

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТАВА КОМПОЗИЦИИ ПСЕВДОЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Электрические контакты представляют собой твердую композицию, состоящую из пористой матрицы, пропитанной легкоплавким наполнителем. Под влиянием джоулева тепла происходит расплавление наполнителя. В таком состоянии электрические контакты работают как жидкометаллические. С помощью их математической модели определено переходное сопротивление в зоне контактирования контактов и распределение пор на их рабочей поверхности. Новые контактные композиции рекомендуются к использованию в главных контактах многоамперных автоматических выключателях, в токоограничивающих блоках автоматических выключателей до 1000А, в контакторах.

Ключевые слова: математическая модель, электрический контакт, контактная композиция, контактное нажатие, переходное сопротивление, автоматический выключатель.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Низковольтные электрические аппараты являются необходимым звеном в современном электроснабжении. Для защиты силовых электрических цепей используются многоамперные автоматические выключатели на токи свыше 75 кА. Одним из основных узлов таких выключателей является контактная система, которая содержит серебросодержащие композиции [1]. Дефицит серебра в Украине заставляет искать новые контактные материалы, способные заменить серебро многоамперных автоматических выключателей без снижения их эксплуатационных параметров.

В мировой практике известны различные решения повышения эффективности работы контактных систем. Но, к сожалению, не все они применимы для контактных систем многоамперных автоматических выключателей из-за особенности их работы. Дело в том, что контакты таких электрических аппаратов должны пропускать не только значительные токи, но и противостоять силам электродинамического отброса, которые могут приводить к несвоевременному размыканию электрической цепи. Такое нежелательное явление приводит к необходимости увеличения контактного нажатия, что в свою очередь увеличивает габариты многоамперных автоматических выключателей.

В настоящее время возрос интерес к жидкометаллическим контактам (ЖМК), которые обладают рядом достоинств. Они имеют малое переходное сопротивление, незначительные контактные нажатия. Кроме того, при работе таких контактов отсутствует вибрация, сваривание, залипание и другие недостатки присущи традиционным контактным материалам. Однако эти же композиции контактов имеют и существенные недостатки: необходимость закрытого объема контактного узла, зависимость работоспособности их от положения в пространстве, применение дорогостоящих и токсичных легкоплавких элементов, таких как ртуть, галлий, свинец и др. [2, 3].

Кроме ЖМК широко применяются в данном классе электрических аппаратов так называемые жидкометаллические композиционные контакты (КЖМК), которые состоят из пористых, слоистых, сетчатых материалов, пропитанных или смоченных жидким металлом, помещенных между двумя твердометаллическими электродами. Достоинством таких составов композиций контактов является использование незначительного количества жидкого металла, который имеет токсичные или дорогие элементы (индий, галлий, кадмий, свинец, олово и др.), что в свою очередь говорит о их недостатках [4].

Анализируя приведенные технические решения необходимо отметить, что математических моделей, объединяющих параметры уменьшения переходного сопротивления в зависимости от применяемого легкоплавкого материала и материала основы не имеется, т.к. во многих работах рассматривается только принцип действия контактных композиций.

Поэтому тема работы и проблема, решаемая в ней, являются актуальными. И вместо указанных выше контактов предлагаются новые, так называемые псевдожидкометаллические (ПЖМК).

В работе [5, 6] показаны составы композиций электрических контактов ПЖМК для многоамперных автоматических выключателей, которые в холодном состоянии имеют твердую структуру, а при работе автоматических выключателей они работают как ЖМК. Заявленный состав контактной композиции не имеет токсичных и дорогих элементов, обладает низким переходным сопротивлением и высокой электродинамической устойчивостью. При изготовлении контактной композиции использовалась медная или бронзовая основа, которая перед прессованием перемешивалась с разрыхлителем для образования пор (рис. 1, а).

Количество разрыхлителя и материала основы изменялось в широких пределах. После прессования и спекания заготовки контактов пропитывались легкоплавкой составляющей (рис. 1, б).

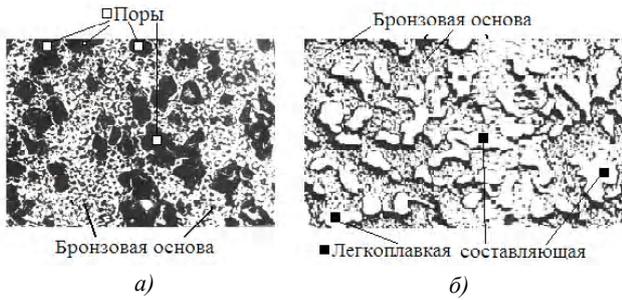


Рис. 1. Структура контактной композиции: а) после спекания с образованием пор; б) после пропитки легкоплавкой составляющей

Характерно то, что эти контакты имеют те же достоинства, как и ЖМК. Полученные композиции электрических контактов состоят из тугоплавкой составляющей (матрицы) и легкоплавкой, температура плавления которой ниже температуры плавления токоведущих элементов электрического аппарата. При замыкании электрической цепи контактные поверхности твердые, и их касание происходит только по отдельным точкам контактирования при установленном контактном нажатии. В момент расплавления легкоплавкой составляющей площадь контактирования увеличивается, уменьшается переходное сопротивление вместе с уменьшением плотности тока, и дальнейшее расплавление материала не происходит.

Цель статьи – создание математической модели псевдожидкометаллического контакта, определяющей основные параметры, такие как переходное сопротивление, за счет увеличения площади контактирования и уменьшение действия электродинамических усилий.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Специфика работы ПЖМК заключается в изменении агрегатного состояния состава композиции под влиянием джоулева тепла при прохождении по ним тока. В результате увеличивается эффективная площадь контактирования и уменьшается переходное сопротивление R_n . Изменение переходного сопротивления в зависимости от величины проходящего тока зависит от многих факторов:

- соотношения тугоплавкой и легкоплавкой составляющей;
- размера пор в матрице контактной композиции;
- электро- и теплопроводности состава композиции контактов;
- твердости и усилий нажатия контактов;
- совместимости свойств элементов матрицы и жидкого наполнителя.

Путь экспериментального определения зависимостей довольно-таки долгий и дорогой. Для повышения эффективности использования данных составов композиций контактов, и определения необходимых параметров, впервые разработана математическая модель контактной проводимости ПЖМК. Особенностью данной модели является определение параметров взаимодействия пористости материала основы и распределение наполнителя как внутри пор, так и на рабочей поверхности

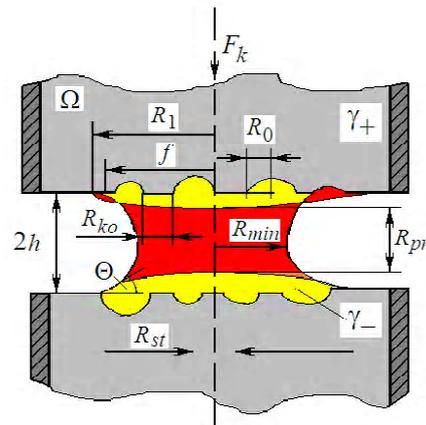
контактов. В результате получено, что контактная проводимость в жидком состоянии состава связывает переходное сопротивление:

- с соотношением объемов туго- и легкоплавкой составляющих с размером зерен пор, заполненных наполнителем;
- с электропроводностью состава композиции;
- с взаимной смачиваемостью туго- и легкоплавкой составляющих композиции контактов;
- с твердостью композиционного состава и усилием нажатия контактных пар.

В основу математической модели ПЖМК положены переходное сопротивление мостика из жидкого состава наполнителя и вероятностное определение количества таких мостиков на рабочей поверхности контактов.

В первую очередь необходимо определить геометрические параметры проводящей гетерогенной поверхности. Распределение жидкого наполнителя по объему рабочей поверхности контактов характеризуется коэффициентом пористости K_v . Формирование проводящей поверхности зависит от коэффициента поверхностной пористости K_{so} . Для упрощения расчета можно принять, что $K_{so} = K_v$.

Распределение наполнителя по рабочей поверхности контакта определяется коэффициентом объемной пористости K_s . При расплавлении наполнителя происходит увеличение его объема, что учитывается коэффициентом температурного расширения α . При этом средний радиус контактных пятен R_1 превышает радиус пор R_0 . При совмещении двух контактных пятен (или больше) образуется жидкометаллический мостик максимальной высотой $2h$ и осевым радиусом $y(x)$, который принимает максимальное значение f или минимальное значение R_{min} в более узком месте перешейка и зависит от угла смачивания Θ (рис. 2).



F_k – сила контактного нажатия; Ω – область контактной поверхности; R_1 – средний радиус пятна; f – максимальное значение распределения мостика; R_0 – радиус пор; γ_+ – электропроводность матрицы; R_{ko} – радиус одной поры; R_{min} – минимальный радиус перешейка; R_{pr} – радиус перешейка; γ_- – электропроводность легкоплавкого наполнителя; R_{st} – сопротивление стягивания линий тока

Рис. 2. Жидкометаллический мостик и его параметры

В стационарном режиме форма мостика определяется состоянием минимальной энергии.

Полная энергия системы W равна сумме потенциальной энергии поверхностного натяжения и энергии жидкого легкоплавкого наполнителя с рабочей поверхностью матрицы, т. е.

$$W = \sigma S + \mu S_0, \quad (1)$$

где σ – поверхностное распределение наполнителя; S – боковая поверхность мостика; μ – предельная энергия взаимодействия материала наполнителя и матрицы; S_0 – торцевая поверхность мостика.

Решение задачи по определению характеристик мостика и переходного сопротивления дало следующие соотношения:

– средний радиус пятен R_1 превышает радиус пор R_0 в Z раз, т. е.

$$R_1 = Z \cdot R_0; Z = \max(1, Z_0), \quad (2)$$

где Z_0 – решение нелинейного уравнения:

$$Z_0^3 = \left[1 + K_{so}(Z_0^2 - 1)\right] \cdot \frac{\alpha l_*}{R_0 \varphi(\Theta)}, \quad (3)$$

где l_* – средняя глубина проплавления в контактной зоне; φ – функция угла смачивания; Θ – краевой угол смачивания наполнителем материала матрицы:

$$\varphi(\Theta) = \frac{\text{tg}(\Theta/2)}{2} \left(1 + \frac{\text{tg}^2(\Theta/2)}{3}\right). \quad (4)$$

Геометрические параметры мостика определяются: – высотой мостика:

$$h = R_1 \cdot \text{tg}\Theta / 2, \quad (5)$$

– минимальным значением осевого радиуса в месте перешейка мостика

$$R_{\min} = h \cdot [b(\Theta) - \sec\Theta], \quad (6)$$

– максимальным значением осевого радиуса контактных пятен

$$f = h \cdot [b(\Theta) - \text{tg}\Theta], \quad (7)$$

где $b(\Theta)$ – сложная функция угла смачивания:

$$b(\Theta) = \frac{\text{tg}\Theta + \frac{\pi/2 - \Theta}{\cos^2\Theta}}{2} \times \left\{ \left[\frac{\text{tg}\Theta + \frac{\pi/2 - \Theta}{\cos^2\Theta}}{2} \right] + \frac{1}{2\sin^2\Theta/2} - \sec^2\Theta \right\}^{1/2}. \quad (8)$$

Количество пор в среднем, которые соединяются в одно пятно, можно оценить по следующей формуле:

$$K_f = \max(1, K_{fo}). \quad (9)$$

Количество пор на поверхности контакта:

$$K_{fo} = 1 - K_{so} \left[\left(Z^2 (b - \text{tg}\Theta)^2 \cdot (\text{tg}\Theta - 1) \right) \right] \quad (10)$$

Полученные результаты дают возможность оценить общее количество проводящих мостиков. Обозначим контактную поверхность, которая воспринимает усилие через область Ω . На каждой поверхности контактов этой области находится в среднем N контактных ассоциированных пятен:

$$N = K_s \Omega / \pi R_1^2. \quad (11)$$

Наиболее реальными считаются пятна случайно расположенные в пределах области Ω с равномерной плотностью вероятности. Это же относится к группе пор, которые могут ассоциироваться в пятне при образовании мостика (гипотетическое пятно). Тогда, вероятность вступления в контакт одного пятна на одном контакте с одним из пятен области на другом контакте, равна:

$$P_j = \min \left[1, 4K_s \left(1 - \sum_{l=1}^{j-1} P_l / N \right) \right], \quad (12)$$

Общее количество пятен, которые вступили в контакт, с образованием проводящих мостиков

$$n = \sum_{j=1}^N P_j. \quad (13)$$

Полное электрическое сопротивление контакта, которое приходится на один жидкометаллический мостик, состоит из сопротивления жидкометаллического перешейка R_{pr} и сопротивления стягивания линий тока R_{st}

$$R_k = R_{pr} + R_{st}. \quad (14)$$

Сопротивление перешейка определяется соотношением:

$$P_{pr} = \int_0^{2h} \frac{dx}{\gamma_- \cdot \pi r^2(x)}, \quad (15)$$

где γ_- – удельная электропроводность расплава состава композиции; $r(x)$ – радиус сечения жидкометаллического мостика.

Сопротивление стягивания линий тока определяется как:

$$R_{st} = \frac{2R_{ko}}{K_f} + \frac{1}{2\gamma_+ \cdot f}, \quad (16)$$

где R_{ko} – сопротивление стягивания, которое приходится на одну пору.

Введем обозначение: $\varepsilon = \gamma_- / \gamma_+$ ($\gamma_- \leq \gamma_+$; $0 < \varepsilon < 1$) и примем, что:

$$R_{ko}(\varepsilon) \approx R_{ko}(0)(1 - \varepsilon) + R_{ko}(1)\varepsilon, \quad (17)$$

$$R_{ko}(1) = \frac{1}{4\gamma_- \cdot R_0}, \quad (18)$$

Величина $R_{ko}(0)$ находится посредством решения краевой задачи Дирихле из уравнения Лапласа и равна

$$R_{ko}(0) = \frac{4}{\pi R_0 \cdot \gamma_-} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{x_j^3}, \quad (19)$$

где x_j – положительные корни уравнения $Y_0(x_j) = 0$; $Y_0(x)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Таким образом,

$$R_{ko}(0) \approx \frac{1}{R_0 \gamma_-} \cdot \left[x(1 - \varepsilon) + \frac{\varepsilon}{4} \right], \quad (20)$$

где $x = \frac{4}{\pi} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{x_j^3} \approx 0,1$ (согласно численному решению уравнения).

Пример расчета параметров жидкометаллического мостика на основе представленной модели приведен на рис. 3 в виде зависимости поверхностей $R_n = f(K_{so}, R_0)$ для двух соотношений электропроводностей твердой γ_+ и жидкой фазы γ_- .

На основании разработанной модели проанализировано влияние различных факторов и величин, в принятых вариантах расчета:

- пористость состава композиции $K_{so} = (0,3; 0,5; 0,8)$;
- размер пор $R_0 = (20; 50; 100)$ мкм;
- угол смачивания $\Theta = 0,6$ рад;
- твердость $HB = 2,8$;

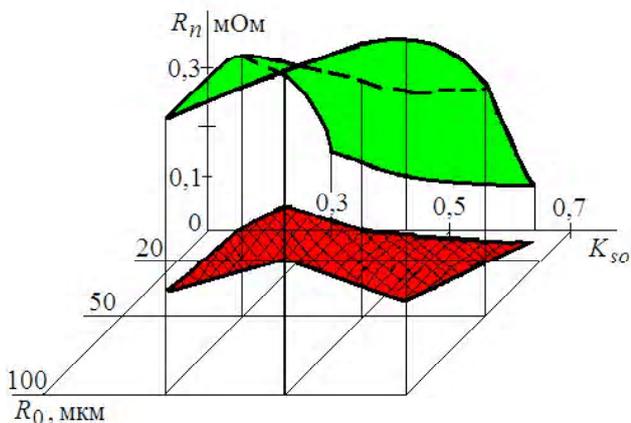


Рис. 3. Расчетное значение переходного сопротивления R_n ПЖМК при различных значениях коэффициента пористости K_{so} и размерах пор R_0

- усилие нажатия контактов $F_k = 30$ Н;
- коэффициент объемного расширения $\alpha = 0,0125$;
- удельная электропроводность матрицы $\gamma_+ = (0,6; 1,5)$;
- удельная электропроводность легкоплавкой составляющей (наполнителя) $\gamma_- = (0,6; 0,3; 0,1)$.

Анализ результатов расчета показывает, что на величину переходного сопротивления в разной степени оказывают влияние все перечисленные факторы. Например, с увеличением размера пор R_0 переходное сопротивление возрастает, что объясняется ростом количества контактных пятен. С ростом коэффициента пористости до $K_{so} = 0,5$ переходное сопротивление снижается и в дальнейшем стабилизируется. Поэтому установлено, что оптимальная пористость считается при значениях коэффициента пористости равном $0,5-0,7$.

Результаты расчета, практически, совпадают с результатами испытаний ПЖМК на специальных стендах, где при условных плотностях токов переходное сопротивление ниже, чем у серебросодержащих композиций.

ВЫВОД

Использование данной математической модели ПЖМК позволяет сузить поиск оптимальных параметров структуры и физических характеристик состава композиции контактов для достижения цели – получения минимального переходного сопротивления за счет изменения агрегатного состояния состава композиции. Использование ПЖМК в главных контактах многоамперного автоматического выключателя приводит к уменьшению контактного нажатия и усилия пружин, компенсирующих электродинамические силы отброса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев В. Л. Особенности работы и конструкций многоамперных автоматических выключателей / Беляев В. Л. – С. Пб. : СЗТУ, 2005. – 254 с.
2. Пат. № 4513904 США, Н01Н 11/02. Способ уменьшения сопротивления между контактными поверхностями.
3. Пат. № 53-3431 Япония, Н01Н 29/20. Выключатель на основе металла с низкой температурой плавления.
4. Брон О. Б. Электрическая стойкость композиционных жидкометаллических контактов / О. Б. Брон, В. Л. Беляев // Электромеханика. – 1984. – № 8. – С. 76–81.
5. Павленко Ю. П. Новый контактный материал для многоамперных выключателей / Ю. П. Павленко, Г. Н. Гапоненко, Т. П. Крыгина // Низковольтные аппараты защиты и управления. – 1993. – С. 223–229.
6. Павленко Т. П. Псевдожидкометаллические контакты электрических аппаратов с бездуговой коммутацией / Т. П. Павленко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 1999. – № 4. – С. 69–72.

Стаття надійшла до редакції 08.01.2013.
Після доробки 25.01.2013.

Павленко Т. П.

Д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна
**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СКЛАДУ КОМПОЗИЦІЇ ПСЕВДОРІДИННОМЕТАЛЕВИХ КОНТАКТІВ
 ЗА МАТЕМАТИЧНОЮ МОДЕЛЮ**

Електричні контакти являють собою тверду композицію, що складається з пористої матриці, просякнutoї легкоплавким наповнювачем. Під впливом джоульова тепла відбувається розплавлення наповнювача. У такому стані електричні контакти працюють як рідиннометалеві. За допомогою математичної моделі визначено перехідний опір в зоні контактування контактів, розподіл пор на їх робочій поверхні. Нові контактні композиції рекомендуються до використання в головних контактах багатоамперних автоматичних вимикачів, в струмообмежувальних блоках автоматичних вимикачів до 1000А, в контакторах.

Ключові слова: математичка модель, електричний контакт, контактна композиція, контактне натискання, перехідний опір, автоматичний вимикач.

Pavlenko T. P.

D-r Sci. Tech, professor, National technical university «Kharkiv politechnik institute», Ukraine

DETERMINATION OF THE COMPOSITION OF THE PSEUDO-LIQUID METAL CONTACTS BY THE MATHEMATICAL MODEL

The electrical contacts are the hard composition. The composition contains the porous matrix saturated with fusible filler. There is the change of the aggregate state composition when the current passes from the electric contacts. The fusible filler is melted under the influence of Joule's heat. The electric contacts work as liquid metallic in such state. It is necessary to analyze the conductivity of contacts and change of their parameters in the contact area for the effective composition exposure of contacts. The article presents the transitional resistance in an area connections of contacts, the distribution of pores on their working surface and co-operation of hard phase matrix with filler by the mathematical model of contact conductivity. In a mathematical model the parameters liquid metallic bridge and probabilistic determination of numbers of such bridges on the working surface by contacts are examined. The new contact compositions are recommended to be used in the main contacts of circuits breakers with the large values of current, in the blocks with current limitation to 1000 A by circuits breakers and in contactors.

Keywords: mathematical model, the electric contact, the contacts composition, the pressure of contacts, the transitional resistance, the circuit breaker.

REFERENCES

1. Belyaev V. L. Osobennosti raboty i konstruksiy mnogoampernih avtomaticheskikh vyklyuchateley. Sankt-Peterburg, SZTU, 2005, 254 p.
2. Pat. № 4513904 SShA, N0IN 11/02. Sposob umensheniya soprotivleniya mezhdru kontaktnymi poverhnostyami.
3. Pat. № 53-3431 Yaponiya, N0IN 29/20. Vyiklyuchatel na osnove metalla s nizkoy temperaturoy plavleniya.
4. Bron O. B., Belyaev V. L. Elektricheskaya stoykost kompozitsionnyih zhidkometallicheskih kontaktov, *Elektromehanika*, 1984, No. 8, pp. 76–81.
5. Pavlenko Yu. P., Gaponenko G. N., Krygina T. P. Novyyi kontaktnyy material dlya mnogoampernih vyklyuchateley, *Nizkovoltnyye apparaty zaschity i upravleniya*, 1993, pp. 223–229.
6. Pavlenko T. P. Psevdozhidkometallicheskie kontakty elektricheskikh apparatov s bezdugovoy kommutatsiyey, *Integrovani tehnologii ta energoberezhennya*, 1999, No. 4, pp. 69–72.

УДК 62-83:621.874

Швед Ю. С.¹, Орловский И. А.²

¹Ст. лаборант, Запорожский национальный технический университет, Украина

²Д-р техн. наук, профессор, Запорожский национальный технический университет, Украина, E-mail: i_orlovsky@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕДВИЖЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА

Выполнен анализ экспериментальных исследований процессов в электроприводах передвижения мостовых кранов грузоподъёмностью 15 и 20 тонн. Получены близкие к экспериментальным данным параметры режима электропривода мостового крана при математическом моделировании. Показана методом математического моделирования возможность движение мостового крана без касания ребордами колес рельсов.

Ключевые слова: мостовой кран, математическая модель, электропривод, экспериментальные исследования.

Мостовые краны широко применяются практически во всех отраслях народного хозяйства при технологических, погрузочно-разгрузочных, монтажных, складских и

других работах. Современные технологии повышают требования к точности и плавности перемещения грузов, к снижению потребления электроэнергии оборудо-

© Швед Ю. С., Орловский И. А., 2013