



УДК 621.316.9333.064.4

ПАВЛЕНКО Т.Л., докт. техн. наук,
каф. "Электрические машины",
НТУ "Харьковский политехнический институт", г. Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЭНЕРГИИ ТОРМОЗНОГО И РЕКОМБИНАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭМИССИОННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

При работе коммутационных низковольтных электрических аппаратов их контакты подвержены интенсивному износу и, соответственно, эрозии рабочей поверхности, что может привести к аварийной ситуации в системе электроснабжения. Для повышения износостойкости контактов необходимо создавать контактные композиции, не имеющих токсичных и дорогостоящих элементов. Для достижения поставленной цели предлагаются электрические контакты повышенной износостойкости с составом элементов, имеющих малую работу выхода электронов. Новые составы композиций имеют активную составляющую, которая снижает работу выхода электронов. При этом увеличивается скорость основания дуги по рабочей поверхности контактов и уменьшается их эрозия. Проведенные предварительные экспериментальные исследования композиций электрических контактов с малой работой выхода показали положительные результаты при различных видах испытаний. Износ рабочей поверхности таких контактов имеет равномерный мелкоочечный рельеф, по сравнению с промышленными образцами аналогичного состава без активной составляющей. Результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретические. Ряд экспериментов показал, что износостойкость композиций контактов с малой работой выхода увеличивается в 2 – 2,5 раза. Получены совершенно новые композиции электрических контактов, принцип действия которых основан на явлении термоэмиссии. Использование данного явления способствует дальнейшему развитию теории энергетических процессов и способов их регулирования. Новые составы композиций электрических контактов не содержат токсичных элементов и обеспечивают экономию дорогостоящих элементов (например, серебра), которые используются в электрических контактах. Данные композиции способствуют повышению конкурентоспособности коммутационных низковольтных электрических аппаратов на мировом рынке.

Введение. Работа электрических аппаратов с дуговой коммутацией тока связана с определенными проблемами, которые приводят к разрушению рабочей поверхности электрических контактов с образованием на ней эрозии. Это объясняется развитием процессов и явлений, которые происходят как на рабочей поверхности контактов, так и внутри состава композиции. Причем, некоторые из них действуют, практически, одновременно и поэтому, их невозможно рассматривать поодиночке, а тем более давать им конкретную оценку.

В контактной системе происходят явления тепло и массообмена, которые влияют на износостойкость и надежность работы электрических контактов. Проблема износостойкости рабочей поверхности контактов постоянно остается актуальной, т.к. практически все исследования температурного поля электрических контактов, носят экспериментальный характер, в результате чего очень сложно четко определить динамику изменения теплового потока и самого температурного поля. При этом используются модели и результаты расчетов нестационарных тепловых процессов.

Цель. Для определения износостойкости композиций электрических контактов необходимо провести теоретические исследования явлений с использованием физико-математических моделей.

Методика. Построение данной математической модели основано на результатах физических моделей теоретического исследования процессов и явлений, которые базируются на энергетических уровнях распределения и взаимодействия частиц, взаимодействующих с тепловым и электрическим полем. Предлагаемая модель связана с уравнениями теплопроводности, движения частиц и определения различных параметров при взаимодействии систем катод — плазма — анод в межконтактном промежутке при расхождении электрических контактов [1]. Поэтому, явления, возникающие в коммутационных электрических аппаратах, объединяются в одну систему уравнений тепло-массообмена.

Расчет эмиссии электронов с поверхности электрического контакта проводится из оценки энергетического баланса катодного пятна с учетом тормозного и рекомбинационного излучения.

Возникновение тормозящего электрического поля обусловлено беспорядочным движением частиц в области ионизированного газа в межконтактном промежутке. Данный вид излучения характерен для области тлеющего разряда.

Ввиду сложности протекающих процессов и их взаимодействия между собой, для демонстрации адекватности математической модели, при определении сопутствующих им основных параметров, использовался медный катод, свойства



которого достаточно известны. Для сравнения результатов исследований использовались параметры экспериментальных образцов. При этом были определены значения удельного износа электрических контактов и падение напряжения при необходимом значении коммутируемого тока, равного 10 А. При таком значении тока происходит быстрый нагрев центральной части катодного пятна с увеличением плотности тока.

Для объяснения происходящих явлений на поверхности электрических контактов проведена оценка вклада в энергетический баланс катодного пятна тормозного и рекомбинационного излучения ускоренных в кнудсеновском слое эмиссионных электронов.

Результаты. Определение параметров тормозного излучения исходит из уравнения энергии электронов, рассеиваемых в столб электрической дуги:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{2m_e}{m} v_m \varepsilon; \quad t > 0; \quad \varepsilon(0) = \frac{m_e v_e^2}{2}, \quad (1)$$

где m_e – масса электронов; m – масса ионизированных частиц в межконтактном промежутке; v_m – эффективная частота кулоновских столкновений; t – длительность протекания процесса; v_e – скорость электрона на выходе из кнудсеновского слоя.

Количество энергии, излучаемое электроном в спектральный интервал $d\omega$ во всех направлениях в результате торможения равно:

$$dj_T(\varepsilon) = \hbar \omega n_i v d\sigma_\omega; \quad v < \sqrt{\frac{2\hbar\omega}{m_e}}, \quad (2)$$

где $d\sigma_\omega = \frac{16\pi}{3\sqrt{3}} \frac{e^6}{m_e^2 c^3 \hbar \omega^2} d\omega$ – сечение тормозного излучения; e – заряд электрона; c – скорость света в вакууме; \hbar – постоянная Планка; n_i – количество излучаемых частиц; ω – спектральный интервал во всех направлениях в результате тормозного излучения; v – абсолютная скорость частиц.

Интегрируя $dj_T(\varepsilon)$ в пределах допустимого спектрального интервала $0 < \omega < m\omega^2/2\hbar$ находим мощность тормозного излучения:

$$j_T(\varepsilon) = \frac{8\pi}{3\sqrt{3}} \frac{e^6}{m_e c^3 \hbar} n_i v. \quad (3)$$

Полная энергия тормозного излучения:

$$\varepsilon_*^T = \int_0^{t_0} j_T(\varepsilon) dt, \quad (4)$$

где t_0 – время существования тормозного излучения.

Для вычисления энергии тормозного излучения ε_*^T , следует определить временную зависимость энергии $\varepsilon(t)$ или скорости $v(t)$ ионизированных частиц.

По определению эффективной частоты столкновений частиц имеем:

$$v_m = \sigma_m(v) n_i v, \quad (5)$$

где $\sigma_m(v) \approx \pi r_0^2$ – транспортное сечение кулоновских столкновений, $r_0 = \frac{2e^2}{m_e v^2}$ – характерный радиус кулоновского взаимодействия электрона с ионом:

С учетом приведенных соотношений уравнение энергии электрона:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{4\pi e^4 n_i}{m_e m v^2}. \quad (6)$$

Решая уравнение, получим скорость движения частиц:

$$v(t) = v_0 \left(1 - \frac{t}{t_0}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad \text{где } t_0 = \frac{m_e m v_0^3}{12\pi e^4 n_i}. \quad (7)$$

Таким образом, энергия тормозного излучения:

$$\varepsilon_*^T = \frac{3}{4} c_0 n_i v_0 t_0, \quad c_0 = \frac{8\pi e^6}{3\sqrt{3} m_e c^3 \hbar}. \quad (8)$$

Вычисляя коэффициенты, находим энергию тормозного излучения на поверхности медного катода:

$$\varepsilon_*^T = 2,84 \cdot 10^{-21} A v_0^2 \varepsilon(0), \quad (9)$$

где A – массовое число ядра иона, следовательно, доля энергии тормозного излучения составляет:

$$F_\Sigma^T = 2,84 \cdot 10^{-21} A v_0^2. \quad (10)$$

На катод поступает половина энергии излучения, поэтому искомым коэффициент равен:

$$F_T \approx 1,42 \cdot 10^{-21} A v_0^2. \quad (11)$$

Выразив начальную скорость на выходе из кнудсеновского слоя через катодное падение напряжения, получаем окончательное расчетное выражение энергии тормозного излучения:

$$F_T = 0,5 \cdot 10^{-5} AU. \quad (12)$$

Длительность существования данного явления на рабочей поверхности контактов способствует образованию катодных или анодных пятен

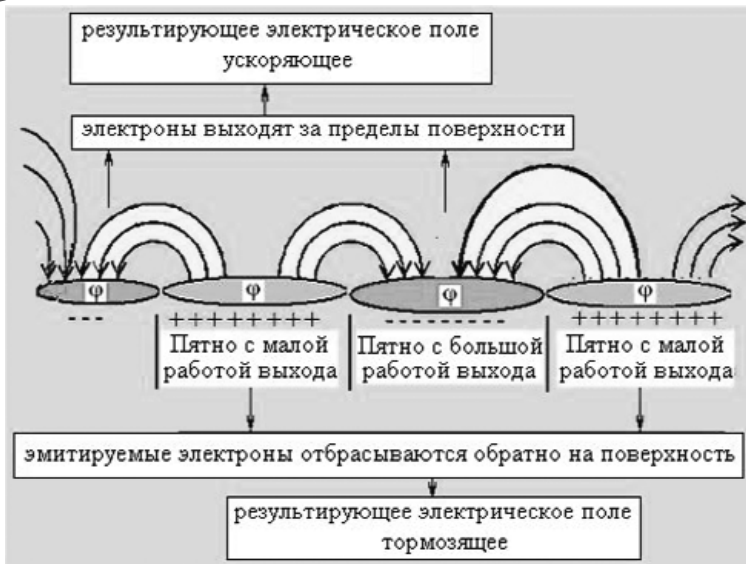


Рис. 1. Поле пятен на поверхности катода электрического контакта

различного типа, которые и определяют ее износ. Причем, на образование пятен влияет работа выхода электронов элементов, входящих в состав композиции электрических контактов.

Если размеры пятен малы по сравнению с дебаевской длиной L_D , то поле пятен на поверхности электрических контактов на участках с малой работой выхода будет отбрасывать эмитируемые электроны обратно на рабочую поверхность, а на участках с большой работой выхода – ускорять электроны, вышедшие за пределы поверхности (Рис. 1).

Если при этом разность работ выхода $\phi_2 - \phi_1$ имеет значительную величину, то напряженность поля пятен на поверхности электрических контактов, превышает напряженность поля, создаваемого пространственным зарядом в дебаевском слое. В этом случае у катодных пятен с меньшей работой выхода результирующее электрическое поле может быть тормозящим, а у пятна с большей работой выхода – ускоряющим для электронов независимо от соотношения между работой выхода ϕ и электрохимическим потенциалом μ .

Данные положения подтверждаются экспериментальными исследованиями.

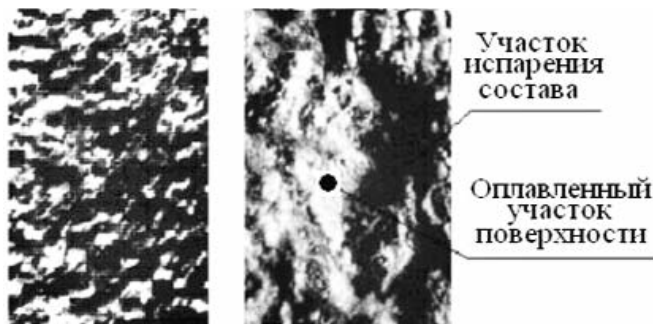


Рис. 2. Результаты исследований рабочих поверхностей электрических контактов: а – с активирующей составляющей; б – без активирующей составляющей.

Научная новизна и практическая ценность. Предварительные исследования рабочих поверхностей контактов после их испытаний в разных режимах, показали, что образцы, состоящие из элементов с малой работой выхода электронов, имеют меньший износ рабочей поверхности (Рис. 2, а).

Характер эрозии рабочей поверхности равномерный и мелкозернистый по сравнению с промышленными образцами, не содержащими таких элементов (Рис. 2, б). Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают основные теоретические положения.

Аналогичны выкладки и для случая рекомбинационного механизма излучения. Данный процесс характеризуется коэффициентом рекомбинации α , который связан с плотностью заряженных частиц и зависит от температуры. Большую роль процесс рекомбинации играет в тройных соударениях частиц при высоком давлении. В результате происходит переход электронов на n -й энергетический уровень со скоростью в пределах от v до $v + dv$. При этом на один электрон, в среднем, излучается энергия:

$$I_{\omega n} = \hbar \omega n_i \sigma_{cn} \varphi(v) v dv, \quad (13)$$

где σ_{cn} – сечение фотозахвата для однозарядных ионов; $\varphi(v)$ – функция распределения электронов по скоростям, для рассматриваемого случая, которая близка к дельта – функции:

$$\hbar \omega = |E_n| + \frac{m_e v^2}{2}, \quad (14)$$

$$\sigma_{cn} \approx \frac{16\pi}{3\sqrt{3}} \frac{e^{10}}{c^3 \hbar^4 m_e v^2 \omega} n^{-3}, \quad (15)$$

где E_n – энергия связанного состояния электрона в атоме для главного квантового числа n .

Интегрируя по скоростям электронов по всему возможному спектру излучения (с учетом $m v dv = \hbar d\omega$) и суммируя по n , находим мощность рекомбинационного излучения, приходящегося на один электрон:

$$j_p(\varepsilon) = \frac{16\pi}{3\sqrt{3}} \frac{e^{10} n_i}{c^3 \hbar^3 m_e v} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^3}. \quad (16)$$

Полная энергия рекомбинационного излучения эмиссионного электрона составит в среднем:

$$\varepsilon_*^p = \int_0^{t_0} j_p(\varepsilon) dt = \frac{4e^6 S}{3\sqrt{3}c^3 \hbar^3 m_e} \varepsilon(0). \quad (17)$$

Доля энергии при рекомбинационном излучении (коэффициент излучения): $F_p = 32,6 \cdot 10^{-5}$



Суммарная доля энергии эмиссионных электронов, поступающая в катодную область посредством излучения составит:

$$F = F_T + F_p = 10^{-5} A(0,5U + 32,6). \quad (18)$$

Например, для меди $A = 63,5$; $U = 12$ В; $F = 1,0245$, что соответствует эквивалентному напряжению.

Аналогичным образом можно оценить энергию, излучаемую электронами на катод из прианодных областей.

Для случая короткой дуги необходимо принять в расчет что:

$$U = U_k + U_A + U_{eA}, \quad (19)$$

где U_k , U_A – напряжение на катоде и аноде; U_{eA} – падение напряжения в прикатодных областях.

Выводы. Таким образом, в результате оценки баланса энергии и функции распределения электронов по скоростям, определяется значение энергии при рекомбинационном и тормозном изучении электронов с поверхности электрических контактов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павленко Т.П. Термоэмиссионная активность композиционных контактных материалов / Т.П. Павленко // Вестник НТУ "ХПИ". "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов". – Харьков. : НТУ"ХПИ". – 2005. – № 48. – С. 115–118.
2. Павленко Т.П. Физические процессы на поверхности контактов с учетом потоков плазмы и термоэмиссионной активности материала / Т.П. Павленко // Електротехніка і Електромеханіка. – Харьков. – 2009. – № 1. – С. 25–28.
3. Павленко Т.П. Энергетические параметры катодного пятна электрической дуги на рабочей поверхности контактов. / Т.П. Павленко, В.С. Лупиков // Вестник НТУ "ХПИ" – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2006. – № 35. – С 101–106.

4. Павленко Т.П. Баланс энергии на поверхности катода с учетом явления термоэмиссии. / В.И. Милых, Т.П. Павленко // Гірн. електромеханіка та автоматика (наук.-техн. зб.). – Дніпропетровськ. – 2011. – № 86. – С. 115–118.

5. Павленко Т.П. Модели катодных процессов с учетом эмиссии частиц с поверхности контакта электрического аппарата. / Т.П.Павленко, В.И.Милых // Электрика. – М.: – 2011. – № 7. – С. 18–20.

6. Павленко Т.П. Электрические контакты с особыми свойствами для коммутационных электрических аппаратов. / В.И.Милых, Т.П.Павленко, // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук. : КДУ. – 2011. – Вип. 3/2011(68). – С. 11–13.

7. Павленко Т.П. Модели катодных процессов с учетом эмиссии частиц с поверхности контакта электрического аппарата. / Т.П. Павленко, В.И. Милых // Электрика. – М.: – 2011. – № 7. – С. 18–20.

8. Барановский В.И. Квантовая механика и квантовая химия : учеб. пособ. / В.И. Барановский. – М.: Академия. 2008. – 384 с.

9. Бахвалов Н.С. Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования в 2-х томах. / Н.С. Бахвалов., В.В. Воеводин –М. : Наука. 2005, – 632 с.

10. Милых В.И., Павленко Т.П. Математическая модель развития процессов на катоде электрических контактов. // Техническая электродинамика. – К.: – 2012. – № 2. – С. 19–23.

11. Евстафьев В.В. Эмиссионные явления на поверхности твердого тела. – Пенза: изд. Пенз. гос. ун-та, 2008, – 240 с.

12. Козирський В.В. Розробка методів підвищення надійності забезпечення споживачів електричною енергією з використанням інтелектуальної системи контролю/ Козирський В.В., Гай О.В.// Енергетика і електрифікація, 2012, – № 12/10. – С. 68–71.

13. Мещеряков В.П. Электрическая дуга большой мощности в выключателях. – Ульяновск, 2008. – Ч. 1. – 429 с.

