

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

В.Л. Волков

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПАРАМЕТРАМ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Сформулированы требования к электромеханическим параметрам МЭМС акселерометра по критерию статической точности. Выявлены параметры, наиболее сильно влияющие на основной показатель качества акселерометра – крутизну статической характеристики. Разработана методика расчета статических характеристик акселерометра для заданного диапазона измерений.

Ключевые слова: МЭМС, акселерометр, статическая характеристика, чувствительность, корректирующее устройство, средний квадрат ошибки, допуск параметра, точность, моделирование.

Постановка задачи

Результаты научно-исследовательской работы, представленные в [1] показали возможность создания микромеханического компенсационного акселерометра в условиях отсутствия измерительных шумов с оптимальными параметрами, обеспечивающими минимальные значения динамических ошибок. Была дана оценка влияния параметров корректирующего устройства (КУ) датчика на средний квадрат ошибки (СКО) и сформулированы требования к допустимым отклонениям параметров КУ относительно расчетных.

Однако, задача обоснования требований к параметрам акселерометра значительно сложнее и предполагает формулирование требований, прежде всего, на основе обеспечения статической точности. Такая задача может быть решена только при выявлении параметров, наиболее сильно влияющих на основной показатель качества – крутизну статической характеристики. Необходимо оценить допуски на электромеханические параметры датчика и КУ при заданном допуске на крутизну статической характеристики.

При оценке коэффициентов влияния параметров акселерометра на статическую ошибку может быть применена методика, основанная на статистических испытаниях Монте-Карло (применялась в работе [1] при оценке коэффициентов влияния параметров КУ на СКО динамической ошибки).

Задача определения коэффициентов чувствительности dJ/df_i показателя качества K – крутизны статической характеристики к параметрам ДПИ решается следующим образом. Производится моделирование работы ДПИ при номинальных значениях параметров (расчетных параметрах ДПИ для заданного диапазона измерения, оптимальных параметрах КУ). При этом исследуемому параметру f_i задаются случайные вариации с равновероятным распределением. Проводятся многократные статистические испытания, в которых регистрируется выходная характеристика K и на основе множества результатов определяется среднее значение характеристики K и ее среднеквадратическое отклонение σ_K . Коэффициент чувствительности i -го параметра по результатам испытаний при этом определяется как [2]

$$\frac{dK}{df_i} = \frac{\sigma_K/K}{\sigma_{f_i}/f_i}, \quad (1)$$

где σ_{f_i} – среднеквадратическое отклонение i -го параметра от номинального значения.

На стадии проектирования ДПИ для показателя качества K устанавливают его номинальное значение $K_{\text{ном}}$ и предельную допустимую погрешность. Необходимо, чтобы K попадал в поле допуска, тогда ДПИ по данному свойству считается работоспособным.

Чтобы обеспечить допустимую точность акселерометра на статическом режиме (относительная погрешность на границах диапазона должна составлять не более 0,1%), необходимо предъявить требования к предельным отклонениям параметров с учетом их коэффициентов влияния на статическую характеристику.

Предельная абсолютная погрешность выходного сигнала датчика на границе диапазона определяется по приближенному соотношению ошибки, взятому из метрологии

$$\Delta U = \sum_{j=1}^n \frac{dK}{df_j} \delta(f_j) = \sum_{j=1}^n k_j \delta(f_j), \quad (2)$$

где $\delta(f_j)$ – предельно возможное отклонение j -го параметра от номинального значения, k_j – коэффициент чувствительности j -го параметра.

В предельном случае, когда ошибка возникает только из-за j -го параметра, а ошибки других параметров нулевые, из (2) для j -го параметра получим:

$$\Delta U_{\text{max}} = k_j \delta(f_j). \quad (3)$$

На основании 0,1% предельной ошибки, т.е. при $\Delta U_m / U_{\text{max}} = 0,001$, где U_{max} – максимальное значение выходного сигнала в вольтах, определим предельно допустимые отклонения параметров от номинальных значений. Из (3) получим

$$\delta(f_j) = 0,001 U_{\text{max}} / k_j. \quad (4)$$

При расчете акселерометра на разные диапазоны измерения необходимо выбрать ключевой параметр, наиболее сильно влияющий на крутизну статической характеристики акселерометра. В методике расчета акселерометра для заданного диапазона измерения сначала определяется номинальная крутизна статической характеристики K из условия, определяющего коэффициент передачи датчика для заданного диапазона

$$U_{\text{max}} / f_{\text{max}} = K, \quad (5)$$

где f_{max} – верхнее предельное значение входного ускорения на данном диапазоне измерения.

Затем решается задача расчета параметров акселерометра дающих крутизну K и с учетом коэффициентов влияния параметров определяются допустимые отклонения параметров от расчетных.

Математическая модель акселерометра

Микромеханический акселерометр представляет собой маятниковую кремниевую конструкцию (рис. 1) с осью вращения, проходящей через упругие подвесы.

Центр масс на рисунке смещен вправо за счет $am1 > am2$. Упругие подвесы имеют крестообразную форму и работают на кручение. Основными конструктивными параметрами маятниковой конструкции являются:

$am1, am2$ – длина правой и левой части рамки маятника;

bm – ширина рамки маятника;

$am3, bm3$ – длина и ширина ограничителя маятника;

ct – толщина рамки маятника;

ap – длина упругого подвеса;

cp – максимальная и минимальная толщина упругого подвеса;

h – зазор маятника с крышкой.

В рассматриваемой конструкции микромеханического акселерометра используется емкостной преобразователь перемещений и электростатическая силовая обратная связь, реализованные с помощью токопроводящих элементов подвижной части и неподвижных обкладок акселерометра [3, 4].

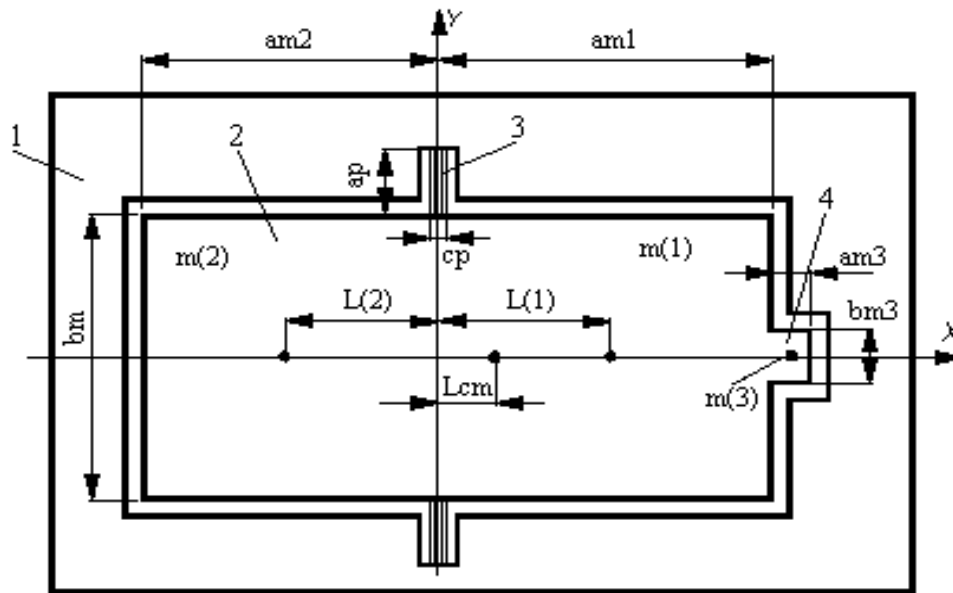


Рис. 1. Маятниковая конструкция акселерометра:
 1 – неподвижная обкладка акселерометра; 2 – маятник;
 3 – упругий подвес; 4 – ограничитель

Структурная схема измерительного устройства на базе рассматриваемой маятниковой конструкции представлена на рис. 2.

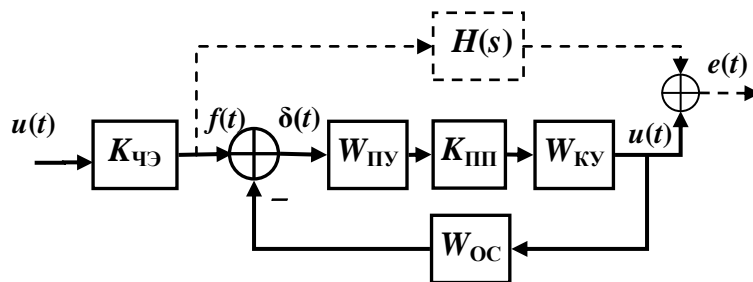


Рис. 2. Структурная схема датчика:
 $K_{чэ}$ - коэффициент передачи чувствительного элемента;
 $W_{пв}$ - передаточная функция подвижного узла (маятника);
 $K_{пп}$ - коэффициент передачи преобразователя перемещения;
 $W_{кв}$ - передаточная функция усилителя с корректирующим устройством;
 $K_{ос}$ - коэффициент передачи силового элемента обратной связи;
 $H(s)$ – идеальный оператор передачи измеряемого сигнала
 $e(t)$ - ошибка датчика

Общая передаточная функция согласно структурной схеме вычисляется в виде

$$W(s) = K_{чэ} \frac{W_{пв} K_{пп} W_{кв}}{1 + W_{пв} K_{пп} W_{кв} K_{ос}} \quad (6)$$

Основные передаточные функции структурной схемы рис. 2 вычисляются в соответствии с формулами:

$$W_{пв} = 1 / (Js^2 + K_{дy}s + G_y), \quad (7)$$

$$W_{кв} = T(1)s + T(2) + T(3)/s, \quad (8)$$

где J – момент инерции относительно оси вращения, $K_{дy}$ - коэффициент демпфирования от-

носителем оси Y , G_y - жесткость упругих подвесов относительно оси кручения Y , $T(1)$, $T(2)$, $T(3)$ – постоянные времени корректирующего устройства.

Основные математические модели интегрального маятника, преобразователя перемещения, силового элемента обратной связи используются в соответствии с теоретическими положениями работ [3, 4].

Здесь отметим только формулы для вычисления определяющих параметров маятника. Формула момента инерции маятника выведена в соответствии геометрией, приведенной на рис. 1.

$$J = (m_1/3 + m_3) a_{m1}^2 + m_2 a_{m2}^2/3 + m_3 a_{m3}^2/3. \quad (9)$$

Расстояние до центра масс маятника определяется в соответствии с законами теоретической механики по формуле

$$L_{cm} = \sum(L_i \cdot m_i) / M, \quad (10)$$

где $M = \sum m_i$ – полная масса маятника.

Методика расчета основных характеристик акселерометра

В структурной схеме датчика (см. рис. 2) для улучшения динамических свойств предусмотрено корректирующее устройство с передаточной функцией $W_{ку}$, соответствующей ПИД-регулятору (см. формулу (8)). Параметры КУ при этом рассчитываются в соответствии с критерием минимума СКО динамической ошибки на основе методики работы [1].

С целью расчета конструктивных параметров акселерометра и передаточных функций в программной среде *Matlab* разработана программа-функция $[Z, W_{пу}, W_{ку}, W] = dlu(P)$, входными данными которой является вектор параметров P (маятника, КУ, конструкции):

$$P = [am(1), am(2), bm, am(3), bm(3), ct, ap, cp, h, K_{ус}, T(1), T(2), T(3), U_{оп}],$$

где, дополнительно к параметрам конструкции рис. 1, обозначено: $K_{ус}$ – коэффициент усилителя мощности, $U_{оп}$ – опорное напряжение.

Выходными параметрами программы-функции являются передаточные функции: $W_{пу}$ – подвижного узла; $W_{ку}$ – корректирующего устройства; W – акселерометра и вектор расчетных параметров акселерометра

$$Z = [M, L_{цм}, J, G_y, K_{до}, K_{чэ}, K_{ос}, K_{пп}, K, T],$$

где M – масса маятника; $L_{цм}$ – расстояние до центра масс маятника; J – момент инерции относительно оси вращения; $K_{до}$ - коэффициент демпфирования относительно оси Y ; G_y - жесткость упругих подвесов относительно оси кручения; $K_{чэ}$ - коэффициент передачи чувствительного элемента; $K_{ос}$ - коэффициент обратной связи; $K_{пп}$ - коэффициент первичного преобразователя; $T = [T(1), T(2), T(3)]$ – вектор постоянных времени КУ.

Текст программы-функции $dlu(P)$ на языке *Matlab* составлен в соответствии с теоретическими формулами механики (в частности формулы (9), (10)), формулами для расчета коэффициента чувствительного элемента, первичного преобразователя, датчика обратной связи [3, 4], формулами для вычисления передаточных функций (7), (8).

Использование программы-функции $dlu(P)$ осуществляется путем предварительного задания входных данных – вектора параметров P с последующим ее вызовом из управляющей программы *control_dlu*:

```
am(1)=3.7e-3; am(2)=3.3e-3; am(3)=1e-5; % длина частей маятника
bm=3.5e-3; bm(3)=1e-5; % ширина частей маятника
ct=1e-4; % толщина маятника
ap=2e-4; % длина упругого подвеса
cp=1e-5; % max и min толщина упругого подвеса
h=1.0277e-5; % зазор между маятником и неподвижной обкладкой
Kус=2; % коэффициент усилителя мощности
Uоп=5; % опорное напряжение
```

$P=[am(1),am(2),bm, am(3),bm(3),cm,ap,cp,h,Kyc,T(1),T(2),T(3),Uоп]$; % вектор параметров
 $[Z,Wпу,Wку,W]=dлу(P)$; % вызов программы-функции.

Для расчета параметра $am1$, определяющего диапазон измерения датчика, сначала определяется коэффициент передачи датчика K (5), соответствующий диапазону измерения и, учитывая коэффициент влияния $am1$ на K , определяется численное значение $am1$ (параметр $am2$ связан с $am1$ соотношением: $am2=7e-3 - am1$).

Пример. Для исходных данных датчика при диапазоне измерения $\pm 1g$ определены параметры КУ по методике работы [1]: коэффициент передачи КУ: $K_{КУ} = 1 \cdot 10^7$; постоянные времени: $T_1 = 0,0024$; $T_2=155$; $T_3= 27,596$. При использовании программы-функции $dлу$ рассчитаны все параметры акселерометра (основные параметры приведены в табл. 1).

Таблица 1

Основные параметры акселерометра для диапазона $\pm 1g$

Параметр	$m(1),$ $m(2),$ $m(3),$ Кг	$L(1),$ $L(2),$ $L(3),$ М	$M,$ Кг	$L_{цм},$ М	$K_{ду}$	J	G_y	T_1, T_2, T_3
Значение	$3.0247 \cdot 10^{-5}$ $2.6789 \cdot 10^{-5}$ $2.328 \cdot 10^{-10}$	0.0019 -0.0016 0.0037	$5.70 \cdot 10^{-5}$	$2.272 \cdot 10^{-4}$	$2.038 \cdot 10^{-9}$	$2.41 \cdot 10^{-10}$	$2.76 \cdot 10^{-6}$	0,0024 0,0204 27,6
Параметр	$K_{КУ}$	$h,$ М	$K_{пп}$	$\omega_0,$ рад/с	$K_{чэ}$	$K_{ос}$	$t_{пш},$ с	
Значение	$1.0 \cdot 10^{+7}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$5.0 \cdot 10^{+5}$	$1,27 \cdot 10^5$	$1.296 \cdot 10^{-8}$	$2.541 \cdot 10^{-8}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$	

Соответствующие полученным параметрам передаточные функции имеют следующий вид:

– передаточная функция подвижного узла:

$$1$$

$W_{пу} = \frac{1}{2.358e-10 s^2 + 1.687e-5 s + 2.76e-6}$;

– передаточная функция корректирующего устройства:

$$0.0024 s^2 + 168.7 s + 27.6$$

$W_{ку} = \frac{0.0024 s^2 + 168.7 s + 27.6}{s}$;

– полная передаточная функция датчика:

$$3.11e-5 s^2 + 2.186 s + 0.3576$$

$W = \frac{3.11e-5 s^2 + 2.186 s + 0.3576}{2.358e-10 s^3 + 7.786e-5 s^2 + 4.287 s + 0.7013}$.

Далее, решая задачу обоснования требований к параметрам акселерометра, необходимо определить коэффициенты чувствительности параметров (вектора параметров P), на основной показатель качества – крутизну статической характеристики K .

Для этого на основе метода статистического моделирования составлена управляющая программа $dлу_kj.m$, текст которой представлен далее:

% Блок исходных данных

$Ao=7e-3; g=9.80665; am(1)=3.727174e-3; am(2)=Ao-am(1); am(3)=1e-5;$
 $bm=3.5e-3; bm(3)=1e-5; cm=1e-3; ap=2e-4; cp=1e-5; mu=17.9e-6; h=1e-5; Kyc=2e0;$
 $Kyc=2; Uоп=5; K0=5.0985811e-1; T(1)=0.0024; T(2)=168.6865; T(3)=27.596;$

% Вычисление $Ko(k)$ – крутизны при вариации $s(k)$ j -го параметра
 $j=1;$

$while j<15$

$P=[am(1),am(2),bm,am(3),bm(3),cm,ap,cp,h,Kyc,T(1),T(2),T(3),Uоп]$; % обновление вектора параметров
 $an(j)=P(j); k=1;$

```

while k<50
P(j)=0.5*an(j)+an(j)*rand(1,1); % вариация j-го параметра
[Z,Wпу,Wку,W,K]=dlu_kj_fcn(P); % вычисление параметров акселерометра
Ko(k)=K; s(k)=P(j); % запоминание K и j-го параметра в массив
k=k+1;
end
-----
% Расчет коэффициентов влияния и допусков параметров
K=sum(Ko)/length(Ko); % среднее значение крутизны
b(j)=sum(s)/length(Ko); % среднее значение j-го параметра
e=Ko-K; e1=s-b(j);
CKO(j)=sum(e.*e)/length(e); % среднееквадратическое значение крутизны
CKOj(j)=sum(e1.*e1)/length(e1); % среднееквадратическое значение j-го параметра
kj(j)=abs((CKO(j)/K)/(CKOj(j)/b(j))); % коэффициент влияния j-го параметра
delt(j)=0.001*Uоп/kj(j); % допустимое отклонение j-го параметра
j=j+1
end

```

Эта программа вызывает подпрограмму-функцию $dlu_kj_fcn(P)$, предназначенную для расчета параметров акселерометра и построенную аналогично $dlu(P)$.

При использовании $dlu_kj.m$ по формуле (1) найдены коэффициенты чувствительности (коэффициенты влияния) параметров f_i ДПИ на выходную характеристику K . Результаты - коэффициенты влияния k_j и допуски δ_j параметров сведены в табл. 2, также в табл. 2 представлены исходные данные по номинальным значениям параметров f_i и их среднееквадратическим отклонениям σ_{fi} .

Таблица 2

Коэффициенты чувствительности k_i и допуски δ_i параметров

Параметр f_i	Статистический номинал f_i	σ_{fi}	σ_K	$k_i=dK/df_i$	δ_i
$P(1)=am(1)$	$3.67e-3$	$1.14e-6$	$1.33e+0$	$1.66e+4$	$3.011e-7$
$P(2)=am(2)$	$3.28e-3$	$8.47e-7$	$1.00e+0$	$2.59e+3$	$1.93e-6$
$P(3)=bm$	$3.57e-3$	$1.015e-6$	$1.31e-10$	$2.92e-7$	$1.7e+4$
$P(4)=am(3)$	$1.0e-5$	$8.34e-12$	$5.24e-11$	$3.98e-5$	$1.3e+2$
$P(5)=bm3$	$1.0e-5$	$8.53e-12$	$4.39e-11$	$3.29e-5$	$1.5e+2$
$P(6)=cm$	$1.02e-3$	$7.83e-8$	$1.95e-1$	$1.58e+3$	$3.17e-5$
$P(7)=ap$	$2.02e-4$	$3.41e-9$	$1.77e-28$	$8.21e-24$	$6.1e+20$
$P(8)=cp$	$9.96e-6$	$8.63e-12$	$1.77e-28$	$1.59e-22$	$3.1e+19$
$P(9)=h$	$1.005e-5$	$8.3e-12$	$5.55e-1$	$4.78e+5$	$1.05e-8$
$P(10)=Kyc$	$1.96e+0$	$3.18e-1$	$3.59e-29$	$3.23e-28$	$1.5e+25$
$P(11)=T(1)$	$2.36e-3$	$4.65e-7$	$3.59e-29$	$2.67e-25$	$1.9e+22$
$P(12)=T(2)$	$1.7e+2$	$2.39e+3$	$3.59e-29$	$3.74e-30$	$1.3e+27$
$P(13)=T(3)$	$2.76e+1$	$4.44e+1$	$3.59e-29$	$2.25e-29$	$2.2e+26$
$P(14)=Uop$	$4.98e+0$	$2.08e+0$	$3.46e-29$	$1.22e-28$	$4.1e+25$

Параметры с наибольшими коэффициентами влияния: $am(1)$, $am(2)$ - длина правой и левой части маятника; cm - толщина маятника; h - зазор между маятником и неподвижными обкладками акселерометра в таблице выделены жирным цветом. К отмеченным параметрам предъявляются достаточно серьезные требования: указанные линейные размеры $am(1)$, $am(2)$, cm должны выдерживаться практически с микронной точностью, а зазор h с точностью до сотых долей микрона. Изготовление элементов конструкции акселерометра с такими допусками вряд ли возможно, поэтому реальное значение крутизны статической характеристики при изготовлении будет отличаться от расчетного на величину больше чем 0,1 %.

Тем не менее, уровень 0,1 процентной ошибки крутизны K достигается калибровкой

акселерометра, например, за счет регулировки зазора. В этом случае сохранение 0,1 % ошибки показателя K практически сводится к стабильности параметров $am(1)$, $am(2)$, cm , h в процессе эксплуатации с указанными в табл. 2 допусками. Учитывая высокостабильные свойства конструкционного материала кремния, из которого изготавливается акселерометр, достижение ошибки статической характеристики на уровне 0,1 % и даже лучше вполне возможно.

Моделирование акселерометра в *Matlab Simulink*

С целью реального исследования работоспособности акселерометра и его параметров создана его модель в визуальной среде *Matlab Simulink* [5] при задании рассчитанных параметров.

Схема моделирования акселерометра в *Matlab Simulink* представлена на рис. 3. Схема предусматривает вычисление ошибки отработки входного скачкообразного сигнала структурой акселерометра. Причем при дальнейшей обработке массива ошибок, полученных в блоке e , рассчитывается экспериментальное значение среднего квадрата ошибки.

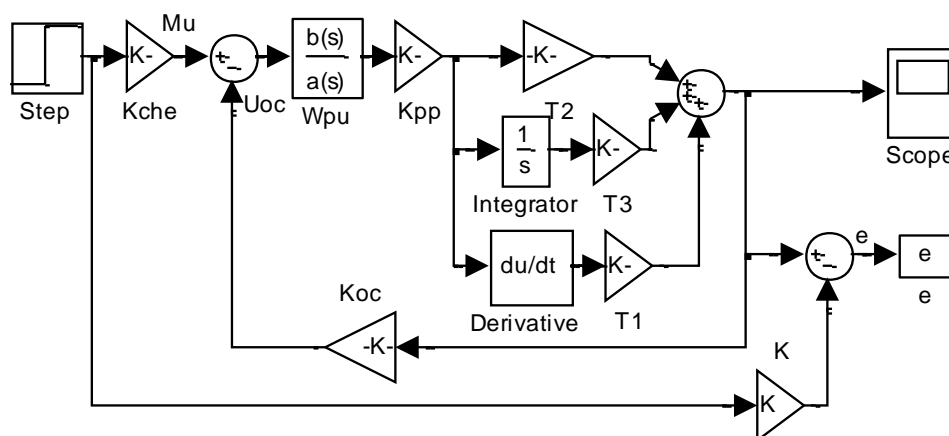


Рис. 3. Схема моделирования акселерометра в *Matlab Simulink*

Математическая модель МЭМС акселерометра успешно проверена при моделировании в *Matlab Simulink* для диапазона $\pm 1g$, что дает основание сделать заключение о реальной возможности создания датчика также на другие диапазоны измерения с минимальными статическими и динамическими ошибками.

Результаты моделирования по схеме 3 представлены в виде переходного процесса (см. график на рис. 4) при действии входного ускорения $1g$. Время переходного процесса получено на уровне 0,000004 с, что соответствует теоретической модели и что также подтверждает качественную работоспособность датчика.

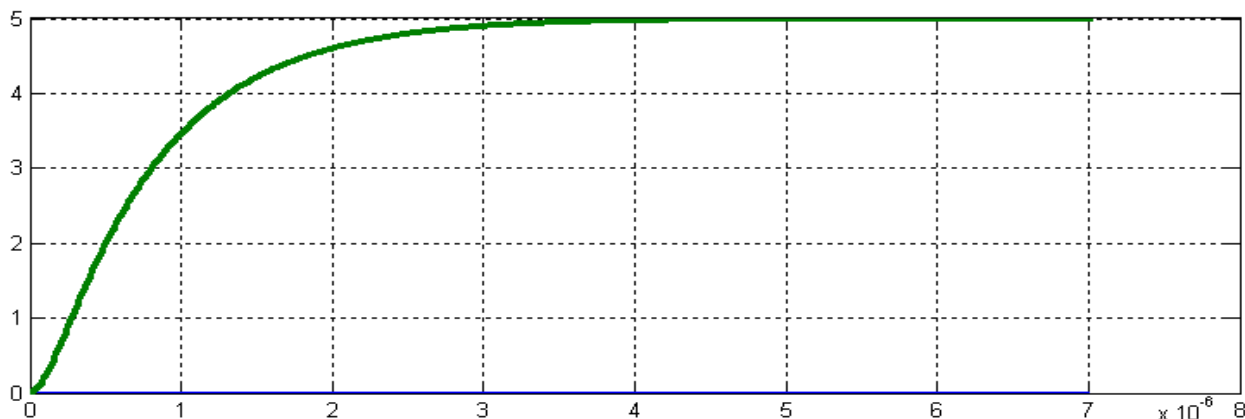


Рис. 4. Переходный процесс датчика

На основе моделирования по схеме 3 произведена оценка СКО, результаты которой для данного примера соответствуют минимальным значениям, отмеченным в [1]: СКО=0,000021.

Выводы

В качестве заключения по проведенным исследованиям можно отметить следующее:

- существует возможность уменьшения статических и динамических ошибок рассматриваемого акселерометра на основе заданных исходных данных, особенностей конструкции, с учетом практических возможностей и ограничений;
- необходимо отметить особенность создания МЭМС акселерометра для различных диапазонов измерения за счет использования изменения наиболее чувствительных параметров конструкции маятника (например, зазора между подвижной и неподвижной частью маятника и корпуса, смещения оси крепления упругих подвесов).

В данной работе выявлены параметры МЭМС маятникового компенсационного акселерометра, наиболее сильно влияющие на основной показатель качества акселерометра – крутизну статической характеристики, сформулированы требования к электромеханическим параметрам акселерометра по критерию статической точности, разработана методика расчета статических характеристик акселерометра для заданного диапазона измерений.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Оптимизация параметров микромеханического акселерометра / В.Д. Вавилов, В.Л. Волков, А.В. Улюшкин // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород. 2010. № 3. С. 308 – 314.
2. **Волкова, Н.В.** Исследование датчиков первичной информации методом статистических испытаний Монте-Карло // Приборостроение в аэрокосмической технике: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Арзамас, 1999. С. 24-28.
3. **Распопов, В.Я.** Микромеханические приборы: учеб. пособие / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
4. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учебник / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.
5. **Дьяконов, В.П.** *Simulink 5/6/7*: Самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс. 2008. – 784 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2011*

V.L. Volkov

MOTIVATION OF THE REQUIREMENTS TO PARAMETERS FOR ACCELEROMETER A MICROMECHANICAL

The Worded requirements to electromechanic parameter MEMS accelerometer on criterion of steady-state accuracy. The Revealed parameters, most powerfully influencing upon the leading index quality accelerometer - a steepness of the steady-state feature. The Designed methods of the calculation steady-state and dynamic features accelerometer for given a range of the measurements.

Key words: MEMS, accelerometer, steady-state feature, sensitivity, correcting device, average square of the mistake, tolerance of the parameter, accuracy, modeling.