

Е. С. Люминарская

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СЛАБОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ В УСЛОВИЯХ ЗАПЫЛЕННОСТИ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Дата поступления: 31.07.2016

Решение о публикации: 01.09.2016

Дата публикации: 30.09.2016

Аннотация: Введение. В настоящее время на транспорте, в автомобильной, авиационной, космической, бытовой и иной технике широко применяются миниатюрные механически управляемые переключатели. К их преимуществам относятся небольшой вес и малые габариты. Однако плохое контактное соединение может привести к выходу из строя приборов, от которых зависит работа всей сложной техники. В бытовой технике это не приведет к серьезным проблемам, но для транспорта сбой контактной системы может привести к катастрофическим последствиям. Важнейшим показателем надежности микропереключателей является безотказность работы. Отказы микропереключателей возникают из-за тепловых, электрических, механических и химических явлений в переходной зоне электрических контактов. В настоящее время большое распространение получили слаботочные контакты. Отказы и сбои в таких контактах появляются в основном из-за попадания в межконтактное пространство пыли и других загрязнений, образования пленок, не разрушающихся при замыкании контактов, внезапного изменения силы прижатия контактов, из-за поломки упругого элемента или распорной пружины.

В статье представлена математическая модель контактных систем при сбое на примере современных электронных микропереключателей стержневого типа.

Цель. Создание математической модели контактных систем при сбое на примере современных электронных микропереключателей стержневого типа, исследование работы микропереключателей в реальных условиях эксплуатации.

Методология. Для достижения поставленной цели применялись теоретические методы исследования с использованием ПЭВМ. Были использованы теория контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, теория электрических контактов, методы линейной алгебры и др. Использовались программные комплексы Mathcad, ANSYS. При экспериментальных исследованиях применялись методы математической статистики.

Результаты. В статье предложена методика определения переходного сопротивления слаботочных электрических контактов, учитывающая возможную запыленность контактных поверхностей, образование пленок на поверхностях контактов и изменение параметров шероховатости контактных поверхностей в результате пластических деформаций. Для исследуемых контактов получена зависимость вероятности сбоя от концентрации частиц пыли.

Практическая значимость. Описанная в статье методика позволяет определить переходное сопротивление электрических контактов как при нормальной работе, так и при сбое.

Заключение. Разработка математических моделей контактов при сбое дает возможность оценивать надежность соединений в реальных условиях работы, выбирать основные параметры коммутационных элементов с учетом возможных загрязнений, а также разрабатывать новые и уточнять имеющиеся методики обнаружения сбоев.

Ключевые слова: электрический контакт, переходная зона, переходное сопротивление, микропереключатель, коммутация.

Ekaterina S. Lyuminarskaja

Bauman Moscow State Technical University

DETERMINATION OF TRANSIENT RESISTANCE LOW-CURRENT ELEKTRIC CONTACTS IN DUSTY CONDITIONS THE CONTACT SURFACES

Abstract: Introduction. Now on transport, in automotive, aviation, space, household and other vehicles the tiny mechanically managed switches are widely used. The small weight and small dimensions belong to their benefits. However bad contact connection can lead to failure of devices on which work of all difficult technique depends. In household appliances it will not lead to serious problems, but for transport failure of contact system can lead to catastrophic consequences. The most important indicator of reliability of microswitches is non-failure operation of work. Failures of microswitches arise because of the thermal, electric, mechanical and chemical phenomena in a transitional zone of electric contacts. Now big distribution was gained by low-current contacts. Refusals and failures in such contacts appear generally because of hit in intercontact space of dust and other pollution, formation of the films which are not collapsing in case of short circuit of contacts, sudden change of force of pressing of contacts because of breakdown of an elastic element or an expansion spring.

In article the mathematical model of contact systems in case of failure on the example of modern electronic microswitches of rod type is provided.

Purpose. Creation of mathematical model of contact systems at failure on the example of modern electronic microswitches of rod type, research of operation of microswitches in actual practice operation.

Methodology. Theoretical methods of research with use of personal electronic computer were applied to achievement of an effective objective. The theory of contact interaction of rough surfaces, the theory of electric contacts, methods of linear algebra, etc. have been used. The program complexes Mathcad, ANSYS were used. In case of pilot studies methods of mathematical statistics were applied.

Results. In article the technique of determination of transitional resistance of low-current electric contacts considering possible dust content of contact surfaces, formation of films on surfaces of contacts and change of parameters of a roughness of contact surfaces as a result of plastic deformations is offered. For the studied contacts dependence of probability of failure on concentration of particles of dust is received.

Practical importance. The technique described in article allows to determine the transitional resistance of electric contacts both during the normal work, and at failure.

Conclusion. Development of mathematical models of contacts at failure gives the chance to estimate reliability of connections in actual practice of work, to choose key parameters of switching elements taking into account possible pollution, and also to develop new and to specify the available techniques of detection of failures.

Keywords: electrical contact, the transition zone, transition resistance, microswitch, switchin.

Введение

Необходимость повышения надежности работы транспортных средств требует применения новых подходов к выявлению и предотвращению отказов технических систем. Для чего рядом специалистов предлагается повышать оперативность управления технологической сетью связи и моделировать работы по устранению неисправностей с целью выработки необходимых команд [4-17].

Другим способом повышения надежности является своевременное обнаружение сбоев и их источников в работе электронной аппаратуры. Одним из важнейших источников сбоев является электрический контакт. Сбои в работе электрических контактов трудно предсказывать, т.к. они происходят из-за случайных явлений. Плохое контактное соединение может привести к выходу из строя приборов, от которых зависит работа всей сложной техники. В бытовой технике это не приведет к серьезным проблемам, но для транспорта и космических аппаратов сбой контактной системы может привести к катастрофическим последствиям.

Основным показателем надежности микропереключателей является безотказность работы. Отказы микропереключателей возникают из-за тепловых, электрических, механических и химических явлений в переходной зоне электрических контактов. В настоящее время большое распространение получили слаботочные контакты, т.е. контакты, в которых протекают токи менее 0,1 А и напряжение не выше 5В. Отказы и сбои в таких контактах появляются в основном из-за попадания в межконтактное пространство пыли и других загрязнений, образования пленок, не разрушающихся при замыкании контактов, и внезапного изменения силы прижатия контактов.

В статье представлена математическая модель контактных систем при сбое на примере современных электронных микропереключателей стержневого типа. Отметим, что создание подобных моделей дает возможность оценивать надежность соединений в реальных условиях эксплуатации, выбирать основные параметры коммутационных элементов с учетом возможных загрязнений, а также разрабатывать новые и уточнять имеющиеся методики обнаружения сбоев.

1. Математическая модель шероховатой поверхности

Переходная зона электрических контактов обычно представляется в виде контакта шероховатых поверхностей, которые взаимодействуют отдельными микровыступами [1,2]. При моделировании шероховатые поверхности заменяются эквивалентными поверхностями, которые представляют собой набор упругих сегментов, случайным образом расположенных на упругом основании (рис. 1). Высота сферических

выступов определяется случайной величиной ξ_i , закон распределения которой

$$F(\xi) = \xi^{\nu-1},$$

где $\xi = p/R_p$; R_p – высота сглаживания [2].

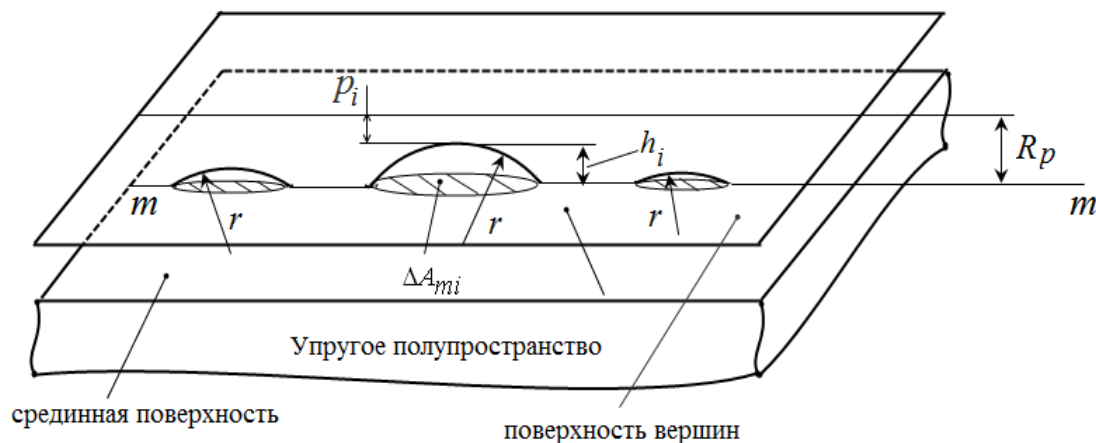


Рис.1. Эквивалентная заменяющая поверхность

Количество микровыступов выбирается из условия равенства площадей сечений выступов на средних линиях эквивалентной и реальной поверхностей по формуле

$$n = \frac{A_n \cdot t_m \cdot \nu}{2\pi \cdot R_p \cdot r},$$

где A_n - номинальная площадь касания; t_m, ν - параметры опорной кривой шероховатой поверхности [2].

Радиусы всех сферических выступов считаются одинаковыми и вычисляются по формуле

$$r = \sqrt{r_n \cdot r_{n\text{прод}}},$$

где $r_{n\text{прод}}$, r_n - значения радиусов кривизны вершин неровностей в продольном и поперечном профилях.

В отличие от ранее предложенных методик данная методика учитывает:

- возможность упругой, упругопластической и пластической деформаций отдельных выступов контактных поверхностей в зависимости от нагрузки на них;
- упругую деформацию основания, на котором располагаются сферические выступы, моделирующие шероховатые поверхности;
- изменение характеристик выступов при повторной нагрузке из-за пластических деформаций отдельных выступов;
- возможность попадания пыли на контактные поверхности.

2. Взаимодействие двух выступов

При расчете все выступы разделяются на три группы. К первой группе относятся взаимодействующие между собой выступы, ко второй группе – невзаимодействующие выступы. К третьей группе относятся выступы, между которыми расположены частицы пыли.

Схема взаимодействия выступов первой группы представлена на рис.2.

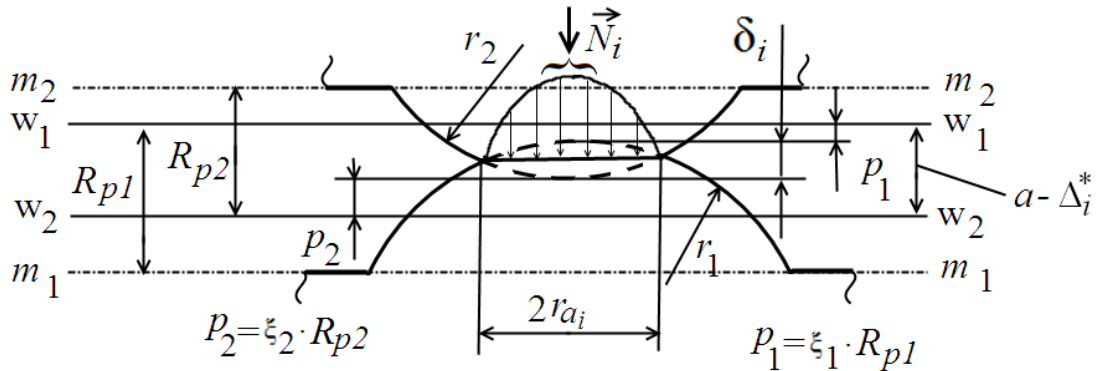


Рис. 2. Схема взаимодействия выступов первой группы

Сила взаимодействия двух выступов определяется через их сближение δ_i по формуле

$$\delta_i = a - \Delta_{oi} - \delta_{1i}^{очн} - \delta_{2i}^{очн}, \quad (1)$$

где Δ_{oi} - начальный зазор между выступами; $\delta_{1i}^{очн}$, $\delta_{2i}^{очн}$ - перемещения взаимодействующих выступов как жестких целых из-за деформации упругих оснований; a - сближение поверхностей вершин.

Если относительное сближение двух взаимодействующих выступов $\delta_i^* = \delta_i \cdot \frac{E_{np}^2}{\sigma_T^2 \cdot r_{np}} < 6.7$, то сила взаимодействия N и радиус пятна контакта r_a определяются по формулам Герца, которые в относительной форме имеют следующий вид

$$N^* = \frac{4}{3} (\delta^*)^{3/2}, \quad r_a^* = \sqrt{\delta^*}, \quad (2)$$

где $N^* = \frac{E_{np}^2}{\sigma_T^2 \cdot r_{np}^2} \cdot N$, $r_a^* = \frac{E_{np}}{\sigma_T \cdot r_{np}} \cdot r_a$ – относительные величины силы

взаимодействий двух выступов и радиуса пятна контакта; E_{np}, r_{np} – приведенный модуль упругости и приведенный радиус выступов; σ_T – предел упругости материалов контактов.

Для расчетов в упругой и упругопластической областях применяются выражения, предложенные в работе [3]. Проведенные по указанным формулам вычисления позволяют получить следующие зависимости:

для упругопластической области $6.717 < \delta^* < 747.2$

$$N^* \approx 23.2 \cdot \left[1 + 0.42 \cdot \left(\frac{\delta^*}{6.717} - 1 \right) + 2.12 \cdot \left(\frac{\delta^*}{6.717} - 1 \right)^{1.128} \right],$$

$$r_a^* \approx 0.742 + 0.345 \cdot \sqrt{N^*} + 0.00022 \cdot N^*; \quad (3)$$

для пластической области $\delta^* \geq 747.2$

$$N^* = 3\pi r_a^{*2}, \quad r_a^* = 1.25 \cdot \sqrt{\delta^*} \quad (4)$$

Перемещения выступов из-за деформации упругого основания $\delta_{1i}^{очн}$, $\delta_{2i}^{очн}$ определяются по формулам, используемым для расчета деформации упругого полупространства при воздействии нормального давления. При этом предполагается, что давление на основание распределено равномерно.

3. Схема взаимодействия выступов третьей группы представлена на рис.

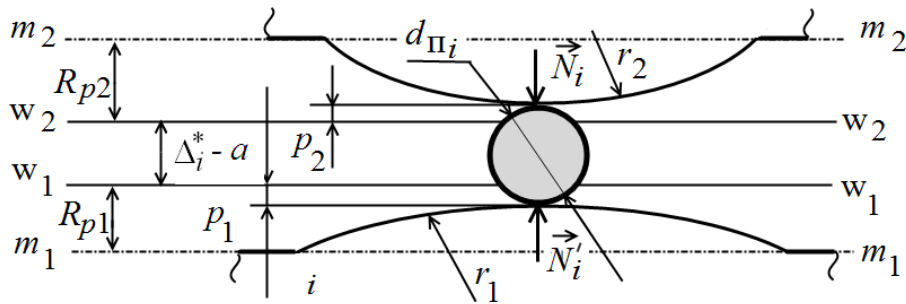


Рис. 3. Схема взаимодействия выступов с частицей пыли

Частицы пыли неправильной формы заменяются эквивалентными шарами, диаметр которых определяется по формуле:

$$d = \sqrt{L \cdot B},$$

где L, B – два наименьших размера во взаимно перпендикулярных направлениях.

Диаметр частиц пыли считается случайной величиной, имеющей закон распределения Рэля. Координаты выступов являются независимыми случайными величинами с равномерным законом распределения.

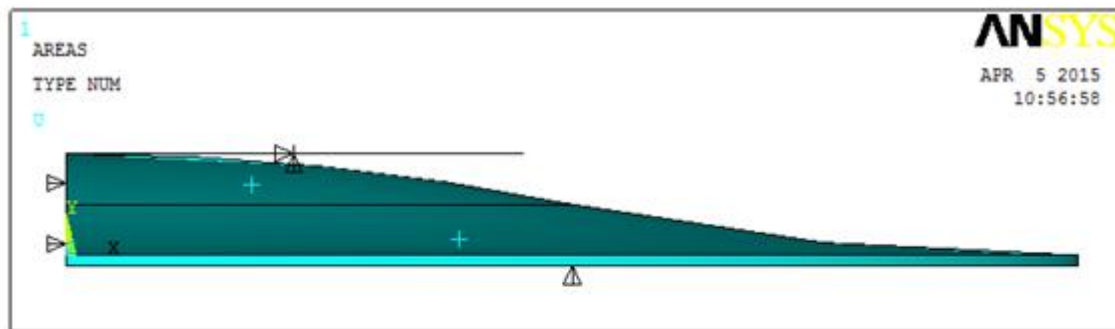
В математической модели предполагается, что взаимодействие двух выступов с частицей пыли носит упругий характер. Силы взаимодействия в этом случае определяются по формуле Герца. Если при взаимодействии растягивающие напряжения в центре пылинки окажутся больше предела прочности материала пылинки, то пылинка разрушается и не влияет на расчет.

Вычисления выполняются в следующей последовательности: задается сближение контактных поверхностей a ; по формуле (1) определяются значения сближений микронеровностей δ_i ; по формулам (2)-(4) вычисляются силы взаимодействия микронеровностей N_i и радиусы пятен контакта r_{ai} . Вычисления выполняются методом итераций. На первой итерации силы взаимодействия N_i принимаются равными нулю.

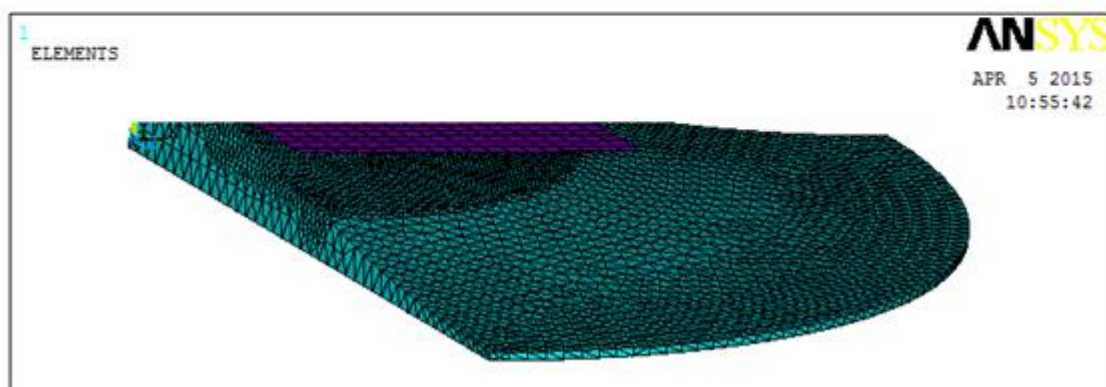
3. Изменение характеристик выступов при пластической деформации

При взаимодействии контактных поверхностей одни выступы могут деформироваться упруго, другие могут иметь пластические деформации. Контакт шероховатых поверхностей будет полностью упругим только в случае, когда взаимодействующие поверхности имеют очень высокую поверхностную твердость (более 6 ГПа). Расчетные исследования показывают, что выступы поверхностей электрических контактов имеют в основном развитую пластическую или упругопластическую деформации. При снятии нагрузки после первого нагружения упругие деформации исчезают, а пластические остаются. Поэтому после первого взаимодействия микропрофили контактирующих поверхностей изменяют свои характеристики. Высоты отдельных выступов уменьшаются, а радиусы вершин увеличиваются. При определении характеристик переходной зоны разрывных электрических контактов необходимо учитывать эти изменения.

Для определения остаточных деформаций выступов, были проведены расчетные исследования методом конечных элементов в системе ANSYS. Задача взаимодействия двух одинаковых выступов одинакового радиуса является симметричной, поэтому рассматривалось взаимодействие четверти выступа с жесткой плоскостью. На рис. 4 показано закрепление поверхностей микровыступа и его разбивка на конечные элементы.



а) закрепление выступа



б) разбивка на конечные элементы

Рис. 4. Моделирование выступа в ANSYS

По результатам моделирования были получены зависимости относительной величины пластического уменьшения высоты выступа $w_0^{*ост} = \frac{E_{np}^2}{\sigma_T^2 \cdot r_{np}} \cdot w_0^{ост}$ и коэффициента увеличения радиуса вершины выступа $k_r = \frac{r^{ост}}{r}$ от относительного сближения δ^* . Здесь $w_0^{ост}$ – остаточное уменьшение высоты выступа, r – радиус неровности до деформации, и $r^{ост}$ – радиус неровности после пластической деформации и снятия нагрузки. При расчете использовался материал с идеальной упругопластической характеристикой, имеющей следующие параметры: модуль упругости I рода $E = 1.2 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0.3$; предел текучести $\sigma_T = 300 \text{ МПа}$. Методом наименьших квадратов были получены следующие аналитические зависимости

$$w_0^{*ост} = \frac{\delta^*}{2} - 20 \operatorname{atan}(0.02 \cdot \delta^*),$$

$$k_r = 1 + 0.0002(\delta^* - 6.72)^{1.5}.$$

4. Сопротивление переходной зоны

Сопротивление переходной зоны представляется в виде параллельного соединения сопротивлений отдельных микровыступов.

Поверхности микровыступов покрыты пленками. Если среднее контактное давление двух микровыступов больше предела прочности пленки, то сопротивление контактирующих микровыступов обуславливается только стягиванием линий тока к площадке пятна контакта [1,3] и определяется по формуле:

$$R_{\text{ш}} = \gamma \cdot (\rho_1 + \rho_2) / (4 \cdot r_{ai}),$$

где ρ_1, ρ_2 – удельные сопротивления материалов контактов; r_{ai} – радиус пятна контакта двух выступов.

Сопротивление двух выступов с частично разрушенными пленками превышает их сопротивление без поверхностных пленок, при расчете это учитывается коэффициентом γ .

Если под действием контактной силы поверхностные пленки не разрушены, то сопротивление контактирующих выступов складывается из сопротивления стягивания и поверхностного сопротивления пленок и определяется по формуле:

$$R_{\text{ш}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4 \cdot r_{ai}} + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\pi \cdot r_{ai}^2},$$

где σ_1, σ_2 – удельные сопротивления поверхностных пленок.

Для теоретического исследования были выбраны медные контакты со сферическими поверхностями с радиусами 3мм и следующими параметрами микронеровностей: средний шаг неровностей профиля $S_{m1} = S_{m2} = 30\text{мкм}$; радиус сферических выступов, моделирующих шероховатые поверхности, $r = 50\text{мкм}$; высота сглаживания профиля $R_{p1} = R_{p2} = 0.9\text{мкм}$; параметры опорной кривой $v_1 = v_2 = 3$, $t_{m1} = t_{m2} = 0.5$. Номинальная сила взаимодействия контактов $F_{\text{ном}} = 0.7H$.

Расчетные исследования коммутации микропереключателей показывают, что при дребезге контактов максимальная сила взаимодействия контактов превышает номинальное значение почти в 10 раз. Такая большая сила действует короткое время (~5мкс). Этот короткий импульс может разрушить частицы пыли, расположенные на контактных поверхностях. Поэтому на первом этапе расчета контакты нагружались силой, превышающей номинальное значение в 10 раз, и определялось количество разрушенных частиц пыли. На втором этапе контакты нагружались номинальной силой, и определялось электрическое сопротивление.

По предложенной методике была получена зависимость вероятности сбоя P от концентрации частиц пыли на контактных поверхностях v_c

(количества частиц пыли на 1 мм^2 контактной поверхности). Сбой фиксировался по величине переходного сопротивления. Если переходное сопротивление превышало номинальное значение в два и более раз, то условно фиксировался сбой. Расчеты выполнялись методом статистических испытаний. При этом случайными величинами принимались диаметры частиц пыли, координаты расположения пылинок и высоты микровыступов. Результаты расчета приведены на рис.5.

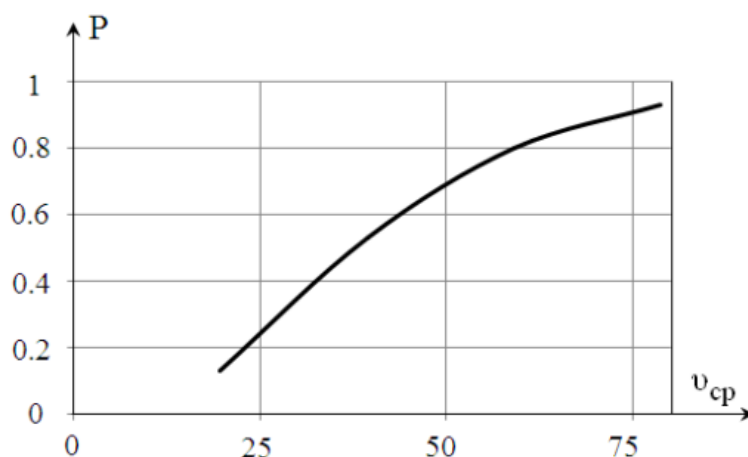


Рис. 5. Зависимость вероятности сбоя от концентрации частиц пыли на контактных поверхностях.

Заключение

1. Предложена математическая модель механического взаимодействия электрических контактов, в которой впервые учитывается: возможность упругой, упругопластической и пластической деформаций отдельных выступов контактных поверхностей в зависимости от нагрузки на них; упругая деформация основания, на котором располагаются сферические выступы, моделирующие шероховатые поверхности; изменение характеристик выступов при повторной нагрузке; возможность попадания пыли на контактные поверхности.

2. Предложена методика определения переходного сопротивления, учитывающая возможную запыленность контактных поверхностей и образование пленок (оксидных, сульфидных и др.) на поверхностях контактов.

3. Получены расчетные зависимости, позволяющие определить высоту и радиус единичной сферической неровности после снятия нагрузки при пластической деформации.

4. Расчетным путем показано, что при запыленности контактных поверхностей 20 частиц на мм^2 вероятность сбоя достигает 15%.

Библиографический список

1. Holm R. Electrical Contacts. – New York: Springer. – 1979.
2. Демкин Н. Б. Контактное покрытие шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
3. Измайлов В. В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография / В. В. Измайлов, М. В. Новоселова. – Тверь: ТГТУ, 2010. – 112 с.
4. Белозеров В. Л. Экономика транспорта: управление в рыночных условиях: монография / В. Л. Белозеров, А. Н. Ефанов, А. А. Зайцев и др.; под ред. О. В. Белого. – СПб.: Изд-во «Наука», 2014. – 204 с.
5. Зайцев А. А. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны: монография / А. А. Зайцев, Е. И. Морозова, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова. – СПб.: Изд-во ООО «Типография «НП-Принт», 2015. – 140 с.
6. Соколова Я. В. Теоретические и практические аспекты управления инновационными процессами в транспортной компании / Я. В. Соколова // Журнал университета водных коммуникаций. – СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2013.
7. Соколова Я. В. Проектное управление инновационным развитием транспортной компании / Я. В. Соколова // Транспортное дело России, 2014. – № 5. – С. 50-52.
8. Плеханов П. А. Проблема формирования требований к качеству и безопасности перевозочных услуг железнодорожного транспорта / П. А. Плеханов // Экономика железных дорог, 2015. – № 10 – С. 20-27.
9. Зайцев А. А. Механизм формирования высокоэффективных услуг на транспортном рынке России / А. А. Зайцев, А. Н. Ефанов // Известия ПГУПС, 2013. – № 3. – С. 5-17.
10. Волкова Е. М. Формирование системы взаимодействия железнодорожной компании с субъектами рынка пригородных пассажирских перевозок: автореферат дисс. на соискание ученой степени к.э.н. – СПб: ПГУПС, 2013. – 24 с.
11. Журавлева Н. А. Развитие рынка услуг железнодорожного транспорта в контексте экономической безопасности России // Экономические науки, 2015. – № 132. – С. 15-19.
12. Журавлева Н. А. Системный подход к формированию эффективной модели железнодорожной отрасли / Н. А. Журавлева, В. Г. Карчик // Экономика железных дорог, 2014. – № 5. – С. 11-27.
13. Красковский А. Е. Постановка экономически обоснованных целей по безопасности движения / А. Е. Красковский, П. А. Плеханов, С. А. Вырков // Экономика железных дорог, 2013. – № 2. – С. 42-48.
14. Красковский А. Е. Перспективная экономическая стратегия обеспечения безопасности движения в ОАО «РЖД» / А. Е. Красковский,

П. А. Плеханов, В. Г. Иванов, Д. Ю. Барканова // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2011. – № 3 (28). – С. 248-256.

15. Лизунова Ю. А. Проблемы управления стратегическими инновациями / Ю. А. Лизунова // Новая наука: Опыт, традиции, инновации, 2015. – № 6. – С. 234-236.

16. Паздерина В. А. Стратегическое управление инновациями / В. А. Паздерина, Т. А. Катаева // Экономика и бизнес: теория и практика, 2015. – № 10. – С. 108-112.

17. Титов С. А. Стратегические инновации: комплексный подход к созданию конкурентных преимуществ путем инноваций в бизнес-модели компании / С. А. Титов, Н. В. Титова, В. П. Чернышев, Р. Б. Титаренко // Фундаментальные исследования, 2015. – № 10. – С. 193-196.

References

1. Holm R. Electrical contacts. NY, 1979. 464 p.
2. Demkin N.B. Kontaktirovanie sherohovatykh poverhnostej [Contacting rough surfaces]. Moscow, 1970. 227 p.
3. Izmaylov V. V. & Novoselova M. V. Kontakt tverdykh tel i ego provodimost' [Contact solids and conductivity]. Tver', 2010. 112 p.
4. Belozеров V. L., Yefanov A. N., Zaytsev A. A. & Belyi O. V. Ekonomika transporta: upravlenye v rinochnikh usloviyakh [Transportation Economy: Management under Conditions of Market]. St.Petersburg, 2014. 204 p.
5. Zaysev A. A., Morozov E. I., Talashkin G. N. & Sokolova J. V. Magnitolevitacionnyj transport v edinoj transportnoj sisteme strany [Magnetogravitational transport in uniform transport system of the country]. St. Petersburg, 2015. 140 p.
6. Sokolova J. V. Zhurnal universiteta vodnykh kommunikacij – *Journal of University of water communications*, 2013.
7. Sokolova J. V. *Transportnoe delo Rossii – The transport business of Russia*, 2014, no. 5, pp. 50–52.
8. Plekhanov P. A. *Ekonomika zheleznnykh dorog – Economy of Railways*, 2015, no. 10, pp. 20–27.
9. Zaytsev A. A. & Yefanov A. N. *Izvestiya PGUPS – Proceedings of Petersburg transport University*, 2013, no. 3, pp. 5–17.
10. Volkova E. M. Formirovanie sistemy vzaimodeystviya zheleznodozhnoy kompanii s subjektami rynka prigorodnykh passagirskikh perevozok [Forming of Transaction System between Railway Company and Regional Passenger Transportation Market Subjects]. St. Petersburg, 2013. 24 p.
11. Zhuravleva N. A. *Ekonomicheskiye nauki – Economic science*, 2015, no. 132, pp. 15–19.
12. Zhuravleva N. A. & Karchik V. G. *Ekonomika zheleznnykh dorog – Economy of Railways*, 2014, no. 5, pp. 11–27.

13. Kraskovskiy A. E., Plekhanov P. A. & Vyrkov S. A. *Ekonomika zheleznykh dorog – Economy of Railways*, 2013, no. 2, pp. 42–48.

14. Kraskovskiy A. E., Plekhanov P. A., Ivanov V. G. & Barkanova D. J. *Izvestiya PGUPS – Proceedings of Petersburg transport University*, 2011, no. 3, pp. 248–256.

15. Lizunova J. A. *Novaja nauka: opyt, tradicii, innovacii – A new science: the Experience, tradition, innovation*, 2015, no. 6, pp. 234–236.

16. Pazderina V. A. & Kataeva T.A. *Ekonomika i bisness: teorija i praktika – Economics and business: theory and practice*, 2015, no. 10, pp. 108–112.

17. Titov S. A., Titova N. V., Chernyshev V. P. & Titarenko R. B. *Fundamentalnye issledovanija – Fundamental research*, 2015, no. 10, pp. 193–196.

Сведения об авторе:

ЛЮМИНАРСКАЯ Екатерина Станиславовна, к.т.н., доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана,
E-mail: lyuminarskaja.caterina@yandex.ru

Information of author:

Ekaterina S. LYUMINARSKAJA,
E-mail: lyuminarskaja.caterina@yandex.ru