

УДК 621.316.933.064.4

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МНОГОАМПЕРНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИХ ГЛАВНЫХ КОНТАКТОВ

Т. П. Павленко

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

Для распределения электрической энергии и защиты электрических цепей при аварийных режимах применяются многоамперные автоматические выключатели. Такие выключатели используются в комплектных трансформаторных подстанциях, а также в электроустановках, осуществляющих технологические процессы производства металлов и химических веществ электролизным способом. В данной работе отражены и проанализированы основные параметры, которые определяют работоспособность и быстродействие срабатывания автоматических выключателей при аварийных ситуациях. Показаны методы определения и распределения плотности тока с учетом разделения главных контактов на ряд параллельных. Данное решение способствует уменьшению влияния электродинамических сил, которые приводят к несвоевременному размыканию электрических контактов. Для уменьшения действия электродинамических сил предлагаются прогрессивные конструкции контактных систем без применения серебра. Принцип действия контактов основан на жидкометаллическом эффекте, что способствует уменьшению габаритов механизма включения–отключения, контактных нажатий и электрического аппарата в целом.

Ключевые слова: многоамперный автоматический выключатель, электрические контакты.

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ БАГАТОАМПЕРНИХ АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ І ПЕРСПЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЇХ ГОЛОВНИХ КОНТАКТІВ

Т. П. Павленко

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

Для розподілу електричної енергії та захисту електричних ланцюгів при аварійних режимах використовуються багатоамперні автоматичні вимикачі. Такі вимикачі використовуються в комплектних трансформаторних підстанціях, а також в електроустановках, які здійснюють технологічні процеси виробництва металів і хімічних речовин електролізними засобами. У даній роботі відображені й проаналізовані основні параметри, які визначають працездатність і швидкість спрацювання автоматичних вимикачів при аварійних ситуаціях. Показані методи визначення та розподілу щільності струму з урахуванням поділу головних контактів на низку паралельних. Дане рішення сприяє зменшенню впливу електродинамічних сил, які призводять до несвоєчасного розмикавання електричних контактів. Для зменшення дії електродинамічних сил пропонуються прогресивні конструкції контактних систем без застосування срібла. Принцип дії контактів заснований на рідинометалевому ефекті, що сприяє зменшенню габаритів механізму включення–відключення, контактних натискань і електричного апарату в цілому.

Ключові слова: багатоамперний автоматичний вимикач, електричні контакти.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Рост мощности систем электроснабжения и промышленных установок приводит к повышению номинальных токов электротехнических устройств, которые возросли за последнее время практически в 20 раз.

Необходимость повышения значений токов и напряжений также вызвано еще и тем, что значительное место в системе электроснабжения предприятий занимают резкопеременные нагрузки некоторых электротехнических установок в металлургических цехах, которые управляют технологическими процессами и участвуют, например, в процессе выплавки металла или электролиза химических веществ.

Распространенными электротехническими устройствами, которые участвуют в распределении электрической энергии в электрических установках и осуществляют их защиту при возникновении аварийной ситуации, являются многоамперные автоматические выключатели с большими значениями номинальных токов.

Современные тенденции развития низковольтного электроаппаратостроения требуют уменьшения массогабаритных показателей автоматических выключателей при одновременном улучшении их защитных характеристик.

Основными элементами многоамперных автоматических выключателей являются:

- параллельная контактная система;
- механизм включения–отключения (свободного расцепления);
- привод механизма;
- блок расцепителей.

Конструктивной особенностью многоамперных автоматических выключателей (рис. 1,а) по сравнению с автоматическими выключателями на номинальные токи до 1000 А является наличие двух- или трехступенчатой контактной системы, которая состоит из главных (ГК) и дугогасительных (ДК) контактов (рис. 1,б).

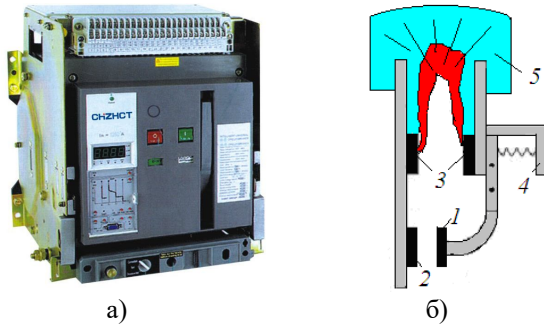


Рисунок 1 – Конструкція багатоамперного автоматичного вимикача (а) і фрагмент його контактної системи (б): 1 – подвижний головний контакт; 2 – неподвижний головний контакт; 3 – подвижний і неподвижний дугогасительные контакты; 4 – соединение с механизмом расцепления; 5 – фрагмент дугогасительной системы

Контактная многоступенчатость способствует снижению энергетической нагрузки за счет ее равномерного перераспределения в контактном соединении [1].

Для выполнения определенных функций основными элементами используются следующие конструктивные решения:

- разделение электрических контактов в каждом полюсе автоматического выключателя на ряд параллельных;
- разделение электрических контактов на ДК и ГК, которые обеспечивают протекание тока в номинальном режиме;
- применение электродинамических компенсаторов на ДК для уменьшения электродинамических сил;
- выполнение механизма свободного расцепления с учетом накопления энергии перед его включением.

Исходя из конструктивных решений, прослеживается очевидная связь между основными элементами многоамперного автоматического выключателя, что в значительной мере определяют его работу.

Цель данного исследования – анализ параметров, определяющих работоспособность многоамперных автоматических выключателей и определение перспективных конструкций главных контактов, способствующих замене серебросодержащих композиций.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В соответствии с поставленной целью проанализируем работу основных элементов многоамперных выключателей и параметры, которые определяют их работоспособность.

Основными параметрами многоамперного выключателя, которые определяют его габариты и массу, являются:

- электродинамическая устойчивость (ЭДУ), которая обеспечивается рядом параллельных контактов;

- предельная коммутационная (ПКС) и включающая способность, что обеспечивается эффективностью работы дугогасительной системы выключателя и механизма свободного расцепления;

- энергоемкость многоамперного автоматического выключателя, которая определяется его механизмом свободного расцепления [1, 2];

- движение подвижных частей механизма свободного расцепления по пути замыкания ГК и ДК; при этом действуют как противодействующие усилия, так и усилия контактных пружин, а также электродинамические силы, возникающие при протекании тока КЗ в устройстве электродинамического компенсатора;

- движение подвижных частей механизма от момента замыкания главных контактов до полного выбора провала. При этом добавляется сопротивление пружин ГК, но электродинамические усилия ДК резко уменьшаются за счет перераспределения токов между ДК и ГК.

Процесс полного включения многоамперного автоматического выключателя заканчивается выпрямлением рычагов механизма свободного расцепления.

С ростом ПКС выключателя повышается мощность привода и механизма свободного расцепления. Но это приводит к увеличению габаритов и массы всего выключателя. При этом надежность выключателя уменьшается из-за механического износа контактов при их соударениях.

Контактная система современных многоамперных автоматических выключателей представляет собой количество параллельных контактов, которые находятся в каждом полюсе выключателя. Разделение главных контактов на ряд параллельных в одном полюсе обеспечивает уменьшение необходимого суммарного контактного нажатия при сохранении величин коммутируемых токов и значений ЭДУ.

Это, естественно, приводит к уменьшению значений электродинамических усилий. Также к уменьшению ЭДУ приводит разброс переходных сопротивлений контактов, связанный с неравномерностью величин протекающих токов.

Суммарное контактное сопротивление их уменьшается благодаря сохранению суммарной величины контактного нажатия. Это приводит к росту их электродинамической устойчивости.

Однако при пропускании переменного тока через контакты из-за эффекта близости и поверхностного эффекта токи в параллельных контактах распределяются неравномерно. Поэтому количество параллельных контактов выбирается таким образом, что на каждый из них приходится разное значение тока в номинальном режиме работы выключателя.

Для равномерного распределения тока в параллельных контактах автоматического выключателя приходится увеличивать их активное и индуктивное сопротивления и уменьшать взаимоиндуктивность. Но это приводит к увеличению габаритов контактного узла, а, соответственно, и самого выключателя.

Уменьшение числа параллельных контактов приводит к увеличению мощности привода и механизма, что также влияет на увеличение габаритов выключателя.

При применении последовательно коммутирующих ГК и ДК происходит перетекание тока из ГК в параллельную цепь ДК в процессе отключения автоматического выключателя. При этом должны выполняться определенные условия, обеспечивающие минимальное время горения электрической дуги [2]:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi) - \frac{u_d}{r_g + r_d} \left[1 - e^{-\frac{r_g + r_d}{L_g + L_d - 2M} t} \right]; \quad (1)$$

$$u_d > I_m (r_g + r_d); \quad (2)$$

$$u_d \gg I_m \omega (L_g + L_d - 2M), \quad (3)$$

где I_m – амплитудное значение тока, протекающего по главным контактам до их размыкания; t – время от момента размыкания главных контактов; ψ – угол, зависящий от момента коммутации; u_d – напряжение на дуге при размыкании ГК; r_g, r_d, L_g, L_d – активные и индуктивные сопротивления параллельных ГК и ДК соответственно; M – взаимная индуктивность между ГК и ДК.

Выполнение условий (2) и (3) способствует быстрому размыканию ДК и гашению электрической дуги, что обеспечивает минимальную эрозию их рабочей поверхности.

Одним из основных параметров, определяющих работу контактных систем, является переходное сопротивление электрических контактов. В связи с тем, что расстояние между параллельными ветвями ГК и контактодержателями небольшое, то на распределение токов между ними оказывает влияние контактное сопротивление. Оно нестабильно и зависит от разных факторов. Основными из них являются [3, 4]:

- материал контактных накладок и их форма;
- состояние контактной поверхности;
- контактные нажатия;
- величина протекающего тока.

Процесс изменения контактного сопротивления и падения напряжения при больших токовых нагрузках имеет сложный характер. В момент замыкания контактов данные параметры сначала растут, но по мере продолжительной работы контактов или в случае возникновения КЗ происходит размягчение контактного материала и увеличение площади контактирования, что приводит к уменьшению этих параметров.

Зная размеры контакта и падение напряжения $U(t)$ на поверхности, с которой оно снимается с учетом длины участка l контакта, определяется напряженность электрического поля $E_f(t)$ (рис. 2), где z, x, y – оси распределения напряженности поля; $2a \times 2b \times l$ – размер контактодержателя [2, 3].

$$E_f(t) = \frac{U(t)}{l}. \quad (4)$$

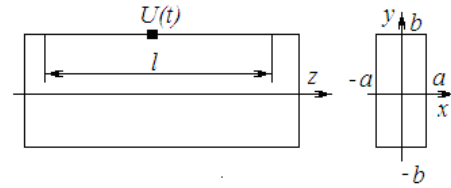


Рисунок 2 – Поверхность электрического контакта и его параметры

Плотность тока на поверхности контакта, А/мм²:

$$\delta_f(t) = \frac{E_f}{\rho}, \quad (5)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала, Ом·мм²/м.

С учетом (4) и (5),

$$\delta_f(t) = \frac{U(t)}{\rho l}. \quad (6)$$

Распределение напряженности и плотности тока по сечению контакта определяется, исходя из уравнения Максвелла:

$$\Delta \bar{E} = \frac{\mu_0}{\rho} \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}, \quad (7)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость, Гн/м.

Вектор напряженности \bar{E} электрического поля вдоль оси z :

$$\bar{E} = \bar{K} E_z = \bar{K} \rho \delta_z, \quad (8)$$

где \bar{K} – единичный вектор напряженности электрического поля, направленный вдоль оси z ; δ_z – плотность тока вдоль оси z .

Исходя из (7) и (8), а также опустив индекс z , можно получить уравнение для определения плотности тока по сечению шины контактодержателя:

$$\Delta \delta = \frac{\mu_0}{\rho} \frac{\partial \delta}{\partial t}. \quad (9)$$

В связи с тем, что в модели рис. 2 рассматривается параллелепипед, то удобно воспользоваться декартовыми координатами, получив уравнение распределения плотности тока в частных производных:

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta}{\partial y^2} = \frac{\mu_0}{\rho} \frac{\partial \delta}{\partial t}, \quad (10)$$

где $-a < x < a$; $-b < y < b$; $t > 0$.

Начальные и граничные условия решения:

$$\delta(x, y, 0) = 0; \quad (11)$$

$$\delta(\pm a, y, t) = \delta(\pm b, x, t) = \delta_f(t).$$

При плотности тока $\delta_f(t)=1$ и с учетом (7), решение уравнения (10) возможно в виде

$$\delta_i(x, y, t) = 1 - [\delta_1(x, t) - 1][\delta_1(y, t) - 1], \quad (12)$$

где $\delta_1(x, t)$ и $\delta_1(y, t)$ удовлетворяют соответственно уравнениям

$$\frac{\partial \delta_1(x, t)}{\partial t} = \aleph \frac{\partial^2 \delta_1(x, t)}{\partial x^2}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \delta_1(y, t)}{\partial t} = \aleph \frac{\partial^2 \delta_1(y, t)}{\partial y^2}, \quad (14)$$

где принимается $\aleph = \frac{\rho}{\mu_0}$.

При краевых условиях:

$$\delta_1(x, 0) = \delta_1(y, 0) = 0; \quad (15)$$

$$\delta_1(\pm a, t) = \delta_1(\pm b, t) = 1. \quad (16)$$

Таким образом, выражение (12) удовлетворяет исходному уравнению (10) и условиям (15).

Решение задач (13) и (15) имеет вид:

$$\delta_1(x, t) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \exp\left[-\aleph \frac{(2n+1)^2 \pi^2 t^2}{4a^2}\right]}{2n+1} \times \quad (17)$$

$$\times \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2a};$$

$$\delta_1(y, t) = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \exp\left[-\aleph \frac{(2m+1)^2 \pi^2 t^2}{4b^2}\right]}{2m+1} \times \quad (18)$$

$$\times \cos \frac{(2m+1)\pi y}{2b},$$

где n, m – число параллельных ламелей контактов.

Подставив (17) и (18) в (12), получим

$$\delta_1(x, y, t) = 1 - \frac{16}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n+m}}{(2n+1)(2m+1)} \times$$

$$\times \exp\left[-\frac{\aleph \pi^2 t}{4} \left(\frac{(2n+1)^2}{a^2} + \frac{(2m+1)^2}{b^2}\right)\right] \times \quad (19)$$

$$\times \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2a} \cos \frac{(2m+1)\pi y}{2b}.$$

Выражение (19) соответствует $\delta_f = 1$.

Для решения задачи, исходя из граничных условий $\delta_f = \frac{U(t)}{\rho l} \neq 1$, необходимо воспользоваться теоремой Дюамеля.

$$\delta(x, y, t) = \frac{1}{\rho l} \int_0^t U(\lambda) \frac{\partial}{\partial t} \delta_1(x, y, t - \lambda) d\lambda, \quad (20)$$

где $U(\lambda)$ – подинтегральная функция.

Обозначив для краткости

$$\alpha_{n,m} = \frac{\aleph \pi^2}{4} \left[\frac{(2n+1)^2}{a^2} + \frac{(2m+1)^2}{b^2} \right] \quad (21)$$

и подставив (19) в (20), произведя при этом необходимые вычисления, получим плотность тока в шине контактодержателя:

$$\delta(x, y, t) = \frac{16}{\rho l \pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\alpha_{n,m} (-1)^{n+m}}{(2n+1)(2m+1)} \times$$

$$\times \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2a} \cos \frac{(2m+1)\pi y}{2b} \times \quad (22)$$

$$\times \exp(-\alpha_{n,m} t) \int_0^t \exp(\lambda_{n,m} \lambda) U(\lambda) d\lambda.$$

Ток, протекающий через шину ламели, А:

$$i(t) = \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \delta(x, y, t) dx dy. \quad (23)$$

Проинтегрировав выражение (22) и используя (23), получим

$$i(t) = \frac{256ab}{\pi^4 \rho l} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\alpha_{n,m}}{(2n+1)^2 (2m+1)^2} \times$$

$$\times \int_0^t \exp[-\lambda_{n,m} (t - \lambda)] U(\lambda) d\lambda. \quad (24)$$

При отсутствии скин-эффекта ток равномерно распределяется по сечению шины контактодержателя. В этом случае ток на поверхности контакта

$$i_0(t) = \frac{U(t) 4ab}{\rho l}. \quad (25)$$

С ростом тока напряжение на контактах возрастает до напряжения плавления, величина которого зависит от материала контакта.

При увеличении амплитуды тока в контактах происходит их отброс, который характеризуется резким возрастанием напряжения. При этом на контактах возникает короткая электрическая дуга и ток из коммутирующего контакта перетекает в шунтирующую цепь. После замыкания контактов часть тока из шунтирующей цепи перетекает в коммутирующую цепь. Этот процесс может повторяться, если этого тока достаточно для электродинамического отброса контактов.

Одним из показателей при выборе контактного материала для параллельных контактов является стабильность вольтамперных характеристик и малый разброс токов.

Нестабильность вольтамперных характеристик контактов в существенной мере обуславливает неравномерность токовых нагрузок параллельных контактов, снижая при этом электродинамическую устойчивость.

Как показывает практика, наилучшими контактными парами являются композиции контактов КМК-А30м / КМК-А32м, КМК-А40 / КМК-А40. Проведенные эксперименты показали, что наименьший отброс данных композиций контактов наблюдался при контактном нажатии 40 Н. При этом, ток отброса для контактной пары КМК-А40 / КМК-А40 составляет 6500–7000 А, а для пары КМК-А30м / КМК-А32м – 9500–12000 А [2, 3].

Для определения электродинамической устойчивости параллельных контактов необходимо определить распределение плотности токов.

Рассмотрим решение данной задачи с учетом вольтамперных характеристик коммутирующих контактов и индуктивных связей между ними.

Вольтамперные характеристики (рис. 3) замкнутых контактов имеют значительный статический разброс [2, 3].

Это связано со случайным контактированием контактов и увеличением площади проводящей поверхности вследствие ее размягчения при протекании тока. Нестабильность характеристик обусловлена неравномерностью токовых нагрузок параллельных контактов, что снижает их электродинамическую устойчивость [1–3].

Имея исходные данные, составим систему уравнений, определяющую указанный процесс, которая включает n уравнений баланса напряжений во всех параллельных ветвях и уравнение баланса токов в системе, а именно:

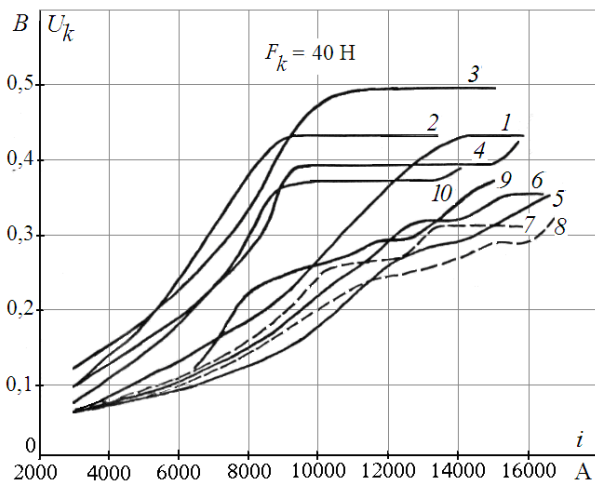


Рисунок 3 – Вольтамперные характеристики контактной пары КМКА30/КМКА32

- количество параллельных ветвей контактов – k ;
- расстояние между параллельными контактодержателями (ламелями) – S ;
- стороны контактодержателя $2a$ и $2b$ прямоугольного сечения;
- значения сопротивления параллельных ламелей вблизи оси вращения;
- амплитуду тока I_m , а также набор экспериментальных вольт-амперных характеристик, соответствующих определенному материалу контактов.

Баланс напряжений для j -ой параллельной ветви контактов

$$\Delta U = U_{kj}(i_j(t)) + \left(R_{kj}^{(0)} + R \right) i_j(t) + \sum_{m=1}^n M_{jm} \frac{d i_m(t)}{dt}, \quad (26)$$

где $j=1\dots,n$; $m=1\dots,n$; $U_{kj}(i_j(t))$ – падение напряжения из вольт-амперной характеристики коммутирующего контакта в j -ой параллельной ветви, соответствующее току $i_j(t)$, мВ; $R_{kj}^{(0)}$ – сопротивление

j -ой параллельной ламели вблизи оси вращения, Ом (т.к. разброс значений $R_{kj}^{(0)}$ относительно мал, то можно считать $R_{kj}^{(0)} = R_k = const$); R – сопротивление шины контактодержателя, Ом; ΔU – падение напряжения на полюсе автоматического выключателя, мВ; $i_j(t)$ – ток в j -ой ламели, А; M_{jm} – взаимная индуктивность параллельных шин, Гн.

Баланс токов в системе:

$$\sum_{j=1}^n i_j(t) = i(t) = I_m \sin \omega t, \quad (27)$$

где I_m – максимальное значение сквозного тока, кА.

Начальное условие:

$$i_j(0) = 0, \quad j = 1, \dots, n. \quad (28)$$

Взаимоиндуктивность любой пары параллельных ламелей, Гн:

$$M_{jm} = \frac{1}{r^2} \sum_{t,p=1}^r \frac{\mu_0 l}{2\pi} \times \left(\ln \frac{l + \sqrt{l^2 + h_{tp}^2}}{h_{tp}} - \frac{\sqrt{l^2 + h_{tp}^2}}{l} + \frac{h_{tp}}{l} \right); \quad (29)$$

где h_{tp} – расстояние между бесконечно тонким проводником, проходящим через площадку с номером t , принадлежащую j -ой ламели, и бесконечно тонким проводником, проходящим через площадку с номером p , принадлежащей ламели m ; r – количество площадок в сечении ламели, которое определяется из условия сходимости.

Собственная индуктивность контактов, Гн:

$$L_j = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{g} - 1 \right), \quad (30)$$

где g – среднее геометрическое расстояние площади прямоугольника со сторонами a и b .

$$\ln g = \frac{1}{2} \ln(a^2 + b^2) - \frac{1}{2} \frac{a^2}{b^2} \ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} \right) - \frac{1}{12} \frac{b^2}{a^2} \ln \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right) + \frac{2}{3} \frac{a}{b} \operatorname{arctg} \frac{b}{a} + \frac{2}{3} \frac{b}{a} \operatorname{arctg} \frac{a}{b} - \frac{25}{12}. \quad (31)$$

Максимальное значение тока электродинамической устойчивости I_m' определяется методом последовательных приближений. Полученные значения токов I_m' сохраняются и используются для статистической оценки множества их значений, соответствующих различным выборкам вольтамперных характеристик контактов [2, 3].

Вероятностные оценки случайных величин целесообразно получать методом статистического моделирования, используя модель токораспределения в параллельных ламелях и вольтамперные характеристики, соответствующие определенному материалу контактов и контактной нажатии.

Необходимость такого подхода вызвана тем, что результаты проведенных экспериментов характеризуют случайные процессы единичного контакта, которые нельзя распространить на всю систему, поскольку изменение в единичном контакте влияет на распределение тока в системе параллельных контактов.

Для сокращения количества экспериментов и количества натуральных образцов многоамперных выключателей используется методика статистической оценки электродинамической устойчивости в системе параллельных ламелей при различных параметрах контактной системы [2, 3].

При этом выбирается случайная точка вольтамперной характеристики композиции контактов $Q = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$, где ξ_j – номер экспериментальной вольтамперной характеристики композиции контактов, соответствующей j -ой ламели.

Для каждой точки Q определяется максимальное значение тока $I'_m(Q)$, при которой не происходит отброса контактов. Определив N независимых реализаций случайной величины I'_m , можно получить математическое ожидание с помощью среднего арифметического этих реализаций, которое имеет наименьшую дисперсию. Количество реализаций зависит от точности результата.

Оценить необходимое число реализаций возможно на основе теоремы из теории вероятности.

Следствием теоремы являются:

– при большем числе реализаций N частота появления события A имеет распределение, близкое к нормальному;

– математическое ожидание и дисперсия определяются как

$$M\left[\frac{m}{N}\right] = p; \quad D_{m/n} = \frac{p(1-p)}{N}, \quad (32)$$

где m – частота появления события A ; p – вероятность появления события.

Число реализаций

$$N = \frac{p(1-p)}{\varepsilon^2} \left[\Phi^{-1} \left(\frac{1}{2} \alpha \right) \right]^2, \quad (33)$$

где ε – величина отклонения вероятности p и появления события A ; α – заданная достоверность;

Φ^{-1} – функция, обратная функции Лапласа:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2x} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (34)$$

Таким образом, вероятностными оценками величины тока электродинамической устойчивости являются ее математическое ожидание, дисперсия и функция плотности вероятности.

Работа контактных систем проходит в разных условиях и при разных режимах работы электротехнических устройств. Поэтому перед исследователями стоит главная задача – подобрать композицию контактного материала, которая удовлетворяла бы необходимым требованиям и условиям работы.

В соответствии с поставленной целью, рассмотрим и проанализируем работу перспективных композиций электрических контактов для многоамперных автоматических выключателей.

Основным требованием, предъявляемым к главным контактам многоамперных автоматических выключателей, является высокая электропроводность, что и обеспечивает низкое переходное сопротивление, поскольку они остаются постоянно замкнутыми при включении автоматического выключателя.

Надежность работы контактной системы повышают либо подбором контактного материала, обладающего повышенной устойчивостью против сваривания (но при этом переходное сопротивление может расти), что приводит к потерям электроэнергии, либо усложнением конструкции, что приводит к увеличению материалоемкости электрического аппарата.

В реальных контактах линии тока стягиваются, проходя через ограниченные площади контактной поверхности, что приводит к увеличению сопротивления (по сравнению со случаем проводимости по всей контактной поверхности) и появлению электродинамических сил отталкивания [4, 5].

В настоящее время используются решения увеличения площади контактирования без увеличения контактного нажатия. Одним из них является применение жидкометаллических контактов (ЖМК), у которых большая площадь контактирования обеспечивается жидким металлом [6].

Об использовании жидкого металла (например, ртути) в качестве электрических контактов было известно еще в конце XIX века при создании и применении ртутных выключателей. Но из-за сложности конструкций выключателей, связанных с контактным узлом, а также вредности паров ртути данное решение нашло дальнейшее применения только в слаботочных контактных узлах.

По мере роста мощности энергоустановок в конце XX столетия возрос интерес к жидкометаллическим контактам, которые обладают рядом преимуществ, что дало возможность их использования в сильноточных электрических аппаратах.

Немаловажным обстоятельством является то, что в композиции ЖМК не входит серебро, мировые запасы которого очень ограничены. Поэтому основными задачами при проектировании контактных узлов из жидкометаллических контактов являются:

- уменьшение расхода серебра или полная его замена другими токопроводящими материалами;
- использование в составах композиций ЖМК недорогостоящих и нетоксичных элементов;
- повышение мощности электротехнических устройств;
- уменьшение габаритов и материалоемкости конструкций электротехнических устройств.

В качестве жидкого материала контактов чаще всего используются сплавы галлия – индия – олова,

а также ртути и ее сплавы. Иногда в составах композиций ЖМК применяют сплавы щелочных металлов, таких как натрий, калий, цезий и др. [6, 7].

Для данных композиций переходное сопротивление остается неизменным в интервале величины пропускающих токов 100–1200 А и составляет $1,6 \cdot 10^{-3}$ Ом при контактном нажатии – 10 Н.

Исследования электродинамических сил отброса контактов [6, 7] показали, что в композиционных ЖМК они примерно в 200 раз меньше, чем в твердометаллических серебросодержащих композициях, как при пропускании сквозных токов, так и при токах КЗ.

Широко используются конструкции контактных композиций ЖМК, которые состоят из пористых, слоистых, сетчатых материалов, пропитанных или смоченных жидким металлом [6–8].

В качестве примера рассмотрим модель конструкции ЖМК мостикового типа (рис. 4) [6–8].

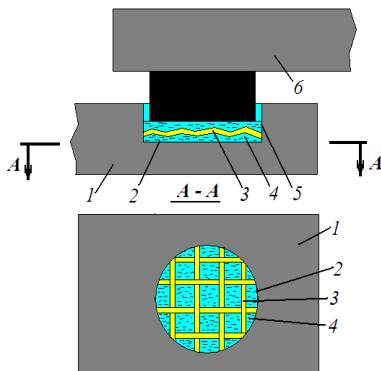


Рисунок 4 – Композиционный жидкометаллический контакт с сетчатой основой: 1 – неподвижный контактодержатель; 2 – углубление; 3 – сетчатая основа; 4 – жидкий металл; 5 – выступ; 6 – подвижный контактодержатель (мостик)

В неподвижном электроде 1 расположено углубление 2, в которое помещается сетчатая основа 3 композиционного ЖМК, пропитанная или смоченная жидким металлом. Подвижный контактодержатель (электрод) 6 входит в углубление 2 выступа 5 и соприкасается с сетчатой основой контактной композиции.

В качестве сетчатой основы 3 используются различные материалы как проводящие электрический ток (медные, латунные и другие металлические сетки), так и диэлектрики (стеклоткань, стекловолокно и другие ткани). Иногда используются пористые материалы (поролон, губка) и мелкозернистые наполнители, которые после пропитки жидким металлом образуют пастообразную электропроводящую массу.

Преимуществом таких конструкций и композиций ЖМК по сравнению с другими похожими композициями является наличие незначительного количества жидкого металла. Его хватает только для пропитки и заполнения сетчатого основания.

Самой перспективной композицией ЖМК, которая применяется в настоящее время в силовых коммутационных электрических аппаратах, является состав на основе легкоплавких элементов (галлий – индий – олово).

Анализируя композиции ЖМК, определено, что кроме достоинств они имеют существенные недостатки. Основными из них являются:

- нестабильность свойств. Например, галлий является химически активным металлом, способным вступать в химическую реакцию практически со всеми металлами;
- необходимость принудительного подогрева контактного узла;
- сложность конструкции контактного узла из-за наличия определенных емкостей, что приводит к увеличению его массы и габаритов.

Поиск перспективных решений конструкций и материала контактов, использующих принцип жидкометаллического контактирования, продолжается.

Реальной перспективой являются нетрадиционные подходы, обеспечивающие создание и применение бессеребряных контактов с низким переходным сопротивлением и повышенной электродинамической устойчивостью. Одним из таких конструктивных решений является создание и использование так называемых псевдожидкометаллических контактов (ПЖМК), принцип действия которых основан на изменении их агрегатного состояния в процессе работы [9, 10].

Контакты состоят из более тугоплавкой и легкоплавкой составляющей (матрицы или арматуры), с температурой плавления несколько ниже допустимой для токоведущих частей аппарата (рис. 5).

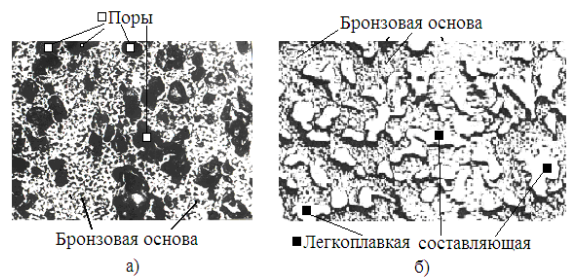


Рисунок 5 – Структура контактной композиции: а) после спекания с образованием пор; б) после пропитки легкоплавкой составляющей

В момент замыкания электрической цепи контакты твердые и касание происходит только по отдельным точкам при установленном контактном нажатии.

В точках касания контактных поверхностей плотность тока велика, что приводит к локальному разогреву и расплавлению легкоплавкой составляющей контакта. В момент расплавления площадь контактирования увеличивается, переходное сопротивление падает, уменьшается плотность тока и дальнейшего расплавления не наблюдается. За счет агрегатных процессов и состояния контактной по-

верхности происходит частичное или полное затвердевание легкоплавкой составляющей, что приводит к равномерному распределению плотности токов по поверхности контактов, а сам ток протекает между точками контактирования по материалу основы контакта. При этом переходное сопротивление контактов резко уменьшается, а соответственно уменьшается действие электродинамических сил, способствующих несвоевременному размыканию контактных пар.

Данное решение способствует уменьшению габаритов механизма свободного расцепления и многоамперных автоматических выключателей соответственно за счет уменьшения необходимого контактного нажатия и пружин, компенсирующих электродинамические силы отброса.

Новое решение может применяться для конструкций ГК многоамперных автоматических выключателей, а также в токоограничивающих блоках автоматических выключателей на номинальные токи до 1000 А или других электротехнических конструкциях без частых коммутации.

ВЫВОДЫ. Анализ параметров, определяющих работу параллельных контактов многоамперных автоматических выключателей, показал, что при проектировании их контактных систем необходимо учитывать не только распределение плотности тока по сечению контакта, но и по сечению шины контактодержателя. Это обеспечивает равномерность токовых нагрузок параллельных контактов, снижая при этом действие электродинамических сил, что приводит к повышению износостойкости электрических контактов.

Указанные вероятностные характеристики могут служить критериями оценки тока электродинамической устойчивости параллельных контактов.

Применение перспективных композиций электрических контактов для многоамперных автоматических выключателей способствует улучшению их характеристик, повышению токов и быстродействию срабатывания при аварийных ситуациях.

MULTIAMPERE CIRCUIT BREAKERS PARAMETERS AND THEIR MAIN CONTACTS PERSPECTIVE CONSTRUCTIONS ANALYSIS

T. Pavlenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

ul. Frunze, 21, Kharkiv, 61002, Ukraine. E - mail: khpavlenko@yandex.ru, tpavlenkoskp@ukr.net

Purpose. Analysis of parameters determining the performance of high current circuit breakers and advanced silverless main contacts, having low transition resistance and high electrodynamic stability. **Methodology.** Determined parameters, containing main and arcing contacts, based on the analysis of the parallel contact systems, depending on the electrodynamic stability, switching limit capacity and power consumption of high current circuit breakers. Probability evaluation of the random values by the method of statistical modeling that uses a model of the current distribution in the parallel slats and the current-voltage characteristics corresponding to the specific content of the contact and the contact pressing are shown. **Results.** Mathematical model the voltage and current density distribution in parallel to the contacts is developed. Current-voltage characteristics and their dependence on the applied contact material are defined. Statistical evaluation of electrodynamic stability in the system of parallel lamellae at different parameters of the contact system is developed. Probabilistic characteristics are evaluation criteria of parallel contacts current electrodynamic stability. Perspective silverless contacts design based on liquid-metal effect are shown. Composition of liquid metal contacts (LMC) with mesh base and pseudo liquid metal contacts (PLMC), based on the change of their aggregate state in the operation process are compared. **Originality.** Parameters dependence of the of contact systems on the material of the contact pads and their shape, condition of contact surfaces, the contact pressing, the magnitude of the flowing current is

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабышев А.В., Тарасов Е.В. Низковольтные автоматические выключатели. – Томск: Томский политехнический университет, 2011. – 346 с.
2. Гапоненко Г.Н., Мильгром С.Я. Расчет динамики механизма многоамперного автоматического выключателя // Аппараты низкого напряжения. – Харьков, 1990. – С. 35–43.
3. Гапоненко Г.Н., Долинский Ю.М. Особенности поведения параллельных контактов при протекании токов короткого замыкания // Низковольтные аппараты защиты и управления. – Харьков, 1988. – С. 32–41.
4. Беляев В.Л., Куклев Ю.В. Электрический износ контактов многоамперных аппаратов низкого напряжения // Электротехника. – 2002. – Вып. 2. – С. 13–16.
5. Способ уменьшения сопротивления между контактными поверхностями // Патент США Н01Н 11/02 № 4513904.
6. Выключатель на основе металла с низкой температурой плавления. – Япония. Н01Н 29/20 № 53–3431.
7. Дегтярь В.Г., Иванов А.В. Сильноточные жидкометаллические коммутационные аппараты // Электротехническая промышленность. Аппараты низкого напряжения. – 1981. – Вып. 1. – С. 18–19.
8. Брон О.Б., Беляев В.Л. Электродинамическая стойкость композиционных жидкометаллических контактов // Электромеханика. – 1984. – Вып. 8. – С. 76–81.
9. Павленко Т.П. Контактные композиции для многоамперных автоматических выключателей // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – Харьков, 2013. – Вып. 4. – С. 53–58.
10. Павленко Т.П. Псевдожидкометаллические контакты электрических аппаратов с бездуговой коммутацией // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: Харківський державний політехнічний університет, 1999. – Вип. 4. – С. 69–72.

shown for the first time in calculation methods. In perspectives electrical contacts designs for high current circuit breakers the composition of the solid contacts (PLMC), worked in operation as liquid-metal contacts (LMC) are represented for the first time. The composition feature of such contacts is the presence of a hard metal matrix, containing a low-melting component in pores. **Practical value.** PLMC contacts using helps to reduce sizes of a trip-free mechanism and high current circuit breakers, respectively, by reducing the necessary contact pressing and springs that compensate the electrodynamic forces reject. Given contacts composition also can be used in the current limiting circuit breakers blocks for rated currents up to 1000 A or other electrical constructions without frequent switching.

Key words: high current circuit breaker, electrical contacts.

REFERENCES

1. Kabyshev, A.V. and Tarasov, Ye.V. (2011), *Nizkovoltnyye avtomaticheskiye vyklyuchateli* [Low voltage circuit breakers], TPU, Tomsk. (in Russian)
2. Gaponenko, G.N. and Mylgrom, S.Ya. (1990), "The calculation of the dynamics of the mechanism of high current circuit breaker", *Apparaty nizkogo napryazheniya*, pp. 35–43. (in Russian)
3. Gaponenko, G.N. and Dolinskiy, Yu.M. (1988), "Features of the behavior of parallel contacts during the flow of short circuit currents", *Nizkovoltnyye apparaty zashchity i upravleniya*, pp. 32–41. (in Russian)
4. Belyaev, V.L. and Kuklev, Yu.V. (2002), "Electrical contact wear, high current devices low voltage", *Elektrotehnika*, Vol. 2, pp. 13–16. (in Russian)
5. *Sposob umensheniya soprotivleniya mezhdu kontaknyimi poverhnostyami*, Patent SShA N0IN 11/02 № 4513904. [A method of reducing resistance between the contact surfaces]. *U.S. patent*.
6. *Vyklyuchatel na osnove metalla s nizkoy temperaturoy plavleniya*. Yaponiya. N0IN 29/20 № 53–3431. [The switch on the basis of the metal with the low-temperature melting]. *Japan patent*.
7. Degtyar, V.G. and Ivanov, A.V. (1981), "High current liquid metal switching devices", *Elektrotehnicheskaya promyshlennost. Apparaty nizkogo napryazheniya*, Vol. 1, pp. 18–19. (in Russian)
8. Bron, O.B. and Belyaev, V.L. (1984), "Electrodynamic stability of composite liquid metal contacts", *Elektromekhanika*, Vol. 8, pp. 76–81. (in Russian)
9. Pavlenko, T.P. (2013), "Contact composition for a multiampere circuit breakers", *Energoberezhniye, energetika, energoaudit*, Vol. 4, pp. 53–58. (in Russian)
10. Pavlenko, T.P. (1999), "Contact arrangements for high current circuit breakers", *Integrovani tekhnologiyi ta energoberezhennya*, Vol. 4, pp. 69–72. (in Russian).

Стаття надійшла 24.02.2016