

## ИНЕРЦИОННЫЙ ВКЛЮЧАТЕЛЬ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ ИНЕРЦИОННОГО ТЕЛА

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 обл., Россия  
<sup>1</sup> kb2@uniitf.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Инерционные выключатели используются в подвижных объектах для коммутации электрических цепей технических систем. Срабатывание подобных приборов происходит в основном при наборе интеграла линейного ускорения, с которым объект перемещается в пространстве. Для интегрирования линейного ускорения традиционно используются магнитоиндукционные и гидравлические демпферы. В ряде случаев гидравлические демпферы как упрощающие конструкции инерционных выключателей более предпочтительны. В работе представлены результаты разработки конструкции инерционного выключателя с гидравлическим демпфированием инерционного тела, приведена его математическая модель – составленные дифференциальные уравнения, описывающие движения подвижных конструктивных элементов, а также условия начала движения. *Материалы и методы.* При составлении дифференциальных уравнений были приняты следующие допущения: жидкость считаем несжимаемой; изменения размеров деталей инерционного выключателя за счет изменения температуры окружающей среды от номинальной не учитываются; изменение вязкости демпфирующей жидкости от изменения температуры окружающей среды от нормальной не учитывается. Основная особенность разработанной конструкции инерционного выключателя, отличающая его от инерционных приборов аналогичного назначения, – использование дополнительной магнитной системы, обеспечивающей «падающую» силовую характеристику системы инерционное тело – рабочая пружина с минимальным силовым воздействием магнитной системы на инерционное тело на начальном участке его движения и резко возрастающим силовым воздействием на конечном участке, достаточным для надежного переключения контактной системы с увеличенным количеством контактов, обеспечивающих пропускание токов в широком диапазоне значений с малыми падением напряжения в контактном переходе. Переключение контактной системы из исходного состояния происходит при поступательном перемещении переключателя контактной системы навстречу инерционному телу с преодолением усилия рабочей пружины и сил инерции, действующих на переключатель. Конструкция разработанного инерционного выключателя обеспечивает специально введенными блокирующими элементами надежное сохранение исходного состояния контактной системы во всех условиях эксплуатации подвижных объектов, в которых он может применяться. *Результаты и выводы.* Представленные результаты работ показывают возможность создания надежного и технологичного инерционного выключателя, предназначенного для технических систем автономных подвижных объектов.

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

**Для цитирования:** Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Инерционный выключатель с гидравлическим демпфированием инерционного тела // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 88–97. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10

## INERTIA SWITCH WITH HYDRAULIC DAMPING OF THE INERTIAL BODY

V.N. Kitaev<sup>1</sup>, R.L. Afanasiev<sup>2</sup>, M.V. Petrov<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia  
<sup>1</sup> kb2@uniitf.ru

**Abstract.** *Background.* Inertial switches are used in mobile objects for switching of electrical circuits of technical systems. Operation of similar devices happens generally at a set of integral of linear acceleration with which an object moves in space. For integration of linear acceleration magnetic-induction and hydraulic dampers are traditionally used. In some cases hydraulic dampers as the simplifying designs of inertial switches, are more preferable. In work results of development of a design of the inertial switch with hydraulic damping of an inertial body are presented, its mathematical model – the worked-out differential equations describing movements of mobile structural elements and also conditions of a start of motion is given. *Materials and methods.* By drawing up the differential equations the following assumptions were accepted: we consider liquid incompressible; changes of the sizes of details of the inertial switch due to temperature

change of the environment from nominal are not considered; change of viscosity of the damping liquid from temperature change of the environment from normal is not considered. The main feature of the developed design of the inertial switch distinguishing it from inertial devices of similar appointment – use of the additional magnetic system providing the «falling» power system performance an inertial body – a working spring with the minimum power impact of a magnetic system on an inertial body on the initial site of its movement and sharply increasing power influence on the final site, sufficient for reliable switching of a contact system with the increased number of the contacts providing transmission of currents in the wide range of values with small voltage drops in contact transition. Switching of a contact system from an initial state happens at forward movement of a switching element of a contact system towards to an inertial body to overcoming effort of a working spring and forces of inertia operating on a switching element. The design of the developed inertial switch provides with specially entered blocking elements reliable preservation of an initial condition of a contact system in all service conditions of mobile objects in which it can be used. *Results and conclusions.* The presented results of works show a possibility of creation of the reliable and technological inertial switch intended for the technical systems of autonomous mobile objects.

**Keywords:** inertia switch, hydraulic damper, inertial body, contact system, mathematical model, differential equations

**For citation:** Kitaev V.N., Afanasiev R.L., Petrov M.V. Inertia switch with hydraulic damping of the inertial body. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(1):88–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10

### Необходимость разработки

Для коммутации электрических цепей систем подвижных объектов традиционно используются пороговые инерционные выключатели, коммутирующие электрические цепи технических систем при движении объектов.

Разработанная ранее конструкция инерционного выключателя с гидравлическим демпфированием инерционного тела [1, 2] обеспечивала выполнение предъявленных требований по надежности.

С целью упрощения конструкции и повышения надежности был разработан новый инерционный выключатель [3] с увеличенным количеством контактов, конструкция которого свободна от недостатков прототипа [1].

### Конструкция

Конструкция инерционного выключателя приведена на рис. 1, 2.

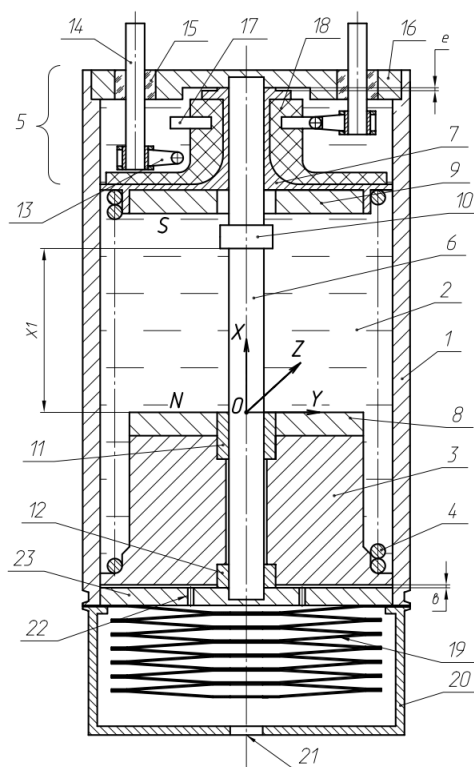


Рис. 1. Инерционный выключатель в исходном состоянии

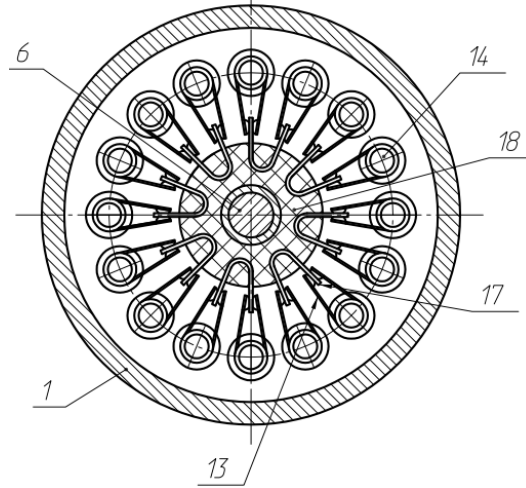


Рис. 2. Контактная система

На рис. 1 приведен осевой разрез инерционного выключателя в исходном состоянии; на рис. 2 – размещение контактов контактной системы; на рис. 3 – графики зависимости усилий, действующих на инерционное тело, от расстояния между постоянными магнитами.

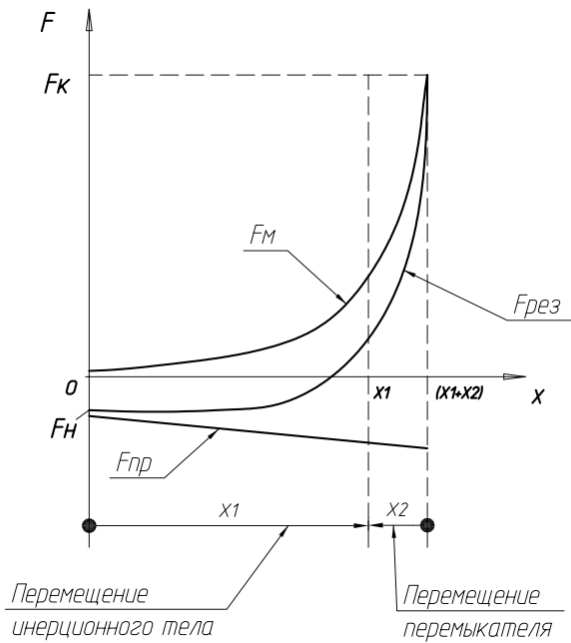


Рис. 3. Силовые характеристики магнитов и рабочей пружины при перемещении инерционного тела и переключателя

В герметичном цилиндрическом корпусе 1 (рис. 1–3), заполненном демпфирующей изоляционной жидкостью 2, размещены инерционное тело 3, поджатое пружиной 4, и контактная система 5. Демпфирующая жидкость 2 имеет рабочий диапазон температур, с запасом перекрывающий диапазон температур эксплуатации объекта применения. Инерционное тело 3 и переключатель 7 контактной системы 5 установлены соосно на цилиндрической направляющей 6, размещенной вдоль центральной оси корпуса 1. На обращенных друг к другу торцах инерционного тела 3 и переключателя 7 закреплены соответственно постоянные магниты 8, 9. Магниты 8, 9 закреплены разноименными полюсами друг к другу. Цилиндрическая пружина 4 размещена между инерционным телом 3 и переключателем 7. На цилиндрической направляющей 6 между инерционным телом 3 и переключателем 7 выполнен выступ 10, ограничивающий осевые перемещения навстречу друг к другу инерционного тела 3 и переключателя 7. Осевой ход  $x_1$  инерционного тела 3 многократно превосходит осевой ход  $x_2$  переключателя 7, который минимален, но достаточен для переключения контактной системы 5.

Инерционное тело 3 установлено на цилиндрической направляющей 6 на втулках 11, 12, выполненных из антифрикционного материала для снижения трения скольжения при движении инерционного тела 3 на цилиндрической направляющей 6.

Инерционное тело 3 и переключатель 7 установлены в исходных осевых положениях с зазорами  $b$  и  $e$  их противоположных торцов соответственно (рис. 1) с корпусными деталями (крышками 16, 23). Организованные таким образом зазоры исключают «залипание» инерционного тела 3 и переключателя 7 в начале их движения.

Между торцами постоянных магнитов 8, 9 при встречно перемещенном состоянии до упора в выступ 10 инерционного тела 3 и переключателя 7 организован гарантированный минимальный зазор (на чертежах не показан), исключающий касание торцов магнитов 8, 9, следовательно, предотвращающий их разрушение при значительных механических воздействиях. Инерционное тело 3 и переключатель 7 сопряжены по внешнему диаметру с внутренним диаметром корпуса 1 и по внутреннему диаметру с внешним диаметром цилиндрической направляющей 6 с малым, но гарантируемым в требуемом диапазоне температур эксплуатации инерционного выключателя зазором, обеспечивающим подвижность инерционного тела и переключателя.

Контактная система 5 состоит из упругих U-образных контактов 13, закрепленных на токовыводах 14 двух уровней, размещенных на крышке 16 по окружности вокруг переключателя 7. Токовыводы 14 закреплены на крышке 16 через изоляторы 15. В изоляторе 18 переключателя 7 армированы V-образные токопроводящие ножи 17, взаимодействующие с упругими контактами 13 при переключении контактной системы 5. Контактная система 5 переключается перемещающимся по цилиндрической направляющей 6 переключателем 7. Конструкция контактной системы 5 с осевым перемещением переключателя 7 обеспечивает увеличенное число контактов со стабильными электрическими параметрами при ограниченном диаметре контактной системы, а следовательно, и прибора в целом. На рис. 2 показана конструкторская реализация в приборе 8 контактов. Соотношение замыкающих и замыкающих контактов может быть любым.

Сильфон 19 закреплен на крышке 23. Внутренний объем сильфона 19 через отверстия 22 соединен с внутренним объемом корпуса 1 и выполняет функцию компенсатора температурного изменения объема жидкости 2, заполняющей прибор. Возможные повреждения сильфона 19 предотвращает защитный кожух 20, закрепленный с торца корпуса 1.

Инерционный выключатель работает следующим образом. При наличии ускорения  $a$  в направлении оси чувствительности с величиной, обеспечивающей превышение усилия предварительного поджатия пружины 4, инерционное тело 3 начинает перемещаться, сжимая пружину 4. Демпфирующая жидкость 2 перетекает через кольцевой зазор между корпусом 1 и фланцем инерционного тела 3, а также через зазоры между втулками 11, 12 и цилиндрической направляющей 6, отслеживая величину расхода жидкости 2 через зазоры значение действующего линейного ускорения, т.е. интегрируется ускорение. Перемещение  $x_1$  инерционного тела 3 ограничивается выступом 10. Возросшее усилие взаимного притяжения постоянных магнитов 8, 9 преодолевает усилие пружины 4 и силу инерции, действующую на переключатель 7, перемещает переключатель 7 в противоположную сторону на величину  $x_2$  также до упора в выступ 10. При этом соответствующие токопроводящие ножи 17 переключателя 7 выходят из взаимодействия с упругими контактами 13 верхнего уровня и взаимодействуют с упругими контактами 13 нижнего уровня, формируя электрические цепи [4].

Характерные графики, поясняющие зависимость сил, действующих на инерционное тело 3 в осевом направлении при его перемещении из исходного положение в конечное, показаны на рис. 3, где  $F_{пр}$  – сила пружины 4;  $F_m$  – сила взаимодействия постоянных магнитов 8, 9;  $F_{рез}$  – результирующая (суммарная) сила пружины 4 и постоянных магнитов 8, 9, действующая на инерционное тело 3;  $F_n$  – результирующая сила в начале движения;  $F_k$  – результирующая сила в конце движения;  $X_1$  – полный ход (осевое перемещение) инерционного тела 3 по оси  $x$ ;  $X_2$  – полный ход (осевое перемещение) переключателя 7 в направлении, противоположном оси  $x$ .

Графики показывают, что результирующее (суммарное) силовое воздействие  $F_{рез}$  пружины 4 и постоянных магнитов 8, 9 на инерционное тело 3 на большем участке его движения положительное (рис. 3), т.е. стремится вернуть инерционное тело 3 в исходное положение, а на конечном участке – отрицательное, т.е. способствует перемещению инерционного тела 3 в конечное осевое положение и удерживает его в этом положении.

При сближении постоянных магнитов 8, 9 из-за перемещения переключателя 7 к инерционному телу 3 на величину  $X_2$  резко возросшее усилие взаимодействия магнитов 8, 9 обеспечивает сохранение переключенного состояния контактной системы 5.

Более подробное описание технических решений инерционного включателя приведено в патенте [3].

### Математическая модель инерционного включателя

Введем прямоугольную правую систему координат  $OXYZ$ , связанную с инерционным включателем. Начало  $O$  системы координат – в центре начального положения поверхности постоянного магнита  $\delta$  инерционного тела. Направления осей показаны на рис. 1. Орты осей являются правой тройкой векторов [5].

Перемещение инерционного тела от начального положения по оси  $OX$  обозначим через  $X_{ит}$  ( $X1$  – максимальная координата  $X_{ит}$ ). Перемещение переключателя от начального положения по оси  $OY$  обозначим через  $X_{пер}$  ( $X2$  – максимальная координата  $X_{пер}$ ).

Для проведения анализа и расчетов элементов конструкции разработана 3D-модель инерционного включателя.

При составлении дифференциальных уравнений были приняты следующие допущения:

- жидкость считаем несжимаемой;
- изменения размеров деталей инерционного включателя за счет изменения температуры окружающей среды (от номинальной  $T_{ж} = 20$  °C) не учитываются;
- изменение вязкости демпфирующей жидкости от изменения температуры окружающей среды (от нормальной  $T_{ж} = 20$  °C) не учитывается.

Сила действует на подвижную часть инерционного включателя – инерционное тело с постоянным магнитом  $\delta$ , втулками  $11$ ,  $12$  и переключатель с постоянным магнитом  $9$ .

Сила инерции, действующая на инерционное тело  $\vec{F}_{ин\_ит}$ , определяется следующим образом:

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

где  $m_{пр\_ит}$  – приведенная масса инерционного тела;  $\vec{a}_{ив\_ит}$  – ускорение летательного аппарата в месте расположения инерционного тела инерционного включателя:

$$\vec{a}_{ив\_ит} = (a_{ив\_ит\_x}; a_{ив\_ит\_y}; a_{ив\_ит\_z}); \quad (2)$$

$a_{ив\_ит\_x}, a_{ив\_ит\_y}, a_{ив\_ит\_z}$  – проекция  $\vec{a}_{ив\_ит}$  на оси системы координат  $OXYZ$ .

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

$$\vec{F}_{ин\_ит} = -m_{пр\_ит} (a_{ив\_ит\_x}; a_{ив\_ит\_y}; a_{ив\_ит\_z}). \quad (3)$$

Приведенная масса инерционного тела определяется по формуле

$$m_{пр\_ит} = m_{ит} + m_{вт11} + m_{вт12} + m_{маг\_ит} + \frac{m_{пр}}{3}, \quad (4)$$

где  $m_{ит}$ ,  $m_{вт11}$ ,  $m_{вт12}$ ,  $m_{маг\_ит}$ ,  $m_{пр}$  – масса инерционного тела, масса втулки  $11$ , масса втулки  $12$ , масса постоянного магнита  $\delta$ , масса пружины  $4$  соответственно.

Аналогичным образом определяется сила инерции, действующая на переключатель  $\vec{F}_{ин\_пер}$ :

$$\vec{F}_{ин\_пер} = -m_{пр\_пер} (a_{ив\_пер\_x}; a_{ив\_пер\_y}; a_{ив\_пер\_z}). \quad (5)$$

Приведенная масса переключателя определяется по формуле

$$m_{пр\_пер} = m_{пер} + m_{маг\_пер} + m_{пр}, \quad (6)$$

где  $m_{пр\_пер}$ ,  $m_{маг\_пер}$ ,  $m_{пр}$  – масса переключателя  $7$ , постоянного магнита  $9$  и пружины  $4$  соответственно;  $\vec{a}_{ив\_пер} = (a_{ив\_пер\_x}; a_{ив\_пер\_y}; a_{ив\_пер\_z})$  – ускорение летательного аппарата в месте расположения переключателя инерционного включателя;  $a_{ив\_пер\_x}, a_{ив\_пер\_y}, a_{ив\_пер\_z}$  – проекции  $\vec{a}_{ив\_пер}$  на оси системы координат  $OXYZ$ .

Сила Архимеда, действующая на инерционное тело  $\vec{F}_{A\_ит}$ , определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{A\_ит} = m_{пр\_ж\_ит} (\vec{a}_{ив\_ит} - \vec{g}), \quad (7)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $m_{пр\_ж\_ит}$  – приведенная масса жидкости, вытесненной инерционным телом:

$$m_{пр\_ж\_ит} = \rho_{ж} V_{пр\_ит}, \quad (8)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости (ГОСТ 13032-77),

$$V_{пр\_ит} = V_{ит} + V_{вт11} + V_{вт12} + V_{маг\_ит} + \frac{V_{пр}}{3}, \quad (9)$$

где  $V_{ит}$ ,  $V_{шт}$ ,  $V_{вт11}$ ,  $V_{вт12}$ ,  $V_{маг\_ит}$ ,  $V_{пр}$  – объем инерционного тела, втулки 11, втулки 12, постоянного магнита 8, пружины 4 соответственно, определяются из 3D-модели инерционного включателя.

Сила Архимеда, действующая на переключатель  $\vec{F}_{A\_пер}$ , определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{A\_пер} = m_{ж\_пер} (\vec{a}_{ив\_пер} - \vec{g}), \quad (10)$$

$m_{пр\_ж\_пер}$  – приведенная масса жидкости, вытесненной переключателем с постоянным магнитом 9 и пружиной 4:

$$m_{пр\_ж\_пер} = \rho_{ж} V_{пр\_пер}, \quad (11)$$

$$V_{пр\_пер} = V_{пер} + V_{маг\_пер} + V_{пр}, \quad (12)$$

где  $V_{пер}$ ,  $V_{маг\_пер}$ ,  $V_{пр}$  – объем переключателя, постоянного магнита 9 и пружины 4 соответственно, определяются из 3D-модели инерционного включателя.

Величина силы упругости пружины 4  $F_{пр}$  (может менять свое направление по оси OX) определяется следующим образом:

$$F_{пр} = F_{пр\_0} + C_{пр} (X_{пер} - X_{ит}), \quad (13)$$

где  $F_{пр\_0}$  – начальное усилие пружины;  $C_{пр}$  – коэффициент упругости пружины (жесткость).

Сила  $\vec{F}_{р\_ит}$  действующая на втулки 11, 12 со стороны цилиндрической направляющей определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{р\_ит} = \vec{F}_{тр\_ит} + \vec{N}_{11} + \vec{N}_{12}, \quad (14)$$

где  $\vec{F}_{тр\_ит}$  – сила трения втулок 11, 12 инерционного тела о цилиндрическую направляющую. Ее величина определяется следующим образом:

если  $\frac{dX_{ит}}{dt} \neq 0$ , то

$$F_{тр\_ит} = \mu_{ит\_с} (N_{11} + N_{12}); \quad (15)$$

если  $\frac{dX_{ит}}{dt} = 0$ , то

$$F_{тр\_ит} \leq \mu_{ит\_п} (N_{11} + N_{12}), \quad (16)$$

где  $\mu_{ит\_с}$ ,  $\mu_{ит\_п}$  – коэффициент трения скольжения и покоя соответственно;  $\vec{N}_{11}$ ,  $\vec{N}_{12}$  – нормальные составляющие реакций сил, действующих на цилиндрическую направляющую со стороны втулок 11, 12.

Сила  $\vec{F}_{р\_пер}$ , действующая на переключатель со стороны цилиндрической направляющей, определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{\text{р\_пер}} = \vec{F}_{\text{тр\_пер}} + \vec{N}_7, \quad (17)$$

где  $\vec{F}_{\text{тр\_пер}}$  – сила трения переключателя о цилиндрическую направляющую. Ее величина определяется следующим образом:

если  $\frac{dX_{\text{ит}}}{dt} \neq 0$ , то

$$F_{\text{тр\_пер}} = \mu_{\text{пер\_с}} N_7; \quad (18)$$

если  $\frac{dX_{\text{ит}}}{dt} = 0$ , то

$$F_{\text{тр\_пер}} \leq \mu_{\text{пер\_п}} N_7, \quad (19)$$

где  $\mu_{\text{пер\_с}}$ ,  $\mu_{\text{пер\_п}}$  – коэффициент трения скольжения и покоя соответственно;  $\vec{N}_7$  – нормальная составляющая реакции силы, действующей на цилиндрическую направляющую со стороны переключателя.

Сила  $\vec{F}_{\text{р\_нож}}$ , действующая на упругий контакт контактной системы переключателя со стороны токопроводящего ножа, определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{\text{р\_нож}} = (\vec{F}_{\text{тр\_нож}} + \vec{N}_{17}), \quad (20)$$

где  $\vec{F}_{\text{тр\_нож}}$  – сила трения токопроводящего ножа об упругие контакты. Ее величина определяется следующим образом:

если  $\frac{dX_{\text{ит}}}{dt} \neq 0$ , то

$$F_{\text{тр\_нож}} = \mu_{\text{нож\_с}} N_{17}; \quad (21)$$

если  $\frac{dX_{\text{ит}}}{dt} = 0$ , то

$$F_{\text{тр\_нож}} \leq \mu_{\text{нож\_п}} N_{17}, \quad (22)$$

где  $\mu_{\text{нож\_с}}$ ,  $\mu_{\text{нож\_п}}$  – коэффициент трения скольжения и покоя соответственно;  $\vec{N}_{17}$  – нормальная составляющая реакции силы, действующей на токопроводящие ножи со стороны упругих контактов.

Величину силы гидравлического сопротивления  $F_{\text{гс\_ит}}$  при протекании жидкости через кольцевой зазор между корпусом и фланцем инерционного тела, а также через зазоры между втулками  $I1$ ,  $I2$  инерционного тела и цилиндрической направляющей будем определять по следующей формуле:

$$F_{\text{гс\_ит}} = \Delta p_{\text{ит}} S_{\text{ит}}, \quad (23)$$

где  $\Delta p_{\text{ит}}$  – перепад давления жидкости на инерционном теле (перед и за телом);  $S_{\text{ит}}$  – площадь торцевой поверхности инерционного тела (с фланцем):

$$S_{\text{ит}} = \frac{\pi d_{\text{ит}}^2}{4}, \quad (24)$$

$d_{\text{ит}}$  – внешний диаметр инерционного тела.

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

При перемещении инерционного тела с площадью поверхности  $S_{\text{ит}}$  на величину  $\Delta X_{\text{ит}}$  происходит вытеснение жидкости объемом  $\Delta V_{\text{ит}}$ :

$$\Delta V_{\text{ит}} = S_{\text{ит}} \Delta X_{\text{ит}}, \quad (25)$$

которая перетекает за промежуток времени  $\Delta t$  через кольцевой зазор между корпусом и фланцем инерционного тела, а также через зазоры между втулками  $I1$ ,  $I2$  инерционного тела и цилиндрической направляющей.

С другой стороны, имеем

$$\Delta V_{\text{ит}} = Q_{\text{ит}} \Delta t, \quad (26)$$

где  $Q_{\text{ит}}$  – суммарный расход жидкости через зазоры.

Приравнявая соотношения (25) и (26), после ряда преобразований получаем следующее соотношение:

$$\frac{\Delta X_{\text{ит}}}{\Delta t} = \frac{Q_{\text{ит}}}{S_{\text{ит}}}. \quad (27)$$

После предельного перехода в выражении (27) при  $\Delta t \rightarrow 0$  с учетом того, что

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X_{\text{ит}}}{\Delta t} = |v_{\text{ит}}|, \quad (28)$$

имеем следующее соотношение для определения величины суммарного расхода жидкости:

$$Q_{\text{ит}} = |v_{\text{ит}}| S_{\text{ит}}, \quad (29)$$

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

С другой стороны, суммарный расход  $Q_{\text{ит}}$  жидкости через зазоры можно определить следующим образом:

$$Q_{\text{ит}} = Q_{\text{к\_ит}} + Q_{\text{вт\_напр}}, \quad (30)$$

где  $Q_{\text{к\_ит}}$  – расход жидкости через кольцевой зазор между корпусом и фланцем инерционного тела, определяется по работе [6] как расход жидкости через кольцевую щель с учетом движения инерционного тела (поршня);  $Q_{\text{вт\_напр}}$  – расход жидкости через зазоры между втулками 11, 12 инерционного тела и цилиндрической направляющей, определяется по работе [6] как расход жидкости через кольцевую щель с учетом движения инерционного тела (поршня).

Величина силы гидравлического сопротивления  $F_{\text{гс\_пер}}$  при протекании жидкости через кольцевой зазор между корпусом и переключателем, а также через зазор между цилиндрической направляющей и переключателем будем определять по следующей формуле:

$$F_{\text{гс\_пер}} = \Delta p_{\text{пер}} S_{\text{пер}}, \quad (31)$$

где  $\Delta p_{\text{пер}}$  – перепад давления жидкости на переключателе (перед и за телом);  $S_{\text{пер}}$  – площадь торцевой поверхности переключателя:

$$S_{\text{пер}} = \frac{\pi d_{\text{пер}}^2}{4}, \quad (32)$$

$d_{\text{пер}}$  – внешний диаметр переключателя.

Перепад давления жидкости на переключателе будем определять из следующих соображений.

При перемещении переключателя с площадью поверхности  $S_{\text{пер}}$  на величину  $\Delta X_{\text{пер}}$  происходит вытеснение жидкости объемом  $\Delta V_{\text{пер}}$ :

$$\Delta V_{\text{пер}} = S_{\text{пер}} \Delta X_{\text{пер}}, \quad (33)$$

которая перетекает за промежуток времени  $\Delta t$  через кольцевой зазор между корпусом и переключателем, а также через зазор между переключателем и цилиндрической направляющей.

С другой стороны, имеем

$$\Delta V_{\text{пер}} = Q_{\text{пер}} \Delta t, \quad (34)$$

где  $Q_{\text{пер}}$  – суммарный расход жидкости через зазоры.

Приравнявая соотношения (33) и (34), после ряда преобразований получаем следующее соотношение:

$$\frac{\Delta X_{\text{пер}}}{\Delta t} = \frac{Q_{\text{пер}}}{S_{\text{пер}}}. \quad (35)$$



После предельного перехода в выражении (35) при  $\Delta t \rightarrow 0$  с учетом того, что

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X_{\text{пер}}}{\Delta t} = |v_{\text{пер}}|, \quad (36)$$

имеем следующее соотношение для определения величины суммарного расхода жидкости:

$$Q_{\text{ит}} = |v_{\text{пер}}| S_{\text{пер}}, \quad (37)$$

где  $v_{\text{пер}}$  – скорость движения переключателя.

С другой стороны, суммарный расход  $Q_{\text{пер}}$  жидкости через зазоры можно определить следующим образом:

$$Q_{\text{пер}} = Q_{\text{к_пер}} + Q_{\text{пер_напр}}, \quad (38)$$

где  $Q_{\text{к_пер}}$  – расход жидкости через кольцевой зазор между корпусом и переключателем, определяется по работе [6] как расход жидкости через кольцевую щель с учетом движения переключателя (поршня);  $Q_{\text{пер_напр}}$  – расход жидкости через зазор между переключателем и цилиндрической направляющей, определяется по работе [6] как расход жидкости через кольцевую щель с учетом движения инерционного тела (поршня).

Величина силы взаимодействия постоянных магнитов  $\delta, 9 F_{\text{маг}}$  определяется путем интерполяции по таблице ее значений, рассчитанных с использованием методов конечно-элементного анализа.

Уравнения движения инерционного тела и переключателя запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} m_{\text{пр\_ит}} \vec{a}_{\text{ит}} = \vec{F}_{\text{ин\_ит}} + \vec{F}_{\text{А\_ит}} + \vec{F}_{\text{пр}} + \vec{F}_{\text{р\_ит}} + \vec{F}_{\text{гс\_ит}} + \vec{F}_{\text{маг}}, \\ m_{\text{пр\_пер}} \vec{a}_{\text{пер}} = \vec{F}_{\text{ин\_пер}} + \vec{F}_{\text{А\_пер}} + \vec{F}_{\text{пр}} + \vec{F}_{\text{р\_пер}} + \vec{F}_{\text{р\_нож}} + \vec{F}_{\text{гс\_пер}} + \vec{F}_{\text{маг}}, \end{cases} \quad (39)$$

где  $\vec{a}_{\text{ит}} = (a_{\text{ит\_x}}; a_{\text{ит\_y}}; a_{\text{ит\_z}})$  и  $\vec{a}_{\text{пер}} = (a_{\text{пер\_x}}; a_{\text{пер\_y}}; a_{\text{пер\_z}})$  – ускорения инерционного тела и переключателя.

Система уравнений (39) решается численно при начальных условиях:  $t = 0$  с,  $X_{\text{ит}} = 0$  м,  $X_{\text{пер}} = 0,014$  м,  $Y_{\text{ит}} = 0$  м,  $Y_{\text{пер}} = 0$  м,  $Z_{\text{ит}} = 0$  м,  $Z_{\text{пер}} = 0$  м.

### Заключение

Представленные результаты работы показывают возможность создания надежного и технологичного инерционного включателя, предназначенного для технических систем автономных подвижных объектов.

### Список литературы

1. Патент РФ 2778658, МПК Н 01 Н 35/14. Инерционный выключатель / Китаев В. Н. № 2022108834 ; заявл. 01.04.2022 ; зарег. 22.08.2022.
2. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель порогового инерционного включателя // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 30–40.
3. Патент РФ 2784377, МПК Н 01 Н 35/14. Инерционный включатель / Китаев В. Н. № 20221289621 ; заявл. 19.09.2022 ; зарег. 24.11.2022.
4. Китаев В. Н. Оптимальные пути решения конструкторских задач на примере создания надежного электро-механического поляризованного переключателя // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 113–116.
5. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика : справ. пособие. М. : Машиностроение, 1971.
6. Китаев В. Н. Конструкция контактной системы электро-механического прибора // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 110–111.

### References

1. Patent RF 2778658, MPK N 01 N 35/14. Inertial switch. Kitaev V.N. № 2022108834; appl. 01.04.2022; reg. 22.08.2022. (In Russ.)
2. Kitaev V.N., Afanas'ev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of a threshold inertial switch. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):30–40. (In Russ.)

3. Patent RF 2784377, МПК N 01 N 35/14. Inertial switch. Kitaev V.N. № 20221289621; appl. 19.09.2022; reg. 24.11.2022. (In Russ.)
4. Kitaev V.N. Optimal ways to solve design problems by the example of creating a reliable electromechanical polarized switch. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;2:113–116. (In Russ.)
5. Bashta T.M. *Mashinostroitel'naya gidravlika: sprav. posobie = Machine-building hydraulics : reference manual*. Moscow: Mashinostroenie, 1971. (In Russ.)
6. Kitaev V.N. Design of the contact system of an electromechanical device. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;2:110–111. (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 обл.,  
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)  
E-mail: kb2@vniitf.ru

#### Роман Львович Афанасьев

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

#### Максим Владимирович Петров

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

#### Vladimir N. Kitaev

Head of the design department,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vassilyev street, Snezhinsk,  
Chelyabinsk region, Russia)

#### Roman L. Afanasiev

Candidate of technical sciences,  
deputy head of department,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vassilyev street, Snezhinsk,  
Chelyabinsk region, Russia)

#### Maxim V. Petrov

Engineer,  
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin  
All-Russian Research Institute of Technical Physics  
(13 Vassilyev street, Snezhinsk,  
Chelyabinsk region, Russia)

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

**Поступила в редакцию/Received 15.12.2023**

**Поступила после рецензирования/Revised 25.12.2023**

**Принята к публикации/Accepted 20.01.2024**