

УДК 621.6-52

ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ СВАРКИ

© 2013 В.Е. Вохрышев, К.Н. Омеляненко

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 13.03.2013

Процесс электрической дуговой сварки представлен как объект автоматизации, разработана система его автоматического управления.

Ключевые слова: сварка, объект автоматизации, алгоритм, система автоматического управления.

Автоматизированные технологические процессы электрической дуговой сварки широко распространены в технике [1]. Однако, как показывают исследования (проведенные, в том числе, и авторами) при автоматической сварке может появляться значительный процент брака свариваемых изделий в виде прожогов, непроваров, появления трещин, и т.п., обусловленных как технологией сварки, так и неопределенностью параметров свариваемых изделий и среды.

В существующих системах обычно используются астатические законы управления [1, 2], включающие в себя интегральные составляющие. Эти законы реализуются в виде ПИД-регуляторов, широко используемых в системах регулирования, что объясняется обширным опытом успешного их применения для обеспечения первичных показателей качества управления в режимах «малых» отклонений регулируемых координат, когда модель объекта линейна. Однако в режимах «больших» отклонений характерных и для процесса сварки, которые вызываются конструктивными и технологическими возмущениями, указанные законы оказываются малоэффективными, что и является одной из причин появления брака изделий при сварке.

Между тем, современные микропроцессорные средства позволяют реализовать и другие достаточно сложные алгоритмы управления, что позволяет получить новые качественные свойства замкнутых систем. В связи с этим проблема синтеза простых и практически эффективных законов, алгоритмов и структур систем управления установками для автоматической сварки, работающих в условиях неопределенности параметров объекта и среды, а также создания устройств, реализующих эти алгоритмы, является актуальной.

В настоящей статье представлены результаты исследований процесса сварки как объекта автома-

тизации, реализованного на действующем оборудовании, предназначенном для сварки трубчатых изделий (установка УСК-22М предприятия «АВИАКОР – авиационный завод», г. Самара), и его модернизации с использованием разработанной дискретно-непрерывной, субоптимальной по совокупности критериев качества, системы управления.

Сварка осуществляется неплавящимся электродом в среде защитных газов. Качество сварки определяется совокупностью параметров, в качестве которых выступают геометрические размеры шва и такие показатели как стойкость против возникновения трещин и межкристаллической коррозии, требуемая структура шва, околошовной зоны и другие.

Величины этих параметров и предельные значения их отклонений, точно также как и механические и физико-химические характеристики шва, не контролируются в процессе сварки, ограничиваются для конкретных изделий технологическим регламентом и могут быть проверены тем или иным способом лишь после ее завершения [3]. Поэтому качество сварки и безаварийная работа оборудования в значительной степени зависят от надежной и качественной работы систем стабилизации косвенных параметров процесса сварки: тока сварки и его напряжения, температуры сварного шва, скорости сварки, длины дуги и другие, что приводит к обеспечению надежного воспроизведения требуемого уровня качества шва при сварке однотипных изделий.

На рис. 1 представлены блок-схемы процессов изменения температуры сварного шва – T , длины дуги – L , скорости сварки – V как объектов управления.

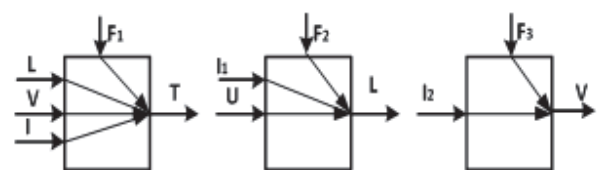


Рис. 1. Блок-схемы процесса сварки как объекта автоматизации

Вохрышев Валерий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: vohr3@yandex.ru

Омеляненко Константин Николаевич, аспирант. E-mail: k.Omelyanenko@mail.ru

Здесь F_1, F_2, F_3 – неконтролируемые возмущающие воздействия, вызванные особенностями конструкции свариваемых изделий, колебаниями в источниках нагрева и электропитания, сварочной ванне, а также другими причинами; контролируемые входные воздействия: L – длина дуги (расстояние от свариваемой детали до электрода при горячей дуге), I – ток сварки, I_1 – ток электродвигателя, обеспечивающего перемещение сварочного электрода в вертикальной плоскости, I_2 – ток электродвигателя, обеспечивающего перемещение сварочного электрода в горизонтальной плоскости. Автоматические системы стабилизации этих параметров на действующем оборудовании построены с использованием П- и ПИД-регуляторов.

Основными требованиями, предъявляемыми к качеству процесса управления сваркой в области малых отклонений являются высокая точность, малая чувствительность к изменениям параметров объекта и среды, а также к действующим возмущениям, асимптотическая устойчивость движения. Для этой области разработаны эффективные методы синтеза, в частности метод, основанный на использовании квадратичного критерия [2],

$$J = \int_0^{\infty} (\varepsilon^2(t) + T_1^2 \dot{\varepsilon}^2(t)) dt. \quad (1)$$

В случае, когда регулируемая координата системы находится в области больших отклонений достаточно удаленной от заданного значения, наиболее распространенным требованием к качеству движения является минимум времени регулируемой координаты до попадания в область малых отклонений, т. е. обеспечение перехода ее через область больших отклонений при минимизации критерия быстродействия:

$$J = \int_{t_1}^{t_2} dt. \quad (2)$$

Сложность реализации подобной стратегии обусловлена трудностями обеспечения совместности законов управления, синтезированных на основе критериев (1) и (2), на границе областей, которые во многих практических случаях оказываются непреодолимыми.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ РЕШЕНИЕ

Для решения задачи синтеза управления процессами стабилизации длины дуги и скорости сварки, обеспечивающих формирование заданных геометрических размеров и термический цикл, в данной работе при больших отклонениях

управления в работе использовался метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [4] на основе сопровождающего функционала, имеющего синергетическую интерпретацию. Сопровождающие функционалы выступают в роли вспомогательного средства для образования конкретных критериев качества в режимах больших и малых отклонений и имеют переменную в пространстве состояний структуру.

Функционал имеет вид:

$$J = \int_0^{\infty} (c^2 \dot{\psi}^2 + m^2 \varphi^2(\psi)) dt, \quad (2)$$

где $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n)$, – агрегированная макропеременная, представляющая собой произвольную дифференцируемую или кусочно-непрерывную функцию фазовых координат x_1 , выполняющая роль притягивающего многообразия, $\phi(\psi)$ – также некоторая функция, удовлетворяющая условиям: $j(0) = 0$, $\phi(\psi) \cdot \psi > 0$ при любых $\psi \neq 0$, c и m – постоянные коэффициенты.

Регулярная процедура синтеза управления методом АКАР предполагает необходимость неформального выбора макропеременных в виде линейной или нелинейной комбинации фазовых координат, от вида которых зависит результат синтеза управления. Если объект описывается системой дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{aligned} \dot{x}_k(t) &= f_k(x_1, \dots, x_n), \\ \dot{x}_n(t) &= f_n(x_1, \dots, x_n) + u, \quad k = 1, n, \end{aligned}$$

то процедура синтеза управления методом АКАР приводит к выражению [4]

$$u = -\left(\frac{\partial \psi}{\partial x_n}\right)^{-1} \left(\sum_{k=1}^n \frac{\partial \psi}{\partial x_k} f_k + \frac{1}{T} \phi(\psi) \right), \quad (3)$$

где $T=c/m$.

Управление (3) обеспечивает перевод объекта из произвольного начального состояния в окрестность притягивающего многообразия $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ и устойчивое движение в предписанное конечное вдоль него. Управление (3) может обеспечить самодвижение объекта (с одновременным “силовым” воздействием на него при соответствующем выборе функций Ψ , $\phi(\psi)$). Данная работа, включаясь в контекст этого направления, предлагает синтез управления процессов сварки, основанный на сочетании метода АКАР на базе сопровождающего функционала (2) при “больших” отклонениях и квадратичного критерия – при “малых” отклонениях соответственно, что позволяет ускорить гашение переходного процесса в системе при “больших” отклонениях и необходимую точность – при “малых”, и тем самым уменьшить вероятность появ-

ления прожогов и непроваров изделий, “прилипания” электрода и гашения дуги при сварке.

Задача синтеза управления процессами стабилизации длины дуги и скорости сварки, обеспечивающие формирование заданных геометрических размеров шва и термический цикл, формулируется следующим образом: для произвольных входных воздействий на объект (из допустимой области) необходимо для заданного объекта найти управление $u(t)$, ограниченное по модулю и минимизирующее функционал (1) – при “малых” и функционал (2) при “больших” отклонениях.

Решение задачи имеет следующий вид.

$$u = \begin{cases} u1, & \text{при } xB < x_1 \vee x_1 < xH \\ u2, & \text{при } xH \leq x_1 \wedge x_1 \leq xB, \end{cases} \quad (4)$$

где $C = xB - xH$ – зона малых отклонений, $xH = x_0 - \Delta$, $xB = x_0 + \Delta$, Δ – половина величины зоны малых отклонений, в этой зоне обеспечивается устойчивое горение дуги, x_1, x_0 – текущее и заданное значения регулируемой координаты, \vee и \wedge – знаки дизъюнкции и конъюнкции соответственно, $u1, u2$ – управления, действующие соответственно вне зоны “малых” отклонений регулируемой координаты и в зоне “малых” отклонений Δ .

В работе управление $u1$ формируется в соответствии с выражением (3) с назначением в качестве макропеременной Ψ и $\phi(\Psi)$ следующих соотношений:

$$\phi(\Psi) = B \cdot \text{sign}(\Psi), \quad (5)$$

$$\Psi = \sum_{k=1}^n k_i \cdot x_i, \quad (6)$$

где k_i – постоянные коэффициенты, x_i – переменные состояния объекта, sign – знаковая функция принимающая значение +1 или -1, в зависимости от знака функции Ψ (для контура стабилизации длины дуги) и +1 или 0 (для контура стабилизации скорости сварки).

В соответствии с уравнением (3) синтезированное управление имеет вид

$$u1 = -\left(\frac{1}{T} \cdot B \cdot \text{sign}\left(\sum_{k=1}^n k_i \cdot x_i\right) + \sum_{i=1}^n k_i \cdot f_i\right) \cdot k_n. \quad (7)$$

Управление (7) является дискретно-непрерывным: при “больших” отклонениях – релейным, а вблизи зоны “малых” отклонений – близким к непрерывному, которое плавно, без скачков переводит объект в зону “малых” отклонений. Процедура синтеза управления $u2$ по критерию (1) приводит к соотношению [2]:

$$W_{\text{pez}}(p) = \frac{1}{T_1 \cdot p \cdot W_o(p)} = \frac{x_1(p)}{u2(p)},$$

где $W_{\text{pez}}(p), W_o(p)$ – передаточные функции соответственно регулятора и объекта, или пола-

$$\text{гая } p = \frac{d}{dt}$$

$$u2 = \sum_{i=2}^n b_i x_i + b_1 \cdot \int x_1 dt, \quad (8)$$

где b_i – постоянные коэффициенты.

Таким образом, при “больших” отклонениях действует дискретно-непрерывное управление, длительность действия которого зависит от величины отклонения, а при “малых” – управление, синтезированное по критерию (1).

Конкретный вид управлений (7) и (8) определяется видом математического описания процессов сварки, которое по каналам I_1-L и I_2-V получено аналитически, а по каналу $L-T$ – экспериментально. Передаточные функции по этим каналам аппроксимируются передаточными функциями и дифференциальными уравнениями второго порядка, коэффициенты которых определяются электромеханическими постоянными электродвигателей установки (вертикального перемещения сварочного электрода и вращения заготовки) и переходной характеристикой температуры сварного шва. Уравнения (7) и (8) в этом случае имеют вид соответственно

$$\begin{aligned} u1 &= -(B1 \cdot \text{sign}(x_2 + k_1 x_1) + k_2 x_2) \\ u2 &= b_1(x_0 - x_1) + b_2 x_2 + b_3 \cdot \int (x_0 - x_1) dt, \end{aligned} \quad (9)$$

где $B1$ – реально существующие на установке ограничения на величины управляющих воздействий, а коэффициенты $k_1, k_2, b_i, i = 1, 3$ – положительные вещественные числа.

Управления (9) реализованы в устройстве [5] на базе микроконтроллера фирмы Atmel и внедрены в производство.

На рис. 2 приведены примеры осциллограмм процессов до и после внедрения системы стабилизации длины дуги с управлением (9) при сварке труб. Качественные характеристики стабилизации улучшилось примерно в 4 раза.

Для выявления степени влияния систем на качество свариваемых изделий были исследованы данные о количестве брака по данным лаборатории технического контроля однотипных изделий до и после внедрения разработанных систем с алгоритмами (9). Обработка результатов путем сравнения статистических рядов [6] в течение одного года показала снижение брака на 13 %. Разница оказалась статистически значимой с достоверностью выводов более 0.99.

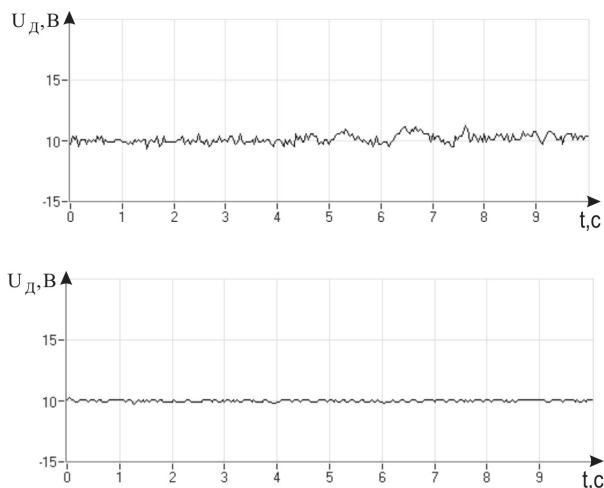


Рис. 2. Осциллограммы процессов стабилизации длины дуги до и после внедрения системы

ВЫВОДЫ

1. Синтезированы дискретно-непрерывные законы управления технологическим процессом сварки, позволяющие реализовать управ-

ление, субоптимальное по совокупности критериев качества.

2. Исследованиями реализованных и внедренных в производство систем с синтезированными алгоритмами управления установлено, что они обеспечивает улучшение показателей качества регулирования, и как следствие – существенное снижение брака свариваемых изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гладков В.А.* Управление процессами и оборудованием при сварке. М.: Издательский центр “Академия”, 2006. – 432 с.
2. *Ротач В.Я.* Теория автоматического управления теплоэнергетическими. М.: Энергоатомиздат, 1985. 306 с.
3. *Моисеенко В.П.* Материалы и их поведение при сварке. Ростов н/Д: Феникс, 2009. 300 с.
4. Современная прикладная теория управления. Ч.2. Синергетический подход в теории управления [под ред. А.А. Колесникова]. Таганрог, ТРТУ, 2000. 558 с.
5. Пат. № 2440220 Российская Федерация. Устройство для автоматического регулирования длины дуги при электросварке / *Вохрышев В.Е., Омеляненко К.Н.* Бюл. 2012, № 2.
6. *Налимов В.В.* Применение математической статистики при анализе вещества. М.: Физматгиз, 1960. 430 с.

DISCREET-UNINTERRUPTED WELDING TECNOLOGICAL PROCESS AUTOMATION DIRECTION

© 2013 V. E. Vokhryshev, K.N. Omelyanenko

Samara State Technical University

The block diagram of the electric arc welding process as the object of the automation system and its automatic control using indirect measurement of parameters characterizing the quality of welding is researched in the article.

Key words: welding, automation object, automatic control system, discreet-uninterrupted direction.