

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО ВКЛЮЧАТЕЛЯ

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, Россия
^{1, 2, 3} kb2@vniitf.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Инерционные включатели традиционно 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 включателей более предпочтительны. В работе представлены результаты разработки конструкции инерционного включателя 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 включателя 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 включателя, отличающая его от инерционных приборов аналогичного назначения, – возможность срабатывания при ускорении в любом из двух осевых направлений. Переключение контактной системы из исходного состояния происходит при разблокировании и последующем развороте переключателя контактной системы. Разработанная конструкция инерционного включателя обеспечивает надежное сохранение исходного состояния контактной системы во всех условиях эксплуатации подвижных объектов, и надежное ее переключение при движении объекта применения в течение определенного времени (разгоне, торможении) с ускорением не менее некоторой (уставочной) величины. *Результаты и выводы.* Представленные результаты работ показывают возможность создания надежного и технологичного инерционного включателя, предназначенного для технических систем автономных подвижных объектов.

Ключевые слова: инерционный включатель, гидравлический демпфер, 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. 2025. № 2. С. 71–79. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-8

MATHEMATICAL MODEL OF THE INERTIA SWITCH

V.N. Kitaev¹, R.L. Afanasyev², M.V. Petrov³

^{1, 2, 3} Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute
of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
^{1, 2, 3} kb2@vniitf.ru

Abstract. *Background.* The inertia switches are traditionally used in mobile vehicles for commutating the electric circuits of the engineering systems. Triggering of such devices takes place mainly when having taken integral along linear acceleration while the vehicle's space motion. To integrate the linear acceleration, both magnetic induction and hydraulic dampers are customary used. In a number of cases the hydraulic dampers, simplifying design of inertia switchers, are preferred. Given work presents the results of development of the inertia switch design, its mathematical model: differential equations, describing motion of mobile design elements, and the initial motion conditions, as well. For differential equating as follows assumptions are taken: the liquid is incompressible; no account to inertia switch components variation in dimension due to environmental variation in temperature; no account to dumping liquid viscosity variation due to environmental temperature variation. *Materials and methods.* The major feature of inertia

switch designed to distinguish it from similar inertia devices is its feasible actuation at acceleration along either of the two axial directions. The contact system switches from the initial state at releasing and following turning of the jumper strap. Design of the inertia switch enables reliable retention of the initial state of a contact system at any operation conditions of the mobile vehicles as well as fail-safe switching while vehicle motion during specified period of time (speedup, braking) with acceleration of no less than certain (specified) value. Presented results demonstrate possibility of development of the reliable and technologically effective inertia switch, designed for engineering systems of the independent mobile vehicles.

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

For citation: Kitaev V.N., Afanasyev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of the inertia switch. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(2):71–79. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-8

Актуальность разработки инерционного выключателя

Для оптимального построения технических систем подвижных объектов потребовалась разработка инерционного выключателя, срабатывающего при наличии ускорения в любом из двух осевых направлений.

Применение двух инерционных выключателей, установленных с взаимно противоположным расположением осей чувствительности, в малогабаритном объекте не представилось возможным.

Инерционный выключатель должен с требуемым показателем надежности срабатывать – переключать контактную систему в составе объекта применения при его движении в течение определенного времени (разгоне, торможении) с ускорением не менее некоторой (уставочной) величины. Вместе с тем инерционный выключатель должен сохранять исходное состояние контактной системы при ударных ускорениях, на несколько порядков превышающих уставочное значение ускорения и вибрации в широком диапазоне частот.

В ходе выполнения разработки на основании имеющегося научно-технического задела [1–4] было создано техническое решение инерционного выключателя с инерционным демпфированием инерционного тела, обеспечивающего выполнение предъявленных к нему требований, соответствующих условию «изобретательский уровень» [5].

Конструкция инерционного выключателя

Конструкция инерционного выключателя иллюстрируется рис. 1–9.

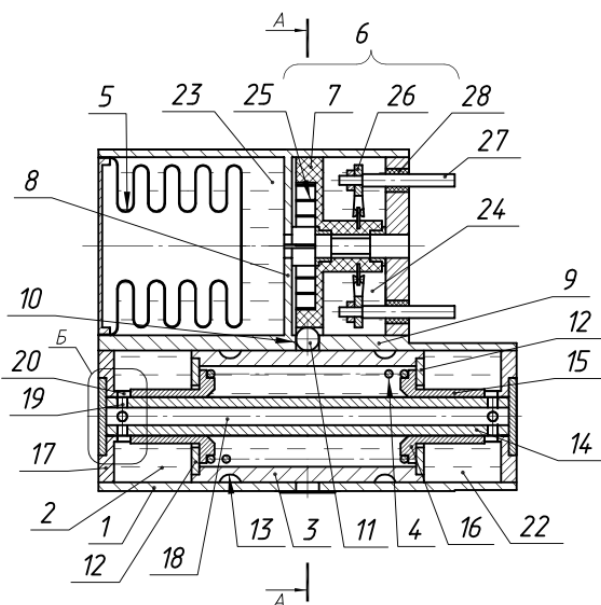


Рис. 1. Инерционный выключатель в исходном состоянии

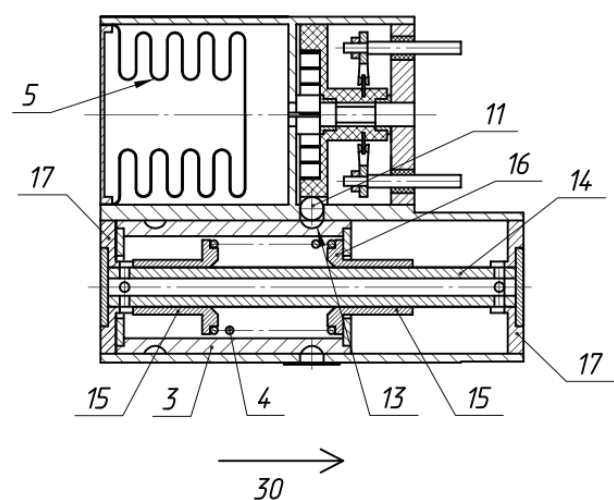


Рис. 2. Инерционное тело, перемещенное в одном из осевых направлений

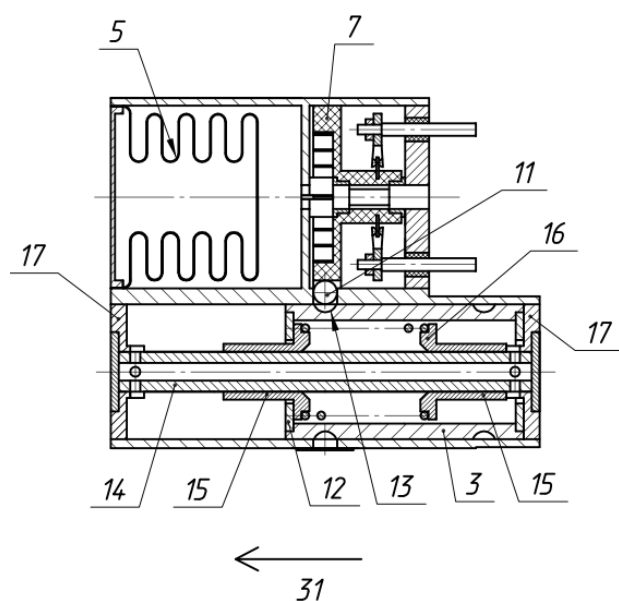


Рис. 3. Инерционное тело переместилось в противоположном осевом направлении

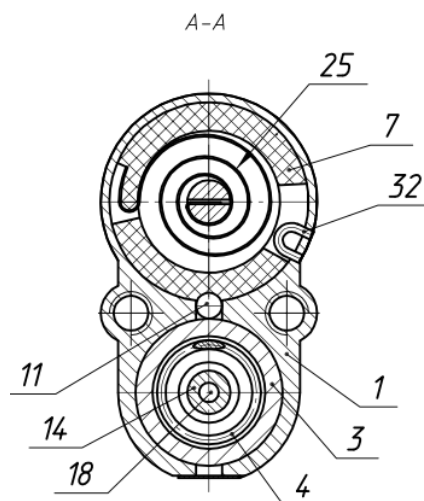


Рис. 4. Блокировка переключателя шариком

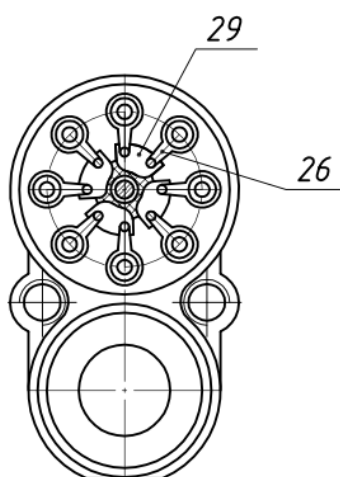


Рис. 5. Конструкция контактной системы

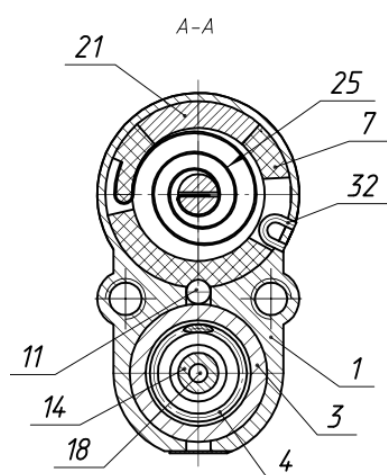


Рис. 6. Конструкции переключателя с постоянным магнитом

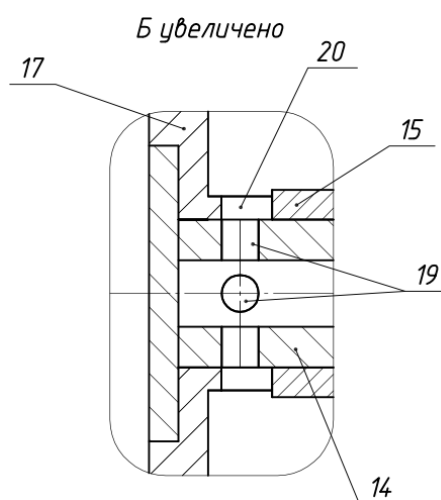


Рис. 7. Конструкция радиальных каналов

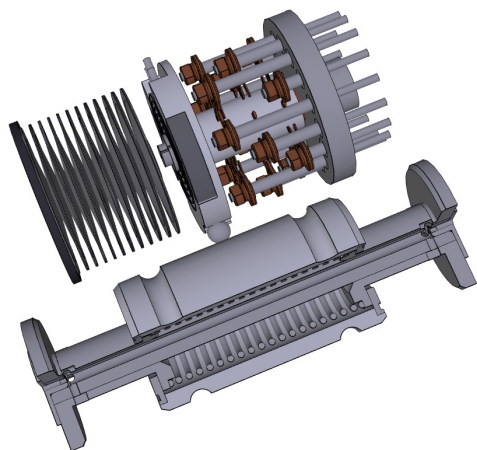


Рис. 8. 3D-модель инерционного включателя, корпус не показан

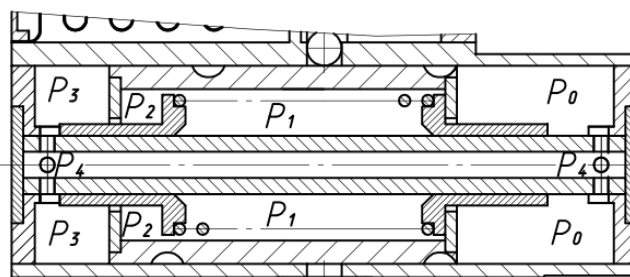


Рис. 9. Давления жидкости в объемах прибора при его срабатывании

Демпфирующая жидкость на рис. 2–9 не показана.

Инерционный включатель выполнен следующим образом. В герметичном корпусе 1 (рис. 1, 4, 5), заполненном демпфирующей диэлектрической жидкостью 2, в разделенных перегородками 8, 9 полостях 22, 23, 24 размещены инерционный груз 3 с рабочей пружиной 4, термокомпенсатор 5 и контактная система 6 с поворотным переключателем 7. Объемы 23 с термокомпенсатором и с контактной системой сообщаются через сквозной канал (не показано) в перегородке 8. Переключатель 7 поджат пружиной кручения 25 и заблокирован от проворота фиксатором в виде шарика 11, контактирующим с инерционным грузом 3 и установленным в цилиндрическом отверстии 10 в перегородке 9 между полостями 22, 24 корпуса 1. Инерционный груз 3 выполнен в виде полого цилиндра 3 с закрепленными по торцам шайбами 12 и с двумя кольцевыми канавками 13 на внешней цилиндрической поверхности для захода блокирующего поворот переключателя 7 шарика 11.

Внутри инерционного груза 3 размещен шток 14, на котором с возможностью осевого перемещения установлены две втулки 15. Каждая втулка 15 имеет наружный торцевой буртик 16. Втулки 15 помещены буртиками 16 в полость инерционного груза 3 между шайбами 12 и ориентированы буртиками 16 навстречу друг другу. Втулки 15 отжаты пружиной 4 в противоположные стороны до упора буртиками 16 в шайбы 12, закрепленные на инерционном грузе 3, а внешними торцами – в корпусные крышки 17. В штоке 14 выполнен сквозной продольный канал 18, сообщающийся в торцевых зонах с внутренним объемом корпуса 1 через выполненные в стенке штока 14 радиальные каналы 19. Радиальные каналы 19 совмещены с выполненными на внутренних торцах корпусных крышек 17 ответными пазами 20, в которые установлен шток 14. Количество радиальных каналов (отверстий) 19 равно количеству пазов 20.

Конструкция инерционного груза 3 в виде полого цилиндра с шайбами 12 и с предложенным соосным расположением втулок 15 и пружины 4 внутри инерционного груза 3, в совокупности выполняющих функции инерционного чувствительного элемента, обеспечивает «двунаправленность» срабатывания инерционного включателя с использованием одного инерционного груза 3 и одной рабочей пружины 4. Обеспечивается одинаковая чувствительность инерционного включателя в обоих осевых направлениях, а также достигается компактность всего прибора по высоте.

Контактная система 6 состоит из упругих контактов 26, установленных на токовыводах 27 со стеклоизоляторами 28. Поворотный переключатель 7 с ножами 29, поворачиваемый спиральной пружиной 25, обеспечивает переключение контактной системы 6. В исходном состоянии контактной системы 6 переключатель 7 заблокирован шариком 11, перемещение которого ограничено внешней цилиндрической поверхностью инерционного груза 3. Ограничитель угла поворота 32 переключателя 7 обеспечивает требуемое взаимное расположение ножей 29 относительно соответствующих упругих контактов 26 в переключенном состоянии контактной системы 6.

Термокомпенсатор в виде сильфона 5 компенсирует температурные изменения объема жидкости 2 в требуемом диапазоне температур внешней среды.

Выполнение в штоке 14 сквозного продольного канала 18, сообщающегося в торцевых зонах с внутренним объемом прибора через выполненные в стенке штока 14 радиальные каналы в виде отверстий 19 и совмещение радиальных каналов 19 с ответными пазами 20 на внутренних торцах, охватывающих шток 14 корпусных крышек 17, с возможностью разворота осевой направляющей 14, позволяет изменением проходного сечения радиальных каналов 19 регулировать гидравлическое сопротивление, следовательно, и расход демпфирующей жидкости 2 через организованные продольный 18 и радиальные 19 каналы при осевом перемещении инерционного груза 3, т.е. дает возможность настраивать интеграл по ускорению срабатывания инерционного включателя (рис. 1, 7). При этом регулировка осуществляется практически в полностью собранном приборе, т.е. значительно упрощается его сборка.

Работа инерционного включателя

Инерционный включатель работает следующим образом. При наличии ускорения в направлении 30 (рис. 2) вдоль оси чувствительности с величиной, обеспечивающей превышение усилия предварительного поджатия пружины 4, инерционный груз 3 вместе с одной из втулок 15 начинает перемещаться, сжимая пружину 4. Демпфирующая жидкость 2 перетекает через радиальные зазоры между инерционным грузом 3 и корпусом 1, инерционным грузом 3 и буртиками 16 втулок 15, штоком 14 и втулками 15, а также через продольный канал 18 и радиальные каналы 19, отслеживая величиной расхода жидкости 2 значение линейного ускорения, т.е. ускорение интегрируется. Перемещение инерционного груза 3 ограничивается корпусной крышкой 17 (рис. 2, 3). Одна из кольцевых канавок 13

совмещается с шариком 11, который отжимается в нее переключателем 7, поворачиваемым спиральной пружиной кручения 25. Затем разблокированный переключатель 7 поворачивается спиральной пружиной 25 далее, переключая контактную систему 6. Ограничитель угла поворота 32 переключателя 7 обеспечивает требуемое взаимное расположение ножей 29 относительно соответствующих упругих контактов 26, при котором соответствующие ножи 29 переключателя 7 заходят в зоны контактирования упругих контактов 26. Переключенное состояние контактной системы 6 сохраняется поджатием переключателя 7 к ограничителю поворота 32 спиральной пружиной кручения 25.

При наличии ускорения в осевом направлении 31 (рис. 3) инерционный груз 3 вместе с соответствующей втулкой 15 смещается в противоположном направлении, совмещая другую кольцевую канавку 13 с шариком 11. В остальном работа инерционного включателя аналогична приведенному ранее.

При необходимости взведения инерционного включателя в процессе изготовления и приемки во фланце переключателя 7 закрепляется постоянный магнит 21 (рис. 6). Приспособлением с постоянным магнитом (на чертежах не показано) переключатель 7 посредством взаимодействия магнитов поворачивается и автоматически блокируется шариком 10, который отжимается из соответствующей кольцевой канавки 13 при возврате инерционного груза 3 в исходное положение пружиной 4. Для обеспечения взведения инерционного включателя корпус 1 выполняется из немагнитного металла, например, стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-2014 или сплава 36НХТЮ ГОСТ 10994-74. Возможность многократного срабатывания и взведения инерционного включателя обеспечивает достоверное подтверждение качества его изготовления, следовательно, и надежности в течение последующего срока эксплуатации.

Обеспечение расходом жидкости 2 через организованные в конструкции инерционного включателя радиальные зазоры и каналы интегрирования линейного ускорения в направлении срабатывания исключает срабатывание прибора от кратковременных ускорений.

Более подробно с конструкцией и работой инерционного включателя можно ознакомиться по описанию изобретения [5].

Математическая модель инерционного включателя

Введем прямоугольную правую систему координат $OXYZ$, связанную с инерционным включателем. Начало системы координат – в центре инерционного груза 3 при его начальном положении. Направления осей показаны на рис. 1.

Введем базовую точку в центре инерционного груза 3 и обозначим ее абсциссу через $X_{пз}$. Диапазон изменения $X_{пз} - [X_1, X_2]$ ($X_1 < 0, X_2 > 0$).

При составлении дифференциальных уравнений были приняты следующие допущения:

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

Силы, действующие на подвижные части инерционного включателя – инерционный груз 3, шайбы 12, одну из втулок 15, пружину 4, рассмотрены ниже.

Сила инерции, действующая на подвижные части $\vec{F}_{ин}$, определяется следующим образом:

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

где $m_{пр}$ – приведенная масса подвижных частей; $\vec{a}_{ив}$ – ускорение в месте расположения центра масс подвижных частей:

$$\vec{a}_{ив} = (a_{ив_x}; a_{ив_y}; a_{ив_z}), \quad (2)$$

где $a_{ив_x}, a_{ив_y}, a_{ив_z}$ – проекции $\vec{a}_{ив}$ на оси системы координат $OXYZ$.

Приведенная (суммарная) масса подвижных частей инерционного чувствительного элемента прибора определяется по формуле

$$m_{пр} = m_{иг} + 2m_{шб} + m_{вт} + \frac{m_{пр}}{3}, \quad (3)$$

где $m_{иг}, m_{шб}, m_{вт}, m_{пр}$ – масса инерционного груза 3, шайбы 12, втулки 15, пружины 4 соответственно.

Сила Архимеда, действующая на подвижные части $\vec{F}_A$, определяется следующим образом:

$$\vec{F}_A = m_{\text{пр_ж}} (\vec{a}_{\text{ив}} - \vec{g}), \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения; $m_{\text{пр_ж}}$ – приведенная масса жидкости, вытесненной подвижными частями:

$$m_{\text{пр_ж}} = \rho_{\text{ж}} V_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; $V_{\text{пр}}$ – приведенный объем подвижных частей:

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{иг}} + 2V_{\text{шб}} + V_{\text{вт}} + V_{\text{пр}}, \quad (6)$$

где $V_{\text{иг}}$, $V_{\text{шб}}$, $V_{\text{вт}}$, $V_{\text{пр}}$ – объем инерционного груза 3, шайбы 12, втулки 15, пружины 4 соответственно.

Величина силы упругости пружины 4 $F_{\text{пр}}$ определяется следующим образом:

$$F_{\text{пр}} = -\text{sign}(X_{\text{пз}}) [F_{\text{пр}_0} + C_{\text{пр}} X_{\text{пз}}], \quad (7)$$

где $\text{sign}(X_{\text{пз}}) = \begin{cases} 1 & \text{при } X_{\text{пз}} > 0 \\ 0 & \text{при } X_{\text{пз}} = 0 \\ -1 & \text{при } X_{\text{пз}} < 0 \end{cases}$; $F_{\text{пр}_0}$ – начальное усилие пружины 4; $C_{\text{пр}}$ – коэффициент упругости пружины 4 (жесткость).

Касательная составляющая реакции ($F_{\text{тр}}$, – сила трения), действующей на инерционный груз 3 со стороны шарика 11 контактной системы 6 определяется следующим образом:

$$F_{\text{тр}} \leq \mu_{\text{тр}} N_{\text{шр}}, \quad (8)$$

где $\mu_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; $N_{\text{шр}}$ – нормальная составляющая реакции, действующей со стороны шарика 11 на инерционное тело 3.

Сила гидравлического сопротивления $\vec{F}_{\text{ге}}$ зависит от разности давлений Δp во внутренних полостях инерционного включателя (см. рис. 9) и определяется следующим образом:

$$F_{\text{ге}} = \sum_{i=1}^{i=6} p_i S_i, \quad (9)$$

где p_i – давление в области с номером i ; S_i – алгебраическая сумма площадей, на которые оказывается давление p_i (каждому слагаемому приписывается знак «+» или «-» в зависимости от направления действия давления).

Перепад давления жидкости во внутренних полостях инерционного включателя будем определять из следующих соображений.

При перемещении подвижного элемента с площадью поверхности $S_{\text{пз}}$ на величину $\Delta X_{\text{пз}}$ происходит вытеснение жидкости объемом ΔV :

$$\Delta V = S_{\text{пз}} \Delta X_{\text{пз}}. \quad (10)$$

Вытесненная жидкость протекает за промежуток времени Δt через зазоры и отверстия.

С другой стороны, имеем

$$\Delta V = Q \Delta t, \quad (11)$$

где Q – суммарный расход жидкости через зазоры и отверстия.

Из выражений (10) и (11), получаем следующее соотношение:

$$\frac{\Delta X_{\text{пз}}}{\Delta t} = \frac{Q}{S_{\text{пз}}}. \quad (12)$$

После предельного перехода в (12) при $\Delta t \rightarrow 0$ с учетом того, что

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X_{пз}}{\Delta t} = \left| \dot{X}_{пз} \right|, \quad (13)$$

имеем следующее соотношение для определения величины суммарного расхода жидкости:

$$Q = \left| \dot{X}_{пз} \right| S_{пз}, \quad (14)$$

где $\dot{X}_{пз}$ – первая производная по времени абсциссы подвижного элемента.

С другой стороны, суммарный расход Q жидкости, перетекающей при движении подвижного элемента из полости P_3 в полости P_0, P_2, P_4 (см. рис. 9), можно определить следующим образом:

$$Q = Q_{30} + Q_{32} + Q_{34}, \quad (15)$$

где Q_{30} – расход жидкости через кольцевой зазор между корпусом I и инерционным грузом 3 ; Q_{32} – расход жидкости через кольцевой зазор между шайбой 12 и втулкой 15 ; Q_{34} – расход жидкости через четыре отверстия в штоке 14 .

Расходы жидкости через зазоры и отверстия будем определять следующим образом [1]:

$$Q_{30} = \frac{S_{кр_гр} \delta_{кр_гр}^2}{12 \eta_{ж} K L_{кр_гр}} (P_3 - P_0) + \frac{S_{кр_гр}}{2} \left| \dot{X}_{пз} \right|, \quad (16)$$

где $S_{кр_гр}$ – площадь зазора между корпусом I и инерционным грузом 3 ; $\delta_{кр_гр}$ – величина зазора между корпусом I и инерционным грузом 3 ; $\eta_{ж}$ – коэффициент динамической вязкости жидкости; K – коэффициент несоосности, $K = 0,4 \div 1$; $L_{кр_гр}$ – длина зазора между корпусом I и инерционным грузом 3 в направлении движения жидкости; P_3, P_0 – давления в соответствующих полостях инерционного включателя (см. рис. 9):

$$Q_{32} = \frac{S_{шб_шт} \delta_{шб_шт}^2}{12 \eta_{ж} K L_{шб_шт}} (P_3 - P_2) + \frac{S_{шб_шт}}{2} \left| \dot{X}_{пз} \right|, \quad (17)$$

где $S_{шб_шт}$ – площадь зазора между шайбой 12 и штоком 14 ; $\delta_{шб_шт}$ – величина зазора между шайбой 12 и штоком 14 ; $L_{шб_шт}$ – длина зазора между шайбой 12 и штоком 14 в направлении движения жидкости; P_3, P_2 – давления в соответствующих полостях инерционного включателя (см. рис. 9):

$$Q_{34} = 4 \mu S_{отв} \sqrt{\frac{2(P_3 - P_4)}{\rho_{ж}}}, \quad (18)$$

где μ – коэффициент расхода; $S_{отв}$ – площадь отверстия в штоке 14 ; P_3, P_4 – давления в соответствующих полостях инерционного включателя (см. рис. 9).

Аналогичным образом определяются разности давлений при протекании жидкости через остальные области инерционного включателя.

Таким образом, имеем систему уравнений, связывающую P_i, S_i, Q_i . Эту систему уравнений можно рассматривать как неявное соотношение для проекции силы гидравлического сопротивления $\vec{F}_{гс}$ на ось абсцисс:

$$\Phi(F_{гс}, \dot{X}_{пз}, P_1, P_2, P_3, P_4, P_0) = 0. \quad (19)$$

Явного выражения для $F_{гс}$ не было получено – значение этой силы рассчитывается путем численного решения (19) на каждом временном шаге.

Уравнения движения инерционного тела запишем в следующем виде:

$$m_{пр} \ddot{X}_{пз} = \left(\vec{F}_{ин} + \vec{F}_A + \vec{F}_{пр} + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_{гс} \right)_x, \quad (20)$$

где $\ddot{X}_{пз}$ – вторая производная по времени $X_{пз}$; $\left(\vec{F}_{ин} + \vec{F}_A + \vec{F}_{пр} + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_{гс} \right)_x$ – проекция на ось OX суммы сил, действующих на инерционное тело.

Уравнение (20) решается численно при начальных условиях: $t = 0$ с, $X_{пз} = 0$ м, $X_1 = X_{\min}$, $X_2 = X_{\max}$ и заданной зависимости ускорения инерционного включателя от времени.

Использование описанной математической модели позволяет определить режимы, при которых срабатывает инерционный включатель, а также подобрать конструктивные параметры, обеспечивающие его срабатывание при требуемых режимах.

Заключение

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

Список литературы

1. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Инерционный включатель с гидравлическим демпфированием инерционного тела // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 88–97. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10
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. Пат. РФ 2778658, МПК H01 H 35/14. Инерционный включатель / Китаев В. Н. № 2022108834 ; заявл. 01.04.2022 ; зарег. 22.08.2022.
4. Пат. РФ 2784377, МПК H01 H 35/14. Инерционный включатель / Китаев В. Н. № 2022124603 ; заявл. 19.09.2022 ; зарег. 24.11.2022.
5. Пат. РФ 2824656, МПК H01 H 35/14. Инерционный включатель / Китаев В. Н., Тенетилов Г. В. № 2024103939 ; заявл. 16.02.2024 ; зарег. 12.08.2024.
6. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика : справ. пособие. М. : Машиностроение, 1971.

References

1. Kitaev V.N., Afanas'ev R.L., Petrov M.V. Inertial switch with hydraulic damping of an inertial body. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):88–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10
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 2778658, MPK H01 H 35/14. *Inertsionnyy vklyuchatel' = Inertial switch*. Kitaev V.N. № 2022; appl. 01.04.2022; reg. 22.08.2022. (In Russ.)
4. Patent RF 2784377, MPK H01 H 35/14. *Inertsionnyy vklyuchatel' = Inertial switch*. Kitaev V.N. № 2022; appl. 19.09.2022; reg. 24.11.2022. (In Russ.)
5. Patent RF 2824656, MPK H01 H 35/14. *Inertsionnyy vklyuchatel' = Inertial switch*. Kitaev V.N., Tenetilov G.V. № 2024103939; appl. 16.02.2024; reg. 12.08.2024. (In Russ.)
6. Bashta T.M. *Mashinostroitel'naya gidravlika. Spravochnoe posobie = Machine-building hydraulics : a reference manual*. Moscow: Mashinostroenie, 1971. (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, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb@vniitf.ru

Роман Львович Афанасьев

заместитель начальника отдела,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, 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 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

Roman L. Afanasyev

Deputy head of department,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

Максим Владимирович Петров

инженер,

Российский федеральный ядерный центр –

Всероссийский научно-исследовательский

институт технической физики

имени академика Е. И. Забабахина

(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)

E-mail: kb2@vniitf.ru

Maksim V. Petrov

Engineer,

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin

All-Russian Research Institute of Technical Physics

(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 05.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 24.04.2025

Принята к публикации/Accepted 01.05.2025