

УДК 622:621.316.9

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

**З. М. Иохельсон, докт. техн. наук, О. И. Кашуба, докт. техн. наук
(МакНИИ), И. А. Бершадский, канд. техн. наук (ДонНТУ)**

Розглянуто комп'ютерну модель для визначення параметрів дугового розряду в колі постійного струму, виконано порівняння результатів розрахунків за цією моделлю з відомою методикою розрахунку на прикладі омичного кола.

The computer model for definition of arc discharge parameters in dc circuit is considered, comparison of results of calculations on this model with the known technique on example of ohmic circuit is carried out.

На искробезопасность (ИБ) электрической цепи оказывает влияние большое количество одновременно действующих факторов, взаимосвязанных между собой. Поэтому трудно выбрать единый критерий, по которому можно было бы аналитически определить опасность электрической цепи, воспламеняющей газовую смесь. До настоящего времени достоверная расчетная оценка ИБ для сложной цепи в общем случае не производилась.

Исследования последних лет показали [1, 2], что расчетная оценка ИБ должна сводиться к определению энергии W_p , длительности электрического разряда T_p , возникающего при заданных условиях коммутации, а также известных параметрах цепи и источников.

Основным препятствием на пути создания методик для таких расчетов является, по нашему мнению, отсутствие характеристик разряда, основанных на моделях дуги с учетом ее тепловых параметров. Попытки заменить характеристику дугового разряда во время переходного процесса в цепи аппроксимирующими выражениями (линейная, квадратичная форма изменения тока во времени, сопротивление, обеспечивающее максимум мощности и др.) не имели достаточных оснований, и полученные результаты были далеки от данных по воспламенению.

В последние годы за рубежом появился ряд публикаций [3], направленных на разработку компьютерных математических моделей поведения выключателей при переходе тока через ноль. При этом существенной проблемой при попытках использовать обобщенные балансные уравнения дуги является получение их параметров.

Целью статьи является разработка подходов к созданию схем искробезопасных цепей на основе структурных компьютерных компонентов со встроенной моделью дугового разряда и автоматической адаптацией ее параметров к коммутационным процессам.

Достаточно полно в количественном отношении электрическая дуга может быть описана посредством выражений, определяющих баланс энергии в створе разряда. Наиболее строгим является уравнение Эленбааса [4], устанавливающее связь между градиентом в створе дуги, проводимостью плазмы и температурой:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + \sigma E^2 + Q_i, \quad (1)$$

где $\rho, c_p, \lambda, \sigma$ – плотность, теплоемкость при постоянном давлении, теплопроводность, электропроводность газовой среды; $T(r, t)$ – температура; Q_i – потери на излучение на единицу объема плазмы; $E(t)$ – однородное поле по сечению разряда; t, r – время и радиус цилиндрического столба разряда.

Интегрированием уравнения (1) определяют поле температур в створе дугового разряда в зависимости от координат и времени. Как правило, реальную дугу заменяют приближенной цилиндрической моделью. Применение частных решений уравнения баланса (1) пока не нашло своего использования в расчетах по ИБ. На начальном этапе исследований целесообразно упростить задачу, исходя из соотношения для динамической характеристики дуги.

В установившемся режиме должен существовать энергетический баланс дуги:

$$EI - P_0 = 0,$$

где P_0 – отводимая от единицы длины столба дуги мощность.

В неустановившемся режиме это выражение переходит в неравенство $EI - P_0 > < 0$, то есть теплосодержание Q в единице длины дуги уменьшается или, наоборот, увеличивается:

$$\frac{dQ}{dt} = EI - P_0. \quad (2)$$

При малых токах в случае открытой дуги справедливо допущение $P_0 = \text{const}$. Тогда сопротивление дуги по Майру:

$$R = ke^{-Q/Q_0}, \quad (3)$$

где k, Q_0 – постоянные.

Заменяя $R = E / I$ и дифференцируя (3), получаем уравнение Майра:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q_0}{R} \cdot \frac{dR}{dt} = Q_0 \left(\frac{1}{I} \cdot \frac{dI}{dt} - \frac{1}{E} \cdot \frac{dE}{dt} \right) = EI - P_0. \quad (4)$$

Часто через $\frac{Q_0}{P_0} = \tau$ обозначают постоянную времени дуги. Для решения (4) необходимо иметь еще одно уравнение, устанавливающее связь параметров

электрической цепи с дугой (предполагается, что Q_0, P_0 известны). Например, задавая характер изменения тока цепи $i = f(t), E = Rf(t)$ и переходя к полной длине дуги, получаем уравнение Майра в виде ($P_p = P_0 l$):

$$\frac{1}{dt} \left(\frac{1}{R} \right) = \frac{ui - P_p}{lQ_0 R} = \frac{ui}{P_0 \tau R} - \frac{P_0}{P_p \tau R}$$

или

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_p} - 1 \right). \quad (5)$$

Для компьютерного моделирования удобнее решать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d \ln g}{dt} = \frac{\{1,0\}}{\tau} \left(\frac{gu^2}{P_p} - 1 \right), \\ i = gu \end{cases} \quad (6)$$

Отводимая от дуги мощность P_p может быть представлена упрощенно с использованием статической ВАХ разряда [2]

$$u_p = u_k + (a + \frac{b}{i})vt$$

в виде

$$P_p = u_p \cdot i = (u_k + E_n(i) \cdot l) \cdot i, \quad (7)$$

где i и l – ток и длина разряда; u_p – напряжение разряда; u_k – минимальное значение катодного падения напряжения; v – скорость размыкания контактов; a, b – коэффициенты, характеризующие условия получения характеристик; t – время; E_n – усредненное значение напряженности поля в столбе и анодной области. Для катода из кадмия: $u_k = 8$ В; $a = 82,81$ В/мм; $b = 2,42$ В·А/мм ($i = 0,024 \dots 0,1$ А); $a = 43,89$ В/мм; $b = 5,18$ В·А/мм ($i = 0,05 \dots 2$ А).

Постоянная времени дуги τ зависит от тока разряда и радиуса его столба. В условиях одночленной степенной аппроксимации тепловых функций дуги (при допущении о температурах, не превышающих 10000 К), воспользуемся аналитическим выражением для τ [4]:

$$\tau = \frac{r_0^2 D_b (2\pi r_0 \sqrt{B_p})^{\frac{2(1-b)}{p+1}}}{i^{\frac{2(1-b)}{p+1}}}, \quad (8)$$

где r_0 – расчетный радиус столба дуги, см; $B_p, b, D_0, p = 3,5$.

Зависимость температуры от радиуса столба дуги определялась по методике, изложенной в работе [5] на основе модифицированного «метода источников».

Для получения всех необходимых параметров разряда в ИБ цепи заданной топологии предлагается использовать Simulink – модель программного комплекса Matlab. Его преимущество по сравнению с большинством других программных средств схемотехнического моделирования состоит в возможности объединения как физических воздействий, так и средств поддержки самих приборов, элементов цепей и виртуальных измерителей.

Модель дуги представляется как управляемый по напряжению источник тока (рис. 1). Измерительный блок и источник тока взаимодействуют, осуществляя связь между электрическими сигналами (напряжением и током, протекающим в разряде) и Simulink – блоком DEE (переходной функцией).

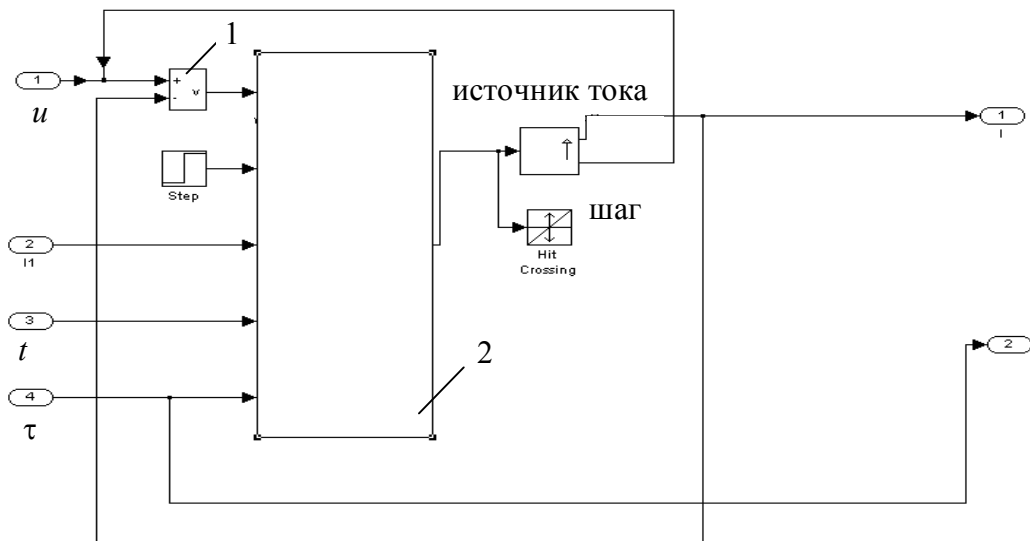


Рис. 1. Блок обрыва электрической цепи: 1 – измерительный блок; 2 – редактор дифференциальных уравнений

Уравнение дуги Майра встроено в цепь с помощью редактора дифференциальных уравнений DEE, как показано на рис. 2.

Имя:	Редактор дифференциальных уравнений	
# ВХОДОВ:	5	
dx/dt	Уравнения первого порядка	x0
	$\frac{u(2) \cdot (1/u(5)) \cdot (\exp(x(1))) \cdot (u(1)^2) / (u(3) \cdot (8 + 43.89 \cdot \sqrt{u(4)}) + 5.18 \cdot \sqrt{u(4)}) - 1}{}$	$\log(x0)$
	Число состояний = 1	Всего = 1
Уравнения полезной мощности f(x,u):		
y =	$\exp(x(1)) \cdot u(1)$	

Рис. 2. Описание уравнения Майра

В нем приведена символическая запись адаптированной к обозначениям редактора DEE системы (6).

$$\begin{cases} \frac{dx(1)}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \cdot \left(\frac{e^{x(1)}u(1)^2}{P_p} - 1 \right), \\ y = e^{x(1)}u(1) \end{cases} \quad (9)$$

где $u(1)$ – первый вход DEE блока, эквивалентный напряжению на дуге u ; $u(2)$ – второй вход DEE блока, представляет собой логику размыкания цепи: $u(2) = 0$, когда контакт замкнут и $u(2) = 1$, когда контакт начинает дуговое размыкание; $u(3)$ – модельное время t ; $u(4)$ – постоянная времени дуги τ , выраженная через (8); x_0 – начальная величина проводимости дуги $g(0)$; $x(1)$ – переменная состояния дифференциального уравнения, $\ln(g)$; y – выход блока DEE, равный току дуги: i ; P_p – параметр дуги, выраженный через (7).

Чтобы проверить методику оценки дугового разряда с точки зрения искробезопасности, нами была рассмотрена простейшая цепь, состоящая из источника питания – батареи $U = 24$ В и последовательно установленного неповреждаемого резистора R . Оценка проводилась для двух сопротивлений $R_1 = 33$ Ом, $R_2 = 15,5$ Ом и токов в цепи $I_{01} = 0,73$ А, $I_{02} = 1,55$ А.

С учетом коэффициента искробезопасности 1,5 получили измененную цепь с $I_{u1} \approx 1,1$ А, $I_{u2} \approx 2,32$ А. Энергия разряда W_p и его длительность T_p при размыкании контактов с различными скоростями просчитывалась на компьютерной модели и затем сравнивалась с аналогичными расчетными данными из ГОСТ [2]. Результаты сведены в таблицу (W_p^* , T_p^* – данные ГОСТ).

Сравнительные данные параметров разряда

v , м/с	Расчетные параметры дугового разряда в ИБ цепи							
	$I_{u1} \approx 1,1$ А				$I_{u2} \approx 2,32$ А			
	T_p , мс	W_p , мДж	T_p^* , мс	W_p^* , мДж	T_p , мс	W_p , мДж	T_p^* , мс	W_p^* , мДж
0,046	3,63	7,34	3,62	7,38	7,66	20,6	4,59	20,5
0,110	1,525	3,09	1,516	3,08	1,97	8,8	1,92	8,57
0,300	0,564	1,151	0,556	1,13	0,739	3,33	0,704	3,14
0,900	0,191	0,397	0,185	0,377	0,258	1,18	0,235	1,05
1,800	0,097	0,207	0,093	0,189	0,136	0,63	0,117	0,52
4,000	0,046	0,102	0,042	0,085	0,066	0,32	0,053	0,24
6,500	0,029	0,069	0,026	0,052	0,043	0,22	0,032	0,15

Выводы

1. Показана возможность использования модели дугового разряда на основе уравнения Майра для расчетной оценки искробезопасности на примере омической цепи.

2. Сравнение результатов расчетов по разработанной методике с известными формулами [2] показывают хорошую сходимость при малых скоростях размыкания. Некоторое завышение энергий разряда при высоких скоростях размыкания (до 24 %) вызвано, на наш взгляд, неучетом в ранее известных моделях инерционных свойств плазмы разряда и изменения мощности теплоотдачи при увеличении длины разряда.

1. *Жданкин В. К.* Вид взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь» // СТА. – 1999. – № 2. – С. 72–83.

2. *ГОСТ Р 51330.10-99 (МЭК 60079-11-99).* Электрооборудование взрывозащищенное. Ч. 11. Искробезопасная электрическая цепь *i*. – Взамен ГОСТ 22782.5-81. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.

2. *Schavemaker P. H. and Sluis L.* The arc model blockset // Proceedings of the Second IASTED International Conference «Power and energy systems» (EuroPES), June 25–28. – 2002. – Crete, Greece. – P. 644–648.

3. *Крижанский С. М.* К теории вольтамперной характеристики столба нестационарного дугового разряда высокого давления // Журнал технической физики. – 1965. – Вып. 10. – Т. 35.

4. *Бершадский И. А., Клименко М. С., Иохельсон З. М.* Сферическая модель воспламенения электрической искрой газовой смеси для оценки искробезопасности электрических цепей рудничного электрооборудования // Наукові праці ДонНТУ. Серія „Електротехніка і енергетика”. – Донецьк: ДонНТУ. – 2006. – Вип. 112.