



ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ДУГИ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены установившиеся режимы в сварочной цепи при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитного газа. Предложен подход к оценке качества процесса саморегулирования дуги, основанный на применении метода коэффициентов ошибок.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся электрод, переходные и установившиеся процессы, точность саморегулирования

Эффективность алгоритмов управления роботизированной дуговой сваркой плавящимся электродом существенным образом зависит от того, насколько при их разработке учитывается характер динамических процессов, протекающих в сварочном контуре. Особенность этих процессов обусловлена явлением саморегулирования дуги, которое, как известно, было обнаружено и всесторонне исследовано еще в начале 40-х годов прошлого столетия [1]. Хотя изучению указанного явления посвящено огромное количество работ, вопросы качества саморегулирования дуги все же недостаточно отражены в литературе. Можно указать лишь на недавно опубликованную работу [2], в которой использован интегральный критерий качества, позволяющий сравнивать близкие по структуре системы (лучшая из них имеет меньшую интегральную оценку). В работе [2] не рассмотрены вопросы точности в установившихся режимах, которая наряду со временем протекания переходного процесса является, как известно [3–7], одним из основных показателей качества процесса.

Между тем для анализа точности в установившихся режимах в условиях постоянных медленно изменяющихся внешних воздействий в свое время был предложен весьма изящный метод, описанный впервые, по-видимому, в работе [7] и получивший позже известность как метод коэффициентов ошибок. Этот метод позволяет довольно просто получить представление об установившихся процессах в линейных системах с обратной связью произвольной структуры непосредственно по коэффициентам передаточных функций в зависимости от внешних воздействий и их производных. В работе [8] показано, что упомянутый метод в принципе распространяется и на определенные классы нелинейных систем, в которых

нелинейные элементы не охвачены цепью обратной связи.

В настоящей работе ставится задача исследовать установившийся процесс в сварочной цепи при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитного газа и на основе метода коэффициентов ошибок построить оценку точности процесса саморегулирования дуги.

Рассмотрим дифференциальное уравнение

$$(T_e T_s D^2 + T_s D + 1)v_m = v_e - DH + \frac{1}{E} Du_s, \quad (1)$$

описывающее, согласно [9], динамические процессы, которые протекают в сварочной цепи.

В уравнение (1) введены следующие обозначения: $v_e = v_e(t)$ — скорость подачи плавящегося электрода относительно сопла горелки; $v_m = v_m(t)$ — скорость плавления электрода; $H = H(t)$ — расстояние между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны; $u_s = u_s(t)$ — напряжение на выходных клеммах источника сварочного тока; $E \equiv \partial u_a / \partial l$ — напряженность электрического поля в столбе дуги; $u_a = u_a(t)$ — напряжение на дуге; l — длина дуги; t — текущее время; $D = d/dt$ — оператор дифференцирования; T_e, T_s — постоянные времени:

$$T_e = \frac{L}{R_*}; \quad T_s = \frac{R_*}{EM} \quad (2)$$

Здесь L — индуктивность сварочного контура; $M \equiv \partial v_m / \partial i$ — крутизна характеристики плавления электрода при номинальных значениях сварочного тока i и вылета электрода

$$R_* = R + S_a - S_s, \quad (3)$$

где R — суммарное сопротивление подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке горелки; $S_a \equiv \partial u_a / \partial i$; $S_s \equiv \partial u_s / \partial i$ — крутизна вольт-амперных характеристик дуги и источника сварочного тока при номинальном значении сварочного тока i .



В качестве меры точности саморегулирования примем величину

$$\varepsilon(t) = v_e(t) - v_m(t), \quad (4)$$

представляющую собой отклонение скорости плавления электрода $v_m(t)$ от скорости подачи электрода $v_e(t)$.

На основании (4) и (1) можно записать

$$\begin{aligned} (T_e T_s D^2 + T_s D + 1)\varepsilon(t) = \\ = (T_e T_s D^2 + T_s D)v_e(t) + DH(t) - \frac{1}{E}Du_s(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Применив к (5) преобразование Лапласа, получим

$$\varepsilon(p) = W_1(p)v_e(p) + W_2(p)H(p) - W_3(p)u_s(p), \quad (6)$$

где p — комплексная переменная; $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$ — передаточные функции:

$$\begin{aligned} W_1(p) = \frac{T_e T_s p^2 + T_s p}{T_e T_s p^2 + T_s p + 1}; \quad W_2(p) = \frac{p}{T_e T_s p^2 + T_s p + 1}; \\ W_3(p) = \frac{E^{-1}p}{T_e T_s p^2 + T_s p + 1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку передаточные функции $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$ не имеют полюсов в начале координат, то, согласно [7], они могут быть разложены в степенные ряды относительно p . Следовательно, установившееся отклонение $\varepsilon_\infty(t)$ по каждому входному воздействию $v_e(t)$, $H(t)$, $u_s(t)$ можно представить как сумму соответствующих разложений

$$\varepsilon_\infty(t) = \varepsilon_{1\infty}(t) + \varepsilon_{2\infty}(t) + \varepsilon_{3\infty}(t), \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1\infty}(t) = A_0 v_e(t) + A_1 Dv_e(t) + A_2 D^2 v_e(t) + \dots; \\ \varepsilon_{2\infty}(t) = B_0 H(t) + B_1 DH(t) + B_2 D^2 H(t) + \dots; \\ \varepsilon_{3\infty}(t) = C_0 u_s(t) + C_1 Du_s(t) + C_2 D^2 u_s(t) + \dots \end{aligned} \quad (9)$$

В этих выражениях

$$\begin{aligned} A_n = \frac{1}{n!} \left[\frac{d^n W_1}{dp^n} \right]_{p=0}; \quad B_n = \frac{1}{n!} \left[\frac{d^n W_2}{dp^n} \right]_{p=0}; \\ C_n = \frac{1}{n!} \left[\frac{d^n W_3}{dp^n} \right]_{p=0}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (10)$$

— постоянные коэффициенты.

Итак, подставив в разложения (9) найденные по формулам (10) коэффициенты A_n , B_n , C_n и просуммировав затем результат, согласно (8), получим оценку точности саморегулирования дуги $\varepsilon_\infty(t)$.

Если в выражениях (9) ограничиться, например, двумя первыми членами ряда, что вполне

приемлемо в нашем случае, то приближенная оценка точности $\varepsilon_\infty^*(t)$ примет достаточно простой вид, а именно

$$\varepsilon_\infty^*(t) = T_s Dv_e + DH - \frac{1}{E}Du_s. \quad (11)$$

Зная числовые значения параметров T_s и E , а также скорость изменения входных воздействий $v_e(t)$, $H(t)$, $u_s(t)$, по формуле (11) можно легко вычислить отклонение $\varepsilon_\infty^*(t)$, т. е. получить в каждом конкретном случае оценку точности саморегулирования дуги без проведения каких-либо дополнительных теоретических или экспериментальных исследований.

Из выражения (11) непосредственно видно, что если $v_e = \text{const}$, $H = \text{const}$, $u_s = \text{const}$, то отклонение $\varepsilon_\infty(t)$ в установившемся режиме равно нулю. Очевидно, что при $v_e(t) \neq \text{const}$ отклонение $\varepsilon_\infty(t)$ будет тем меньше, чем меньше постоянная времени T_s , зависящая, согласно (2), (3), от крутизны вольт-амперных характеристик дуги $S_a \equiv \partial u_a / \partial i$, источника сварочного тока $S_s \equiv \partial u_s / \partial i$, крутизны характеристики плавления электрода $M \equiv \partial v_m / \partial i$ и напряженности электрического поля в столбе дуги $E \equiv \partial u_d / \partial l$. Из (11), (2), (3) нетрудно увидеть, что, чем меньше $R_* = R + S_a - S_s$ и больше EM , тем меньше в установившемся режиме отклонение $\varepsilon_\infty(t)$, т. е. тем выше точность саморегулирования дуги.

Что касается времени переходного процесса τ , являющегося еще одной из основных характеристик качества саморегулирования дуги, то, поскольку в сварочном контуре $T_s \gg T_e$, это время можно оценить по простой формуле

$$\tau^* = T_s \ln(k), \quad (12)$$

где k — число, определяющее степень уменьшения начального отклонения ε_0 за искомое время τ , т. е. $k = \varepsilon_0 / \varepsilon(t)$.

Из формул (12), (2), (3), в частности, следует, что с уменьшением R_* и увеличением EM время переходного процесса τ уменьшается.

Таким образом, формулы (11) и (12) весьма удобны для числовой оценки качества процесса саморегулирования дуги, от которого в известной степени зависит и само качество дуговой сварки.

На рис. 1, 2 представлены результаты компьютерного моделирования процессов, описываемых дифференциальным уравнением (1). Взятые следующие числовые значения параметров сварочного контура и режима дуговой сварки: $L = 4 \cdot 10^{-4}$ Гн; $R = 0,015$ Ом; $E = 2$ В/мм; $M = 0,31$ мм/(А·с); $S_a = 0,005$ В/А.

Переходные и установившиеся процессы $\varepsilon(t)$, полученные при изменении скорости подачи элект-



трода $v_e(t)$ и постоянных значениях $H = 17$ мм, $u_s = 30$ В, показаны на рис. 1. Для простоты проверки формулы (11) закон изменения $v_e(t)$ задавали зависимостью

$$v_e(t) = \begin{cases} 45, & t < 0,5 \\ 45 + 20(t - 0,5), & t \geq 0,5 \end{cases} \text{ [мм/с].}$$

Сравнивая кривые 1 и 2 на рис. 1, видим, что точность саморегулирования дуги, характеризующая отклонением $\varepsilon(t)$, повышается при уменьшении крутизны S_s вольт-амперной характеристики источника сварочного тока.

На рис. 2 показан переходной процесс $\varepsilon(t)$, вызванный ступенчатым изменением расстояния $H(t)$ между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны:

$$H(t) = \begin{cases} 17, & t < 0,5 \\ 20, & t \geq 0,5 \end{cases} \text{ [мм].}$$

При этом задавали напряжение $u_s = 30$ В и скорость $v_e = 45$ мм/с.

Из рис. 2 видно, что время переходного процесса сокращается с уменьшением крутизны S_s вольт-амперной характеристики источника сварочного тока.

Чтобы проиллюстрировать эффективность применения формул (11) и (12) для числовой оценки качества саморегулирования дуги, проведем расчет по этим формулам установившегося отклонения $\varepsilon_{\infty}^*(t)$ и времени переходного процесса τ в рассмотренных выше случаях.

В случае линейного изменения скорости подачи электрода $v_e(t)$ (рис. 1)

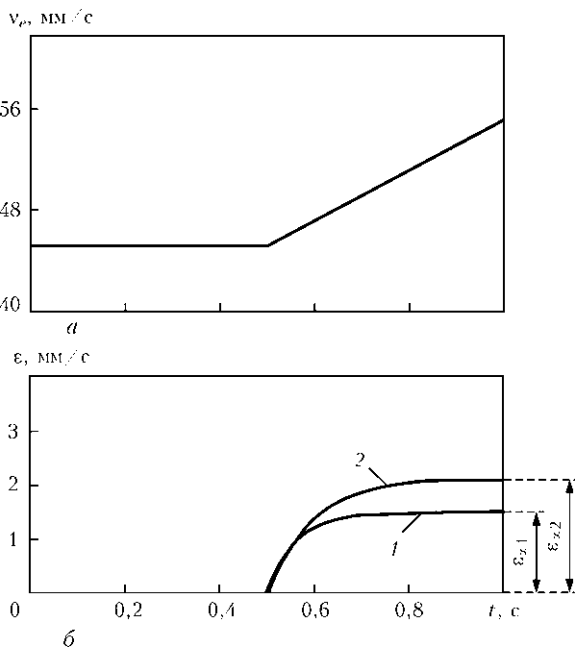


Рис. 1. Линейное изменение скорости v_e подачи электрода (а) и реакция отклонения $\varepsilon(t)$ на это изменение (б): 1 — $S_s = -0,025$; 2 — $-0,045$ В/А

$$\varepsilon_{\infty 1}^*(t) = T_s D v_e = \frac{0,015 + 0,005 + 0,025}{2 \cdot 0,31} \cdot 20 = 1,45 \text{ мм/с}$$

(кривая 1);

$$\varepsilon_{\infty 2}^*(t) = \frac{0,015 + 0,005 + 0,045}{2 \cdot 0,31} \cdot 20 = 2,1 \text{ мм/с (кривая 2).}$$

В случае ступенчатого изменения расстояния $H(t)$ между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны (рис. 2)

$$\tau_1^* = T_s \ln(k) = \frac{0,015 + 0,005 + 0,015}{2 \cdot 0,31} \cdot 3 = 0,17 \text{ с (кривая 1);}$$

$$\tau_2^* = \frac{0,015 + 0,005 + 0,045}{2 \cdot 0,31} \cdot 3 = 0,31 \text{ с (кривая 2).}$$

Сравнивая значения ε_{∞}^* и τ^* , вычисленные по формулам (11) и (12), с соответствующими значениями ε_{∞} и τ , полученными при моделировании (рис. 1, 2), $\varepsilon_{\infty 1}(t) = 1,45$ мм/с, $\varepsilon_{\infty 2}(t) = 2,09$ мм/с, $\tau_1 = 0,16$ с, $\tau_2 = 0,32$ с, нетрудно убедиться, что они практически совпадают.

Таким образом, компьютерное моделирование и приведенные расчеты показывают, что предложенные в настоящей работе оценки (11) и (12) позволяют получить четкое представление о точности и времени переходных процессов саморегулирования дуги. Зная параметры сварочной це-

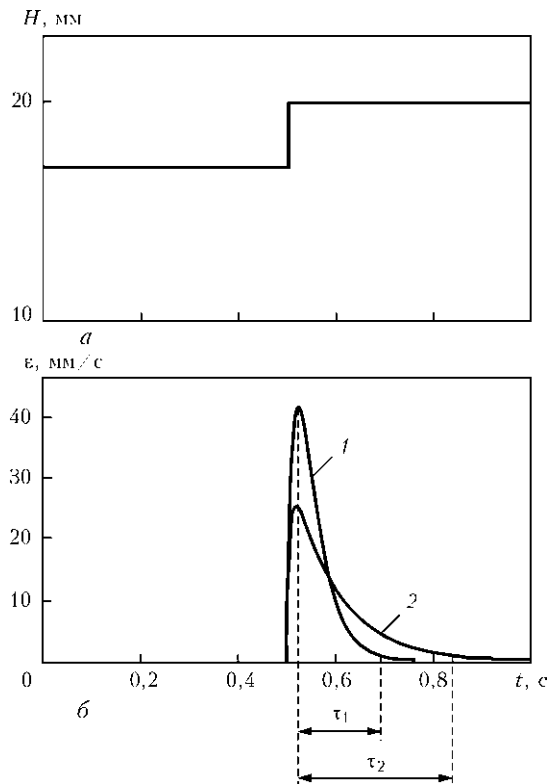


Рис. 2. Ступенчатое изменение расстояния H между мундштуком и сварочной ванной (а) и реакция отклонения $\varepsilon(t)$ на это изменение (б): 1 — $S_s = -0,015$; 2 — $-0,045$ В/А



пи, по формулам (11), (12) легко рассчитать числовые значения ε_{∞}^* и τ^* . Более того, располагая указанными формулами, путем выбора определенных соотношений между параметрами сварочной цепи можно обеспечить желаемые показатели качества саморегулирования дуги. Такая необходимость, в частности, возникает при использовании импульсных способов дуговой сварки [10].

Оценки (11) и (12) были использованы нами в [11] при разработке адаптивного дугового сенсора Arc Sensor для корректирующего управления роботизированной дуговой сваркой.

1. Патон Б. Е. Избранные труды. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2008. — 893 с.
2. Дюргеров Н. Г. Интегральный критерий качества саморегулирования сварочной дуги // Свароч. пр-во. — 2001. — № 8. — С. 8–10.
3. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. — М.: Наука, 1987. — 256 с.

4. Кинг Л. Г. Снижение установившейся динамической ошибки в замкнутых следящих системах // Прикл. механика и машиностроение. — 1954. — № 2. — С. 3–14.
5. Лукас В. А. Теория автоматического управления. — М.: Недра, 1990. — 416 с.
6. Туманов М. П. Теория управления. Теория линейных систем автоматического управления. — М.: МГИЭМ, 2005. — 80 с.
7. Теория следящих систем / Под ред. Х. Джеймса и др. — М.: Изд-во иностр. лит., 1951. — 484 с.
8. Цыбулькин Г. А. Анализ установившихся режимов некоторых классов нелинейных динамических систем на основе процедур рекуррентного оценивания // Кибернетика и вычисл. техника. — 1994. — Вып. 101. — С. 74–80.
9. Цыбулькин Г. А. Стабилизация скорости плавления электрода при роботизированной дуговой сварке // Автомат. сварка. — 2008. — № 12. — С. 13–16.
10. Разработка высокоэффективных способов дуговой сварки и их применение / Н. Кидзи, К. Кобаяси, Д. Исии, Х. Ямаока // Там же. — 2003. — № 10/11. — С. 59–63.
11. Цыбулькин Г. А. Робастный цифровой сенсор для дуговой сварки // Там же. — 2001. — № 11. — С. 55–56.

Steady-state modes in the welding circuit during gas metal arc welding are considered. An approach is offered to evaluate quality of the self-adjusting arc process based on the use of the error index method.

Поступила в редакцию 26.06.2009

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНОГО, РЕСУРСНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА

Промышленная конференция + блиц-выставка

18–22 февраля 2010

Славское, Карпаты

В рамках конференции состоятся семинары:

- ◆ Оборудование. Инструменты. Оснастка. Перспективные металлические и неметаллические материалы. Технологии. Наноматериалы и нанотехнологии. Научный руководитель — Коваленко В. С., НТУУ «КПИ», г. Киев
- ◆ Современные технологии ремонтно-восстановительных работ в промышленности. Научный руководитель — Лобанов Л. М., ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев
- ◆ Перспективы развития автодорожной отрасли. Строительные материалы. Научный руководитель — Богомолов В. А., Харьковский НАДУ (ХАДИ)
- ◆ Теоретические и прикладные проблемы трибологии. Защита материалов от коррозии. Научные руководители — Похмурский В. И., Широков В. В., ФМИ НАН Украины, г. Львов
- ◆ Горнодобывающая промышленность: технология, оборудование, безопасность и экология. Научные руководители — Красник В. Г., МУП, Кулиш В. А., УкрНИИпроект, г. Киев

Круглый стол:

- ◆ Приборы неразрушающего контроля и средства обеспечения надежности и безопасности в отраслях промышленности в транспорте. Научный руководитель — Духовский А. Ю., директор НПП «ИНТРОН-СЭТ», г. Донецк

**Контакты: тел./факс: +38(044) 573-30-40,
моб.: +38-067-708-93-95
E-mail: office@conference.kiev.ua,
www.conference.kiev.ua**