

УДК 621.311; 658.26; 621.791.752

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДУГОВОЙ НАГРУЗКИ

Черненко А.Н., Вахнина В.В.

ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», Тольятти,
e-mail: tchernenko83@gmail.com

Проведен анализ процессов дуговой сварки и дуговой плавки металла. Установлено, что общим нелинейным элементом, оказывающим наибольшее негативное влияние на систему электроснабжения является электрическая дуга. Показано, что процесс дуговой сварки и плавки металлов можно представить общим электротехнологическим контуром. Обоснована необходимость использования динамических ВАХ дуги, так как статические ВАХ дают связь между действующими значениями токов и напряжений для времени, намного превышающего длительность одного полупериода. Получена математическая модель для длинных электрических дуг. Разработана обобщенная структурная схема системы автоматического регулирования дуговой нагрузки и получена ее передаточная функция. Полученная обобщенная модель электротехнологического процесса обработки металла посредством электрической дуги позволяет оценить воздействие дуговой нагрузки (дуговой сварки и дуговой плавки) на систему электроснабжения.

Ключевые слова: математическая модель, электрическая дуга, система автоматического регулирования, дуговая сварка, дуговая плавка металла

SPECIAL ASPECTS OF NONLINEAR ARC LOAD SIMULATION

Chernenko A.N., Vakhnina V.V.

Togliatti State University, Togliatti, e-mail: tchernenko83@gmail.com

In the article is given the analysis of arc welding processes and arc melting metal. It was found that the overall non-linear element having the greatest negative impact on the electric power supply system is an electric arc. It is shown that the process of arc welding and melting of metals can be represented by a total circuit of electric processing equipment. The article validates the necessity of using dynamic CVC of the arc, because the static CVC provide a link between the actual value of the currents and voltages for the time, much longer than the duration of one half cycles. The mathematical model for long arcs was worked out. Was developed the generalized block diagram of automatic control system of a regulatory type for arc load and obtained its transfer function. Was obtained the generalized model of metal processing by an electric arc to evaluate the impact of arc load (arc welding and arc melting) on the electric power supply system.

Keywords: Mathematical model, electric arc, automatic control system of a regulatory type, arc welding, arc melting

На промышленных предприятиях широкое распространение получили электротехнологические процессы обработки металлов электрической дугой, такие как электродуговая сварка и плавка металлов.

Дуговые сталеплавильные печи используются для плавки шихты и получения качественных и легированных сталей, а также полупродуктов для агрегатов ковш-печь и машин непрерывного литья заготовок.

Дуговые процессы сварки стали основными при создании металлоконструкций различного назначения, они легко поддаются механизации и автоматизации [3].

Общим для процессов дуговой сварки и плавки металлов является наличие электротехнологического контура (сварочного или плавного) и электрической дуги. В общем случае схема цепи дуговой сварки или плавки может быть представлена в виде рис. 1.

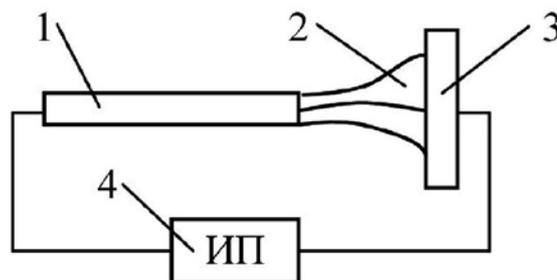


Рис. 1. Схема цепи дуговой сварки или плавки:

1 – электрод; 2 – электрическая дуга; 3 – свариваемый или расплавляемый металл; 4 – источник питания электрической дуги

Электрическая энергия, поступающая из системы электроснабжения, в электро-технологическом контуре преобразуется в форму, наиболее полно соответствующую каждому электротехнологическому процессу, затем энергия электрического дугового разряда преобразуется в термическое воздействие на объект обработки. Общим нелинейным элементом в цепи дуговой сварки или плавки металлов, оказывающим наибольшее негативное влияние на систему электроснабжения является электрическая дуга.

Искажение кривой напряжения, вызванное нелинейным характером вольт-амперной характеристики (ВАХ) дуги, неблагоприятно сказывается на работе всех видов электроприемников (ЭП) [2]. Наличие в сети высших гармоник тока и напряжения вызывает: дополнительные потери электроэнергии в сетях, трансформаторах и электрических машинах; ухудшение механических характеристик и КПД синхронных и асинхронных двигателей; ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов и кабелей; нарушение работы систем автоматики, телемеханики, связи, компьютерной техники и других устройств; недоучет потребляемой электроэнергии индукционными счетчиками электроэнергии; ухудшение коэффициента мощности ЭП; нарушение работы вентиляционных преобразователей и т.д.

Для анализа дуговых процессов на переменном токе необходимо пользоваться динамическими ВАХ дуги, так как статические ВАХ дают связь между действующими значениями токов и напряжений для времени, намного превышающего длительность одного полупериода.

Динамическую модель электрической дуги на макроуровне можно представить в виде дифференциальных уравнений в простых производных [1]. Электрическую проводимость дуги $1/R$ можно представить функцией, накопленной в дуге тепловой энергии W_T . Разница между подводимой к дуге мощностью и мощностью, отводимой от нее путем рассеивания, выражает изменение запаса энергии не только в тепловом, но и в магнитных полях дуги. В соответствии с этим можно записать:

$$\frac{1}{R} = f(W_T); \quad (1)$$

$$Q_D - Q_P = \frac{dW_T}{dt} + \frac{dW_M}{dt}, \quad (2)$$

где $\frac{1}{R} = \frac{I_D}{U_D}$ – электрическая проводимость дуги; $Q_D = 0,24U_D I_D$ – полная тепловая

мощность дуги; Q_P – мощность, рассеиваемая дугой в окружающее пространство;

$\frac{dW}{dt}$, $\frac{dW_M}{dt}$ – изменение запаса тепловой и магнитной энергии в дуге соответственно.

Выражения (1) и (2) позволяют получить описание динамики процессов в длинных дугах без учета процессов в приэлектродных областях:

$$L_M I_D \frac{dI_D}{dt} + \frac{f(W_T)}{f'(W_T)} \left(\frac{1}{I} \frac{dI_D}{dt} - \frac{1}{U_D} \frac{dU_D}{dt} \right) = Q_D - Q_P(I_D) \quad (3)$$

где L_M – индуктивность дуги.

Выражение (3) является нелинейным дифференциальным, поэтому его неудобно использовать при расчетах.

Выполненный анализ показал, что при рассмотрении процессов в локальной области при малых отклонениях силы тока $i_D(t)$ и напряжения дуги $u_D(t)$ уравнение (3) можно линеаризовать:

$$L_0 \frac{di_D}{dt} + Q_D \left(R_s \frac{di_D}{dt} - \frac{du_D}{dt} \right) = u_D - R_d i_D, \quad (4)$$

где L_0 – индуктивность дуги в рабочей точке при $I_D = I_0$;

$$Q_D = \frac{f(W_{T0})}{f'(W_{T0}) Q_{P0}} -$$

тепловая постоянная времени дуги; Q_{P0} – мощность, рассеиваемая дугой в окружающее пространство, при $I_D = I_0$;

$R_s = \frac{U_0}{I_0}$ – статическое сопротивление дуги; $R_d = \frac{dU_D}{dI_D}$ – динамическое сопротивление

дуги при $I_D = I_0$; U_0 , I_0 – заданные параметры режима сварки или плавки (напряжение и сила тока дуги).

В электротехнологическом контуре в процессе сварки или плавки металла появляются возмущения, которые нарушают равновесие системы. К ним можно отнести изменение длины дуги, короткие замыкания дугового промежутка, изменение напряжения питающей сети, изменение скорости подачи электрода и т.д.

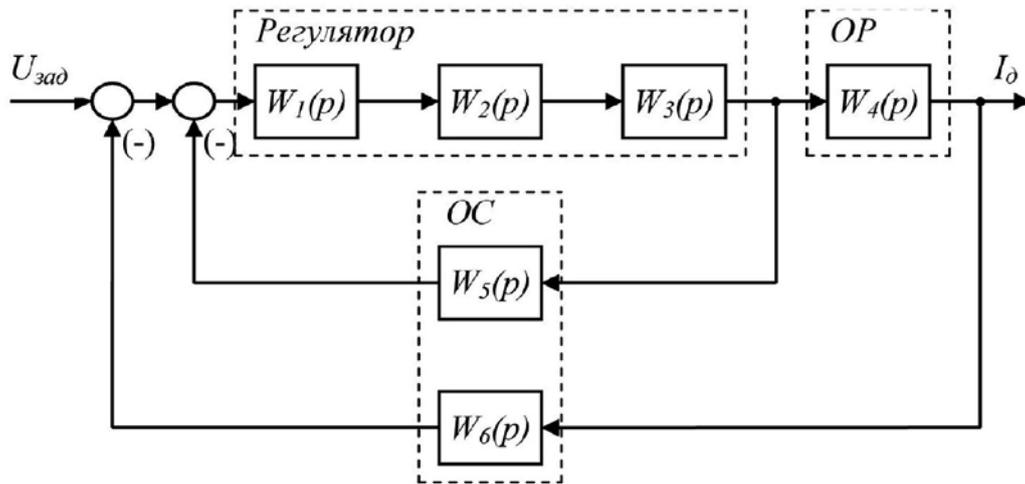


Рис. 2. Обобщенная структурная схема САР напряжения дуги при дуговой сварке и плавке

Для нейтрализации возникающих возмущений в электротехнологическом контуре служит система автоматического регулирования режима сварки или плавки. Поскольку, нелинейным элементом в схеме замещения цепи дуговой сварки и плавки является электрическая дуга, то она выступает объектом регулирования (ОР) в системе автоматического регулирования (САР) электрическим режимом при обработке металлов электрической дугой.

Общими задачами САР являются: противодействие возмущениям, компенсация или ослабление их вырабатываемыми встречными регулирующими воздействиями, обеспечивающими заданное на каждый момент времени состояние ОР.

Разнообразные САР установок дуговой сварки и плавки металлов отличаются функ-

циональными возможностями, принципами построения, конструктивной реализацией, но по функциональному назначению могут быть сведены в обобщенную структурную схему комбинированной САР, приведенную на рис. 2.

В обобщенную структурную схему САР дуговой нагрузки входят: регулятор, представленный передаточными функциями измерителей $W_1(p)$, усилителей $W_2(p)$ и исполнительных механизмов $W_3(p)$; объект регулирования, представленный передаточной функцией объекта регулирования $W_4(p)$; обратные связи, представленные передаточными функциями корректирующего звена обратной связи регулятора $W_5(p)$ и датчиков процесса $W_6(p)$.

С учётом рис. 2 передаточная функция САР может быть описана выражением:

$$W_{САР}(p) = \frac{W_{РЕГ}(p) \cdot W_{ОР}(p)}{1 + W_{РЕГ}(p) [W_{ОР}(p) \cdot W_6(p) + W_5(p)]}; \quad (5)$$

$$W_{РЕГ}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p);$$

$$W_{ОР}(p) = W_4(p),$$

где $W_{РЕГ}(p)$ – передаточная функция автоматического регулятора; $W_{ОР}(p)$ – передаточная функция объекта регулирования.

Все элементы структурной схемы представлены своими передаточными функциями $W_i(p)$, что позволяет рассмотреть спектральные характеристики ЭТК с учетом влияния системы электроснабжения.

Полученная обобщенная модель электротехнологического процесса обработки металла посредством электрической дуги позволяет оценить воздействие дуговой нагрузки (дуговой сварки и дуговой плавки) на систему электроснабжения.

Список литературы

1. Гладков Э.А. Управление процессами оборудованием при сварке. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 430 с.
2. Управление качеством электроэнергии / Под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
3. Электротехнологические промышленные установки / Под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.