УДК 621.316.5

О.Г. ВОЛКОВА, ассистент, ЗНТУ, Запорожье
В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук., проф., зав. каф., НТУ "ХПИ", Харьков
Е.И. БАЙДА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСИЛИЯ СЖАТИЯ НА ПЕРЕХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРЫВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Features of transitive resistance in breaking electric contacts depending on the push force vector are investigated. It is established, that the tangential component of the force at compressed contacts reduces their transitive resistance without essential increase of the force.

Исследованы особенности переходного сопротивления разрывных электрических контактов в зависимости от вектора силы сжатия. Установлено, что приложение касательно направленного усилия к поверхностям сжатых контактов снижает их переходное сопротивление без существенного увеличения силы сжатия.

Досліджено особливості перехідного опору розривних електричних контактів залежно від вектора сили стискування. Встановлено, що додаток зусилля, спрямованого вздовж поверхонь стислих контактів, знижує їх перехідний опір без істотного збільшення сили стискування.

Введение. Сила сжатия (нажатия) является одним из основных факторов, влияющим на характер контактного сопротивления [1]. Недостаточная сила контактного нажатия приводит к увеличению переходного контактного сопротивления и, в отдельных случаях, прерыванию протекания тока через контакты. Экспериментально установлено, что с уменьшением силы нажатия в два раза переходное сопротивление контактов может увеличиться в четыре и более раз в зависимости от их размеров. При увеличении силы нажатия переходное сопротивление уменьшается, поскольку возрастает суммарная площадь площадок проводимости (*p*-пятен) на контактных поверхностях. Другими важными факторами, влияющими на переходное сопротивление контактов, являются свойства материалов контактов и параметры контактных поверхностей. В работе [2] приведена эмпирическая зависимость переходного сопротивления как функции силы нажатия, а роль

других факторов учитывается поправочными коэффициентами:

$$R = \frac{k\left(1 + 2\alpha T / 3\right)}{\left(0{,}1 \cdot F\right)^m}, \qquad (1)$$

где R – переходное сопротивление контактов; α – температурный коэффициент сопротивления, 1/°С; T – температура нагрева контактов, °С; F – сила контактного нажатия, Н; k, m – коэффициенты, учитывающие свойства материалов контактов и параметры их поверхностей.

Соотношение (1) позволяет учесть дополнительные факторы, например, поверхностные пленки, с помощью поправочных коэффициентов. При заданном материале основным способом уменьшения переходного сопротивления является увеличение силы контактного нажатия. Однако, для большинства коммутационных электрических аппаратов с разрывными контактами (РК) такой способ уменьшения контактного сопротивления имеет ограниченное применение. При увеличении силы нажатия РК требуется увеличение нагрузок в элементах привода контактов. Это может привести к механическому разрушению контактов, увеличивает трение в подвижных сопряжениях, существенно снижает быстродействие механизма коммутации и в конечном итоге надежность электрического аппарата. Поэтому при проектировании коммутационных электрических аппаратов одной из важнейших является задача выбора оптимальной силы нажатия контактов с учетом конструктивных возможностей механизмов и надежности работы контактного соединения. В известных методиках для определения фактической площади контактов вектор силы контактного нажатия рассматривался однокомпонентным, содержащим только одну составляющую, направленную нормально к поверхности замкнутых контактов. Другие (касательные) компоненты этого вектора не учитываются.

В этой связи представляет интерес исследование процессов на реальных площадках замкнутых контактов в условиях, когда вектор силы нажатия кроме нормальной имеет и касательную компоненту. При этом дополнительно предполагается, что величина этой касательной силы не превышает силы трения покоя на поверхностях площадок контактов, что обеспечивает стабильность их состояния.

Цель работы – исследование контактов в условиях, когда вектор силы нажатия контактов кроме нормальной компоненты имеет касательную компоненту, величина которой не превышающим силу трения покоя сжатых поверхностей этих контактов.

Теоретические положения. При моделировании в данной работе принято, что вектор силы $\boldsymbol{F}$ имеет нормальную $\boldsymbol{F}_n$ и касательную $\boldsymbol{F}_t$

компоненты и приложен в точке соприкосновения контактов P (рис. 1). Обозначения на схеме на рис. 1: НК, ПК – неподвижный и подвижный контакты электрического аппарата; $\boldsymbol{u}$ – вектор перемещения подвижного контакта. Принимая во внимание небольшую величину объема области деформации металлических поверхностей контактов в качестве допущений принято, что контакты имеют цилиндрическую форму, в зоне контактного взаимодействия происходит их упругопластическая деформация. Для численного моделирования использованы характеристики главных контактов контактора РПН типа КНОА 110/1000, в частности, сила сжатия контактов равна 500 Н.

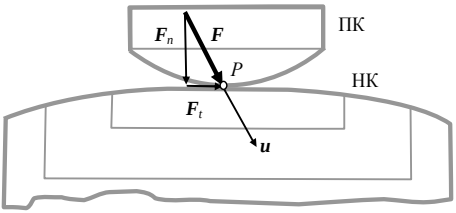

Рис. 1. Расчетная модель контактов.

При действии нормальной составляющей силы $\boldsymbol{F}_n$ площадка единичного контакта представляет круговую область радиуса r_0 [1-3]:

$$r_0 = \sqrt{\frac{F_n}{\pi HV}}\,, \qquad (2)$$

где HV – твердость контактного материала по Виккерсу.

Последующие приложение касательной составляющей силы $\boldsymbol{F}_t$ к сжатым поверхностям деформирует эту площадку, растягивая ее в направлении касательной силы. Рост площади фактического контакта микронеровности при наличии касательной силы объясняется превышением напряжения в контактном материале предела текучести [4]:

$$p_n^2 + \alpha^2 p_t^2 \geq p^2\,, \qquad (3)$$

где p_n, p_t – напряжение на пятне контакта в нормальном и касательном нормальном направлениях ; α − постоянная, зависящая от пластичности контактного материала; p – предел текучести материала.

При отсутствии касательной составляющей силы $\boldsymbol{F}_k$ давление на пятне контакта достигает предела текучести $p_n = p$ и площадь единичного контакта A_0 пропорциональна нормальной составляющей силы

$$A_0 = \frac{K_i F_n}{p_n}\,, \qquad (4)$$

где K_i – коэффициент пропорциональности, характеризующий часть силы, действующей на единичную площадку.

При приложении касательного усилия пластическая деформация контактного материала увеличиваться, как видно из соотношения (3), поскольку полное напряжение все еще соответствует случаю пластического течения контактного материала. Это возможно, если нормальное напряжение p_n будет уменьшаться при приложении касательного напряжения p_t, т.е. при росте площади единичного контакта:

$$A_1 = A_0\left(1+\alpha\left(\frac{F_t}{F_n}\right)^2\right)^{0.5}. \qquad (5)$$

Круглая форма площадки контакта при этом трансформируется, в форму эллипса, главные полуоси которого пропорциональны компонентам вектора силы.

Теоретически, рост площади пятна единичного контакта может быть ограничен только пределом прочности на срез поверхностного слоя контактного материала. Как видно из соотношения (5), для чистых металлических поверхностей воздействие касательной силы, не превышающей 0,1 нормальной составляющей может дополнительно увеличивать площадь единичного контакта [4]. В реальных условиях можно ожидать уменьшение этой приближенной оценки. Таким образом, при наличии касательной составляющей вектора силы площадь фактического контакта увеличивается, что ведет к увеличения проводимости контактных соединений без роста силы сжатия.

В соответствии с теорией упругости, деформация контактной поверхности в статическом режиме без учета внутренних напряжений можно представить в следующем виде [5, 6]:

$$\nabla\left(\left(\lambda+G\right)\cdot div\left(\vec{\mathbf{u}}\right)\right)+\nabla\left(G\cdot\nabla\vec{\mathbf{u}}\right)=0; \qquad (6)$$

$$\lambda=\frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)};\ G=\frac{1}{2(1+\mu)},$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости первого рода; $\vec{\mathbf{u}}$ – двухмерный вектор перемещений.

Особенностью расчета уравнения (6) является необходимость учитывать пластические деформации, возникающие в месте контакта. Более упрощенно можно записать

$$\frac{\partial}{\partial x}\cdot\left(\left(\lambda+G\right)\cdot\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}\right)\right)+\frac{\partial}{\partial x}\cdot\left(G\cdot\frac{\partial u_x}{\partial x}\right)=0; \qquad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\cdot\left(\left(\lambda+G\right)\cdot\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}\right)\right)+\frac{\partial}{\partial y}\cdot\left(G\cdot\frac{\partial u_y}{\partial x}\right)=0\,.$$

где $\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}$ −относительное удлинения; u_x, u_y − компоненты вектора перемещения.

Для аналитического описания деформации использована билинейная аппроксимация зависимости напряжений σ от относительного удлинения ε. Коэффициент Пуассона используется в теории деформации твердых тел и равен отношению относительного поперечного сжатия материала к его относительному продольному удлинению [4].

Излом характеристики соответствует относительному удлинению ε_s, при котором происходит смятие контактного материала (рис. 2).

Моделирование процессов на контактах. Моделирование проводилось с использованием пакета расчетных программ Comsol Multiphysics для двух вариантов приложения вектора силы к контактам: 1 – приложение нормальной компоненты вектора силы; 2 – приложение нормальной и касательной компонент вектора силы, причем последняя по величине не превышает 10% нормальной компоненты [7]. При моделировании использовалось значение силы в относительных единицах, приведенных к максимальной величине нормальной компоненты силы, равной 500Н:

$$Parameter = F_n/500\,. \qquad (8)$$

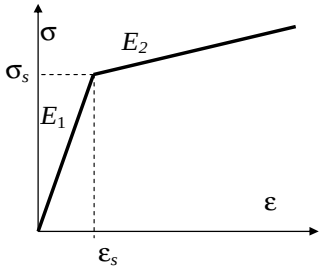

Рис. 2. Билинейная аппроксимация $\sigma = f(\varepsilon)$.

Касательное усилие принято равным $\boldsymbol{F}_t$ = 0,1 $\boldsymbol{F}_n$.

В качестве характеристик моделирования рассматривались зависимости от этого параметра длины A линии площадки контакта, переходное сопротивление R, распределение деформации и давления на поверхности контактов. В процессе расчета определялись линейные размеры зоны контакта (линии контакта A_1 и A_2 соответственно для первого и второго вариантов приложения силы), а его площадь Q определялась как произведение длины линии контакта на его ширину – 50 мм. Результаты расчета сведены в табл. 1 и представлены в виде графиков на рис. 3.

Таблица 1 – Расчетные данные длины линии контакта в зависимости от величины параметра

Размер зоны контакта	*Parameter*									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$A_1 \cdot 10^{-4}$, м	0,40	0,80	1,05	1,25	1,38	1,43	1,55	1,75	1,98	2,00
$A_2 \cdot 10^{-4}$,м	1,57	1,76	1,85	2,14	2,37	2,43	2,61	2,75	2,82	2,90

Анализ графиков показывает, что касательное усилие значительно увеличивает размеры линии контакта, особенно при малых величинах нормального усилия.

Упрощенные степенные зависимости длины площадки контакта от относительной величины силы (x = *Parameter*) получены по данным табл. 1 методом наименьших квадратов:

$$A_1 = 2{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot x^{0{,}66} \text{ м}; \quad A_2 = 2{,}86 \cdot 10^{-4} \cdot x^{0{,}29} \text{ м}. \qquad (9)$$

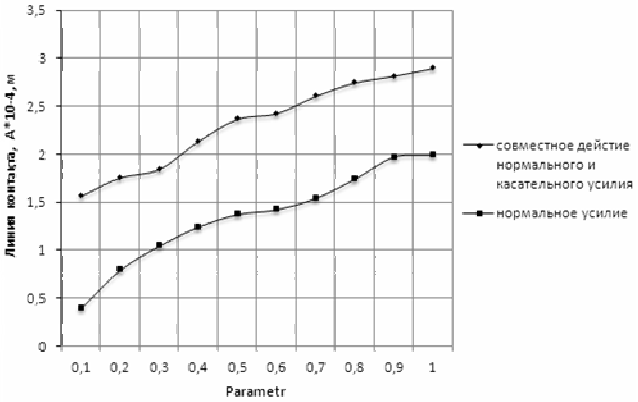

Рис. 3. Зависимость длины линии контакта для двух вариантов воздействия силы.

Оценка переходного сопротивления получена из условия, что площадка представлена эквивалентным по площади Q кругом радиуса

$$r_i = \sqrt{A_i \cdot 50 \cdot 10^{-3} / \pi}\,, \qquad (10)$$

где i – номер варианта, i =1, 2.

С учетом (5), (6) определяются величины R_i переходного сопротивления для двух вариантов:

$$R_i = 2 \cdot 10^{-8} / (2 \cdot r_i) \qquad (i = 1, 2). \tag{11}$$

Расчетные зависимости переходного сопротивления от относительной величины силы представлены в виде графиков на рис. 4.

Результаты расчета деформации (2) и давления представлены в виде эпюр напряжений в центральном сечении цилиндрических контактов (рис. 5-8). Подвижный контакт выделен утолщенными линиями.

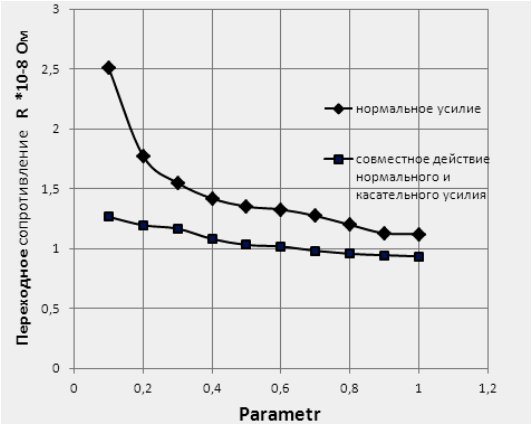

Рис. 4. Характеристики переходного сопротивления контакта для двух вариантов воздействия силы.

Как видно на рис. 5, наличие касательной компоненты силы приводит к смещению изолиний напряжений деформации в направлении этой силы. Сравнение графиков давления на рис. 6 и 7 подтверждают теоретическое положение об увеличении области контактного давления, от $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ мм до $5{,}0 \cdot 10^{-4}$ мм.

Учитывая, что предел смятия материала медных контактов составляет $2 \cdot 10^{8}$ Па, на рис. 8 видно, что максимальное контактное давление при дополнительном приложении касательного усилия к замкнутым контактам увеличивает размер зоны их пластической деформации. Согласно утверждениям Р. Хольма, в этих областях гарантировано образование металлического контакта с разрушением поверхностных пленок. Периферийные зоны контактной поверхности относятся к зонам упругой деформации и являются основными очагами переходного сопротивления и контактного нагрева. Таким образом, площадь контакта увеличивается без существенного увеличения силы сжатия и, соответственно, уменьшается переходное сопротивление контактов.

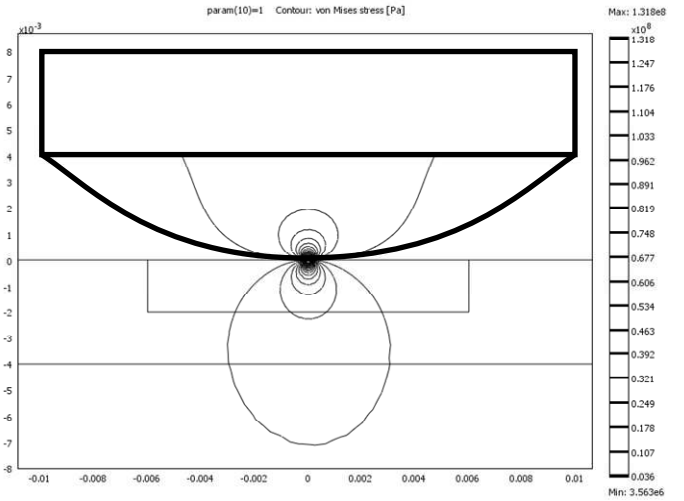

Рис. 5. Изолинии напряжений деформации при нормальном сжатии контактов.

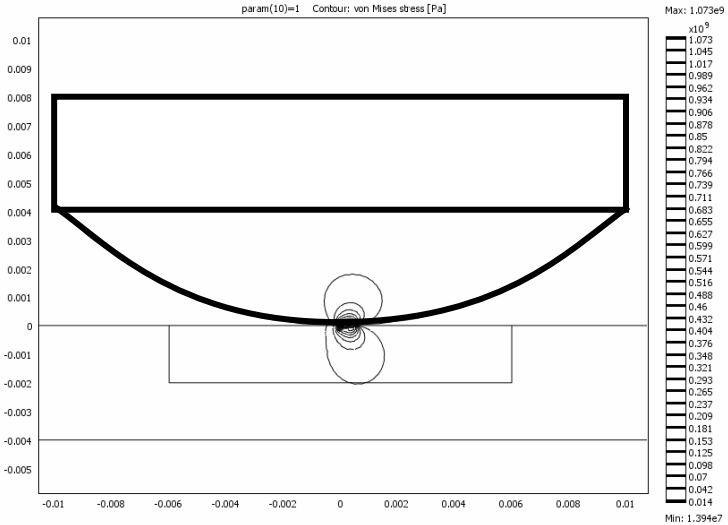

Рис. 6. Изолинии напряжений деформации при нормальном сжатии контактов и наличии касательной компоненты силы.

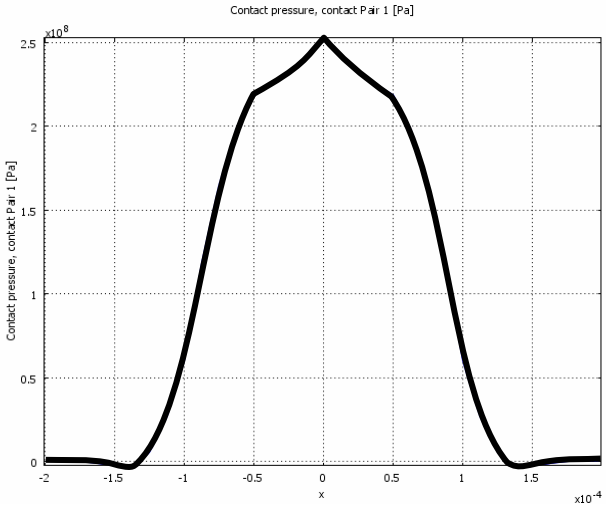

Рис. 7. Распределение давления на контактной поверхности при нормальным сжатии контактов.

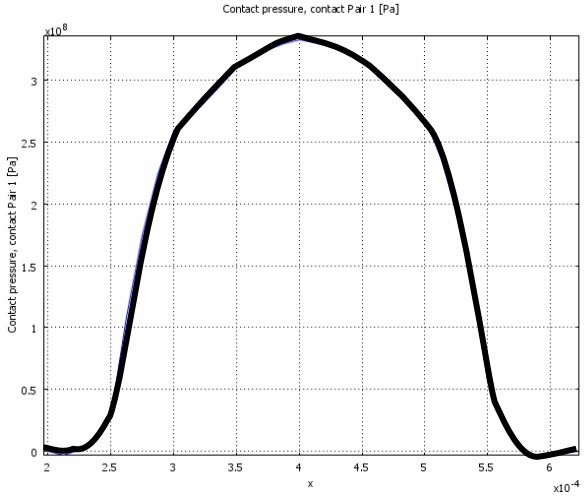

Рис. 8. Распределение давления на контактной поверхности при действии нормальной и касательной сил.

Выводы. 1. Предложен метод оценки контактного сопротивления на основе численного моделирования. При этом площадка контакта представляется в виде эллипса, полуоси которого пропорциональны компонентам вектора силы, действующей на контакты, соответственно, нормальной и касательной.

2. Установлено, что наличие дополнительной касательной компоненты силы сжатия приводит к уменьшению переходного сопротивления. Наибольший эффект наблюдается в области небольших нормальных усилий. При величине дополнительного касательного усилия 0,1 от нормального, переходное сопротивление уменьшается в два раза.

3. Получены численные оценки увеличения области контактного сжатия единичной площадки от $2{,}5\cdot10^{-4}$ мм до $5{,}0\cdot10^{-4}$ мм при приложении дополнительного касательного усилия величиной 0,1 от нормальной составляющей силы нажатия.

Список литературы: 1. *Мышкин Н.К.* Электрические контакты / *Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М.* − Долгопрудный : Интеллект, 2008. – 560 с. **2.** *Таев И.С,* Электрические контакты и дугогасительные устройства / *И.С. Таев.* – М. : Энергия, 1973. – 424 с. **3**. *Залесский А.М.* Тепловые расчеты электрических аппаратов / *А.М. Залесский, Г.А. Кукеков*. – Л. : Энергия, 1967. – 380 с. **4.** *Мур Д.* Основы и применения триботехники / *Д. Мур*. – М. : Мир, 1978. – 488 с. **5**. *Френкель Я.И.* Курс теоретической механики / *Я.И. Френкель.* – Ленинград: Типография "Красный печатник", 1939. − 386 с.**6.** *Тищенко С.П.* Теория упругости: Теория упругости / *Тищенко С.П., Гудьер. Дж.*; Пер. с англ. под ред. Г.С. Шапиро. − М.: Наука,1979 − 560 с. **7.** *Волкова О.Г.* Влияние усилия замыкания разрывных контактов на переходное сопротивление / *О.Г. Волкова* // Електротехніка і Електромеханіка. Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – №2. – С. 25-26.

Поступила в редколегію 17.05.2012.
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.