

Accéléromètre et Sismomètre

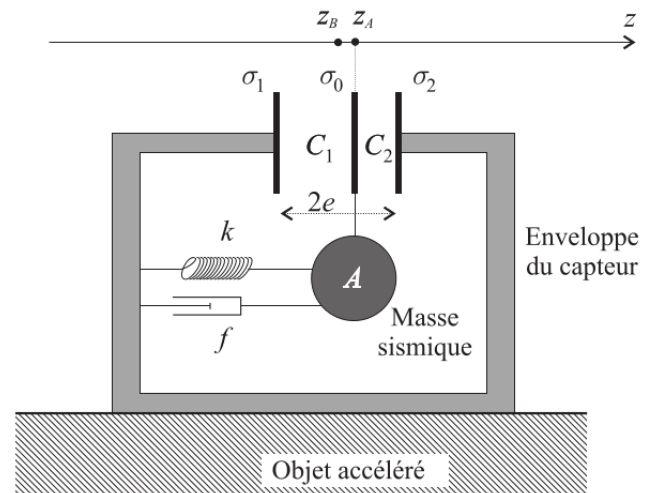
La notion de filtrage se retrouve dans divers domaines de la physique, notamment en électricité, en mécanique... Les sismomètres, les amortisseurs, les accéléromètres sont des filtres mécaniques. Le récent essor des appareils grand public utilisant des accéléromètres intégrés (manettes de jeu vidéo, smartphone, consoles inertielles...) nous amène à examiner le cas d'un composant actuel.

I. Accéléromètre

On présente ici le principe d'un accéléromètre capacitif 1D de la famille des MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), fixé sur une puce de quelques millimètres de côtés. La dimension typique du capteur lui même est de l'ordre du millimètre ou inférieure. Le reste de la puce est occupé par l'électronique associée. Le modèle mécanique simplifié de l'accéléromètre 1D est représenté sur la figure ci-dessous, associé au système de transduction mécanique-électrique.

Une masse m , dite masse sismique, assimilable à un point matériel A est reliée à l'enveloppe du capteur par des micro poutres élastiques de coefficient de raideur k . Elles contraignent le mouvement de A dans une direction fixe Oz par rapport au boîtier. Un amortissement à frottement visqueux proportionnel à la vitesse de A par rapport au boîtier et de coefficient f est assuré par un gaz comprimé dans le boîtier étanche.

Deux condensateurs plans C_1 et C_2 sont formés par deux armatures fixes σ_1 et σ_2 liées au boîtier et par l'armature mobile σ_0 liée à A . Ce dispositif à capacité variable permet de traduire le mouvement par un signal électrique. La distance entre les deux armatures fixes sera notée $2e$ et la surface de chacune des armatures est S . Au repos l'armature σ_0 est à égale distance de σ_1 et σ_2 .



I.1. Equation mécanique

On note z_A la position de A et z_B la position d'un point de référence du boîtier du capteur rigidement fixé au système dont on veut mesurer l'accélération. On prendra $z_A = z_B$ au repos et on notera $z = z_A - z_B$. L'application du principe fondamental de la dynamique dans le référentiel galiléen du laboratoire, noté \mathcal{R} montre que z satisfait **l'équation caractéristique des oscillateurs amortis** avec second membre, c'est-à-dire en régime forcé :

$$\ddot{z} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{z} + \omega_0^2 z = \ddot{z}_A \quad \text{avec} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{et} \quad Q = \frac{m\omega_0}{f} = \frac{\sqrt{mk}}{f}.$$

On remarque que c'est l'accélération du support qui intervient au second membre en tant que forçage, car le mouvement est ici étudié dans le référentiel de la puce, noté \mathcal{R}' , qui est accéléré et donc non galiléen. Etant donné que nous sommes dans le cas d'un mouvement de translation, cela peut se comprendre par une simple relation de Chasles¹. Dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen, l'accélération de la masse sismique est $\ddot{z}_A = \ddot{z}_B + \ddot{z}$.

Dans le cas d'un mouvement sinusoïdal du support (vibrations), on montre en passant en notation complexe que **cet oscillateur mécanique se comporte comme un filtre passe-haut vis-à-vis des vibrations** $z_A(t)$.

1. cf programme de SPE sur les changements de référentiels et référentiels non galiléens.

I.2. Transduction mécanique-électrique et traitement du signal

Le premier élément de l'électronique du capteur peut être modélisé par le schéma électrique équivalent représenté ci-contre. Les générateurs idéaux de tension sont tels que $e_1(t) = E \sin(\omega_1 t)$ et $e_2(t) = -E \sin(\omega_1 t)$. On rappelle que la capacité d'un condensateur plan dont les armatures de surface S sont séparées d'une distance d est $C = \frac{\epsilon S}{d}$ où ϵ est la permittivité du milieu. Le courant circulant dans les deux condensateurs s'écrit

$$C_1 \frac{d(V_a - e_1)}{dt} = C_2 \frac{d(V_a - e_2)}{dt} \quad \text{avec} \quad C_1 = \frac{\epsilon S}{e + z} \quad \text{et} \quad C_2 = \frac{\epsilon S}{e - z}.$$

Ceci conduit à

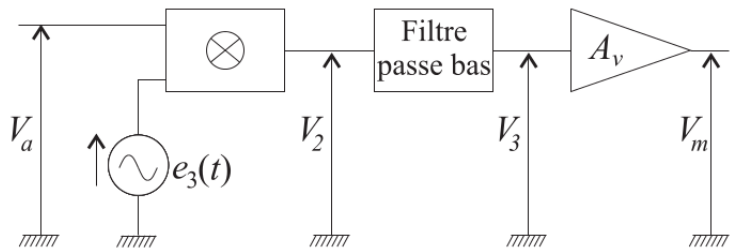
$$\frac{dV_a}{dt} = -\frac{E\omega_1}{e} z(t) \cos(\omega_1 t)$$

Prenons l'exemple d'un mouvement sinusoïdal du support de la puce de pulsation $\omega \ll \omega_1$, alors

$$z(t) = Z_m \cos(\omega t + \varphi) \quad \text{et} \quad V_a(t) \approx -\frac{E}{e} z(t) \sin(\omega_1 t) + V_{a0} \quad \text{avec} \quad V_{a0} = \text{cte}.$$

Il s'agit d'un signal modulé par le mouvement de la puce. Cette relation sera vraie plus généralement pour un mouvement quelconque s'il est lent par rapport à la période caractéristique $\frac{2\pi}{\omega_1}$.

La seconde partie de l'électronique du capteur permet d'accéder à $z(t)$ par *démodulation synchrone*. On construit le signal de mesure $V_m(t)$ à partir de $V_a(t)$ selon le schéma de la figure ci-contre. Le signal de modulation $e_3(t) = E \sin(\omega_1 t)$ est combiné par le premier étage avec V_a pour obtenir $V_2(t) = \frac{1}{E} V_a(t) \times e_3(t)$. Le filtre passe-bas possède une pulsation de coupure inférieure ω_1 , et un gain noté $G(\omega)$. On termine par un étage d'amplification de gain A_v .



En reprenant l'exemple ci-dessus de sollicitation sinusoïdale de pulsation ω , on obtient finalement

$$V_m(t) \approx -\frac{A_v G(\omega) E}{2e} z(t).$$

I.3. Capteur de mouvement tri-dimensionnel (ex : ADXL330)

En associant trois exemplaires d'un tel système selon trois axes différents au sein d'une puce, on forme un capteur de mouvement tri-dimensionnel. On en donne un exemple en annexe, où l'on reproduit quelques pages de la documentation officielle du capteur ADXL330.

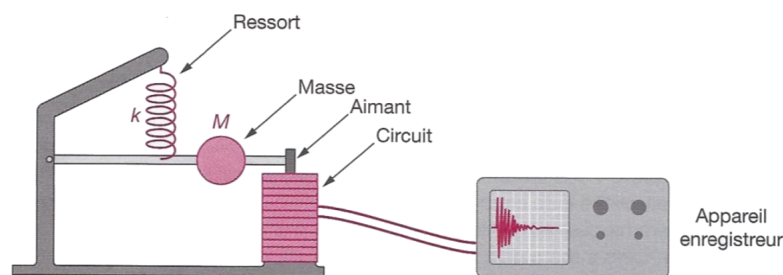
II. Sismographe et sismomètre

La surveillance des mouvements du sol dus à la sismicité sont importants, dans la mesure où ils permettent de détecter l'apparition de phénomènes dont les conséquences peuvent être tragiques (tremblements de terre, tsunamis...). La détection est parfois trop tardive pour permettre une alerte efficace, les enregistrements sont alors utilisés à posteriori pour mieux comprendre la nature de l'événement et tenter d'anticiper les prochains.

Principe

Un *sismographe* est un instrument de mesure équipé d'un capteur des mouvements du sol, le *sismomètre*, capable de les enregistrer sur un support visuel, le *sismogramme*.

Le sismomètre est un capteur de type accéléromètre, qui enregistre le mouvement du support sur lequel il se trouve fixé. Constitué comme un oscillateur mécanique amorti, il constitue une illustration d'application pratique de filtrage. On présente ci-dessous un exemple de sismomètre vertical, c'est-à-dire mesurant les mouvements selon l'axe Oz .



Les mouvements de la partie mobile engendrent, par induction, un courant électrique dans un bobinage. Ceci a deux effets importants :

- amortir les oscillations mécaniques et éviter donc une prolongation excessive du mouvement après une excitation brève ;
- fournir un signal électrique qui peut être aisément amplifié, enregistré et transmis.

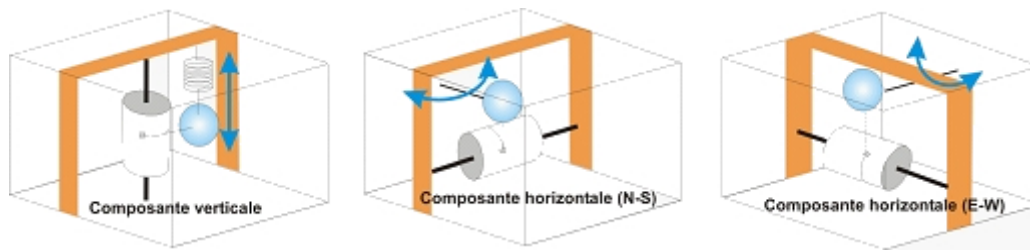
Le déplacement de la masse par rapport à sa position d'équilibre noté $s(t)$, est lié au mouvement du sol z_{sol} , par **l'équation caractéristique des oscillateurs amortis** :

$$\ddot{s} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{s} + \omega_0^2 s = A \ddot{z}_{\text{sol}}$$

ou Q est le facteur de qualité du système, ω_0 est la pulsation propre de l'oscillateur et A est l'amplification. On constate de nouveau que le *forçage* appliqué au second membre est associé à l'accélération du support. **REMARQUE** : Déplacer le sismomètre à vitesse constante n'engendre aucune détection. Seules les accélérations provoquent une réponse. **Un sismomètre est un accéléromètre.**

Un sismomètre est le plus souvent protégé par un bâti lié au sol, dans lequel la masse du capteur peut osciller en cas de sollicitation sismique. L'appareil doit être autant que possible isolé de l'extérieur, afin que les variations de température ou de pression n'affectent pas la stabilité du système. Lorsque le sol bouge, le bâti qui est solidaire au sol bouge aussi, ce qui provoque un mouvement relatif entre la masse et le bâti qui porte également le système d'enregistrement. Ce mouvement relatif est amplifié, puis enregistré.

Par ailleurs, les ondes sismiques qui génèrent les oscillations du sol peuvent avoir des polarisations, c'est-à-dire des directions de vibrations diverses que l'on peut décomposer suivant les trois dimensions qui définissent notre environnement : on considère donc en général une verticale et deux horizontales. Selon l'orientation des oscillations de la masse, certains sismomètres sont alors sensibles aux mouvements horizontaux et d'autres aux mouvements verticaux. Pour mesurer complètement les mouvements du sol, une station sismologique doit alors contenir trois composantes : un sismomètre vertical et deux horizontaux, afin d'obtenir une bonne restitution des vibrations du sol en trois dimensions. Il existe en réalité également des sismomètres capables d'enregistrer plusieurs composantes à la fois (trois composantes orthogonales).



Un sismomètre ne doit pas privilégier de fréquence : il ne doit pas y avoir de phénomène de résonance. Le choix du sismologue est donc de se rapprocher du niveau amortissement critique pour que l'oscillation repasse par zéro rapidement. Comme la masse revient assez vite vers sa position d'équilibre, elle est prête pour réagir à l'arrivée du train d'onde suivant. Le sismologue doit tenir compte de l'environnement d'où une large gamme de sismomètres dont les caractéristiques varient sensiblement. Diverses causes vont contribuer à mettre en oscillation le sol et vont donc intervenir dans la réponse du sismomètre.

Exemples :

- phénomènes de marée (période : demi-journée, 10^{-5} Hz) ;
- perturbations liées à l'activité humaine, qu'il s'agisse de la circulation de véhicules, de travaux de terrassement lors de constructions... ;
- la houle, qui est un train régulier de vagues formées au large, est également un phénomène périodique auquel vont être sensibles les sismomètres verticaux. En effet, bien que n'existant qu'à la surface de l'eau, ces vagues exercent une action sur le fond marin. Les sismomètres ultrasensibles détectent alors une oscillation dont la périodicité va de quelques secondes à quelques dizaines de secondes.

Il existe différents types de sismomètres, de différentes bandes passantes et de différents gains. La fréquence d'enregistrement est usuellement comprise entre 0.01 Hz et quelques dizaines de Hz. La prise en compte de l'environnement permet au sismologue de définir dans quel intervalle spectral se situe l'information utile et il définit la bande passante des sismomètres à utiliser.

ANNEXE - Notice du ADXL330

FEATURES

3-axis sensing

Small, low-profile package

4 mm × 4 mm × 1.45 mm LFCSP

Low power

180 μ A at $V_s = 1.8$ V (typical)

Single-supply operation

1.8 V to 3.6 V

10,000 g shock survival

Excellent temperature stability

BW adjustment with a single capacitor per axis

RoHS/WEEE lead-free compliant

APPLICATIONS

Cost-sensitive, low power, motion- and tilt-sensing applications

Mobile devices

Gaming systems

Disk drive protection

Image stabilization

Sports and health devices

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL330 is a small, thin, low power, complete 3-axis accelerometer with signal conditioned voltage outputs, all on a single monolithic IC. The product measures acceleration with a minimum full-scale range of $\pm 3 g$. It can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

The user selects the bandwidth of the accelerometer using the C_x , C_y , and C_z capacitors at the X_{OUT} , Y_{OUT} , and Z_{OUT} pins. Bandwidths can be selected to suit the application, with a range of 0.5 Hz to 1600 Hz for X and Y axes, and a range of 0.5 Hz to 550 Hz for the Z axis.

The ADXL330 is available in a small, low profile, 4 mm × 4 mm × 1.45 mm, 16-lead, plastic lead frame chip scale package (LFCSP_LQ).

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

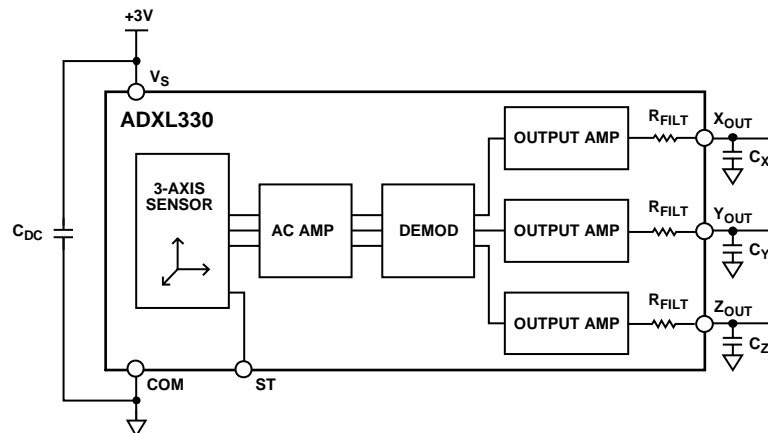


Figure 1.

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 owners.

THEORY OF OPERATION

The ADXL330 is a complete 3-axis acceleration measurement system on a single monolithic IC. The ADXL330 has a measurement range of $\pm 3 g$ minimum. It contains a polysilicon surface micromachined sensor and signal conditioning circuitry to implement an open-loop acceleration measurement architecture. The output signals are analog voltages that are proportional to acceleration. The accelerometer can measure the static acceleration of gravity in tilt sensing applications as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

The sensor is a polysilicon surface micromachined structure built on top of a 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 plates attached to the moving mass. The fixed plates are driven by 180° out-of-phase square waves. Acceleration deflects the moving mass and unbalances the differential capacitor resulting in a sensor output whose amplitude is proportional to acceleration. Phase-sensitive demodulation techniques are then used to determine the magnitude and direction of the acceleration.

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

MECHANICAL SENSOR

The ADXL330 uses a single structure for sensing the X, Y, and Z axes. As a result, the three axes sense directions are highly orthogonal with little cross axis sensitivity. Mechanical misalignment of the sensor die to the package is the chief source of cross axis sensitivity. Mechanical misalignment can, of course, be calibrated out at the system level.

PERFORMANCE

Rather than using additional temperature compensation circuitry, innovative design techniques ensure high performance is built-in to the ADXL330. As a result, there is neither quantization error nor nonmonotonic behavior, and temperature hysteresis is very low (typically less than 3 mg over the -25°C to $+70^\circ\text{C}$ temperature range).

Figure 14, Figure 15, and Figure 16 show the zero g output performance of eight parts (X-, Y-, and Z-axis) soldered to a PCB over a -25°C to $+70^\circ\text{C}$ temperature range.

Figure 26, Figure 27, and Figure 28 demonstrate the typical sensitivity shift over temperature for supply voltages of 3 V . This is typically better than $\pm 1\%$ over the -25°C to $+70^\circ\text{C}$ temperature range.

APPLICATIONS

POWER SUPPLY DECOUPLING

For most applications, a single 0.1 μF capacitor, C_{DC} , placed close to the ADXL330 supply pins adequately decouples the accelerometer from noise on the power supply. However, in applications where noise is present at the 50 kHz internal clock frequency (or any harmonic thereof), additional care in power supply bypassing is required as this noise can cause errors in acceleration measurement. If additional decoupling is needed, a 100 Ω (or smaller) resistor or ferrite bead can be inserted in the supply line. Additionally, a larger bulk bypass capacitor (1 μF or greater) can be added in parallel to C_{DC} . Ensure that the connection from the ADXL330 ground to the power supply ground is low impedance because noise transmitted through ground has a similar effect as noise transmitted through V_{S} .

SETTING THE BANDWIDTH USING C_X , C_Y , AND C_Z

The ADXL330 has provisions for band limiting the X_{OUT} , Y_{OUT} , and Z_{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

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

or more simply

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

The tolerance of the internal resistor (R_{FILT}) typically varies as much as $\pm 15\%$ of its nominal value (32 k Ω), and the bandwidth varies accordingly. A minimum capacitance of 0.0047 μF for C_X , C_Y , and C_Z is recommended in all cases.

Table 5. Filter Capacitor Selection, C_X , C_Y , and C_Z

Bandwidth (Hz)	Capacitor (μF)
1	4.7
10	0.47
50	0.10
100	0.05
200	0.027
500	0.01

SELF TEST

The ST pin controls the self test feature. When this pin is set to V_{S} , an electrostatic force is exerted on the accelerometer beam. The resulting movement of the beam allows the user to test if the accelerometer is functional. The typical change in output is -500 mg (corresponding to -150 mV) in the X-axis, 500 mg (or 150 mV) on the Y-axis, and -200 mg (or -60 mV) on the Z-axis. This ST pin may be left open circuit or connected to common (COM) in normal use.

Never expose the ST pin to voltages greater than $V_{\text{S}} + 0.3\text{ V}$. If this cannot be guaranteed due to the system design (for instance, if there are multiple supply voltages), then a low V_{F} clamping diode between ST and V_{S} is recommended.

DESIGN TRADE-OFFS FOR SELECTING FILTER CHARACTERISTICS: THE NOISE/BW TRADE-OFF

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

The output of the ADXL330 has a typical bandwidth of greater than 500 Hz. The user must filter the signal at this point to limit aliasing errors. The analog bandwidth must be no more than half the analog-to-digital sampling frequency to minimize aliasing. The analog bandwidth can be further decreased to reduce noise and improve resolution.

The ADXL330 noise has the characteristics of white Gaussian noise, which contributes equally at all frequencies and is described in terms of $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ (the noise is proportional to the square root of the accelerometer bandwidth). The user should 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 ADXL330 is determined by

$$\text{rms Noise} = \text{Noise Density} \times (\sqrt{BW} \times 1.6)$$

Often, the peak value of the noise is desired. Peak-to-peak noise can only be estimated by statistical methods. Table 6 is useful for estimating the probabilities of exceeding various peak values, given the rms value.

Table 6. Estimation of Peak-to-Peak Noise

Peak-to-Peak Value	% of Time that Noise Exceeds Nominal Peak-to-Peak Value
$2 \times \text{rms}$	32
$4 \times \text{rms}$	4.6
$6 \times \text{rms}$	0.27
$8 \times \text{rms}$	0.006

USE WITH OPERATING VOLTAGES OTHER THAN 3 V

The ADXL330 is tested and specified at $V_{\text{S}} = 3\text{ V}$; however, it can be powered with V_{S} as low as 1.8 V or as high as 3.6 V. Note that some performance parameters change as the supply voltage is varied.

The ADXL330 output is ratiometric, therefore, the output sensitivity (or scale factor) varies proportionally to the supply voltage. At $V_s = 3.6\text{ V}$, the output sensitivity is typically 360 mV/g . At $V_s = 2\text{ V}$, the output sensitivity is typically 195 mV/g .

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

The output noise is not ratiometric but is 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. At $V_s = 3.6\text{ V}$, the X- and Y-axis noise density is typically $230\text{ }\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, while at $V_s = 2\text{ V}$, the X- and Y-axis noise density is typically $350\text{ }\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Self test response in g is roughly proportional to the square of the supply voltage. However, when ratiometricity of sensitivity is factored in with supply voltage, the self test response in volts is roughly proportional to the cube of the supply voltage. For example, at $V_s = 3.6\text{ V}$, the self test response for the ADXL330 is approximately -275 mV for the X-axis, $+275\text{ mV}$ for the Y-axis, and -100 mV for the Z-axis.

At $V_s = 2\text{ V}$, the self test response is approximately -60 mV for the X-axis, $+60\text{ mV}$ for the Y-axis, and -25 mV for the Z-axis.

The supply current decreases as the supply voltage decreases. Typical current consumption at $V_s = 3.6\text{ V}$ is $375\text{ }\mu\text{A}$, and typical current consumption at $V_s = 2\text{ V}$ is $200\text{ }\mu\text{A}$.

AXES OF ACCELERATION SENSITIVITY

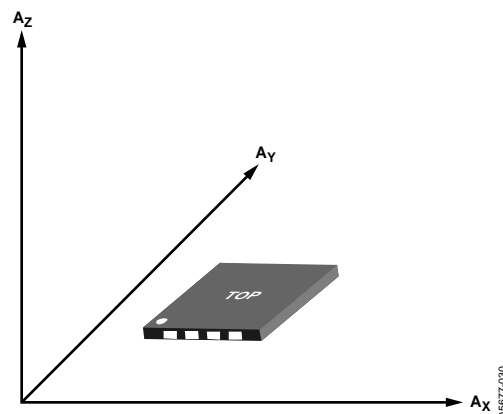


Figure 31. Axes of Acceleration Sensitivity, Corresponding Output Voltage Increases When Accelerated Along the Sensitive Axis

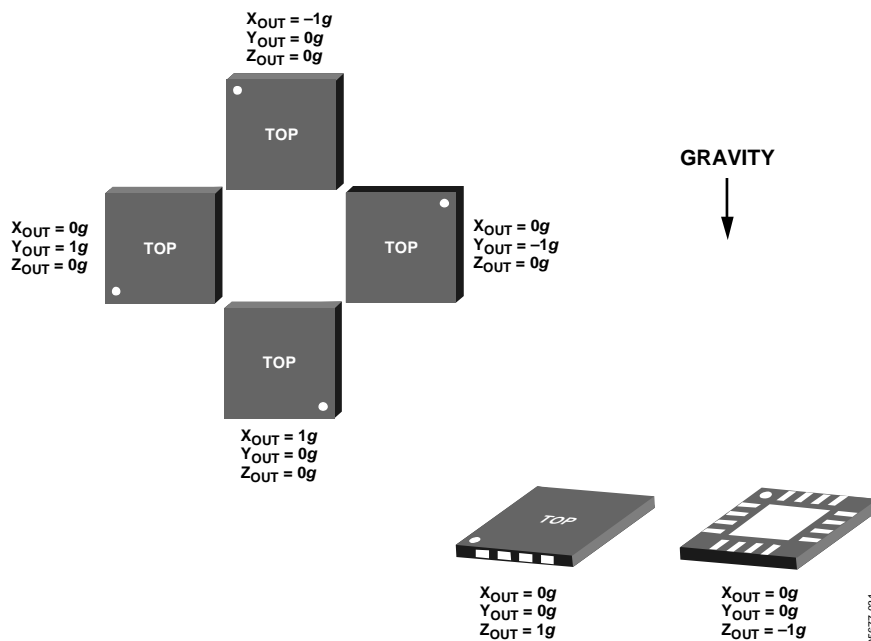


Figure 32. Output Response vs. Orientation to Gravity