

УДК 531.768.082.14

В.Д. Вавилов, А.В. Улюшкин

НАСТРОЙКА КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В КОНТУРЕ МИКРОДАТЧИКА

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

Рассмотрен принцип применения электронных ПИД-контроллеров в контурах регулирования микродатчиков и показана их эффективность для получения оптимальных характеристик. Приведен практический пример моделирования характеристик для компенсационного акселерометра с электростатической обработкой.

Ключевые слова: микроакселерометр, маятник, ПИД-контроллер, демпфирование, широтно-импульсная модуляция (ШИМ)

Рассмотрим корректирование динамических характеристик микродатчиков на примере линейного акселерометра. Состоит акселерометр из четырех основных узлов: корпуса (рис. 1), чувствительного элемента (рис. 2), электронного блока [1] и корректирующего устройства (рис. 3).

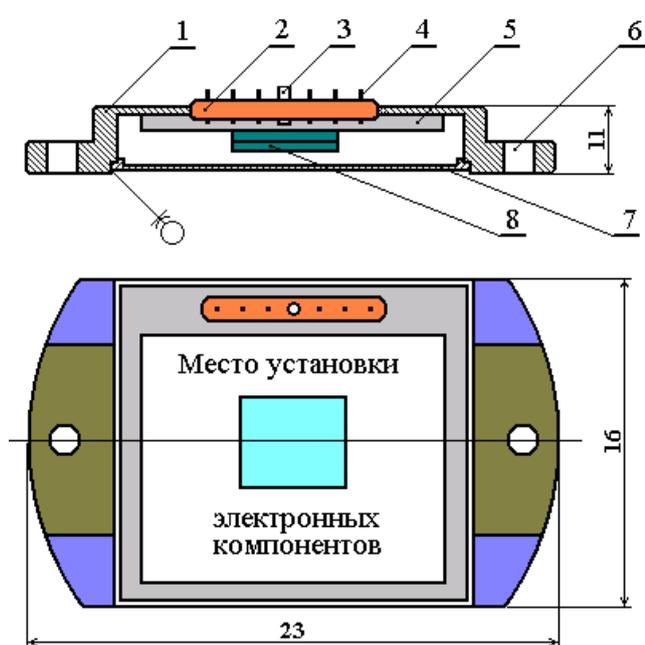


Рис. 1. Общий вид микросистемного акселерометра:

1 – корпус; 2 – гребенка выводов; 3 – трубка для вакуумирования; 4 – гермовывод; 5 – ситалловая подложка; 6 – отверстие для крепления на объекте; 7 – крышка; 8 – чувствительный элемент и электронный блок

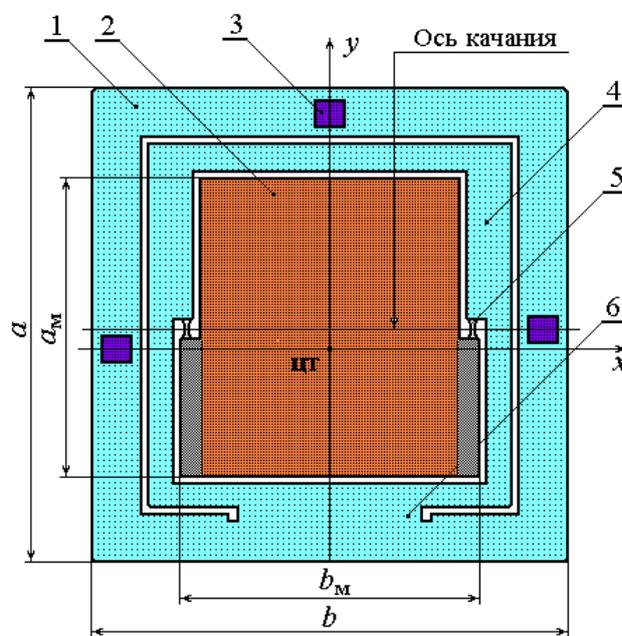


Рис. 2. Маятниковый ЧЭ акселерометра, выполненный на консоли:

1 – несущая пластина; 2 – тело маятника; 3 – точка соединения несущей пластины с основанием; 4 – жесткая рамка; 5 – упругий подвес; 6 – консоль

Краткие описания отмеченных механических узлов приведены в подрисуночных подписях. Электронный блок включается в прямой цепи контура регулирования акселерометра и имеет на выходе аналоговый ПИД-контроллер, который и является корректирующим устройством. Емкостный преобразователь перемещения выполнен по принципу ШИМ и имеет в

своем составе фильтр нижних частот на ОУ2. Описывается блок без ПИД-контроллера аperiodическим звеном первого порядка. Собственно схема ПИД-контроллера выполнена на пяти операционных усилителях ОУ3-ОУ7 и содержит следующие функциональные устройства. Схема на ОУ3 представляет дифференцирующий каскад и предназначена для организации скоростного демпфирования с помощью электрического контура. На ОУ4 выполнен интегратор для организации астатического режима работы акселерометра, повышающего точность в статике. На ОУ5 формируется пропорциональная составляющая регулятора. Схема на ОУ6 суммирует пропорциональную, дифференциальную и интегральную части сигнала, управляющего маятником.

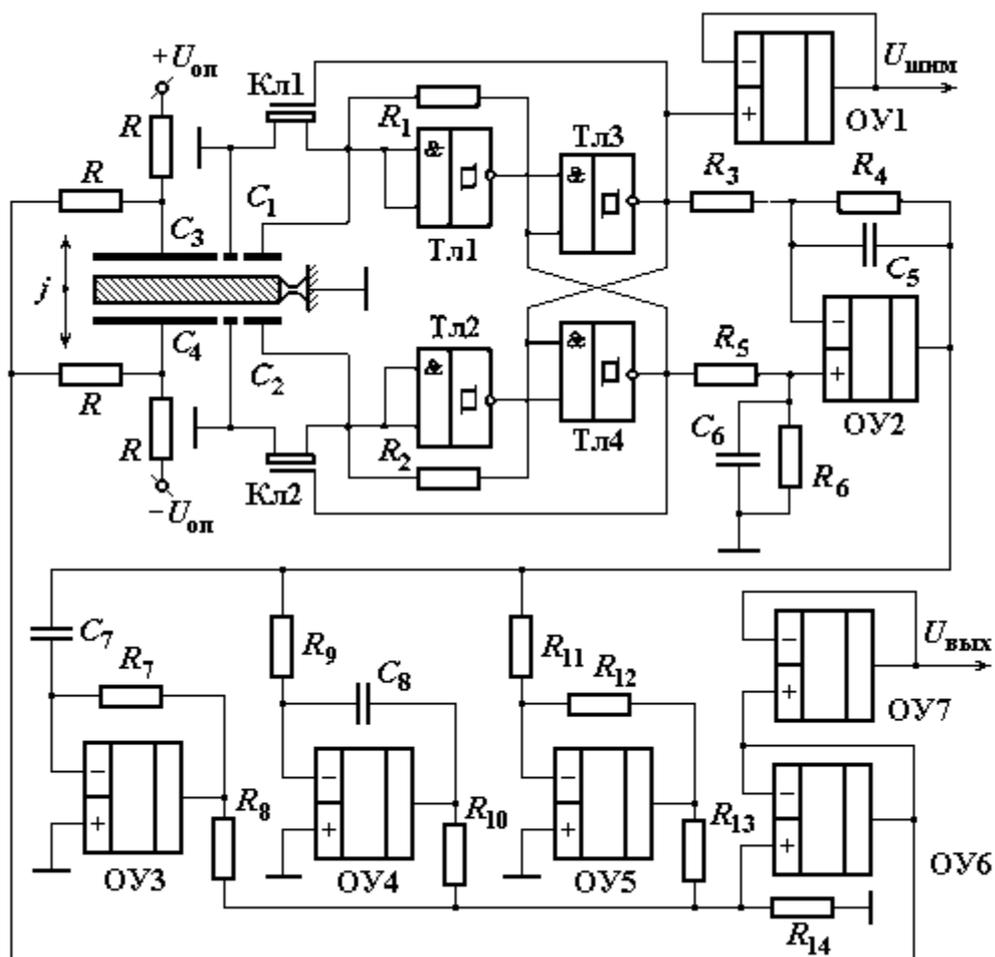


Рис. 3. Принципиальная схема акселерометра с электростатической силовой обработкой

Измеряемая величина при наличии ПИД-контроллера 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 больше скорость отклонения регулируемой величины от измеряемого значения, тем сильнее противодействие, создаваемое дифференциальной составляющей. Это есть скоростной принцип демпфирования подвижных узлов, аналогичный вязкостному демпфированию. Таким образом, вязкий газ в камере маятника исключается, а выполнение функций демпфирования возлагается на электронный ПИД-контроллер. Принципиальная электрическая схема акселерометра приведена на рис. 3, а на рис. 4 – его структурная схема.

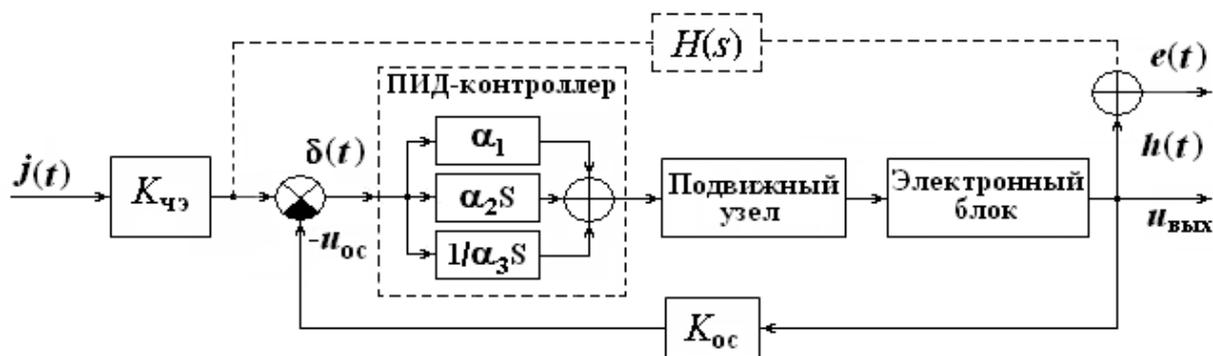


Рис. 4. Структурная схема микроакселерометра с ПИД-контроллером

Конкретные математические описания звеньев структурной схемы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Математическое описание звеньев структурной схемы

Функциональное звено	Передаточная функция	Параметры
Чувствительный элемент	$K_{чз} = mx_c$	$m = \gamma_M a_M c_M (b_{M1} - b_{M2})$
Момент инерции маятника	$J_z = (m_1 + m_2) \times$ $\times [a_M^2/3 + c_M^2/12 + a_{п}^2/4 - x_c(a_{п} - x_c)]$ $+ (m_1 - m_2)a_M(a_{п}/2 - x_c)$	$m_1 = \gamma_M a_M b_{M1} c_M,$ $m_2 = \gamma_M a_M b_{M2} c_M$
Координата центра тяжести	$x_c = \frac{b_{M1}(a_M + a_{п}) + b_{M2}(a_M - a_{п})}{2(b_{M1} + b_{M2})}$	
Подвижный узел	$W_{пу}(s) = 1 / (J_z s^2 + K_{дy} s + G_y)$	
Коэффициент демпфирования	$K_{дy} = \mu a_M^6 / (4h^3)$	μ - вязкость газа
Механическая жесткость подвеса	$G_y = \frac{E_{[100]} b_{п} c_{п}^3}{16a_{п}}, G_{кр} = \frac{5\sqrt{3} E_{[100]} c_{п}^3}{32(1 + \gamma) a_{п}}$	G_y - жесткость на изгиб, $G_{кр}$ - жесткость на кручение
Датчик перемещений и электронный блок	$W_{yc} = \frac{U_{оп} x_c}{h} \frac{K_{yc}}{1 + \tau s}$	$U_{оп} = U_{ст}$ $K_{yc} = R_4/R_3 = R_5/R_6$
ПИД-контроллер	$W_{кор}(s) = x + ys + \frac{1}{zs}$	x, y, z - коэффициенты настройки ПИД-контроллера
Датчик момента	$K_{ос} = 2\epsilon\epsilon_0 U_{оп} l_{ц} F / h^2$	$F = a_M b_{M2}$

Таким образом, с учетом структурной схемы и соотношений табл. 1 полная передаточная функция компенсационного акселерометра с электростатической обратной связью и с ПИД-контроллером в прямой цепи контура регулирования будет иметь вид

$$W_{акс}(s) = \frac{K(\beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0)}{\alpha_4 s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}, \quad (1)$$

где

$$K = K_{чз} K_{пп} K_{yc}, \alpha_4 = Jz\tau; \alpha_3 = K_{дy} z\tau + Jz; \alpha_2 = Gxz\tau + K_{дy} z + K_{ос} K_{пп} K_{yc} yz;$$

$$\alpha_1 = (G_y + K_{ос} K_{пп} K_{yc})z; \alpha_0 = K_{ос} K_{пп} K_{yc}; \beta_2 = yz; \beta_1 = xz; \beta_0 = 1.$$

Настроить ПИД-контроллер – это значит определить его неизвестные коэффициенты x , y , z на оптимальный режим микроакселерометра, например, на оптимальный переходный процесс. В данном случае определение неизвестных коэффициентов осуществлялось методом Монте-Карло [2], заключающимся в переборе случайных чисел для x , y , z и подстановке их в аналитическое выражение для переходного процесса, записанного по передаточной функции (1). Далее идет сравнение с оптимальным переходным процессом, в качестве которого взята нарастающая единичная ступенька. Начальные значения и число итераций задается в программе в зависимости от требуемой точности. После каждого сравнения вычисляется минимум среднеквадратического отклонения (СКО) искомой характеристики переходного процесса от оптимальной. В качестве результата в конце цикла расчетов выдаются численные значения коэффициентов x , y , z ПИД-контроллера, соответствующие минимуму СКО.

Ниже приведен пример компьютерной программы на Матлабе для вычисления коэффициентов x , y , z ПИД-контроллера в задаче о настройке корректирующего устройства в контуре микродатчика. Все пояснения к программе приведены в комментариях.

```
function [Wopt,K,СКО]=СКО(x,y,z);
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 of a pendulum
am=3.5e-3;
%width of a pendulum
bm1=3.5e-3;
bm2=3.3e-3;
%thickness of a pendulum
cm=1e-3;
m1=rho*am*bm1*cm;
m2=rho*am*bm2*cm;
m=m1+m2;
%length elastic springs
ap=2e-4;
%the thickness of an elastic spring
cp=10e-6;
%length of a shoulder of a pendulum
%viscosity of nitrogen
%mu=17.9e-6;
mu=0;
%the moment of inertia of a pendulum
Xc=(bm1*(am+ap)+bm2*(am-ap))/(2*(bm1+bm2));
J=(m1+m2)*(am^2/3+cm^2/12+ap^2/4-Xc*(ap-Xc))+(m1-m2)*am*(ap/2-Xc)
%number of springs
k=2;
%angular rigidity
Gy=k*(5*(sqrt(3))*E100*cp^4)/(32*(1+gamma)*ap)
h=7e-6;
%axial factor of attenuation
Kd=mu*(am*(bm1-bm2)^2)/h^3;
```

```

%angular factor of attenuation
Kdy=Kd*Xc^2;
%factor of transfer of a sensitive element
Kche=(m1-m2)*Xc;
%basic voltage
Uop=5;
eps0=8.85418782e-12;
epsazota=1;
F=2*am*bm2;
%Factor of transfer of a link of a feedback
Koc=2*eps0*epsazota*Uop*F*Xc/(h^2);
Kyc=2
%Factor of transfer of the gauge of a corner
Kpp=Uop*Xc*Q/h;
M=Kche*Kpp*Kyc
N=Koc*Kpp*Kyc
T=(J/Gy)^(1/2)
tau=0.00000005
x
y
z
b0=1; b1=x*z; b2=y*z;
a0=N; a1=Gy*z+N*x*z; a2=Kdy*z+Gy*z*tau+N*y*z; a3=J*z+Kdy*z*tau; a4=J*z*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)
otn=N/Gy
jmax=Koc*Uop/((m1-m2)*Xc)
Umax=(Kche/Koc)*jmax
polosa=sqrt(a0/a2)
Wopt=minreal(W);
%вычисление СКО
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=0.005; yn=0.005; 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
CKOmax=CKO; x=x0; y=y0; z=z0;

```

```

end
k=k+1;
end
clc
x; y; z;
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(x,y,z)
Figure 1
step(Wopt/K),grid

```

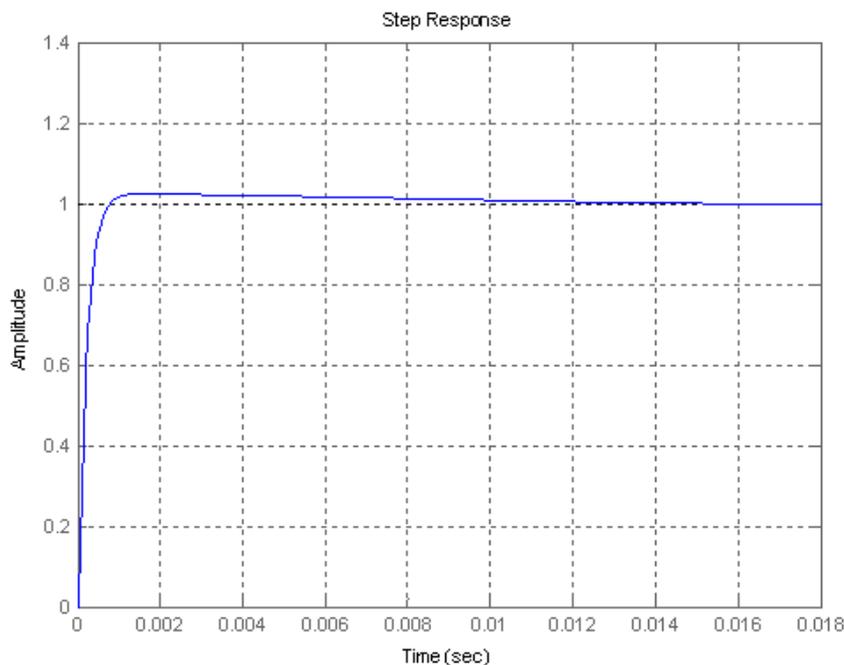


Рис. 5. Переходная характеристика микроакселерометра, соответствующая коэффициентам ПИД-контроллера: $x = 1.2115$; $y = 0.0100$; $z = 0.0058$

Вывод

Применение ПИД-контроллеров в контурах регулирования микродатчиков является эффективным средством и позволяет легко получать оптимальные характеристики.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учебник / В.Д. Вавилов. – Н. Новгород: НГТУ, 2003. – 503 с.
2. **Дьяконов, В.П.** SIMULINK 5/6/7. – ДМК Пресс, 2008. – 770 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2010*

V.D. Vavilov, A.V. Ulyushkin

TUNING OF A CORRECTING DEVICE IN A MICROSENSOR CIRCUIT

We consider the principle of application of electronic PID-controllers in microsensor adjustment circuits, and show their effectiveness for obtaining the optimal characteristics. We provide a practical example of modeling the characteristics of a compensational electrostatic accelerometer.

Key words: microaccelerometer, pendulum, PID-controller, damping, pulse-duration modulation (PDM)