



КОМПЕНСАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА РЕЖИМ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

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

Рассматривается один из подходов к снижению влияния внешних возмущений на параметры режима дуговой сварки, основанный на использовании принципа поглощения. Изложена процедура структурного синтеза компенсирующей обратной связи. Приведены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: дуговая сварка, стабилизация режима, принцип поглощения, компенсация возмущений, структурный синтез, внутренние модели

Проблема стабилизации режима автоматической дуговой сварки плавящимся электродом давно обсуждается в литературе [1–5]. Эта проблема, как известно, связана с существенным влиянием на процесс дуговой сварки различного рода неконтролируемых возмущений, приводящих в итоге к снижению качества сварного соединения. Основная трудность при построении систем стабилизации состоит в том, что сварочный контур с плавящимся электродом как объект автоматического управления сам по себе уже представляет систему с естественной обратной связью, обеспечивающей саморегулирование длины дуги [6]. Поэтому простое введение в сварочный контур дополнительных обратных связей для стабилизации режима сварки не всегда приводит к желаемому эффекту.

Между тем, существует и иная возможность устранения влияния возмущений, основанная на использовании так называемого принципа поглощения [7], в основе которого лежит синтез внутренней модели внешнего возмущения с введением компенсирующей связи. Несмотря на возросший в последнее время интерес к системам этого класса [7–11], указанный принцип пока еще не получил должного развития в системах управления сварочными процессами.

В настоящей работе рассматривается задача синтеза структуры компенсирующего устройства (КУ), обеспечивающего в некоторых случаях снижение влияния внешних воздействий на параметры режима дуговой сварки.

Рассмотрим структурную схему сварочного контура (рис. 1), составленную на основании уравнений [12]:

$$\begin{aligned} (LD + S)i &= u_* - u_s; \quad u_s - u_a = Ri; \quad u_a = u_0 + El; \\ l &= H - h; \quad h = \frac{1}{D}(v_e - v_m); \quad v_m = Mi, \end{aligned} \quad (1)$$

где L — индуктивность источника сварочного тока; R — суммарное сопротивление подводящих проводов, вылета электрода h и скользящего контакта в мундштуке горелки; u_s — напряжение на выходных клеммах источника сварочного тока; u_* — напряжение холостого хода; u_a — напряжение на дуге; u_0 — сумма приэлектродных падений напряжений; i — ток сварки; l — длина дугового промежутка; $E \equiv \partial u_a / \partial l$ — напряженность электрического поля в столбе дуги; $S \equiv \partial u_s / \partial i$ — крутизна вольт-амперной характеристики источника сварочного тока при номинальном значении тока $i_{ном}$; H — расстояние между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны; v_e — скорость движения (скорость подачи) плавящегося электрода относительно сопла горелки; v_m — скорость плавления электрода; $M \equiv \partial v_m / \partial i$ — крутизна характеристики плавления электрода при номинальных значениях сварочного тока $i_{ном}$ и вылета электрода $h_{ном}$; $D = d/dt$ — оператор дифференцирования; t — время.

Из рис. 1 видно, что внешние возмущения, действующие на напряжение u_* , скорость v_e и расстояние H , могут привести к изменению номинальных значений сварочного тока $i_{ном}$ и напряжения на дуге $u_{a,ном}$. Рассмотрим для определенности случай, когда возмущение номинального режима дуговой сварки вызвано кратковременным изменением H . При этом прежде всего произойдет изменение (возмущение) напряжения на дуге $u_a(t)$. Представим $u_a(t)$ в виде суммы

$$u_a(t) = u_{a,ном} + \xi(t), \quad (2)$$

где $\xi(t)$ — результирующее возмущение.

Ясно, что для компенсации возмущения $\xi(t)$ необходимо его измерить. Но поскольку непосредственное измерение $u_a(t)$ практически невозможно, то попытаемся оценить $\xi(t)$ косвенным путем, введя в структуру системы двухвходовую внутреннюю модель внешнего возмущения. Идея косвенной оценки заключается в следующем. Ес-

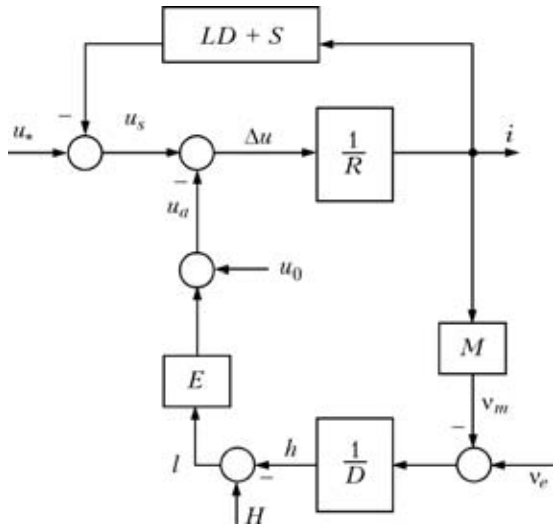


Рис. 1. Структурная схема сварочного контура (здесь и на рис. 2, 3 см. обозначения в тексте)

ли две координаты в цепи из детектирующих звеньев выбраны так, что элемент, на который воздействует возмущение $\xi(t)$, находится между ними, то разность выбранных координат будет функцией этого возмущения. При определенном подборе операторов внутренней модели некоторая переменная $\delta(t)$ будет пропорциональна или равна возмущению $\xi(t)$. Следует заметить, что идея косвенного измерения возмущений впервые была высказана, по-видимому, А. Г. Ивахненко [13] и получила дальнейшее развитие в работах [14–17].

Структура КУ, включающая двухвходовую внутреннюю модель внешнего возмущения и компенсирующую связь, представлена на рис. 2, где для удобства рассмотрения показан лишь тот участок сварочного контура, элементы которого используются в дальнейших расчетах. На основании внутренней модели (иногда ее называют дифференциальной вилкой [15, 17]) можно записать

$$y = (1 - W_1 W_0) u_s - W_1 W_0 u_a, \quad (3)$$

где через W_0 обозначен оператор

$$W_0 = 1/R, \quad (4)$$

а через W_1 — неизвестный пока оператор.

Если измерительные связи выполнены так, что

$$W_1 W_0 \equiv 1, \quad (5)$$

то из выражения (3) следует тождество

$$y \equiv u_a, \quad (6)$$

которое означает, что в каждый момент времени t сигнал $y(t)$ численно равен напряжению на дуге $u_a(t)$. Это является важным, поскольку тогда, согласно структурной схеме, представленной на рис. 2, и с учетом соотношений (2) и (6) получим

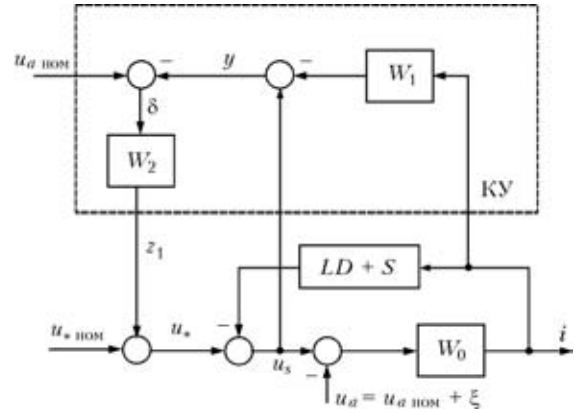


Рис. 2. Структурная схема КУ с компенсирующим воздействием на напряжение холостого хода

равенство $\delta = u_{a \text{ ном}} - y = u_{a \text{ ном}} - u_{a \text{ ном}} - \xi = -\xi$. Отсюда следует, что сигнал $\delta(t)$, создаваемый измерительными связями, не зависит ни от тока сварки i , ни от напряжения на дуге $u_a(t)$, а зависит лишь от возмущения $\xi(t)$.

Теперь воспользуемся принципом поглощения [7], в силу которого инвариантность напряжения u_a относительно возмущения $\xi(t)$ может быть обеспечена подавлением его компенсирующим воздействием $z_1(t)$. Поскольку в данной схеме (рис. 2) компенсирующее воздействие направлено по цепи управления напряжением u_* , то указанная инвариантность означает, что $z_1 \equiv W_2 \delta \equiv \xi$. Следовательно, для компенсации $\xi(t)$ необходимо обеспечить выполнение тождества $W_2 \equiv 1$.

На практике закон управления $u_* = u_*(\delta)$, осуществляющий текущую компенсацию возмущения, целесообразно строить исходя из условия астатизма, т. е. в интегральной форме

$$u_* = u_{* \text{ ном}} + z_1; \quad z_1 = K_1 \int_0^t \delta(t) dt,$$

где $u_{* \text{ ном}}$ — номинальное значение напряжения холостого хода; K_1 — положительный коэффициент.

При этом оператор W_2 будет иметь вид

$$W_2 = \frac{K_1}{D}. \quad (7)$$

Итак, для компенсации (поглощения) возмущения ξ необходимо обеспечить согласно (4), (5) и (7) выполнение двух условий:

$$W_1 \equiv \frac{1}{W_0} = R; \quad W_2 = \frac{K_1}{D}. \quad (8)$$

Выбором операторов W_1 и W_2 синтез модели поглощения, включающей двухвходовую модель внешнего воздействия и компенсирующую обрат-

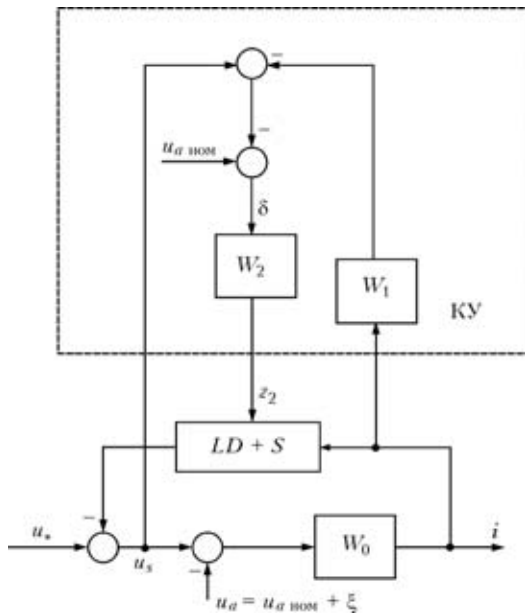


Рис. 3. Структурная схема КУ с компенсирующим воздействием на крутизну вольт-амперной характеристики источника сварочного тока

ную связь, завершается. В результате получаем КУ с весьма ценным свойством — оно создает сигнал $z_1(t)$, существенно подавляющий внешнее возмущение, поступающее на тот участок цепи, который охватывается двухвходовой моделью.

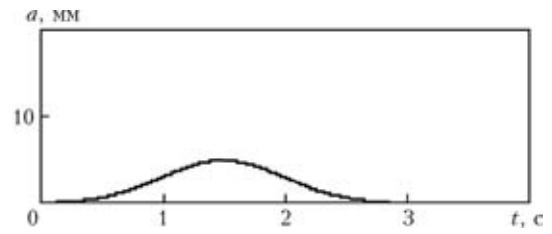


Рис. 4. График функции $a(t)$

Тем самым обеспечивается стабилизация напряжения на дуге на уровне заданного номинального значения $u_{a\text{ ном}}$.

В тех случаях, когда важнее обеспечивать независимость сварочного тока i от возмущения $\xi(t)$, компенсирующую обратную связь следует завести на параметрический вход звена с передаточной функцией $(LD + S)$, как показано на рис. 3. Закон управления, осуществляющий текущую компенсацию возмущения, в этом случае будем строить в виде

$$S = S_{\text{ном}} + z_2; \quad z_2 = K_2 \int_0^t \delta(t) dt,$$

где $S_{\text{ном}}$ — номинальное значение крутизны вольт-амперной характеристики источника сварочного тока, а $K_2 = \text{const} > 0$.

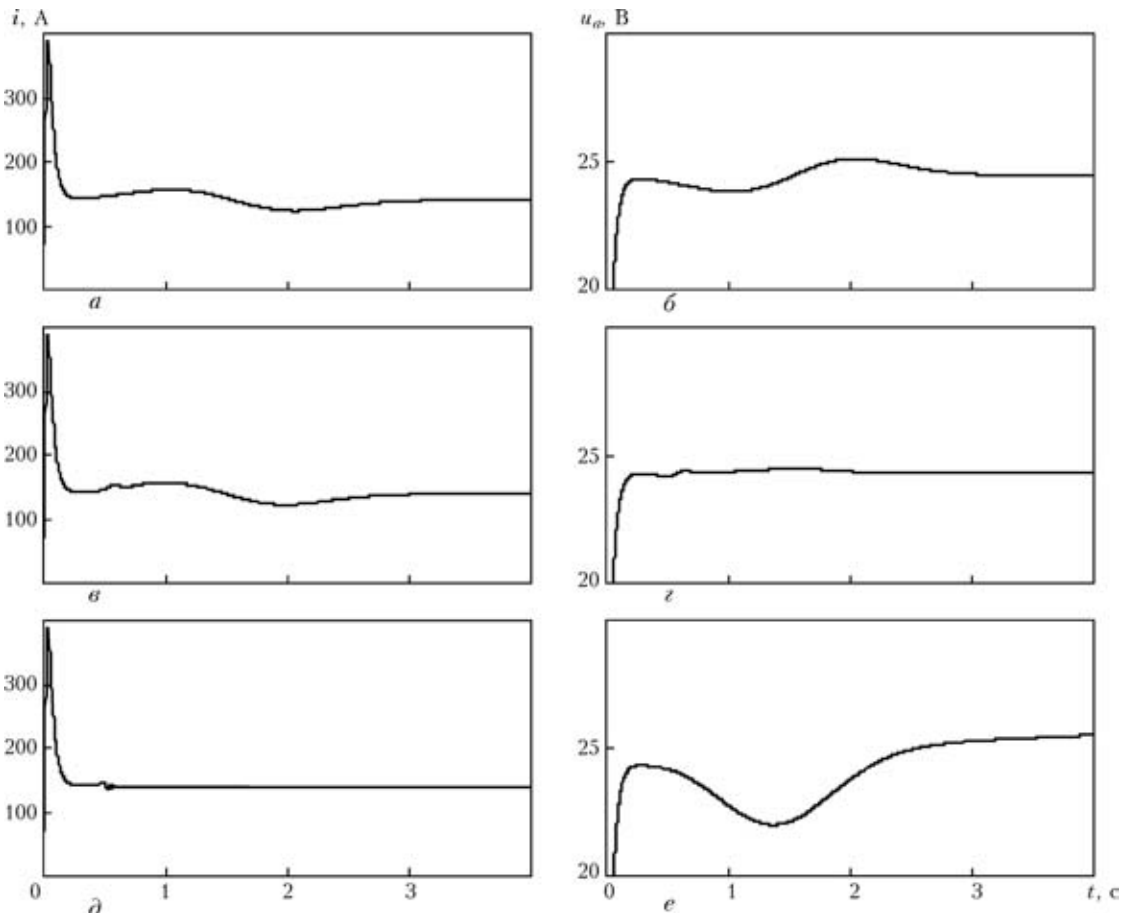


Рис. 5. Графики функций $i(t)$ (а, в, д) и $u_a(t)$ (б, з, е), построенные по результатам моделирования (а–е — см. в тексте)



Для проверки эффективности введения КУ в сварочный контур с помощью ЭВМ проводили моделирование динамики процессов, протекающих в контуре при дуговой сварке.

Взяты следующие параметры контура и режима сварки: $L = 4 \cdot 10^{-4}$ Гн; $R = 0,02$ Ом; $S = -0,02$ В/А; $u_* = 30$ В; $u_0 = 12$ В; $u_{a \text{ ном}} = 24$ В; $v_e = 50$ мм/с; $H_{\text{ном}} = 17$ мм. Расчетные значения коэффициентов КУ K_1 и K_2 составили $K_1 = 50 \text{ с}^{-1}$ и $K_2 = 0,01 (\text{А} \cdot \text{с})^{-1}$.

В качестве возмущения рассматривалось изменение расстояния $H(t)$, вызванное «прихваткой» на осевой линии свариваемых соединений. Закон изменения $H(t)$ задавался зависимостью $H(t) = [17 - a(t)]$ мм, где $a(t) = 5e^{-n(t-1,5)^2}$ мм, $n = 2\text{с}^{-2}$. График функции $a(t)$ показан на рис. 4.

Результаты моделирования представлены на рис. 5 в виде кривых $i(t)$ и $u_a(t)$ в контуре без (рис. 5, а, б) и с компенсирующей связью (рис. 5, в–е). При сравнении кривых можно увидеть, что в контуре без КУ возмущение по расстоянию приводит к изменению сварочного тока $i(t)$ и напряжения на дуге $u_a(t)$ (рис. 5, а, б). В контуре с КУ дело обстоит иначе. В том случае, когда компенсирующий сигнал $z_1(t)$ воздействует на напряжение холостого хода u_* (см. рис. 2), напряжение на дуге $u_a(t)$ становится независимым от возмущения и равным $u_{a \text{ ном}}$ (рис. 5, в). При этом отклонение сварочного тока $i(t)$ от его номинального значения $i_{\text{ном}}$ остается практически не компенсированным (рис. 5, г). В случае, когда компенсирующий сигнал $z_2(t)$ воздействует на крутизну S вольт-амперной характеристики источника сварочного тока (см. рис. 3), инвариантным по отношению к возмущению становится ток сварки $i(t)$, а изменение напряжения на дуге $u_a(t)$ при этом даже несколько увеличивается по сравнению с аналогичными показателями в схеме без КУ.

Таким образом, результаты численного моделирования показали, что введение в систему управления процессом дуговой сварки с плавящимся электродом компенсирующих связей позволяет реализовать идею поглощения вредных воздействий. Однако стабилизировать при этом удается лишь один из основных параметров режима (или сварочный ток, или напряжение на дуге). Тем не менее, высокая эффективность введения компен-

сирующей связи дает основание ожидать, что с использованием принципа поглощения возмущений при разработке сварочного оборудования открывается еще один путь к улучшению качества сварных соединений.

1. Патон Б. Е. Некоторые задачи в области автоматического регулирования сварочных процессов // Автомат. сварка. — 1958. — № 4. — С. 3–9.
2. Гладков Э. А. Автоматизация сварочных процессов. — М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1976. — 176 с.
3. Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша. — Киев: Вищ. шк., 1986. — 296 с.
4. Лебедев А. В. Эффективность стабилизации среднего значения тока при полуавтоматической сварке // Автомат. сварка. — 1978. — № 10. — С. 37–41.
5. Стабилизация процесса импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом / Б. Е. Патон, П. П. Шейко, А. М. Жерносеков, Ю. О. Шимановский // Там же. — 2003. — № 8. — С. 3–6.
6. Патон Б. Е. Саморегулирование дуги при сварке плавящимся электродом // Там же. — 1952. — № 1 — С. 38–45.
7. Clarke D. W., Montadi C., Tuffs P. S. Generalized predictive control. Pt. 1: The basic algorithm // Automatica. — 1987. — 27, № 2. — P. 137–148.
8. Tomizuka M., Tsao T., Chew K. Analysis and synthesis of discrete-time repetitive controllers // ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control. — 1989. — 111, № 3. — P. 357–359.
9. Гудвин Г., Цыпкин Я. З. Робастные системы управления с внутренней моделью // Докл. АН Украины. — 1992. — 323, № 4. — С. 640–644.
10. Цыпкин Я. З. Синтез структуры стабилизирующих и инвариантных регуляторов // Там же. — 1996. — 347, № 5. — С. 607–609.
11. Цыбулькин Г. А. О компенсации влияния неустойчивости режима сварки на оценку отклонения электрода от линии соединения свариваемых деталей // Автомат. сварка. — 1998. — № 4. — С. 50–52.
12. Цыбулькин Г. А. К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Там же. — 2002. — № 5. — С. 17–19.
13. Ивахненко А. Г. Связь теории инвариантности с теорией дифференциальных регуляторов // Автоматика. — 1961. — № 1. — С. 3–25.
14. Менский Б. М. К вопросу о реализации принципа инвариантности // Изв. АН СССР. Энергетика и автоматика. — 1961. — № 5. — С. 80–86.
15. Кухтенко А. И. Проблема инвариантности в автоматике. — Киев: Гостехиздат, 1963. — 376 с.
16. Зайцев Г. Ф., Стеклов В. К. Автоматические системы с дифференциальными связями. — Киев: Техника, 1984. — 167 с.
17. Цыпкин Я. З. Стохастические дискретные системы с внутренними моделями // Пробл. управления и информатики. — 1996. — № 1/2. — С. 21–26.

The paper deals with one of the approaches to lowering the influence of external disturbances on the arc welding mode parameters, based on application of the absorption principle. The procedure of structural synthesis of compensating feedback is described. Results of mathematical simulation are given.

Поступила в редакцию 22.03.2006