

ИНЕРЦИОННЫЙ ВКЛЮЧАТЕЛЬ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ ИНЕРЦИОННОГО ТЕЛА

В. Н. Китаев¹, Р. Л. Афанасьев², М. В. Петров³

^{1, 2, 3} Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл., Россия
¹ 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. Kitaev¹, R.L. Afanasiev², M.V. Petrov³

^{1, 2, 3} Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia
¹ 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

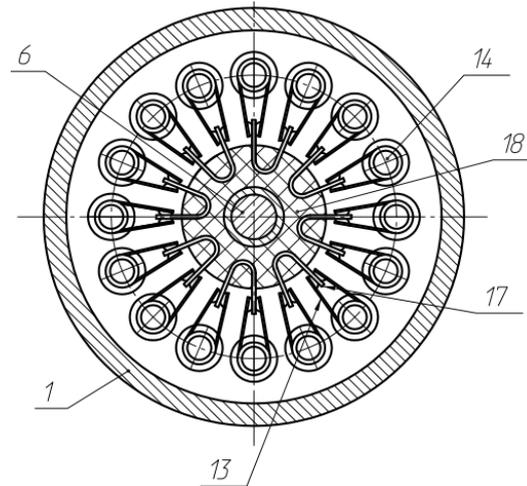


Рис. 2. Контактная система

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.

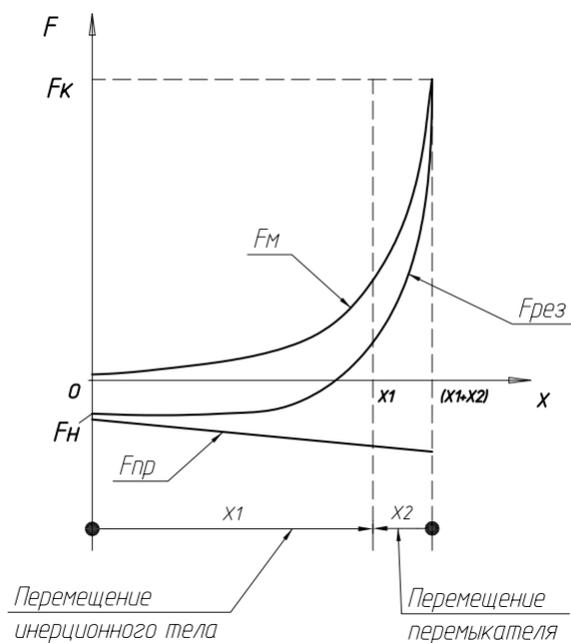


Рис. 3. Силовые характеристики магнитов и рабочей пружины при перемещении инерционного тела и переключателя

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 включателя 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 включатель 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; $X1$ – полный ход (осевое перемещение) инерционного тела 3 по оси x ; $X2$ – 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 $X2$ 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 δ 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 δ , 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 δ , 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 Δt 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.

Приравнивая 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 Δt 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.

Приравнивая 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