

УДК 681.2.002.2; 681.2.002.5

© Ю. В. Денисов, М. В. Капленко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАСТРОЙКИ ПОРОГОВЫХ ДАТЧИКОВ УСКОРЕНИЯ

Проанализирована работа инерционного прибора, в котором движение инерционной массы происходит в неинерциальной системе отсчета. Составлены уравнения относительного покоя и движения инерционной массы при поступательном переносном движении. Установлено влияние параметров прибора, параметров сборки отдельных конструктивных единиц, настройки на ускорение срабатывания прибора.

Кл. сл.: пороговый датчик ускорения, относительное движение, относительный покой, неинерциальная система отсчета, параметры настройки

ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматривается проблема прогнозирования параметров настройки срабатывания порогового датчика ускорения (ПДУ). ПДУ используются в составе систем для коммутации электрических цепей при превышении действующим ускорением заданного порогового уровня. Наиболее близкими по функциональным параметрам к исследуемому прибору являются акселерометры прямого измерения. В отличие от рассматриваемого датчика ускорения в современных приборах используются иные физические явления [1, 2, 3] (акселерометры следующих типов: поплавковые, сухие с металлическим или кварцевым подвесом, электростатические, микромеханические). Описание акселерометров, конструктивно сходных с исследуемым, встречается в [4, 5]. Проблемы настройки рассматриваемого типа приборов в данных работах не анализируются, поэтому актуальной проблемой является получение аналитического описания влияния конструктивных параметров ПДУ на его функциональные характеристики.

Предметом исследования является ускорение срабатывания ПДУ и оценка влияния на него основных конструктивных параметров прибора: коэффициентов инерции, коэффициентов жесткости, шероховатости поверхностей, величины переносного ускорения, что определяет актуальность решаемой задачи.

В статье определяются величина переносного ускорения, при котором чувствительный элемент (инерционное тело) переходит из состояния относительного покоя к состоянию относительного движения, и закон дальнейшего движения по отношению к подвижной системе координат (корпусу прибора).

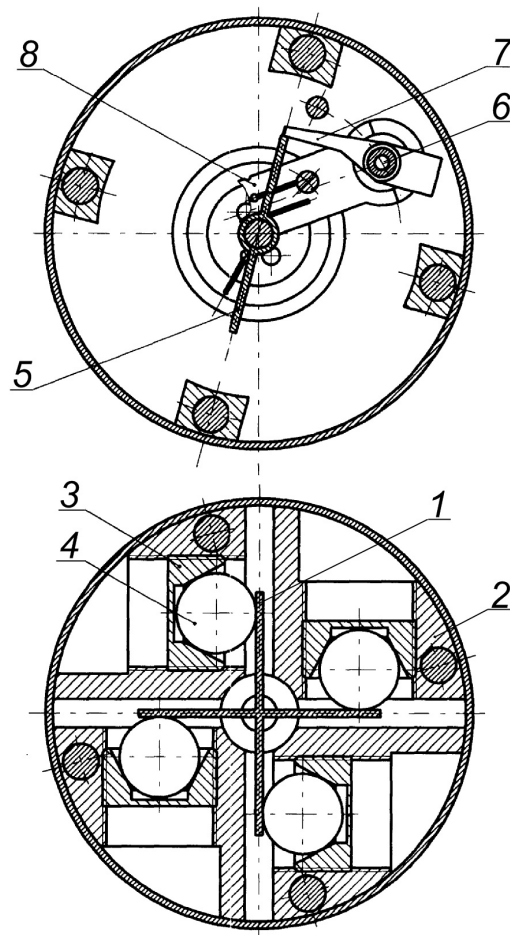


Рис. 1. Основные элементы конструкции порогового датчика: 1 — крестовина, 2 — корпус, 3 — конус, 4 — инерционное тело, 5 — фиксатор, 6 — вал, 7 — рычаг, 8 — переключатель

Анализируемый ПДУ имеет следующую конструкцию (рис. 1). Чувствительный элемент состоит из крестовины 1, установленной в корпусе 2 на двух шарикоподшипниках, и спиральной пружины, жестко закрепленной в корпус через обойму, четырех конусов 3 и четырех инерционных тел 4. Свободные осевые перемещения крестовины устраняются тарельчатой пружиной. Крестовина за счет усилия спиральной пружины поджимает инерционные тела к конусам. Механизм освобождения контактной системы состоит из фиксатора 5, установленного на крестовине 1 и удерживающего от поворота вал 6 через установленный на вал рычаг 7. Поворот вала обеспечивается спиральной пружиной. Контактная система состоит из переключателя 8, установленного на валу 6, и трех контактов.

Работа ПДУ осуществляется следующим образом: при действии ускорения в любом направлении инерционные тела 4 выкатываются из конусов 3 и поворачивают крестовину 1. Установленный на крестовине фиксатор 5 поворачивается, освобождая рычаг 7 и связанный с ним вал 6. Установленный на валу переключатель 8 замыкает требуемые контакты.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА

Расчетные схемы для момента отрыва приведены на рис. 2, 3. На расчетной схеме I: $\mathbf{P}$ — сила тяжести; $\mathbf{N}'_2, \mathbf{N}_3$ — нормальные составляющие реакции поверхности; $\mathbf{F}'_2, \mathbf{F}_3$ — силы трения скольжения; m_k — момент трения качения; Φ_e — переносная сила инерции.

На схеме II: $\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2$ — давление фиксатора и инерционного тела на крестовину; $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ — силы трения скольжения, выражаемые через нормальные реакции с помощью закона Кулона; M_2 — момент упругости спиральной пружины; M_{C2} — момент сопротивления в подшипниках.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Установлено, что расчет можно разделить на две задачи: статическую и динамическую (относительное равновесие и относительное движение), что позволяет определить ускорение поступательно движущейся подвижной системы координат, при котором начинается движение инерционного тела.

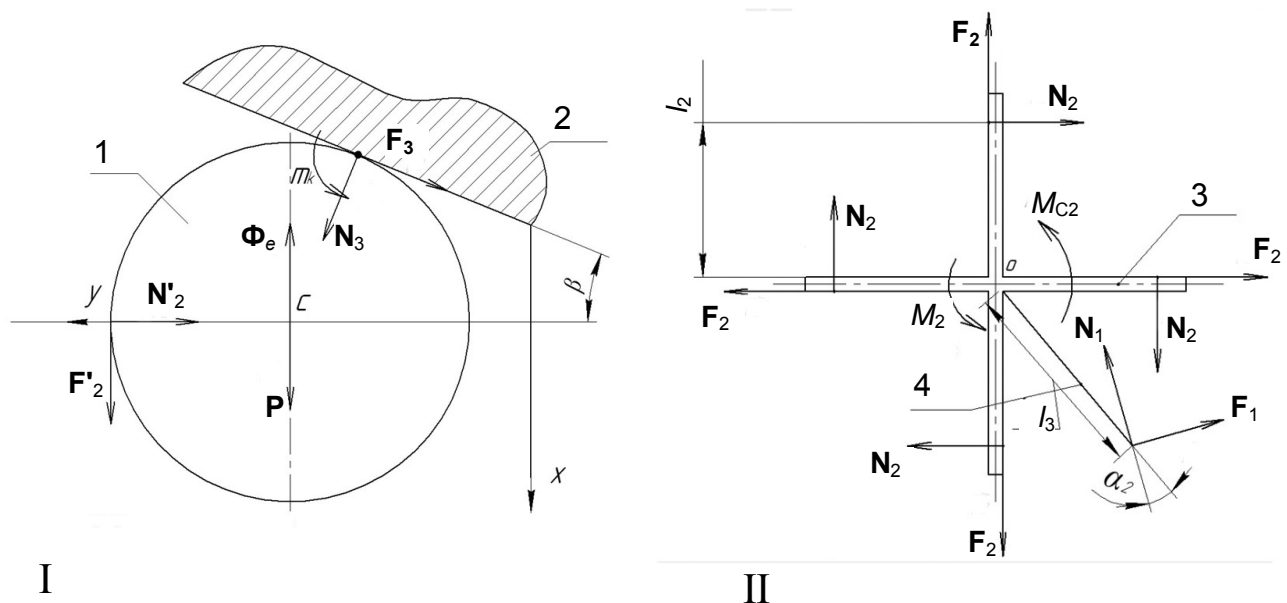


Рис. 2. Расчетные схемы.

Расчетная схема I для момента отрыва: 1 — инерционное тело, 2 — конус; расчетная схема II: 3 — крестовина, 4 — фиксатор механизма коммутации

Полученные результаты базируются на комплексном применении основных положений теоретической механики [6], математических методах анализа [7], а также натурном и математическом моделировании.

Вращательное движение крестовины 3 и плоское движение инерционного тела 1 (рис. 2) описываются дифференциальными уравнениями движения. Уравнения относительного покоя для определения величины $[a_e]$ получаются из системы (1)–(4) при условии, что относительная скорость и ускорение равны нулю, при этом к действующим на тела силам добавлена переносная сила инерции.

В динамическом режиме работы уравнение движения для крестовины имеет вид

$$\ddot{\varphi}_2 \cdot J_{кр} = -M_2(\varphi_2) - M_{C2} - N_1 \cdot l_3 \sin \alpha_2 - F_1 \cdot l_3 \cos \alpha_2 + 4 \cdot N_2 \cdot l_2; \quad (1)$$

для инерционного тела:

$$\ddot{X} \cdot m_{ин} = F_2 + P - K_1 \cdot t \cdot m_{ин} - [a_e] \cdot m_{ин} + N_3 \cos \beta + F_3 \sin \beta; \quad (2)$$

$$\ddot{Y} \cdot m_{ин} = -N_2 + N_3 \sin \beta - F_3 \cos \beta; \quad (3)$$

$$\ddot{\varphi}_1 \cdot J_{ин} = -F_2 \cdot r - m_k + F_3 \cdot r, \quad (4)$$

где $m_{ин}, J_{ин}, r$ — масса, момент инерции и радиус инерционного тела, $J_{кр}$ — момент инерции крестовины.

Сила Φ_e имеет вид $\Phi_e = K_1 \cdot t \cdot m_{ин} + [a_e] \cdot m_{ин}$, где K_1 — коэффициент нарастания ускорения. Решая систему (1)–(4) для обобщенной координаты φ_2 , выполняя линеаризацию для малых значений параметров ($\varphi_1 \approx 0^\circ \dots 5^\circ$, $\varphi_2 \approx 0^\circ \dots 4^\circ$, $X \approx 0 \dots 1$ мм, $Y \approx 0 \dots 0.6$ мм) вблизи устойчивого положения равновесия, получаем уравнение второго порядка

$$\ddot{\varphi}_2 + \omega_0^2 \cdot \varphi_2 = D \cdot K_1 \cdot t + D \cdot [a_e] + E, \quad (5)$$

где D, E — коэффициенты, полученные при алгебраических преобразованиях системы (1)–(4); ω_0 — циклическая частота.

Общее решение уравнения (5) имеет вид:

$$\varphi_2(t) = C_{11} \cdot \cos(\omega_0 t) + C_{12} \cdot \sin(\omega_0 t) + H_{01} + H_{11} \cdot t, \quad (6)$$

где C_{11}, C_{12} — постоянные, определяемые из начальных условий. При значениях $C_{11} = 5.2 \cdot 10^{-5}$ рад, $C_{12} = 1.64 \cdot 10^{-5}$ рад частное решение (5) представлено на рис. 3.

Задавая значения угла срабатывания, получаем время, соответствующее этому углу, и соответствующее ускорение срабатывания.

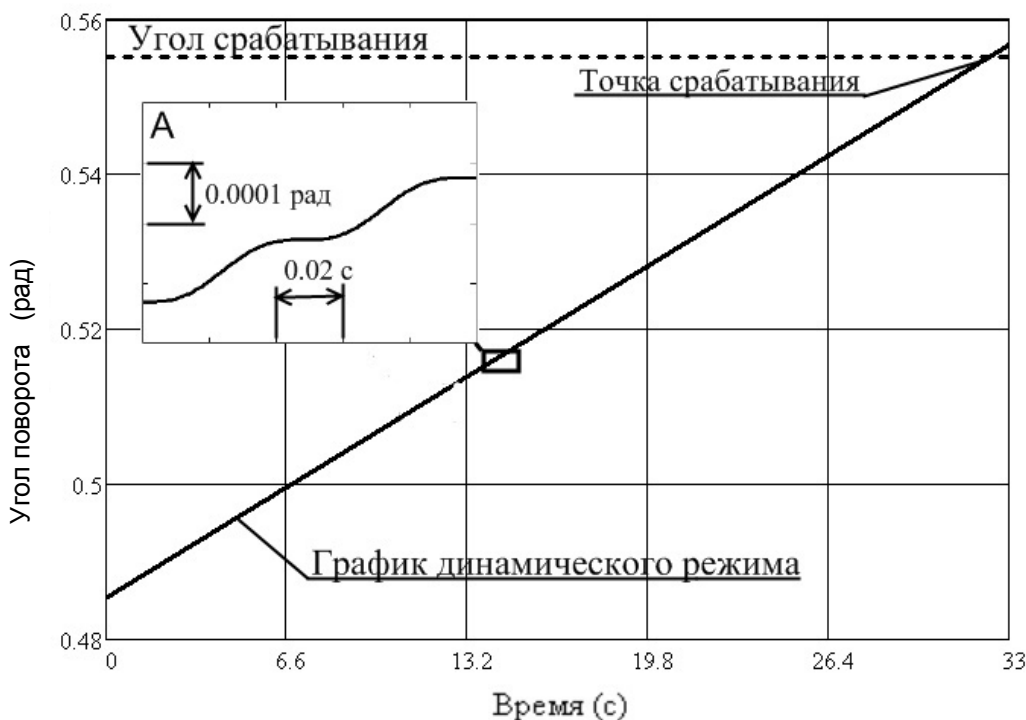


Рис. 3. График динамического режима ПДУ.

На фрагменте А показан в более крупном масштабе закон движения крестовины

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. С помощью разработанной модели исследованы два варианта движения инерционного тела, определяющие получение требуемых функциональных характеристик: первый — качение без проскальзывания по конусу и проскальзывание по крестовине, второй — проскальзывание по конусу и качение без скольжения по крестовине. При качении инерционного тела без скольжения по поверхности конуса (нормальный режим работы) сила трения скольжения является неизвестной величиной, а при скольжении инерционного тела по крестовине — определяется с помощью закона Кулона. Соответственно для данного варианта кинематической схемы должно выполняться условие

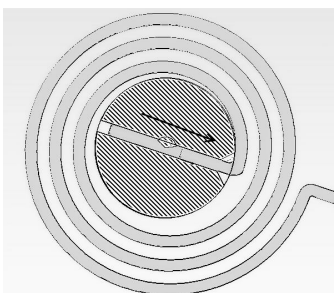
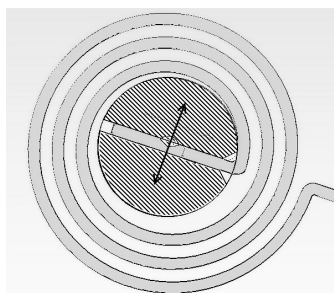
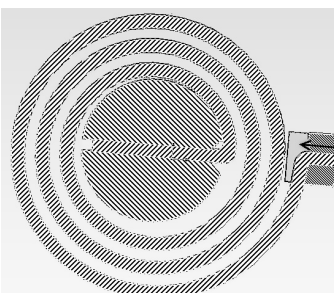
$$f_3 \geq \frac{F_3}{N_3}, \quad (7)$$

где f_3 — коэффициент трения скольжения.

2. Параметры шероховатостей поверхностей конуса и крестовины влияют на ускорение срабатывания прибора за счет возникновения различных видов кинематических связей при движении инерционного тела по поверхности конуса и крестовины.

3. При создании математического описания ПДУ использованы программы Ansys v.12, Pro/ENGINEER Wildfire 3.0, с помощью которых а) проведен расчет зависимости момента, развиваемого плоской спиральной пружиной, от угла ее взведения (деформации пружины) при различных допусках на геометрические размеры; б) выполнен анализ влияния параметров закрепления концов спиральной пружины на момент упругости (см. таблицу); в) с помощью трехмерных моделей выполнен расчет моментов инерции и положение центра тяжести геометрически сложных элементов ПДУ, используемых при решении уравнений (1)–(4).

Влияние параметров закрепления концов спиральной пружины на погрешность срабатывания ПДУ

Функциональная характеристика	Параметр		
	l_1 — величина смещения пружины относительно вала в направлении стрелки	l_2 — величина смещения пружины относительно вала в направлении стрелки	l_3 — величина смещения пружины относительно вала в направлении стрелки
			
Максимальное изменение погрешности срабатывания	$\Delta_{\max} = 0.8147 \text{ g}$	$\Delta_{\max} = 0.4541 \text{ g}$	$\Delta_{\max} = 0.0147 \text{ g}$

АНАЛИЗ

Для ПДУ проведенный анализ позволил определить степень влияния параметров начальной настройки на погрешность срабатывания при следующих значениях параметров, учитывая область значений ускорения срабатывания ($25g \leq \leq a_{сраб.} \leq 30g$):

$M_1 = 9.5 \cdot 10^{-3}$ Н·м — момент упругости, приложенный к рычагу;

$M_{C1} = 0.4 \cdot 10^{-3}$ Н·м — момент трения в подшипниках рычага;

$\alpha_2 = 0^\circ$;
 $f_1 = 0.15$ — коэффициент трения кинематической пары (рычаг—фиксатор);

$M_2 = 44.93 \cdot 10^{-3}$ Н·м — момент упругости, приложенный к крестовине;

$M_{C2} = 0.4 \cdot 10^{-3}$ Н·м — момент трения в подшипниках крестовины;

$k = 0.0015 \cdot 10^{-2}$ м — коэффициент трения качения пары (конус—инерционное тело);

$f_2 = 0.15$ — коэффициент трения пары (поверхность крестовины—инерционное тело).

Области изменения параметров и соответствующие им погрешности при определении ускорения срабатывания:

коэффициент трения f_2 пары (поверхность крестовины—инерционное тело)

от 0.099 до 0.13, погрешность = 1.35 g;

коэффициент трения f_1 кинематической пары (рычаг—фиксатор)

от 0.099 до 0.13, погрешность = 0.134 g;

угол α_2 отклонения от 90° рычага к фиксатору

от 0 до 1.5 град, погрешность = 0.118 g;

начальный угол взведения пружины

от 27.323 до 30.032 град, погрешность = 2.31 g.

Согласно данным расчетам, можно сделать следующие выводы:

— при большой жесткости спиральной пружины незначительные изменения угла взведения приводят к существенному изменению ускорения срабатывания;

— максимальные изменения остальных технологических параметров приводят к изменениям погрешности срабатывания, значительно меньшим чем при изменениях угла взведения пружины.

Экспериментальное подтверждение разработанных математических описаний ПДУ проведено в процессе настройки партий выпускаемых датчиков в производственных условиях. В процессе работы было рассмотрено более ста ПДУ, накоплен значительный статистический материал. При настройке варьировались угол начального взведения плоской спиральной пружины, допуски на геометрические размеры и параметры шероховатостей контактирующих поверхностей. Коэффициент корреляции вектора данных, полученных экспериментальным путем, и вектора соответствующих расчетных данных составляет 0.966.

ВЫВОДЫ

1. Полученные математические описания пороговых датчиков ускорения позволяют упростить

процесс настройки путем выбора соответствующих параметров.

2. Основным фактором, влияющим на начальную настройку порогового датчика, является начальный угол взведения плоской спиральной пружины, момент которой приложен непосредственно к крестовине. Все остальные факторы имеют меньшее влияние, их можно компенсировать корректировкой угла начальной деформации пружины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасева Т.В. Влияние технологических факторов на конструктивно-механические параметры чувствительных элементов интегральных акселерометров и датчиков давления. Дис. ... канд. техн. наук. Арзамас: НИИПИ Кварц, 2002.
2. Измайлов А.Е. Исследование точности прецизионных акселерометров и повышение их качества: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МАТИ, 2003.
3. Скалон А.И., Шугаев М.А. Влияние технологических погрешностей на метрологические характеристики микромеханических акселерометров // Гирокопия и навигация. 2000. № 4. С. 90–91.
4. Боднер В.А. Приборы первичной информации: учебник для авиационных вузов / В.А. Боднер. М.: Машиностроение, 1981. 344 с.
5. Инерциальная навигация. Анализ и проектирование / Под ред. К.Ф. О’Доннелла. М.: Наука, 1969. 592 с.

6. Иилинский А.Ю. Механика относительного движения и силы инерции. М.: Наука, 1981. 192 с.
7. Эдвардс Ч.Г., Пенни Д.Э. Дифференциальные уравнения и краевые задачи: моделирование и вычисление с помощью Mathematica, Maple и MATLAB. 3-е изд.: пер. с англ. М.: Вильямс, 2008. 1104 с.

**ФГУП "Уральский электромеханический завод",
г. Екатеринбург**

Контакты: Капленко Максим Владимирович,
k-14627@planet-a.ru

Материал поступил в редакцию 11.10.2010.

THE IMPLEMENTATION OF MATHEMATICAL SIMULATION METHODS FOR EFFICIENCY INCREASING OF ADJUSTMENT OF THE THRESHOLD ACCELERATION TRANSDUCERS

Yu. V. Denisov, M. V. Kaplenko

Federal State Unitary Enterprise Ural Electromechanical Plant, Ekaterinburg

The performance of an inertial device where the motion of inertial mass takes place in non-inertial system of readout is analyzed. The equations of the inertial mass relative rest and inertial mass motion at the progressive pick-and-go motion were developed. The influence of device parameters and assembly parameters of individual construction units, and setting for acceleration of the device action were established.

Keywords: threshold acceleration transducers, relative translational motion, relative translational rest, noninertial reference system, tuning parameter