

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО ВКЛЮЧАТЕЛЯ

В. Н. Китаев<sup>1</sup>, Р. Л. Афанасьев<sup>2</sup>, М. В. Петров<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия  
<sup>1,2,3</sup> kb2@vniitf.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Инерционные включатели используются в беспилотных летательных аппаратах для коммутации электрических цепей их систем. Срабатывание подобных приборов происходит в основном при наборе интеграла линейного ускорения, с которым аппарат перемещается в пространстве. *Материалы и методы.* Для интегрирования линейного ускорения традиционно используются магнитоиндукционные и гидравлические демпферы. В ряде случаев гидравлические демпферы как упрощающие конструкции инерционных включателей более предпочтительны. *Результаты и выводы.* В работе представлены результаты разработки математической модели инерционного включателя – составленные дифференциальные уравнения, описывающие движения подвижных конструктивных элементов, а также условия начала движения. Разработана математическая модель, позволяющая получать расчетные оценки параметров функционирования и срабатывания инерционного включателя.

**Ключевые слова:** инерционный включатель, гидравлический демпфер, магнитная система, инерционное тело, контактная система, математическая модель, дифференциальные уравнения

**Для цитирования:** Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель инерционного включателя // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 30–40. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-4

## MATHEMATICAL MODEL OF A THRESHOLD INERTIA SWITCH

V.N. Kitaev, R.L. Afanasyev, M.V. Petrov

<sup>1,2,3</sup> Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia  
<sup>1,2,3</sup> kb2@vniitf.ru

**Abstract.** *Background.* Inertia switches serve in pilotless vehicles for electrical switching. The switches triggering takes place generally when reached the integral of linear acceleration at which the vehicle travels in the space. *Materials and methods.* For integration of the linear acceleration both magnetic and hydraulic dampers are customary used. In several cases hydraulic dampers are more suitable in the view of inertia switches design simplification. *Results and conclusions.* The work presents the results of developed mathematical model of the inertia switch: formulated differential equations describing movement of mobile design elements and motion start conditions, as well. A mathematical model is worked up to estimate the parameters of both functioning and triggering the inertia switch.

**Keywords:** inertia switch, hydraulic damper, magnetic system, inertia body, contact system, mathematical model, differential equation

**For citation:** Kitaev V.N., Afanasyev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of a threshold inertia switch. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):30–40. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-4

### Введение

При выполнении опытно-конструкторских работ по разработке электромеханических приборов для беспилотных летательных аппаратов целесообразно создание математических моделей приборов, позволяющих уже на начальных стадиях разработки оптимизировать технические решения, заложенные в их конструкции.

В работе представлены результаты разработки математической модели порогового инерционного прибора.

Конструкция прибора в исходном состоянии показана на рис. 1 (продольный разрез).

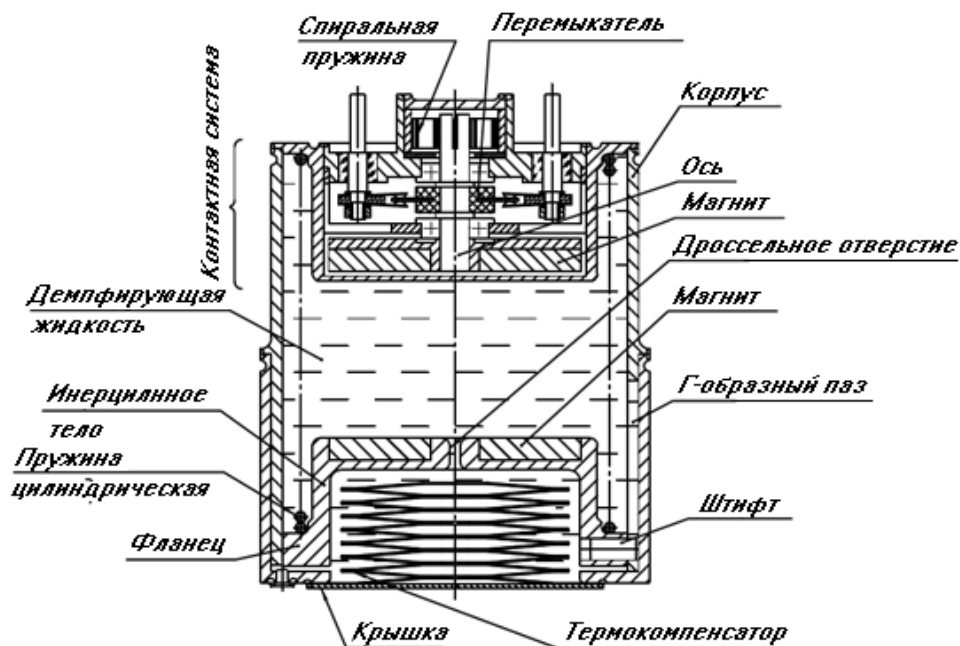


Рис. 1. Конструкция прибора в исходном состоянии

В герметичном корпусе размещено инерционное тело, выполненное в виде полого цилиндра с фланцем, в котором равномерно по окружности размещены три радиальных штифта, входящие в пазы корпуса. Инерционное тело выполнено из «тяжелого» вольфрамового немагнитного сплава типа ВМЗ-2. Внутренняя полость инерционного включателя заполнена демпфирующей полиметилсилоксановой жидкостью по ГОСТ 13032-77. Фланец и корпус сопряжены по диаметру с малым зазором. Фланец инерционного тела поджат цилиндрической пружиной. На торце инерционного тела закреплен постоянный магнит, намагниченный в поперечном направлении.

Контактная система, отделенная от внутренней полости корпуса кожухом, состоит из размещенных на токовыводах упругих контактов и поворотного переключателя с токопроводящими ножами. Токопроводящие ножи, закрепленные на переключателе, взаимодействуют с упругими контактами, закрепленными на токовыводах, формируя требуемые электрические цепи. Токовыводы установлены на изоляторах. Исходное состояние контактной системы обеспечивается спиральной пружиной, удерживающей ось переключателя в исходном угловом положении.

На оси переключателя закреплена подложка с размещенным постоянным магнитом, намагниченным в поперечном направлении.

Постоянные магниты инерционного тела и контактной системы развернуты относительно друг друга, как в исходном, так и в переключенном состоянии контактной системы на определенный угол (рис. 2).

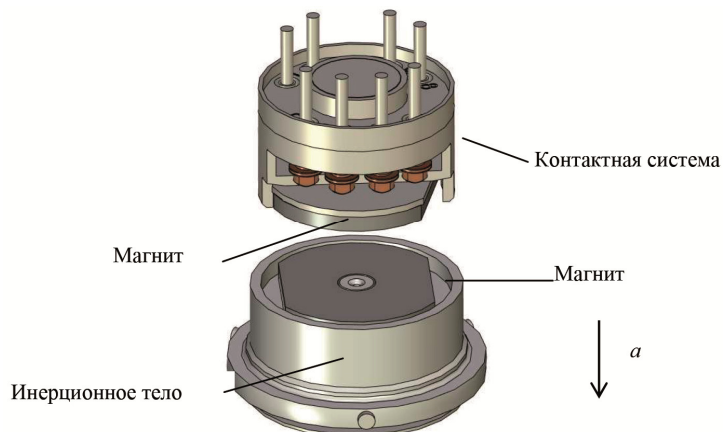


Рис. 2. Расположение магнитов инерционного тела и контактной системы

Переключение контактной системы магнитной системой через герметичную стенку заимствовано из ранее разработанных технических решений [1, 2].

### Принцип действия инерционного включателя

При ускорении  $a$  (рис. 2) в направлении оси чувствительности прибора действует сила инерции с величиной, обеспечивающей превышение усилия предварительного поджатия цилиндрической пружины, инерционное тело начинает перемещаться, сжимая цилиндрическую пружину. Демпфирующая жидкость перетекает через дроссельное отверстие, кольцевой зазор между корпусом и фланцем, а также через зазоры между штифтами и стенками пазов.

Радиальные штифты, установленные во фланце, перемещаются по наклонным Г-образным пазам в корпусе и поворачивают инерционное тело на некоторый угол  $\beta$ .

При приближении постоянного магнита инерционного тела к постоянному магниту контактной системы резко возрастающее усилие взаимодействия полюсов магнитов переключает контактную систему прибора. Переместившись до конца Г-образных пазов, штифты инерционного тела фиксируют переключенное состояние контактной системы.

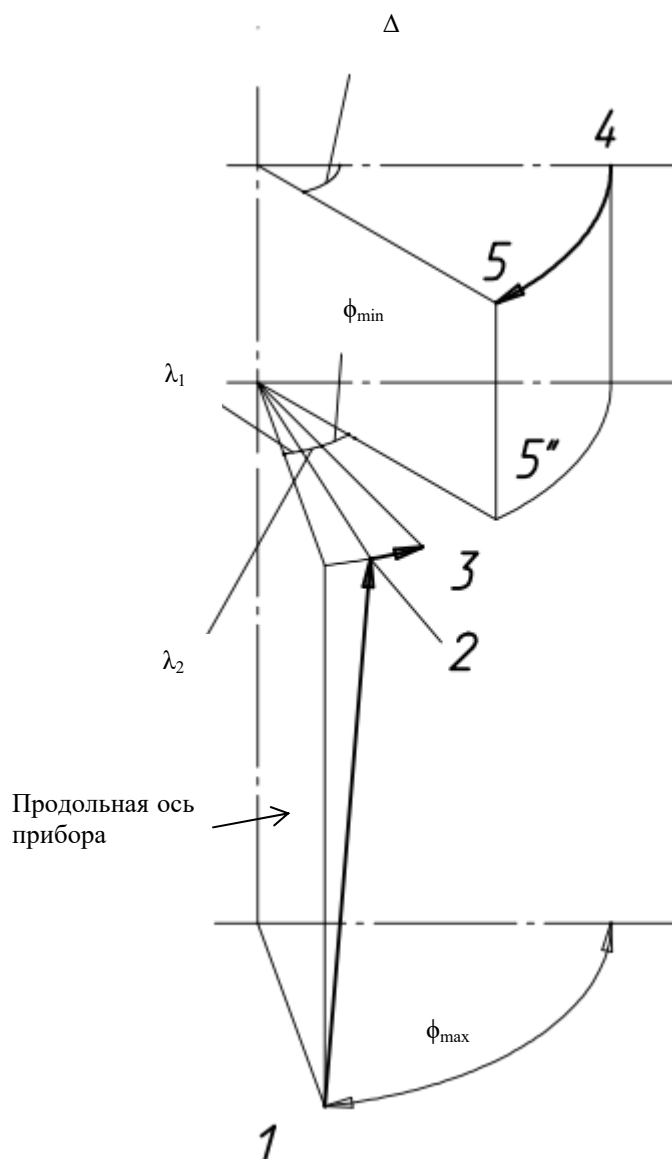


Рис. 2. Схема изменения пространственного положения магнитов при срабатывании инерционного включателя

На схеме изменения пространственного положения магнитов при срабатывании инерционного выключателя: 1 – исходное положение магнита инерционного тела; 1–2 – поступательно-вращательное движение магнита инерционного тела по винтовой линии; 2–3 – вращательное движение магнита инерционного тела в перемещенном положении; 4 – исходное положение магнита контактной системы; 4–5 – поворот магнита переключателя контактной системы;  $\phi_{\max}$  – угол между магнитами в исходном состоянии инерционного выключателя;  $\phi_{\min}$  – угол между магнитами в сработанном состоянии инерционного выключателя;  $\lambda_1$  – угол поворота магнита инерционного тела на участке 1–2;  $\lambda_2$  – угол поворота магнита инерционного тела (ИТ) на участке 2–3;  $\Delta$  – угол поворота переключателя.

### Система координат

Введем прямоугольную правую систему координат  $OXYZ$ , связанную с прибором. Начало  $O$  системы координат – в центре начального положения центра поверхности инерционного тела. Направления осей показаны на рис. 3. Орты осей являются правой тройкой векторов, т.е. ось  $OZ$  направлена от нас.

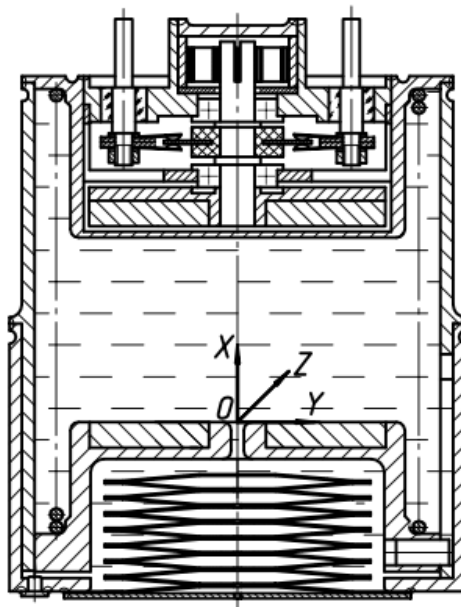


Рис. 3. Ориентация прибора в системе координат  $OXYZ$

Перемещение ИТ от начального положения по оси  $OX$  обозначим через  $X_{\text{ИТ}}$ . Если инерционное тело переместилось в конечное положение, то  $X_{\text{ИТ}} = X_{\text{кон}}$  (рис. 3).

### Дифференциальные уравнения

При составлении дифференциальных уравнений были приняты следующие допущения [3, 4]:

- силами трения в контактной системе пренебрегаем (подшипники на оси переключателя, взаимодействие токопроводящих ножей и упругих контактов);
- жидкость считаем несжимаемой;
- изменения размеров деталей прибора за счет отклонения температуры жидкости от номинальной ( $T_{\text{ж}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) не учитываются;
- взаимодействие цилиндрической поверхности штифтов с угловым элементом в месте изменения направления каждого паза не учитывается. Принимается условие о прохождении штифтами всего наклонного участка паза.

### Силы, действующие на подвижные части инерционного выключателя

Опишем силы, действующие на подвижные части инерционного выключателя – инерционное тело и переключатель контактной системы.

Сила инерции  $\vec{F}_{ин}$  определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{ин} = -m_{ит} \vec{a}, \quad (1)$$

где  $m_{ит}$  – приведенная масса инерционного тела;  $\vec{a}$  – ускорение носителя в месте положения инерционного тела прибора:

$$\vec{a} = (a_x; a_y; a_z), \quad (2)$$

$a_x, a_y, a_z$  – проекция  $\vec{a}$  на оси системы координат OXYZ.

Выражение (1) с учетом соотношения (2) перепишем в следующем виде:

$$\vec{F}_{ин} = -m_{ит} (a_x; a_y; a_z). \quad (3)$$

Приведенная масса инерционного тела определяется по формуле

$$m_{ит} = m_{цил} + m_{маг} + 3m_{шт} + \frac{m_{пр}}{3}, \quad (4)$$

где  $m_{цил}$  – масса полого цилиндра с фланцем;  $m_{маг}$  – масса постоянного магнита инерционного тела;  $m_{шт}$  – масса штифта;  $m_{пр}$  – масса пружины.

Сила Архимеда  $\vec{F}_A$  определяется следующим образом:

$$\vec{F}_A = m_{жит} (\vec{a}_ж - \vec{g}), \quad (5)$$

где  $\vec{a}_ж$  – ускорение прибора в месте положения центра тяжести жидкости, вытесненной инерционным телом (в упрощенной постановке  $\vec{a}_ж = \vec{a}$ );  $g$  – ускорение свободного падения;  $m_{жит}$  – масса жидкости, вытесненной инерционным телом:

$$m_{жит} = m_{жцил} + m_{жмаг} + 3m_{жшт} + \frac{m_{жпр}}{3}, \quad (6)$$

$m_{жцил}$ ,  $m_{жмаг}$ ,  $m_{жшт}$ ,  $m_{жпр}$  – масса жидкости, вытесненная полым цилиндром с фланцем, магнитом инерционного тела, штифтом, пружиной соответственно.

Масса жидкости, вытесненная полым цилиндром с фланцем, определяется следующим образом:

$$m_{жцил} = \rho_ж V_{цил}, \quad (7)$$

где  $\rho_ж$  – плотность жидкости (ГОСТ 13032-77);  $V_{цил}$  – объем полого цилиндра с фланцем, определяется из конструкторской документации.

Аналогичным образом определяются массы  $m_{жмаг}$ ,  $m_{жшт}$ ,  $m_{жпр}$ :

$$m_{жмаг} = \rho_ж V_{маг}, \quad (8)$$

$$m_{жшт} = \rho_ж V_{шт}, \quad (9)$$

$$m_{жпр} = \rho_ж V_{пр}, \quad (10)$$

где  $V_{маг}$ ,  $V_{шт}$ ,  $V_{пр}$  – объемы магнита инерционного тела, штифта, пружины соответственно.

### Сила упругости цилиндрической пружины

Величина силы упругости цилиндрической пружины  $F_{ц}$  определяется следующим образом [5, 6]:

$$F_{ц} = F_{ц0} + C_{ц} (X_{ит} - X_{ит0}), \quad (11)$$

где  $F_{ц0}$  – начальное усилие пружины:

$$F_{ц0} = C_{ц} (h_{ц0} - h_{ц1}), \quad (12)$$

$C_{пр}$  – коэффициент упругости пружины (жесткость):

$$C_{ц} = \frac{F_{цк}}{(h_{ц0} - h_{ц1})}, \quad (13)$$

$F_{цк}$  – контрольное усилие пружины;  $h_{ц0}$  – высота пружины в свободном состоянии;  $h_{ц1}$  – высота пружины в исходном состоянии;  $h_{ц2}$  – контрольная высота пружины;  $X_{ит0} - X_{ит}$  в начальном положении инерционного тела.

Величина силы трения  $F_{тр}$  трех штифтов о стенки в пазах определяется следующим образом:

если  $\frac{dX}{dt} \neq 0$ , то

$$F_{тр} = -\text{sign}\left(\frac{dX}{dt}\right)\mu_c(N_1 + N_2 + N_3), \quad (14)$$

если  $\frac{dX}{dt} = 0$ , то

$$|F_{тр}| \leq \mu_n(N_1 + N_2 + N_3), \quad (15)$$

где  $\mu_c, \mu_n$  – коэффициент трения скольжения и покоя соответственно;  $N_1, N_2, N_3 = F_{маг\_вр} \cos \beta$  (при  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$ ) – нормальные составляющие реакций, действующих со стороны пазов на штифты (рис. 4).

Силы, действующие со стороны паза на штифт, показаны на рис. 4.

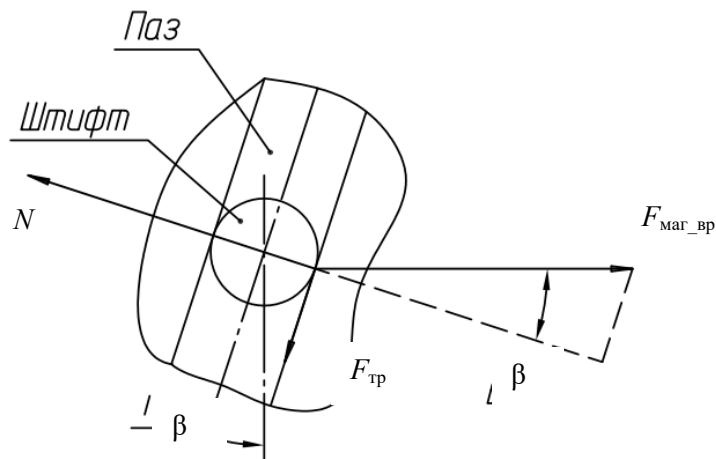


Рис. 4. Силы, действующие на штифт инерционного тела:  
 $F_{маг\_вр}$  – сила от момента вращения взаимодействующих магнитов инерционного тела и контактной системы

Величину силы гидравлического сопротивления будем определять по следующей формуле

$$F_{гс} = \Delta p S_{ит}, \quad (16)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления жидкости на инерционном теле (перед и за ним);  $S_{ит}$  – площадь торцевой поверхности инерционного тела:

$$S_{ит} = \frac{\pi d_{ит}^2}{4}; \quad (17)$$

$d_{ит}$  – диаметр инерционного тела.

Перепад давления жидкости на инерционном теле будем определять из следующих соображений.

При перемещении инерционного тела с площадью поверхности  $S_{ит}$  на величину  $\Delta X_{ит}$  происходит вытеснение жидкости объемом  $\Delta V$  [7]:

$$\Delta V = S_{\text{ит}} \Delta X_{\text{ит}}, \quad (18)$$

которая перетекает за промежуток времени  $\Delta t$  через кольцевой зазор между корпусом и фланцем, через зазоры между штифтами и стенками пазов и через дроссельное отверстие.

С другой стороны, имеем

$$\Delta V = Q \Delta t, \quad (19)$$

где  $Q$  – суммарный расход жидкости через зазоры и дроссельное отверстие.

Приравняв соотношения (18) и (19), после ряда преобразований получаем следующее соотношение:

$$\frac{\Delta X_{\text{ит}}}{\Delta t} = \frac{Q}{S_{\text{ит}}}. \quad (20)$$

После предельного перехода в выражении (20) при  $\Delta t \rightarrow 0$  с учетом того, что

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X_{\text{ит}}}{\Delta t} = |v_{\text{ит}}|, \quad (21)$$

имеем следующее соотношение для определения величины суммарного расхода жидкости:

$$Q = |v_{\text{ит}}| S_{\text{ит}}, \quad (22)$$

где  $v_{\text{ит}}$  – скорость движения инерционного тела.

С другой стороны, суммарный расход  $Q$  жидкости можно определить следующим образом:

$$Q = Q_d + Q_3, \quad (23)$$

где  $Q_d$  – расход жидкости через дроссельное отверстие;  $Q_3$  – расход жидкости через зазоры между корпусом и фланцем и между штифтами и стенками пазов.

Расход жидкости через дроссельное отверстие [2] будем определять следующим образом:

$$Q_d = \mu S_d \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (24)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода;  $S_d$  – площадь дроссельного отверстия:

$$S_d = \frac{\pi d_d^2}{4}, \quad (25)$$

$d_d$  – диаметр дроссельного отверстия.

Коэффициент расхода жидкости  $\mu$  через дроссельное отверстие будем задавать как функцию числа Рейнольдса  $Re$ :

$$\mu = \mu(Re). \quad (26)$$

Число Рейнольдса определяется выражением

$$Re = \frac{v_d d_d}{\gamma_{\text{ж}}}, \quad (27)$$

где  $v_d$  – средняя скорость течения жидкости через дроссельное отверстие:

$$v_d = \frac{Q_d}{S_d}, \quad (28)$$

$\gamma_{\text{ж}}$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости:

$$\gamma_{\text{ж}} = \frac{\eta_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}; \quad (29)$$

$\eta_{\text{ж}}$  – коэффициент динамической вязкости жидкости, задается как функция температуры жидкости  $T_{\text{ж}}$ :

$$\eta_{\text{ж}} = \eta_{\text{ж}}(T_{\text{ж}}). \quad (30)$$

Расход жидкости через зазоры [2] определяется выражением

$$Q_3 = \frac{S_3 \delta^2}{12 \eta_{ж} K L_3} \Delta p + \frac{S_3}{2} |v_{ит}|, \quad (31)$$

где  $S_3$  – площадь зазора, определяется по 3d-модели прибора или упрощенно:

$$S_3 = \frac{\pi}{4} (d_k^2 - d_\phi^2); \quad (32)$$

$d_k$  – диаметр корпуса;  $d_\phi$  – диаметр фланца;  $\delta$  – величина зазора, определяется по 3d модели прибора или упрощенно:

$$\delta = \frac{d_k - d_\phi}{2}; \quad (33)$$

$K$  – коэффициент несоосности,  $K = 0,4 \div 1$ ;  $L_3$  – длина боковой поверхности фланца диаметром  $d_\phi$ .

После подстановки выражения (22) в формулу (23) с учетом соотношений (24), (31) имеем следующие уравнения для определения перепада давления  $\Delta p$  на инерционном теле:

$$\mu S_d \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_{ж}}} + \frac{S_3 \delta^2}{12 \eta_{ж} K L_3} \Delta p + \frac{S_3}{2} |v_{ит}| = |v_{ит}| S_{ит}. \quad (34)$$

Выражение (34) перепишем в следующем виде:

$$u^2 + \frac{12 \eta_{ж} K L_3 \mu S_d \sqrt{2}}{S_3 \delta^2 \sqrt{\rho_{ж}}} u + \frac{12 \eta_{ж} K L_3}{S_3 \delta^2} |v_{ит}| \left( \frac{S_3}{2} - S_{ит} \right) = 0, \quad (35)$$

где

$$u = \sqrt{\Delta p}. \quad (36)$$

Выражение (35) перепишем в следующем виде:

$$u^2 + 2Bu + C = 0, \quad (37)$$

где

$$B = \frac{6 \eta_{ж} K L_3 \mu S_d \sqrt{2}}{S_3 \delta^2 \sqrt{\rho_{ж}}}, \quad (38)$$

$$C = \frac{12 \eta_{ж} K L_3}{S_3 \delta^2} |v_{ит}| \left( \frac{S_3}{2} - S_{ит} \right). \quad (39)$$

Решение уравнения (38) выглядит следующим образом:

$$u = -B \pm \sqrt{B^2 - C}. \quad (40)$$

После подстановки в выражение (36) соотношения (40), выбора знака «-», так как  $\Delta p \geq 0$ , и ряда преобразований получаем следующее выражение для определения перепада давления  $\Delta p$ :

$$\Delta p = (\sqrt{B^2 - C} - B)^2. \quad (41)$$

### Моменты сил, действующие на инерционное тело

Магнитный момент  $\vec{M}_{\text{маг}}$  определяется следующим образом:

$$\vec{M}_{\text{маг}} = \vec{M}_{\text{маг}}(x_{\text{ит}}, \varphi_{\text{маг}}), \quad (42)$$

определяется методами конечно-элементного анализа.



Момент сил  $\vec{M}_N$ , действующих со стороны Г-образных пазов на штифты инерционного тела, определяется следующим образом:

$$\vec{M}_N = R_{кр} (\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3), \quad (43)$$

где  $R_{кр}$  – внутренней радиус корпуса инерционного включателя.

### Моменты сил, действующие на контактную систему

#### Момент упругости спиральной пружины контактной системы

Момент упругости спиральной пружины  $\vec{M}_{сп}$  определяется следующим образом:

$$\vec{M}_{сп} = \vec{M}_{сп}(\varphi_{сп}), \quad (44)$$

определяется из конструкторской документации.

#### Уравнения движения подвижных частей инерционного включателя

Уравнение поступательного движения инерционного тела относительно корпуса прибора запишем в следующем виде:

$$m_{ит} \vec{a}_{ит} = \vec{F}_{ин} + \vec{F}_{ц} + \vec{F}_A + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_{гс} + \vec{F}_{маг}, \quad (45)$$

где  $\vec{a}_{ит}$  – ускорение инерционного тела относительно корпуса прибора.

#### Уравнение вращательного движения инерционного тела

Уравнения вращения инерционного тела запишем в следующем виде:

$$J_{ит} \vec{\epsilon}_{ит} = \vec{M}_{маг} + \vec{M}_N, \quad (46)$$

где  $J_{ит}$  – осевой момент инерции инерционного тела;  $\vec{\epsilon}_{ит}$  – угловое ускорение инерционного тела, вращающегося вокруг своей оси.

Уравнения вращения переключателя контактной системы запишем в следующем виде:

$$J_{кc} \vec{\epsilon}_{кc} = \vec{M}_{маг} + \vec{M}_{сп}, \quad (47)$$

где  $J_{кc}$  – осевой момент инерции переключателя;  $\vec{\epsilon}_{кc}$  – угловое ускорение переключателя вокруг своей оси.

Система дифференциальных уравнений, описывающих поступательное и вращательное движение подвижных частей прибора вдоль и вокруг оси  $OX$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{итx} = (F_{инx} - F_{ц} - F_A - F_{тр} \cos \beta - F_{гс} + F_{маг\_пр}) / m_{ит}, \\ a_{итx} = \frac{dv_{итx}}{dt} = \frac{d^2 X_{ит}}{dt^2}, \\ \epsilon_{ит} = (M_{маг} - M_N) / J_{ит}, \\ \epsilon_{ит} = \frac{d\omega_{ит}}{dt} = \frac{d^2 \varphi_{ит}}{dt^2}, \\ \epsilon_{кc} = (M_{маг} - M_{сп}) / J_{кc}, \\ \epsilon_{кc} = \frac{d\omega_{кc}}{dt} = \frac{d^2 \varphi_{кc}}{dt^2}, \end{array} \right. \quad (48)$$

где  $\omega_{ит}$  – угловая скорость инерционного тела вокруг оси  $OX$ ;  $\varphi_{ит}$  – угол поворота инерционного тела вокруг оси  $OX$ ;  $\varphi_{ит} = f(X_{ит})$ , а в простом случае ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$ )  $\varphi_{ит} = \frac{X_{ит} \cdot \text{tg} \beta}{R_{кр}}$ ;  $\omega_{кc}$  – угловая скорость переключателя контактной системы вокруг оси  $OX$ ;  $\varphi_{кc}$  – угол поворота переключателя контактной системы вокруг оси  $OX$ .

Система (48) решается численно при начальных условиях:  $X_{ит} = 0$ ,  $\varphi_{кв} = 0$  ( $t = 0$ ).

Таким образом, полученное решение математической модели инерционного прибора позволяет оптимизировать процесс его производства.

### Список литературы

1. Патент 2762663 РФ, МПК Н 01 Н 1/42. Концевой выключатель / Китаев В. Н., Филиппов М. А., Екимов Н. В., Тенетилов Г. В. ; № 2021111093 ; заявл. 19.04.2021, зарег. 21.12.2021.
2. Патент 2552349 РФ, МПК Н 01 Н 1/42. Контактная система / Китаев В. Н., Китаева Е. Н., Новоселова Н. В. ; № 2013112091 ; заявл. 18.03.2013, зарег. 10.06.2015.
3. Семенов А. Д., Юрков Н. К. Моделирование систем управления. СПб. : Лань, 2022. 328 с.
4. Юрков Н. К. Технология производства электронных средств : учебник. СПб. : Лань, 2014. 480 с.
5. Петелин К. С., Рыбаков И. М., Юрков Н. К. Модели и метод организации концептуального мультипроектного управления // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2014. № 3. С. 10–18.
6. Гришко А. К., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Математическое моделирование системы обеспечения тепловых режимов конструктивно-функциональных модулей радиоэлектронных комплексов // Проектирование и технология электронных средств. 2015. № 3. С. 27–31.
7. Жаднов В. В., Юрков Н. К. Особенности конструирования бортовой космической аппаратуры : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. 112 с.

### References

1. Patent 2762663 Russian Federation, MPK N 01 N 1/42. Limit switch. Kitaev V.N., Filippov M.A., Ekimov N.V., Tenetilov G.V.; No. 2021111093; appl. 19.04.2021, reg. 21.12.2021. (In Russ.)
2. Patent 2552349 Russian Federation, MPK N 01 N 1/42. Contact system. Kitaev V.N., Kitaeva E.N., Novoselova N.V.; No. 2013112091; appl. 18.03.2013, reg. 10.06.2015. (In Russ.)
3. Semenov A.D., Yurkov N.K. *Modelirovanie sistem upravleniya = Modeling of control systems*. Saint Petersburg: Lan', 2022:328. (In Russ.)
4. Yurkov N.K. *Tekhnologiya proizvodstva elektronnykh sredstv: uchebnik = Technology of production of electronic means : textbook*. Saint Petersburg: Lan', 2014:480. (In Russ.)
5. Petelin K.S., Rybakov I.M., Yurkov N.K. Models and method of organization of conceptual multiproject management. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2014;(3):10–18. (In Russ.)
6. Grishko A.K., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Mathematical modeling of the system for providing thermal modes of constructive and functional modules of radioelectronic complexes. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic means*. 2015;(3):27–31. (In Russ.)
7. Zhadnov V.V., Yurkov N.K. *Osobennosti konstruirovaniya bortovoy kosmicheskoy apparatury: ucheb. posobie = Design features of onboard space equipment : textbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2012:112. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Владимир Николаевич Китаев

начальник конструкторского отдела,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, Челябинская область,  
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

#### Роман Львович Афанасьев

заместитель начальника отдела  
прикладных исследований,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, Челябинская область,  
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

#### Vladimir N. Kitaev

Head of the design department,  
Russian Federal Nuclear Center –  
All-Russian Scientific Research  
Institute of Technical Physics  
named after Academician E. I. Zababakhin  
(13 Vasilieva street, Snezhinsk,  
Chelyabinsk region, Russia)

#### Roman L. Afanas'ev

Deputy head of the applied research department,  
Russian Federal Nuclear Center –  
All-Russian Scientific Research  
Institute of Technical Physics  
named after Academician E. I. Zababakhin  
(13 Vasilieva street, Snezhinsk,  
Chelyabinsk region, Russia)

**Максим Владимирович Петров**

инженер-исследователь  
отдела прикладных исследований,  
Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
имени академика Е. И. Забабахина  
(Россия, Челябинская область,  
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

**Maksim V. Petrov**

Research engineer of the applied research department,  
Russian Federal Nuclear Center –  
All-Russian Scientific Research  
Institute of Technical Physics  
named after Academician E. I. Zababakhin  
(13 Vasilieva street, Snezhinsk,  
Chelyabinsk region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 15.11.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 20.12.2021**

**Принята к публикации/Accepted 10.02.2022**