

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ИЗНОС КОНТАКТОВ КОММУТАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Милых В.И., д.т.н., проф., Павленко Т.П., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

ул. Фрунзе, 21, 61002, Харьков, Украина,

E-mail: khpavlenko@yandex.ru

Рассмотрены особенности потоков плазмы, которые влияют на износ рабочей поверхности электрических контактов. На основании анализа разных факторов, определяющих возникновение потоков плазмы и дальнейшее ее поведение, можно определить механизм износа рабочей поверхности контактов электрических силовых аппаратов и соответственно, подобрать состав композиции электрических контактов.

Ключевые слова: потоки плазмы, электрические контакты.

Введение. Процесс коммутации в электрических аппаратах сопровождается дуговым разрядом в межконтактном промежутке при размыкании контактов, который влияет на износ рабочей поверхности контактов и тем самым определяет долговечность электрического аппарата.

Анализ предыдущих исследований. Электрическая дуга на контактах силовых коммутационных аппаратов сопровождается потоками плазмы, которые обладают большой скоростью и, действуя как всасывающий насос, захватывают и уносят с собой продукты разложения композиции электрических контактов [1, 2]. Потоки плазмы очень подвижны и часто меняют свою форму и местоположение, а также неоднородны по своей структуре и обладают тепловой и механической инерцией. Они имеют вид резко очерченных пучков (факелов) и по своей яркости значительно превосходят другие части дуги. Особенностью потоков плазмы является то, что, имея различную интенсивность, они могут как подавлять друг друга, так и изменять форму и состояние поверхности электрических контактов. В результате, расплавленные компоненты композиции электрических контактов стягиваются, под действием инжекторного эффекта потоков плазмы, к основанию потока и вытягиваются в направлении его движения, что приводит к образованию на поверхности электрических контактов заостренных выступов.

Цель работы. Провести анализ параметров, определяющих износ электрических контактов под влиянием потоков плазмы при различных условиях.

С учетом поведения потоков плазмы и их влияния на рабочую поверхность контактов электрических аппаратов.

Материал и результаты исследования. Потоки плазмы возникают как на аноде, так и на катоде контактов коммутационных аппаратов при постоянном и при переменном токе, а также при кратковременных импульсах тока [2, 3]. От возникновения и действия потоков поверхность электрического контакта катодной зоны особенно изнашивается.

Возникая на катоде электрического контакта, потоки плазмы влияют на размеры катодного пятна, уменьшая его диаметр и увеличивая величину реактивной силы

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \ln \frac{r_0}{r_n} \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость; I – ток столба дуги; r_0 – радиус ствола дуги; r_n – радиус катодного пятна.

Силовое взаимодействие потоков плазмы с поверхностью осуществляется через магнитное поле. В результате катодное пятно на рабочей поверхности электрического контакта испытывает давление, которое распространяется на всю поверхность контакта (рис. 1).

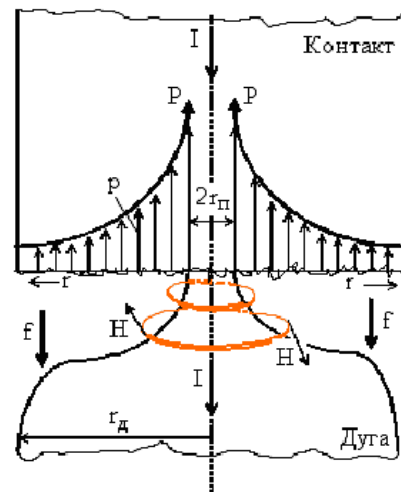


Рисунок 1 – Осевые силы у опорного пятна дуги

Давление на рабочей поверхности контакта коммутационного электрического аппарата является результатом так называемого базового распора магнитных силовых линий и определяется формулой:

$$p = \frac{m_f H^2}{2} = \frac{m_f I^2}{8\rho^2 r^2} \quad (2)$$

где H – напряженность магнитного поля столба дуги; r – радиальная координата поверхности контакта.

Наибольшего значения это давление достигает у катодного пятна поверхности контакта электрического аппарата, где $r = r_n$, а потом уменьшается обратно пропорционально r^2 .

Таким образом, возникновение потоков плазмы на рабочей поверхности контакта электрического аппарата можно рассматривать либо как результат действия электромагнитных (реактивных) сил, сжимающих дугу, либо как результат действия осевых сил f , возникающих в местах изменения площади сечения дуги.

В результате такого поведения плазменных потоков нагрев контактов электрических аппаратов происходит весьма неравномерно, что и приводит к образованию и развитию катодных пятен различного рода на рабочей поверхности электрических контактов [4, 5]. С увеличением температуры катодные пятна вызывают взрывное разрушение рабочей поверхности контактов за счет термоупругих напряжений, что приводит к испарению компонентов композиции электрических контактов и в дальнейшем к интенсивному износу рабочей поверхности.

Скорость испарения состава элементов электрического контакта зависит от поверхностной плотности энергии W на катодном пятне, от количества тепла Q , необходимого для испарения одного грамма элемента состава электрического контакта и нагрева выделяющегося пара до температуры струи, от плотности плазмы $\rho_{пл}$ и работы выхода электронов ϕ с поверхности электрического контакта. Начальная скорость потока плазмы электрической дуги определяется как $u_{пл} = \frac{W}{Qr_{пл}}$. Эта скорость различна у

анода и у катода электрического контакта, т.к. у них неодинаковы значения поверхностной плотности энергии.

Но не вся энергия уходит на испарение элементов композиции контакта электрического аппарата. Значительная ее часть отводится теплопроводностью электрических контактов.

Зависимость температуры T от плотности энергии на катодном пятне и времени t существования дуги определяется как

$$T = \frac{2Wt^{1/2}}{(\rho I_{кc} r)^{1/2}},$$

где $I_{к}$, c , r – соответственно теплопроводность, теплоемкость и плотность композиции контакта электрического аппарата.

В местах механического сужения ствола дуги происходят термогазокинетические процессы, которые в основном связаны с электромагнитным давлением. Дифференциальное уравнение баланса механической и электромагнитной энергий частиц элементов состава композиции электрического контакта при установившемся движении со скоростью v вдоль дуги по координате s в столбе дуги имеет вид:

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{u^2}{2} \right) + \frac{1}{r_{пл}} \frac{dp}{ds} - \frac{1}{r_{пл}} dB = 0, \quad (3)$$

где B – индукция магнитного поля столба дуги.

Если ограничиться движением частиц состава композиции электрических контактов вдоль оси ствола, изменяющего свое сечение, то $dB=0$, тогда

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{u^2}{2} \right) + \frac{1}{r_{пл}} \frac{dp}{ds} = 0.$$

Если ввести в рассмотрение функцию давления, определяемую формулой:

$$P = \int \frac{dp}{r_{пл}}, \quad (4)$$

то в таком случае выражение (3) примет вид:

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{u^2}{2} \right) + \frac{d}{ds} P = 0 \quad (5)$$

и его интеграл, относящийся к двум различным точкам на оси столба дуги:

$$\frac{u_1^2}{2} + P_1 = \frac{u_2^2}{2} + P_2. \quad (6)$$

Рассматриваемый процесс связан с изменением давления p на поверхности электрического контакта, обусловленным базовым распором магнитных силовых линий, плотности потоков плазмы $\rho_{пл}$ и температуры T на рабочей поверхности электрических контактов. Данный процесс не является адиабатическим. При расчете таких процессов обычно используют соотношение, выражающее связь между давлением p и плотностью потоков плазмы $\rho_{пл}$ электрической дуги:

$$\frac{p}{r_{пл}^n} = A = const, \quad (7)$$

где $A=0,0023$ ккал/кгс·м – коэффициент пропорциональности между количеством тепла, выделяемого поверхностью электрических контактов и затраченной работой возникновения электрической дуги.

Процесс в этом случае называется политропным, а показатель степени n – показателем политропы. Для данного процесса он лежит в пределах $0 < n < 1$. Использование данного соотношения позволяет следующим образом выразить общую функцию давления:

$$P = \int \frac{dp}{\left(\frac{p}{A} \right)^{1/n}} = \frac{n}{n-1} A^{1/n} p^{1-1/n} = \frac{n}{n-1} \frac{p}{r_{пл}^n}. \quad (8)$$

Подставляя функцию P в (6), получим:

$$\frac{u_1^2}{2} + \frac{n}{n-1} \frac{p_1}{r_{1пл}^n} = \frac{u_2^2}{2} + \frac{n}{n-1} \frac{p_2}{r_{2пл}^n}. \quad (9)$$

Это уравнение можно преобразовать как:

$$\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_1}{r_{1пл}^n} \left(\frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{r_{1пл}}{r_{2пл}} - 1 \right). \quad (10)$$

Используя соотношение (7), получим:

$$\frac{p_1}{r_{1пл}^n} = \frac{p_2}{r_{2пл}^n} \quad \text{или} \quad \frac{r_{1пл}}{r_{2пл}} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/n}. \quad (11)$$

Учитывая это соотношение, получаем следующее уравнение движения потока частиц плазмы электрической дуги

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_1}{r_{1пл}^n} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (12)$$

Для учета влияния температуры в столбе электрической дуги воспользуемся уравнением состояния: $p = \rho RT$, (где R – газовая постоянная плазмы). С учетом температуры на оси столба электрической дуги и соответствующих давлений p_1 и p_2 можно получить уравнение движения потока частиц плазмы в виде:

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = \frac{n}{n-1} RT \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (13)$$

Принимая во внимание уравнение неразрывности среды $r_{1пл} u_1 = r_{2пл} u_2$, можем записать что:

$$u_2 = \frac{r_{1пл}}{r_{2пл}} u_1 = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} u_1. \text{ Учитывая эти соотно-}$$

шения и исключая скорость v_2 из уравнения (13), получим:

$$u_1 = \sqrt{\frac{2n}{n-1} RT \frac{1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-n}{n}}}{\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{2}{n}} - 1}}. \quad (14)$$

Уравнение (14) позволяет найти максимальную скорость потока частиц на оси столба дуги, если известна температура T_d и отношение давлений p_1/p_2 . Между этими величинами существует связь. Для ее нахождения можно воспользоваться двухслойной моделью канала, показанной в работе [6].

Исходя из этой модели, можно предположить, что электропроводность плазмы σ резко уменьшается с уменьшением температуры. Когда температура падает ниже некоторой граничной величины T_o , то электропроводность плазмы становится столь малой, по сравнению с ее величиной у оси ствкола, что с ней можно не считаться и принять $\sigma = 0$. Таким образом, при температуре T_o электропроводность σ терпит разрыв непрерывности и скачком переходит от значения $S = const \neq 0$ к $\sigma = 0$.

Если при радиусе столба дуги r_d электропроводность $\sigma = const$, то радиальная координата $r \leq r_d$ и температура $T > T_o$. Если $\sigma = 0$, то при $r > r_k$ получается $T < T_o$.

Тепловой баланс стационарно горящей электрической дуги составим исходя из того, что выделяющаяся в дуге энергия тратится на передачу тепла окружающей среде путем теплопроводности и излучения. В таком случае:

$$I_{пл} \left(\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right) = -W_T + W_{И},$$

где $\lambda_{пл}$ – теплопроводность плазмы дугового канала;

$$W_T = \frac{I^2}{p^2 r_d^4 S} - \text{объемная плотность теплового}$$

потока; $W_{И}$ – объемная плотность энергии излучения.

Решение этого уравнения при граничных условиях: $\left(\frac{dT}{dr} \right)_{r=0} = 0$ и $T_{r=r_d} = T_o$ принимает вид:

$$T = T_o + \frac{r_d^2}{4I_{пл}} (W_T - W_{И}) \left[1 - \left(\frac{r}{r_d} \right)^2 \right].$$

Отсюда можно определить максимальное значение температуры T_m на оси ствкола при $r=0$:

$$\begin{aligned} T_m &= T_o + \frac{r_d^2}{4\lambda_{пл}} (W_T - W_{И}) = \\ &= T_o + \frac{I^2}{4\pi^2 r_d^2 \lambda_{пл} \sigma} - \frac{r_d^2}{4\lambda_{пл}} W_{И}. \end{aligned} \quad (15)$$

Решая это уравнение относительно r_d , получим:

$$\begin{aligned} r_d &= \left(\frac{2\lambda_{пл} (T_m - T_o)}{W_{И}} \right) \times \\ &\times \left(\sqrt{1 + \frac{I^2 W_{И}}{4\pi^2 \lambda_{пл}^2 \sigma (T_m - T_o)^2}} - 1 \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Давление на оси ствкола дуги определяется как:

$$\begin{aligned} p_{ст} &= \frac{m_0 I^2 W_{И}}{16p^2 I_{пл} (T_m - T_o)} \times \\ &\times \frac{1}{\left[\sqrt{1 + \frac{I^2 W_{И}}{4p^2 I_{пл}^2 \sigma (T_m - T_o)^2}} - 1 \right]}. \end{aligned} \quad (17)$$

Вывод. Учитывая свойства плазмы и зная компоненты композиции, а также давление ствкола дуги на поверхность контакта, можно определять скорость движения частиц в столбе дуги, температуру на рабочей поверхности контакта. С учетом поведения потоков плазмы и зная основные ее параметры, можно подобрать состав композиции для контактов сильноточных коммутационных электрических аппаратов, в которой будет наблюдаться незначительный износ рабочей поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брон О.Б., Сушков Л.К. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. – Л.: Энергия, 1975.– 209 с.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987.– 592 с.
3. Накоряков П.Е. Генерация потоков электродуговой плазмы.– Новосибирск: Наука, 1987.– 446 с.
4. Павленко Т.П. Динамическая модель развития дугового разряда //Электротехника и электромеханика.– 2005 № 3. С. 38–42.
5. Павленко Т.П. Физические процессы на поверхности контактов с учетом потоков плазмы и термоэмиссионной активности материала // Электротехника і Електромеханіка, № 1.– Харьков, 2009.– С. 25–28.
6. Жуков М.Ф., Урюков Б.А и др. Теория термической электродуговой плазмы. Ч. 1. Методы математического исследования плазмы.– Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987.–287 с.

Стаття надійшла 15.02.2011 р.
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.
Некрасовим А.В.

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЗНОС КОНТАКТІВ КОМУТАЦІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Мілих В.І., д.т.н., проф., Павленко Т.П., к.т.н., доц.

Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”

вул. Фрунзе, 21, 61002, м. Харків, Україна

E-mail: khpavlenko@yandex.ru

Розглянуті особливості потоків плазми, які впливають на знос робочої поверхні електричних контактів. На підставі аналізу різних чинників, що визначають виникнення потоків плазми і подальшу її поведінку, можна визначити механізм зносу робочої поверхні контактів електричних комутаційних апаратів і, відповідно, підібрати склад композиції електричних контактів.

Ключові слова: потоки плазми, електричні контакти.

ANALYSIS OF PLASMA PARAMETERS, THAT DETERMINE CONTACTS DETERIORATION OF THE COMMUTATION ELECTRICAL APPARATUSES

Milykh V., Doc. Sc. (Tech.), Prof., Pavlenko T., Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

National technical university “Kharkov polytechnic institute”

ul. Frunze, 21, 61002, Kharkov, Ukraine

E-mail: khpavlenko@yandex.ru

The features of plasma streams are considered which influence the wear of working surface of electric contacts. On the basis of analysis of different factors, determining the origin of streams of plasma and its further conduct, it is possible to define the mechanism of wear of working surface of contacts of electric vehicles of commutations and accordingly, to choose composition of electric contacts.

Key words: streams of plasma, electric contacts.