

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ С САМОРЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

При автоматизации дуговой сварки плавящимся электродом необходимо иметь ясное представление о структуре системы саморегулирования скорости плавления электрода. В данной работе на основе аналитического описания динамических процессов, протекающих в сварочном контуре, построена общая структура этой системы. Простой структурный анализ позволяет легко получить необходимые характеристики системы с саморегулированием, включая точность в установившемся режиме и время отработки возмущающих воздействий. Предложены критерии, позволяющие выбирать из области допустимых значений параметров сварочного процесса те из них, которые обеспечивают желаемое быстродействие системы саморегулирования. Приведены результаты сравнения оценок быстродействия, полученных с помощью этих критериев, с результатами компьютерного моделирования. Библиогр. 14, рис. 5.

Ключевые слова: роботизированная дуговая сварка, плавящийся электрод, структура системы саморегулирования, оценки точности и быстродействия системы

Известен широкий класс биосистем, осуществляющих саморегуляцию (гомеостаз) процессов в живых организмах, структуры которых «синтезированы» самой природой в ходе длительной эволюции. Накоплен огромный фактический материал, описывающий различные проявления гомеостаза [1, 2]. В то же время вопросы, относящиеся к построению самой структуры таких систем, слабо освещены в литературе. Основная проблема здесь состоит в том, что выделение из общей структуры отдельных подструктур, выполняющих вполне определенные функции гомеостаза и установление функциональных связей между этими подструктурами, оказалось весьма трудной задачей.

Сходная ситуация складывается при изучении одной из уникальных технических систем управления, широко используемой в сварочной технологии, системы саморегулирования дуги [3–6], точнее говоря, саморегулирования скорости плавления электрода (СПЭ) при дуговой сварке или наплавке в среде защитного газа. Как и в системах гомеостатического типа, в СПЭ существует некоторая неопределенность относительно ее структуры и отдельных элементов, выполняющих те или иные функции саморегулирования. Тем не менее, при роботизации дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа необходимо иметь четкое представление о структуре СПЭ и ее параметрах.

Следует заметить, что вопросы, связанные с построением структуры СПЭ, рассматривались и ранее, но структурные схемы были излишне громоздкими, а потому мало пригодными для прак-

тического использования. В данной работе ставилась задача синтеза «свернутой» легко обозримой структуры СПЭ на основе аналитического описания хорошо наблюдаемых динамических процессов, протекающих в сварочном контуре этой системы.

Построение структурной схемы СПЭ. На рис. 1 изображена принципиальная схема сварочного контура СПЭ. На этой схеме и в дальнейшем изложении $u_s = u_s(i, t)$ — напряжение, поступающее на вход контура от источника сварочного тока; $v_e = v_e(t)$ — скорость подачи электрода относительно торца токоподводящего мундштука; $H = H(t)$ — расстояние между торцом мундштука и свариваемым изделием; $h = h(t)$ — вылет электрода; $l = l(t)$ — длина дуги; $u_a = u_a(l, i)$ напряжение на дуге; $i = i(t)$ — сварочный ток.

Обозначим через R суммарное электрическое сопротивление подводящих проводов, скользящего контакта в мундштуке горелки, вылета электрода и свариваемого изделия, входящего

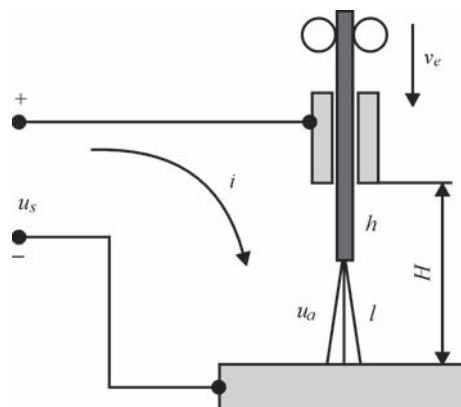


Рис. 1. Схема сварочного контура

в сварочный контур, а через L — индуктивность сварочного контура. Дифференциальное уравнение контура с учетом R и L запишем в виде

$$L \frac{di}{dt} + Ri = u_s(i, t) - u_a(l, i). \quad (1)$$

Функции $u_s(i, t)$ и $u_a = u_a(l, i)$ в рабочем диапазоне сварочных токов будем полагать непрерывными и дифференцируемыми по своим аргументам, а сами аргументы — непрерывными и ограниченными.

Скорость подачи электрода $v_e(t)$ и скорость его плавления $v_m(t)$ связаны с текущим значением вылета электрода $h(t)$ уравнением

$$h = h_0 + \int_0^t (v_e - v_m) dt, \quad (2)$$

в котором h_0 — начальное значение вылета.

Зависимость $v_m(t)$ от $i(t)$, согласно работам [5, 6], запишем в виде

$$v_m(t) = Mi, \quad (3)$$

где M — параметр, характеризующий электрические, теплофизические и геометрические свойства плавящегося электрода.

Систему уравнений (1)–(3) дополним равенством

$$h + l = H \quad (4)$$

и продифференцируем (1), (2) и (4) по времени t . Исключив затем из образовавшихся уравнений промежуточные переменные u_a , i , h и l , придем к одному уравнению относительно переменной v_m :

$$a \frac{d^2 v_m}{dt^2} + b \frac{dv_m}{dt} + v_m = v_e + \frac{dg}{dt}. \quad (5)$$

В этом уравнении введены следующие обозначения:

$$a = \frac{L}{EM}, \quad b = \frac{R}{EM}, \quad g = \frac{u_s}{E} - H, \quad (6)$$

где $E = \partial u_a / \partial l$ — напряженность электрического поля в столбе дуги; R_w — общее сопротивление сварочного контура:

$$R_w = R + S_a + R_s.$$

Здесь $S_a = \partial u_a / \partial i$, $R_s = \partial u_s / \partial i$ — тангенсы углов наклона статических вольт-амперных характеристик дуги и источника сварочного тока в рабочей точке сварки.

Дифференциальное уравнение (5) представляет собой математическую модель, связывающую скорость плавления электрода $v_m(t)$ и ее производные со скоростью подачи $v_e(t)$ и возмущениями du_s/dt и dH/dt . Запишем это уравнение в операторной форме

$$A(p)v_m(t) = v_e(t) + B(p)g(t), \quad (7)$$

где

$$A(p) = ap^2 + bp + 1; \quad B(p) = p; \quad \left(p \equiv \frac{d}{dt} \right),$$

и введем в рассмотрение уравнение рассогласования

$$\varepsilon(t) = v_e(t) + B(p)g(t) - v_m(t). \quad (8)$$

С уравнениями (7) и (8) сопоставим структурную схему (рис. 2). На этой схеме функция

$$W(p) = \frac{K}{p(Tp + 1)} \quad (9)$$

является передаточной функцией разомкнутой части системы, а через K и T в выражении (9) обозначены соотношения

$$K = \frac{1}{b} = \frac{EM}{R_w}, \quad T = \frac{a}{b} = \frac{L}{R_w}. \quad (10)$$

Анализ структуры СПЭ. Как видно из рис. 2, СПЭ представляет собой замкнутую систему с жесткой отрицательной обратной связью по скорости плавления электрода $v_m(t)$. В качестве входных воздействий выступают $v_e(t)$ и $g(t)$. Рассогласование $\varepsilon(t)$ по существу управляет скоростью плавления электрода $v_m(t)$ через посредство передаточной функции $W(p)$.

Стандартный вид структурной схемы СПЭ позволяет при ее анализе воспользоваться результатами теории систем автоматического управления. В частности, только по наличию сомножителя p в знаменателе передаточной функции (9), согласно работе [7], можно сразу констатировать, что СПЭ обладает астатизмом первого порядка по отношению к воздействиям $v_e(t)$ и $g(t)$. Это значит, что когда $v_e(t) = v_{e0} = \text{const}$ и $g(t) = g_0 = \text{const}$, установившаяся ошибка $\varepsilon_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t)$ равна нулю. Следовательно, в установившемся режиме, в соответствии с выражением (8), выполняется равенство $v_m(\infty) = v_e$, которое означает, что СПЭ обеспечивает стабилизацию скорости плавления электрода $v_m(t)$ на заданном уровне v_{e0} .

Если же $v_e(t) \neq \text{const}$, а изменяется по какому-либо закону, то и $v_m(t)$ будет изменяться по такому же закону, т. е. скорость $v_m(t)$ будет как бы «следить» за скоростью $v_e(t)$. В таком случае СПЭ, согласно терминологии работы [8], представляет собой следящую систему. В частности, если $v_e =$

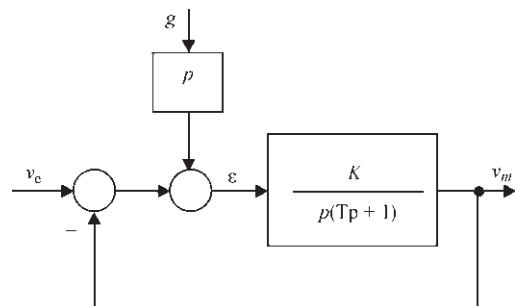


Рис. 2. Структурная схема СПЭ

$= v_{e0} + \Delta v_e \sin \omega t$, где Δv_e — амплитуда, а ω — угловая частота, то после окончания переходного процесса скорость $v_m(t)$ будет изменяться следующим образом:

$$v_m(t) = v_{e0} + \Delta v_m(\omega) \sin [\omega t + \varphi(\omega)].$$

Здесь нужно иметь в виду, что амплитуда $\Delta v_m(\omega)$ и фазовый сдвиг $\varphi(\omega)$ зависят от ω и, как показано в работе [9], $\Delta v_m(\omega) \rightarrow 0$ при $\omega \rightarrow \infty$. Следовательно, частоту ω , с которой предполагается совершать колебательное движение $v_e(t)$, нужно выбирать из условия $\omega < \omega_c$, где ω_c — граничная частота полосы пропускания СПЭ. Что касается случая, когда $g(t) \neq \text{const}$, то при $v_e(t) = v_{e0}$ скорость $v_m(t)$, как видно из структурной схемы СПЭ, будет «следить» за изменением dg/dt . Это замечательное свойство широко используется в импульсно-дуговых технологиях сварки [10–13].

Обратимся теперь к вопросу о быстродействии СПЭ. Рассмотрим характерный случай, когда на величину R_w налагается ограничение при подводной дуговой сварке. Но имеется возможность изменять в некоторых пределах значения параметров L , E и M . В качестве меры быстроты протекания переходных процессов в этом случае может служить обобщенная оценка числового значения коэффициентов характеристического уравнения $T\lambda^2 + \lambda + K = 0$, соответствующего дифференциальному уравнению (5):

$$\Omega = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2} = \sqrt{\frac{K}{T}}. \quad (11)$$

В этом выражении λ_1, λ_2 — корни уравнения $T\lambda^2 + \lambda + K = 0$. Оценку Ω в теории управления называют среднеквадратичным корнем. Увеличение Ω в β раз приводит к уменьшению в β раз времени затухания переходного процесса.

Учитывая соотношения (10), приведем формулу (11) к виду

$$\Omega = \sqrt{\frac{EM}{L}}. \quad (12)$$

Из этой формулы сразу видно, что для повышения быстродействия СПЭ нужно уменьшать L

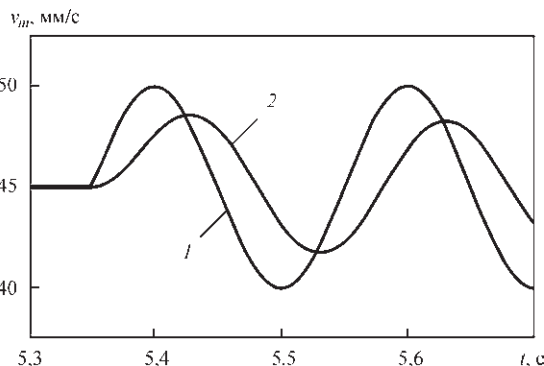


Рис. 3. Реакция скорости плавления электрода $v_m(t)$ на гармоническое воздействие $v_e(t) = 45 + 5 \sin(31,4t)$; описание кривых 1, 2 см. в тексте

и увеличивать E и M . Диапазон допустимых значений L , согласно работе [4], достаточно широк ($10^{-3} \dots 10^{-4}$ Гн). Значения параметра E зависят, как известно, от состава защитного газа, используемого при дуговой сварке. При сварке в CO_2 параметр E принимает значения в диапазоне от 1,7 до 3,3 В/мм, а при сварке в аргоне — от 0,6 до 1,3 В/мм. Что касается параметра M , то его значение сильно зависит от диаметра электрода d . Эта зависимость, согласно работе [14], имеет следующий вид: $M = \psi/d^2$, где ψ — коэффициент, характеризующий теплофизические свойства материала электрода (плотность, температуры плавления и кипения, удельную теплоемкость и работу выхода электрона). Следовательно, с уменьшением d значение параметра M резко увеличивается. Таким образом, имеется принципиальная возможность для обеспечения приемлемого быстродействия СПЭ.

На рис. 3–5 приведены результаты компьютерного моделирования процессов в СПЭ, полученные при следующих значениях параметров сварочного контура и режима роботизированной дуговой сварки: $u_s = 30$ В; $H = 17$ мм; $R_1 = 0,025$ Ом; $R_s = 0,01$ В/А; $S_a = 0,005$ В/А; $L_1 = 0,0001$ Гн; $L_2 = 0,001$ Гн.

Моделировалась дуговая сварка в аргоне ($E_1 = 1,7$ В/мм) и в CO_2 ($E_2 = 3$ В/мм) электродами двух различных диаметров: $d_1 = 1,2$ мм ($M_1 = 0,37$ мм/(с·А)) и $d_2 = 0,8$ мм ($M_2 = 0,82$ мм/(с·А)). В качестве типовых воздействий использовались функциональные зависимости, описываемые следующими аналитическими выражениями:

$$v_e(t) = \begin{cases} 45, & t < t_*, \\ 45 + 5 \sin \omega t, & t \geq t_*, \end{cases} \quad (13)$$

$$v_e(t) = \begin{cases} 45, & t < t_*, \\ 60, & t \geq t_*, \end{cases} \quad (14)$$

где $t_* = 5,35$ с.

На рис. 3, 4 цифрой 1 отмечены графики функции (13), а цифрой 2 — отмечена реакция $v_m(t)$ на воздействие $v_e(t)$, выраженное этой функцией. При-

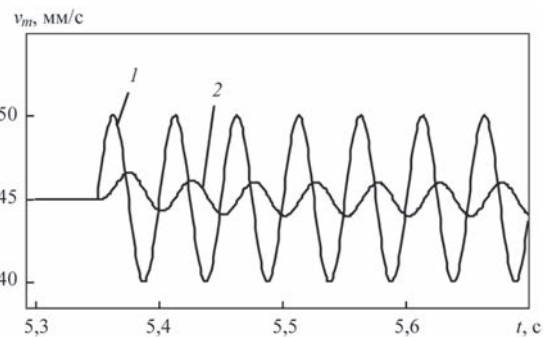


Рис. 4. Реакция скорости плавления электрода $v_m(t)$ на гармоническое воздействие $v_e(t) = 45 + 5 \sin(125,6t)$; описание кривых 1, 2 см. в тексте

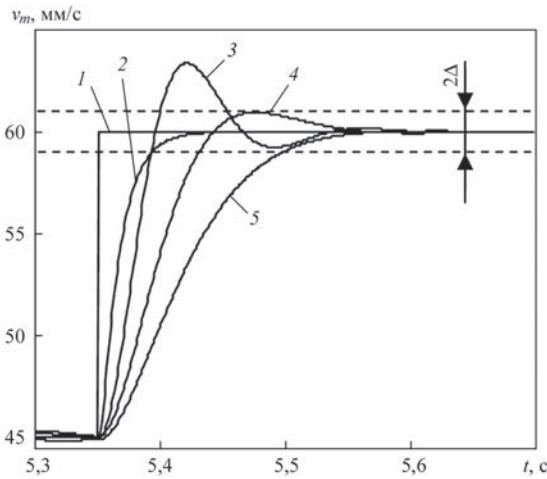


Рис. 5. Реакция скорости плавления электрода $v_m(t)$ на скачок скорости его подачи $v_e(t)$ при различных сочетаниях параметров L, E и M

чем на рис. 3 график $v_e(t)$ построен при $\omega = 31,4 \text{ c}^{-1}$, а на рис. 4 — при $\omega = 125,6 \text{ c}^{-1}$. Из этих рисунков видно, что, как и следовало ожидать, скорость $v_m(t)$ в установившемся режиме изменяется по тому же закону, что и скорость $v_e(t)$, а ее амплитуда уменьшается с увеличением частоты ω .

На рис. 5 цифрой 1 отмечен график функции (14), а цифрами (2–5) — отмечена реакция $v_m(t)$ на воздействие $v_e(t)$ при различных сочетаниях параметров L, E и M : кривая 2 получена при L_1, E_2, M_2 ; кривая 3 — при L_2, E_2, M_2 ; кривая 4 — при L_2, E_2, M_1 ; кривая 5 — при L_2, E_1, M_1 .

Из этого рисунка видно, что время регулирования τ_c (время, по истечении которого разность $|v_m(t) - v_{e0}|$ не превышает некоторой наперед заданной величины Δ) существенно зависит от сочетания параметров, фигурирующих в формуле (12). Параметры τ_c и Ω связаны соотношением

$$\tau_c = \frac{4,8}{\Omega} \quad (15)$$

Следовательно, вычислив по формуле (12) значения

$$\Omega_2 = \sqrt{\frac{E_2 M_2}{L_1}} = 156,8 \text{ c}^{-1}, \quad \Omega_3 = \sqrt{\frac{E_2 M_2}{L_2}} = 49,6 \text{ c}^{-1},$$

$$\Omega_4 = \sqrt{\frac{E_2 M_1}{L_2}} = 33,3 \text{ c}^{-1}, \quad \Omega_5 = \sqrt{\frac{E_1 M_1}{L_2}} = 25,1 \text{ c}^{-1}$$

и подставив их последовательно в формулу (15), получим

$$\begin{aligned} \tau_{c2} &= 0,031 \text{ c}, \quad \tau_{c3} = 0,097 \text{ c}, \\ \tau_{c4} &= 0,144 \text{ c}, \quad \tau_{c5} = 0,191 \text{ c}. \end{aligned} \quad (16)$$

Сравнение расчетных значений (16) с результатами моделирования, приведенными на рис. 5, обнаруживает хорошее их совпадение. Таким образом, оценку быстродействия Ω или времени ре-

гулирования τ_c можно легко получить, не решая дифференциальное уравнение (5), а используя простые соотношения (12) и (15).

Выводы

1. На основе аналитического описания хорошо наблюдаемых динамических процессов, протекающих в сварочном контуре, построена структура СПЭ, анализ которой позволяет достаточно просто получить необходимое представление об основных свойствах СПЭ. В частности, из структурной схемы СПЭ сразу видно, что она обладает астатизмом первого порядка и в зависимости от закона изменения $v_e(t)$ может обеспечивать или стабилизацию скорости плавления электрода $v_m(t)$ на заданном уровне v_{e0} , или «слежение» за изменениями $v_e(t)$ или dg/dt .

2. Критерий Ω , используемый в данном исследовании, позволяет также просто (без проведения предварительного моделирования или специальных экспериментов) выбрать из допустимых значений параметров E, M и L именно те из них, которые обеспечивают необходимое быстродействие СПЭ.

Список литературы

- Новосельцев В. Н. (1978) *Теория управления и биосистем. Анализ сохранительных свойств*. Москва, Наука.
- Албегов Е. В., Бутенко Д. В., Бутенко Л. Н. (2014) *Гомеостатика: концептуальное моделирование структурированных устойчивых систем*. Москва, Издательский дом Академии Естествознания.
- Патон Б. Е. (1952) Саморегулирование дуги при сварке плавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, **1**, 38–45.
- Лесков Г. И. (1970) *Электрическая сварочная дуга*. Москва, Машиностроение.
- Патон Б. Е., Лебедев В. К. (1966) *Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки*. Москва, Машиностроение.
- Pan J. (2003) *Arc welding control*. Woodhead Publishing Ltd.
- Дорф Р., Бишоп Р. (2002) *Современные системы управления*. Москва, Лаборатория базовых знаний.
- (1988) *Теория управления. Терминология*. Вып. 107. Москва, Наука.
- Цыбульский Г. А. (2005) Влияние частотных свойств сварочного контура на параметры тока при импульсно-дуговых процессах сварки. *Автоматическая сварка*, **10**, 11–15.
- Воропай Н. М., Илюшенко В. М., Ланкин Ю. Н. (1999) Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режимов (Обзор). *Там же*, **6**, 26–32.
- Патон Б. Е., Шейко П. П., Жерносеков А. М. и др. (2003) Стабилизация процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом. *Там же*, **8**, 3–6.
- Сараев Ю. Н. (2002) Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов. *Сварочное производство*, **1**, 4–11.
- Цыбульский Г. А. (2016) О влиянии параметров сварочной цепи на формирование импульсов сварочного тока. *Автоматическая сварка*, **9**, 15–19.
- Коринец И. Ф. (1995) Математическая модель плавления электродной проволоки при дуговой сварке. *Автоматическая сварка*, **10**, 39–43.

References

1. Novoseltsev, V.N. (1978) *Theory of control and biosystems. Analysis of conservation properties*. Moscow, Nauka.
2. Albegov, E.V., Butenko, D.V., Butenko, L.N. (2014) *Homeostatics: concept modeling of structured stable systems*. Moscow, Natural Sci. Acad.
3. Paton, B.E. (1952) Self-regulation in consumable electrode welding. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 38–45.
4. Leskov, G.I. (1970) *Electric welding arc*. Moscow, Mashinostroenie.
5. Paton, B.E., Lebedev, V.K. (1966) *Electric equipment for arc and slag welding*. Moscow, Mashinostroenie.
6. Pan, J. (2003) *Arc welding control*. Wood head Publish. LTD and CRC LLC.
7. Dorf, R., Bishop, R. (2002) *Modern control systems*. Moscow, Laboratory of basic knowledges.
8. (1988) *Theory of control. Terminology*, Issue 107. Moscow, Nauka.
9. Tsybulkin, G.A. (2005) Influence of frequency properties of the welding circuit on current parameters in pulsed-arc welding processes. *The Paton Welding J.*, **10**, 9–13.
10. Voropaj, N.M., Ilyushenko, V.M., Lankin, Yu.N. (1999) Peculiarities of pulsed-arc welding with synergic control of mode parameters (Review). *Avtomatich. Svarka*, **6**, 26–32.
11. Paton, B.E., Shejko, P.P., Zhernosekov, A.M. et al. (2003) Stabilization of the process of consumable electrode pulse-arc welding. *The Paton Welding J.*, **8**, 2–5.
12. Saraev, Yu.N. (2002) Adaptive pulsed-arc methods of mechanized welding in construction of main pipelines. *Svarochn. Proizvodstvo*, **1**, 4–11.
13. Tsybulkin, G.A. (2016) Effect of parameters of welding circuit on formation of welding current pulses. *The Paton Welding J.*, **9**, 14–17.
14. Korinets, I.F. (1995) Mathematical model of electrode wire melting in arc welding. *Avtomatich. Svarka*, **10**, 39–43.

Г. О. Цибулькін

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ З
САМОРЕГУЛЮВАННЯМ ШВИДКОСТІ
ПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДА

При автоматизації дугового зварювання плавким електродом необхідно мати чітке уявлення про структуру системи з саморегулюванням швидкості плавлення електрода. У даній ро-

боті на основі аналітичного опису динамічних процесів, що протікають в зварювальному контурі, побудована загальна структура цієї системи. Простий структурний аналіз дозволяє легко отримати необхідні характеристики системи саморегулювання, включаючи точність в усталеному режимі і час відпрацювання збурюючих впливів. Запропоновано критерії, що дозволяють вибирати з області допустимих значень параметрів зварювального процесу ті з них, які забезпечують бажану швидкодню системи саморегулювання. Наведено результати порівняння оцінок швидкодії, отриманих за допомогою цих критеріїв, з результатами комп'ютерного моделювання. Бібліогр. 14, рис. 5.

Ключові слова: роботизоване дугове зварювання, плавкий електрод, структура системи саморегулювання, оцінки точності і швидкодії системи

G.A. Tsybulkin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich str., 03680, Kiev-150, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

SYNTHESIS OF STRUCTURE OF THE SYSTEM
WITH SELF-REGULATING THE ELECTRODE
MELTING RATE

During automation of arc welding using consumable electrode, it is necessary to have a clear idea about the structure of the system with self-regulating the electrode melting rate. In this paper, based on the analytical description of dynamic processes occurring in the welding circuit, the general structure of this system was designed. The simple structural analysis allows easily obtaining the necessary characteristics of the self-regulating system, including accuracy in the steady mode and the time of optimizing the disturbing effects. The criteria were offered allowing the selection of those values from the range of admissible values of parameters of the welding process, which provide the desired quick response of the self-regulating system. The results of comparison of evaluation of quick response, obtained with the help of these criteria, with the results of computer simulation are presented. 14 Ref., 5 Figures.

Key words: robotic arc welding, consumable electrode, structure of the self-regulating system, evaluation of accuracy and quick response of the system

Поступила в редакцію 11.05.2017

**Науково-практична конференція
«СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА»**

22-23 листопада 2017 р.

Міжнародний виставковий центр, Київ

Тематика конференції:

- ◆ розвиток прогресивних зварювальних процесів;
- ◆ нові зварювальні матеріали та обладнання;
- ◆ проблеми і тенденції автоматизації зварювальних та споріднених процесів;
- ◆ впровадження прогресивних технологій при виготовленні та ремонті металоконструкцій;
- ◆ стандартизація та сертифікація в зварювальному виробництві;
- ◆ підготовка кадрів та організація конкурсів професійної майстерності;
- ◆ проблеми екології;
- ◆ розвиток міжнародного співробітництва.

Свої пропозиції та тези доповідей просимо направляти до 1 серпня: maksimov@paton.kiev.ua