

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО ЗАМЫКАТЕЛЯ

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, Россия  
<sup>1, 2, 3</sup> kb2@vniitf.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Инерционный замыкатель предназначен для использования в системах коммутации электрических цепей задействия систем безопасности подвижных объектов (автомобилей). *Материалы и методы.* Инерционный замыкатель содержит корпус с выполненным из диэлектрического материала основанием, размещенное в корпусе инерционное тело, выполненное в виде тела вращения и поджатое пружиной к верхней части корпуса с возможностью перемещения и/или наклона до взаимодействия торцевой поверхности с электрическими контактными поверхностями, установленными на основании. Инерционное тело выполнено с фланцем, которым оно поджато пружиной до взаимодействия с внутренней и торцевой поверхностями верхней части корпуса. При этом устройство дополнено контактом, установленным в исходном положении с зазорами относительно торцевой поверхности инерционного тела и поверхности основания и выполненным, например, в виде диска с радиальными упругими лепестками с возможностью их прогиба при перемещении и/или наклоне инерционного тела. Выполнение контакта с радиальными лепестками уменьшает усилие, необходимое для его упругой деформации инерционным телом, следовательно, увеличивает величину прогиба радиальных лепестков, увеличивая длительность замыкания. Наличие в формируемой электрической цепи упругих лепестков увеличивает длительность замкнутого состояния контактов при срабатывании инерционного замыкателя, так как после ударного воздействия – спада ударного ускорения, электрические контакты не размыкаются сразу после начала обратного перемещения инерционного тела пружиной в исходное положение, что способствует надежному задействию систем безопасности объекта применения даже при ударных ускорениях малой длительности. Выполнение инерционного тела с фланцем, которым оно поджато пружиной до взаимодействия с внутренней и торцевой поверхностями верхней части корпуса, обеспечивает работоспособность устройства от поперечных ускорений, обеспечивает наклон инерционного тела. Также для обеспечения настройки диаграммы чувствительности с целью адаптации инерционного замыкателя под разные объекты применения и обеспечения меньшей погрешности срабатывания по амплитуде и длительности ударного ускорения инерционное тело выполнено с отверстиями на торцах, диаметр и/или глубина которых определены требуемыми условиями сборки и настройки замыкателя. Также с целью обеспечения требуемой чувствительности инерционного тела в продольном и поперечном направлении инерционное тело выполнено составным с соосно установленным в центральное резьбовое отверстие сменным вкладышем с различной массой. *Результаты и выводы.* Представленные результаты работ показывают возможность создания надежного и технологичного инерционного замыкателя, обеспечивающего надежное срабатывание в системах безопасности подвижных объектов (автомобилей).

**Ключевые слова:** инерционный замыкатель, инерционное тело, надежность срабатывания, пространственная диаграмма срабатывания, математическая модель, дифференциальные уравнения

**Для цитирования:** Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель инерционного замыкателя // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 66–71. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-8

## MATHEMATICAL MODEL OF THE INERTIA CLOSER

V.N. Kitaev<sup>1</sup>, R.L. Afanasyev<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, Russia  
<sup>1, 2, 3</sup> kb2@vniitf.ru

**Abstract.** *Background.* The inertia closer is designed for the electric circuit commutation when initiating the mobile item (vehicle) security systems. *Materials and methods.* The closer package with base of a dielectric material contains the inertial body in the form of revolution body, applied by spring to the top of the package; the body can move and/or tilt to contact electric interfaces, fixed on the base. The inertial body has a flange to tight the body with a spring to contact with inner and end surfaces of the top package. The arrangement has in addition an extra-contact in the initial state bitten about both the face of the inertial body and the base surface; the contact may be in the form of a disk with elastic radial blades, bending when the inertial body moving and/or tilting. The contact with radial blades reduces effort necessary for its elastic deformation by the inertial body, increasing hence the flexure of radial blades to prolong closing duration.

Elastic blades in the electrical circuit make longer the close-contact state after the inertial closer triggering, since deceleration after the impact doesn't result in breaking contact due to reverse motion of the inertial body moved by the spring to the initial state. This guarantees reliable triggering of the security systems even at impact accelerations of short duration. The flange of the inertial body, making contact of the latter with inner and end surfaces of top package, provides device operability under transverse acceleration through inclination of the inertial body. For sensitivity diagrams adjustment to adapt the inertia closer to different application and reduce activation errors, concerning amplitude and impact acceleration duration, the inertial body has holes at the end surfaces, which depth are specified by assembling and settings of the closer. To gain desired lengthwise and crosswise sensitivity the inertial body is of split-type with wear bushing of varying weight, inserting coaxially through central threaded hole. *Results and conclusions.* Shown work demonstrates possibility of development of the reliable and technologically effective inertial closer for failsafe operation of mobile vehicles' security system.

**Keywords:** inertia closer, inertial body, reliable triggering, spatial triggering diagram, mathematical model, differential equations

**For citation:** Kitaev V.N., Afanasyev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of the inertia closer. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = Reliability and quality of complex systems. 2025;(1):66–71. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-8

### Назначение инерционного замыкателя

Инерционный замыкатель предназначен для использования в системах коммутации электрических цепей задействования систем безопасности подвижных объектов (автомобилей).

Техническое решение инерционного замыкателя обеспечивает надежное срабатывание – замыкание контакта с увеличенной длительностью замкнутого состояния при ударном ускорении в продольном и/или поперечном направлениях.

### Конструкция инерционного замыкателя

Конструкция инерционного замыкателя представлена на рис. 1–6.

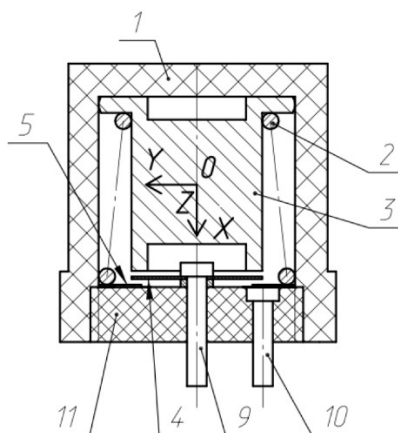


Рис. 1. Инерционный замыкатель в исходном состоянии

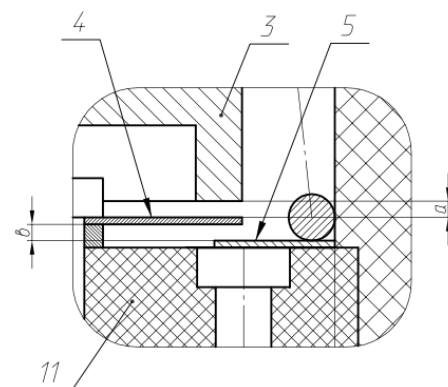


Рис. 2. Межконтактные зазоры

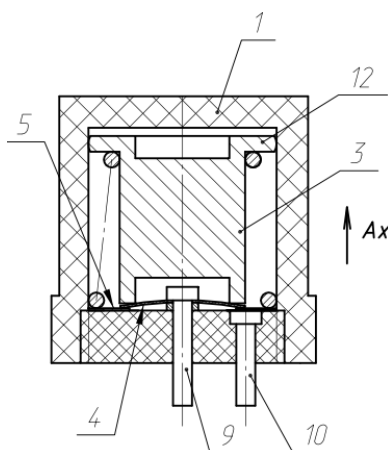


Рис. 3. Инерционный замыкатель в сработавшем состоянии при ускорении в продольном направлении

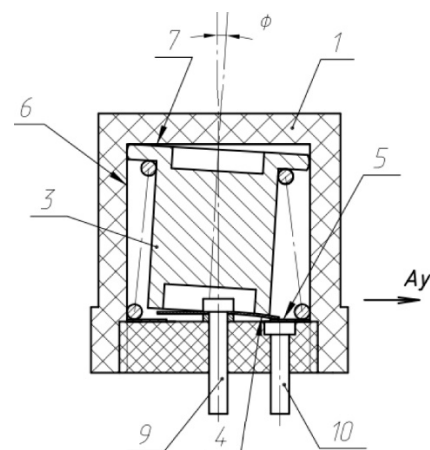


Рис. 4. Инерционный замыкатель в сработавшем состоянии при ускорении в поперечном направлении

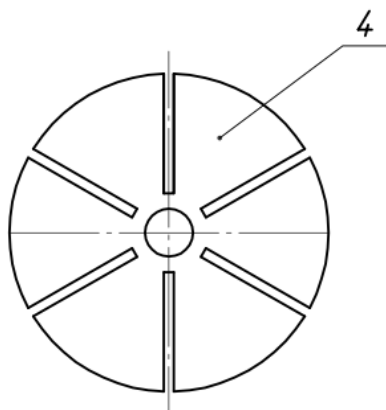


Рис. 5. Конструкция диска с упругими радиальными лепестками

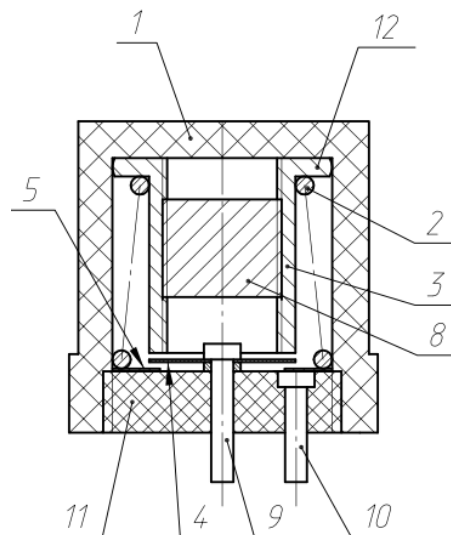


Рис. 6. Вариант конструкции инерционного замыкателя в исходном состоянии с составным инерционным телом

Инерционный замыкатель выполнен следующим образом.

В корпусе 1 (см. рис. 1) из диэлектрического материала с основанием 11, также из диэлектрического материала, размещено поджатое пружиной 2 к верхней части корпуса 1 инерционное тело 3. Инерционное тело 3 выполнено в виде цилиндра с фланцем 12 на торце, которым оно поджато пружиной 2 до взаимодействия с внутренней цилиндрической 6 и торцевой 7 поверхностями верхней части корпуса 1. На основании 11 закреплены на токовыводе 10 электрические контактные поверхности 5 в виде шайбы, и на токовыводе 9 – контакт 4. Токовывод 9 закреплен в центре основания 11, что обеспечивает одинаковую чувствительность в любом поперечном направлении. Контакт 4 выполнен в виде диска с радиальными упругими лепестками (рис. 5) с возможностью их прогиба при перемещении и/или наклоне инерционного тела 3 и установлен в исходном положении с зазорами  $a$  и  $b$  относительно торцевой поверхности инерционного тела 3 и поверхности основания 11 соответственно (см. рис. 2). Инерционное тело 3 установлено с возможностью перемещения и/или наклона до взаимодействия торцевой поверхностью с электрическими контактными поверхностями 5.

На торцах инерционного тела 3 могут быть выполнены отверстия, глубиной и/или диаметром которых в процессе сборки обеспечивается настройка диаграммы чувствительности инерционного замыкателя.

Также инерционное тело 3 может быть выполнено составным (рис. 6) с соосно установленным в центральное резьбовое отверстие сменным вкладышем 8 с различной массой. Массой вкладыша 8 обеспечивается требуемая чувствительность в продольном направлении, а его осевым расположением в инерционном теле 3 – в поперечном направлении.

Настраиваемая диаграмма чувствительности позволит адаптировать заявляемый инерционный замыкатель для разных объектов применения и обеспечить меньшую погрешность срабатывания по амплитуде и длительности ударного ускорения.

Для обеспечения больших контактных давлений между контактами 4, 5, а следовательно, и обеспечения стабильных электрических параметров, инерционное тело 3 может быть выполнено из тяжелого сплава на основе вольфрама.

Для повышения безопасности – снижения вероятности перемыкания проводов коммутируемой электрической цепи в объекте применения корпус 1 выполнен из диэлектрического материала.

### Работа инерционного замыкателя

Инерционный замыкатель работает следующим образом.

При потере скорости от столкновения с преградой инерционное тело 3 перемещается по оси (см. рис. 3) или наклоняется в боковом направлении (см. рис. 4), в зависимости от угла столкновения с преградой, определяющего направление ударного ускорения  $A$ , и касается лепестков диска 4, замыкая электрическую цепь, и далее упруго отгибает их до упора в шайбу 5. Замкнутая электрическая цепь, например системы безопасности автомобиля, задействует натяжители ремней безопасности и/или подушки безопасности.

При спаде ударного ускорения за счет увеличенной упругой деформации лепестков диска 4 электрический контакт между ними и инерционным телом 3 разомкнется не в момент начала отжатия инерционного тела 3 пружиной 2 в исходное положение, а только после возврата лепестков в исходное (недеформированное) состояние, т.е. длительность замкнутого состояния электрической цепи увеличится на время, необходимое для выборки зазора  $b$  (см. рис. 2), повышая надежность срабатывания систем безопасности объекта применения.

### Математическая модель инерционного замыкателя

Введем прямоугольную правую систему координат  $OXYZ$ , связанную с инерционным замыкателем. Начало системы координат – в центре масс инерционного тела 3 при исходном состоянии инерционного замыкателя. Направления осей и ускорения ( $A_x, A_y$ ) показаны на рис. 1. В силу симметрии конструкции будем рассматривать ее функционирование в плоскости  $OXY$  задаваемой линией действия ускорения и осью симметрии корпуса 1.

Перемещение инерционного тела 3 от начального положения по оси  $OX$  обозначим через  $X_{ит}$ .  $X_{ит} = X_a$  – координата в момент контакта инерционного тела 3 с диском 4, зазор  $a$  выбран,  $X_{ит} = X_{max}$  – максимальная координата инерционного тела 3, зазор  $b$  выбран.

Перемещение инерционного тела 3 от начального положения по оси  $OY$  обозначим через  $Y_{ит}$ .  $\varphi$  – угол между осью  $OX$  и осью инерционного тела 3.

Силы, действующие на инерционное тело 3 инерционного замыкателя, рассмотрены ниже.

Сила инерции  $\vec{F}_{ин}$ , действующая на инерционное тело 3 определяется следующим образом:

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

где  $m_{пр}$  – приведенная масса инерционного тела 3;  $\vec{a}_{из}$  – ускорение инерционного замыкателя в центре масс инерционного тела 3:

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

где  $a_{из\_x}, a_{из\_y}, a_{из\_z}$  – проекции  $\vec{a}_{из}$  на оси системы координат  $OXYZ$  (в рассматриваемом двумерном случае  $a_{из\_z} = 0$ ).

Приведенная масса инерционного тела 3 определяется по формуле

$$m_{пр} = m_{ит} + \frac{1}{3} m_{пр}, \quad (3)$$

где  $m_{ит}, m_{пр}$  – масса инерционного тела 3, пружины 2 соответственно (масса диска 4 не учитывается).

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

$$F_{пр} = F_{пр\_0} + C_{пр} X_{ит}, \quad (4)$$

где  $F_{пр\_0}$  – начальное усилие пружины 2;  $C_{пр}$  – коэффициент упругости пружины 2 (жесткость).

Величина силы упругости диска 4  $F_{дi}$  ( $i = 5 \dots 8$ ) определяется следующим образом:

$$F_{дi} = \begin{cases} 0, & \text{если } X_{ит} \leq X_a; \\ C_{дi} (X_{ит} - X_a), & \text{если } X_{max} \geq X_{ит} > X_a, \end{cases} \quad (5)$$

где  $C_{пр}$  – коэффициент упругости диска 8 (жесткость).

Реакции  $\vec{R}_i$  ( $i = 1 \dots 4$ ) сил действуют на корпус 1 со стороны инерционного тела 3 в местах их контакта (см. рис. 4).

Систему уравнений движения инерционного тела 3 запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} m_{пр} \ddot{X}_{ит} = (\vec{F}_{ин} + \vec{F}_{пр} + \sum_{i=5}^{i=8} \vec{F}_{дi} + \sum_{i=1}^{i=6} \vec{R}_i)_x; \\ m_{пр} \ddot{Y}_{ит} = (\vec{F}_{ин} + \sum_{i=1}^{i=4} \vec{R}_i)_y; \\ J_{ит} \ddot{\varphi} = M_{пр} + \sum_{i=5}^{i=8} M_{дi} + \sum_{i=1}^{i=4} M_{Ri}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\ddot{X}_{ит}$  – вторая производная по времени от координаты  $X_{ит}$ ;  $\ddot{Y}_{ит}$  – вторая производная по времени от координаты  $Y_{ит}$ ;  $\ddot{\varphi}$  – вторая производная по времени от угла  $\varphi$ ;  $J_{ит}$  – момент инерции инерционного тела 3 относительно оси, параллельной OZ, проходящей через центр масс инерционного тела;  $M_{пр}$  – момент силы упругости пружины 2;  $M_{дл}$  – момент сил упругости диска 2, действующих в местах контакта с инерционным телом 3 (см. рис. 4);  $M_{Ri}$  – момент реакций сил, действующих на корпус 1 со стороны груза 3 в местах их контакта (см. рис. 4).

Система уравнений (6) решается численно при начальных условиях:  $t = 0$  с,  $X_{ит} = 0$  м и заданной зависимости ускорения инерционного замыкателя от времени.

Это позволяет определить режимы, при которых срабатывает инерционный замыкатель, либо подобрать конструктивные параметры, обеспечивающие его срабатывание при требуемых режимах.

### Достигнутые результаты

Представленные результаты показывают возможность создания надежного и технологичного инерционного замыкателя, предназначенного для использования в системах коммутации электрических цепей задействования систем безопасности подвижных объектов (автомобилей).

Представленная математическая модель значительно сократила продолжительность разработки инерционного замыкателя, позволив выбрать еще при выпуске конструкторской документации оптимальные конструктивные параметры. Необходимость разработки математических моделей приборов с инерционным принципом действия подтверждается по результатам ранее проведенных разработок [2, 3].

### Список литературы

1. Пат. № 621.316.54. Инерционный замыкатель / В. Н. Китаев, Л. Ю. Кудрявцева. Заявка № 2024133314 от 07.11.2024, МПК F42 C 1/04.
2. 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
3. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель порогового инерционного включателя // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 30–40.

### References

1. Patent № 621.316.54. *Inertsionnyy zamykatel' = Inertial circuit breaker*. V.N. Kitaev, L.Yu. Kudryavtseva. Appl. № 2024133314 from 07.11.2024, MPK F42 C 1/04. (In Russ.)
2. 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
3. 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.)

### 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

#### 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)

**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

**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

**Roman L. Afanasyev**

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

**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 18.11.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 17.12.2024**

**Принята к публикации/Accepted 15.01.2025**