

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДУГОВОГО РОЗРЯДУ

Ягуп В. Г.¹, Ягуп К. В.²¹Харківська національна академія міського господарства,²Українська державна академія залізничного транспорту

Запропонована математична модель дугового розряду, яка реалізована в системі Simylink-MATLAB. Модель апробована на прикладі моделювання дуги в резистивному ланцюзі, що живиться змінним струмом.

Постановка проблеми. В багатьох задачах електротехніки виникає потреба враховувати дуговий розряд. Так, дуга виникає при коротких замиканнях в системах електропостачання [1], в електричних апаратах при їх комутаціях [2], використовується в електрозварювальних пристроях [3], в дугових освітлювальних пристроях [4]. Розрахунки електромагнітних процесів необхідно проводити для оцінок небезпечних значень струмів і напруг, що діють на елементи електричної системи і призводять до їх нагріву. Крім того, оцінка параметрів струмів і напруг потрібна для визначення енергетичних показників, які характеризують якість електропостачання цієї системи. Труднощі аналізу електричних систем з дуговим розрядом обумовлені суттєвою не лінійністю вольт-амперних характеристик самого дугового розряду. Основним апаратом теоретичного дослідження нелінійних електричних систем на сьогоднішній день є математичне моделювання їх за допомогою комп'ютерних засобів та сучасних числових математичних методів.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Складність процесів в самому дуговому розряді обумовила розробку моделей, що розглядають і враховують термодинамічні і електродинамічні особливості поведінки носіїв електричного заряду в тілі самої дуги [5]. Такі моделі актуальні, наприклад, для аналізу фізико хімічних процесів при зварюванні металів, при аналізі спектрів електроосвітлювальних приладів, що випромінюються завдяки існуванню дугового розряду. Однак, з точки зору розрахунків електричних кіл для проектування і вибору комутуючих пристроїв такі досконалі розрахунки не мають сенсу. В електроенергетичних системах з урахуванням співвідношень напруг дуги та самої системи, наприклад, взагалі нехтують процесами в дузі і вважають коротке замикання металевим [6]. Одночасно така крайня оцінка не може бути прийнятною, коли треба врахувати затримку струмів в ланцюгах з дуговим розрядом, які суттєво впливають на енергетичні показники електропостачання систем електрозварювання і електроосвітлення.

Мета статті. Стаття присвячена розробці і реалізації моделі дугового розряду в системі Simylink-MATLAB, придатної для розрахунків і моделювання процесів електропостачання систем з дуговим розрядом, а також перевірки працездатності такої моделі на прикладі системи змінного струму.

Основний матеріал дослідження. В основу моделі покладені нелінійні рівняння, що описують вольт-амперну характеристику дугового розряду у формі звичайних диференціальних рівнянь [7]:

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

де r – радіус дуги, i – струм через дугу, k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти, що визначають параметри вольт-амперної характеристики дугового розряду.

Параметри m і n рекомендовано прийняти відповідно 0 та 2. В зазначеному рівнянні права частина віддзеркалює енергію, що виділяється в дузі. Отже, провідність g стовпа дуги визначається величиною, зворотною до коефіцієнта при квадраті струму в правій частині рівняння:

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

До цього рівняння слід додати залежність напруги на дузі від струму, яку тепер можна виразити через провідність дуги в формі звичайного компонентного рівняння:

$$v = \frac{i}{g}. \quad (3)$$

Для побудови візуальної моделі дугового розряду приймемо зазначені рекомендовані величини m і n та приведемо рівняння (1) до нормальної форми, відокремивши першу похідну від змінної в лівій частині диференціального рівняння:

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

Побудована за цим рівнянням візуальна модель [8] наведена на рис. 1. Для представленої моделі прийняті наступні значення коефіцієнтів $k_1=3000$; $k_2=1$; $k_3=12,5$. На рис.2 зображено вольт-амперну характеристику дугового розряду, яка отримана за допомогою віртуального приладу XY Graph, на вході котрого спрямовані струм та напруга на дузі. Як видно з отриманого графіка, характеристика має всі характерні ознаки реальної вольт-амперної характеристики дугового розряду, такі, як наявність гістерезису і напруги загоряння дуги. Для вивчення поведінки моделі дуги в системі електроживлення розглянуто випадок живлення дуги через резистор. Відповідна візуальна модель зображена на рис.3, в якій додано рівняння за законом Кірхгофа для напруг, а також компонентне рівняння резистора, який увімкнено послідовно з джерелом живлення і пристроєм з дуговим розрядом.

Для запуску моделі використано числовий метод інтегрування диференціальних рівнянь зі змінним кроком і можливістю інтегрування жорстких систем ode23s(stiff/Mod/Rosenbrock), а для забезпечення стійкості процесу інтегрування прийшлося призначити досить мале значення максимально допустимого кро-

ку 0,00001 с. Часові діаграми, отримані моделюванням, наведені на рис.4. На діаграмах зображені живляча синусоїдальна напруга, напруга і струм дуги. Остання діаграма має характерний зсув у бік відставання, що з точки зору якості електропостачання погіршує енергетичні показники системи в цілому.

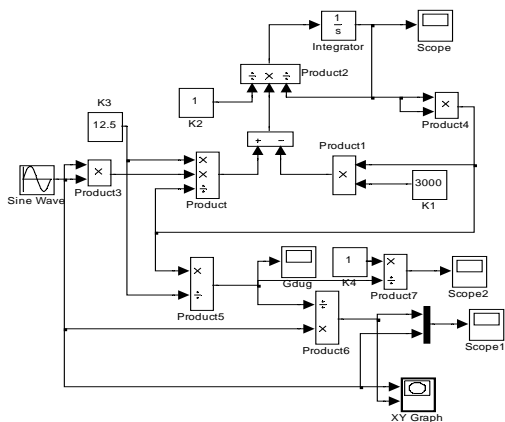


Рисунок 1 – Візуальна модель дуги

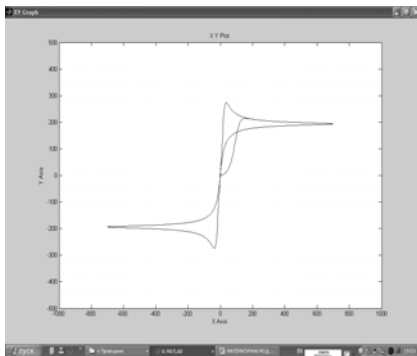


Рисунок 2 – Вольт-амперна характеристика дуги

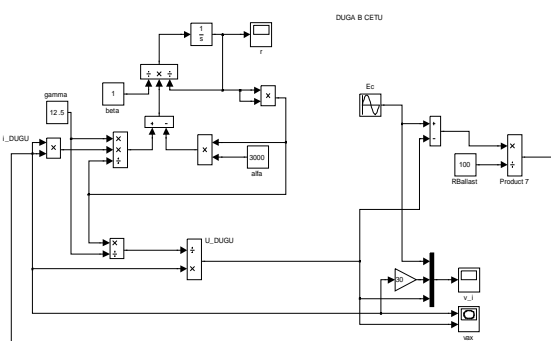


Рисунок 3 – Модель системи електропостачання з дугою

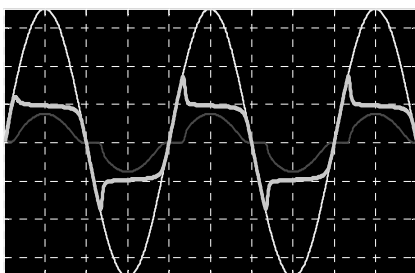


Рисунок 4 – Часові діаграми моделювання

Висновки.

1. Розглянута можливість побудови математичної візуальної моделі на основі відносно простих співвідношень, представлених системою звичайних диференціальних рівнянь.

2. Модель може бути реалізована в будь-якій комп'ютерній системі візуального моделювання динамічних систем.

3. Моделювання показує адекватність побудованих візуальних моделей в сенсі відображення вольт-амперних характеристик дугового розряду, а також електромагнітних процесів в системі електроживлення пристрою з дуговим розрядом.

4. Питання про відповідність вольт-амперної характеристики реальній характеристиці конкретного дугового пристрою може бути вирішено шляхом апроксимації модельних вольт-амперних характеристик, впливаючи на коефіцієнти системи рівнянь, що описують модель дугового розряду.

Список використаних джерел

1. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах / Р. Рюденберг – М.: Иностранная литература, 1955. - 714 с.
2. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутациях электрических цепей / Г. В. Буткевич – М.: Высшая школа, 1967. – 195 с.
3. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. – 215 с.
4. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы / Д. Уэймаус – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
5. Финкельбург В. Электрическая дуга и термическая плазма / В. Финкельбург, Г. Меккер – М.: ИЛ, 1961. - 436 с.
6. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – М.: Издательство стандартов, 1994. - 63 с.
7. 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.

Анотация

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Ягуп В. Г., Ягуп Е. В.

Предложена визуальная модель для приборов с дуговым разрядом, адекватно отображающая поведение дуги в системе электроснабжения.

Abstract

MATHEMATICAL MODEL OF ARC

V. Yagup, K. Yagup

Visual model of arc-devices is proposed. The model is adequate as to behavior in electric power supply system.