

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

В.Д. Вавилов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОСИСТЕМНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ОТРАБОТКОЙ

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

Разработан интегральный компенсационный акселерометр с электростатической отрицательной обратной связью. Получены расчетные соотношения для микромеханической и электрической частей. Приведена программа оптимизации параметров акселерометра по переходному процессу.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы (МЭМС), критерий оптимальности, линеаризация характеристики, электростатический преобразователь силы.

Электростатическая отрицательная обратная связь может эффективно применяться как для линейных, так и для угловых акселерометров [1]. При этом тип ЧЭ может быть осевым или маятниковым, а упругий подвес может быть выполнен для работы на изгиб или кручение.

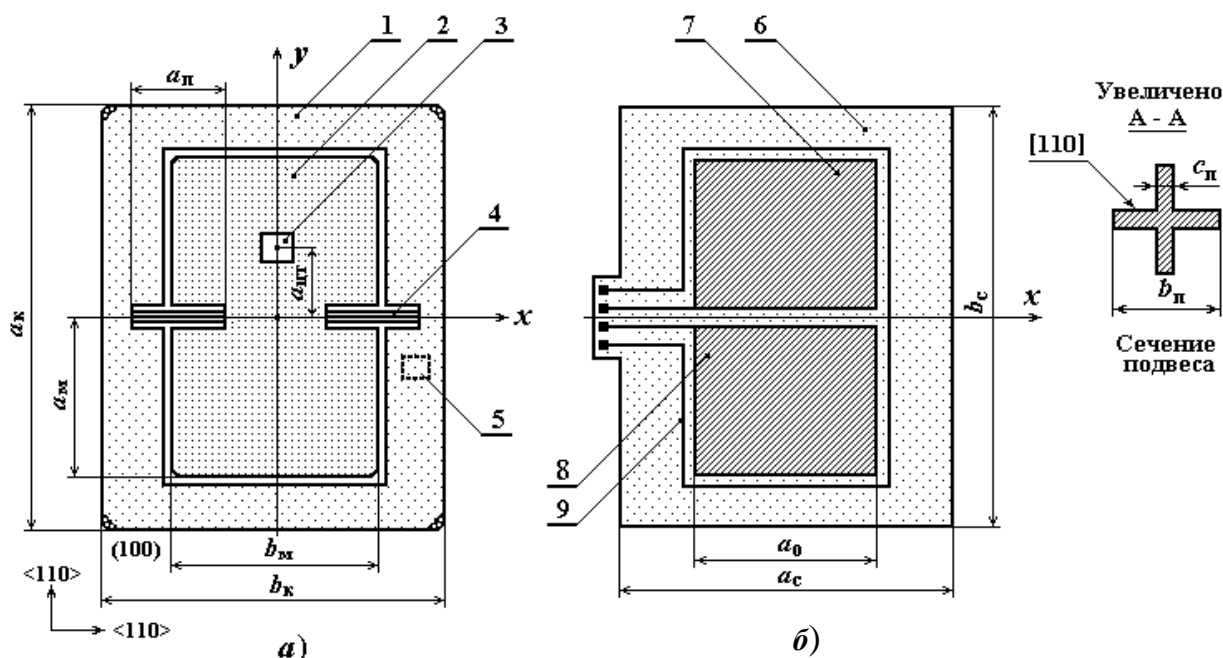


Рис. 1. Подвижный узел (а): 1 - корпусная кремниевая пластина; 2 - чувствительная масса (маятник), 3 - участок разбаланса массы маятника; 4 - упругий торсион; **Неподвижная пластина(б):** 5 - датчик температуры; 6 - стеклянная обкладка; 7 - неподвижный электрод датчика перемещений; 8 - неподвижный электрод силового датчика; 9 - охранный контур

Электростатические преобразователи силы (момента) обладают многими положительными свойствами, которых нет у других типов силовых преобразователей. Например, малые габаритные размеры и масса, повышенная точность преобразования и большая удельная сила делают силовые электростатические преобразователи силы вне всякой конкуренции.

Рассмотрим пример построения маятникового акселерометра, предназначенного для измерения линейных ускорений с использованием электростатического преобразователя момента. На рис. 1 приведены детали ЧЭ, состоящего из кремниевой корпусной пластины 1, в которой выполнен методом анизотропного травления проводящий маятник 2, Маятник является несимметричным относительно оси качания (оси x) за счет выполнения сквозного отверстия 3 в одной из его частей. Отверстие является разбалансом, посредством выбора его размеров задают диапазон измерений.

С корпусной пластиной маятник представляет единое целое и соединены между собой упругими подвесами-торсионами 4, которые в поперечном сечении представляют симметричный крест и работают на кручение. Проводящая корпусная пластина и соответственно выполненные в ней маятник соединены с общей шиной питания (землей). После размерного травления маятника поверхность его подвергают химической полировке и окислению с целью изоляции внешней поверхности от проводящего тела. На внешней поверхности маятника отсутствуют, какие либо надстройки или проводники соединений с другими узлами акселерометра. Все связи выполнены беспроводными.

На рис. 1, б приведена одна из стеклянных обкладок 5, на которой выполнены неподвижные электроды 6 емкостного преобразователя перемещений и неподвижные электроды 7 электростатического преобразователя момента. Между подвижным проводящим электродом, которым является маятник и неподвижными электродами образован зазор h . Неподвижные электроды выполнены на стеклянной обкладке 5 посредством металлизации и соединены с помощью контактных площадок и проводящих дорожек с электрической схемой акселерометра.

Одним из недостатков электростатического преобразователя момента является нелинейность его характеристики по напряжению. Соответственно разработан линеаризатор (рис. 2) с использованием резистивного сумматора и опорных напряжений.

Реализация демпфирования подвижного узла в компенсационном акселерометре с электромагнитной силовой обработкой возможна как с заполнением ЧЭ газом, например сухим азотом, так и в электрическом контуре для случая вакуумирования чувствительного элемента.

Работа акселерометра с электростатической силовой обработкой осуществляется следующим образом. В нейтральном состоянии маятник 2 находится в среднем положении между неподвижными электродами 7 емкостного датчика перемещений. На выходе устройства сигнал равен нулю. Поскольку электроды обработки питаются выходным напряжением, сила электростатического преобразователя равна нулю и никакого влияния на маятник 2 не происходит.

При действии ускорения возникает сила инерции, создающая момент, который отклоняет маятник. Этот момент определяется произведением силы инерции на плечо небаланса:

$$M_{ин} = m_{неб} a_{цт} j, \quad (1)$$

$m_{неб}$ - массы небаланса 3 (на рис. 1 это сквозное отверстие); j - действующее ускорение.

Угол отклонения маятника является пропорциональным действующему ускорению. Соответственно выходной сигнал является также пропорциональным углу отклонения маятника и поступает на проводники обработки 7. Возникающая электростатическая сила $F_{эл}$ имеет противоположное направление, по сравнению с направлением силы инерции, и определяется в следующем виде:

$$M_{эл} = \frac{\epsilon_0 \epsilon U_{оп} U_{вых} F a_{цт}}{h^2}, \tag{2}$$

$\epsilon_0 = 8.85418782e-12$ Кл/(В·м) - диэлектрическая постоянная; ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость для материала находящегося между электродами; $U_{оп}$ - опорное напряжение; F - площадь электрода; $a_{цт}$ - длина маятника от центра тяжести до оси качения.

Сила электростатического преобразователя задается нагрузочным резистором и напряжением источника опорного напряжения, которое в основном влияет на точность задаваемого тока. Поскольку сила тока в подвижном проводнике является величиной постоянной $I = U_{оп}/R_H = const$, то этим осуществлена линеаризация выходной характеристики акселерометра. Сила тока во втором проводнике задается нагрузочным резистором и выходным напряжением. Величина ускорения, которое может отработать устройство с электростатическим датчиком момента, определяется следующим соотношением:

$$j = \frac{\epsilon_0 \epsilon U_{оп} U_{вых} F a_{цт}}{m_{неб} h^2}. \tag{3}$$

При конструктивных размерах $a_M = b_M = 2,5...4 \cdot 10^{-3}$ м, $c_M = 2...4 \cdot 10^{-4}$ м, для диапазона 100 г требуется выполнить зазор между электродами порядка $h = 10 \cdot 10^{-6}$ м, что вполне приемлемо для реализации при современном технологическом уровне. Вторые концы всех электродов на маятнике должны быть соединены с проводящим телом маятника и подключены к общему контакту источников опорного напряжения.

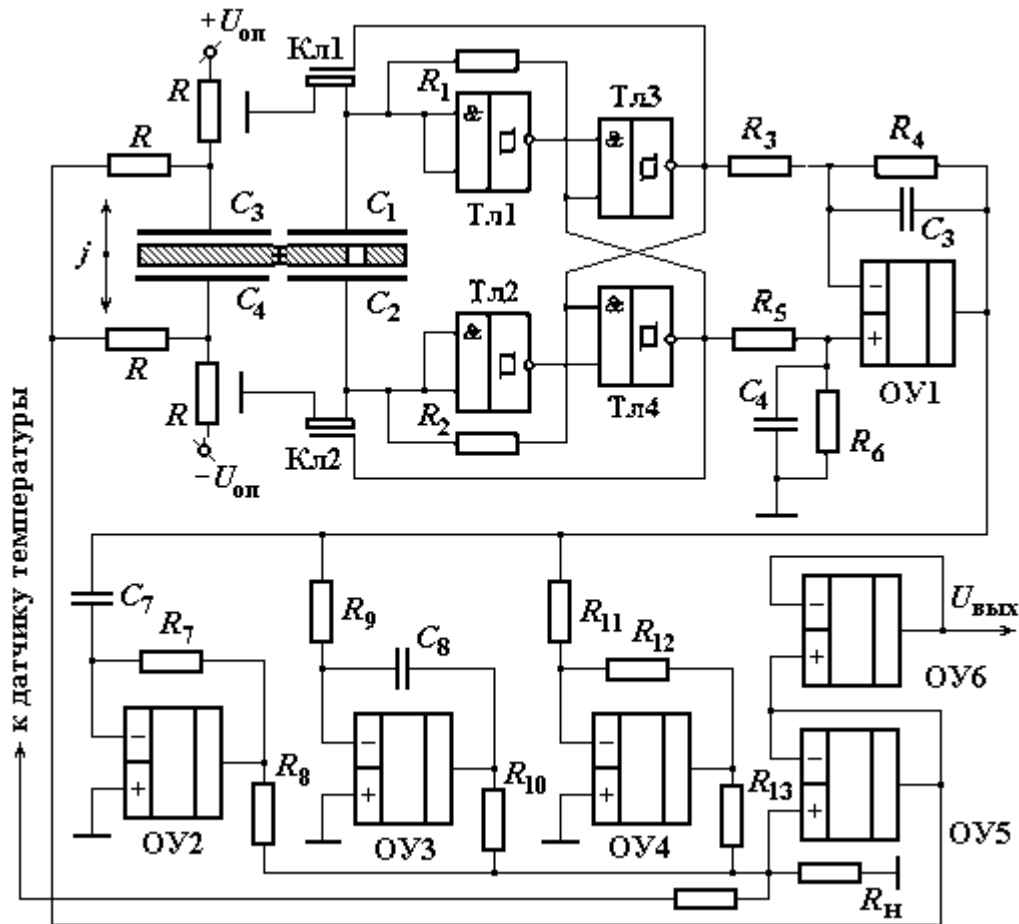


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема акселерометра

Электрод 8, размещенный вдоль всех кромок стеклянной крышки, является охраняемым. Маятник линейного акселерометра отличается от маятника углового акселерометра наличием разбаланса, выполненного в виде локального сквозного травления или применения дополнительных пластин на одном из плеч маятника. Вторая стеклянная крышка, расположенная с другой стороны кремниевой пластины, является аналогичной первой.

Передаточная функция подвижного узла, а также математические соотношения для расчета ее коэффициентов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Функциональное звено	Передаточная функция	Параметры
Чувствительный элемент	$K_{чэ} = m_0 a_{цг}$	$m_0 = \gamma_m a_0 b_0 c_0$
Момент инерции маятника	$J_x = m(4a_m^2/3 + c_m^2/12) - m_0(a_0^2/3 + c_0^2/12 + a_{цг}^2)$	$m = \gamma_m a_m b_m c_m$
Подвижный узел	$W_{пу}(s) = 1 / \left(J_x s^2 + K_{ду} s + G_{кр} \right)$	
Коэффициент демпфирования	$K_{ду} = \mu a_m^6 / (4h^3)$	μ - вязкость газа
Механическая жесткость подвеса	$G_{кр} = \frac{E_{[100]} b_{п} c_{п}^3}{96(1 + \gamma) a_{п}}$	$G_{кр}$ - жесткость на кручение
Датчик перемещений и электронный блок	$W_{yc} = \frac{U_{оп} a_{цг} K_{yc}}{h (1 + \tau_s)}$	$U_{оп} = U_{ст}$ $K_{yc} = R_4/R_3 = R_5/R_6$
Корректирующее устройство	$W_{кор}(s) = \alpha_1 + \alpha_2 s + \frac{1}{\alpha_3 s}$	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - параметры корректирующего устройства
Датчик момента	$K_{ос} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon U_{оп} F a_{цг}}{h^2}$	$\varepsilon = 1$ - относительная диэлектрическая проницаемость азота
Идеальный оператор	$H(s)$	$e(t)$ - погрешность акселерометра

Электрическая схема акселерометра (рис. 2) включает в свой состав следующие узлы: подвижные и неподвижные электроды емкостного преобразователя перемещений с повторителем (ОУ1); электрические цепи корректирующего устройства; усилитель мощности, он же апериодический фильтр нижних частот; силовые электроды обратной связи (C_3 и C_4); резисторы нагрузки R_n и источники опорного напряжения ($\pm U_{оп}$). В схеме применен встроенный датчик температуры. Принципиально схема электростатического акселерометра идентична с магнитоэлектрическим. Вся разница этих двух акселерометров в физической основе и параметрах их звеньев обратной связи.

Известно, что для маятникового акселерометра, наиболее эффективным корректирующим устройством является устройство по принципу ПИД-регулятора [2]. И тогда передаточная функция корректирующего устройства может быть записана в следующем виде:

$$W_{кор}(s) = \alpha_1 + \alpha_2 s + \frac{1}{\alpha_3 s}, \tag{4}$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - постоянные времени звеньев: пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего. Алгоритм и компьютерная программа расчета постоянных времени ПИД-

регулятора посредством оптимизации переходного процесса приведены в приложении. Структурная схема датчика с ПИД-регулятором не зависит от типа звена обратной связи и для всех компенсационных акселерометров приведена на рис. 3.

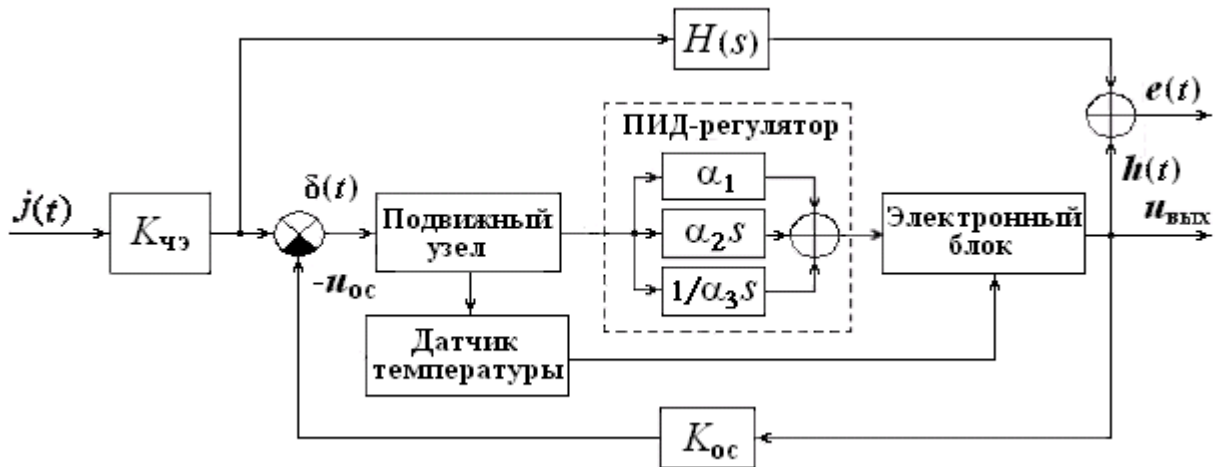


Рис. 3. Структурная схема датчика с ПИД регулятором

Измеряемая величина при наличии ПИД-регулятора будет отработана пропорциональной составляющей обратной связи, а ошибка стабилизируется на значении, близком к нулю. Выходной же сигнал будет полностью обеспечивать интегральная составляющая регулятора. Дифференциальная составляющая противодействует предполагаемым отклонениям регулируемой величины, которые могут произойти в будущем. Эти отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему. Чем быстрее регулируемая величина отклоняется от измеряемого значения, тем сильнее противодействие, создаваемое дифференциальной составляющей. Математические описания узлов электрической схемы, а также формулы для расчетов параметров приведены в табл. 1.

Пользуясь структурной схемой и типовой методикой описания управляемых технических систем с отрицательной обратной связью, полную передаточную функцию акселерометра в замкнутом контуре, с учетом передаточных функций отдельных звеньев и принципиальной электрической схемы (рис. 2) можно получить в следующем виде:

$$W_{\text{акс}}(s) = \frac{K(\beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0)}{\alpha_4 s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}, \quad (5)$$

где

$$K = K_{\text{чэ}} K_{\text{мп}} K_{\text{yc}}, \alpha_4 = J\tau; \alpha_3 = K_{\text{дy}} T\tau + J\tau; \alpha_2 = GT\tau + K_{\text{дy}} T + \alpha_0 T^2; \\ \alpha_1 = (G_y + \alpha_0) T; \alpha_0 = K_{\text{ос}} K_{\text{мп}} K_{\text{yc}}; \beta_2 = T^2; \beta_1 = T, \beta_0 = 1.$$

Таким образом, с учетом соотношений для параметров полная передаточная функция компенсационного акселерометра с электростатической обратной связью и с ПИД-регулятором в прямой цепи идентична с передаточной функцией акселерометра с магнитоэлектрической обратной связью. Из (5) видно, что все коэффициенты передаточной функции однозначно определяются через конструктивные и физические параметры акселерометра.

Ввиду малости зазоров, требуемых для обеспечения достаточной силы отработки, в варианте с заполнением, как правило, имеет место передемпфирование. При вакуумировании ЧЭ абсолютный коэффициент демпфирования $K_{\text{д}}$ значительно снижается, поскольку в нем остается только гистерезисная составляющая. Физически коэффициент $K_{\text{дy}}$ никогда не равен

нулю, так как в подвесе маятника имеет место внутреннее трение. При этом из (5) следует, что постоянную времени τ необходимо увеличивать.

Приложение. Компьютерная программа для моделирования характеристик микросистемного акселерометра с электростатической обработкой.

```

function [Wopt,K,CKO]=CKO(x,y,z);
% transmission function of the detector element

clc
% Accelerometr with feedback:
% density of silicon
rho=2328;
gamma=0.27
% The module of elasticity of silicon (100)
E100=1.295e11;
% acceleration of gravitation
g=9.80665;
% length and width of a pendulum
am=3.5e-3; bm=3.5e-3; cm=1e-3;
am0=1e-4; bm0=1e-4;
m=rho*am*bm*cm;
m0=rho*am0*bm0*cm;
% length elastic springs
ap=15e-4;
bp=5e-4;
% the maximal and minimal thickness of an
elastic spring
cp=1e-5;
% length of a shoulder of a pendulum
act=am/2;
% viscosity of nitrogen
% mu=17.9e-6;
mu=0;
% weight of a pendulum
% the moment of inertia of a pendulum
J=m*((4*am^2)/3+(cm^2)/12)-m0*((am0^2)/3+
+(cm^2)/12+act^2)
% number of springs
k=2;
% angular rigidity
Gkr=k*E100*bp*cp^3/(96*(1+gamma)*ap)
% Gy=k*(5*(sqrt(3))*E100*cp^4)/(32*(1+gamma)*ap)
h=15e-6;
% axial factor of attenuation
Kd=mu*(am*bm)^2/h^3;
% angular factor of attenuation
Kdy=Kd*act^2;
% factor of transfer of a sensitive element
Kche=m0*act;
% basic voltage
Uop=5;
eps0=8.85418782e-12;

T=(J/Gkr)^(1/2)
tau=0.00000005
x
y
z
b0=x
b1=y
b2=z
a0=N*x
a1=Gkr+N*y
a2=Kdy+Gkr*tau+N*z
a3=J+Kdy*tau
a4=J*tau
% The closed transfer function
W=tf(M*[b2 b1 b0],[a4 a3 a2 a1 a0])
% Not closed transfer function
% R=W/(1-W)
K=dcgain(W)
% damp(W/K)
otn=N/Gkr
% figure(1)
% bode(R/K),grid
% figure(2)
% step(W/K),grid
% figure(3)
% nyquist(R/K),grid
jmax=Koc*Uop/(m0*act*g)
Umax=(Kche*g/Koc)*jmax
polosa=sqrt(Gkr/J)
Wopt=minreal(W);
% вычисление CKO
dt=.00001;
t=[0:dt:2]';
u=1-dirac(t+1e-15);
h=lsim(Wopt/K,u,t);
CKO=dt*sum((h-u).^2)
clear
k=1;
rand('seed',0);
xn=1000; yn=1; zn=0.005;
CKOmax=1e15;
while k<200
x0=xn*(1+rand(1,1));
y0=yn*(1+rand(1,1));
z0=zn*(1+rand(1,1));
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(x0,y0,z0);
if CKO<CKOmax

```

```

epsazota=1;
F=am*bm;
%Factor of transfer of a link of a feedback
Koc=2*eps0*epsazota*Uop*F*Xc/(h^2);
%Factor of transfer of a link of a feedback
Koc=2*mi*Uop*act*avit*n/(pi*Rn^2*h)
Kyc=2
%Factor of transfer of the gauge of a corner
Kpp=Uop*Q/h;
M=Kche*Kpp*Kyc
N=Koc*Kpp*Kyc
CKOmax=CKO;
x=x0; y=y0; z=z0;
end
k=k+1;
end
clc
x
y
z
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(x,y,z)
step(Wopt/K),grid

```

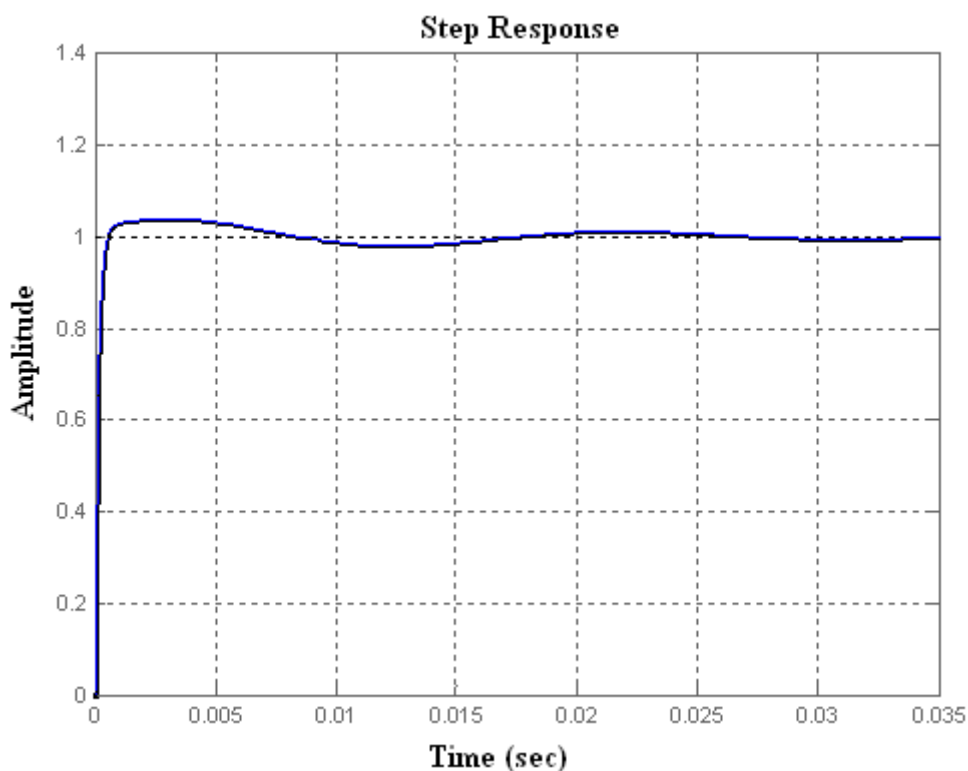


Рис. 4. Переходный процесс микросистемного акселерометра с электростатической обработкой

Оптимизация характеристик микросистемного акселерометра осуществлялась с помощью метода Монте-Карло, заключающегося в переборе случайных вариантов постоянных времени звеньев ПИД-регулятора α_1 , α_2 , α_3 - приближающих искомым переходный процесс к прямоугольной ступеньке [3]. Критерием выбора постоянных времени является минимум СКО.

Выводы

1. Разработана математическая модель и компьютерная программа для моделирования характеристик микросистемного акселерометра с электростатической обработкой.
2. Исследования на модели показали, что электростатические преобразователи силы (момента) обладают многими положительными свойствами, которых нет у других типов силовых преобразователей. Например, малые габаритные размеры и масса, повышенная точ-

ность преобразования и большая удельная сила делают электростатические преобразователи вне всякой конкуренции.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учеб пособие / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород., 2003. – 504 с.
2. **Вавилов, В.Д.** Компьютерное моделирование характеристик микросистемных датчиков: учеб. пособие / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н.Новгород, 2007. – 80 с.
3. **Вавилов, В.Д.** Теоретические основы микросистемных акселерометров и гироскопов: учеб. пособие / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2011. – 204 с.

*Дата поступления
в редакцию 24.06.2011*

V.D. Vavilov

MATHEMATICAL MODEL INTEGRAL AKSELEROMETRE WITH ELECTROMAGNETIC WORKS

It was designed integral compensation accelerometer with electrostatic by negative feedback. Accounting correlations are Received for mikromechanic and electric parts. Broughted program optimums parameter accelerometers on connecting process

Key words: mikroelectromechanic of the system (MEMS), criterion optimums, linearization of the feature, electrostatic converter of power.