarrollo de esta práctica, no corresponden con los valores teóricos esperados para un movimiento periódico de estas características.

3. Instrumentación.

Para la elaboración de esta práctica se va a hacer uso del software Labview, con opción de capturar ficheros para su mejor visualización en Matlab.

Para la obtención de las señales en Labview se han usado las salidas de tensión del eje X e Y del acelerómetro, capturadas a través de la tarjeta USB-6009 de National Instruments, tal y como se observa en la Figura 1. Estas señales se han preprocesado para obtener una mejor calidad de la señal de salida. Debido a la baja frecuencia del movimiento en cuestión, estas señales se han filtrado mediante un filtro paso bajo elíptico con una frecuencia de corte de 10 Hz.

La carpeta donde se encuentran los archivos .VI correspondientes a la aplicación, se encuentra en el siguiente directorio:

C:\Documents and Settings\Paco\Escritorio\Practica_uSIST_péndulo

El fichero .VI a utilizar el *pendulo.vi*.

En este mismo directorio también se encuentra otra carpeta, *\Data*, donde podemos encontrar el archivo *grafica.m* que nos va a servir para representar la gráfica de las señales obtenidas en Matlab.

El archivo *pendulo.vi*, tiene la opción de grabar la señal deseada a un archivo, tal y como se ha comentado anteriormente. Para ello, se debe pulsar el botón añadido a la aplicación con este fin. Dichos archivos tienen una capacidad de 10 MB, y se encuentran en la carpeta *\Data* dentro del directorio de trabajo. En este directorio es donde nos tenemos que situar en Matlab para que la función *pendulo.m* funcione

correctamente. De todas formas, también se pueden realizar los mismos cálculos en la aplicación Labview.

Para comenzar a realizar medidas, hay que pulsar el botón de ejecución continua, tal y como se muestra a en el diagrama frontal donde también se han incluido qué es cada uno de los elementos que podemos encontrar en él.

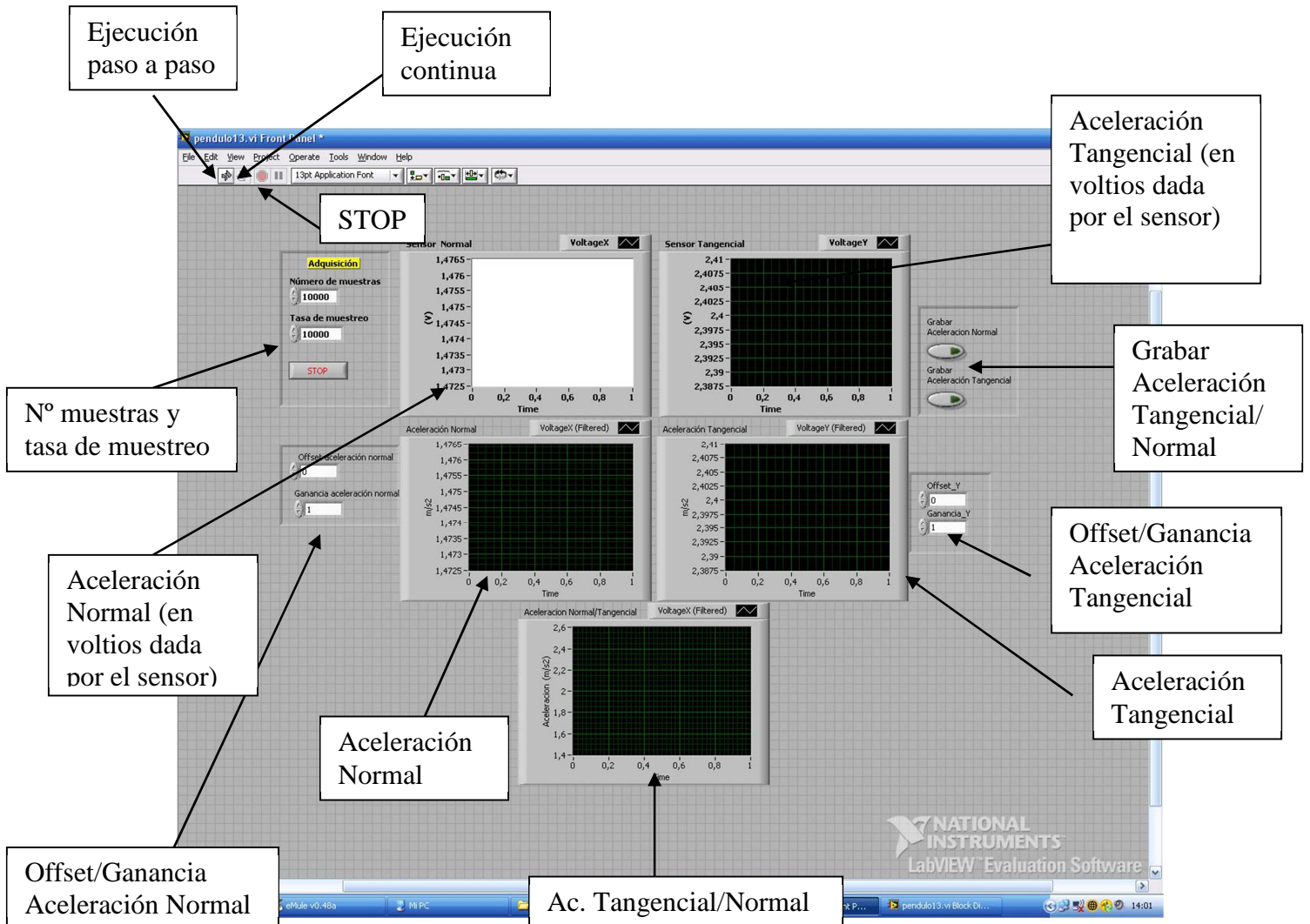


Figura 5. Descripción de la pantalla de presentación de aceleraciones en Labview.

En el siguiente apartado comienza la realización de la práctica. Todas las cuestiones deben ser contestadas y entregadas al profesor responsable de la asignatura.

Evaluación de un Acelerómetro MEMS en un Péndulo

Memoria

NOMBRE DE LOS ALUMNOS:

| |
|--|
| |
| |

FECHA Y HORA:

1. INTRODUCCIÓN.

El objetivo de esta práctica es obtener la función de transferencia de un acelerómetro comercial de manera que se obtenga las aceleraciones en ejes X e Y en función de las tensiones que éste genera. Se plantean un conjunto de fases y preguntas que se deben contestar secuencialmente, aunque se recomienda avanzar en ellas antes de contestarlas definitivamente hasta aclarar las dudas que surjan al alumno. Medir las señales con dos cifras decimales.

2. DESARROLLO PRÁCTICO

3.1. Modo reposo o estático.

En esta primera parte de la práctica, vamos a observar el comportamiento estático del sistema. Para ello se dispone en la maqueta de una escala en grados donde podemos medir aproximadamente el valor del ángulo de inclinación del acelerómetro. Tomar siempre una misma referencia, lo más cercana al acelerómetro, para medir la inclinación. En lo que sigue, denominaremos ejes X e Y a los que aparecen dibujados en la Figura 4.

En modo estático, nos vamos a fijar simplemente en los valores obtenidos en las gráficas de tensión, no en las de aceleración, pues éstas aún no están inicialmente escaladas.

En estado de reposo, con el eje situado en 0° de la escala, iniciamos una medida de las salidas del acelerómetro.

1) ¿Cuál es la tensión de salida en cada eje?

Eje X: **V**

Eje Y: **V**

(Nota: Selecciona no autoescalado de señal en la escala vertical de la ventana dónde se representan cada una de las tensiones y modifica la escala manualmente para una mejor observación de los resultados. También se recomienda pasar el péndulo lentamente desde posición vertical a horizontal y observar cómo cambian los valores de tensión V_x y V_y).

2) ¿Sabrías deducir a partir de las medidas anteriores cuál es la tensión de alimentación del sistema sin tener que medirla?

.....V

3) ¿Cuál ha sido tú razonamiento?

4) A partir de estos resultados, ¿Cuál de los ejes (mirando a las gráficas de Labview) está midiendo un valor de gravedad distinto de cero en esta situación?

5) ¿Sabrías decirme si es positiva o negativa y por qué es éste el eje acelerado?

Mueve el eje con la mano, manteniéndolo fijo para cada posición, de un lado a otro, de más a menos 90° , y observa cómo varían las tensiones de ambos ejes. Mantén el eje lo más estable posible en dicha posición para poder realizar una buena medida.

6) ¿Cuál es la tensión para gravedad o aceleración cero en cada uno de los ejes?

Eje X: **V**

Eje Y: **V**

7) **¿En qué posiciones se obtienen?**

Eje X: °

Eje Y: °

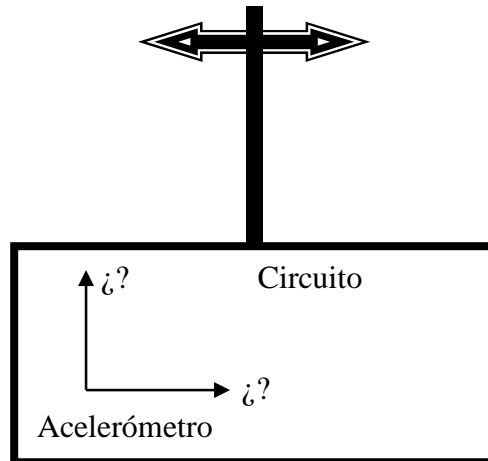
Nota: usar el semicírculo graduado colocado en el eje de giro del péndulo.

8) **¿Cuánto difieren respecto de los valores esperados en tensión según las especificaciones, sabiendo que la tensión de alimentación real es de 5V?**

Eje X: V

Eje Y: V

9) **¿Sobre qué eje, según la aplicación, estamos midiendo la aceleración vertical (normal) y horizontal (tangencial)? Razona tu respuesta.**



10) **¿Para que posición, midiendo en la escala graduada, tendrán ambos el mismo valor de la aceleración? (medir el ángulo de giro con el criterio de signos indicado en el semicírculo graduado)**

11) Tal y como se puede comprobar este sistema puede detectar cambios en la aceleración, realizando distintas medidas de los valores de la aceleración en distintos puntos, **¿Cuál sería su posición ideal para medir variaciones de aceleración sin presencia de gravedad? Es decir, que ningún eje tuviera aceleración en estado de reposo.**

12) Veremos que al moverse el péndulo, a la aceleración de la gravedad medida por el sensor se le sumarán las componentes de aceleración tangencial o normal debidas al propio movimiento. En nuestro caso estamos interesados en medir la aceleración debida al movimiento del péndulo, por lo que habrá que quitarles la componente debida a la gravedad, que actúa como Offset, y calcular la ganancia que tiene el péndulo entre 0 y 90°. **¿Cuál es el eje que mide aceleraciones normales, el X o Y?**

13) Teniendo en cuenta la diferencia de tensión entre 0° y 45°, y entre 45° y 90°. Para ello se debe completar las tensiones para las posiciones de 0°, 45° y 90°, y calcular los valores de sensibilidad entre los dos intervalos y el valor medio, todo ello indicado en la tabla siguiente:

| Posición | 0° | 45° | 90° | V(0°)-V(45°) | V(45°)-V(90°) | $\frac{\Delta V}{\Delta^\circ}$ (0°-45°) | $\frac{\Delta V}{\Delta^\circ}$ (45°-90°) | $\frac{\Delta V}{\Delta^\circ}$ (medio) |
|----------------|----|-----|-----|--------------|---------------|---|--|--|
| V _x | | | | | | | | |
| V _y | | | | | | | | |

¿Qué sensibilidad media has calculado para los dos ejes?

Eje X:V/°

Eje Y:V/°

14) Según el fabricante, para un eje perpendicular a la gravedad, la sensibilidad a cambios de inclinación, difieren según sean éstos mayores o menores de 45°, **¿Cuánto difieren estas sensibilidades de las especificaciones?**

A continuación vamos a calcular los coeficientes de la función de transferencia lineal que relaciona la aceleración con las tensiones medidas en cada eje. Para ello vamos a calcular la ganancia y la tensión offset de cada eje.

15) Rellena la siguiente tabla midiendo las tensiones de salida para los distintos ángulos indicados. Poner también los valores de aceleración calculados teóricamente debido a la proyección sobre los ejes X e Y del peso para cada posición (para facilitar la determinación de estas componentes de aceleración debida al peso, se recomienda dibujar la aceleración de la gravedad y los ejes X e Y en la misma tabla).

| Ángulo | Tensión(V) | | a (m/s ²) | | Dibuja los ejes X e Y y la gravedad |
|--------|------------|----------------|-----------------------|----------------|-------------------------------------|
| | Eje Normal | Eje Tangencial | Eje Normal | Eje Tangencial | |
| -90° | | | | | |
| -45° | | | | | |
| 0° | | | | | |
| 45° | | | | | |
| 90° | | | | | |

16) ¿Cuál será el offset que habrá que quitar a ambas señales de tensión?

Eje normal:.....V

Eje tangencial:.....V

17) Ahora se puede **calcular** la ganancia de la función de transferencia a partir de la tabla anterior:

| Ángulo | $\Delta V = V(^{\circ}) - V_{offset}$ | | $a(^{\circ}) - a(0^{\circ})$ | | $K = \Delta a / \Delta V$ | |
|--------|---------------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| | Eje Normal | Eje Tangencial | Eje Normal | Eje Tangencial | Eje Normal | Eje Tangencial |
| -90° | | | | | | |
| -45° | | | | | | |
| 0° | | | | | | |
| 45° | | | | | | |
| 90° | | | | | | |

Suponiendo que el péndulo es lineal, podemos tomar como la ganancia la media de estos valores obtenidos e introducirlos en los controladores numéricos asociados a la ganancia de los que dispone la pantalla principal de la aplicación en Labview.

18) ¿Cuál será la ganancia de ambos ejes?

Eje normal:..... (m/s²)/V

Eje tangencial:..... (m/s²)/V

Introducir los valores calculados en los controladores numéricos asociados al Offset de los que dispone la pantalla principal de la aplicación en Labview.

19) Escribir las funciones de transferencia obtenidas:

$$a_n(0) = K_n \cdot (V_n(0) - V_{n_offset}) = \dots \cdot (V_n(0) - \dots) \text{ m/s}^2$$

$$a_t(0) = K_t \cdot (V_t(0) - V_{t_offset}) = \dots \cdot (V_t(0) - \dots) \text{ m/s}^2$$

20) Deja el péndulo en la posición de reposo y apunta las aceleraciones que aparecen en las ventanas de Labview:

$$a_n(0) = \dots \text{ m/s}^2$$

$$a_t(0) = \dots \text{ m/s}^2$$

21) ¿Coinciden con las esperadas? Explica tu respuesta.

3.2. Comportamiento dinámico.

A partir de ahora nos vamos a fijar en el comportamiento dinámico del sistema. Para ello, debemos primero escalar la señal y convertirla en valores de aceleración.

22) Antes de comenzar, hacemos oscilar el péndulo y nos fijamos en los valores que se obtienen y de cómo dependen de la amplitud inicial que le demos a éste. ¿Hay alguna diferencia cualitativa en las señales obtenidas? ¿Amplitud? ¿Frecuencia?

Para una mejor observación de las señales de aceleración, pasamos a escalar los valores de tensión. Para ello debemos hacer un cálculo del offset y de la ganancia de la señal y

utilizaremos algunos de los valores obtenidos anteriormente y algunos que habrá que medir ahora.

Para esta segunda parte de la práctica, se recomienda no sobrepasar los 40-45° de amplitud inicial, pues el péndulo no se comporta bien mecánicamente para inclinaciones mayores.

Haciendo oscilar ahora el péndulo podrá observar los valores de aceleración reales que se obtienen. Se recomienda que pares el programa de labview para congelar las curvas en la pantalla y poder medir dichas oscilaciones.

23) ¿Cuál es la frecuencia de oscilación en cada eje?

Eje X:.....Hz

Eje Y:.....Hz

24) ¿Es la misma? ¿Por qué?

25) Observando la gráfica donde aparecen ambas aceleraciones, dibuja y explica con qué posición del péndulo corresponden los picos y los valles de ambas curvas y explica dichos puntos significativos.

26) Observando los valores de la amplitud de las señales obtenidas, **¿qué explicación darías a que haya valores mayores que g en estas aceleraciones?**

27) Observando el signo de nuestra señal y comparando con la hoja del fabricante, **¿En qué sentido está orientado el dispositivo para cada eje?**

28) Si aumentamos el número de muestras a obtener, de 1000 a 5000 por ejemplo, podemos ver el decaimiento de la amplitud de la señal en el tiempo. **¿Cuál es la constante de amortiguamiento del sistema si se aproxima una envolvente?**

29) A continuación, vamos a hacer oscilar el péndulo desde cualquier inclinación inicial. En cualquier momento hacemos una parada brusca de su movimiento pasando por el ángulo 0° , colocando un bolígrafo o cualquier material rígido de forma que golpee a la barra de madera en el punto más bajo de la trayectoria del péndulo, pero teniendo cuidado de no tocar la tarjeta del sensor. Observa la señal que se obtiene en ambos ejes **y dibújalas.**

30) ¿Podrías explicar su forma?

31) ¿Cuáles son los valores máximos de aceleración que se obtienen?

32) ¿Son positivos o negativos? ¿Por qué?

ANEXO I. Características de Fabricante del Acelerómetro ADXL311.

FEATURES

- Low cost
- High resolution
- Dual-axis accelerometer on a single IC chip
- 5 mm × 5 mm × 2 mm CLCC package
- Low power < 400 μ A (typ)
- X-axis and Y-axis aligned to within 0.1° (typ)
- BW adjustment with a single capacitor
- Single-supply operation
- High shock survival

APPLICATIONS

- Tilt and motion sensing in cost-sensitive applications
- Smart handheld devices
- Computer security
- Input devices
- Pedometers and activity monitors
- Game controllers
- Toys and entertainment products

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL311 is a low cost, low power, complete dual-axis accelerometer with signal conditioned voltage outputs, all on a single monolithic IC. The ADXL311 is built using the same proven iMEMS® process used in over 100 million Analog Devices accelerometers shipped to date, with demonstrated 1 FIT reliability (1 failure per 1 billion device operating hours).

The ADXL311 will measure acceleration with a full-scale range of $\pm 2 g$. The ADXL311 can measure both dynamic acceleration (e.g., vibration) and static acceleration (e.g., gravity). The outputs are analog voltages proportional to acceleration.

The typical noise floor is $300 \mu g/\sqrt{\text{Hz}}$ allowing signals below 2 mg (0.1° of inclination) to be resolved in tilt sensing applications using narrow bandwidths (10 Hz).

The user selects the bandwidth of the accelerometer using capacitors C_X and C_Y at the X_{FILT} and Y_{FILT} pins. Bandwidths of 1 Hz to 2 kHz may be selected to suit the application.

The ADXL311 is available in a 5 mm × 5 mm × 2 mm 8-terminal hermetic CLCC package

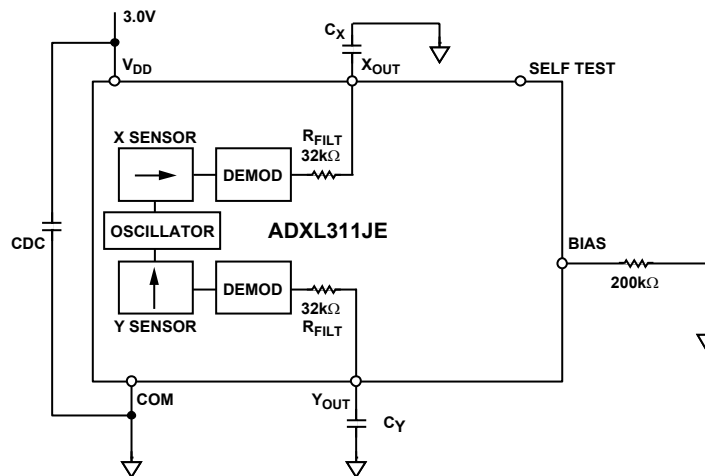


Figure 1. Functional Block Diagram

Rev. A

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective companies.

TABLE OF CONTENTS

| | | | |
|--|---|--|----|
| Specifications..... | 3 | Pin Configuration and Functional Descriptions..... | 9 |
| Absolute Maximum Ratings..... | 4 | Outline Dimensions | 10 |
| Typical Performance Characteristics | 5 | Ordering Guide | 10 |
| Theory of Operation | 7 | | |
| Applications..... | 7 | | |
| Design Trade-Offs for Selecting Filter Characteristics: The Noise/BW Trade-Off..... | 7 | | |
| Using the ADXL311 as a Dual-Axis Tilt Sensor..... | 8 | | |

REVISION HISTORY

| | |
|---|----|
| 7/03—Data sheet changed from Rev. 0 to Rev. A. Change to OUTLINE DIMENSIONS..... | 10 |
| Revision 0: Initial Version | |

SPECIFICATIONS

Table 1. $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{DD} = 3\text{ V}$, $R_{BIAS} = 125\text{ k}\Omega$, Acceleration = 0 g , unless otherwise noted.)

| Parameter | Conditions | Min | Typ | Max | Units |
|--|---------------------------------|------|-----------------------------|------|------------------------------------|
| SENSOR INPUT | Each Axis | | | | |
| Measurement Range | | | ± 2 | | g |
| Nonlinearity | Best Fit Straight Line | | 0.2 | | % of FS |
| Alignment Error ¹ | | | ± 1 | | Degrees |
| Alignment Error | X Sensor to Y Sensor | | 0.01 | | Degrees |
| Cross Axis Sensitivity ² | | | ± 2 | | % |
| SENSITIVITY | Each Axis | | | | |
| Sensitivity at X_{FILT} , Y_{FILT} | $V_{DD} = 3\text{ V}$ | 140 | 167 | 195 | mV/g |
| Sensitivity Change due to Temperature ³ | Delta from 25°C | | -0.025 | | %/ $^\circ\text{C}$ |
| ZERO g BIAS LEVEL | Each Axis | | | | |
| 0 g Voltage X_{FILT} , Y_{FILT} | $V_{DD} = 3\text{ V}$ | 1.2 | 1.5 | 1.8 | V |
| 0 g Offset vs. Temperature | Delta from 25°C | | 2.0 | | mg/ $^\circ\text{C}$ |
| NOISE PERFORMANCE | | | | | |
| Noise Density | @ 25°C | | 300 | | $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ RMS |
| FREQUENCY RESPONSE | | | | | |
| 3 dB Bandwidth | At Pins X_{FILT} , Y_{FILT} | | 6 | | kHz |
| Sensor Resonant Frequency | | | 10 | | kHz |
| FILTER | | | | | |
| R_{FILT} Tolerance | 32 k Ω Nominal | | ± 15 | | % |
| Minimum Capacitance | At Pins X_{FILT} , Y_{FILT} | 1000 | | | pF |
| SELF TEST | | | | | |
| X_{FILT} , Y_{FILT} | Self Test 0 to 1 | | 45 | | mV |
| POWER SUPPLY | | | | | |
| Operating Voltage Range | | 2.7 | | 5.25 | V |
| Quiescent Supply Current | | | 0.4 | 1.0 | mA |
| Turn-On Time | | | $160 \times C_{FILT} + 0.3$ | | ms |
| TEMPERATURE RANGE | | | | | |
| Operating Range | | 0 | | 70 | $^\circ\text{C}$ |

¹ Alignment error is specified as the angle between the true and indicated axis of sensitivity (Figure 1).

² Cross axis sensitivity is the algebraic sum of the alignment and the inherent sensitivity errors.

³ Defined as the output change from ambient to maximum temperature or ambient to minimum temperature.

ADXL311

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 2.

| Parameter | Rating |
|---|------------------|
| Acceleration (Any Axis, Unpowered) | 3,500 g, 0.5 ms |
| Acceleration (Any Axis, Powered, $V_{DD} = 3\text{ V}$) | 3,500 g, 0.5 ms |
| V_{DD} | -0.3 V to +0.6 V |
| Output Short-Circuit Duration, (Any Pin to Commom) | Indefinite |
| Operating Temperature Range | -55°C to +125°C |
| Storage Temperature | -65°C to +150°C |

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Table 3. Package Characteristics

| Package Type | θ_{JA} | θ_{JC} | Device Weight |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 8-Lead CLCC | 120°C/W | TBD°C/W | <1.0 gram |

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

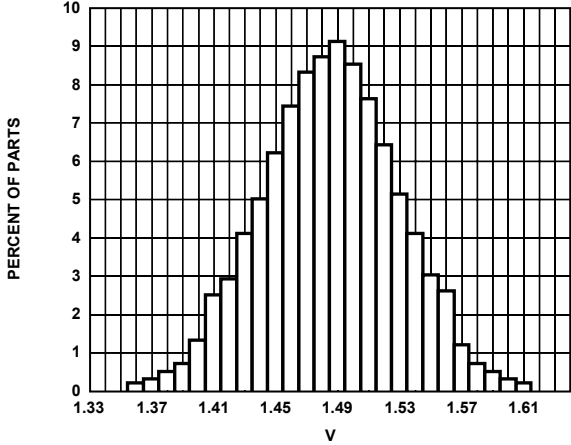


Figure 2. X-Axis Zero g BIAS Output Distribution

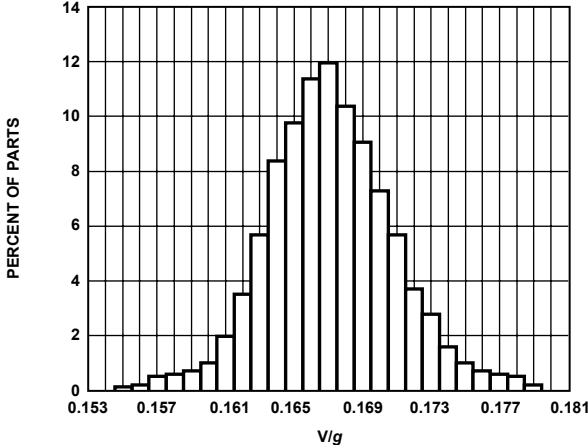


Figure 5. Y-Axis Sensitivity Distribution at Y_{OUT}

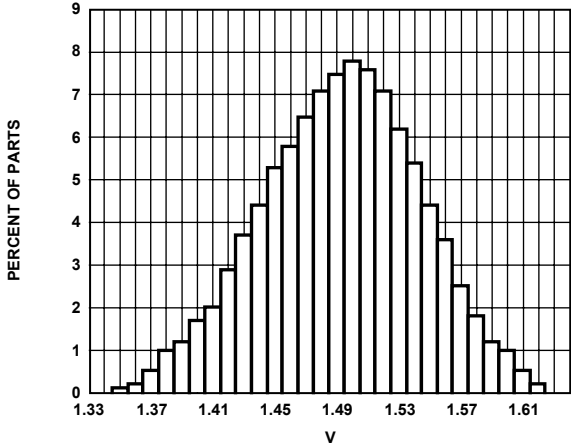


Figure 3. Y-Axis Zero g BIAS Output Distribution

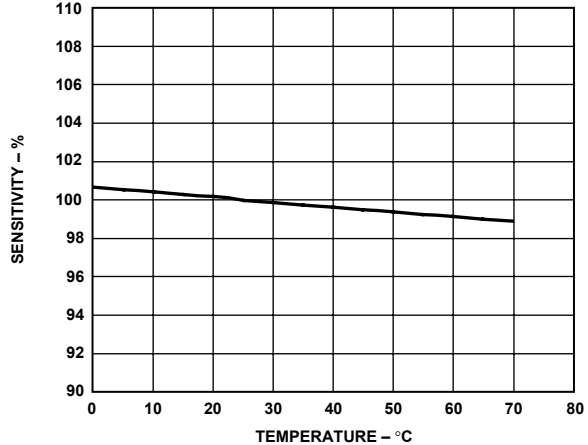


Figure 6. Normalized Sensitivity vs. Temperature

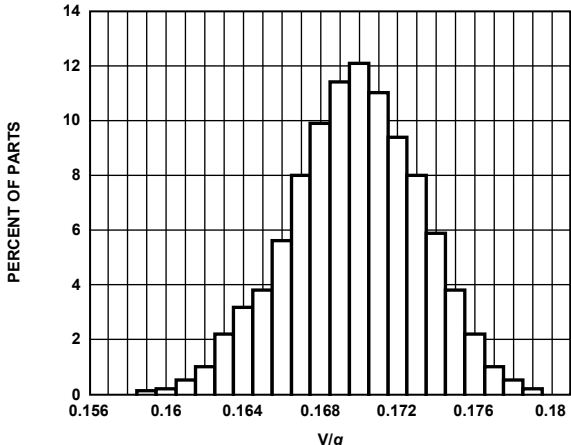


Figure 4. X-Axis Output Sensitivity Distribution at X_{OUT}

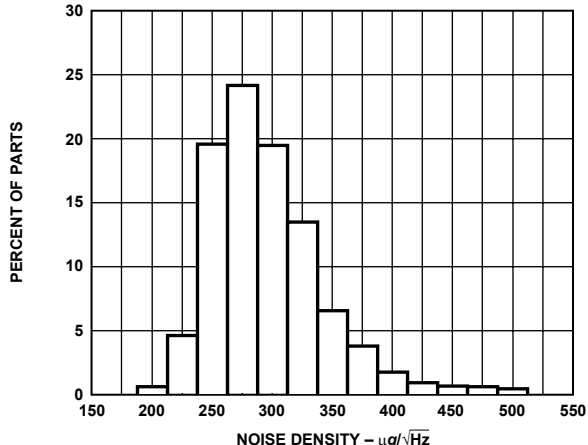


Figure 7. Noise Density Distribution

ADXL311

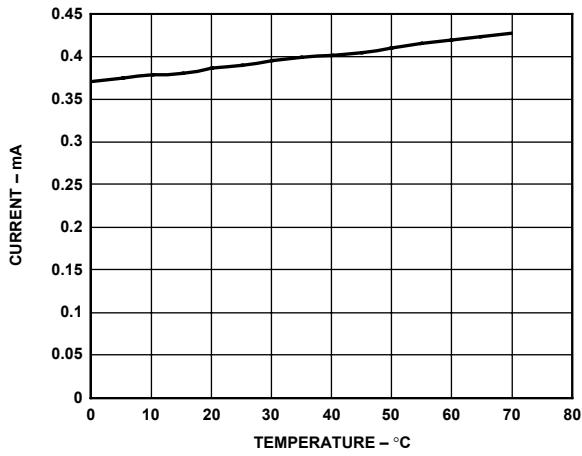


Figure 8. Typical Supply Current vs. Temperature

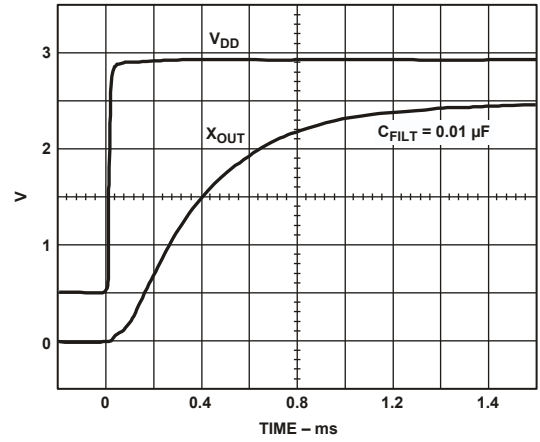


Figure 9. Typical Turn-On Time

THEORY OF OPERATION

The ADXL311 is a complete, dual-axis acceleration measurement system on a single monolithic IC. It contains a polysilicon surface-micromachined sensor and signal conditioning circuitry to implement an open-loop acceleration measurement architecture. The output signals are analog voltage proportional to acceleration. The ADXL311 is capable of measuring both positive and negative accelerations to at least $\pm 2 g$. The accelerometer can measure static acceleration forces, such as gravity, allowing it to be used as a tilt sensor.

The sensor is a surface-micromachined polysilicon structure built on top of the silicon wafer. Polysilicon springs suspend the structure over the surface of the wafer and provide a resistance against acceleration forces. Deflection of the structure is measured using a differential capacitor that consists of independent fixed plates and central plates attached to the moving mass. The fixed plates are driven by 180° out of phase square waves. Acceleration will deflect the beam and unbalance the differential capacitor, resulting in an output square wave whose amplitude is proportional to acceleration. Phase sensitive demodulation techniques are then used to rectify the signal and determine the direction of the acceleration.

The output of the demodulator is amplified and brought off-chip through a $32\text{ k}\Omega$ resistor. At this point, the user can set the signal bandwidth of the device by adding a capacitor. This filtering improves measurement resolution and helps prevent aliasing.

Applications

POWER SUPPLY DECOUPLING

For most applications, a single $0.1\text{ }\mu\text{F}$ capacitor, CDC, will adequately decouple the accelerometer from noise on the power supply. However, in some cases, particularly where noise is present at the 100 kHz internal clock frequency (or any harmonic thereof), noise on the supply may cause interference on the ADXL311 output. If additional decoupling is needed, a $100\text{ }\Omega$ (or smaller) resistor or ferrite beads may be inserted in the supply line of the ADXL311. Additionally, a larger bulk bypass capacitor (in the $1\text{ }\mu\text{F}$ to $4.7\text{ }\mu\text{F}$ range) may be added in parallel to CDC.

SETTING THE BANDWIDTH USING C_X AND C_Y

The ADXL311 has provisions for bandlimiting the X_{OUT} and Y_{OUT} pins. Capacitors must be added at these pins to implement low-pass filtering for antialiasing and noise reduction. The equation for the 3 dB bandwidth is

$$F_{-3dB} = 1 / (2\pi(32\text{ k}\Omega) \times C_{(X,Y)})$$

or, more simply

$$F_{-3dB} = 5\text{ }\mu\text{F} / C_{(X,Y)}$$

The tolerance of the internal resistor (R_{FILT}) can vary typically as much as $\pm 15\%$ of its nominal value of $32\text{ k}\Omega$; thus, the bandwidth will vary accordingly. A minimum capacitance of 1000 pF for C_X and C_Y is required in all cases.

Table 4. Filter Capacitor Selection, C_X and C_Y

| Bandwidth | Capacitor (μF) |
|-----------|-----------------------------|
| 10 Hz | 0.47 |
| 50 Hz | 0.10 |
| 100 Hz | 0.05 |
| 200 Hz | 0.027 |
| 500 Hz | 0.01 |
| 5 kHz | 0.001 |

SELF TEST

The ST pin controls the self-test feature. When this pin is set to V_{DD} , an electrostatic force is exerted on the beam of the accelerometer. The resulting movement of the beam allows the user to test if the accelerometer is functional. The typical change in output will be 270 mg (corresponding to 45 mV). This pin may be left open circuit or connected to common in normal use.

R_{BIAS} SELECTION

A bias resistor (R_{BIAS}) must always be used. If no resistor is present, the ADXL311 may appear to work but will suffer degraded noise performance. The value of the resistor used is not critical. Any value from $50\text{ k}\Omega$ to $2\text{ M}\Omega$ can be used. Using a $2\text{ M}\Omega$ resistor rather than a $50\text{ k}\Omega$ will save roughly $25\text{ }\mu\text{A}$ of supply current.

Design Trade-Offs for Selecting Filter Characteristics: The Noise/BW Trade-Off

The accelerometer bandwidth selected will ultimately determine the measurement resolution (smallest detectable acceleration). Filtering can be used to lower the noise floor, which improves the resolution of the accelerometer. Resolution is dependent on the analog filter bandwidth at X_{OUT} and Y_{OUT} .

The output of the ADXL311 has a typical bandwidth of 5 kHz . The user must filter the signal at this point to limit aliasing errors. The analog bandwidth must be no more than half the A/D sampling frequency to minimize aliasing. The analog bandwidth may be further decreased to reduce noise and improve resolution.

The ADXL311 noise has the characteristics of white Gaussian noise that contributes equally at all frequencies and is described in terms of $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, i.e., the noise is proportional to the square

ADXL311

root of the bandwidth of the accelerometer. It is recommended that the user limit bandwidth to the lowest frequency needed by the application, to maximize the resolution and dynamic range of the accelerometer.

With the single pole roll-off characteristic, the typical noise of the ADXL202E is determined by

$$RMS\ NOISE = (300\ \mu g / \sqrt{Hz}) \times (\sqrt{BW} \times 1.6)$$

At 100 Hz the noise will be

$$RMS\ NOISE = (300\ \mu g / \sqrt{Hz}) \times (\sqrt{100} \times 1.6) = 3.8\ mg$$

Often the peak value of the noise is desired. Peak-to-peak noise can only be estimated by statistical methods. Table 5 is useful for estimating the probabilities of exceeding various peak values, given the rms value.

Table 5. Estimation of Peak-to-Peak Noise

| Peak-to-Peak Value | % of Time That Noise Will Exceed Nominal Peak-to-Peak Value |
|--------------------|---|
| 2 × RMS | 32 |
| 4 × RMS | 4.6 |
| 6 × RMS | 0.27 |
| 8 × RMS | 0.006 |

The peak-to-peak noise value will give the best estimate of the uncertainty in a single measurement. Table 6 gives the typical noise output of the ADXL311 for various C_x and C_y values.

Table 6. Filter Capacitor Selection (C_x , C_y)

| Bandwidth (Hz) | C_x , C_y (μF) | RMS Noise (mg) | Peak-to-Peak Noise Estimate (mg) |
|----------------|---------------------------|----------------|----------------------------------|
| 10 | 0.47 | 1.2 | 7.2 |
| 50 | 0.1 | 2.7 | 16.2 |
| 100 | 0.047 | 3.8 | 22.8 |
| 500 | 0.01 | 8.5 | 51 |

USING THE ADXL311 WITH OPERATING VOLTAGES OTHER THAN 3 V

The ADXL311 is tested and specified at $V_{DD} = 3\ V$; however, it can be powered with V_{DD} as low as 2.7 V or as high as 5.25 V. Some performance parameters will change as the supply voltage is varied.

The ADXL311 output is ratiometric, so the output sensitivity (or scale factor) will vary proportionally to supply voltage. At $V_{DD} = 5\ V$ the output sensitivity is typically 312 mV/g.

The zero g bias output is also ratiometric, so the zero g output is nominally equal to $V_{DD}/2$ at all supply voltages.

The output noise is not ratiometric but absolute in volts; therefore, the noise density decreases as the supply voltage increases. This is because the scale factor (mV/g) increases while the noise voltage remains constant.

The self-test response is roughly proportional to the square of the supply voltage. At $V_{DD} = 5\ V$, the self-test response will be approximately equivalent to 800 mg (typical).

The supply current increases as the supply voltage increases. Typical current consumption at $V_{DD} = 5\ V$ is 600 μA .

Using the ADXL311 as a Dual-Axis Tilt Sensor

One of the most popular applications of the ADXL311 is tilt measurement. An accelerometer uses the force of gravity as an input vector to determine the orientation of an object in space.

An accelerometer is most sensitive to tilt when its sensitive axis is perpendicular to the force of gravity, i.e., parallel to the earth's surface. At this orientation, its sensitivity to changes in tilt is highest. When the accelerometer is oriented on axis to gravity, i.e., near its +1 g or -1 g reading, the change in output acceleration per degree of tilt is negligible. When the accelerometer is perpendicular to gravity, its output will change nearly 17.5 mg per degree of tilt, but at 45° degrees, it is changing only at 12.2 mg per degree and resolution declines.

DUAL-AXIS TILT SENSOR: CONVERTING ACCELERATION TO TILT

When the accelerometer is oriented so both its X-axis and Y-axis are parallel to the earth's surface, it can be used as a two axis tilt sensor with a roll axis and a pitch axis. Once the output signal from the accelerometer has been converted to an acceleration that varies between -1 g and +1 g , the output tilt in degrees is calculated as follows:

$$PITCH = ASIN(A_X / 1\ g)$$

$$ROLL = ASIN(A_Y / 1\ g)$$

Be sure to account for overranges. It is possible for the accelerometers to output a signal greater than $\pm 1\ g$ due to vibration, shock, or other accelerations.

PIN CONFIGURATION AND FUNCTIONAL DESCRIPTIONS

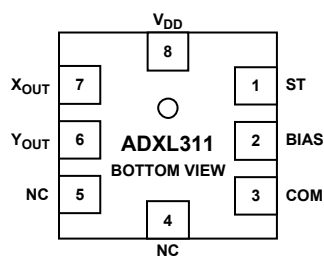


Figure 10. 8-Lead CLCC

Table 7. Pin Function Descriptions—8-Lead CLCC

| Pin No. | Mnemonic | Description |
|---------|-----------|--|
| 1 | ST | Self Test |
| 2 | BIAS | Bias Resistor ($\approx 200\text{ k}\Omega$) |
| 3 | COM | Common |
| 4 | NC | Do Not Connect |
| 5 | NC | Do Not Connect |
| 6 | Y_{OUT} | Y Channel Output |
| 7 | X_{OUT} | X Channel Output |
| 8 | V_{DD} | 2.7 V to 5.25 V |

ADXL311

OUTLINE DIMENSIONS

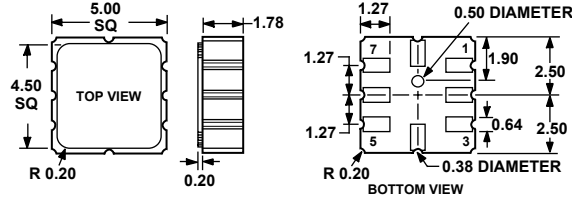


Figure 11. 8-Terminal Ceramic Leadless Chip Carrier [CLCC]
(E-8)
Dimensions shown in millimeters

ESD CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although this product features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



Ordering Guide

| ADXL311Products | Number of Axes | Specified Voltage | Temperature Range |
|----------------------------|----------------|-------------------|-------------------|
| ADXL311JE | 2 | 3 V | 0°C to 70°C |
| ADXL311JE-REEL | 2 | 3 V | 0°C to 70°C |
| ADXL311EB Evaluation Board | | | |

NOTES

ADXL311

NOTES