

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЛАБОТОЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

В. П. Диденко, канд. техн. наук (МакНИИ)

Наведені результати досліджень залежності довжини розряду від часу, визначені та уточнені коефіцієнти математичної моделі дугового розряду.

Research results according dependence of discharge distance on the time are stated, coefficients of mathematical arc discharge model are defined and specified.

В работах многих исследователей рассмотрены вопросы расчетной оценки искробезопасности электрических цепей. Одной из наиболее сложных задач, сдерживающих дальнейшее развитие расчетных методов, является достоверное математическое моделирование дугового разряда. Вольтамперная характеристика электрической дуги в воздухе описывается полуэмпирической формулой Айртона [1], которую после некоторого упрощения можно записать в виде [2]

$$u = U_0 + l \left(a + \frac{b}{i} \right), \quad (1)$$

где u и i – напряжение и ток разряда; U_0 – сумма катодного и анодного падений напряжения, называемая начальным падением напряжения на разряде; l – длина разряда; a и b – коэффициенты ударной и тепловой ионизации газа.

Несмотря на то, что вольтамперная характеристика электрической дуги получена Айртоном несколько десятилетий назад, само аналитическое выражение не претерпело изменений до настоящего времени, и работы исследователей [2–5] были направлены на уточнение величины начального падения напряжения на разряде, длины разряда и коэффициентов ионизации. Однако и в настоящее время возникают трудности в расчетах разрядов размыкания и в понимании происходящих процессов. Удовлетворительные результаты дает моделирование длины разряда линейным законом с постоянной скоростью, хотя расстояние между контактами изменяется по колебательному закону [5]. Большинство дуговых электрических разрядов размыкания, согласно осциллографическим исследованиям, прекращаются при снижении тока разряда до нуля, а при расчетной оценке с использованием формулы (1) прекращение электрических разрядов происходит всегда скачкообразно при снижении тока разряда ниже некоторого непостоянного значения. Не учитываются инерционные свойства плазмы разряда, что не позволяет объяснить наличие процесса деионизации плазмы разряда, установленного экспериментально [6].

В настоящей работе изучались вопросы: изменения длины дугового разряда размыкания, инерции тепловой ионизации и уточнения коэффициентов

ударной и тепловой ионизации математической модели разряда с учетом этих факторов.

Визуальное изучение дуговых разрядов размыкания в искробезопасных или близких к искробезопасным электрических цепях затруднено малым временем существования и длиной разряда. Однако даже на фотографии разряда в индуктивной цепи напряжением 24 В, индуктивностью 1 Гн и током 110 мА видно, что столб плазмы разряда не является прямолинейным, поэтому длина разряда не совпадает с расстоянием между электродами (рис. 1).

На фотографии (рис. 2) разряда, создаваемого высоковольтной автомобильной катушкой зажигания, хорошо видно, что при постоянном расстоянии между электродами длина и пространственное расположение столба плазмы разряда нестабильны. Длина разряда может существенно превышать расстояние между электродами.

Учитывая то, что природа столба плазмы разрядов, возникающих в высоковольтных и низковольтных цепях, одна и та же, можно предположить, что в низковольтных дуговых разрядах длина столба плазмы разряда также больше, чем межэлектродное расстояние и нестабильное пространственное расположение.

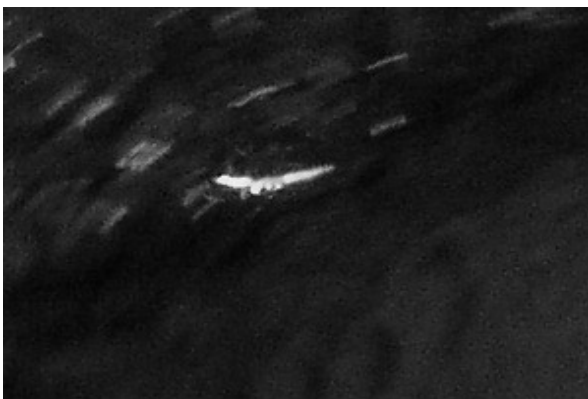


Рис. 1. Разряд размыкания

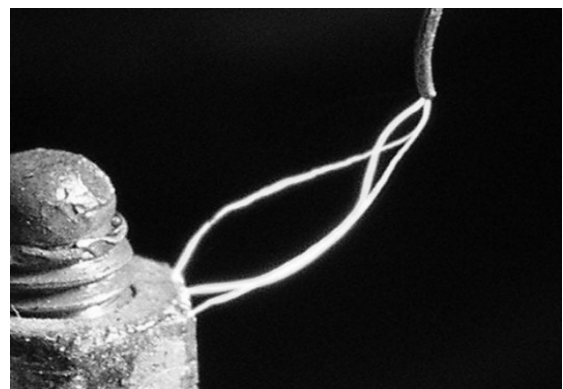


Рис. 2. Разряд между контактами высоковольтной катушки

Для изучения вольтамперных характеристик дуговых разрядов размыкания проведено осциллографирование напряжения на разрядном промежутке в омической цепи напряжением 25 В при токах в цепи до коммутации 0,17; 0,34; 0,5; 1,0; 1,98 и 3,77 А. При этом «минус» подавался на кадмиевый электрод, а «плюс» – на вольфрамовый, изготовленный из вольфрамовой проволоочки диаметром 0,2 мм со свободным концом длиной 11 мм. Начальное отклонение свободного конца проволоочки составляло 2 мм.

Анализ осциллограмм напряжения на разряде показывает, что сохраняется только общий характер зависимости напряжения на разряде во времени. Длительности разрядов на пяти осциллограммах, снятых для каждого тока, укладываются в определенные диапазоны изменения. Однако ни одна из осциллограмм напряжения на разряде не повторилась, несмотря на одинаковые условия коммутации. Это можно объяснить нестабильностью пространственно-

го расположения столба плазмы разряда, что проявляется в нестабильности длины разряда. Таким образом, можно говорить о том, что закон изменения длины разряда содержит в определенной степени случайную величину и вызвано это тем, что в настоящее время мы не имеем возможности описать закономерности этого процесса.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений напряжения на разряде показывает, что хотя длина разрядного промежутка изменяется по колебательному закону, приведенному в работе [5], более достоверным является моделирование закона изменения длины разряда с помощью линейной модели с постоянной скоростью.

Ясно, что тепловая ионизация газа в разряде, то есть образование заряженных частиц в результате его нагрева носит инерционный характер, причем инерционным является как нагрев газа, так и его охлаждение. В работе [6] приводятся результаты экспериментальных исследований процесса деионизации плазмы. Они свидетельствуют о том, что при выделении в разряде максимальной энергии, при которой не происходит воспламенения 20 % водородно-воздушной среды, время, необходимое для деионизации плазмы, составляет примерно 3 мкс, а метано-воздушной среды – 8 мкс.

Поэтому в формуле (1) составляющая тепловой ионизации должна содержать ток разряда с учетом инерции изменения теплового состояния газа $i_T(t)$. Процесс аналогичен заряданию конденсатора емкостью C напряжением произвольной формы $u(t)$ через резистор R . Подаваемое напряжение $u(t)$ и напряжение на конденсаторе $u_c(t)$ связаны зависимостью

$$u(t) = RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t). \quad (2)$$

Представим $u(t)$ и $u_c(t)$ в виде

$$\begin{aligned} u(t) &= ni(t); \\ u_c(t) &= n \cdot i_T(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где n – коэффициент, равный 1 В/А.

Обозначив τ постоянной времени тепловой ионизации, равную RC , получим ток разряда

$$i_p(t) = \tau \frac{di_T(t)}{dt} + i_T(t). \quad (4)$$

Система уравнений, описывающих вольтамперную характеристику разряда, примет вид

$$\begin{aligned} u_p(t) &= U_0 + \left(a + \frac{b}{i_T(t)}\right) \cdot l_p(t); \\ i_p(t) &= \tau \frac{di_T(t)}{dt} + i_T(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Несмотря на простоту, второе уравнение системы (5) в аналитическом виде не решается, а просто моделируется и решается численными методами.

Методом последовательных приближений определены коэффициенты a , b и τ модели разряда (5) по наибольшей сходимости экспериментальных и расчетных зависимостей изменения напряжения на разряде во времени. При этом начальное падение напряжения на разряде U_0 принималось равным 10 В, а скорость изменения длины разряда – постоянной и равной 3 м/с. Определено, что значения коэффициентов ударной a и тепловой b ионизации и постоянная времени τ составили соответственно 34500 В/м, 7500 ВА/м и 1 мкс.

Из более чем 600 осциллограмм напряжения и тока разрядов в омических цепях при коммутируемых токах от 130 мА до 3,77 А в подавляющем большинстве разрядов процесс их завершения происходит плавно, а не скачкообразно, как полагалось ранее в работах многих исследователей. А единичные случаи разрядов при малых коммутируемых токах, заканчивающихся почти скачкообразно, объясняются тем, что в этих разрядах на финальной стадии наблюдается аномальное повышение напряжения. Это свидетельствует об увеличении длины разрядного промежутка, «выпучивании» столба плазмы разряда, после чего напряжения в цепи недостаточно для создания носителей тока в разряде и его продолжения.

Выполнены расчеты (с помощью математического пакета Mathcad) коэффициента корреляции и доверительных интервалов при вероятности 0,95 для экспериментальных и расчетных значений напряжения на разряде. Коммутируемый ток равен 3,77 А. Результаты расчетов приведены в таблице.

Коммутируемый ток, А	Среднеквадратическое отклонение	Квантиль вероятности распределения Стьюдента	Коэффициент корреляции
0,34	3,599	1,645	0,959
0,5	3,403	1,645	0,984
3,77	3,013	1,645	0,997

Расчеты выполнены с использованием исходных данных текущего времени, экспериментальных и расчетных значений напряжения на разряде, считываемых из файлов. Коэффициенты корреляции находятся в пределах 0,959...0,997, что свидетельствует об удовлетворительной сходимости расчетных и экспериментальных результатов, а также о правильности определения коэффициентов ударной и тепловой ионизации и постоянной времени тепловой ионизации модели разряда.

Выводы

1. Показано, что столб плазмы электрического дугового разряда в низковольтных цепях имеет нестабильное пространственное расположение, что обуславливает наличие случайного фактора в законе изменения длины разряда.
2. Обоснована необходимость учета инерционных свойств плазмы разряда.
3. Определена постоянная времени тепловой ионизации и уточнены коэффициенты ударной и тепловой ионизации модели разряда.

1. *Радиофизическая электроника* / Под ред. Н. А. Капцова. – Изд. Московского университета, 1960.

2. *Ерыгин А. Т., Трембицкий Л. А., Яковлев В. П.* Методы оценки искробезопасности электрических цепей. – М.: Наука, 1984. – 256 с.

3. *Лаппо П. В.* Способы и средства обеспечения искробезопасности энергоемкой шахтной геофизической аппаратуры повышенного напряжения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 1985. – 18 с.

4. *Диденко В. П.* Способы оценки и обеспечения искробезопасности на основе моделирования движения контактов искрообразующего механизма и переходных процессов в электрических цепях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / МакНИИ: Макеевка, 1990. – 18 с.

5. *Диденко В. П., Шевченко Ф. Л.* Расчет длины разрядного промежутка при оценке искробезопасности электрических цепей // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. – Макеевка, 2003. – С. 184–187.

6. *Коган Э. Г.* Способы и средства обеспечения искробезопасности рудничного электрооборудования. – М.: Недра, 1988. – 101 с.