

С.Р. Карпиков

ОАО «Авангард», Санкт-Петербург, Россия

ОЦЕНКА НЕЛИНЕЙНОСТИ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С МАЯТНИКОВЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Исследуется конструкция автоколебательного акселерометра, в котором инерционная масса, являющаяся чувствительным элементом, выполнена в виде маятника. Предлагается вариант реализации такого датчика с использованием микромеханической технологии. Проводится сравнение нелинейности характеристики преобразования представленной схемы с аналогичным датчиком, в котором используется линейный чувствительный элемент. Исследование проводится с помощью численного расчета и компьютерного моделирования характеристики преобразования датчиков на основе уравнения движения чувствительного элемента. По результатам моделирования определяется нелинейность, как в границах устойчивой работы датчика, так и в рабочем диапазоне измерений. Несмотря на увеличение нелинейности в полном диапазоне измерений, в рабочем диапазоне существенных различий в характеристике преобразования для автоколебательного датчика с линейным и с маятниковым чувствительным элементом не наблюдалось.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, нелинейные системы, МЭМС, акселерометр, автоколебания.

Для цитирования: Карпиков С.Р. Оценка нелинейности автоколебательного акселерометра с маятниковым чувствительным элементом // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 12–17.

S.R. Karpikov

OJSC Avangard, Saint-Petersburg, Russia

ESTIMATE OF THE NONLINEARITY OF THE SELF-OSCILLATING ACCELEROMETER WITH THE PENDULUM SENSITIVE ELEMENT

The object of study is the design of the self-oscillating accelerometer, wherein the inertial mass, which is a sensitive element, is executed in the form of a pendulum. An option of implementation of such a sensor is proposed with the use of micromechanical technology. Nonlinearity of the characteristic of the conversion of the presented circuit is compared with a similar sensor wherein a linear sensing element is used. The study is carried out with the use of numerical calculation and computer simulation of the sensors transformation characteristics based on the equation of the sensitive element motion. On the basis of the simulation results the nonlinearity is determined both within the limits of the stable operation of the sensor and in the operating range of the measurements. Despite the increase in nonlinearity in the full range of measurements, in the operating range no significant differences have been observed in the conversion characteristic for the self-oscillating sensor with a linear and pendulum sensitive element.

Keywords: computer simulation, nonlinear systems, microelectromechanical systems, accelerometer, self-oscillations.

For citation: Karpikov S. R. Estimate of the nonlinearity of the self-oscillating accelerometer with the pendulum sensitive element. Radiopromyshlennost, 2018, no. 1, pp. 12–17 (In Russian).

Введение

Автоколебательная схема построения акселерометров предоставляет ряд преимуществ по сравнению с традиционно используемыми схемами датчиков, в которых применяется линейный контур управления [1–5], как без обратной связи, так и с обратной связью [6] (компенсационные датчики): возможность управления резонансом [7], настройка параметров во время работы, а также работа всех компонентов датчика в ключевом режиме, что снижает влияние шумов [2, 8]. В то же время такой способ измерения требует значительного усложнения конструкции датчиков из-за большого количества элементов.

Рассмотрим датчик ускорения, схема которого показана на рис. 1. Конструкция содержит инерционную массу (чувствительный элемент) m 1 и упругие подвесы с жесткостью c . Инерционная масса совершает непрерывное колебательное движение под действием силового привода, состоящего из магнитопровода 4 и электромагнита 5, управляемого через усилитель тока 6 сигналом обратной связи, формируемым нелинейным звеном 7 на основе сигнала с оптопар, образованных излучателями 2 и фотоприемниками 3, фиксирующих определенные положения чувствительного элемента. При этом коэффициент демпфирования ξ выступает фактором, ограничивающим амплитуду колебаний.

Наиболее простым вариантом чувствительного элемента для использования в такой схеме является линейный чувствительный элемент [1], совершающий колебания вдоль одной оси, которая является осью чувствительности. Однако в этом случае сложно достичь высокой точности из-за возникновения «паразитных» колебаний вдоль перпендикулярных к основной осей. Альтернативным вариантом является изготовление чувствительного элемента в виде маятника – в этом случае частота второго резонанса (с направлением колебаний, не совпадающих с осью чувствительности) оказывается существенно выше, чем для линейного чувствительного элемента из-за иной конструкции упругих подвесов. Но в этом случае инерционная масса движется по дуге, и при измерении линейного ускорения может возрастать нелинейность.

Цель настоящего исследования заключается в оценке нелинейности измерения линейного ускорения с помощью маятниковых автоколебательных акселерометров. Нелинейность определим как отклонение зависимости между выходным сигналом и измеряемым ускорением от линейной аппроксимации, которое измеряется в процентах от диапазона измерения [1].

Описание конструкции

Исследуемый маятниковый акселерометр может быть выполнен по микромеханической технологии, когда основным конструкционным материалом является кремниевая пластина. Такой вариант построения датчика показан на рис. 2. Он состоит из основания 1, рамки 2 с инерционной массой 3, закрепленной на упругих подвесах 4 и содержащей две заслонки: 5 и 6. Оптический датчик положения инерционной массы 3 выполнен из излучателя 7, фотоприемников 8, 9 и волоконно-оптических кабелей 10, 11, 12, 13. Излучатель 7 подключен к источнику напряжения 14, а фотоприемники 8 и 9 подключены к компараторам 15, 16, 17 и 18. Электромагнитный силовой привод состоит из катушек 19, 20, размещенных на магнитопроводящих сердечниках 21, 22. На поверхности инерционной массы 3 с каждой стороны расположены магнитопроводы 23, 24. Катушки 19 и 20 подключены к выходу ключа 25 через усилители тока 26 и 27 соответственно. Входы ключа 25 соединены с компараторами 15, 16, 17 и 18. Большая часть элементов датчика может размещаться в плоскости, что повышает технологичность конструкции. Силовой привод размещается на корпусе, кроме того, для него не требуется высокая точность позиционирования.

Математическая модель

Для линейного чувствительного элемента уравнение движения основывается на решении дифференциального уравнения третьего порядка. Уравнение описывает колебательное звено (звено 2-го порядка [9]) и апериодическое звено 1-го порядка

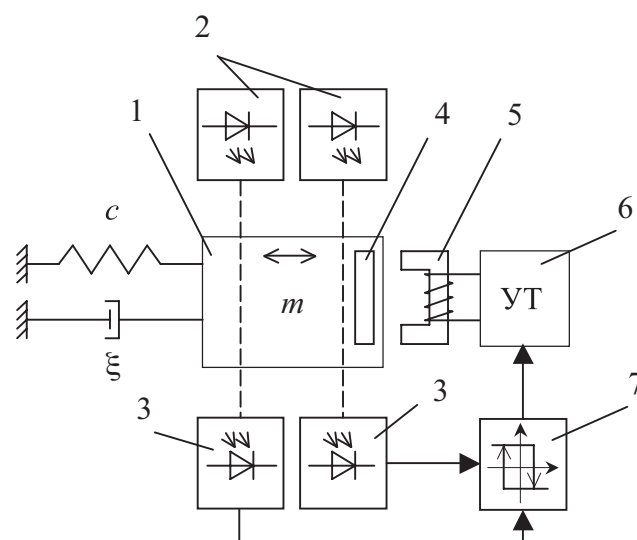


Рисунок 1. Схема автоколебательного датчика ускорения: 1 – чувствительный элемент; 2 – излучатели; 3 – фотоприемники; 4 – магнитопровод; 5 – электромагнит; 6 – усилитель тока; 7 – нелинейное звено в обратной связи

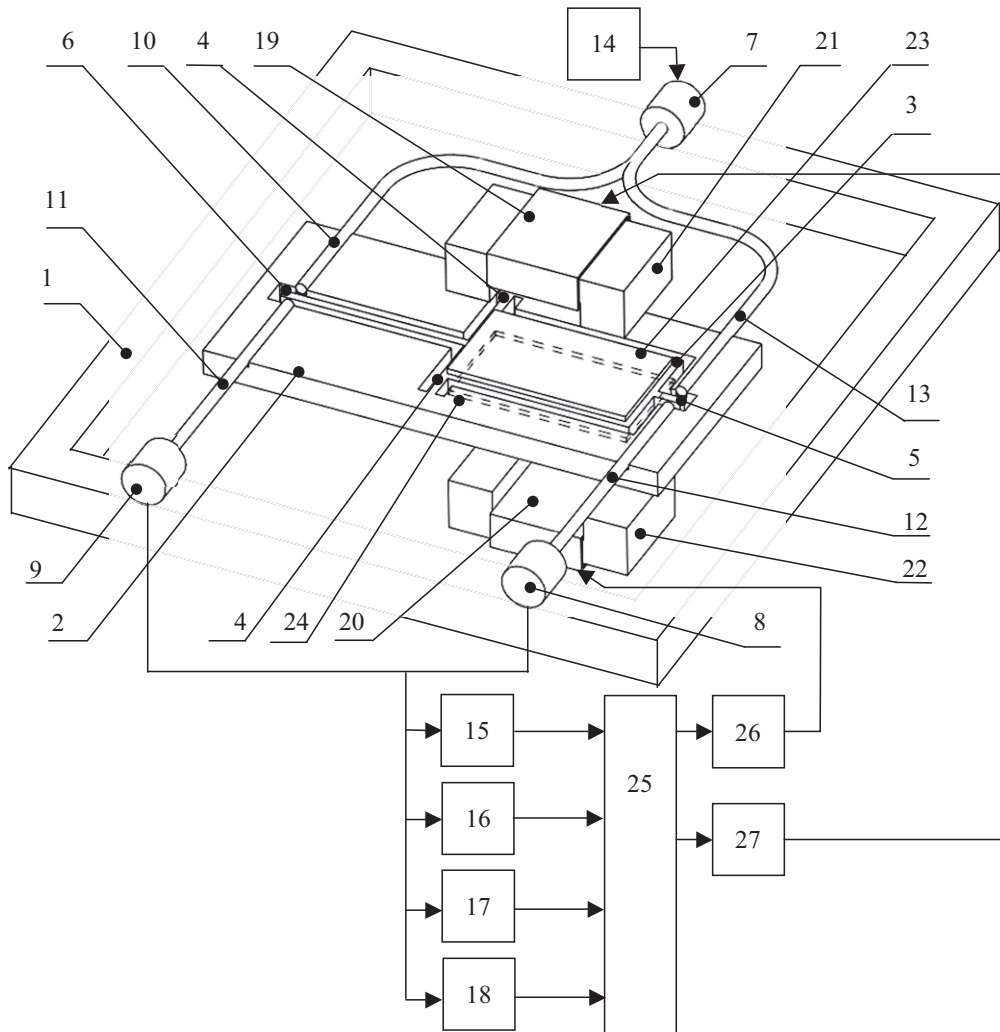


Рисунок 2. Маятниковый акселерометр на кремниевой пластине

(необходимо для учета инерционности электромагнитного силового привода [10])

$$(T_1^2 \frac{d^2}{dt^2} + 2\xi \frac{d}{dt} + 1)(T_2 \frac{d}{dt} + 1)x + \frac{F_u \Phi(x, \dot{x})}{c} = (T_2 \frac{d}{dt} + 1)aT_1^2, \quad (1)$$

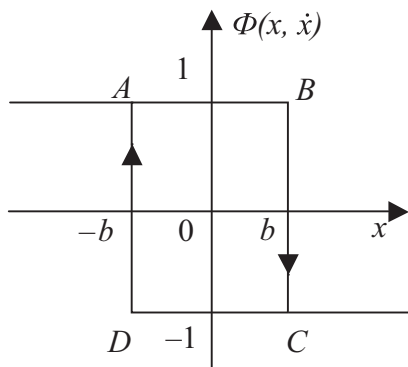


Рисунок 3. График проходит через точки A, B, C при $x' > 0$ и через точки C, D, A при $x' < 0$

где $x = x(t)$ – смещение центра чувствительного элемента от положения равновесия; t – время; $T_1^2 = m/c$ – первая постоянная времени; $T_2 = L/R$ – вторая постоянная времени; R – сопротивление катушек; L – индуктивность катушек; ξ – коэффициент демпфирования; a – действующее ускорение; m – масса чувствительного элемента; c – коэффициент жесткости подвесов; F_u – величина компенсирующего воздействия электромагнитного силового привода; $\Phi = \Phi(x, \dot{x})$ – нелинейная функция обратной связи (рис. 3).

Для исследования маятникового чувствительного элемента уравнение (1) необходимо привести к виду, описывающему угловое движение, при котором координате x ставится в соответствие угол поворота маятника $\varphi = \varphi(t)$, а первая и вторая производные от угла равны, соответственно, угловой скорости и угловому ускорению

$$(T_3^2 \frac{d^2}{dt^2} + 2\xi_2 \frac{d}{dt} + 1)(T_2 \frac{d}{dt} + 1)\varphi + \frac{F_u \Phi(x, \dot{x})l \cos \varphi}{K} = (T_2 \frac{d}{dt} + 1) \frac{aI \cos \varphi}{lK}, \quad (2)$$

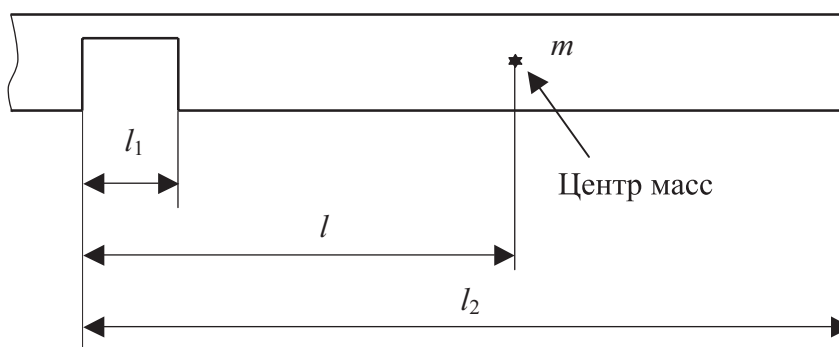


Рисунок 4. Параметры чувствительного элемента

где $T_3^2 = I/K$ – третья постоянная времени; K – вращательный коэффициент жесткости; ξ_2 – вращательный коэффициент демпфирования; $I = m(l_2^3/3 - l_1^3/3)$ – момент инерции чувствительного элемента; l_1 – расстояние до дальней от оси колебаний точки чувствительного элемента, l_2 – расстояние до ближней точки чувствительного элемента, l – расстояние от оси вращения до центра массы чувствительного элемента (рис. 4).

Внешнее ускорение a будет воздействовать на инерционную массу, смещая центр колебаний. Измеряемый сигнал t при этом находится как отношение

$$\tau = M \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1 + \tau_2},$$

где $\tau_1 = t_2 - t_1$, $\tau_2 = t_3 - t_2$; t_1, t_3 – моменты времени, в которые происходит смена состояния нелинейного звена в течение одного периода колебаний, когда инерционная масса пересекает точки b и $-b$; M – постоянный коэффициент, рассчитывающийся при калибровке прибора.

Исходные данные

Для построения характеристики преобразования датчика и определения нелинейности уравнения (1) и (2) были решены численно для двух вариантов конструкции датчика – с линейным (уравнение (1)) и с маятниковым (уравнение (2)) чувствительными элементами. На основе решения уравнений было проведено компьютерное

моделирование движения чувствительного элемента. Выбор параметров осуществлялся исходя из условия равенства диапазона измерения линейного ускорения для двух конструкций датчиков. Параметры сведены в табл. 1, 2.

Общие параметры конструкций: $R = 300$ Ом, $L = 0,1$ мГн. Собственная частота колебаний – 300 Гц.

Результаты компьютерного моделирования

Полученные графики нелинейности датчиков представлены на рис. 5, 6. В полном диапазоне измерения (в рамках этого диапазона колебания устойчивы) при значениях τ от 0 до 1,0 нелинейность составила 6% для линейного чувствительного элемента и 9% для маятникового (рис. 5). Однако на практике измерения проводятся в рабочем диапазоне, который ограничивается τ от 0 до 0,2. В рабочем диапазоне различия между линейным и маятниковым чувствительными элементами незначительны, а максимальная нелинейность составляет 0,063% (на рис. 6 графики для двух типов чувствительных элементов совпадают).

Заключение

После анализа полученных данных был сделан вывод, что, несмотря на увеличение нелинейности на полном диапазоне измерений, в рабочем диапазоне существенных различий в характеристике преобразования для автоколебательного датчика с линейным и с маятниковым чувствительными элементами не наблюдалось. Кроме того,

Таблица 1. Параметры датчика с линейным чувствительным элементом

Параметр	c , Н/м	m , мкг	ξ , с	b , мкм	F_u , мН
Значение	2,5	0,7	$20 \cdot 10^{-6}$	7,0	1,5

Таблица 2. Параметры датчика с маятниковым чувствительным элементом

Параметр	K , Н·м	I , кг·м ²	ξ_2 , с	b , рад.	F_u , мН	l , мм	l_1 , мм	l_2 , мм
Значение	$6,7 \cdot 10^{-9}$	$1,87 \cdot 10^{-15}$	$20 \cdot 10^{-6}$	0,0035	1,5	1,0	0,2	2,0

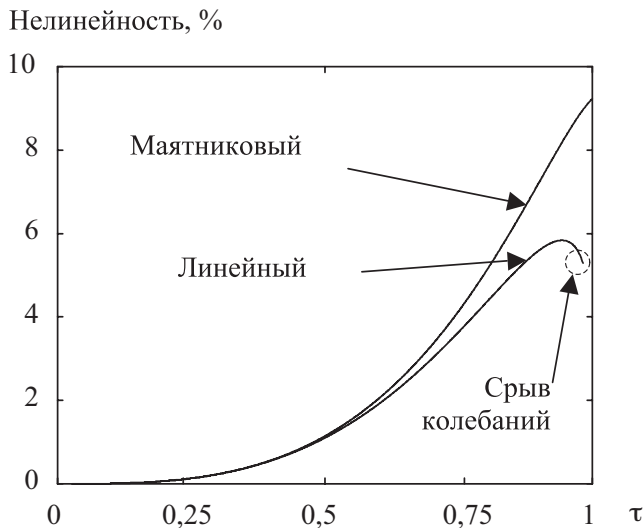


Рисунок 5. Нелинейность характеристики в полном диапазоне измерений для маятникового и линейного чувствительных элементов

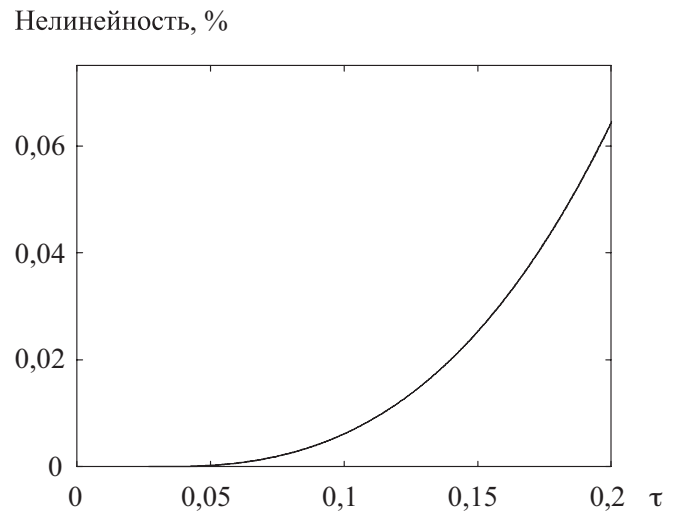


Рисунок 6. Нелинейность характеристики в рабочем диапазоне измерений для маятникового и линейного чувствительных элементов

полученные значения нелинейности в рабочем диапазоне в 0,063% находятся на уровне типичных значений для аналогов, представленных на рынке (от 0,1 до 0,5%) [1, 3, 4, 11], при этом в рассмотренной конструкции не применяется коррекция выходного сигнала, при наличии которой можно ожидать дополнительного снижения нелинейности до уровня приборов навигационного класса (менее 0,01%) [5].

Построение акселерометра с использованием маятниковой схемы позволит уменьшить длину

подвесов, снизив влияние погрешности изготовления и повысив надежность.

Описанный метод измерения и конструкция акселерометра может найти применение в датчиках линейного и углового ускорения, используемых в инерциальных системах навигации и управления движением. Переход к автоколебательным датчикам, в которых для определения параметров движения измеряются интервалы времени, может позволить улучшить точностные характеристики инерциальных систем управления [2, 12, 13].

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.

ACKNOWLEDGEMENT

The research was partially supported by FASIE.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jones T. B., Nenadic N. G. Electromechanics and MEMS. Cambridge University Press, 2013, 577 p.
2. Waters R. L., Fralick M., Jacobs D. Factors Influencing the Noise Floor and Stability of a Time Domain Switched Inertial Device. Proceedings of IEEE/ION PLANS2012. Myrtle Beach, South Car, 2012.
3. Wung T. S., Ning Y. T., Chang K. H., Tang S., Tsai Y. X. Vertical-plate-type microaccelerometer with high linearity and low cross-axis sensitivity. Sensors and Actuators A: Physical, vol. 222, 2015, pp. 284–292. DOI:10.1016/j.sna.2014.11.020.
4. Chunhui D., Changde H., Jiaqi Y. Design and measurement of a piezoresistive triaxial accelerometer based on MEMS. Journal of Semiconductors, vol. 33, no. 10, 2012, pp. 104005–1 – 104005–5. DOI: 10.1088/1674–4926/33/10/104005.
5. Zwahlen P., Nguyen A. M., Dong. Navigation grade MEMS accelerometer. IEEE Xplore. 2010, pp. 631–634. DOI: 10.1109/MEMSYS.2010.5442327.
6. Ye Z., Yang H. High Performance Closed Loop Interface Circuit for High-Q Capacitive Microaccelerometers. IEEE Sensors journal, 2013, vol. 13, no. 5, pp. 1425–1433. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2236312.
7. Карпиков С. Р., Скалон А. И. Влияние нелинейного управления на резонанс в автоколебательном акселерометре // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 8. С. 697–703. DOI 10.17586/0021-3454-2017-60-8-697-703.
8. Zaitsev S., Pandey A. K., Shtempluck O., Buks E. Forced and self-excited oscillations of an optomechanical cavity. Physical Review E, 2011, vol. 84, iss. 4, part 2, pp. 046605-1 – 046605-10. DOI:10.1103/PhysRevE.84.046605.

9. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления / 4-е изд. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.
10. Карпиков С. Р., Скалон А. И. Моделирование характеристик электромагнитного силового привода автоколебательных микромеханических датчиков // Вопросы радиоэлектроники. 2015. № 2 (2). С. 152–159.
11. Evans J. R., Allen R. M., Chung A. I. Performance of Several Low-Cost Accelerometers. *Seismological Research Letters*, 2014, vol. 85, no. 1, pp. 147–158. DOI: 10.1785/0220130091.
12. Swanson P. D., Waters R. L., Tally C. H. Proposed Digital, Auto Ranging, Self Calibrating Inertial Senso. *IEEE Sensors*, 2011, pp. 1457–1460. DOI: 10.1109/ICSENS.2011.6127007.
13. Скалон А. И. Физические основы и пути оптимизации характеристик электромеханических датчиков компенсационного типа. Ч. 2 // Датчики и системы. 2009. № 1. С. 7–11.

REFERENCES

1. Jones T. B., Nenadic N. G. *Electromechanics and MEMS*. Cambridge University Press, 2013, 577 p.
2. Waters R. L., Fralick M., Jacobs D. Factors Influencing the Noise Floor and Stability of a Time Domain Switched Inertial Device. *Proceedings of IEEE/ION PLANS2012*. Myrtle Beach, South Car, 2012.
3. Wung T. S., Ning Y. T., Chang K. H., Tang S., Tsai Y. X. Vertical-plate-type microaccelerometer with high linearity and low cross-axis sensitivity. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 222, 2015, pp. 284–292. DOI:10.1016/j.sna.2014.11.020.
4. Chunhui D., Changde H., Jiaqi Y. Design and measurement of a piezoresistive triaxial accelerometer based on MEMS. *Journal of Semiconductors*, vol. 33, no. 10, 2012, pp. 104005–1 – 104005–5. DOI: 10.1088/1674-4926/33/10/104005.
5. Zwahlen P., Nguyen A. M., Dong. Navigation grade MEMS accelerometer. *IEEE Xplore*. 2010, pp. 631–634. DOI: 10.1109/MEMSYS.2010.5442327.
6. Ye Z., Yang H. High Performance Closed Loop Interface Circuit for High-Q Capacitive Microaccelerometers. *IEEE Sensors journal*, 2013, vol. 13, no. 5, pp. 1425–1433. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2236312.
7. Karpikov S. R., Skalon A. I. Influence of nonlinear control on resonance in the self-oscillating accelerometer. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 697–703. DOI 10.17586/0021-3454-2017-60-8-697-703 (In Russian).
8. Zaitsev S., Pandey A. K., Shtempluck O., Buks E. Forced and self-excited oscillations of an optomechanical cavity. *Physical Review E*, 2011, vol. 84, iss. 4, part 2, pp. 046605-1 – 046605-10. DOI:10.1103/PhysRevE.84.046605.
9. Besekerskiy V. A., Popov E. P. *Teorija sistem avtomaticheskogo upravlenija* [The theory of automatic control systems]. 4-e izd. Saint-Petersburg, Professija Publ., 2003, 752 p. (In Russian).
10. Karpikov S. R., Skalon A. I. Modeling of characteristics of the electromagnetic power drive of self-oscillating micromechanical sensors. *Voprosy radioelektroniki*, 2015, no. 2 (2), pp. 152–159 (In Russian).
11. Evans J. R., Allen R. M., Chung A. I. Performance of Several Low-Cost Accelerometers. *Seismological Research Letters*, 2014, vol. 85, no. 1, pp. 147–158. DOI: 10.1785/0220130091.
12. Swanson P. D., Waters R. L., Tally C. H. Proposed Digital, Auto Ranging, Self Calibrating Inertial Senso. *IEEE Sensors*, 2011, pp. 1457–1460. DOI: 10.1109/ICSENS.2011.6127007.
13. Skalon A. I. Physical fundamentals and ways to optimize the characteristics of compensation type electromechanical sensors. Ch. 2. *Datchiki i sistemy*, 2009, no. 1, pp. 7–11 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Карпиков Станислав Рудольфович, инженер-программист 1-й категории, ОАО «Авангард», 195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр-т, 72, тел.: +7 (952) 368-86-44, e-mail: stanislav__@inbox.ru.

AUTHOR

Karpikov Stanislav, software engineer, OJSC Avangard, 72, Kondratevskiy prospekt, Saint-Petersburg, 195271, Russian Federation, tel.: +7 (952) 368-86-44, e-mail: stanislav__@inbox.ru.