

*Составлен сигнальный граф для уравнений, описывающих электрическую цепь, питающуюся от переменного тока, в которой возникает дуговой разряд. Реализована и исследована математическая модель системы питания дугового разряда через ограничительный реактор в пакете прикладных программ MATLAB.*

**УДК 621.327**

**Е. В. Ягуп**, канд. техн. наук,  
Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта  
г. Харьков, пл. Фейербаха, 11, т.73  
т. 730-10-73

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДУГОВОГО РАЗРЯДА ЧЕРЕЗ ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫЙ РЕАКТОР**

Для оценки опасных значений токов и напряжений, которые возникают в электрических цепях, важным является выполнение расчетов параметров, при которых возникают дуговые разряды. Появление дуги может быть связано с возникновением в электрической сети короткого замыкания, с коммутациями в электрических аппаратах, при использовании электросварочного оборудования [1, 2]. Вольт-амперные характеристики дугового разряда имеют нелинейный характер, что создает трудности в расчете и анализе электрических схем, в которых он возник. Реализация математических моделей в современных компьютерных программах является эффективным способом теоретических исследований нелинейных электрических систем.

Целью статьи является разработка, реализация и проверка адекватности математической модели дугового разряда при питании через ограничительный реактор с использованием пакета прикладных программ Matlab.

При математическом описании вольт-амперной характеристики дугового разряда используется дифференциальное уравнение [3]:

$$k_1 r^n + k_2 r \frac{dr}{dt} = \frac{k_3}{r^{m+2}} i^2 \quad (1)$$

где  $r$  – радиус дуги,  
 $i$  – ток через дугу,

$k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты, определяющие параметры вольт-амперной характеристики дугового разряда, величины которых приняты равными соответственно 3000, 1 и 12,5.

Степени  $m$  и  $n$  рекомендуется принять равными соответственно 0 и 2.

Для построения вольтамперной характеристики необходимо составить уравнение для расчета напряжения на дуге. Такое уравнение можно получить приняв то обстоятельство, что правая часть уравнения (1) отображает энергию выделяющуюся в дуге. Следовательно, проводимость столпа дуги будет определяться как:

$$g = \frac{r^2}{k_3} \quad (2)$$

Зависимость напряжения на дуге от тока будет определяться уравнением:

$$v = \frac{i}{g} \tag{3}$$

Для построения сигнального графа, необходимо перенести все слагаемые, кроме производной в правую часть уравнения [4]:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{k_2 r} \left( \frac{k_3}{r^2} i^2 - k_1 r^2 \right) \tag{4}$$

Сигнальный граф, составленный для системы уравнений (3) – (4) изображен на рис. 1. В узел, которому соответствует переменная в левой части уравнения, входят ветви из узлов, которые соответствуют переменным, находящимся в правой части уравнения. При этом коэффициенты, стоящие перед переменными, соответствуют передачам ветвей. Так как уравнение (4) является нелинейным, то для отображения возведения величин в степени введены специальные обозначения умножителей и делителей. Для операции интегрирования производной используется изображение по Лапласу интегратора 1/s. Ток через дугу оставляем узлом-источником, т.е. модель составляется в импедансной форме.

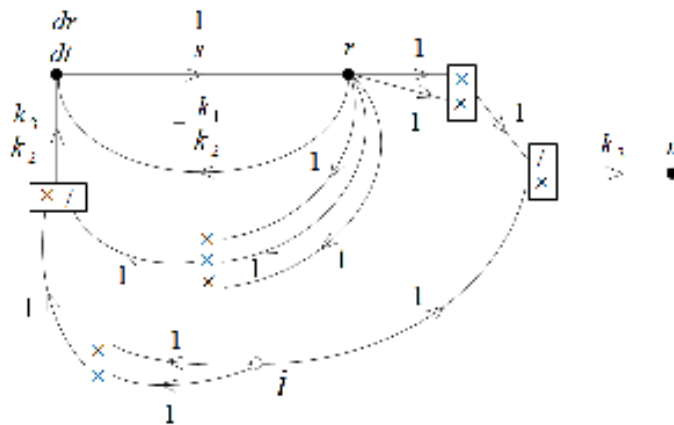


Рис. 1 – Сигнальный граф для описания вольт-амперной характеристики дугового разряда

С использованием построенного сигнального графа была собрана визуальная модель дугового разряда в пакете прикладных программ Matlab изображенная на рис. 2.

В результате работы программы была получена вольт-амперная характеристика изображенная на рис. 3.

На рис. 4. приведена модель системы питания дугового разряда с индуктивной нагрузкой. Представленная модель состоит из двух частей: левая часть – модель дугового разряда, правая часть представляет собой участок питающей сети с индуктивной нагрузкой. С использованием модели выполнены исследования влияния изменения амплитуды питающей сети на напряжение и ток дуги. При этом величины амплитуды задавались равными 600, 400, 300 и 250 В (соответственно рис. 5, 6, 7, 8).

В ходе проведения компьютерных экспериментов было установлено, что при снижении питающего напряжения наблюдаются участки нулевого тока, где напряжение дуги совпадает с напряжением питающей сети. При увеличении питающего напряжения происходит зажигание дуги, которое, однако, практически исчезает при амплитуде питающего напряжения равного 250 В.

Следует также отметить, что изменение питающего напряжения не влияет на

величину установившегося значения тока дуги. Индуктивный характер нагрузки негативно влияет на энергетические показатели питающей сети, а именно снижает коэффициент мощности из-за значительного смещения фаз питающего напряжения и дугового тока, который уменьшается при ограничении активным резистором [5].

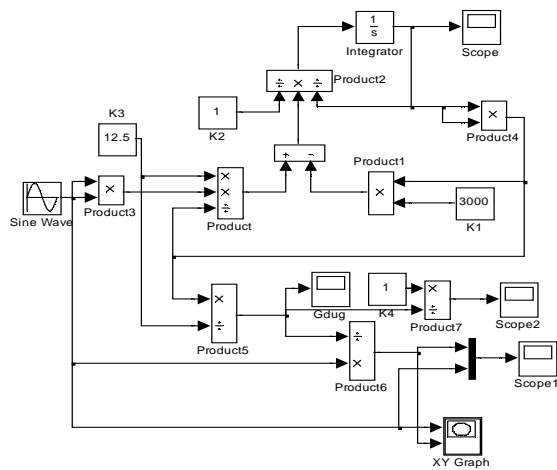


Рис. 2 – Визуальная модель дугового разряда

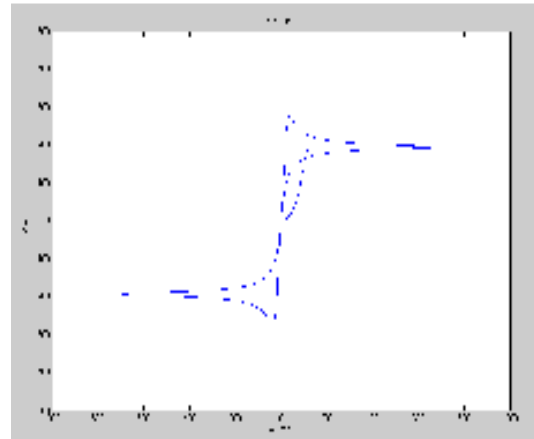


Рис. 3 – Вольт-амперная характеристика дуги

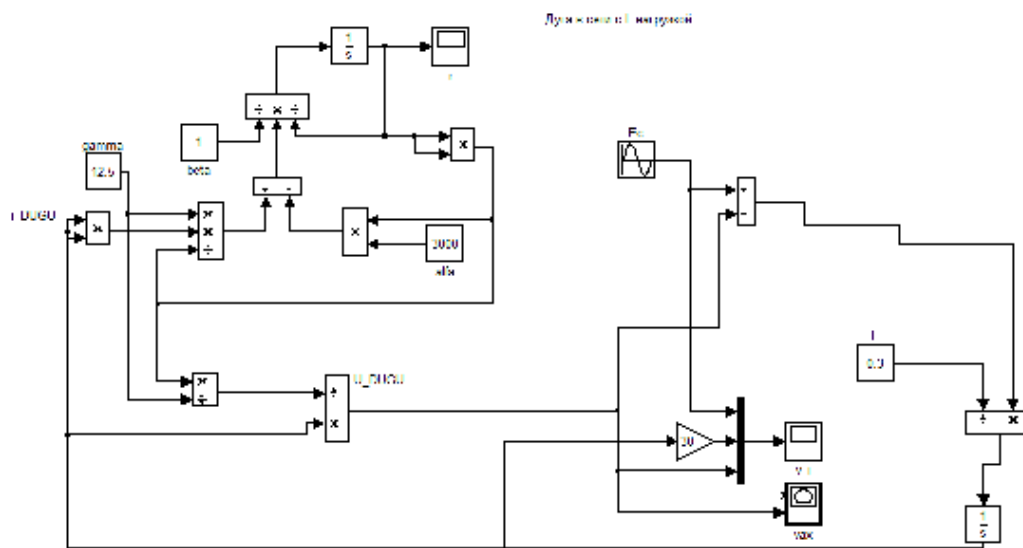


Рис. 4 – Модель системы питания дугового разряда через ограничительный реактор

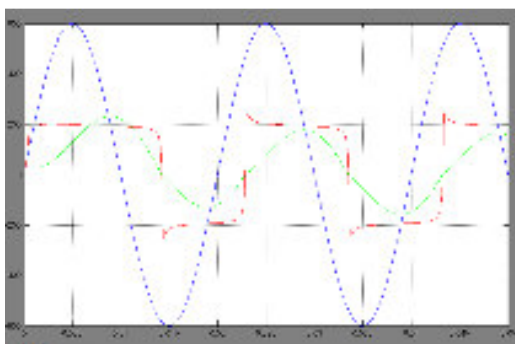


Рис. 5 – Временные диаграммы при питающем напряжении  $U_c = 600$

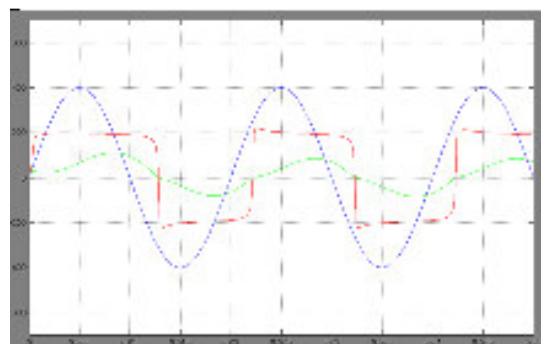


Рис. 6 – Временные диаграммы при питающем напряжении  $U_c = 400$

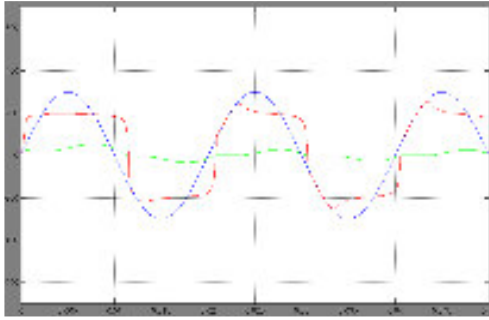


Рис. 7 – Временные диаграммы при питающем напряжении  $U_c = 300$

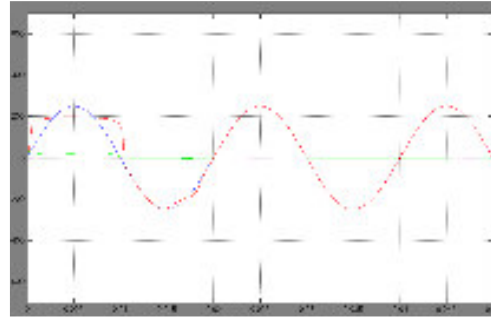


Рис. 8 – Временные диаграммы при питающем напряжении  $U_c = 250$

### Выводы

1. На основе дифференциального уравнения построен сигнальный граф, который является основой для реализации математической модели цепи с дуговым разрядом.
2. Проверена адекватность модели при построении вольт-амперных характеристик.
3. Разработана визуальная модель системы питания дугового разряда через ограничительный реактор.
4. В результате проведения компьютерных экспериментов установлено, что при снижении питающего напряжения в сети появляется участок нулевого тока, на котором напряжение дуги совпадает с напряжением питающей сети.

### Литература:

1. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутациях электрических цепей. М.: Высшая школа, 1967. – 195 с
2. ГОСТ 28249-93 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. - Издательство стандартов, - 1994 г, 63 с.
3. Acha E. A Harmonic domain Computational Package for Nonlinear problems and Its Application to Electric Arcs / E. Acha, A. Semlyen, N. Rajakovic // IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 3, July. 1990. – PP.1390-1397.
4. Робишо Л., Буавер М., Робер Ж. Направленные графы и их приложение к электрическим цепям и машинам. - М.: Энергия, 1964. - с.
5. Ягуп В. Г., Ягуп К. В. Математична модель дугового розряду. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Вип. 129. 2012 р. с. 49 – 50.

---



---

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ ЖИВЛЕННЯ ДУГОВОГО РОЗРЯДУ ЧЕРЕЗ ОБМЕЖУВАЛЬНИЙ РЕАКТОР

К. В. Ягуп

*Складений сигнальний граф для рівнянь, що описують електричне коло, що живиться від змінного струму, в якому виникає дуговий розряд. Реалізована і досліджена математична модель системи живлення дугового розряду через обмежувальний реактор в пакеті прикладних програм Matlab.*

## SIMULATION OF PROCESSES IN SYSTEM OF FEEDING THE ARC THROUGH RESTRICTIVE REACTOR

K. V. Yagup

*A signal graph is drawn up for equations describing an electric chain feeding from an alternating current, which the arc digit is in. Investigational mathematical model of the system of feed of arc digit through restrictive reactor in an application of Matlab package is realized.*