

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ С УПРУГИМИ СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

И. Е. Люминарский, Е. С. Люминарская

Введение

В настоящее время микропереключатели широко используются в автомобилях, авиации, космической технике и т.д. Важнейшим требованием, предъявляемым к разрывным электрическим контактам, является безотказность их работы. Отказы в электрических контактах микропереключателей могут происходить из-за тепловых, электрических, химических и механических явлений. Отказы в слаботочных контактах микропереключателей стержневого типа в основном появляются из-за поломки упругого элемента или распорной пружины, залипания подвижного контакта, дребезга контактов при коммутации, внезапного изменения силы прижатия контактов, загрязнения контактных поверхностей и др.

Важнейшим показателем работы микропереключателей является быстродействие, которое определяется временем переключения и дребезгом контактов. Дребезг может вызывать сбои в работе электронной аппаратуры. Поэтому при проектировании микропереключателей необходимо не только определять время переключения, но и исследовать дребезг контактов. В микропереключателях быстродействие обеспечивается рациональным подбором основных параметров.

Для создания надежных миниатюрных переключателей необходимо разрабатывать математические модели, учитывающие основные процессы, протекающие при коммутации, и использовать их для выявления причин и предвестников сбоев и отказов на этапе проектирования.

Постановка задачи

Существующие методики расчета колебаний контактных систем с упругими стержневыми элементами и упругими ограничениями основываются на использовании метода конечных элементов [1, 2]. В контактных системах упругие ограничители имеют высокую контактную жесткость. При ударе упругого элемента об ограничитель в нем возбуждаются формы колебаний высокой частоты, которые необходимо учитывать при исследовании дребезга контактов. Поэтому при расчете колебаний стержневого упругого элемента с жесткими ограничителями используют малый шаг интегрирования по времени и большое количество конечных элементов, что значительно увеличивает машинное время счета.

Целью данной работы является разработка методики динамического анализа микропереключателей с упругими стержневыми элементами, позволяющей исследовать их работу в момент переключения и дребезга контактов. Методика основана на применении метода Бубнова – Галеркина и использовании собственных форм упругого элемента с подвижным контактом в качестве базисных функций.

Математическая модель

В статье предлагается динамическая модель микропереключателя с упругим стержневым элементом, схема которого представлена на рис. 1. В этой модели принимаются следующие допущения: 1) корпус и толкатель являются абсолютно твердыми телами; 2) положение касания контакта бобышки с неподвижными контактами не изменяется; 3) деформации упругого элемента и распорной пружины подчиняются закону Гука; 4) инерция распорной пружины не учитывается; 5) инерция поверхностных слоев контактов не учитывается, а контактные деформации определяются по формулам Герца.

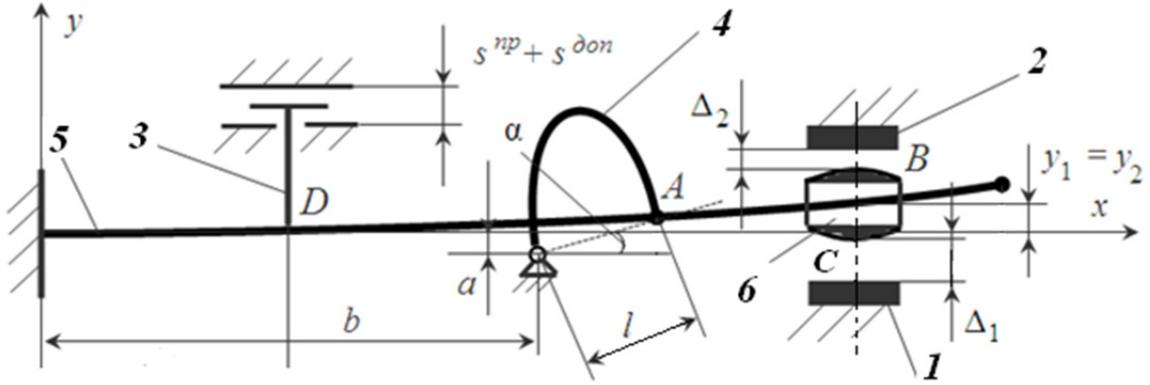


Рис. 1. Схема микропереключателя:
 1, 2 – неподвижные контакты; 3 – толкатель; 4 – распорная пружина;
 5 – упругий элемент; 6 – бобышка подвижного контакта

Быстродействие микропереключателей обеспечивается подбором таких параметров, при которых все положения равновесия упругого элемента с распорной пружиной без опоры на неподвижные контакты неустойчивы. Неустойчивость положений равновесия обеспечивается малыми углами наклона распорной пружины α (см. рис. 1). В этом случае даже при небольших перемещениях поперечных сечений вдоль оси y продольная составляющая силы со стороны распорной пружины \vec{S}_x будет оказывать значительное влияние на движение упругого элемента. Поэтому в предлагаемой математической модели микропереключателя учитывается влияние \vec{S}_x на деформацию упругого элемента.

Схема сил, действующих на упругий элемент, приведена на рис. 2. Продольная составляющая силы со стороны распорной пружины \vec{S}_x приближенно учитывается поперечной силой P^* и изгибающим моментом m^* . При таком учете продольной силы \vec{S}_x нелинейная зависимость внутреннего изгибающего момента от продольной координаты $\tilde{M}(x)$ заменяется линейной $M^*(x) = -P^* \cdot (x_4 - x) - m^*$ на участке $(0, x_4)$. Коэффициенты P^* и m^* определяются методом наименьших квадратов из условия

$$\Phi = \int_0^{x_4} (\tilde{M}(x) - M^*(x))^2 dx = \min, \quad (1)$$

где $\tilde{M}(x) = S_x(y - y_4)$, при $x \leq x_4$.

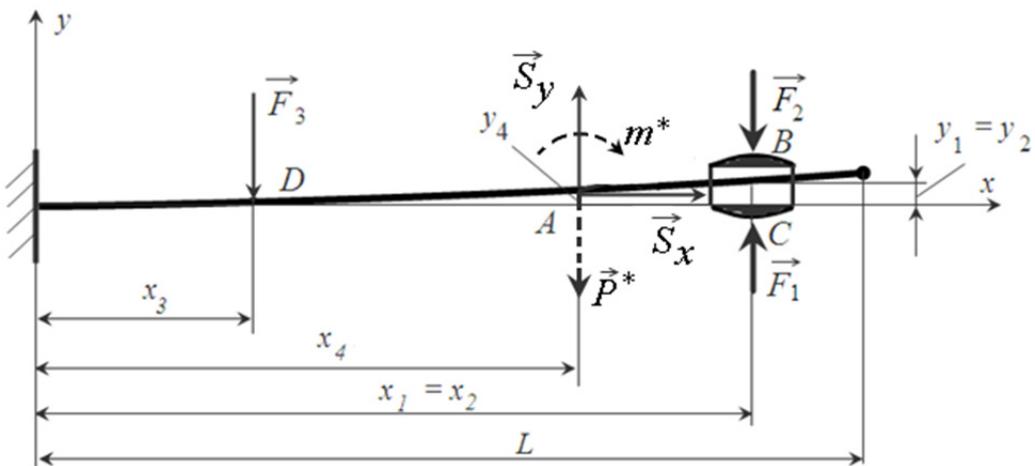


Рис. 2. Расчетная схема

После несложных преобразований получается формула для определения P^* и m^*

$$\begin{bmatrix} 0,5x_4^2 & x_4 \\ \frac{x_4^3}{3} & 0,5x_4^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P^* \\ m^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x \left(x_4 y_4 - \int_{x_4} y dx \right) \\ S_x \left(\frac{x_4^2 y_4}{2} - x_4 \int_{x_4} y dx + \int_{x_4} y \cdot x dx \right) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для динамического анализа микропереключателя используется дифференциальное уравнение движения балки при изгибе с учетом потерь на внутреннее трение [3]

$$m_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EJ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(y + \beta \frac{\partial y}{\partial t} \right) \right] = q(x, t), \quad (3)$$

где $y(t, x)$ – функция перемещений поперечных сечений балки; m_0 – погонная масса балки; E – модуль упругости I рода; J – момент инерции поперечного сечения; β – линейризованный параметр диссипации; $q(x, t)$ – интенсивность силы, действующей на упругий элемент.

Интенсивность $q(x, t)$ может быть представлена следующим образом (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} q(x, t) = & S_y \cdot \delta(x - x_4) - P^* \cdot \delta(x - x_4) - m^* \cdot \delta'(x - x_4) + F_1(t) \cdot \delta(x - x_1) + \\ & + F_2(t) \cdot \delta(x - x_2) - F_3(t) \cdot \delta(x - x_3) - m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \cdot \delta(x - x_2), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\delta(x - x_i)$ – дельта-функция Дирака; $m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \cdot \delta(x - x_2)$ – сила инерции бобышки; m – масса бобышки.

Вертикальная составляющая силы от распорной пружины определяется из выражения

$$S_y = S \cdot \sin(\alpha) = \frac{k(l_0 - l)}{l} \cdot (y_4 + a) = r \cdot (y_4 + a), \quad (5)$$

где k – коэффициент жесткости распорной пружины; l_0 – длина недеформированной распорной пружины; l – длина деформированной распорной пружины.

Решение уравнения (4) можно приближенно представить в следующем виде [4, с. 170]:

$$y(t, x) = \sum_{j=1}^N C_j(t) \cdot U_j(x), \quad (6)$$

где $U_j(x)$ – нормированные по кинетической энергии собственные формы упругого элемента с бобышкой [3]; $C_j(t)$ – неизвестные функции; N – число учитываемых собственных форм.

Неизвестные функции $C_j(t)$ определяются из обыкновенных дифференциальных уравнений, которые получаются путем подстановки решения (6) в уравнение (4) и последующего скалярного умножения полученного уравнения на нормированные собственные формы $U_j(x)$ [3, 5]. Так как скалярное произведение двух различных собственных форм равно нулю, то все дифференциальные уравнения получаются независимыми. Для определения функции $C_j(t)$ необходимо решить одно дифференциальное уравнение второго порядка

$$\begin{aligned} \ddot{C}_i(t) + 2n \cdot \dot{C}_i(t) + \omega_i^2 \cdot C_i(t) = & r \cdot (y(t, x_4) + a) \cdot U_i(x_4) + \\ + F_1(t) U_i(x_1) - F_2(t) U_i(x_2) - F_3(t) U_i(x_3) - & P^* \cdot U_i(x_4) + m^* \cdot U_i'(x_4), \end{aligned} \quad (7)$$

где $i = 1, \dots, N$; ω_i – собственные частоты упругого элемента с бобышкой; $n = 0,5\beta\omega_i^2$ – коэффициент затухания; a – расстояние, показанное на рис. 1.

Собственные формы упругого элемента с бобышкой определялись методом последовательных приближений [4, с. 180; 6, с. 176–189].

Силы реакций F_1 и F_2 зависят от формы, шероховатости, запыленности и сближения контактных поверхностей. Значения этих сил определяются по методике, изложенной в работе [7].

Сила, действующая на упругий элемент со стороны толкателя, $F_3(t)$, вычисляется по формуле Герца.

Сближения контактных поверхностей зависят от перемещения точек упругого элемента y_k и начальных зазоров Δ_k^*

$$\Delta_1(t) = \Delta_1^* + y(t, x_1), \quad \Delta_2(t) = \Delta_2^* - y(t, x_2), \quad \Delta_3(t) = \Delta_3^* - y(t, x_3).$$

Для решения дифференциальных уравнений (7) участок интегрирования $(0, t_k)$ разбивается на M равных интервалов. На каждом интервале переменные величины $r, y(t, x_4), F_1, F_2, F_3, P^*, m^*$ считаются постоянными и принимаются равными средним значениям на шаге интегрирования.

В начальном положении толкатель расположен в крайнем верхнем положении и упирается в ограничитель, а упругий элемент и бобышка находятся в положении равновесия. Расчет выполняется при постоянной скорости толкателя, который движется из крайнего верхнего в крайнее нижнее положение.

В начальный момент времени производные $\frac{dC_i}{dt}$ равны нулю, а функции C_i определяются из уравнений (7), в которых все производные по времени приравниваются к нулю. Значения величин, входящих в правую часть дифференциальных уравнений (7), определяются из расчета равновесия упругого элемента.

Более подробно последовательность динамического анализа упругой системы, ограниченной упругими односторонними связями, изложена в [5].

Результаты исследования

Для проверки предложенной математической модели были проведены теоретические и экспериментальные исследования работы микропереключателя МП9, показанного на рис. 3.

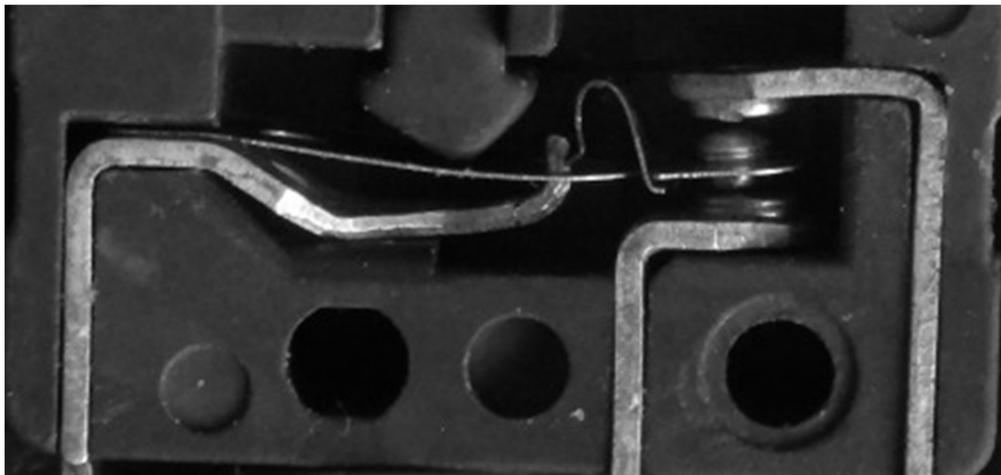


Рис. 3. Микропереключатель МП9

На рис. 4 показана зависимость силы прижатия контактов от времени в момент коммутации. Из графика видно, что при коммутации происходит дребезг контактов. В момент дребезга наблюдается четыре отрыва подвижного контакта от неподвижного контакта. Первый отрыв происходит в течение 0,12 мс, второй – 0,005 мс, третий – 0,041 мс, четвертый – 0,021 мс. Вычисления при различной жесткости распорной пружины показали, что при дребезге в основном происходит два-три отрыва со временем отрыва более $t_o > 0,02$ мс.

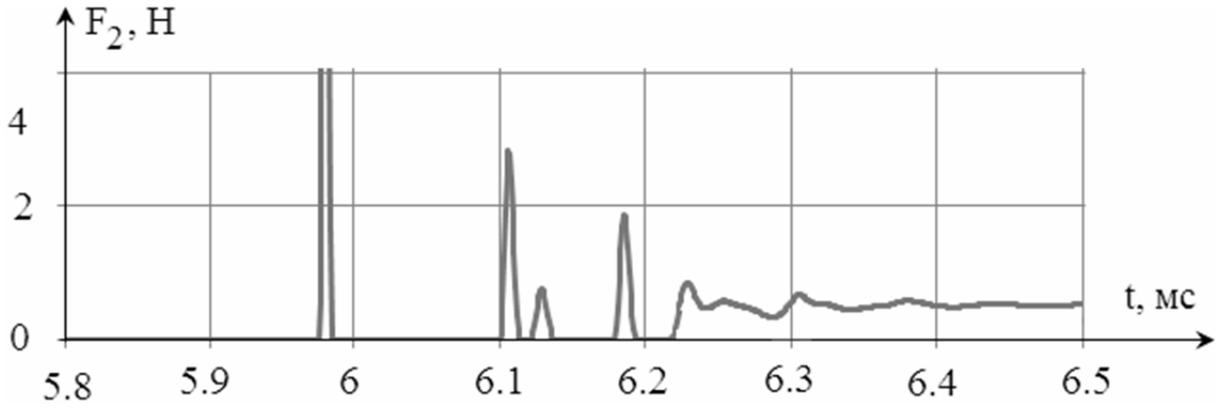


Рис. 4. Изменение силы прижатия контактов при коммутации

В исследуемом микропереключателе сила прижатия контактов \bar{F}_1 в положении равновесия (номинальная) составляет 0,64 Н. При первом взаимодействии максимальное значение этой силы превышает номинальное значение более чем в 10 раз, а время соприкосновения составляет менее 7 мкс (см. рис. 3). За такое короткое время в упругом элементе не успевают появиться большие деформации и напряжения [8, 9].

Расчетные исследования показали зависимость времени переключения от скорости движения толкателя. Поэтому для проверки адекватности математической модели была получена зависимость времени переключения от времени движения толкателя. Время движения толкателя определялось от начала движения толкателя до момента размыкания контактов 2 и 6 (см. рис. 1).

На рис. 5 приведены теоретическая и регрессионная зависимости времени переключения t_n от времени движения толкателя t_T . Время переключения t_n определяется от начала размыкания контактов 2 и 6 до момента первого касания контактов 1 и 6 (см. рис. 1). При определении экспериментальной зависимости использовалась квадратичная модель регрессии. В исследуемом диапазоне скоростей толкателя отклонение теоретических и экспериментальных значений времени переключения не превышает 5 %.

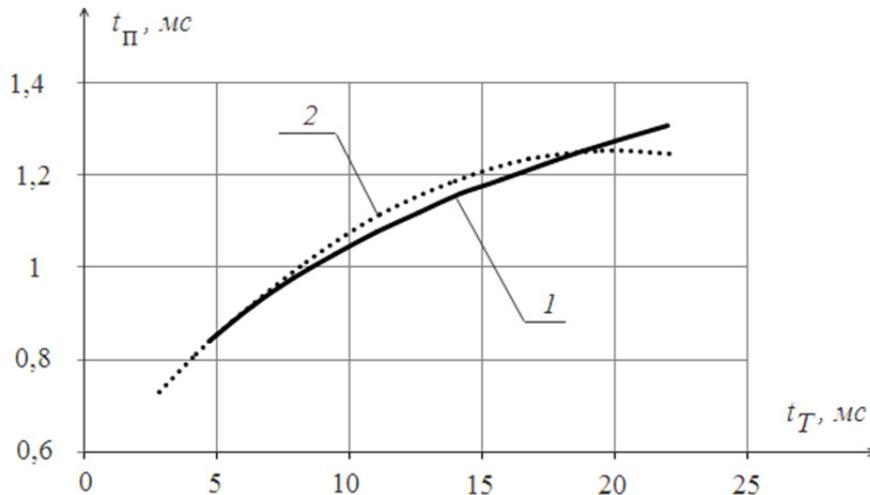


Рис. 5. Зависимость времени переключения от времени движения толкателя:
1 – теоретическая зависимость; 2 – регрессионная зависимость

Предложенная динамическая модель позволяет исследовать работу микропереключателя в период дребезга контактов. Для проверки адекватности модели в этот период работы исследовалась зависимость времени первого (наибольшего) отрыва при дребезге контактов 1 и 6 t_{o1} от времени переключения t_n . На рис. 6 показаны теоретическая и регрессионная зависимости. Для построения регрессионной зависимости также использовалась квадратичная модель регрессии.

Сравнение приведенных зависимостей показывает адекватность модели в фазе дребезга контактов. Расхождение теоретических и экспериментальных зависимостей не превышает 10 %.

Необходимо отметить, что при дребезге появляются два-три больших отрыва (с временем отрыва более 10 мкс). В экспериментальных исследованиях был получен большой разброс значений времени второго отрыва (15...60 мкс). Большой разброс значений может быть связан со случайными вибрациями корпуса, возникающими при коммутации.

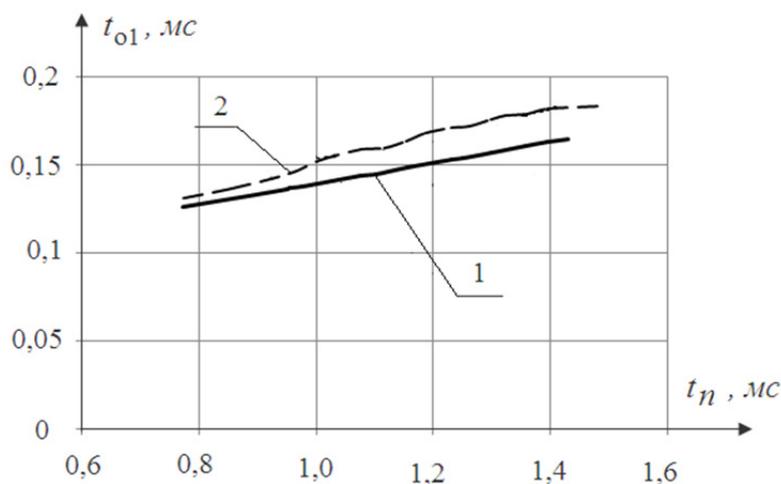


Рис. 6. Зависимость времени первого отрыва при дребезге контактов 1 и 6 от времени переключения: 1 – регрессионная зависимость; 2 – теоретическая зависимость

Выводы

1. Предложена математическая модель микропереключателей с упругими стержневыми элементами, позволяющая исследовать их работу в фазах переключения и дребезга контактов.
2. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили адекватность предложенной модели.
3. Установлено, что время переключения зависит от скорости движения толкателя.
4. Расчетным и экспериментальными путями доказано, что при дребезге контактов происходит три-четыре отрыва со временем отрыва от 10 до 140 мкс.

Список литературы

1. Контактные системы / В. В. Остащавичюс, Б. В. Рудгальвис, В. Л. Рагульские, Б. П. Бакшис. – Л. : Машиностроение, 1987. – 279 с.
2. Уланов, А. В. Математические модели динамики, алгоритмы и информационно-измерительные средства виброакустической диагностики и неразрушающего контроля контактных устройств авиационных приборов : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.11.16 и 05.11.13 / Уланов А. В. – Ижевск : РГБ, 2006. – 178 с.
3. Вибрация в технике : справ. : в 6 т. – М. : Машиностроение, 1981. – Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К. В. Фролова. – 456 с.
4. Вибрация в технике : справ. : в 6 т. – М. : Машиностроение, 1978. – Т. 1. Колебания линейных систем / под ред. В. В. Болотина. – 352 с.
5. Люминарский, И. Е. Расчет упругих систем с односторонними связями : моногр. / И. Е. Люминарский. – М. : МГИУ, 2006. – С. 38–99.
6. Коллац, Л. Задачи на собственные значения / Л. Коллац. – М. : Наука : Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1968. – 504 с.
7. Люминарская, Е. С. Математическая модель слаботочных электрических контактов при сбое / Е. С. Люминарская, В. Н. Дианов // Динамика сложных систем – XXI век. – 2014. – Т. 8, № 1. – С. 73–78.
8. Интегродифференциальная кодоимпульсная модуляция в задачах повышения надежности в аппаратуре / В. Н. Дианов, Т. А. Гевондян, И. М. Белоусов, Е. С. Люминарская // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 2. – С. 136–137.
9. Дианов, В. Н. Диагностика интегродифференциальных сбоев в активных элементах интегральной схемотехники / В. Н. Дианов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 37–40.

Люминарский Игорь Евгеньевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра теории механизмов и машин,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва,
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: lie260@mail.ru

Люминарская Екатерина Станиславовна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электротехники
и промышленной электроники,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва,
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: lyuminarskaja.caterina@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Микропереключатели с упругими стержневыми элементами широко используются в авиационной, космической, автомобильной и другой технике. Отказы в слабых контактах микропереключателей стержневого типа в основном появляются из-за поломки упругого элемента или распорной пружины, залипания подвижного контакта, дребезга контактов при коммутации, внезапного изменения силы прижатия контактов, загрязнения контактных поверхностей. В связи с этим появляется необходимость выявления предвестников отказов и сбоев на этапе проектирования и выбора основных параметров микропереключателей с учетом возможных загрязнений. Перспективным направлением в решении поставленной задачи является математическое моделирование, позволяющее исследовать работу микропереключателей при переключении и дребезге контактов в реальных условиях эксплуатации. *Материалы и методы.* Предложенная методика основана на применении метода Бубнова – Галеркина и использовании собственных форм упругого элемента с подвижным контактом в качестве базисных функций. *Результаты.* Разработанная динамическая модель микропереключателей позволила установить зависимость времени переключения от скорости движения толкателя и появление при дребезге контактов трех-четырех размыканий со временем отрыва подвижного контакта 10–140 мкс. Адекватность математической модели подтверждается экспериментальными данными. *Выводы.* Разработка динамических и математических моделей переключателей дает возможность учитывать основные процессы, протекающие в них при коммутации, и использовать их для выявления причин сбоев на этапе проектирования.

Ключевые слова: микропереключатель, дребезг, быстрдействие, стержневой упругий элемент, собственные формы.

Lyuminarskji Igor Evgenevich

doctor of technical science, professor,
sub-departmen of theory of mechanisms and machines,
Moscow State Technical University
named after N. E. Bauman
(105005, 2-nd Baumanskaya street, apartment 5,
building 1, Moscow, Russia)

Lyuminarskaja Ekaterina Stanislavovna

candidate of technical science, associate professor,
sub-departmen of electrical engineering
and industrial electronics,
Moscow State Technical University
named after N. E. Bauman
(105005, 2-nd Baumanskaya street, apartment 5,
building 1, Moscow, Russia)

Abstract. *Relevance and purpose.* Microswitches with elastic core elements are widely used in aerospace, automotive, etc. engineering. The bounce in low-voltage contacts of the microswitch rod type mostly appear because of a breakage of the elastic element or spacer springs, sticking the movable contact to contact bounce when switching, sudden change of the pressing force of the contact, contamination of contact surfaces. In this regard, there is the need to identify precursors of failures and failures at the design stage and selection of basic parameters of switches with consideration of possible contamination. A promising direction in solving this problem is mathematical modeling, which allows to investigate the operation of the switches when switching and contact bounce in real conditions. *Materials and methods.* The proposed method based on the method of Bubnov-Galerkin and use their own forms of the elastic element with a movable contact as basis functions. Results. Developed the dynamic model of the micro switches has allowed to establish the dependence of the switching time of the speed of movement of a pusher and a contact bounce three or four razmiene with the time separation of the movable contact 10-140 ISS. The adequacy of the mathematical model is confirmed by experimental data. *Conclusions.* Development of dynamic and mathematical models of switches takes into account basic processes proceeding in them at switching, and use them to identify the causes of failures at the design stage.

Key words: microswitch, bounce, speed, the rod elastic element, their own forms.

УДК 621.3.06 + 621.01

Люминарский, И. Е.

Динамическая модель микропереключателей с упругими стержневыми элементами / И. Е. Люминарский, Е. С. Люминарская // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 35–42. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-5.