

---

УДК 621.791.75.01

**Я. П. Лазоренко**, аспирант, **Ф. С. Клишар**  
Ин-т электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины  
(Украина, 03680, ГСП, Киев, 150, ул. Боженко, 11,  
тел.(044) 2712195, E-mail: esharovalov@paton.kiev.ua)

## **Синтез и моделирование адаптивного регулятора формирования валика шва при дуговой сварке плавящимся электродом**

*(Статью представил чл.-кор. НАН Украины В. В. Васильев)*

Рассмотрены синтез и моделирование в среде математического пакета MATLAB адаптивного регулятора для системы управления формированием валика шва в условиях дуговой сварки плавящимся электродом (МАГ-сварки) с замкнутым контуром обратной связи. Для расчета ошибки управления использованы специальные функциональные преобразователи, которые синтезированы на основе искусственных нейронных сетей, полученных обратным решением с использованием математической модели формирования шва.

Розглянуто синтез і моделювання в середовищі математичного пакету MATLAB адаптивного регулятора для системи управління формуванням валика шва в умовах дугового зварювання електродом, що плавиться (МАГ-зварювання) із замкнутим контуром зворотнього зв'язку. Для розрахунку помилки управління використано спеціальні функціональні перетворювачі, які синтезовано на основі штучних нейронних мереж, отриманих зворотнім рішенням з використанням математичної моделі формування шва.

*Ключевые слова: валик шва, МАГ-сварка, нейросетевой функциональный преобразователь, адаптивный регулятор.*

Внедрение автоматических систем управления (АСУ) формой валика сварного шва для дуговой сварки плавящимся электродом (МАГ-сварки) является актуальной задачей, так как дает возможность гарантированно получать заданные размеры выпуклости сварных швов с минимизированными допусками, несмотря на ненаблюдаемые возмущения, колебания параметров электрической сети и другие внешние воздействия. Исследователи отмечают, что традиционные технологии и оборудование для изготовления деталей, сборки и сварки конструкций себя исчерпали [1].

Перспективным направлением является адаптивное управление процессом дуговой сварки, однако запаздывание практических результатов обусловлено отсутствием математических моделей и алгоритмов управления. Работы [2—4], посвященные разработке автоматических регулято-

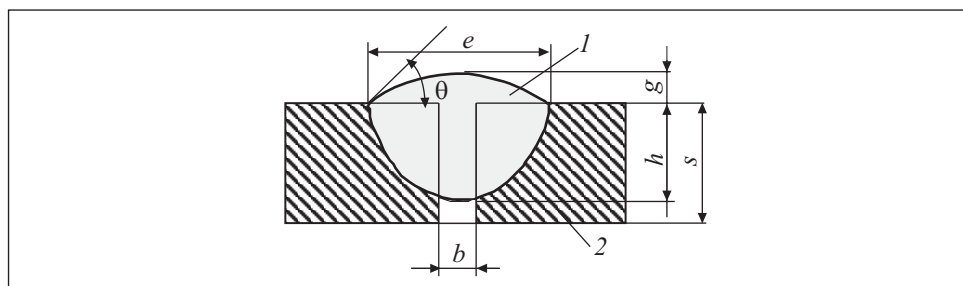


Рис. 1. Схема формирования сварного шва для стыкового соединения с зазором: 1 — сварной шов; 2 — изделие

ров и синтезу математических моделей различных процессов сварки на основе искусственных нейронных сетей, позволили значительно продвинуться в этом направлении. Однако задача разработки адаптивного регулятора для АСУ формированием валика шва в условиях МАГ-сварки в полной мере еще не решена.

Рассмотрим схему формирования сварного шва при МАГ-сварке стыковых соединений без разделки кромок в нижнем положении (рис. 1). Сварное соединение МАГ-сварки имеет следующие параметры: ширина  $e$ , высота валика  $g$ , глубина проплавления  $h$ , толщина изделия  $s$ , величина зазора  $b$ . Высоту валика называют усилением шва в случае выпуклости валика, и ослаблением шва — в случае, если поверхность шва имеет вогнутую форму. На практике представляет интерес параметр, называемый коэффициентом усиления валика,  $\Psi_y = g/e$ , который определяет угол сопряжения  $\theta$  наплавленного металла с основным металлом шва.

В качестве примера рассмотрим задачу управления формированием валика сварного шва при условии отсутствия зазора ( $b = 0$ ), постоянной скорости сварки ( $V_{св} = \text{const}$ ), известном диаметре присадочной проволоки  $d_e$  и неполном проплавлении изделия, т.е. в условиях формирования сварочной ванны на поверхности полубесконечного тела. Пусть расстояние между горелкой и изделием постоянно и соответствует условию устойчивого формирования валика шва. Площадь поперечного сечения валика при данных ограничениях однозначно определяется напряжением и током сварки (без учета разбрызгивания металла), однако коэффициент усиления валика в силу действия возмущений может отличаться от расчетного. В связи с этим актуальным является применение автоматического управления с замкнутой обратной связью.

В данном случае предлагается использовать лазерно-телевизионный триангуляционный сенсор (ЛТТС), описанный в работе [5]. Он устанавливается на сварочной горелке на определенном расстоянии сзади по ходу

сварки и формирует световой контур поперечного сечения валика, что дает возможность оценивать геометрические параметры сварного шва. Особенностью такого решения является наличие временного транспортного запаздывания на несколько секунд в контуре сигнала обратной связи. Следует также учесть, что в реальном сигнале ЛТТС присутствует шум, который может привести к неустойчивой работе автоматического регулятора.

Рассмотрим синтез адаптивного регулятора для АСУ формированием валика шва с транспортным запаздыванием в контуре обратной связи, воспользовавшись методикой, изложенной в работах [6, 7].

Назовем невязкой выражение  $\varepsilon [n] = \varepsilon (\mathbf{z} [n], \mathbf{z}^*, \mathbf{c} [n])$ , где  $\mathbf{z} [n]$  — вектор всех наблюдений, используемый для расчета вектора настраиваемых параметров  $\mathbf{c} [n]$ ;  $\mathbf{z}^*$  — вектор уставок (или задающих воздействий);  $n$  — номер шага алгоритма адаптации. В данном случае можно записать:

$$\varepsilon [n] = ((e^* - \hat{e} [n])(g^* - \hat{g} [n]))^T,$$

$$\mathbf{c} [n] = [Uw [n] Iw [n]]^T,$$

где  $e^*$  и  $g^*$  — уставки геометрических параметров валика;  $\hat{e} [n]$  и  $\hat{g} [n]$  — текущие оценки ширины и высоты валика;  $Uw [n]$  и  $Iw [n]$  — текущие средние значения напряжения и тока сварки, однозначно определяющие режим сварки.

Пусть качество адаптивного управления определяется средними потерями  $J (\mathbf{c}) = M \{\varepsilon^2 (\mathbf{z} [n], \mathbf{z}^*, \mathbf{c} [n])\}$ , которые требуется минимизировать. Тогда вектор

$$\nabla J (\mathbf{c}) = \left[ \frac{\partial J (\mathbf{c})}{\partial c_1} \dots \frac{\partial J (\mathbf{c})}{\partial c_{Nc}} \right]^T \quad (1)$$

представляет собой градиент средних потерь, где оператор

$$\nabla = \nabla_c = \left[ \frac{\partial}{\partial c_1} \dots \frac{\partial}{\partial c_{Nc}} \right]^T$$

является вектором-столбцом, а  $Nc$  — размерность вектора  $\mathbf{c}$  ( $Nc = 2$ ).

На основании (1), учитывая, что случайные величины  $\hat{e} [n]$  и  $\hat{g} [n]$  не являются стационарными, можно записать

$$\nabla J (\mathbf{c}) = [2(e^* - M \{\hat{e}\} [n]) \ 2(g^* - M \{\hat{g}\} [n])]^T,$$

где  $M \{\hat{e}\} [n]$  и  $M \{\hat{g}\} [n]$  — скользящие средние значения оценок  $\hat{e}$  и  $\hat{g}$ .

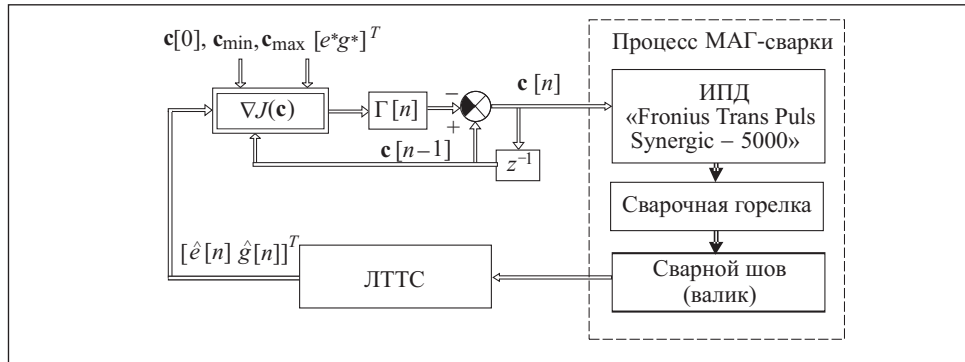


Рис. 2. Структурная схема АСУ формированием валика сварного шва:  $z^{-1}$  — элемент задержки на 1 такт

Нулевое значение  $\nabla J(\mathbf{c})$  обеспечивается следующим рекуррентным алгоритмом адаптивного управления:

$$\mathbf{c}[n] = \mathbf{c}[n-1] - \Gamma[n] \nabla J(\mathbf{c}),$$

$$\mathbf{c}_{\min} < \mathbf{c}[n] < \mathbf{c}_{\max},$$

$$\mathbf{c}[0] = \mathbf{c}_0,$$

где  $\mathbf{c}_{\min}, \mathbf{c}_{\max}$  — пределы изменения параметров настройки;  $\mathbf{c}_0$  — начальные условия;  $\Gamma$  — матрица усиления. Для градиентного метода стохастической аппроксимации матрица  $\Gamma[n]$  будет иметь следующий вид:

$$\Gamma[n] = \begin{bmatrix} K1\gamma[n] & 0 \\ 0 & K2\gamma[n] \end{bmatrix},$$

где  $K1, K2$  — коэффициенты усиления. Скалярный множитель  $\gamma[n] > 0$  должен удовлетворять условиям сходимости рекуррентного алгоритма:

$$\gamma[n] > 0, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \gamma[n] = \infty, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \gamma^2[n] < \infty.$$

Для улучшения сходимости примем  $\gamma[n] = 1/n$ . Далее будем рассматривать решение задачи адаптивного управления для АСУ МАГ-сваркой, структурная схема которой изображена на рис. 2.

В состав структурной схемы АСУ МАГ-сваркой кроме адаптивного регулятора входит ЛТТС, а также сварочное оборудование — источник питания дуги (ИПД) типа «Fronius Trans Puls Synergic-5000», механизм подачи типа «Fronius VR 2000», механизм перемещения сварочной горелки и блок охлаждения сварочной горелки типа «Fronius FK4000». Полу-

чаемый сварной валик обмеряется ЛТТС и сформированные оценки ширины и высоты валика в реальном масштабе времени поступают на вход адаптивного регулятора. Адаптивный регулятор вычисляет невязку  $\varepsilon [n]$  и формирует управления в виде вектора  $[Uw^C Iw^C]^T$  (напряжения и тока сварки), которые подаются на вход ИПД.

Рассмотрим задачу формирования вектора управлений  $[Uw^C Iw^C]^T$ . Поскольку решение данной задачи представляет собой достаточно объемный алгоритм, дадим схематическое описание разработанной методики. Предлагаемая методика содержит следующие шаги:

1. Синтез математической модели МАГ-сварки.
2. Проведение вычислительного эксперимента для формирования таблицы соответствия вход/выход.
3. Решение обратной задачи на основании результатов вычислительного эксперимента путем синтеза и обучения нейросетевых функциональных преобразователей (НФП).
4. Проверка адекватности полученных НФП.
5. Синтез узла вычисления невязки  $\varepsilon [n]$  на основе НФП.

Несмотря на упрощение задачи управления процессом МАГ-сварки, фактически сведение ее к задаче автоматизации процесса наплавки, синтез математической модели формирования валика при наплавке — задача не тривиальная. Наиболее строгим решением ее является использование феноменологической модели МАГ-сварки [8]. Однако в такой постановке она заслуживает самостоятельного научного исследования. В данном случае воспользуемся принципом достаточности и рассмотрим регрессионную модель МАГ-сварки [9], которая, несмотря на известные ограничения, позволяет при заданных условиях сварки реализовать вычислительный эксперимент. Кроме того, модель объекта управления дополнена инерционными звеньями первого порядка, что позволило имитировать динамику поведения процесса сварки [10].

Известная регрессионная модель сварки в углекислом газе представляет собой следующую систему уравнений:

$$h = -1,7 + 0,093 V_{cb} - 0,00325 V_{cb} Uw - 0,023 V_{cb} d_e + 0,00394 Uw^2 + 10^{-3} V_{\Pi} (17,7 d_e - 12,6 - 0,0477 V_{cb} ) + 1,8 b ; \quad (2)$$

$$e = \exp(-3,0 + 0,121 Uw - 0,034 V_{cb} + 3,33 d_e - 0,00166 Uw V_{cb} + 0,0136 V_{cb} d_e + 0,000427 V_{cb}^2 - 0,956 d_e^2 + 10^{-3} V_{\Pi} (7,0 + 0,022 V_{cb} - 2,8 d_e - 0,00561 V_{\Pi} )) ; \quad (3)$$

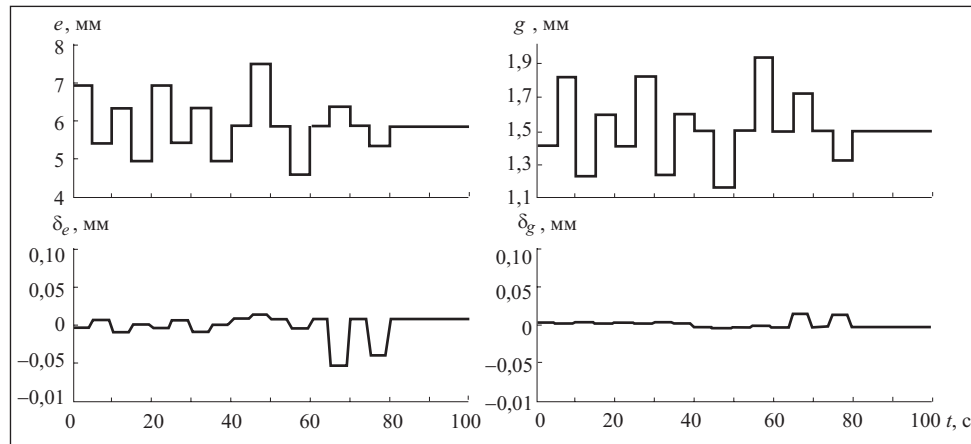


Рис. 3. Эпюры сигналов при проверке адекватности нейросетевой модели МАГ-сварки

$$\Psi_y = \exp(4,8 - 0,215 U_w + 0,014 V_{cb} - 2,87 d_e + 0,0025 U_w V_{cb} - 0,02 V_{cb} d_e - 0,000402 V_{cb}^2 + 0,918 d_e^2 + 10^{-3} V_{\pi} (-7,14 - 0,0404 V_{cb} + 6,15 d_e + 0,0048 V_{\pi})), \quad (4)$$

где  $b$  — величина зазора;  $V_{\pi}$  — скорость подачи проволоки.

Поскольку управление источником питания дуги осуществляется током сварки, для преобразования его в скорость подачи синтезирована следующая регрессионная формула:

$$V_{\pi} = -5,831 \cdot 10^{-7} I_w^3 + 0,0003718 I_w^2 - 0,03235 I_w + 2,31 \text{ (см/с)}. \quad (5)$$

Одним из выходов модели МАГ-сварки является высота валика, рассчитанная по формулам (3) и (4):  $g = \Psi_y e$ .

Вычислительный эксперимент выполнен в математическом пакете MATLAB/Simulink в соответствии с подготовленным для данной задачи двухфакторным центральным ротатбельным планом при следующих диапазонах изменения факторов режима:  $U_w = 21 \dots 29$  В;  $I_w = 125 \dots 165$  А;  $V_{\pi} = 170 \dots 270$  м/ч и выходных параметры модели:  $e = 4,6 \dots 7,5$  мм;  $g = 1,2 \dots 1,9$  мм; постоянные параметры —  $V_{cb} = 36$  м/ч;  $d_e = 1,2$  мм;  $b = 0$  мм.

По результатам вычислительного эксперимента с помощью программного пакета ANFIS были синтезированы и обучены две гибридные искусственные нейронные сети типа Sugeno (отдельно для ширины и высоты валика) и проверена их адекватность (рис. 3). Максимальная погрешность формирования прогнозов ширины  $\delta_e$  и высоты  $\delta_g$  валика шва после обучения не превысила  $\pm 1$  %.

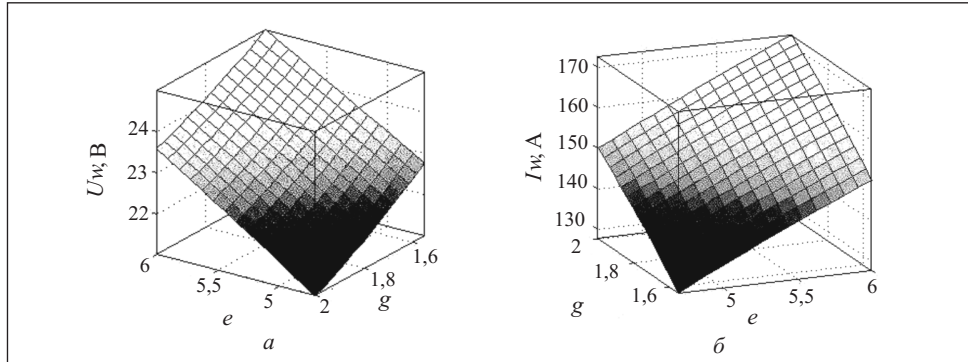


Рис. 4. Поверхности отклика НФП, полученные с помощью математической модели МАГ-сварки для напряжения (а) и тока (б) сварки

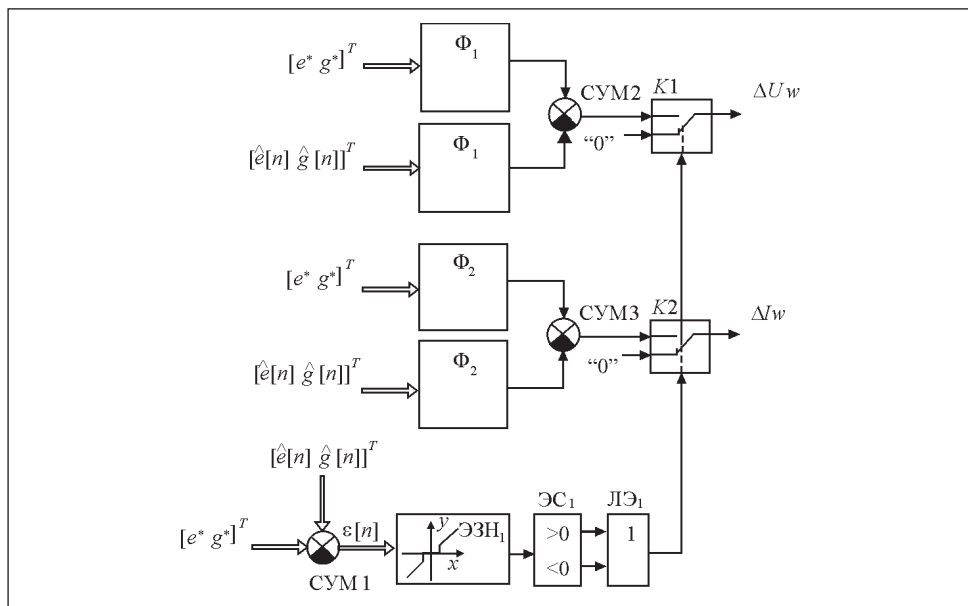


Рис. 5. Узел вычисления невязки: ЛЭ<sub>1</sub> — логический элемент; Φ<sub>1</sub>...Φ<sub>2</sub> — нейросетевые функциональные преобразователи; ЭС<sub>1</sub> — элемент сравнения

После этого матричным способом решена обратная задача, затем синтезированы и обучены две гибридные искусственные нейронные сети Sugeno с треугольными функциями принадлежности (отдельно для напряжения и тока сварки), которые являются искомыми НФП. На рис. 4 представлены поверхности отклика синтезированных НФП.

Узел вычисления невязки представлен на рис. 5. Он содержит два канала сравнения по два идентичных НФП. На входы первого канала

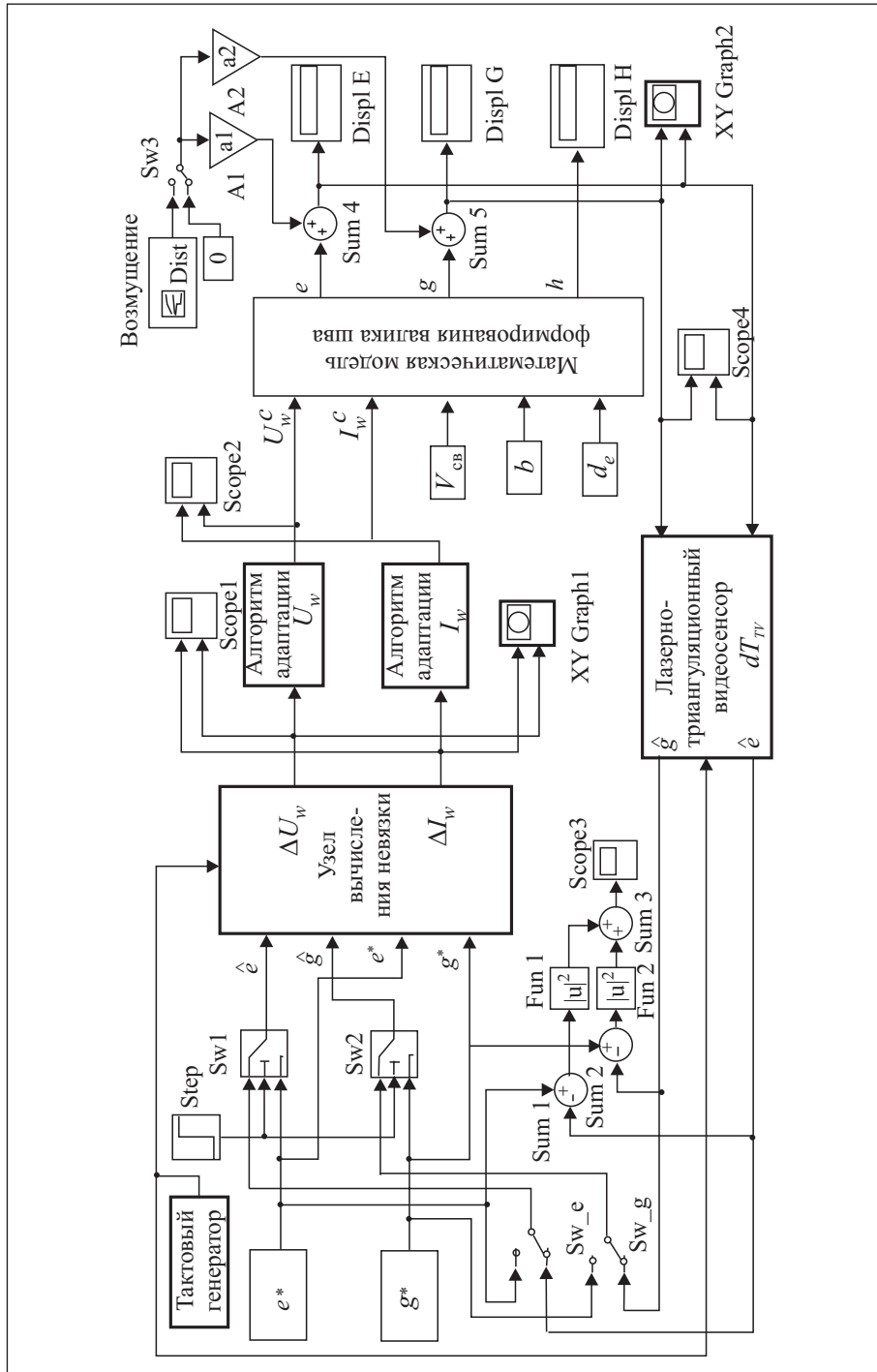


Рис. 6. Структурная схема Simulink-модели адаптивной системы управления формированием валика для МАГ-сварки



поданы уставки (ширины и высоты валика), а на входы второго — текущие оценки ширины и высоты валика с транспортным запаздыванием.

Выходами этих НФП являются, с одной стороны, образцовые уставки для напряжения сварки и скорость подачи, а с другой — напряжение сварки и скорость подачи, которые согласно нейросетевой модели соответствуют текущим значениям геометрических параметров валика. Выходы НФП подаются на элементы вычитания СУМ2 и СУМ3, разностные сигналы которых поступают на коммутаторы. Коммутаторы сигналов  $K1$  и  $K2$  применены с целью обнуления ошибок управления  $\Delta U_w$  и  $\Delta I_w$  в случае, если невязка не превышает заданных пределов зоны нечувствительности. Таким образом, предложенная структура узла вычисления невязки позволяет формировать управление ИПД в виде вектора ошибок управления для напряжения и тока сварки. Величина допусковой зоны ЭЗН1 установлена на уровне  $\pm 0,1$  мм.

Моделирование адаптивной системы управления также выполнялось в пакете MATLAB/Simulink (рис. 6).

Работа адаптивной системы управления заключается в следующем. После получения сигнала запуска начинают формироваться тактовые импульсы, сигнал «Step» активизирует коммутаторы  $SW1$  и  $SW2$ , которые вместо сигналов обратной связи подключают к входам узла формирования невязки сигналы уставок. На вход узла адаптации подаются нулевые значения поправок, что приводит к формированию начальных управляющих воздействий  $U_w^C = U_{w0}$  и  $I_w^C = I_{w0}$ . При этом математическая модель МАГ-сварки испытывает свободное движение аperiodического характера и через некоторое время (приблизительно пять секунд) переходит в устойчивое состояние. Через интервал времени  $dTstep = 5$  с коммутаторы  $SW1$  и  $SW2$  переключаются в состояние, при котором на входы узла вычисления невязки подаются сигналы обратной связи — оценки ширины и высоты валика, что приводит к появлению сигналов ошибок управления. Начинают формироваться сигналы управления процессом МАГ-сварки, что приводит к изменению геометрических параметров валика. Процесс адаптации выполняется до тех пор, пока разности уставок и фактических значений ширины и высоты валика не войдут в допусковую зону элемента ЭЗН1.

В случае наличия шумов сварки АСУ переходит в состояние стохастического движения, которое проявляется в определенных флуктуациях ширины и высоты валика.

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что адаптивный регулятор обладает удовлетворительными точностными и динамическими характеристиками. На рис. 7 представлены временные характеристики функции потерь при различных начальных условиях. Для уставок  $e^* = 5,2$  мм

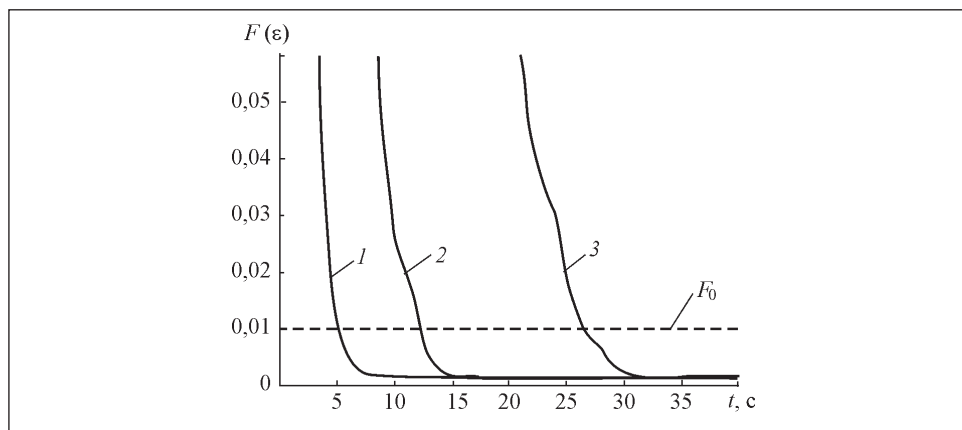


Рис. 7. Функции потерь в переходном режиме для различных начальных условий (шумы наблюдения отсутствуют,  $dT_{TV} = 2$  с): 1 —  $U_{w_0} = 23$  В,  $I_{w_0} = 143$  А; 2 —  $U_{w_0} = 22$  В,  $I_{w_0} = 146$  А; 3 —  $U_{w_0} = 26$  В,  $I_{w_0} = 140$  А;  $F_0$  — уровень зоны нечувствительности

и  $g^* = 1,7$  мм оптимальные начальные условия следующие:  $U_{w_0} = 23$  В,  $I_{w_0} = 143$  А. Настройка регулятора сводится к заданию интервала адаптации и параметров сглаживающего фильтра сигнала невязки (в данном случае — сглаживающих фильтров сигналов  $\Delta U_w$  и  $\Delta I_w$ ). Как показали результаты исследования, адаптивный регулятор устойчиво работает в широком диапазоне параметров настройки.

Особенностью работы адаптивного регулятора является то, что после его запуска коэффициент усиления уменьшается в каждом такте и стремится к нулю. Поэтому алгоритм адаптации периодически перезапускается, обеспечивая при этом подстройку начального состояния. На рис. 8 показаны эпюры сигналов работы адаптивного регулятора для уставок  $e^* = 5,2$  мм,  $g^* = 1,7$  мм при начальных условиях  $U_{w_0} = 26$  В и  $I_{w_0} = 140$  А, интервале адаптации 4 с и транспортном запаздывании  $dT_{TV} = 6$  с (шумы наблюдения отсутствуют). Если начальные условия не соответствуют уставкам для ширины и высоты валика, то после включения обратной связи адаптивный регулятор обеспечивает безударный переходной процесс подстройки состояния объекта управления при минимальной амплитуде управляющих сигналов. Для удобства наблюдения введена переменная  $\mathbf{c}[n] = \mathbf{c}[n] - \mathbf{c}_0 = [\Delta c_U[n] \Delta c_I[n]]^T$ , определяющая приращение вектора управления для текущего интервала адаптации.

Переходной процесс при адаптивном управлении МАГ-сваркой представляет собой аperiodическое движение, при котором геометрические параметры валика плавно изменяются. Длительность переходного процесса при значительном смещении начальных условий может достигать 20 с.

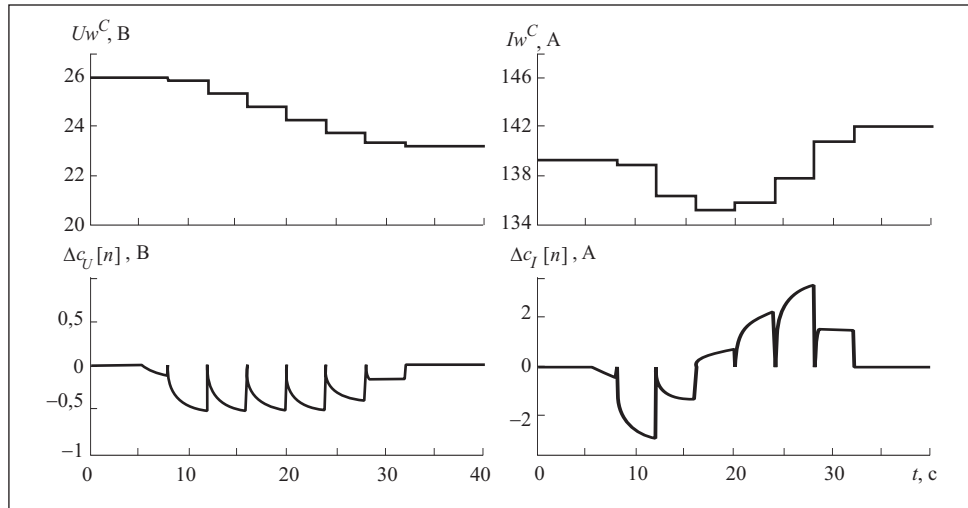


Рис. 8. Эпюры сигналов адаптивного регулятора при наличии значительного смещения начальных условий

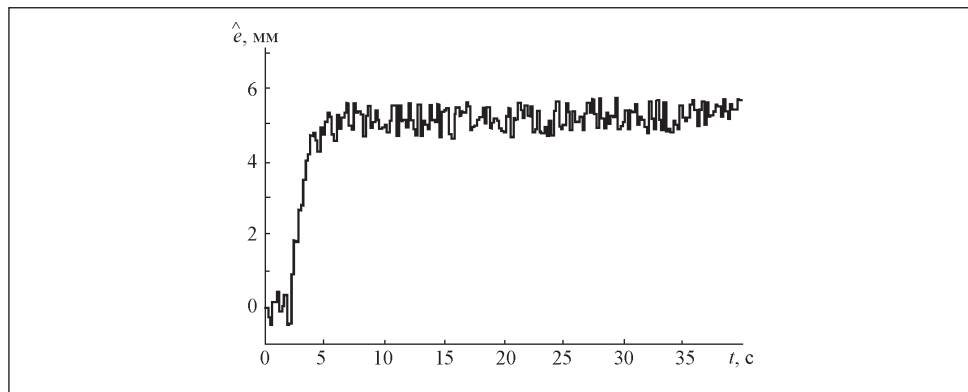


Рис. 9. Зашумленный сигнал оценки наблюдения ширины валика  $\hat{e}$

При моделировании представляет интерес исследование поведения адаптивного регулятора в условия шумов наблюдения, имитирующих шумы МАГ-сварки. К таким шумам были отнесены шумы измерений ЛТТД и неравномерности формирования валика в результате разбрызгивания металла (при сварке с короткими замыканиями), а также результаты воздействия других помех, вызывающих наплывы на поверхности валика. Был использован объект Uniform Random Number, формирующий шумоподобный сигнал с равномерным распределением в заданном диапазоне амплитуд ( $\pm 0,5$  мм для ширины валика и  $\pm 0,2$  мм для высоты валика). Шумы в АСУ

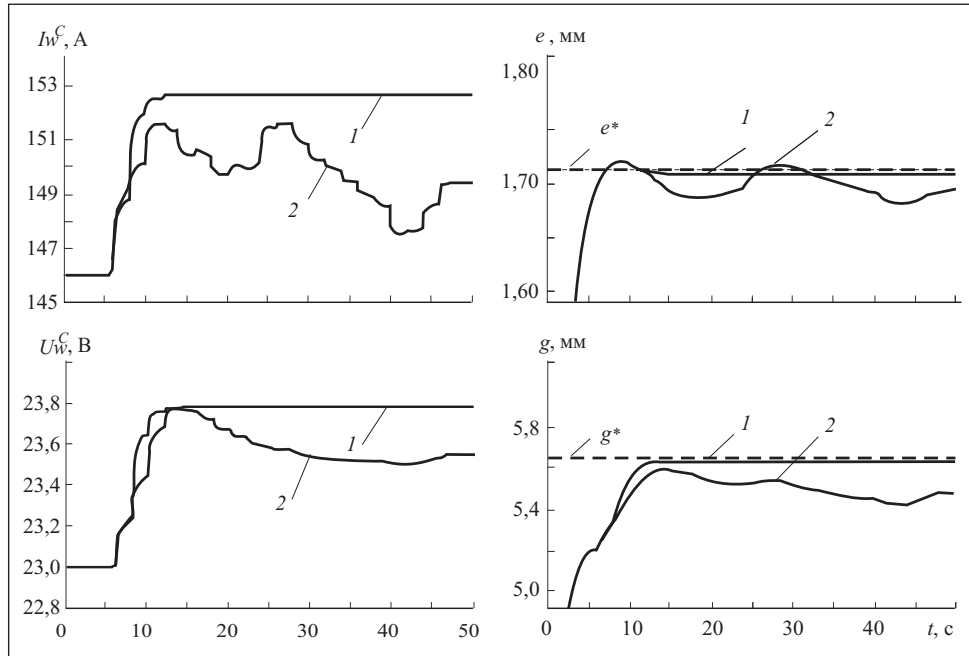


Рис. 10. Графики изменения во времени управляющих воздействий и параметров валика в переходном режиме: 1 — без шумов наблюдения; 2 — с шумами наблюдения

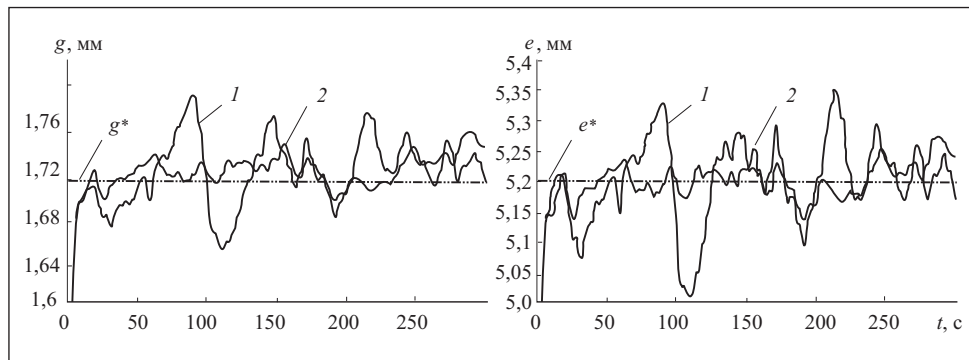


Рис. 11. Кривые качества стабилизации ширины  $e$  и высоты  $g$  валика при различных значениях транспортного запаздывания: 1 —  $dT_{TV} = 6$  с; 2 —  $dT_{TV} = 2$  с

формированием валика вводятся в состав сигналов обратной связи — аддитивной смеси шумоподобного сигнала и задержанных на время транспортного запаздывания выходов модели МАГ-сварки (рис. 9).

Поскольку автоматическое управление осуществляется в условиях МАГ-сварки, важными характеристиками регулятора являются, с одной

стороны, скорость нарастания и амплитуда сигналов управления ИПД, а с другой — амплитуда флуктуаций регулируемых параметров при наличии шумов сварки. Следует учесть, что в рассматриваемом случае имеется негативный фактор — транспортное запаздывание сигнала обратной связи. Несмотря на то что синтезированный регулятор не компенсирует транспортного запаздывания, результаты моделирования свидетельствуют о том, что он обладает удовлетворительными характеристиками в условиях значительных шумов сварки.

На рис. 10 представлены эпюры сигналов управления ИПД для интервала адаптации, равного двум секундам. Из рис. 10 видно, что амплитуда сигналов управления не превышает 6 А для тока дуги (при ограничении скорости изменения 10 А/с) и 0,2 В для напряжения сварки (при ограничении скорости изменения 1 В/с).

Поскольку одним из практических применений предлагаемой АСУ является стабилизация геометрических параметров валика, было выполнено моделирование этого режима для длительных интервалов наблюдений. На рис. 11 показаны временные характеристики изменения геометрических параметров валика в течение 300 с в условиях шумов сварки. Как видно из рис. 11, в течение интервала наблюдений и в переходном режиме отклонения величин ширины и высоты валика относительно уставок не выходят за пределы допустимых значений  $\pm 5\%$  ( $\pm 0,2$  мм для ширины и  $\pm 0,06$  мм для высоты валика).

Были также проведены исследования поведения АСУ формированием валика в условиях воздействия ненаблюдаемых сварочных возмущений, которые вызывают изменения размеров валика, не влияя на площадь его поперечного сечения. Адаптивный регулятор обеспечивает практически полную компенсацию такого вида возмущения в течение четырех интервалов адаптации.

**Выводы.** 1. Синтезирован адаптивный регулятор для автоматической системы управления формированием валика с замкнутой обратной связью, в котором применены нейросетевые функциональные преобразователи.

2. Результаты моделирования свидетельствуют о способности предложенной АСУ стабилизировать размеры валика шва с погрешностью не более  $\pm 5\%$  в условиях сварки при широком диапазоне варьирования транспортного запаздывания в контуре обратной связи.

An adaptive regulator synthesis and design in the environment of MATLAB mathematical package are considered for the control joint bead forming system in the conditions of MAG-welding with the closed-loop feedback. Special functional transformers synthesized on the basis of artificial networks of neurons are used to calculate the control error. These networks were obtained by a reverse decision using a mathematical model of joint forming.

1. Тригубов Г. П., Горбач В. Д. Оптимизация размеров сварных швов за счет адаптивного управления процессом дуговой сварки // Сварочное производство. — 2003. — № 7. — С. 19—21.
2. Гладков Э. А., Полянский П. В., Ширковский Н. А. Адаптивная АСУ процесса аргоно-дуговой сварки // Сварочное производство. — 1986. — № 11. — С. 1—3.
3. Гладков Э. А. Задачи прогнозирования качества и управления формированием шва в процессе сварки с использованием нейросетевых моделей // Там же. — 1996. — № 10. — С. 36—41.
4. Гладков Э. А., Гаврилов А. И., Малолетков А. В., Перковский Р. А. Динамическая нелинейная модель технологического процесса лазерной сварки с глубоким проплавлением // Там же. — 2001. — № 12. — С. 17—24.
5. Кисилевский Ф. Н., Коляда В. А. Система лазерного слежения за валиком усиления сварного шва. // Автоматическая сварка. — 2006. — № 1. — С. 60—62.
6. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. — М. : Наука, 1968. — 400 с.
7. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. — М. : Наука, 1984. — 320 с.
8. Оджи Т., Миясака Ф., Ямамото Т., Тсуджи И. Математическая модель процесса сварки МАГ // Автоматическая сварка. — 2006. — № 3. — С. 14—18.
9. Сергацкий Г. Н., Дубовецкий С. В. Системы разомкнутого управления формированием шва при дуговой сварке // Автоматическая сварка. — 1986. — № 6. — С. 37—48.
10. Кисилевский Ф. Н., Бутаков Г. А. Динамические характеристики температурных полей при сварке // Там же. — 1982. — № 11. — С. 18 — 20.

Поступила 20.03.09

*ЛАЗОРЕНКО Яков Петрович, аспирант, мл. науч. сотр. Ин-та электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. В 2006 г. окончил Национальный технический университет «Киевский политехнический ин-т». Область научных исследований — нейросетевые преобразователи, автоматическое управление дуговой сваркой, математическое моделирование в MATLAB.*

*КЛИШАР Федор Сергеевич, инженер-программист 1 кат. Ин-та электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. В 2008 г. окончил Национальный технический университет «Киевский политехнический ин-т». Область научных исследований — неразрушающий контроль качества сварных швов, электронное моделирование.*