



## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ УСИЛЕНИЯ СВАРНОГО ШВА

**В. В. ДОЛИНЕНКО**, канд. техн. наук, **Т. Г. СКУБА**, **В. А. КОЛЯДА**, инженеры,  
**Е. В. ШАПОВАЛОВ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен подход к построению оптимальной системы автоматического управления формированием усиления сварного шва с транспортным запаздыванием в контуре обратной связи в условиях сварки МАГ. Для построения оптимального регулятора создана динамическая модель формирования усиления сварного шва. Математическое моделирование проводили с использованием пакета MATLAB. Разработанная система управления обеспечивает минимальную продолжительность процесса при заданных ограничениях динамики регулирующих воздействий.

*Ключевые слова:* сварка МАГ, динамическая модель, формирование усиления сварного шва, математическое моделирование, оптимальная система управления, транспортное запаздывание

Обеспечение оптимальной формы шва является одной из основных задач при производстве сварных конструкций. Это связано с тем, что при оптимальной форме усиления шва возможно уменьшение значений коэффициента концентрации напряжений и повышение работоспособности сварных конструкций. Кроме того, обеспечение необходимых размеров шва позволяет минимизировать перерасход сварочных материалов в условиях массового производства. До настоящего времени управление формированием сварного шва в основном реализуется по разомкнутой схеме путем формирования технологических установок на параметры режима сварки. Особенности построения разомкнутых систем управления формированием шва, основанных на регрессионных моделях, рассмотрены в работе [1]. Для управления формой шва применяют также механические колебания сварочного инструмента и магнитное управление сварочной ванной [2]. Все разомкнутые способы управления формированием шва имеют один общий недостаток, связанный с отсутствием механизма компенсации внешних возмущений, которые воздействуют на изделие в процессе дуговой сварки и могут привести к отклонениям геометрических параметров сварного шва от заданных значений. К таким возмущениям можно отнести, например, параметры окружающей среды, состояние поверхности и отклонения в геометрических параметрах объекта сварки. Одним из способов компенсации внешних возмущений является применение систем автоматического управления формированием сварного шва с замкнутой обратной связью. Перспективным направлением дальнейшего развития систем управления дуговой сваркой является разработка

и исследование оптимальных и адаптивных систем, основные преимущества которых показаны в работах [3–5]. Необходимость применения методов теории оптимального управления в сварке связана с высокими требованиями к надежности и долговечности сварных конструкций [6].

Целью настоящей работы является создание системы управления формированием сварного шва при сварке МАГ с использованием в цепи обратной связи лазерно-телевизионного сенсора (ЛТС), который предназначен для измерения геометрических параметров валика усиления сварного шва.

Формализуем задачу управления, т. е. заменим объект управления математической моделью, которая описывает существенные особенности задач и целей управления. Процесс формирования валика сварного шва представляет собой многомерный связный объект управления, поведение которого в первом приближении можно описать системой дифференциальных уравнений первого порядка. В пространстве состояний уравнения объекта имеют вид

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{V}_0, \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{V}_n, \quad (2)$$

где  $\mathbf{x}$  — вектор переменных состояния процесса формирования валика  $(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ ;  $\mathbf{u}$  — вектор управляющих воздействий процесса сварки  $(u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ ;  $\mathbf{y}$  — вектор наблюдений геометрических параметров валика  $(y_1, y_2, \dots, y_l)^T$ ;  $\mathbf{A}$  — матрица состояний системы размером  $n \times n$ ;  $\mathbf{B}$  — матрица управлений  $(n \times m)$ ;  $\mathbf{C}$  — матрица наблюдений  $(l \times n)$ ;  $\mathbf{V}_0(t)$  — матрица коэффициентов входных возмущений;  $\mathbf{V}_n(t)$  — матрица коэффициентов шумов наблюдений;  $t$  — время.

Матрицы  $\mathbf{V}_0(t)$ ,  $\mathbf{V}_n(t)$  представляют собой белые шумы с вероятностными характеристиками:



$$M[\mathbf{x}_0] = \bar{\mathbf{x}}_0 \text{ (среднее значение);}$$

$$M[(\mathbf{x}_0 - \bar{\mathbf{x}}_0)(\mathbf{x}_0 - \bar{\mathbf{x}}_0)^T] = \mathbf{P}_0;$$

$$M[(V_0(t) - V_0^T(t'))] = \mathbf{Q}_0 \delta(t - t');$$

$$M[(V_H(t) - V_H^T(t'))] = \mathbf{R}_0 \delta(t - t');$$

$$M[V_0(t)] = 0; M[V_H(t)] = 0; M[(V_0(t) V_H^T(t'))] = 0,$$

где  $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0)$ ;  $\mathbf{Q}_0, \mathbf{P}_0$  — положительно полуопределенные матрицы;  $\mathbf{R}_0$  — положительно определенная матрица;  $\delta(t - t')$  — функция Кронекера;  $t'$  — момент времени.

Критерий оптимальности, который необходимо минимизировать, задается в виде функционала

$$J = M[\mathbf{x}^T(t_f) \mathbf{F} \mathbf{x}(t_f) + \int_0^{t_f} [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)] dt], \quad (3)$$

где  $M$  — математическое ожидание;  $\mathbf{F}$  — матрица граничных условий;  $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$  — матрицы весовых коэффициентов.

Задача оптимального управления формулируется следующим образом [7]: при заданных уравнениях объекта (1) и (2), ограничениях на управление  $\mathbf{u}(t) \in U, U_t \subseteq \mathbb{R}^m$  (где  $\mathbb{R}^m$  —  $m$ -мерное линейное пространство), краевых условиях  $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$  и  $\mathbf{x}(t_f) = 0$  необходимо определить такое управление с обратной связью  $\mathbf{u} = \mathbf{u}\{y(\tau), t_0 \leq t \leq t_f\}$ , где  $t_0 \leq \tau \leq t_f$ , при котором критерий оптимальности (3) принимает минимальное значение.

Для решения поставленной задачи представим модель объекта управления (ОУ), которым является процесс формирования сварного шва, в виде связанной системы динамических звеньев. Переходные функции звеньев должны максимально точно описывать переходные процессы на выходе ОУ. Для исследования характера этих процессов и получения в результате априорной информации о динамических характеристиках ОУ подготовлены и проведены непосредственно сварочные эксперименты.

При проведении экспериментов регулирующие воздействия формировались в виде отклонений по напряжению  $U_d$  и току сварки  $I_{св}$ ; скорость сварки  $v_{св}$  поддерживали постоянной. Сварку проводили на токе обратной полярности в нижнем положении в смеси защитных газов (85 % Ar + 15 % CO<sub>2</sub>). Использовали источник питания дуги «Fronius Trans Puls Synergic-5000» и механизм подачи проволоки «Fronius VR 2000». Объектом сварки была пластина углеродистой стали толщиной 8 мм. При сварке использовали электродную проволоку Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Номинальные параметры режима сварки:  $I_{св0} = 160$  А;  $U_{д0} = 19$  В;  $v_{св0} = 7$  мм/с. Амплитуда отклонений регулирующих воздей-

ствий составляла для тока  $\Delta I_{св \max} = 15$  А, для напряжения  $\Delta U_{д \max} = 2$  В.

В ходе экспериментов установлено, что скачкообразные изменения регулирующих сигналов приводят к паразитным колебаниям поверхности валика и формированию подрезов. С целью предотвращения возникновения дефектов в сварном шве скорость нарастания/спада регулирующих сигналов была ограничена для напряжения 1 В/с и тока сварки 10 А/с. Результаты экспериментов показали, что для процесса формирования сварного валика характерно как динамическое поведение, так и наличие двух различных транспортных запаздываний при формировании ширины и высоты валика.

Введем следующие обозначения:  $e, g$  — ширина и высота валика сварного шва;  $\Delta e, \Delta g$  — конечные приращения ширины и высоты валика относительно номинальных значений  $e_0$  и  $g_0$ ;  $\Delta U_d, \Delta I_{св}$  — конечные приращения регулирующих воздействий;  $U_d, I_{св}$  — фактические значения регулирующих воздействий. Таким образом, справедливы следующие уравнения:

$$U_d(t) = U_{д0} + \Delta U_d(t); I_{св}(t) = I_{св0} + \Delta I_{св}(t); \quad (4)$$

$$e(t) = e_0 + \Delta e(t); g(t) = g_0 + \Delta g(t), \quad (5)$$

где  $\Delta U_d(t) < \Delta U_{д \max}$ ;  $\Delta I_{св}(t) < \Delta I_{св \max}$ .

Представим модель формирования валика шва для установившегося режима сварки в виде статической связанной системы, линеаризованной в окрестности рабочей точки ( $U_{д0}, I_{св0}$ ).

В матричной форме запишем

$$\begin{bmatrix} \Delta e(t) \\ \Delta g(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{21} \\ k_{12} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_d(t) \\ \Delta I_{св}(t) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$  — коэффициенты усиления выход-вход, значения которых требуется определить.

Для оценки статических и динамических характеристик линеаризованной модели процесса формирования валика проведены сварочные эксперименты, в которых использовали импульсные регулирующие воздействия  $U_d$  и  $I_{св}$  с ограниченной скоростью нарастания/спада. Отметим, что при этом фактически были определены постоянные времени динамической системы источник питания–дуга–сварочная ванна–валик. Поэтому при изменении номенклатуры сварочного оборудования или технологического процесса значения постоянных времени требуется уточнить. Измерение геометрических параметров валика выполняли после сварки с помощью ЛТС [8] с шагом дискретизации 1 мм. Из полученных массивов данных геометрических параметров валиков вычтены средние значения  $e_0 = 7,85$  мм и  $g_0 = 2,2$  мм, а



затем сглажены линейным фильтром скользящего среднего

$$N_O[i] = \frac{\sum_{k=i-3}^{i+3} N_I[k]}{7},$$

где  $N_O$  и  $N_I$  — сглаженный и исходный массивы данных;  $i, k$  — целые числа (индексы массивов). Для того чтобы корректно оценить постоянные времени четырех инерционных звеньев, которые составляют модель, массивы данных сдвинуты по направлению к электроду (вправо по оси  $x$ ) на соответствующие рассчитанные расстояния транспортных запаздываний. Значения транспортных запаздываний определяются следующим образом. Известно, что ширина и высота валика формируется на фронте затвердевания металла сварочной ванны в ее средней и хвостовой части [9]. Поэтому транспортные запаздывания измерений высоты  $\tau_g$  и ширины  $\tau_e$  валика можно определить из следующих формул:

$$\tau_g = \frac{L_{TV} - L_g}{v_{CB}}; \quad \tau_e = \frac{L_{TV} - L_e}{v_{CB}}, \quad (7)$$

где  $L_{TV}$  — расстояние между световым следом ЛТС и электродом горелки, мм;  $L_g$  — расстояние от электрода до крайней точки хвостовой части сварочной ванны, мм;  $L_e$  — расстояние от электрода до средней точки сварочной ванны, мм. Для расчета расстояний  $L_e$  и  $L_g$  синтезирована регрессионная модель, при разработке которой использован вычислительный эксперимент над представленной моделью процесса распространения тепла в полубесконечном теле при нагреве его подвижным нормально-круговым источником [10]:

$$\begin{aligned} L_g &= -0,69 + 0,041U_d + 0,0048I_{CB} + 0,3v_{CB} \text{ [см]}; \\ L_e &= 0,08 + 0,004U_d + 0,0016I_{CB} + 0,4v_{CB} \text{ [см]}. \end{aligned}$$

На рис. 1 представлены графики изменений геометрических параметров валиков в зависимости от линейно изменяющихся регулирующих воздействий, на которые для сравнения наложены реакции инерционных звеньев. Можно отметить нелинейную динамику изменений ширины и высоты валика при воздействии импульса тока сварки, что проявляется в уменьшении длительности импульса выхода за счет фазового сдвига его переднего фронта (рис. 1,  $I$ ).

Динамический объект управления синтезируется следующим образом. В связи с тем, что требуется ограничить динамику изменения регулирующих воздействий  $U_d$  и  $I_{CB}$ , вектор управлений задается в виде производных по времени

$\mathbf{u} = \left[ \frac{dU_d}{dt} \quad \frac{dI_{CB}}{dt} \right]^T$ . Тогда для согласования управляющих и регулирующих воздействий в состав ОУ необходимо добавить идеальное интегрирующее звено. Вектор выхода (вектор наблюдения) задается как  $\mathbf{y} = [\Delta e(t) \Delta g(t)]^T$ . Результирующее уравнение выхода в операторном виде запишется следующим образом:

$$\mathbf{y} = W(p)\mathbf{u}, \quad (8)$$

где  $W(p) = W_3(p)W_2(p)W_1(p)$ ;  $p$  — оператор Лапласа;  $W_3(p)$  — передаточная функция идеального звена транспортного запаздывания;  $W_2(p)$  — передаточная функция аperiodического звена 1-го порядка;  $W_1(p)$  — передаточная функция идеального интегрирующего звена. Эти передаточные функции в матричной форме имеют вид

$$W_1(p) = \begin{bmatrix} \frac{1}{p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{p} \end{bmatrix}; \quad W_2(p) = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{1 + T_{11}p} & \frac{k_{21}}{1 + T_{21}p} \\ \frac{k_{12}}{1 + T_{12}p} & \frac{k_{22}}{1 + T_{22}p} \end{bmatrix};$$

$$W_3(p) = \begin{bmatrix} e^{-\tau_e p} & 0 \\ 0 & e^{-\tau_g p} \end{bmatrix}.$$

После подстановки передаточных функций  $W_3(p)$ ,  $W_2(p)$  и  $W_1(p)$  в (8) уравнение выхода запишется следующим образом:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{(1 + T_{11}p)p} e^{-\tau_e p} & \frac{k_{21}}{(1 + T_{21}p)p} e^{-\tau_g p} \\ \frac{k_{12}}{(1 + T_{12}p)p} e^{-\tau_e p} & \frac{k_{22}}{(1 + T_{22}p)p} e^{-\tau_g p} \end{bmatrix} \mathbf{u}. \quad (9)$$

Ограничения имеют вид

$$\left| \frac{dU_d(t)}{dt} \right| \leq u_{\max 1}, \quad \left| \frac{dI_{CB}(t)}{dt} \right| \leq u_{\max 2}, \quad (10)$$

где  $u_{\max 1} \in U$ ,  $u_{\max 2} \in U$ ,  $U \subseteq \mathfrak{R}_+^2$ ,  $\mathfrak{R}_+^2$  — двумерное пространство неотрицательных чисел.

На рис. 2 представлена структурная схема передаточной функции  $W(p)$ .

Для того чтобы воспользоваться известной методикой синтеза оптимальной системы автоматического управления (САУ) экспоненциальные функции заменяют рациональными полиномами. С достаточной точностью  $e^{-\tau p}$  аппроксимируем полиномом Паде [11] 5-й степени:

$$e^{-\tau p} = \frac{\tau^5 p^5 - 30\tau^4 p^4 + 420\tau^3 p^3 - 3360\tau^2 p^2 + 15120\tau p - 30240}{\tau^5 p^5 + 30\tau^4 p^4 + 420\tau^3 p^3 + 3360\tau^2 p^2 + 15120\tau p + 30240}. \quad (11)$$

Полученную передаточную функцию необходимо представить системой в пространстве состояний. Исходя из условий сварки ( $v_{CB} = \text{const}$ )

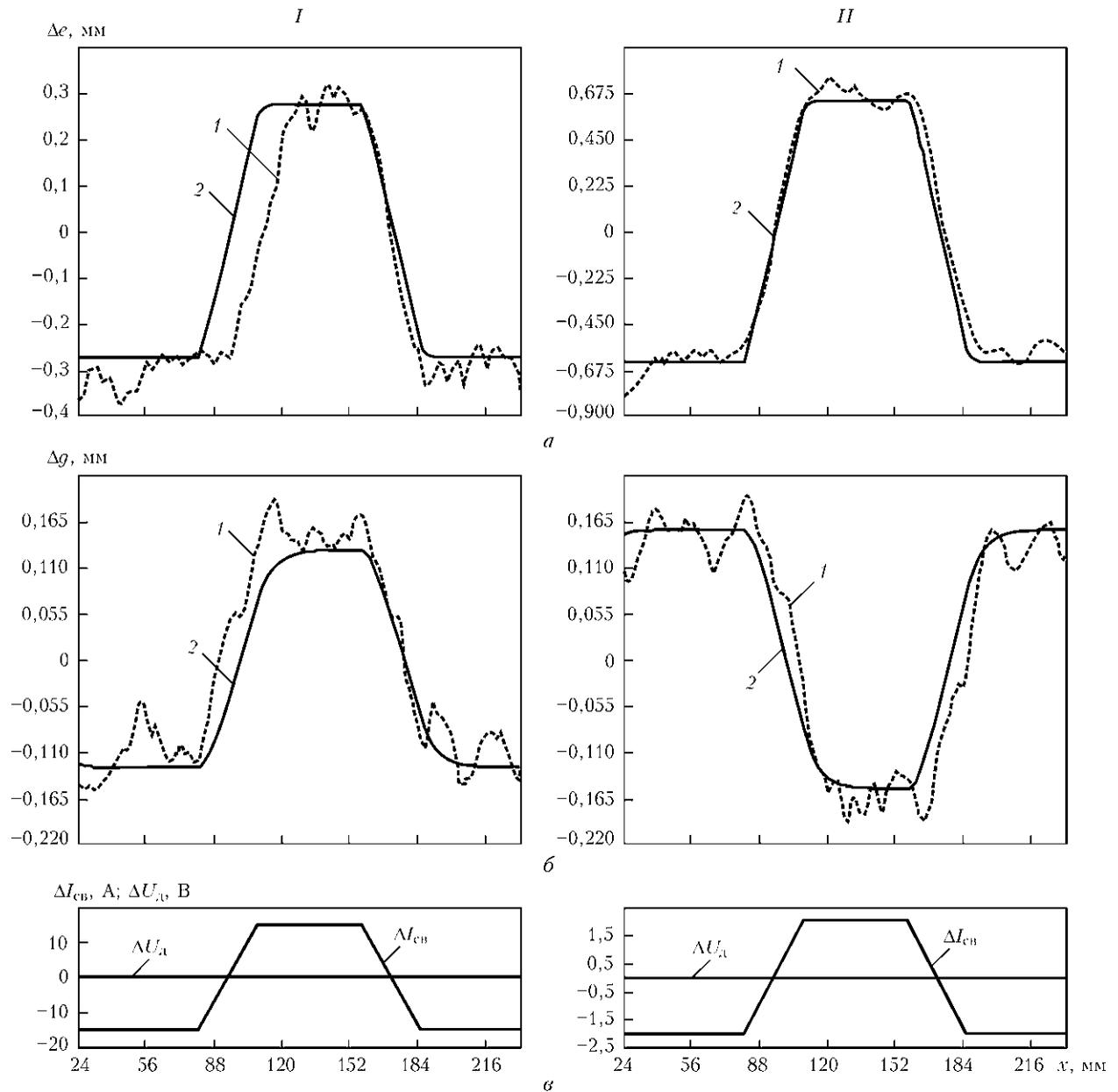


Рис. 1. Результаты идентификации параметров динамических звеньев модели формирования усиления шва для импульса тока сварки (I) и напряжения (II); а, б — изменения соответственно ширины и высоты усиления; в — приращения регулирующих воздействий соответственно по току сварки и напряжению: 1 — реакция динамических звеньев модели; 2 — геометрические параметры валика усиления, измеренные ЛТС

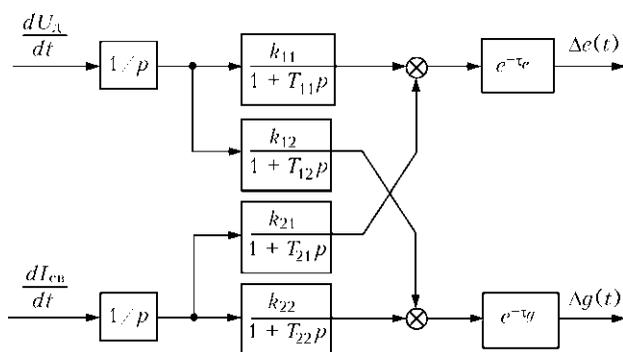


Рис. 2. Структурная схема динамической модели формирования усиления шва

и заданного расстояния  $L_{TV} = 70$  мм определены средние значения транспортных запаздываний —  $\tau_e = 9,52$  с;  $\tau_g = 8,38$  с. Расчеты выполнены исходя из допущения, что при выбранном диапазоне параметров режима сварки транспортные запаздывания  $\tau_g$  и  $\tau_e$  изменяются незначительно. Отсюда следует, что ОУ является стационарным.

Матрицы объекта управления в пространстве состояний **A** (14×14), **B** (14×2) и **C** (2×14) рассчитаны в пакете MATLAB с помощью функции *ss* [12].

Анализ полученных матриц показывает, что количество строк матрицы выхода **C** меньше размерности матрицы **A**, которая определяет вектор



состояния, для восстановления которого целесообразно применение фильтра Калмана–Бьюси — оптимального наблюдателя состояния.

Синтез оптимальной системы управления формированием валика шва выполняется по методике [7], основанной на известном принципе разделения или стохастической эквивалентности [13, 14]. При этом решаются следующие взаимосвязанные задачи: разработка детерминированного оптимального регулятора состояния и синтез фильтра Калмана–Бьюси. Разработка детерминированного оптимального регулятора формулируется как задача определения оптимального управления с обратной связью для объекта (1), (2) при критерии оптимальности (3)

$$u = R^{-1} B^T K \hat{x}, \quad (12)$$

где  $\hat{x}$  — оптимальная оценка состояния ОУ, которая определяется с помощью оптимального наблюдателя состояния — фильтра Калмана–Бьюси;  $K$  — симметрическая матрица, определяемая из матричного уравнения Риккати

$$\dot{K} = -KA - A^T K + KBR^{-1}B^T K - Q \quad (13)$$

при граничном условии  $K(t_f) = F$ .

Требуемые ограничения на управление обеспечим соответствующим выбором матрицы  $R$  и включением в структуру оптимального регулятора вспомогательного элемента, который описывается функцией  $u_{out\ k} = sat(u_{in\ k}, u_{max\ k})$ :

$$u_{out\ k} = \begin{cases} u_{in\ k}, & \text{если } u_{in\ k} < u_{max\ k}, \\ u_{max\ k}, & \text{если } u_{in\ k} \geq u_{max\ k} \end{cases} \text{ при } k = 1, 2, \dots, m. \quad (14)$$

Синтез фильтра Калмана–Бьюси выполняется следующим образом. Поскольку шумы процесса сварки и наблюдения не коррелированы ( $S_0(t) \equiv 0$ ), то оценка  $\hat{x}(t)$  является несмещенной и оптимальной в том случае, если она удовлетворяет уравнению

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K^0(y - C\hat{x}); \quad \hat{x}(t_0) = \bar{x}_0 \quad (15)$$

с матрицей коэффициентов усиления  $K^0 = PC^T R_0^{-1}$ , где матрица  $P$  — решение уравнения Риккати:

$$\dot{P} = AP + PA^T - PC^T R_0^{-1} CP + Q_0, \quad P(t_0) = P_0. \quad (16)$$

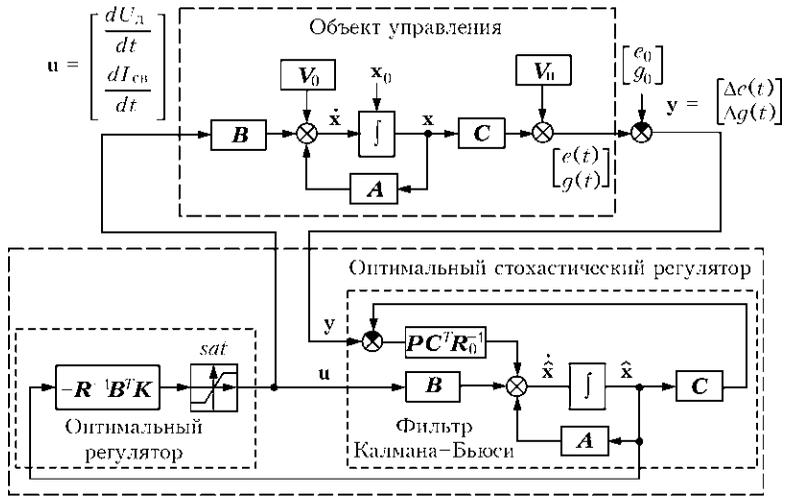


Рис. 3. Структурная схема модели оптимальной САУ

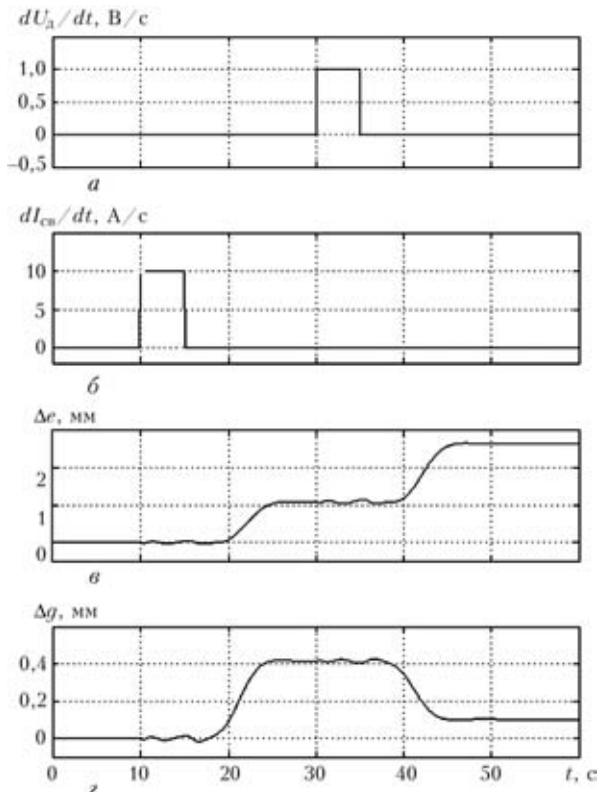


Рис. 4. Переходные характеристики динамической модели объекта управления: а, б — управляющие воздействия соответственно по напряжению и току сварки; в, г — изменения соответственно ширины и высоты шва

Расчет стохастического оптимального регулятора выполнен средствами пакета MATLAB (используется функция *lqry*). Получено решение уравнения Риккати в виде матрицы  $K$  ( $14 \times 14$ ). При расчете использовали матрицы весовых коэффициентов вектора наблюдений  $Q$  ( $2 \times 2$ ) и вектора управления  $R$  ( $2 \times 2$ ) в виде

$$Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0,015 \end{bmatrix}.$$

Для расчета фильтра Калмана–Бьюси использовали функцию *kalman*. В качестве исходных ус-

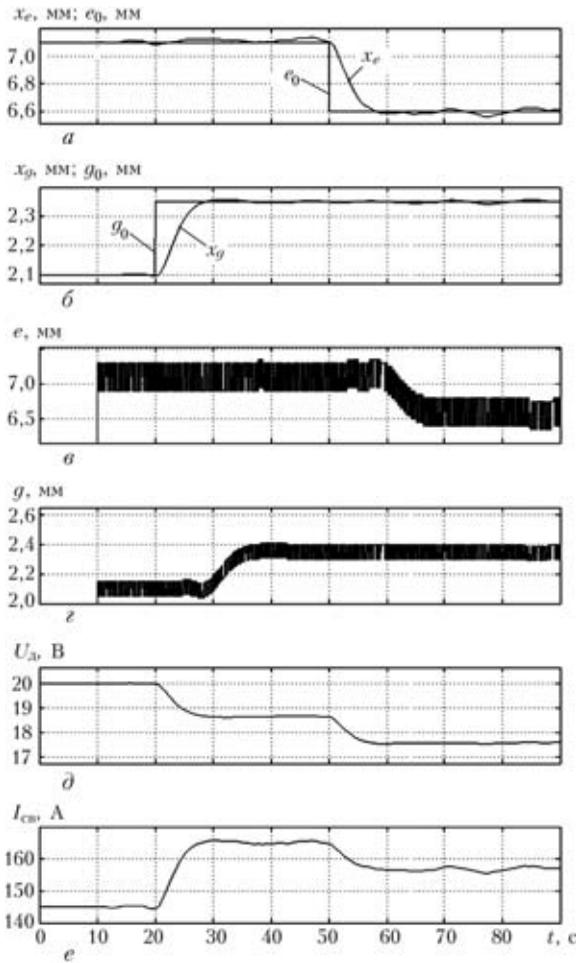


Рис. 5. Графики переходного процесса в оптимальной САУ при изменении задающих воздействий  $e_0$  и  $g_0$  на 20-, 50-й с: а, б — ширина  $x_e$  и высота  $x_g$  валика в текущий момент времени; в, г — сигналы наблюдения ширины и высоты валика; д, е — регулирующие воздействия

ловий заданы матрицы ОУ в пространстве состояний, матрицы коэффициентов входных возмущений  $V_0$  (14×2) и шумов измерений  $V_n$  (2×2), а также ковариационные матрицы шумов

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{bmatrix}; R_0 = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,004 \end{bmatrix}.$$

Структурная схема модели оптимальной САУ (рис. 3) включает модель ОУ и модель стохастического оптимального регулятора, который состоит из оптимального регулятора состояний, элемента ограничения управляющих воздействий и оптимального наблюдателя состояния — фильтра Калмана–Бьюси. Оптимальный регулятор формирует управления в виде вектора производных регулирующих воздействий  $U_d$  и  $I_{св}$ . В качестве сигналов обратной связи используется вектор состояния оптимального наблюдателя  $\hat{x}$ , который вычисляется на основе априорной информации о матрицах объекта управления  $A$ ,  $B$  и  $C$ , а также с учетом текущих значений вектора управлений и вектора выхода  $[\Delta e(t) \Delta g(t)]^T$ .

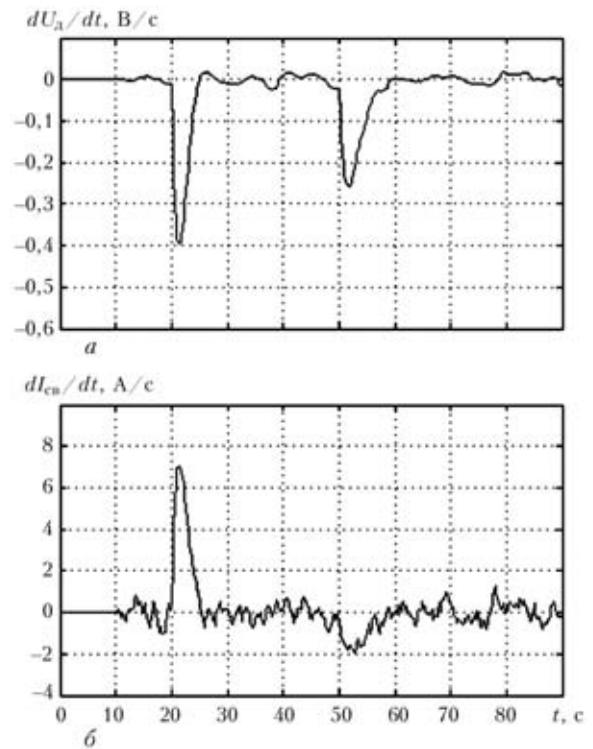


Рис. 6. Графики сигналов управления по напряжению (а) и току (б) сварки в оптимальной САУ

Исследованы переходные характеристики модели ОУ. На рис. 4 показаны графики входных и выходных сигналов при формировании импульсных управлений длительностью 5 с и амплитудами соответственно 1 В/с и 10 А/с. Эти кривые имитируют сигналы в гипотетической САУ с ЛТС, который формирует на поверхности изделия световой след на расстоянии  $L_{TV} = 70$  мм от оси электрода. При этом происходит изменение значений геометрических параметров валика с некоторыми временными запаздываниями относительно момента времени подачи управляющих воздействий.

Выполнено моделирование переходных и стационарных процессов в САУ формированием валика шва (рис. 5 и 6). При этом имитировались значительные уровни шумов наблюдения ширины 0,2 мм и высоты усиления 0,05 мм. Определено, что при установившемся режиме флуктуации выходных параметров изменяются незначительно — ширина и высота усиления соответственно не более чем 0,05 и 0,02 мм. Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что разработанная оптимальная стохастическая САУ с транспортным запаздыванием в контуре обратной связи формирует приемлемую траекторию управления процессом сварки МАГ. При управлении процессом формирования усиления шва, описываемого многомерной динамической системой, обеспечивается минимальное время переходного процесса (не более 8 с) при отсутствии перерегулирования. Согласно рис. 5, в моменты времени 20 и 50 с



при ступенчатом изменении задающих воздействий одновременно начинают изменяться управляющие воздействия, что вызывает движение переменных состояния ОУ  $x_e$  и  $x_g$ . Траектории изменения регулируемых параметров имеют апериодический характер.

Разработанный оптимальный регулятор обеспечивает ограничения динамики регулируемых воздействий. Из рис. 6 следует, что несмотря на наличие в ОУ транспортного запаздывания и значительного уровня шумов сигналы управления не превышают уровней ограничения 1 В/с (для  $dU/dt$ ) и 10 А/с (для  $dI_{св}/dt$ ).

Таким образом, предложенный подход синтеза оптимальной САУ для управления сваркой МАГ, очевидно, может развиваться в направлении как уточнения структуры динамической модели формирования сварного шва, так и расширения вектора управляющих воздействий (например, регулирование скорости сварки) или вектора наблюдений (например, измерение зазора в стыке).

1. *Сергацкий Г. Н., Дубовецкий С. В.* Системы разомкнутого управления формированием шва при дуговой сварке // Автомат. сварка. — 1986. — № 6. — С. 37–48.
2. *Размышляев А. Д.* Физические основы формообразования валиков и швов при дуговой наплавке и сварке с управляющими воздействиями: Дис. ... д-ра техн. наук. — Мариуполь, 1996. — 403 с.
3. *Гуревич В. И.* Динамика тепловых систем автоматического управления режимом сварки // Управление свароч-

The method is proposed for development of the optimal system for automatic control of formation of the reinforced weld with transportation lag in the feedback loop under MAG welding conditions. The dynamic model of formation of the reinforced weld was developed to build the optimal controller. Mathematical modelling was performed by using the MATLAB software package. The developed control system provides minimal duration of the transient process at preset limitations of dynamics of the control effects.

- ными процессами: Сб. науч. тр. (межвузовский). — Тула: ТПИ, 1983. — С. 3–10.
4. *Тригубов Г. П., Горбач В. Д.* Оптимизация размеров сварных швов за счет адаптивного управления процессом дуговой сварки // Свароч. пр-во. — 2003. — № 7. — С. 19–21.
5. *Гладков Э. А.* Задачи прогнозирования качества и управления формированием шва в процессе сварки с использованием нейросетевых моделей // Там же. — 1996. — № 10. — С. 36–41.
6. *Математическое моделирование сварочных процессов для создания систем прогнозирования качества соединений и оптимального управления / Б. Е. Патон, Н. В. Подола, В. Г. Квачев, А. А. Урсатьев // Автомат. сварка. — 1971. — № 7. — С. 1–5.*
7. *Ким Д. П.* Теория автоматического управления. В 2-х т.: Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. — М.: Физматлит, 2004. — 464 с.
8. *Кисилевский Ф. Н., Коляда В. А.* Система лазерного слежения за валиком усиления сварного шва // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 60–62.
9. *Ерохин А. А.* Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
10. *Рыкалин Н. Н., Углов А. А.* Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
11. *Бейкер Дж., Грейвс-Моррис П.* Аппроксимации Паде. — М.: Мир, 1986. — 502 с.
12. *Перельмутер В. М.* Пакеты расширения MATLAB. Control System Toolbox и Robust Control Toolbox. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. — 224 с.
13. *Квакернак Х., Сиван Р.* Линейные оптимальные системы управления. — М.: Мир, 1977. — 650 с.
14. *Брайсон А., Хо Ю-Ши.* Прикладная теория оптимального управления. — М.: Мир, 1972. — 544 с.

Поступила в редакцию 19.03.2009

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

### Восемнадцатая ежегодная международная конференция и выставка

4–8 октября 2010

г. Ялта

#### Научное руководство:

- ◆ Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
- ◆ Российское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
- ◆ Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики
- ◆ Институт электросварки им. Е. О. Патона, Днепропетровский национальный университет, НПП «Машиностроение»

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