

## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОВТОРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

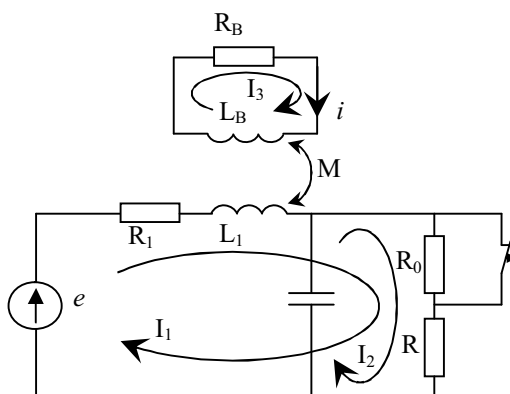
**В.М. Мякишев, Е.М. Шишков**

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Проведен анализ динамических свойств системы «источник питания – сварочная дуга» в зависимости от параметров сварочной цепи. Дана оценка скорости изменения напряжения на дуге при переходе тока через ноль.*

**Ключевые слова:** *сварочная дуга, источник питания, восстанавливающееся напряжение, повторное зажигание, устойчивость горения.*

Процесс повторного зажигания и устойчивого горения сварочной дуги определяются динамическими свойствами системы «источника питания – электрическая дуга». В общем случае оба объекта в динамическом режиме являются нелинейными элементами и их совместный анализ представляет достаточно сложную математическую и экспериментальную задачу. Это обстоятельство приводит к тому, что для анализа динамических процессов, протекающих в дуге во время повторного зажигания, используется несколько математических моделей этой системы.



Р и с. 1. Схема замещения сварочного трансформатора

Как отмечено в [1, 2, 3], при малых токах для моделирования дуговых процессов удобнее использовать модель О. Майра, а для анализа процессов, протекающих в сварочном трансформаторе, в зависимости от конкретной задачи могут быть использованы различные модели.

На рис. 1 представлен один из вариантов схемы замещения сварочного трансформатора с учетом контура вихревых токов  $R_B$  и  $L_B$  паразитной емкости  $C$ , обусловленной емкостью сварочного кабеля и элементами трансформатора, и парамет-

ров трансформатора  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R$  и  $L_1$ , где  $R_1$  – эквивалентное входное сопротивление трансформатора относительно выходных зажимов,  $R$  – сопротивление столба дуги в процессе устойчивого горения,  $R_0$  – сопротивление дугового промежутка в процессе повторного зажигания,  $L_1$  – эквивалентная индуктивность сварочной цепи.

Процесс повторного зажигания дуги наиболее полно характеризуется постоянной времени столба дуги и восстанавливаемым напряжением источника питания.

В работе [2] указано время восстановления напряжения на дуге после взрыва сварочной переключки в пределах  $t_3 = 2 \cdot 10^{-4}$  с. Это время можно считать временем переходного процесса. Известно, что переходный процесс можно считать законченным за  $5\tau_0$ , где  $\tau_0$  – эквивалентная постоянная времени цепи. Исходя из этого можно из экспериментальных данных [2] определить усредненное значение постоянной времени дугового столба  $\tau_0$

$$\tau_0 = \frac{t_3}{5} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ с.} \quad (1)$$

Эти данные с достаточной точностью совпадают с данными, приведенными в [3]. Здесь же указано, что постоянная времени дугового столба существенно зависит от компонентов элементов, вносимых в дуговой столб (обмазки электродов, флюса, газа и т. п.). Исходя из сказанного можно считать, что сопротивление дугового столба в процессе повторного зажигания увеличивается по экспоненциальному закону с минимального значения  $R_0$  дугового столба [1, 3]:

$$R = R_0 \cdot e^{\frac{t}{\tau_0}}. \quad (2)$$

Начальное, минимальное сопротивление столба дуги  $R_0$  можно определить из известного соотношения [2].

Таким образом, зная начальное сопротивление дуги  $R_0$  и постоянную времени  $\tau_0$ , можно записать аналитическое выражение сопротивления дугового столба (2) и учесть его при расчете.

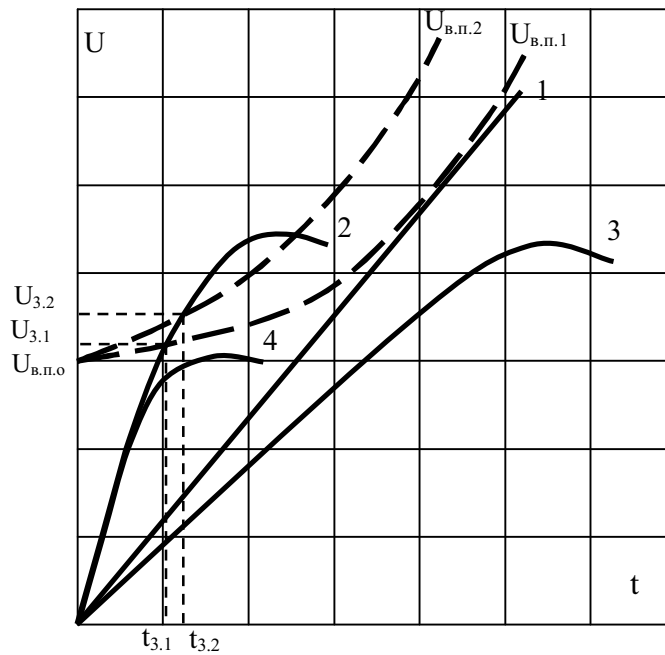
При определенном значении возвращающейся составляющей восстанавливающегося напряжения источник должен обладать скоростью восстановления напряжения больше какого-то критического значения ( $\tau_u < \tau_{кр}$ ) (рис. 2). В противном случае ( $\tau_u > \tau_{кр}$ ) при любом значении возвращающейся составляющей восстанавливающегося напряжения дуга не загорится (зависимости 1, 3, 4 на рис. 2). Нижний предел возвращающейся составляющей восстанавливающегося напряжения определяет напряжение зажигания дуги. Если окажется, что оно меньше напряжения зажигания, то при любой скорости восстановления напряжения дуга не загорится [1, 3, 4].

Из этого следует, что для обеспечения надежного зажигания сварочной дуги необходимо, чтобы напряжение на контактах электродов возрастало быстрее, чем восстанавливалась электрическая прочность дугового столба [1, 2, 4].

Для анализа рассматриваемых процессов опишем работу сварочного трансформатора, схема замещения которого представлена на рис. 1, системой дифференциальных уравнений на основе законов Кирхгофа [3].

Примем  $R' = R + R_0$  – сопротивление дугового столба после размыкания ключа:

$$\begin{cases} (R_1 + R' + j\omega L_1) \cdot I_{11} + R' \cdot I_{22} + j\omega M \cdot I_{33} = E; \\ R' \cdot I_{11} + \left( R' - \frac{1}{j\omega C} \right) \cdot I_{22} = 0; \\ j\omega M \cdot I_{11} + (R_2 + j\omega L_2) \cdot I_{33} = 0. \end{cases} \quad (3)$$



Р и с. 2. К вопросу согласования динамических свойств сварочной дуги и источника питания

Характер процесса повторного зажигания будет определяться корнями характеристического уравнения, которое можно получить из системы (3).

Выполнив несложные преобразования, получим характеристическое уравнение в виде:

$$p^3(CL_1L_2R' - CM^2R') + p^2(M^2 - L_1L_2 + CL_1R_2R' + CL_2R_1R') + p(CR_1R_2R' - L_2R_1 - L_2R' - L_1R_2) - (R_1R_2 + R_2R') = 0.$$

Введем обозначения:

$$a = CL_1L_2R' - CM^2R'; \quad b = M^2 - L_1L_2 + CL_1R_2R' + CL_2R_1R';$$

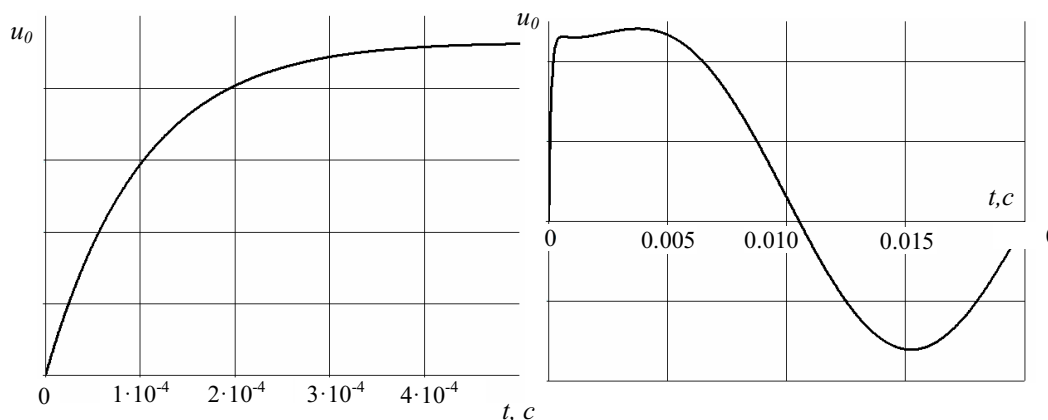
$$c = CR_1R_2R' - L_2R_1 - L_2R' - L_1R_2; \quad m = -(R_1R_2 + R_2R').$$

Характеристическое уравнение:

$$ap^3 + bp^2 + cp + m = 0. \quad (4)$$

Как видно из приведенных соотношений, процесс повторного зажигания сварочной дуги описывается характеристическим уравнением третьего порядка, причем коэффициенты этого уравнения зависят от параметров трансформатора. Сложность

анализа динамических процессов, протекающих в нелинейной системе «источник питания – сварочная дуга», вызывает необходимость использования систем компьютерного моделирования, предусматривающих численное интегрирование системы дифференциальных уравнений и ориентировочный учет изменения восстанавливающейся прочности дугового промежутка. Ниже приведены некоторые данные такого моделирования при следующих параметрах:  $R = 0,14$  Ом,  $R_0 = 100$  Ом,  $R_l = 5$  Ом,  $R_B = 3$  Ом,  $L_l = 0,5$  Гн,  $L_B = 0,3$  Гн,  $M = 0,2$  Гн,  $C_l = 10$  мкФ.



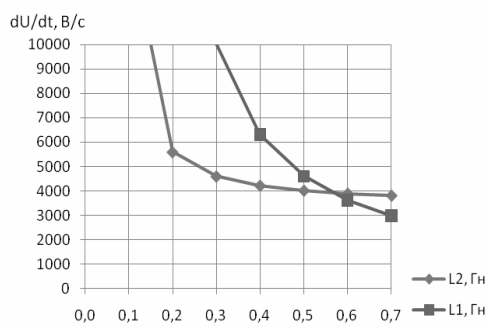
Р и с. 3. Изменение напряжения на дуговом промежутке при переходном процессе

На рис. 3 показаны результаты компьютерного расчета кривых восстанавливающегося напряжения в различных масштабах. Сравнивая полученные кривые с аналогичными экспериментальными [2, 3], можно отметить их хорошее совпадение, что позволяет сделать вывод о приемлемости выбранной схемы замещения сварочного трансформатора и ее параметров. В данном случае получена кривая восстанавливающегося напряжения при переходе от установившегося режима горения дуги с сопротивлением  $R = 0,14$  Ом (сварочный ток  $I = 200$  А) к принужденному режиму с сопротивлением  $R_0 = 100$  Ом, соответствующим режиму погасания дуги.

Дальнейший анализ рассматриваемой цепи предусматривает изменение сопротивления дуги от  $0,14$  Ом по экспоненциальному закону (2), описанному в литературе [1, 2, 4], с учетом постоянной времени дуги.

С целью анализа процесса повторного возбуждения сварочной дуги предусматривалась серия расчетов при изменении различных параметров схемы замещения (рис. 1) в следующих пределах:  $R_l = 3 \div 7$  Ом,  $L_l = 0,3 \div 0,7$  Гн,  $R_B = 1 \div 5$  Ом,  $L_B = 0,1 \div 0,5$  Гн.

При каждом изменении параметров повторяем расчет переходного процесса, в результате которого определяем скорость изменения напряжения на дуговом промежутке в момент времени  $t = 0$ . Расчет проведен средствами программного комплекса



Р и с. 4. Скорость изменения напряжения на дуге при изменении значения индуктивности контура вихревых токов  $L_1$  и эквивалентной индуктивности трансформатора  $L_2$

MathCAD и ядра символьных вычислений MuPAD. Результаты расчета представлены на рис. 4-6.

С увеличением индуктивности, обусловленной контуром вихревых токов  $L_B$ , скорость нарастания напряжения на дуговом промежутке падает, что соответствует росту эквивалентной постоянной времени сварочного трансформатора и объясняет замедление скорости восстановления напряжения на дуге (рис. 4).

Изменение эквивалентной индуктивности цепи  $L_I$  также приводит к снижению скорости нарастания напряжения на дуговом промежутке (рис. 4), что хорошо согласуется с теорией анализа переходных процессов в цепях  $RL$ .

Эквивалентное активное сопротивление трансформатора незначительно по сравнению с сопротивлением, обусловленным эквивалентной индуктивностью, и это позволяет сделать вывод о его незначительном влиянии на скорость восстановления напряжения, что хорошо подтверждается аналитическими расчетами. Аналогичный вывод можно сделать и о влиянии активного сопротивления столба дуги на процесс повторного возбуждения. Однако существенный интерес представляет анализ процесса повторного возбуждения дуги с учетом ее постоянной времени и динамики процесса деионизации дугового промежутка.

На рис. 5 представлена зависимость изменения скорости нарастания напряжения на дуговом промежутке для различных значений активного сопротивления контура вихревых токов эквивалентного активного сопротивления сварочной цепи.

Как отмечалось ранее, сопротивление столба дуги в процессе повторного возбуждения изменяется по экспоненциальному закону. На рис. 6 представлена аналитическая зависимость изменения напряжения на дуговом промежутке при изменении сопротивления столба дуги по закону (2).

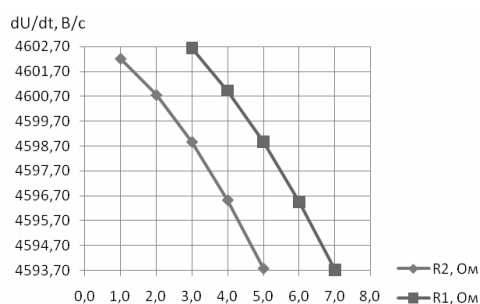


Рис. 5. Скорость изменения напряжения на дуге при изменении значения эквивалентного активного сопротивления  $R1$  и сопротивления контура вихревых токов  $R2$

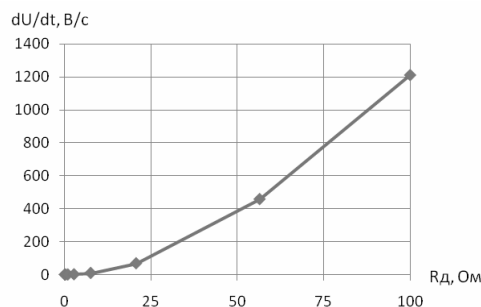


Рис. 6. Скорость изменения напряжения на дуге при изменении значения эквивалентного сопротивления столба дуги по экспоненциальному закону

Из приведенного анализа следует, что надежность повторного зажигания и устойчивого горения электрической дуги зависит от согласования динамических свойств источника питания и столба дуги. Если динамические свойства столба дуги, характеризующиеся ее постоянной времени, можно считать постоянными, т. к. они определяются процессами его деионизации, то на динамические свойства источника питания можно оказывать определенное влияние. В этой связи считаем целесообразным применение подмагничивания системы, использование генераторов импульсов и искажение формы выходного напряжения сварочного трансформатора.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Залесский А.М.* Электрическая дуга отключения. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
2. *Патон Б.Е., Лебедев В.К.* Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. – М.: Машиностроение, 1966.
3. *Мякишев В.М.* Сварочный трансформатор с насыщающимся участком магнитопровода. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 171 с.
4. *Лесков Г.И.* Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970.
5. *Мякишев В.М., Жеваев М.С., Шишков Е.М.* Способ определения постоянной времени сварочной дуги // Электротехника. – №2. – 2009. – С. 20-23.

*Статья поступила в редакцию 24 октября 2011 г.*

UDC 621.3.082.13

#### ANALYSIS OF DYNAMIC PROCESS OF RE-EXCITATION OF THE WELDING ARC

*V.M. Myakishev, E.M. Shishkov*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*The dependence of the dynamic properties of the system «power source – welding arc» on the parameters of the welding circuit was analyzed. The rate of voltage change when current passing through zero was estimated.*

**Key words:** *welding arc, power source, recovery voltage, re-ignition, arcing stability.*

---

*Vladimir M. Myakishev – Associate professor.  
Evgeniy M. Shishkov – student.*