УДК 621.316.933.064.4

Т.П. ПАВЛЕНКО

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТОВ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЭФФЕКТОМ, ДЛЯ МНОГОАМПЕРНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Создания конструкций многоамперных автоматических выключателей со значительными величинами номинальных токов требуют изменения и повышения характеристик их контактных систем, которые определяют энергоемкость, материалоемкость, экономичность и другие параметры. Учитывая особенности составов композиций контактных системах многоамперных автоматических выключателей и их многоступенчатую конструкцию, в данной работе рассмотрены перспективные составы бессеребряных контактов, работающие и расчет их основных параметров. В основу методологического расчета положены методы определения энергетических параметров, отображающие особенности работы контактных систем с жидкометаллическим эффектом.

Ключевые слова: многоамперный автоматический выключатель, бессеребряные контакты, составы композиций, энергетические параметры, структуры композиций.

Створення конструкцій багатоамперних автоматичних вимикачів зі значними величинами номінальних струмів вимагають зміни та підвищення характеристик їх контактних систем, які визначають енергоємність, матеріалоємність, економічність і інші параметри. Враховуючи особливості складів композицій у контактних системах багатоамперних автоматичних вимикачів та їх багатоступінчасту конструкцію, в даній роботі розглянуті перспективні безсрібні контакти, та розрахунок їх основних параметрів. В основу методологічного розрахунку покладені методи визначення енергетичних параметрів, які відображують особливості роботи контактних систем з рідинометалевим ефектом.

Ключові слова: багатоамперний автоматичний вимикач, без срібні контакти, склади композицій, енергетичні параметри, структури композицій.

Purpose. Determination of the energy parameters of promising structures without silver contact with liquid metal effect for high current circuit-breakers. ***Methodology.*** Based on the analysis of the contact systems containing electrical contacts with liquid metal effect, determine their parameters, which determine the electro dynamic stability and energy high current circuit-breakers. The features of models for calculating the main parameters of a liquid-metal contacts (GMK), and a pseudo-liquid-metal contacts (PGMK), intended for the main contacts for high current circuit-breakers. The basis for calculating the parameters of the effect lies conductivities phase changing material properties under the influence of temperature. ***Results.*** Display and analyze the calculation model of conduction in the three-dimensional field for the liquid-metal contact with the mesh being. Identify the most promising design silver contacts, which are based on liquid-metal-effectiveness ones. We compared the composition of liquid metal contacts (GMK) with a mesh base and pseudo liquid metal contacts (PGMK), whose operation is based on the change of the aggregate state during operation. calculation feature parameters PZGMK is a mathematical model of the contacts, which allows to determine the geometric parameters of conducting a heterogeneous surface. ***Originality.*** For the first time shown in the methods of calculation of the dependence of the material parameters of contact systems of contact pads and shapes, with state-of the contact surface, contact pressure, the value of the flowing current. The promising designs of electric for high current circuit-breakers for the first time reflected the composition of solid contacts (PGMK), which during operation act as liquid-metal contacts (GMK). A feature of the composition of such contacts is to have solid metal matrix in the pores of which are low-melting component. For contact PGMK analysis model, distribution of filler material on a conductive surface and the parameters of the porosity of the base material. It is shown that the method of solution, the problem of determining the transition resistance in the ground contacting surface of the contacts. ***Practical value.*** The use of such contacts in the main contact high current circuit breakers and other electrical switching apparatus with current without switching arc to the sustainability of their electro dynamic, reduced transient resistance in comparison with silver-containing compositions, reduced size and weight designs of circuit breakers by using a lightweight mechanism for trip free.

Key words: high current circuit-breaker, without silver contacts, the compositions formulations, the energy parameters, the structure of the compositions.

Введение. Современные мощности промышленных предприятий и систем электроснабжения требуют создания конструкций автоматических выключателей, которые способны выдерживать значительные токи и напряжения. При этом многоамперные автоматические выключатели со значительными токами должны также выполнять функции распределения электрической энергии и защиты энергетических цепей от токов короткого замыкания и перегрузок.

Значительная часть электрической нагрузки проходит через многоамперные автоматические выключатели, которые располагаются в комплектных трансформаторных подстанциях, цеховых распределительных устройствах и в других электроустановках.

Одним из основных элементов таких автома–тических выключателей является контактная система. Для многоамперных автоматических выключателей характерна 2-х или 3- ступенчатая конструкция контактной системы, на которой расположены главные (ГК) и дугогасительные (ДК) контакты.

В современных конструкциях многоамперных автоматических выключателей контактная система содержит контактные накладки, содержащие дефицитные и дорогостоящие элементы, например серебро.

Для уменьшения расхода дорогостоящих контактных элементов исследователи идут по пути создания новых конструктивных узлов контактных систем и их композиций. Применяемые новые решения способствуют экономии материалов, уменьшению габаритов конструкций контактных систем, улучшению характеристик и повышению быстродействия срабатывания многоамперных автоматических выключателей в аварийных ситуациях.

Анализ основных достижений. Низковольтное электроаппаратостроение развивается, в целом, в на–правлении уменьшения материалоемкости и массо–габаритных показателей электрических аппаратов, повышении их эксплуатационных характеристик,

© Т.П. Павленко, 2016

уменьшении расхода остродефицитного серебра в контактных композициях.

В настоящее время в многоамперных автомати–ческих выключателях наряду с серебросодержащими композициями в контактных системах нашли применение жидкометаллические контакты (ЖМК). Такие контакты имеют значительные преимущества по сравнению с твердыми серебросодержащими композициями, а именно [1–6]:

– низкое переходное сопротивление;

–значительную площадь контактирования, что приводит к равномерному распределению тока по рабочей поверхности контактов;

– незначительное контактное нажатие, что способствует использованию облегченного приводного механизма;

– отсутствие явления сваривания и залипания рабочих поверхностей контактных пар,

– отсутствие вибрации из-за воздействия электродинамических сил отталкивания

Конструкции контактных систем с ЖМК весьма разнообразны, при этом в их работе используются различные принципы контактирования жидкой и твердой фазы [1–4] .

Цель работы – определение энергетических па–раметров перспективных конструкций бессеребряных контактов с жидкометаллическим эффектом для многоамперных автоматических выключателей.

Материал и анализ исследований. Современные контактные композиции (ЖМК), для многоамперных автоматических выключателей, состоят из пористых, слоистых, сетчатых материалов, пропитанных или смоченных жидким металлом [1–5]. Принцип действия таких контактов основан на жидкометаллическом эффекте, который заключается в расположении твердых электродов в среде жидкого легкоплавкого металла и во взаимодействии необходимых элементов, участвующих в работе контактной системы.

Одним из основных параметров ЖМК является их проводимость тока, которая анализируется с помо–щью модели, показанной на рис. 1 и рис. 2 [1, 4–7].

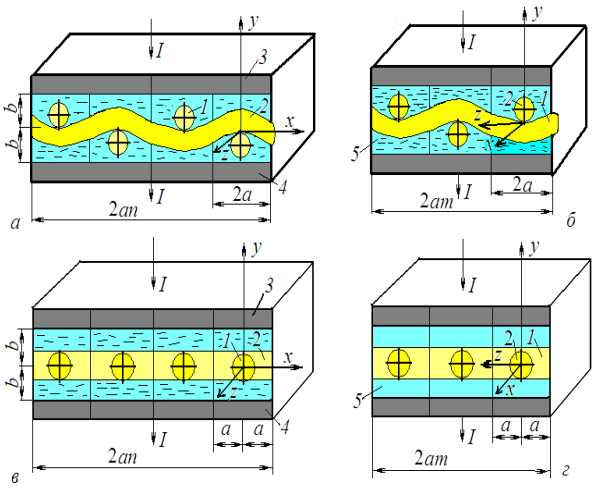


Рис. 1 – Модель композиционного жидкометаллического контакта с сетчатой основой

Структура композиции ЖМК с сетчатой основой (см. рис. 1) представляет собой волокна *1* и *2*, которые находятся между твердометаллическими электродами *3* и *4* в среде жидкого металла *5*.

Для расчета проводимости контактной поверхности принимаются следующие условия:

– поверхность сетчатой основы полностью смочена жидким металлом;

– расстояние между соседними волокнами ячеек *1* и *2* равно *2a* (по осям *x* и *z*), высота ячеек равна *2b* (по оси *y*);

– *n* – число ячее по оси *x*;

– *m* – число ячеек по оси *z*.

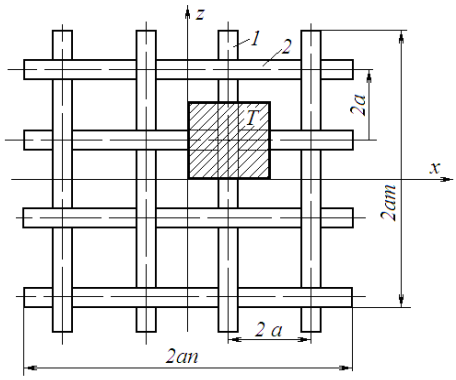


Рис. 2 – Сетчатая структура основы жидкометаллического контакта: *1* и *2* волокна основы

Проводимость контакта ЖМК определяется как:

$$Y_k = n \cdot m \cdot Y \,, \qquad (1)$$

где *Y* – проводимость ячейки с волокнами *1* и *2*.

Электрическое поле, изображенное на рис. 1 композиционного ЖМК трехмерно, что затрудняет решение задачи. Для упрощения задачи строится модель двухмерного поля, где волокна сетчатой структуры основы композиционного ЖМК заменяются на прямые цилиндры радиуса *r*, рис. 2.

Проводимость ячейки (см. рис. 2 – заштрихованная область), заполненная только жидким металлом и имеющая удельную электропроводностью γ_0, с учетом однородного электрического поля, определяется выражением:

$$Y_0 = \frac{1}{R_0} = \frac{\gamma_0 \cdot 2a^2}{b}, \qquad (2)$$

где R_0 – сопротивление ячейки, которая заполнена жидким металлом, Ом

При неоднородном (трехмерном) поле удельная проводимость волокон основы обозначается γ_1. С учетом того, что ток проходит как через жидкий металл, так и через волокна основы.

Сопротивление ячейки определяется как:

$$R = \frac{1}{Y} = R_0 + \Delta R \,, \qquad (3)$$

где ΔR – сопротивление однородного поля волокон основы *1* и *2*, Ом.

Это соотношение остается справедливым и в частном случае, когда в ячейке имеется лишь одно

волокно *1* или *2*:

$$R_i = \frac{1}{Y_i} = R_0 + \Delta R_i, \quad i = 1, 2. \qquad (4)$$

Поскольку каждое из волокон *1* и *2* в отдельности вносит одинаковое возмущение и ячейка *T* симметрична относительно осей *x*, *y*, *z*, то с учетом выражения (4), получим:

$$R_1 = R_2; \quad \Delta R_1 = \Delta R_2, \qquad (5)$$

где R_1, R_2 – сопротивления, соответствующие ячейке *T*, которая содержит только одно волокно *1* или *2*;

$\Delta R_1, \Delta R_2$ – приращения сопротивлений ячеек, обусловленные возмущением однородного поля соответственно волокнами *1* и *2*. Поэтому:

$$\Delta R = \Delta R_1 + \Delta R_2 = 2\Delta R_1 \qquad (6)$$

С учетом соотношений (4) – (6) проводимость Y (3) ячейки *T*, которая содержит волокна *1* и *2* может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} Y &= (R_0 + \Delta R)^{-1} = (R_0 + 2\Delta R_1)^{-1} = \\ &= (R_0 + 2R_1 - 2R_0)^{-1} = (2R_1 - R_0)^{-1}. \end{aligned} \qquad (7)$$

Таким образом, задача проводимости композиционного сеточного жидкометаллического контакта в трехмерном поле сводится к расчету сопротивления R_0 по выражению (2) и сопротивления R_1 ячейки *T* (см. рис. 2.), содержащей лишь одно волокно и образующей двухмерное поле [1, 7].

Для расчета проводимости $Y_1 = \frac{1}{R_1}$ ячейки *T* композиционного ЖМК, с заданной характеристикой среды (удельной электропроводностью) и содержащей только одно волокно, применяется координатно-структурный метод определения проводимостей. Данный метод основан на интерпретации геометрической структуры поля как криволинейной системы координат, названной системой координат поля.

Замена неизвестных координат поля некоторыми известными координатами (координатами аппроксимации) позволяет получить два приближенных значения Y^* и Y^{**} для проводимости Y с заданной характеристикой среды, причем

$$Y^* \le Y \le Y^{**}, \qquad (8)$$

что дает возможность произвести оценку точности определения Y.

Поскольку в среде жидкого металла находятся волокна основы с удельной электропроводностью γ_1, отличающейся от удельной электропроводности жидкого металла γ_0, то можно показать, что если γ в любой части области ячейки *T* уменьшается (увеличивается), то проводимость ячейки также уменьшается (увеличивается). В частности, если в ячейку *T* поместить бесконечно тонкие пластины с удельной электропроводностью $\gamma_1 = 0$; $\gamma_1 = \infty$, то это приведет к уменьшению (увеличению) проводимости Y. Это соответствует физическим представлениям о явлении проводимости.

Для определения заниженного Y^* и завышенного Y^{**} значений проводимости ячейки *T* композиционного ЖМК рассмотрим ¼ ее часть, показанную на модели рис. 3. В данном случае проводимость равна проводимости всей ячейки *T* в результате симметрии относительно осей координат.

Для аппроксимации значений применяется прямоугольная система координат *x*, *y*, *z* (см. рис. 3).

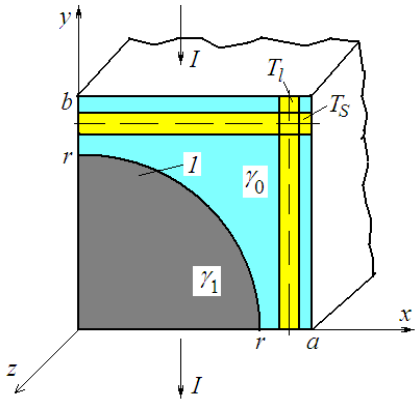


Рис. 3 – Одна четвертая часть ячейки *T* композиционного жидкометаллического контакта с сетчатой основой

При определении заниженного значения проводимости Y^* ячейки *T* предположим, что в нее поместили ряд бесконечно тонких пластинок с удельной электропроводностью $\gamma = 0$, поверхности которых совпадают с осями *y* и *z*. Отсюда следует, что ячейка *T* окажется разбитой на ряд параллельно включенных трубок поля T_l конечной длины $l = b$ и элементарным сечением dS (см. рис. 3). В свою очередь, эти трубки можно разбить на последовательно соединенные участки с элементарной длиной dl, имеющей проводимость $\frac{\gamma \cdot dS}{dl}$. Тогда проводимость $Y(T_l)$ трубок будет определяться из соотношения:

$$\frac{1}{Y(T_l)} = \int_l \frac{dl}{\gamma \cdot dS}. \qquad (9)$$

Учитывая, что проводимость ячейки *T* равна сумме проводимостей $Y(T_l)$, исходя из (7), получим:

$$Y^* = \int_S \frac{1}{\int_l \frac{dl}{\gamma \cdot dS}}. \qquad (10)$$

Данное выражение определяет проводимость ячейки *T* с измененной характеристикой среды, которая имеет в области ячейки множество бесконечных тонких пластинок с удельной электропроводностью $\gamma = 0$. Это может приводить к уменьшению проводимости.

Следовательно,

$$\gamma^* \le Y. \qquad (11)$$

Для композиционного ЖМК (см. рис. 1) заниженная проводимость Y_1^* ячейки T с одним волокном может быть определена как проводимость бесконечного числа элементарных трубок T_l длиной b и проводимостью Y_l (см. рис. 3). Величина их имеет различные значения в области T по длине трубки, т.к. ток I последовательно проходит через жидкий металл с удельной электропроводностью γ_1. Тогда согласно рис. 3 и соотношению (10)

$$Y_1^* = 2a\int_0^a Y_l \cdot dx\,, \qquad (12)$$

где $Y_l = \left(\int_0^b \frac{dy}{\gamma}\right)^{-1}$ – проводимость трубки поля элементарного сечения, отнесенная к величине этого сечения.

Поскольку функция $\gamma = \gamma(x, y)$ принимает значения γ_0 или γ_1, то с учетом рис. 3 для величины Y_l имеем:

при $0 \le x \le r$

$$Y_l = \frac{1}{\int_0^b \frac{dy}{\gamma}} = \frac{1}{\int_0^{\sqrt{r^2-x^2}} \frac{dy}{\gamma_1} + \int_{\sqrt{r^2-x^2}}^b \frac{dy}{\gamma_0}} = \frac{1}{\frac{\sqrt{r^2-x^2}}{\gamma_1} + \frac{b-\sqrt{r^2-x^2}}{\gamma_0}} = \frac{\gamma_0}{b + \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_1} - 1\right)\cdot\sqrt{r^2-x^2}}\,, \qquad (13)$$

при $r \le x \le a$

$$Y_l = \frac{1}{\int_0^b \frac{dy}{\gamma_0}} = \frac{\gamma_0}{b}\,. \qquad (14)$$

Подставив (13) и (14) в выражение (12), получается соотношение

$$\frac{Y_1^*}{2a} = \int_0^r \frac{\gamma_0 \cdot dx}{b + \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_1} - 1\right)\cdot\sqrt{r^2-x^2}} + \int_r^a \frac{\gamma_0 \cdot dx}{b} = \frac{dx}{b + \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_1} - 1\right)\cdot\sqrt{r^2-x^2}} + \frac{\gamma_0(a-r)}{b}\,. \qquad (15)$$

Обозначим из (15):

$$J_1 = \int_0^r \frac{dx}{b + \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_1} - 1\right)\cdot\sqrt{r^2-x^2}}\,, \qquad (16)$$

С учетом рис. 3 следует, что:

при $x = 0,\ \alpha = 0$; при $x = r,\ \alpha = \frac{\pi}{2}$,

$$x = r \cdot \sin\alpha \qquad (17)$$

Подставив (17) в выражение (16), и проведя преобразования, получим

$$J_1 = \int_0^{\pi/2} \frac{r\cdot\cos\alpha\cdot d\alpha}{b + \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_1} - 1\right)\cdot r\cdot\cos\alpha} = \frac{r}{b}\int_0^{\pi/2} \frac{\cos\alpha\cdot d\alpha}{1 + \left(\frac{\gamma_0}{\gamma} - 1\right)\cdot\frac{r}{b}\cdot\cos\alpha} \qquad (18)$$

Введя обозначения:

$$p = \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_1} - 1\right)\cdot\frac{r}{b}\,;\ t = \frac{r}{b} \le 1\,; \qquad K = \frac{r}{a} \le 1\,. \qquad (19)$$

Подставив (19) в выражение (18), получим

$$J_1 = \frac{r}{b}\int_0^{\pi/2} \frac{\cos\alpha\cdot d\alpha}{1 + p\cdot\cos\alpha} = \frac{r}{b\cdot p}\left[\frac{\pi}{2} - \int_0^{\pi/2} \frac{d\alpha}{1 + p\cdot\cos\alpha}\right]. \qquad (20)$$

Обозначив из (20):

$$M = \int_0^{\pi/2} \frac{d\alpha}{1 + p\cdot\cos\alpha}\,. \qquad (21)$$

Подставив выражение (21) в выражение (20), получим

$$J_1 = \frac{r}{b\cdot p}\left(\frac{\pi}{2} - M\right). \qquad (22)$$

Подставив (19) и (22) в выражение (15), получим

$$\frac{Y_1^*}{2a} = \frac{\gamma_0\cdot r}{b\cdot p}\left(\frac{\pi}{2} - M\right) + \frac{\gamma_0(a-r)}{b}\,. \qquad (23)$$

Откуда

$$Y_1^* = \frac{2a\gamma_0}{b}\left[\frac{r}{p}\left(\frac{\pi}{2} - M\right) + a - r\right] = \frac{2a^2\cdot\gamma_0}{b}\left[\frac{K}{p}\left(\frac{\pi}{2} - M\right) + 1 - K\right]\,, \qquad (24)$$

где M – определяется из выражения (21)

$$M = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{1-p^2}}\, arctg\sqrt{\frac{1-p}{1+p}}, & p^2 \le 1 \\ \frac{1}{\sqrt{p^2-1}}\ln\left|\frac{1+\sqrt{\frac{p+1}{p-1}}}{1-\sqrt{\frac{p+1}{p-1}}}\right|, & p^2 > 1. \end{cases} \qquad (25)$$

Для определения завышенного значения проводимости Y^{**} ячейки T необходимо представить расположенные в ней множества бесконечно тонких пластинок с удельной электропроводностью $\gamma = \infty$, поверхности которых ориентированы по осям x и z (см. рис. 3).

В результате ячейка T разбивается на множество последовательно включенных слоев T_S с конечным сечением S и элементарной толщиной dl. Эти же слои можно разбить на параллельно соединенные участки с элементарным сечением dS, которые имеют проводимость $\frac{\gamma\cdot dS}{dl}$. Поэтому проводимость $Y(T_S)$ слоев будет определяться выражением

$$Y(T_S) = \int_S \frac{\gamma \cdot dS}{dl}. \qquad (26)$$

Учитывая, что обратная величина проводимости ячейки T равна сумме обратных величин проводимостей $Y(T_S)$ слоев T_S, имеем:

$$Y^{**} = \left(\int_l \frac{1}{\int_S \frac{\gamma \cdot dS}{dl}} \right)^{-1}. \qquad (27)$$

Это выражение определяет проводимость ячейки T с измененной характеристикой среды, которое заключается в том, что в область ячейки T было помещено множество бесконечно тонких пластин с $\gamma = \infty$. Согласно выводам [1, 4–7] это может приводить лишь к увеличению проводимости.

Следовательно,

$$Y^{**} \geq Y. \qquad (28)$$

Для композиционного ЖМК (см. рис. 1) завышенная проводимость Y_1^{**} ячейки T с одним волокном основы может быть определена как проводимость бесконечного числа слоев элементарной толщины dS с площадью S, совпадающей с поверхностью, образуемой осями x и z. Проводимость такого слоя Y_S имеет различные значения по оси x, поскольку ток I проходит как через жидкий металл, так и через волокно основы радиуса r, т.е.

$$Y_1^{**} = \left(\int_0^b \frac{dy}{Y_S} \right)^{-1}, \qquad (29)$$

где $Y_S = 2a\int_0^a \gamma \cdot dx$ – проводимость слоя элементарной толщины, умноженной на величину этой толщины.

В этом случае функция $\gamma = \gamma(x, y)$ также принимает значения или γ_0, или γ_1.

Поэтому, с учетом рис. 3 для величины Y_S:

при $0 \leq y \leq r$

$$Y_S = 2a \int_0^{\sqrt{r^2-y^2}} \gamma_1 \cdot dx + 2a \int_{\sqrt{r^2-y^2}}^{a} \gamma_0 \cdot dx = 2a \cdot \gamma_1 \sqrt{r^2 - y^2} + 2a \cdot \gamma_0 \left(a - \sqrt{r^2 - y^2} \right) = 2a \cdot \gamma_0 \left[a + \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_0} - 1 \right) \cdot \sqrt{r^2 - y^2} \right], \qquad (30)$$

при $r \leq y \leq b$

$$Y_S = 2a\int_0^a \gamma_0 \cdot dx = 2a^2 \cdot \gamma_0 \qquad (31)$$

Подставив (30) и (31) в выражение (29), получается соотношение:

$$Y_1^{**} = \frac{1}{\int_0^r \frac{dy}{2a\gamma_0 \left[a + \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_0} - 1 \right) \cdot \sqrt{r^2 - y^2} \right]} + \int_r^b \frac{dy}{2a^2 \gamma_0}} = \frac{\frac{2a^2 \cdot \gamma_0}{b}}{\frac{1}{b}\int_0^r \frac{dy}{1 + \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{a} \cdot \sqrt{r^2 - y^2}} + \frac{1}{b} \cdot (b - r)} = \frac{2a^2 \cdot \gamma_0}{b} \cdot \frac{1}{1 - \frac{r}{b} + \frac{1}{b} \cdot \int_0^r \frac{dy}{1 + \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{a} \cdot \sqrt{r^2 - y^2}}}. \qquad (32)$$

Обозначим из (32):

$$J_2 = \frac{1}{b} \cdot \int_0^r \frac{dy}{1 + \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{a} \sqrt{r^2 - y^2}}. \qquad (33)$$

Подставив (17) в выражение (33), получается выражение:

$$J_2 = \frac{1}{b} \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{r \cdot \cos\alpha \cdot d\alpha}{1 + \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_0} - 1 \right) \cdot \frac{r}{a} \cdot \cos\alpha} = \frac{r}{b} \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{\cos\alpha \cdot d\alpha}{1 + \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_0} - 1 \right) \cdot \frac{r}{a} \cdot \cos\alpha}. \qquad (34)$$

При обозначении:

$$q = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_0} - 1 \right) \cdot \frac{r}{a} \qquad (35)$$

$$N = \int_0^{\pi/2} \frac{d\alpha}{1 + \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_0} - 1 \right) \cdot \frac{r}{a} \cdot \cos\alpha}. \qquad (36)$$

Подставив (35) и (36) в выражение (34), получается соотношение

$$J^2 = \frac{r}{b \cdot q} \left(\frac{\pi}{2} - N \right). \qquad (37)$$

Подставив (19) и (37) в выражение (32), получается

$$Y_1^{**} = \frac{2a^2 \cdot \gamma_0}{b} \cdot \frac{1}{1 - t + \frac{t}{q}\left(\frac{\pi}{2} - N \right)} = \frac{2a^2 \cdot \gamma_0}{b} \left[\frac{t}{q} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - N \right) + 1 - t \right]^{-1}, \qquad (38)$$

где N определяется из выражения (36)

$$N=\begin{cases}\dfrac{2}{\sqrt{1-q^2}}arctg\sqrt{\dfrac{1-q}{1+q}}, & q^2\le 1\\ \dfrac{1}{\sqrt{q^2-1}}\ln\left|\dfrac{1+\sqrt{\dfrac{q+1}{q-1}}}{1-\sqrt{\dfrac{q+1}{q-1}}}\right|, & q^2>1\end{cases} \quad (39)$$

Таким образом, с помощью одних и тех же коор–динат аппроксимации (прямоугольной системы коор–динат) выражения (23) и (38) позволяют определить заниженное Y_1^* и завышенное Y_1^{**} значения проводимости ячейки *T* композиционного ЖМК, которые удовлетворяют неравенствам (8), (11) и (28).

Среднегеометрическая величина $Y_{1\Gamma}$ от заниженного и завышенного значений полученных проводимостей

$$Y_{1\Gamma}=\sqrt{Y_1^*\cdot Y_1^{**}} \quad (40)$$

также как и Y_1, удовлетворяет соотношениям (7), (11) и (28) и дает более точное, чем Y_1^* и Y_1^{**}, приближение к Y_1.

Поэтому, выражение (40) говорит о повышении точности определения проводимости.

Соотношения (23), (38) и (40) позволяют рассчитать сопротивление $R_1=\dfrac{1}{Y_1}$, входящее в выражение (7), с помощью которого можно определить проводимость ячейки *T* композиционного ЖМК со слоистой сетчатой структурой. Используя соотношение (1), можно определить полную проводимость Y_k, зная геометрические параметры сетчатой основы композиционного ЖМК (диаметр волокна, размеры ячейки, а также площадь поверхности контакта).

Важнейшим параметром электрических контактов, по которому оценивается качество контакта и его работоспособность, являются электрические тепловые потери, выделяющиеся при прохождении через контакт электрического тока. Величина тепловых потерь зависит от величины проводимости контакта Y_k и определяется выражением:

$$P=U^2\cdot Y_k=\frac{I^2}{Y_k}, \quad (41)$$

где U – падение напряжения на контактах.

Поскольку в композиционных ЖМК ток протекает и через жидкий металл, и через волокна основы, то общие тепловые потери в нем равны сумме тепловых потерь, выделяющихся в жидком металле P_2 и в волокнах P_1:

$$P=P_1+P_2 \quad (42)$$

Для выяснения влияния геометрических параметров сетчатой основы композиционного ЖМК на его сопротивление, и следовательно, общие тепловые потери необходимо определить их распределение между жидким металлом и волокнами композиции контакта.

Данное решение задачи построено на уравнении Лапласа в цилиндрической системе координат, которое имеет следующий вид:

$$\frac{1}{r}\cdot dr\left(r\cdot\frac{d\varphi}{dr}\right)+\frac{1}{r^2}\cdot\frac{d^2\varphi}{d\alpha^2}=0, \quad (43)$$

где φ – потенциал электрического поля.

В качестве проводящей среды в композиционном ЖМК используется жидкий металл, в который помещается цилиндрическое волокно основы.

Решением уравнения Лапласа (43) является [1]:

для волокна основы

$$\varphi_1=-\frac{2\gamma_0}{\gamma_1+\gamma_0}\cdot E_0x; \quad (44)$$

для области *T*, занятой жидким металлом

$$\varphi_2=E_0\cdot\left(\frac{\gamma_1-\gamma_0}{\gamma_1+\gamma_0}\cdot\frac{r_1}{r}-r\right)\cdot\cos\alpha. \quad (45)$$

Напряженность электрического поля внутри волокна

$$E_1=2\gamma_0(\gamma_1+\gamma_0)^{-1}\cdot E_0, \quad (46)$$

где E_0 – напряженность поля в области *T*, заполненной жидким металлом.

Плотность тока в области *T*, при отсутствии в ней волокон

$$\delta_0=\gamma_0E_0=I(4ab)^{-1}. \quad (47)$$

Напряженность поля в области *T*:

$$E_0=I(\gamma_0\cdot 4ab)^{-1}. \quad (48)$$

Напряженность поля области *T* вне волокна основы

$$E_2=\sqrt{E_\alpha^2+E_r^2}, \quad (49)$$

где E_α^2 – составляющая E_2, направленная под углом к оси x.

$$E_\alpha=\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial\varphi}{\partial\alpha}; \quad (50)$$

где E_r – радиальная составляющая вектора E^2

$$E_r=\frac{\partial\varphi_2}{\partial r} \quad (51)$$

Подставив (50), (51) и (45) в (49), окончательно после преобразований получается

$$E_2=\sqrt{\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial\varphi_2}{\partial\alpha}\right)^2+\left(\frac{\partial\varphi_2}{\partial r}\right)^2}=$$
$$=E_0\sqrt{\left[\frac{\gamma_1-\gamma_0}{\gamma_1+\gamma_0}\cdot\frac{r_1^2}{r^2}-1\right]^2\sin^2\alpha+\left[-\frac{\gamma_1-\gamma_0}{\gamma_1+\gamma_0}\cdot\frac{r_1^2}{r^2}-1\right]^2\cos^2\alpha}. \quad (52)$$

Обозначив

$$h=\frac{\gamma_1-\gamma_0}{\gamma_1+\gamma_0}. \quad (53)$$

Подставив (53) в выражение (52), окончательно после преобразований получается:

$$E_2 = E_0\sqrt{\left(h\cdot\frac{r_1^2}{r^2}-1\right)^2\sin^2\alpha+\left(h\cdot\frac{r_1^2}{r^2}+1\right)^2\cos^2\alpha} = \cdot$$

$$= E_0\sqrt{h^2\left(\frac{r_1}{r}\right)^4+1+2h\left(\frac{r_1}{r}\right)^2\cos 2\alpha}. \quad (54)$$

Максимальное значение напряженность $\overline{E}_2$ принимает при углах $\alpha = 0$ или $\alpha = \pi$.

В этом случае

$$E_2 = E_{2m} = E_0\cdot\left[h\cdot\left(\frac{r_1}{r}\right)^2+1\right]. \quad (55)$$

Область, занятая жидким металлом в объеме *T* и ограниченная радиусом r_1 волокна, начинается при $r = r_1$. Тогда

$$E_{2m} = E_0(h+1) = E_0\frac{\gamma_1-\gamma_0+\gamma_1+\gamma_0}{\gamma_1+\gamma_0} = E_0\frac{2\gamma_1}{\gamma_1+\gamma_0}. \quad (56)$$

Таким образом, выражения (46), (48) и (56) позволяют определить напряженности электрического поля области *T* (см. рис. 3) композиционного ЖМК внутри волокна основы – E_1, однородной области *T*, занятой только жидким металлом – E_0 и вне волокна основы – E_2.

Тепловые потери в объемной области *T* определяются как:

$$P = \gamma\cdot E^2, \quad (57)$$

где γ – удельная электропроводимость среды;

E – напряженность электрического поля.

Тепловые потери, выделяющиеся в волокне:

$$P_1 = \gamma_1\cdot E_1^2. \quad (58)$$

Тепловые потери в жидком металле:

$$P_2 = \gamma_2\cdot E_{2m}^2. \quad (59)$$

Подставив (46) и (48) в выражение (58), получим соотношения:

$$P_1 = \frac{\gamma_1(2\gamma_0)^2\cdot I^2}{(\gamma_1+\gamma_0)^2\cdot\gamma_0^2\cdot 16a^2b^2} = \frac{\gamma_1^2\cdot I^2}{4a^2b^2\cdot(\gamma_1+\gamma_0)^2}. \quad (60)$$

Подставив (46) и (56) в выражение (59), получим

$$P_2 = \frac{\gamma_0(2\gamma_1)^2\cdot I^2}{(\gamma_1+\gamma_0)^2\cdot\gamma_0^2\cdot 16a^2b^2} = \frac{\gamma_1^2\cdot I^2}{4a^2b^2\cdot\gamma_0(\gamma_1+\gamma_0)^2} \quad (61)$$

Поскольку поле плотности тока внутри волокна однородно, то тепловые потери, выделяющиеся в волокне равны:

$$P_1 = PV_1, \quad (62)$$

где V_1 – объем волокна

$$V_1 = 2a\pi\cdot r_1^2. \quad (63)$$

Подставив (60) и (63) в выражение (62), получим

$$P_1 = \frac{\gamma_1\cdot I^2\cdot 2a\pi\cdot r_1^2}{4a^2b^2(\gamma_1+\gamma_0)^2} = \frac{\gamma_1\cdot I^2\cdot\pi\cdot r_1^2}{2ab^2(\gamma_1+\gamma_0)^2} \quad (64)$$

Тепловые потери в жидком металле:

$$P_2 = P - P_1 \quad (65)$$

Суммарные потери в волокнах основы (см. рис.1)

$$P_{1\Sigma} = 2n\cdot m\cdot P_1 = n\cdot m\cdot\frac{\gamma_1\cdot I^2\cdot\pi\cdot r_1^2}{ab^2(\gamma_1+\gamma_0)^2} \quad (66)$$

Суммарные тепловые потери в жидком металле:

$$P_{2\Sigma} = P - P_{1\Sigma} = \frac{I^2}{Y_k} - n\cdot m\cdot\frac{\gamma_1\cdot I^2\cdot\pi\cdot r_1^2}{ab^2(\gamma_1+\gamma_0)^2} \quad (67)$$

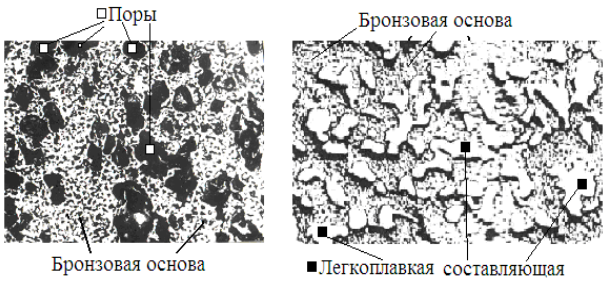
Таким образом, с учетом выражений (41), (66) и (67) и проводимости Y_k, можно определить общие тепловые потери, выделяющие в композиции ЖМК, а также распределение этих потерь между областями, занятыми жидким металлом и материалом волокон основы.

Преимущества контактных композиций ЖМК по сравнению с твердыми серебросодержащими составами, позволяет создавать автоматические выключатели на большие номинальные токи в цепях с ожидаемыми величинами токов короткого замыкания.

Однако композиционные конструкции ЖМК пока не нашли широкого применения из-за токсичности или дефицитности применяемых элементов в контактах их композиций, а также резкого увеличения переходного сопротивления с течением времени из-за окисления контактов в процессе их эксплуатации.

Перспективным является направление работ по созданию бессеребряного контактного материала, реализующего принцип жидкометаллического эффекта в точках контактирования при пропускании тока, Данное явление обеспечивает низкое переходное сопротивление и высокую электродинамическую устойчивость (ЭДУ) за счет увеличения площади контактирования (рис. 4).

Специфика работы разрабатываемых контактов заключается в изменении агрегатного состояния материала под влиянием джоулева тепла при протекании тока. В результате увеличивается эффективная площадь контактирования рабочих поверхностей контактных пар и, таким образом уменьшается переходное сопротивление R_n контактов [8–10].



а *б*

Рис. 4 –Структура рабочей поверхности псевдожидкометаллических контактов
а – после спекания с образованием пор;
б – после пропитки легкоплавкой составляющей

Изменение переходного сопротивления зависит от многих факторов – соотношения объемов туго– и легкоплавких составляющих, от размера пор матрицы, заполненных наполнителем, электро- и

теплопроводности композиции, ее твердости, взаимной смачиваемости материалов состава композиции, усилий контактного нажатия.

Путь экспериментального определения зависимостей является длительным и дорогостоящим. Для повышения эффективности исследований разработана математическая модель контактов, которая позволяет определить геометрические параметры их токопроводящей гетерогенной поверхности, рис. 5 [9, 10].

Распределение материала наполнителя по объему контакт-детали характеризуется коэффициентом пористости K_v. Формирование проводящей поверхности зависит от коэффициента поверхностной пористости K_{so}. Данные понятия тождественны, поэтому принимается $K_{so}= K_v$.

Распределение наполнителя по рабочей поверхности контакта характеризуется коэффициентом K_s, в общем случае с K_{so}. При расплавлении наполнителя происходит увеличение его объема, характеризующееся коэффициентом α, поэтому при условии смачиваемости наполнителя матрицы средний радиус контактных пятен R_1 превосходит радиус пор R_0.

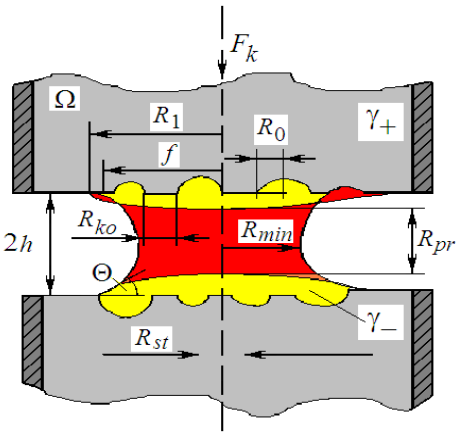


Рис. 5. – Жидкометаллический мостик контактной рабочей поверхности и его параметры
F_k – сила контактного нажатия; Ω – область контактной поверхности, R_1 – средний радиус пятна; f – максимальное значение распределения мостика; R_0 – радиус пор; γ_+ – электропроводность матрицы; R_{ko} – радиус одной поры; R_{min} –минимальный радиус перешейка; R_{pr} – радиус перешейка; Θ – угол смачивания; γ_- – электропроводность легкоплавкого наполнителя; R_{st} – сопротивление стягивания линий тока

При соприкосновении двух контактных пятен образуется жидкометаллический мостик с максимальной высотой $2h$ и осевым радиусом $y(x)$, принимающим максимальное значение $f(y)$ основания и R_{min} в наиболее узком месте, которые в общем случае зависят от угла смачивания Q [9, 10].

Математическое решение задачи по определению характеристик мостика и переходного сопротивления дало следующие соотношения: средний радиус пятен R_1 превосходит радиус пор R_0 в Z раз, т.е.

$$R_1 = ZR_0, \tag{68}$$

где Z = max (1, Z_0) а Z_0 является решением нелинейного уравнения:

$$Z_0^3 = \left[1 + Ks_0 \cdot (Z_0^2 - 1)\right] \cdot \frac{\alpha e_*}{R_0 \varphi \cdot (Q)}, \tag{69}$$

где e_*- средняя глубина проплавления контакт-детали в контактной зоне;

Q – краевой угол смачивания наполнителем материала матрицы;

φ – функция угла смачивания

$$\varphi(Q) = \frac{tg\frac{Q}{2}}{2}\left\{1 + \frac{tg^2\frac{Q}{2}}{3}\right\}. \tag{70}$$

Величины K_s и K_{s0} связаны соотношением

$$K_s = K_{s0} Z^2. \tag{71}$$

Полное электрическое сопротивление, приходящееся на один жидкометаллический мостик, складывается из сопротивления жидкометаллического перешейка R_{km} и сопротивления стягивания R_{ctm}:

$$R_m = R_{km} + R_{ctm} \tag{72}$$

Сопротивление перешейка:

$$R_{km} \int_0^{2h} \frac{\alpha x}{\gamma_- \cdot \pi \cdot \varepsilon(x)} \tag{73}$$

где γ_- – удельная электропроводность расплава;

$\varepsilon(x)$ – радиус сечения мостика,

$$r(0) = r(2h) = f, \qquad r(h) = R_{\min} \tag{74}$$

Вычисляя интеграл по формуле Симпсона, с учетом геометрических параметров мостика, имеем:

$$R_{km} \approx \frac{2}{3\pi} \cdot \frac{\operatorname{ctg}\frac{Q}{2}}{\gamma R_1} \cdot \left[\frac{1}{(b - \operatorname{tg} Q)^2} + \frac{2}{(b - \sec Q)^2}\right] \tag{75}$$

Сопротивление линий стягивания :

$$R_{ctm} = \frac{2R_{ko}}{kf} + \frac{1}{2\gamma_+ f}, \tag{76}$$

где R_{ko} – сопротивление стягивания, приходящееся на одну пору,

γ_+ – удельная электропроводность материала ПЖМК. При этом $\gamma_- \le \gamma_+$.

С необходимой точностью для практических расчетов допустима линейная интерполяция:

$$R_{ko}(\varepsilon) \approx R_{ko}(0) \cdot (1 - \varepsilon) + R_{ko}(1) \cdot \varepsilon; \tag{77}$$

$$R_{ko}(1) = \frac{1}{4r \cdot R_0}. \qquad (78)$$

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

$$R_{ko}(0) = \frac{4}{\pi R_0 \gamma_-} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{x_j^3}, \qquad (79)$$

где x_j – положительные корни уравнения $I_0(x_j) = 0$ занумерованы в порядке возрастания,

$I_0(x)$ – функция Бесселя I рода нулевого порядка.

Таким образом,

$$R_{ko}(0) \approx \frac{1}{R_0 \gamma_-} \cdot \left[x \cdot (1-\varepsilon) + \frac{\varepsilon}{4} \right] \qquad (80)$$

где обозначено:

$$x = \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{x_j^3}. \qquad (81)$$

Значение константы согласно численному суммированию на ПЭВМ составляет $x = 0.1024728 \approx 0.1$.

Для последующих вычислений целесообразно представить выражение для сопротивления мостика в виде:

$$R_{km} = \frac{C_0}{\gamma_- R_1}, \qquad (82)$$

где значение постоянной C_0 определяется как:

$$C_0 = \frac{2}{3\pi} \operatorname{ctg} \frac{Q}{2} \cdot \left[\frac{1}{(b - \operatorname{tg} Q^2)} + \frac{2}{(b - \sec Q)^2} + \frac{2z}{f} \right] \times \times \left[x \cdot (1-\varepsilon) + \frac{\varepsilon}{4} \right] + \sum \frac{\operatorname{ctg} \frac{Q}{2}}{2(b - tgQ)}. \qquad (83)$$

В целом сопротивление контакта из материала ПЖМК можно определить как:

$$R_* = \min \left\{ R_f \cdot \frac{\frac{K_s^2 \cdot \varepsilon}{C_0 \cdot R_1} + \left[\left(\frac{K_s^2 \cdot \varepsilon}{C_0 \cdot Q \cdot R_1} \right)^2 + \frac{4K_s^2 \cdot \varepsilon}{C_0 \cdot Q \cdot R_1} R_{ko} \right]^{\frac{1}{2}}}{\frac{4k^2 \cdot s \cdot \varepsilon}{C_0 \cdot Q \cdot R_1} \cdot R_{ko}} \right\}, \qquad (84)$$

где учтено, что радиус проводящей поверхности не может превосходить радиус воспринимающей усилие области Ω.

Изотермы в окрестности проводящей поверхности являются эллипсоидальными, причем глубина проплавления связана с выражением R_*.

$$\mathring{a}_* = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{\pi} \right) \cdot R_* \qquad (85)$$

Расчет параметров с помощью программ ПЭВМ показал, что с увеличением пористости до K_{so}= 0,5 сопротивление заметно падает, далее стабилизируется, а при малой электропроводности легкоплавкого наполнителя даже несколько повышается. Оптимальной пористостью контактной композиции ПЖМК следует считать значения в пределах K_{so}= 0,5–0,7.

Выводы. Показанные методы расчета параметров перспективных электрических контактов с жидкометаллическим эффектом соответствуют цели, поставленной в работе. В результате были определены основные энергетические показатели, а также показаны изменения свойств и параметров материалов в процессе эксплуатации электрических контактов. С помощью методов аппроксимации определены проводимости тока в элементах состава композиции ЖМК, где в качестве проводящей составляющей используется жидкий металл, в который помещается цилиндрическое волокно сетчатой основы.

Для повышения эффективности исследований состава композиции ПЖМК разработана математическая модель контактов, с учетом их особенностей, которая позволяет определить геометрические параметры их токопроводящей гетерогенной поверхности. Данная модель основана на определении распределения материала наполнителя по всему объему контакт-детали, которое зависит от пористости материала основы.

Список литературы

1. *Беляев В. Л.* Особенности работы и конструкций многоамперных автоматических выключателей / *В.Л. Беляев.* – СПб.: СЗТУ, 2005. – 254 с.
2. *Woodard, Jr K. E.* Пат. 4513904, США. Способ уменьшения сопротивления между контактными поверхностями / *K. E Woodard, Jr., R.. L. Dotson* –1983.
3. Xen Li. Пат. 53-3431б Япония. Выключатель на основе металла с низкой температурой плавления. / Xen Li. – 1995.
4. *Брон О.Б.* Электрическая стойкость композиционных жидкометаллических контактов / *О.Б. Брон, В.Л. Беляев* // Электромеханика, 1984. № 8. – С. 76–81.
5. *Брон О.Б.* Исследование проводимости слоистых жидкометаллических контактов / *О.Б. Брон, В.Л. Беляев, В.Н Острейко* // Электромеханика, 1983. № 8. – С. 44–48.
6. *Дегтярь В.Г.* Жидкометаллические контакты / *В.Г. Дегтярь, В.В. Вячкис* // Аппараты низкого напряжения. – М.: Информэлектро, 1980. – С. 63.
7. *Острейко В.Н.* Координатно-структурный метод определения проводимостей / *В.Н. Острейко* // Электромеханика. 1980. № 12. – С. 1269–1274.
8. *Павленко Т.П.* Псевдорідиннометалеві електричні контакти для низьковольтних автоматичних вимикачів / *Т.П. Павленко* // Сб. научн. тр. ДонГТУ. 2013. Вип. 39. – С. 217–221.
9. *Павленко Т.П.* Анализ параметров переходных процессов в псевдожидкометаллических контактах / *Т.П. Павленко* // Вісник КДУ ім. М. Остроградського. 2013. Вип. 4/2013(81). – С .15–18.
10. *Павленко Т.П.* Математическая модель определения параметров состава композиции псевдожидкометаллических контактов / *Т.П. Павленко* // Електротехніка та Електроенергетика. Наук. журнал. 2013. № 1. – С. 14–18.

References (transliterated)

1. Belyaev V.L. *Osobennosti rabotyi i konstruktsiy mnogoampernyih avtomaticheskih vyiklyuchateley* [Features of operation and design of high current circuit breakers]. *SPb.:SZTU*, 2005. – 254 p.
2. Woodard, Jr K. E. Sposob umensheniya soprotivleniya mezhdu kontaktnyimi poverhnostyami [A method of reducing contact resistance between the surface]. Patent UShA, no 4513904, 1983.
3. Xen Li. Vyiklyuchatel na osnove metalla s nizkoy temperaturoy plavleniya [The circuit breaker on the basis of a metal with a low melting point] Patent Japan, no 53-3431,1995.
4. Bron O.B., Belyaev V.L. Elektricheskaya stoykost kompozitsionnyih zhidkometallicheskih kontaktov [The electrical resistance of composite liquid-metal contacts] / *Elektromehanika – M.: Izv. vuzov*, 1984. no 8, pp. 76–81.
5. Bron O.B., Belyaev V.L., Ostreyko V.N. Issledovanie provodimosti sloistyh zhidkometallicheskih kontaktov [A study of the conductivity of layered liquid-metal contacts] / *Elektromehanika – M.: Izv. vuzov*, 1983. no 8, pp.c. 44–48.
6. Degtjar' V.G, Vjachkis V.V. Zhidkometallicheskie kontakty [Liquid metal contacts]. *Apparaty nizkogo naprjazhenija* [Vehicles of low tension]. Moskow, Informjelektro, 1980, p. 63.
7. Ostrejko V.N. Koordinatno-strukturnyj metod opredelenija provodimostej [Coordinate structural method for determination of conductivity]. / *Elektromehanika – M.: Izv. Vuzov*. 1980. no 12, pp. 1269–1274.
8. Pavlenko T.P. Psevdoridinnometalevi elektrichni kontakti dlja niz'kovol'tnih avtomatichnih vimikachiv [Contacts pseudo liquid metal for low-voltage circuit breakers]. *Sbornik nauchnyh trudov Doneckogo GTU* [Collection of scientific works of Donetsk state technical University]. Alchevs'k, DonSTU, 2013, issue 39, pp. 217–221.
9. Pavlenko T.P. Analiz parametrov perehodnyh processov v psevdozhidkometallicheskih kontaktah [Analysis of parameters of transients in contacts pseudo liquid metal]. *Visnik KDU im. M. Ostrograds'kogo* [Bulletin of the Kremenchuk state universitet named M. Ostrogradskogo]. Kremenchuk, KDU, 2013, issue 4/2013(81), pp. 15–18.
10. Pavlenko T.P. Matematicheskaja model' opredelenija parametrov sostava kompozicii psevdozhidkometallicheskih kontaktov [Mathematical model determination of the parameters of composition of the pseudo liquid metal contacts]. *Elektrotehnika ta Elektroenergetika* [Electronics and Electricity]. Zaporozh'e, ЗНТУ, 2013, no. 1. pp. 14–18.

Поступила (received) 29.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методология расчета параметров контактов с жидкометаллическим эффектом, для многоамперных автоматических выключателей / Т.П. Павленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 20–29. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

Методология расчета параметров контактов с жидкометаллическим эффектом, для многоамперных автоматических выключателей / Т.П. Павленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 20–29. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

The methodology for calculating the parameters of contact with liquid metal effect for high current circuit-breakers /T.P. Pavlenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 11 (1183). – P. 20–29. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2409-9295.

«Відомості про авторів / *Сведения об авторах / About the Authors*»

Павленко Тетяна Павлівна, доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, професор кафедри електричного транспорту, +38(0975734425); e-mail: khpavlenko@yandex.ru;

Павленко Татьяна Павловна, доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, профессор кафедры электрического транспорта, +38(0975734425); e-mail: khpavlenko@yandex.ru;

Pavlenko Tatyana Pavlovna, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kharkiv national university of municipal economy O.V. Beketova, Full Professor Department of electric transport, +38(0975734425); e-mail: khpavlenko@yandex.ru.