

*Диденко В.А.,
Полено А.Н.,
к.т.н. Бондаренко А.Ф.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)
bondarenkoaf@gmail.com*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ MEMS-АКСЕЛЕРОМЕТРА

В роботі отримана математична модель MEMS-акселерометра, яка дозволяє проводити моделювання систем вимірювання параметрів руху з урахуванням його динамічних властивостей. З використанням отриманої моделі проведено теоретичні дослідження. Отримано коефіцієнти передавальної функції MEMS-акселерометра LIS352AX.

***Ключові слова:** MEMS-акселерометр, математична модель, передавальна функція, точність вимірювання, амплітудно-частотна характеристика.*

В работе получена математическая модель MEMS-акселерометра, которая позволяет проводить моделирование систем измерения параметров движения с учетом его динамических свойств. С использованием полученной модели проведены теоретические исследования. Получены коэффициенты передаточной функции MEMS-акселерометра LIS352AX.

***Ключевые слова:** MEMS-акселерометр, математическая модель, передаточная функция, точность измерения, амплитудно-частотная характеристика.*

В настоящее время инерционные датчики движения, построенные по MEMS-технологии, широко применяются как в промышленности, так и в бытовой технике. Область применения данных датчиков распространяется от систем навигации до игровых устройств. Чтобы эффективно использовать инерционные MEMS-датчики, необходимы эффективные и надежные алгоритмы обработки и анализа их выходных сигналов. При разработке таких алгоритмов необходимо учитывать множество факторов, влияющих на точность определения координат объекта и определения его скорости перемещения.

В системах измерения параметров движения на базе MEMS-акселерометров, существенное влияние на результаты измерения оказывают динамические свойства данных акселерометров. Учет этих свойств

в алгоритме обработки выходных сигналов акселерометров позволит добиться повышения точности измерения.

Таким образом, целью настоящей работы является создание модели MEMS-акселерометра, основанной на его принципе работы и учитывающей его статические и динамические параметры.

На рисунке 1 показан основной конструктивный блок элементарной ячейки МЭМС-акселерометра [1]. Весь кристалл акселерометра занят главным образом схемами формирования электрического сигнала, которые окружают миниатюрный датчик ускорения, расположенный в его центре. Датчик представляет собой дифференциальную конденсаторную структуру с воздушным диэлектриком, обкладки которого вырезаны (вытравлены) из поликремниевой пленки толщиной 2 мкм. Неподвижные обкладки этого конденсатора представляют собой простые консольные стержни, расположенные на высоте 1 мкм от поверхности кристалла на поликремниевых столбиках-анкерах, приваренных к кристаллу [1].

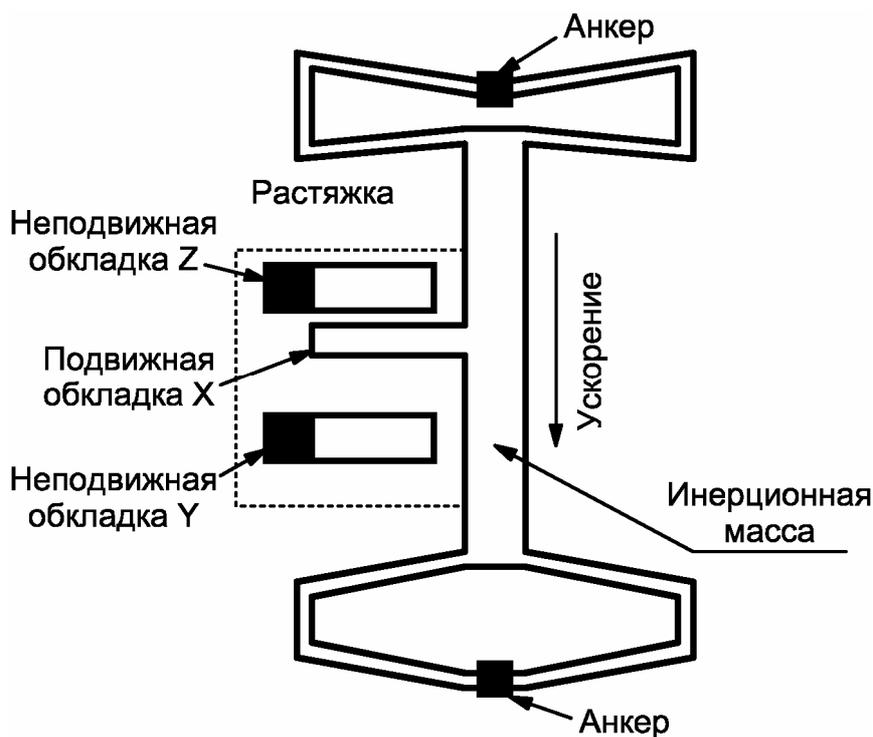


Рисунок 1 – Чувствительный элемент MEMS-акселерометра [1]

Инерционная масса датчика ускорения при изменении скорости перемещения кристалла смещается относительно остальной части кристалла. Ее пальцеобразные выступы образуют подвижную обкладку конденсатора переменной емкости. С каждого конца эта структура опи-

рается на столбики анкеры, аналогичные по конструкции держателям неподвижных обкладок. Растяжки по концам инерционной массы, удерживающие ее на весу, являются механическими пружинами постоянной упругости, ограничивающими перемещение инерционной массы пробника и ее возврат в исходное положение [1].

В спокойном состоянии (движение с постоянной скоростью) все «пальцы» подвижной обкладки X благодаря растяжкам находятся на одинаковом расстоянии от пар пальцев неподвижных обкладок. При каком-либо ускорении датчика подвижные пальцы приближаются к одному из наборов неподвижных пальцев и удаляются от другого набора. В результате этого относительного перемещения соответствующие расстояния становятся неодинаковыми и емкости между подвижной обкладкой и каждой из неподвижных обкладок конденсатора изменяются. При этом изменение выходного напряжения датчика будет пропорционально ускорению вдоль оси чувствительности датчика [1].

Согласно рисунку 1 и принципу работы датчика составим механическую схему. Она показана на рисунке 2 и включает в себя следующие элементы: инерциальная масса (m), элемент жесткости (k), демпфирующий элемент (b). В качестве демпфирующего элемента на рисунке 2 служит воздух внутри ячейки, оказывающий сопротивление движению инерционной массы.

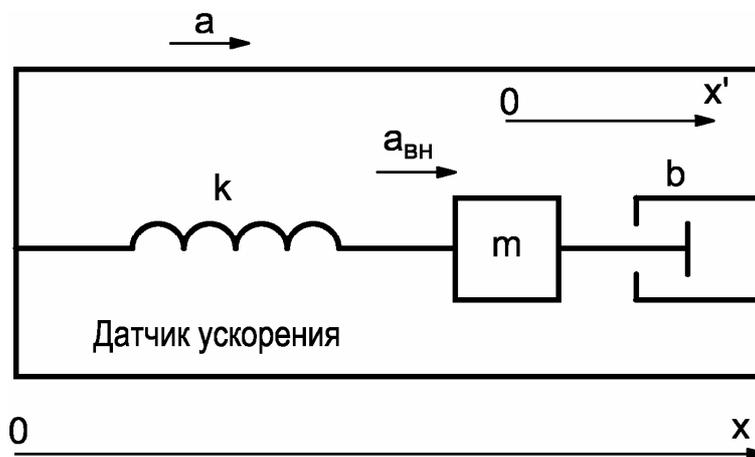


Рисунок 2 – Механическая схема MEMS-акселерометра

Также на рисунке 2 показан вектор ускорения \bar{a} вдоль оси x в системе отсчета связанной с Землей. Вдоль этой оси направлена ось чувствительности датчика. Необходимо установить взаимосвязь между смещением инерциальной массы внутри датчика в системе координат $0-x'$, связанной с ним от величины ускорения движения объекта \bar{a} вдоль оси чувствительности датчика.

В качестве системы отсчета при составлении уравнения динамики принимаем систему, связанную с Землей. Результирующее ускорение движения инерционной массы в этой системе определяем согласно выражению (1):

$$a_p = a + a_{вн}, \quad (1)$$

где a_p – ускорение движения инерционной массы в системе, связанной с Землей;

a – ускорение движения объекта в системе отчета, связанной с Землей;

$a_{вн}$ – ускорение движения инерционной массы датчика в системе отчета, связанной с системой координат 0- x' внутри датчика.

Движение инерционной массы с ускорением a_p обеспечивает сила, связанная с ним согласно второму закону Ньютона:

$$F = m \cdot a_p, \quad (2)$$

где F – сила, действующая на инерционную массу;

m – величина инерционной массы.

При движении на инерционную массу действует сила упругости упругого элемента и сила сопротивления движению. Их сумма равна силе в выражении (2).

Сила упругости, согласно закону Гука:

$$F_y = -k \cdot x', \quad (3)$$

где F_y – сила упругости, действующая на инерционную массу;

k – жесткость упругого элемента;

x' – смещение инерционной массы внутри датчика относительно нулевого положения в системе координат 0- x' .

Сила сопротивления движению инерционной массы внутри датчика:

$$F_c = -b \cdot \frac{dx'}{dt}, \quad (4)$$

где F_c – сила сопротивления движению инерционной массы;

b – коэффициент сопротивления.

С учетом зависимостей (3) и (4) представим выражение (2) в виде:

$$m \cdot a_p = -k \cdot x' - b \cdot \frac{dx'}{dt}. \quad (5)$$

Определим величину $a_{\text{вн}}$, как вторую производную смещения инерционной массы внутри датчика:

$$a_{\text{вн}} = \frac{d^2 x'}{dt^2}. \quad (6)$$

С учетом выражений (1) и (6) представим выражение (5) в виде:

$$m \cdot a + m \cdot \frac{d^2 x'}{dt^2} = -k \cdot x' - b \cdot \frac{dx'}{dt}. \quad (7)$$

Преобразовав выражение (7) получим дифференциальное уравнение связывающее величину ускорения движения объекта с величиной смещения инерционной массы, которое регистрируется датчиком:

$$m \cdot \frac{d^2 x'}{dt^2} + k \cdot x' + b \cdot \frac{dx'}{dt} = -m \cdot a. \quad (8)$$

Применив к выражению (8) преобразование Лапласа с учетом нулевых начальных условий, получим:

$$m \cdot p^2 \cdot x'(p) + b \cdot p \cdot x'(p) + k \cdot x'(p) = -m \cdot a(p), \quad (9)$$

где $x'(p)$ – изображение по Лапласу смещения инерционной массы внутри датчика;

$a(p)$ – изображение по Лапласу ускорения движения объекта вдоль оси чувствительности датчика.

Находим передаточную функцию датчика по каналу ускорение – смещение инерционной массы, используя выражение (9):

$$W_1(p) = \frac{x'(p)}{a(p)} = \frac{-m}{m \cdot p^2 + b \cdot p + k}, \quad (10)$$

где $W_1(p)$ – передаточная функция датчика ускорения по каналу ускорение – смещение инерционной массы.

Поскольку выходное напряжение датчика прямо пропорционально смещению инерциальной массы, используя выражение (10) можно записать передаточную функцию датчика по каналу ускорение – выходное напряжение:

$$W_D(p) = \frac{K_D}{a_1 \cdot p^2 + b_1 \cdot p + 1}, \quad (11)$$

где $W_D(p)$ – передаточная функция датчика по каналу ускорение – выходное напряжение;

K_D – статический передаточный коэффициент датчика по каналу ускорение – выходное напряжение;

a_1 и b_1 – коэффициенты, определяющие постоянные времени объекта второго порядка.

Выражение (11) является математической моделью акселерометра. Для его практического использования необходимо найти статический передаточный коэффициент датчика и коэффициенты, определяющие постоянные времени.

Рассмотрим фрагмент структурной схемы измерительной части системы мониторинга параметров движения кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [2], в составе которой используются MEMS-акселерометры LIS352AX. Пример такой структурной схемы представлен на рисунке 3.

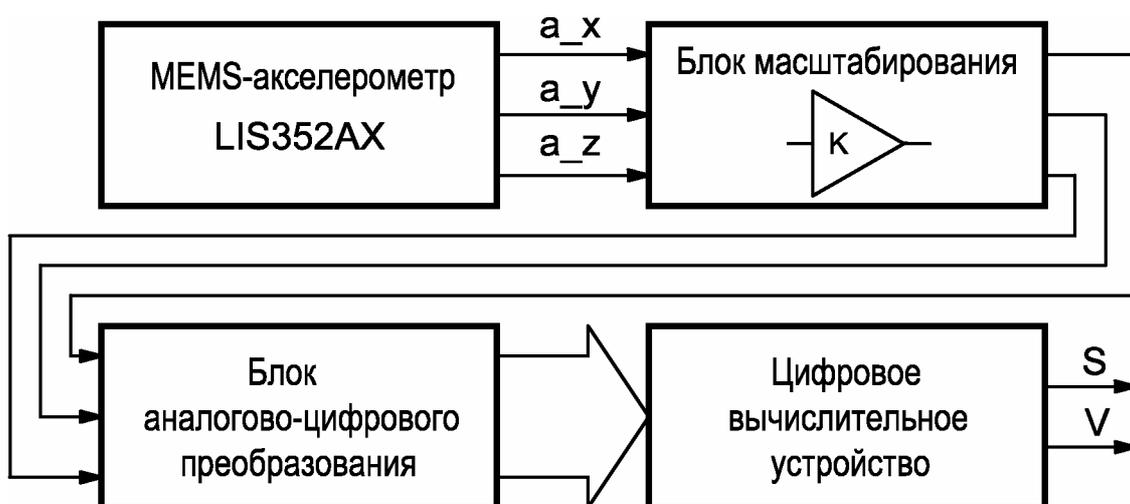


Рисунок 3 – Фрагмент структурной схемы измерительной части системы мониторинга параметров движения кристаллизатора МНЛЗ

В состав измерительной части системы мониторинга на рисунке 3 входят: MEMS-акселерометр, блок масштабирования, блок аналого-цифрового преобразования (АЦП), цифровое вычислительное устройство (ЦВУ). MEMS-акселерометр осуществляет преобразование измеряемого параметра объекта (ускорение) в сигнал электрического напряжения, снимаемого на выходе. Выходное напряжение соответствующей оси чувствительности датчика будет пропорционально значению ускорения вдоль этой оси. Далее электрический сигнал поступает на блок масштабирования, который представляет собой усилитель с изменяемым коэффициентом усиления. Данный блок необходим для приведения уровня сигналов, поступающих на вход АЦП к величине опорного напряжения, а также осуществления калибровки измерительной системы. Блок аналого-цифрового преобразования (АЦП) производит преобразование входного аналогового сигнала в цифровой для его дальнейшей обработки цифровым вычислительным устройством. ЦВУ благодаря заложенному в него алгоритму производит обработку сигналов первичной информации и вычисление скорости движения объекта V и перемещения S .

Для определения статического передаточного коэффициента акселерометра LIS352AX воспользуемся его справочными данными из [3]. Чувствительность датчика составляет 0,363 В/г. Частота резонанса – 2 кГц. Определяем статический передаточный коэффициент:

$$K_{д} = \frac{-0,363}{9,8} = -0,037. \quad (12)$$

Для определения коэффициентов a_1 и b_1 воспользуемся типовой амплитудно-частотной характеристикой акселерометра [4], которая построена для объекта с передаточной функцией вида:

$$W_2(p) = \frac{1}{a_1 \cdot p^2 + b_1 \cdot p + 1}. \quad (13)$$

Подставляя в (13) $p = j\omega$ находим КФЧХ, и, записав ее в показательной форме можно получить выражения для определения АЧХ и ЛАЧХ:

$$A_2(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - a_1 \cdot \omega^2)^2 + b_1^2 \cdot \omega^2}}, \quad (14)$$

$$G_2(\omega) = -10 \cdot \lg\left(\left(1 - a_1 \cdot \omega^2\right)^2 + b_1^2 \cdot \omega^2\right). \quad (15)$$

Примем во внимание, что подъем ЛАЧХ на резонансной частоте согласно [4] составляет +1,5 дБ, а также учтем, что эта точка является максимальной на характеристике. Пользуясь данными положениями, составляем систему двух уравнений с двумя неизвестными, из которых и определяем коэффициенты a_1 и b_1 .

Они принимают следующие значения: $a_1 = 0,342 \cdot 10^{-8}$, $b_1 = 0,56 \cdot 10^{-4}$. Подставим эти значения в выражение (13) и составим на основе этого выражения модель в пакете Simulink. С использованием данной модели и инструмента Linear Analysis проведем линейный анализ данной модели. ЛАЧХ MEMS-акселерометра, построенная на основе его модели приведена на рисунке 4.

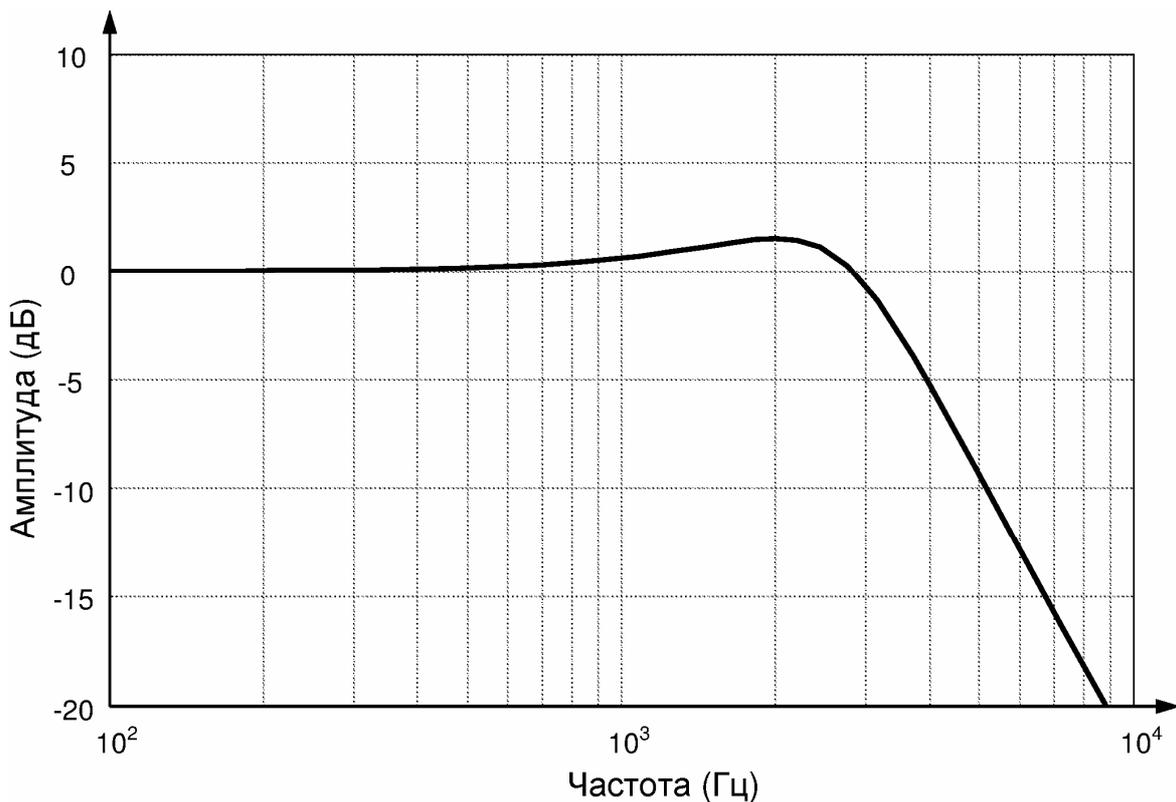


Рисунок 4 – ЛАЧХ MEMS-акселерометра, построенная на основе его модели

Как видно из рисунка 4 на резонансной частоте 2 кГц подъем ЛАЧХ составляет +1,5 дБ, что свидетельствует о правильности определения коэффициентов выражения (13).

Поскольку неизвестные параметры выражения (11) найдены, передаточную функцию MEMS-акселерометра LIS352AX можно записать в следующем виде:

$$W_D(p) = \frac{-0,037}{0,342 \cdot 10^{-8} \cdot p^2 + 0,56 \cdot 10^{-4} \cdot p + 1}. \quad (16)$$

Выводы. Получена обобщенная математическая модель MEMS-акселерометра в виде передаточной функции, которая может быть использована при моделировании систем мониторинга движения, и в частности при моделировании системы мониторинга параметров качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок. Кроме того, аналитическим путем получены коэффициенты передаточной функции MEMS-акселерометра LIS352AX, что позволяет исследовать влияние динамических параметров данного акселерометра на измерительные ошибки. В дальнейшем планируется использовать полученную математическую модель для разработки мероприятий по повышению точности измерения параметров качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок.

Библиографический список

1. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г.И. Волович. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.

2. Паеранд Ю.Е. Моніторинг траєкторії руху кристалізатора машини безперервного лиття заготовок із використанням MEMS-акселерометрів / Ю.Е. Паеранд, О.Ф. Бондаренко, О.М. Полєно // Труды XII Междунар. научно-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ-2011). – Одесса: Политехперіодика. – 2011. – С. 249.

3. LIS352AX MEMS inertial sensor: 3-axis ± 2 g absolute analog-output "piccolo" accelerometer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00228915.pdf

4. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

Рекомендовано к печати к.т.н., проф. Паэрандом Ю.Э.