

УДК 621.316.933.064.4

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПСЕВДОЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНТАКТАХ

Т. П. Павленко

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: khpavlenko@yandex.ru

В системе электроснабжения применяются многоамперные автоматические выключатели, распределяющие токи десятки тысяч ампер. Одним из основных элементов в конструкции таких выключателей является контактная система, состоящая из главных и дугогасительных контактов. Для повышения работоспособности контактов и выключателя в целом необходимо стремиться к уменьшению их переходного сопротивления в зоне контактирования и повышению электродинамической устойчивости. Невыполнение таких условий приводит к несвоевременному расхождению контактов и созданию аварийной ситуации. Развитие данных процессов зависит от распределения теплового и электрического поля на рабочей поверхности контактов, работающих в динамическом режиме. В работе показана математическая модель распределения температурного поля на поверхности псевдожидкометаллических контактов. Данные композиции предназначены для главных контактов многоамперных автоматических выключателей и не содержат серебра и токсичных элементов.

Ключевые слова: электрический контакт, переходное сопротивление, электродинамическая устойчивость.

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ПСЕВДОРІДИННОМЕТАЛЕВИХ КОНТАКТАХ

Т. П. Павленко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: khpavlenko@yandex.ru

У системі електропостачання застосовуються багатоамперні автоматичні вимикачі, що розподіляють струми десятки тисяч ампер. Одним з основних елементів у конструкціях таких вимикачів є контактна система, яка складається з головних і дугогасильних контактів. Для підвищення працездатності контактів і вимикача в цілому необхідно прагнути до зменшення їх переходного опору в зоні контактування і підвищенню електродинамічної стійкості. Невиконання таких умов призводить до несвоечасного розходження контактів і створення аварійної ситуації. Розвиток даних процесів залежить від розподілу теплового та електричного поля на робочій поверхні контактів, що працюють у динамічному режимі. У роботі показана математична модель розподілу температурного поля на поверхні псевдорідиннометалевих контактів. Дані композиції призначені для головних контактів багатоамперних автоматичних вимикачів і не містять срібла та токсичних елементів.

Ключові слова: електричний контакт, перехідний опір, електродинамічна стійкість.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Электрические аппараты представляют собой электротехнические устройства, которые выполняют функции управления технологическими процессами и защиты электрических цепей от токов короткого замыкания и перегрузок. Контактная система в многоамперных автоматических выключателях состоит из дугогасительных и главных электрических контактов [1], выполняющих функции многоступенчатого разрыва электрической цепи. Но, кроме того, основным элементом в составе композиций электрических контактов многоамперных автоматических выключателей является серебро. На самом деле использовать серебро можно только в дугогасительных контактах, т.к. они предназначены для создания видимого разрыва электрической цепи при аварийных ситуациях. Поэтому проблемы, показанные выше, в целом определяют конкурентоспособность многоамперных автоматических выключателей.

В настоящее время в главных контактах все больше просматривается тенденция использования не серебросодержащих композиций.

Например, нашли свое применение жидкометаллические контакты (ЖМК), обладающие низким переходным сопротивлением в зоне контактирования контактов и высокой электродинамической устойчивостью, что снижает развитие электродинами-

ческих сил [2]. К сожалению, такие контакты ЖМК имеют ряд недостатков, которые препятствуют развитию их широкого применения. К основным из них относится необходимость закрытого объема контактного узла, что увеличивает массогабаритные показатели выключателя. Кроме того, используются токсичные и дорогостоящие элементы, такие как ртуть, галлий, свинец и другие легкоплавкие элементы, которые ухудшают экологическое состояние окружающей среды.

Кроме контактов ЖМК, используются также так называемые композиционные жидкометаллические контакты (КЖМК). Основное достоинство их то, что они могут сочетаться с конструкциями существующих высокоточных электрических аппаратов, в том числе и с многоамперными выключателями, и используют незначительное количество жидкого металла. В результате при их работе достигается такой же эффект как и от контактов ЖМК.

Целью работы является создание модели температурного распределения при нестационарном режиме и анализ изменения параметров при исследовании переходных процессов в ПЖМК.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В настоящей работе предлагаются контактные композиции, которые совмещают свойства металлокерамических (КМК) и жидкометаллических кон-

тактов (ЖМК). Такие составы композиции называются псевдожидкометаллическими (ПЖМК). Заявленный состав контактной композиции не имеет токсичных и дорогих элементов, обладает низким переходным сопротивлением, высокой электродинамической устойчивостью [3]. 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). Количество разрыхлителя и материала основы изменялось в широких пределах. После прессования и спекания заготовки контактов пропитывались легкоплавкой составляющей (рис. 1,б).

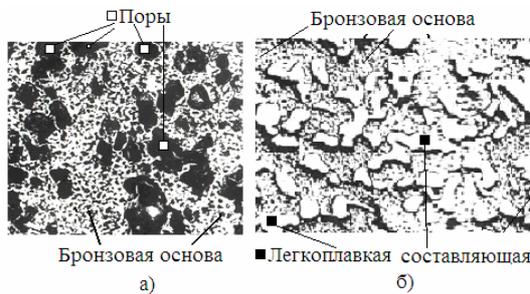


Рисунок 1 – Структура контактной композиции а) после спекания с образованием пор; б) после пропитки легкоплавкой составляющей

На рабочей поверхности таких контактов происходят различные процессы, которые зависят от температурного распределения поля при прохождении электрического тока.

Путь экспериментального определения зависимостей довольно-таки долгий и дорогой. Для повышения эффективности использования данных составов композиций контактов, и определения необходимых параметров, используется анализ тепловых процессов, происходящих при работе контактов ПЖМК на основе математической модели.

Переходные процессы в контактах возникают, как известно, при коммутациях тока или в аварийных режимах (короткое замыкание). Постановка краевой задачи для стационарного процесса, определяющего температурное и электрическое поле в главных контактах ПЖМК, имеет вид:

$$\operatorname{div}(\lambda(T, M) \operatorname{grad} T) + \frac{\bar{\delta}^2}{\gamma(T, M)} = 0, \quad M \in V, \quad (1)$$

где $T(M)$ – температура в точке M ; λ – коэффициент теплопроводности; γ – коэффициент электропроводности; $\bar{\delta} = -\gamma \operatorname{grad} \varphi$ – плотность тока в точке M области V ; φ – потенциал плотности тока в точке M .

Контакты ПЖМК работают в динамическом режиме, который характеризуется нестационарным и квазистационарным электрическим полем, что при-

водит к изменению параметров ПЖМК во времени t . Для практических расчетов достаточно знать оценку параметров начального (при $t = 0$), конечного (при $t = \infty$) условий и постоянной времени τ .

Общая постановка краевой задачи отличается от стационарного анализа наличием субстанционной составляющей и условиями Стефана, а также уравнениями коммутируемой цепи:

$$\rho c \frac{\partial}{\partial t} \left(T + \frac{r}{c} \eta(T - T_*) \right) = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \frac{\bar{\delta}^2}{\gamma}, \quad M \in V, \quad t > 0, \quad (2)$$

где ρ – массовая плотность состава композиции; c – удельная теплоемкость; r – энтальпия фазового перехода состава композиции ПЖМК; η – коэффициент теплообмена с внешней средой; T – температура нагрева поверхности; T_* – температура фазового перехода наполнителя ПЖМК.

Распределение температуры

$$T(M, 0) = T_o(M), \quad (3)$$

где $T_o(M)$ – начальное распределение температурного поля по поверхности.

Мгновенное значение изменения коммутируемого напряжения электрической цепи

$$L_k \frac{di}{dt} + R_k i + U_{Co} + \frac{1}{C_k} \int_0^t i(\xi) d\xi = e(t) \quad (4)$$

$$i(0) = I_0, \quad (5)$$

где L_k – индуктивность электрической цепи; $i(t)$ – мгновенное значение коммутируемого тока в момент времени t ; R_k – активное сопротивление цепи; U_{Co} – начальное напряжение на емкости; C_k – емкость электрической цепи; ξ – распределение расплавленных микроучастков (пятен) под действием электрического тока; I_0 – начальное значение коммутирующего тока.

Характерной особенностью переходных процессов в ПЖМК является наличие нескольких постоянных времени. Одна группа постоянных времени характеризует динамику развития микропроцессов, происходящих как на поверхности контактов, так и внутри самой композиции. Другая группа определяет стабилизацию процесса температурного поля на рабочей поверхности контактов ПЖМК, что имеет наибольшее практическое значение. С учетом взаимодействия параметров и в результате сложных математических преобразований удалось получить соотношения, определяющие температуру контактных деталей в случае симметричной конфигурации контактной системы.

Среднеинтегральная температура на поверхности контактов

$$T_\infty = T_{cp} + \frac{P_k}{2 < \rho c > V_1} \cdot \Phi_1(t) + \frac{I^2 F_o \sqrt{a_2}}{\gamma_2 F_{cp}^2 < \rho c > V_1} \cdot \Phi_2(t), \quad (6)$$

где T_{cp} – температура окружающей среды; P_k – мощность при коммутации тока; V_1 – область поверхностей контактов (подвижного, неподвижного); F_o, F_{cp} – площадь поперечного сечения контактодержателя вблизи контактных накладок и средняя по его длине; γ_2 – коэффициент электропроводности контактодержателя; I – действующее значение коммутируемого тока; a_2 – коэффициент температуропроводности контактодержателя; Φ_1, Φ_2 – коэффициенты, определяющие зависимость кондуктивных особенностей контактов и контактодержателей.

Качественное исследование динамики температурного поля проводится на основе аналитического решения, которое имеет вид:

$$\Phi_1(t) = \exp(-a_2 m^2 t) \cdot \times \left[\frac{\Phi_1(t)}{x_1^2 - a_2 m^2} - \frac{\Phi_2(t)}{x_2^2 - a_2 m^2} \right] / \sqrt{D};$$

$$x_1 = (-B + \sqrt{D}) / 2;$$

$$x_2 = -(B + \sqrt{D}) / 2; \quad D = B^2 - 4C;$$

$$\begin{aligned} \varphi_j(t) &= \exp(a_2 m^2 t) \cdot \times \\ &\times \left[-x_j - m\sqrt{a_2} \cdot \operatorname{erf}(m\sqrt{a_2}t) \right] + \\ &+ x_j \exp(x_j^2 t) \cdot \operatorname{erfc}(-x_j\sqrt{t}), \quad j = 1, 2; \end{aligned}$$

$$\Phi_2(t) = \exp(-a_2 m^2 t) \cdot \times \left[\frac{\Psi_1(t)}{x_1^2 - a_2 m^2} - \frac{\Psi_2(t)}{x_2^2 - a_2 m^2} \right] / D;$$

$$\begin{aligned} \Psi_j(t) &= \exp(a_2 m^2 t) \cdot \left[\frac{x_j}{m\sqrt{a_2}} \cdot \operatorname{erf}(m\sqrt{a_2}t) - 1 \right] + \\ &+ \exp(x_j^2 t) \cdot \operatorname{erfc}(-x_j\sqrt{t}), \quad j = 1, 2. \end{aligned}$$

$$B = \frac{\lambda_2 F_o}{\sqrt{a_2} \langle \rho c \rangle V_1}, \quad C = \frac{\langle \beta \rangle S_1}{\langle \rho c \rangle V_1} - a_2 m^2,$$

$$\langle \rho c \rangle V_1 = \rho_1 c_1 \pi R^2 H + \rho_2 c_2 \left(\frac{\pi R^2 h}{2} + 2R^2 h \right),$$

$$\langle \beta \rangle S_1 = \beta_1 2\pi R H +$$

$$+ \beta_2 \left(\pi R h + \frac{\pi R^2}{2} + 2R h + 2R^2 \right),$$

где высота контакта $h = h_1 = h_2$, коэффициенты теплообмена $\beta_2 = \beta_{21} = \beta_{22}$.

Учитывая, что $a^2 = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2}$, $m^2 = \frac{\beta^2 P_{cp}}{\lambda_2 F_{cp}}$, получаем постоянную времени:

$$\tau = \frac{\rho_2 c_2 F_{cp}}{\beta_2 P_{cp}}. \quad (7)$$

Анализ полученного решения однозначно указывает, что постоянная времени процесса макроскопического постоянства температуры контакта равно:

$$\tau = \frac{1}{a_2 m^2}. \quad (8)$$

Постоянная времени микроскопического температурного поля равна $\tau_o = R^2 / 2a$, что на несколько порядков меньше τ (где R – радиус контакта).

Для несимметричных конфигураций ПЖМК можно приблизительно оценить постоянную времени, если для расчетов взять средние значения величин:

$$\rho_2 = \frac{\rho_{21} + \rho_{22}}{2}; \quad C_2 = \frac{C_{21} + C_{22}}{2};$$

$$F_{cp} = \frac{F_{cp1} + F_{cp2}}{2};$$

$$\beta_2 = \frac{\beta_{21} + \beta_{22}}{2}; \quad P_{cp} = \frac{P_{cp1} + P_{cp2}}{2}.$$

Для расчета функций $\operatorname{erf}(x)$, $x \geq 0$ или $\operatorname{erfc}(x)$ можно использовать таблицы или элементарные аппроксимации:

$$\operatorname{erf}(x) \approx 1 - \sum_{j=1}^3 \hat{a}_j \eta^j \exp(-x^2), \quad \eta = \frac{1}{1 + px},$$

$$p = 0,47047, \quad \hat{a}_1 = 0,3480242,$$

$$\hat{a}_2 = -0,958798, \quad \hat{a}_3 = 0,7478556;$$

$$\operatorname{erfc}(x) \approx \left(\sum_{j=0}^4 \hat{b}_j x^j \right)^{-4}, \quad \hat{b}_0 = 1,$$

$$\hat{b}_1 = 0,278393, \quad \hat{b}_2 = 0,230389,$$

$$\hat{b}_3 = 0,000972, \quad \hat{b}_4 = 0,078108.$$

Конкретный расчет для случая:

$$R = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad H = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b_0 = 10^{-2} \text{ м}; \quad b_{cp} = b_0; \quad h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

материал контактодержателя – бронза и ее параметры:

$$\rho_2 = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3; \quad c_2 = 386,5 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К};$$

$$\beta_2 = 70 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

основа контактов ПЖМК – медь и ее параметры:

$$\rho_1 = 8,94 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3; \quad c_1 = 385 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К};$$

$$\beta_1 = 70 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Тогда

$$\frac{T_\infty - T_{cp}}{T_{\infty ust} - T_{cp}} \approx 0,1138434 [1 - \exp(-u)] +$$

$$+ 0,8861563 \operatorname{erf}(\sqrt{u}),$$

где $u = t/\tau$; $T_{\infty ust} = T_\infty|_{t=\infty}$; постоянная времени $\tau = 38,65 \text{ с}$.

На самом деле процесс происходит довольно-таки быстро, что связано с нелинейными эффектами.

Тогда с учетом выражения (6) и формулы Дюамеля:

$$T_\infty(t) = T_{cp} + \frac{\int_0^t P_k(t-\eta)\Phi_1(\eta)d\eta}{2 < \rho c > V_1} +$$

$$+ \frac{I^2 F_o \sqrt{a_2}}{\gamma_2 F_{cp}^2 < \rho c > V_1} \cdot \Phi_2(t) \quad (9)$$

С помощью модели были получены необходимые параметры, характеризующие работу ПЖМК в динамическом режиме. Полученная модель, конечно, не является оптимальной, но на данном пути

исследований позволила впервые определить изменения параметров ПЖМК при нестационарных процессах.

ВЫВОДЫ. Анализ свойств и параметров ПЖМК показал, что при переходных процессах микроскопическое температурное поле в области контактной зоны проводимости можно считать квазистационарным, а при макроскопическом поле изменяется во времени с изменением среднеинтегральной температуры контакт-деталей $T_\infty(t)$. При этом мощность потерь $P_k(t)$ является алгебраической функцией T_∞ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев В.Л. Особенности работы и конструкций многоамперных автоматических выключателей: Учебное пособие. – СПб.: СЗТУ, 2005. – 254 с.
2. Брон О.Б., Беляев В.Л. Электрическая стойкость композиционных жидкометаллических контактов // Электромеханика – М.: Изв. вузов, 1984. – № 8. – С. 76–81.
3. Павленко Т.П. Контактные композиции для многоамперных автоматических выключателей. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харьков: Информационный журнал, 2013. – № 4. – С. 59–63.

THE ANALYSIS OF PARAMETERS OF TRANSITION PROCESSES IN PSEUDO-LIQUID METAL CONTACTS

T. Pavlenko

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"

vul. Frunze 21, Kharkiv, 61002, Ukraine. E-mail: khpavlenko@yandex.ru

In the power supply industry the high current automatic circuit breakers are used to distribute the currents of tens of thousands of amperes. One of the main elements of the design of these circuit breakers is a contact system that consists of main contacts and arcing contacts. In general, their contact resistance should be reduced in the contact area to enhance their work efficiency. Increasing the electrodynamic stability also improves performance of the contacts and the switch. Delayed divergence of the contacts leads to the risk of emergency. These processes development depends on distribution of heat and electric field on the surface of the working contacts in the dynamic mode. In this paper, the mathematical model of the temperature field distribution on the surface of pseudo - liquid metal contacts is shown. Such compositions are designed for the main high current automatic circuit breakers, and they do not contain silver or toxic elements.

Key words: electrical contact, transition resistance, electrodynamic stability.

REFERENCES

1. Belyaev, V. (2005), *Osobennosti raboty i konstruksii mnogoampornykh avtomaticheskikh vyklyuchatelei* [The operational and design peculiarities of the high current automatic circuit breakers], SZTU, St. Petersburg, Russia.
2. Bron, O., Belyaev, V. (1984), "Electric hardness of the composite liquid-metal contacts", *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, Moscow, Russia, no. 8, pp. 76–81.
3. Pavlenko, T. (2013), "Contact compositions for the high current automatic circuit breakers", *Energy Saving. Power engineering. Energy audit*, Kharkiv, Ukraine, no. 4, pp. 59–63.

Стаття надійшла 22.05.2013.