

УЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА ПРИ ЕГО МОДЕЛИРОВАНИИ

Г.В. Максюзин

maksjuschin@yandex.ru
SPIN-код: 9280-0746

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены основные параметры и характеристики акселерометров, погрешности МЭМС-акселерометров и причины их возникновения. Перечислены основные виды погрешностей, их особенности и причины возникновения. С использованием основных параметров акселерометра для диапазона $\pm 1g$ выполнено моделирование МЭМС-акселерометра без учета погрешностей измерения в программном пакете MATLAB Simulink. Данная модель МЭМС-акселерометра модифицирована для учета температурных погрешностей измерения и шумовых составляющих входного сигнала, в том числе фликкер-шума, для оценки реальной работы МЭМС-акселерометра. По полученным результатам моделирования сделаны выводы о влиянии различных погрешностей на реальную работу МЭМС-акселерометров при моделировании.

Ключевые слова

Точность измерений, МЭМС-акселерометр, погрешности акселерометра, внутренние шумы, фликкер-шум, температурные погрешности, дрейф нуля, моделирование в MATLAB Simulink

Поступила в редакцию 17.01.2019
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. На сегодняшний день в различных областях применения наиболее популярны датчики движения, основанные на МЭМС-технологии. МЭМС или микроэлектромеханические системы — это микроустройства, объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические составляющие.

Целью работы — исследование влияния погрешностей и шумовых составляющих МЭМС-акселерометров на работу акселерометра при моделировании. В данной статье рассмотрены основные параметры и характеристики акселерометров, а также причины возникновения погрешностей в МЭМС-акселерометрах. По результатам исследования влияния погрешностей на работу МЭМС-акселерометров представлены результаты моделирования МЭМС-акселерометра в программном пакете MATLAB Simulink.

Среди важнейших параметров акселерометра можно выделить диапазон измеряемых ускорений, чувствительность, выраженную обычно как отношение сигнала в вольтах к ускорению, нелинейность в процентах полной шкалы чувствительности, температурные дрейфы нуля (смещения) и шумы.

В большинстве случаев применения акселерометров важными параметрами являются диапазон допустимых температур и максимально допустимые пере-

грузки. Этих параметров, как правило, достаточно для определения условий эксплуатации устройств [1]. Большое значение при выборе акселерометра имеет точность измерений, которая зависит от дрейфов нуля и чувствительности, а также шумов датчика, ограничивающих порог разрешения устройства.

Погрешность измерения — это отклонение результатов измерения от истинного значения измеряемой величины [2, 3]. Рассмотрим основные причины возникновения погрешностей измерения МЭМС-акселерометра:

- 1) изменение температуры;
- 2) вибрационные воздействия;
- 3) перекрестное ускорение;
- 4) внутренние шумы акселерометра.

Одна из таких важных характеристик МЭМС-акселерометров, как чувствительность, зависит от резонансной частоты механической подсистемы и качества электронного преобразователя. Изменение температуры окружающей среды приводит к изменению значения диэлектрической проницаемости ϵ , зазора между пластиной маятника и крышками, коэффициента упругости механической части акселерометра, тепловому расширению и технологическим погрешностям изготовления сенсора. Влияние температура на работу МЭМС-акселерометра приводит к смещению нуля. В то же время воздействие температуры на характеристики электронной части акселерометра, как правило, существенно меньше.

Необходимо учитывать, что точность измерений ограничивается спектральным составом шума измерений, а не только систематическими погрешностями, такими как температура. В случае с измерениями с помощью MEMS-акселерометров в шумах присутствует фликкер-шум, окрашивающий шумы измерений [6].

В конечном счете важнейшими характеристиками акселерометров для их сравнительного анализа являются смещение нуля и его дрейфы, нестабильность смещения и шум. Также могут приниматься во внимание дрейф чувствительности, коэффициент нелинейности VRE и др. [7]. Любое смещение акселерометра в отсутствие ускорения при двойном интегрировании вызывает ошибку скорости, пропорциональную времени интегрирования, и ошибку в вычислении положения, растущую со временем по квадратичному закону.

С целью реального исследования работоспособности МЭМС-акселерометра рассмотрена его модель в визуальной среде MATLAB Simulink [8–10]. Схема моделирования акселерометра в MATLAB Simulink представлена на рис. 1.

Ниже приведены основные параметры акселерометра для диапазона $\pm 1g$. Здесь M — масса маятника; G_y — жесткость упругих подвесов относительно оси кручения; J — момент инерции относительно оси вращения; K_{ky} — коэффициент корректирующего устройства (КУ); $K_{чэ}$ — коэффициент передачи чувствительного элемента; K_{oc} — коэффициент обратной связи; $K_{мп}$ — коэффициент первичного преобразователя; $T = [T_1, T_2, T_3]$ — вектор постоянных времени КУ.

Учет погрешностей мэмс-акселерометра при его моделировании

Параметр	m_1, m_2, m_3 , кг	M , кг	J , кг · м ²	G_y , Н · м	T_1, T_2, T_3 , с
Значение	$3,0247 \cdot 10^{-5}$	$5,70 \cdot 10^{-5}$	$2,41 \cdot 10^{-10}$	$2,76 \cdot 10^{-6}$	0,0024
	$2,6789 \cdot 10^{-5}$				168,7
	$2,328 \cdot 10^{-10}$				27,6
Параметр	K_{KY}	$K_{ПП}$	$K_{ЧЭ}$	K_{OC}	$t_{ПП}$, с
Значение	$1,0 \cdot 10^{+7}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,296 \cdot 10^{-8}$	$2,541 \cdot 10^{-8}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$

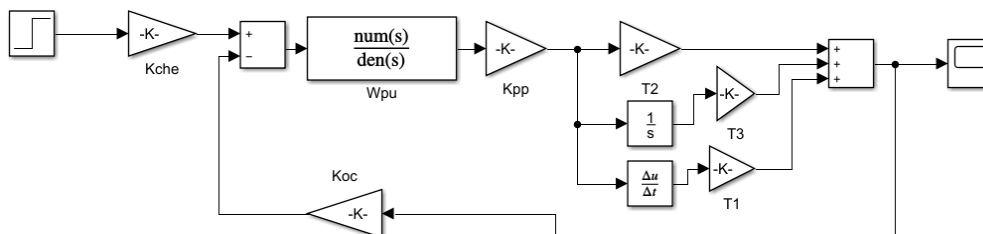


Рис. 1. Схема моделирования акселерометра в MATLAB Simulink

Результаты моделирования по схеме согласно рис. 1 представлены в виде переходного процесса (рис. 2) при действии входного ускорения $1g$. Время переходного процесса получено на уровне $0,000004$ с.

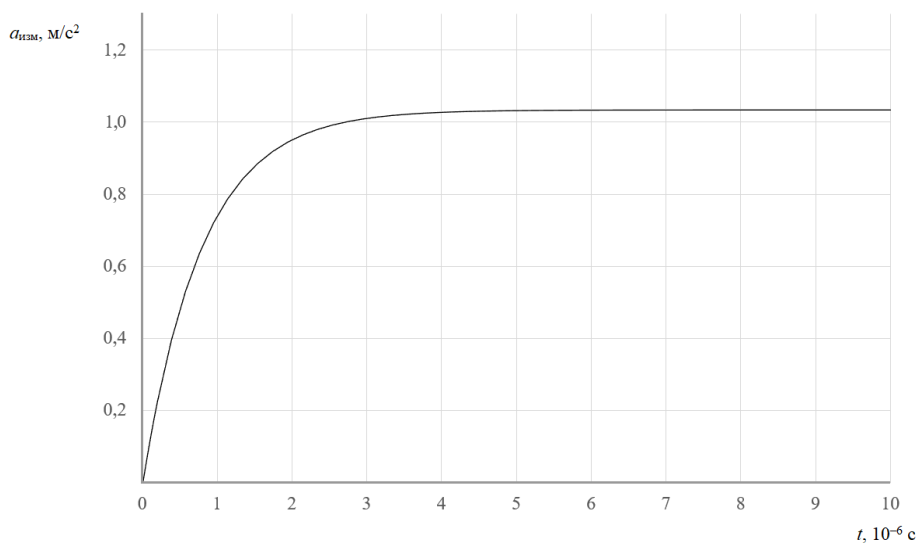


Рис. 2. Переходный процесс акселерометра

Рассмотрим модификацию вышеописанной модели (рис. 3) с учетом шумов акселерометра и температурных шумов, при условии повышения температуры, а также с учетом фликкер-шума, введенного в схему как фильтрованный белый шум дискретным фильтром с частотной характеристикой, дискретно аппроксимированной как

$$H(z) = \frac{1}{1 - 0,999z^{-1}}$$

Внутренние шумы в данной модели приняты как белый шум. Температурный шум в модели задан как линейно растущая функция, при растущей температуре. Очевидно, что время переходного процесса увеличилось из-за влияния температуры. В то же время влияние внутренних шумов самого акселерометра незначительно (рис. 4).

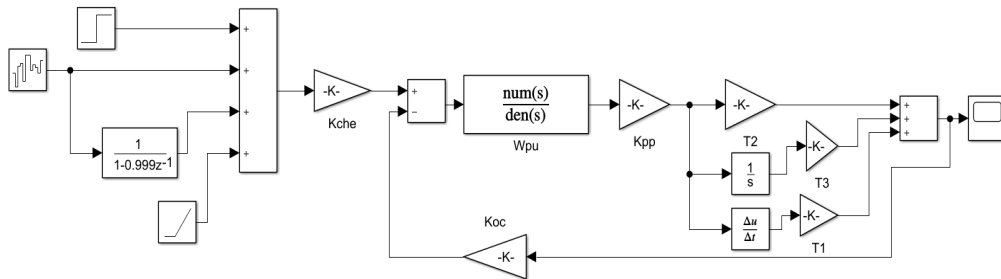


Рис. 3. Схема моделирования акселерометра в MATLAB Simulink с учетом фликкер-шума и влияния температуры

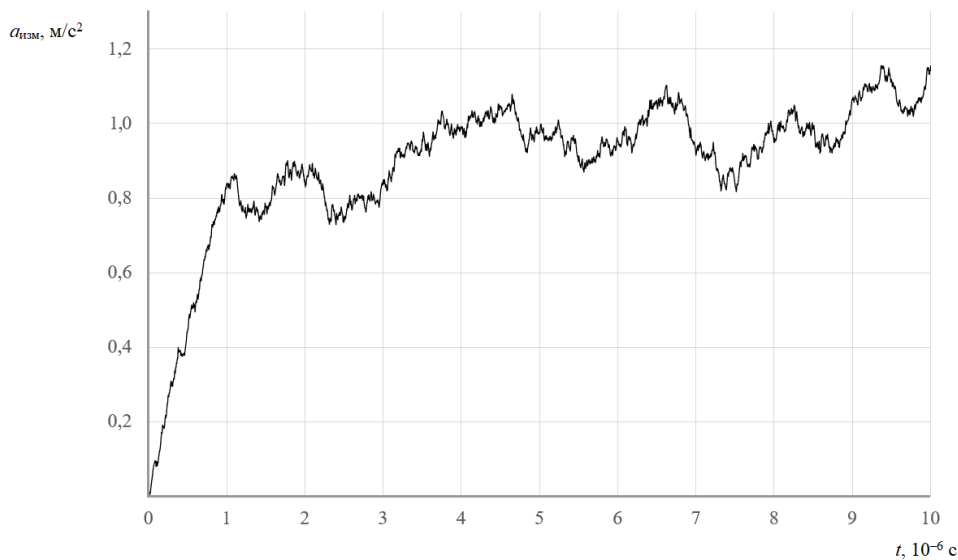


Рис. 4. Переходный процесс акселерометра с учетом фликкер-шума и влияния температуры

Выводы. В данной работе рассмотрены основные параметры акселерометра, погрешности и причины их возникновения в МЭМС-акселерометрах. Проведено моделирование МЭМС-акселерометра в MATLAB Simulink. Схема моделирования МЭМС-акселерометра модифицирована для учета влияния погрешностей и шумовых составляющих во входных данных, что не было сделано в исходной модели. Как видно из результатов моделирования, разные виды погрешностей оказывают различное влияние на суммарную погрешность измерений: фликкер-шум вызывает значительные отклонения на малых интервалах

времени, а тепловые шумы приводят к увеличению длительности переходного процесса.

Литература

- [1] Казакевич А. Акселерометры Analog Devices — устройство и применение. *Компоненты и Технологии*, 2007, № 70, с. 46–50.
- [2] Кравченко Н.С, Ревинская О.Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме. Томск, Изд-во ТПУ, 2011.
- [3] Жуков В.К. Теория погрешностей технических измерений. Томск, Изд-во ТПУ, 2009.
- [4] Дао Ван Ба. Динамический метод исследования погрешностей триады микромеханических акселерометров. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб., СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2015.
- [5] Разработка алгоритма для исследования погрешностей МЭМС-акселерометра. *Studwood.ru*: веб-сайт. URL: https://studwood.ru/570993/informatika/teoreticheskaya_chast (дата обращения: 10.03.2018).
- [6] Фликкер-шум (1/f-шум, избыточный шум). *chronos.msu.ru*: веб-сайт. URL: http://www.chronos.msu.ru/old/TERMS/parkhomov_flicker.htm (дата обращения: 10.09.2018).
- [7] Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб., Концерн ЦНИИ Электроприбор, 2009.
- [8] Волков В.Л. Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра. *Труды НГТУ им П.Е. Алексеева*, 2011, № 2(87), с. 288–295.
- [9] Волков В.Л., Хрисанова М.В. Обеспечение статической и динамической точности микроэлектромеханического датчика угловой скорости. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*, 2013, № 2(99), с. 329–338.
- [10] Павлов Д.В., Лукин К.Г., Петров М.Н. Разработка имитационной модели мемс-акселерометра в среде Simulink. *Вестник НовГУ им. Ярослава Мудрого*, 2016, № 4(95), с. 28–33.

Максюшин Георгий Викторович — студент кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Наталья Сергеевна Соболева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автономные информационные и управляющие системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

ACCOUNTING OF MEMS ACCELEROMETER ERRORS WHEN SIMULATING IT

G.V. Maksyushin

maksjuschin@yandex.ru

SPIN-code: 9280-0746

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The main accelerometer parameters and characteristics, MEMS accelerometer errors and their causes are considered. The main error types, their features and causes of occurrence are listed. Using the basic accelerometer parameters for a range of $\pm 1g$, a MEMS accelerometer was simulated in the MATLAB Simulink software package without considering measurement errors. This model of the MEMS accelerometer has been modified to take into account the temperature measurement errors and the input signal noise components, including flicker noise, to assess the real operation of the MEMS accelerometer. According to the obtained simulation results, conclusions were made about the effect of various errors on the actual operation of MEMS accelerometers in simulation.

Keywords

Measurement accuracy, MEMS accelerometer, accelerometer errors, internal noise, flicker noise, temperature errors, zero drift, simulation in MATLAB Simulink

Received 17.01.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Kazakevich A. Analog Devices accelerometers – implementation and application. *Komponenty i Tekhnologii* [Components & Technologies], 2007, no. 70, pp. 46–50 (in Russ.).
- [2] Kravchenko N.S, Revinskaya O.G. Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy i otsenki pogreshnostey v uchebnom laboratornom praktikume [Optimization methods for measured data and accuracy assessment in educational laboratory course]. Tomsk, TPU Publ., 2011 (in Russ.).
- [3] Zhukov V.K. Teoriya pogreshnostey tekhnicheskikh izmereniy [Error theory of technical measurements]. Tomsk, TPU Publ., 2009 (in Russ.).
- [4] Dao Van Ba. Dinamicheskiy metod issledovaniya pogreshnostey triady mikromekhanicheskikh akselerometrov. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Dynamic methods for error research in triad of micromechanical accelerators. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Sankt-Petersburg, SPbGETU LETI Publ., 2015 (in Russ.).
- [5] Razrabotka algoritma dlya issledovaniya pogreshnostey MEMS-akselerometra [Developing algorithm for research on MEMS accelerometer error]. *Studwood.ru: website* (in Russ.). URL: https://studwood.ru/570993/informatika/teoreticheskaya_chast (accessed: 10.03.2018).
- [6] Flikker-shum (1/f-shum, izbytochnyy shum) [Flicker-noise (1/f noise, excess noise)]. *chronos.msu.ru: website* (in Russ.). URL: http://www.chronos.msu.ru/old/TERMS/parkhomov_flikker.htm (accessed: 10.09.2018).
- [7] Matveev V.V., Raspopov V.Ya. Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsiyal'nykh navigatsionnykh system [Fundamentals of strap down inertial navigation systems]. Sankt-Petersburg, Kontsern TsNII Elektropribor Publ., 2009 (in Russ.).

- [8] Volkov V.L. Motivation of the requirements to parameters for accelerometer a micromechanical. *Trudy NGTU im R.E. Alekseeva*, 2011, no. 2(87), pp. 288–295 (in Russ.).
- [9] Volkov V.L., Khrisanova M.V. Provision steady-state and dynamic accuracy of the micro electromechanic sensor of angular velocity. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2013, no. 2(99), pp. 329–338 (in Russ.).
- [10] [Pavlov D.V., Lukin K.G., Petrov M.N. Development of imitating model of the MEMS accelerometer using Simulink environment. *Vestnik NovGU im. Yaroslava Mudrogo* [Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences], 2016, no. 4(95), pp. 28–33 (in Russ.).

Maksyushin G.V. — Master's Degree Student, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — N.S. Soboleva, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.