

## АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА (НА ПРИМЕРЕ ТРИОДНОЙ ПРЯМОНАКАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПУШКИ)

А.В. Коваленко (ОАО «Национальный институт авиационных технологий»)

Рассмотрен вопрос построения следящего контура для управления электронным лучом при помощи системы ЧПУ. Проанализированы особенности взаимосвязей рабочих параметров наиболее распространенных типов электронно-лучевых пушек (с прямым и принудительным накалом катода). Приведены алгоритмы управления силовыми источниками, предназначенными для работы с данными видами пушек.

Ключевые слова: ЧПУ, система управления, сварка, электронно-лучевая пушка.

Во второй половине прошлого столетия сформировалась группа технологий электронно-лучевой обработки материалов, использующих для осуществления воздействия кинетическую энергию электронов, разогнанных до околосветовых скоростей с помощью ускоряющего напряжения и сформированных в электронный луч [1]. Электронно-лучевые технологии нашли широкое применение в авиационной и космической отраслях промышленности, где активно используются для сварки нагруженных и ответственных деталей и элементов конструкций [2].

Наиболее распространенными источниками электронного луча в настоящее время являются электронно-лучевые пушки (ЭЛП) с термоэмиссионным катодом прямого или принудительного нагрева, построенные по триодной схеме [3]. Принципиальным различием указанных конструкций ЭЛП является способ нагрева катода, при этом алгоритмы управления остальными параметрами в указанных ЭЛП во многом схожи. В связи с этим дальнейшие рассуждения будут проводиться применительно к ЭЛП с прямым нагревом катода.

Как правило, в качестве характеристик технологического процесса электронно-лучевой обработки используют следующие параметры луча: ускоряющее напряжение, сила тока луча, а также силы токов, протекающих через фокусирующую электромагнитную линзу и две пары катушек, осуществляющие отклонение луча относительно осей абсцисс и ординат в системе координат ЭЛП. Первые два параметра являются энергетическими, в то время как остальные три определяют геометрию электронного луча.

Параметры ТП за исключением силы тока луча являются также управляющими параметрами ЭЛП и не зависят от других параметров, что позволяет осуществлять управление ими при помощи простейшего следящего контура, имеющего отрицательную обратную связь по управляемой величине (рис. 1) [4]. Как правило, подобные следящие контуры уже реализованы в блоках питания соответствующих элементов ЭЛП и с высокой точностью обрабатывают заданные значения управляемых величин.

Сила тока луча зависит от силы тока эмиссии катода и величины напряжения на прикатодном управляющем электроде (электроде Венельга), данное напряжение также именуется управляющим напряжением (напряжением Венельга) [1]. При этом сила тока эмиссии зависит от температуры катода, эмис-

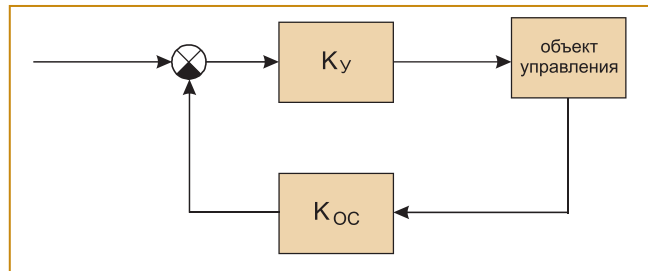


Рис. 1. Общий вид следящего контура с отрицательной обратной связью по управляемой величине, где  $K_U$  – коэффициент усиления в цепи управления;  $K_{OC}$  – коэффициент усиления в цепи обратной связи

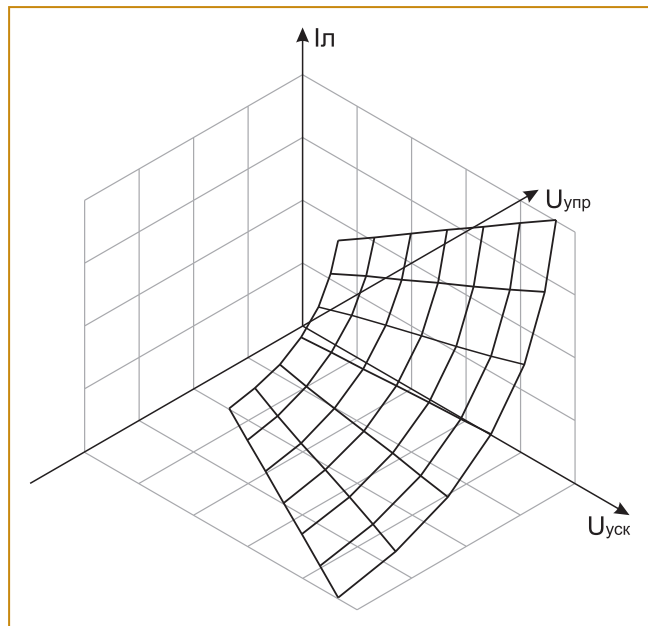


Рис. 2. Зависимость силы тока луча ( $I_{\Gamma}$ ) от величин управляющего ( $U_{упр}$ ) и ускоряющего ( $U_{уск}$ ) напряжений

сионных свойств его материала, а также величины ускоряющего напряжения.

Ввиду инерционности изменения температуры катода в большинстве современных ЭЛП нагрев катода является фиксированным, следовательно, и сила тока эмиссии также остается неизменной. Изменение силы тока эмиссии, вызванное изменением температуры или эмиссионных свойств материала катода, свидетельствует о наличии структурных изменений в катоде и является признаком скорого выхода его из строя. Данный факт может использоваться в качестве критерия для прогнозирования остаточного ресурса работы катода.

Сила тока луча связана с величинами ускоряющего и управляющего напряжений выражением [5]:

$$I_{\lambda} = g \left[ \frac{U_{упр} + D \cdot U_{уск}}{1 + \chi \cdot D} \right]^{3/2}, \quad (1)$$

где  $I_{\lambda}$  – сила тока луча;  $U_{упр}$  – величина управляющего напряжения;  $U_{уск}$  – величина ускоряющего напряжения;  $g$ ,  $D$  и  $\chi$  – коэффициенты, зависящие от особенностей конструкции ЭЛП.

Данные, полученные экспериментально<sup>1</sup> (рис. 2), в большой степени соответствуют выражению (1), отклонения не превышают значений погрешностей измерительных приборов.

В связи с этим для реализации управления силой тока луча в состав следящего контура необходимо ввести элемент, осуществляющий расчет управляющего напряжения, как функции заданной силы тока луча и текущей величины ускоряющего напряжения (рис. 3) в соответствии с выражением (2):

$$U_{упр} = f(I_{\lambda}, U_{уск}) = \left[ \frac{I_{\lambda}}{g} \right]^{2/3} \cdot (1 + \chi \cdot D) - D \cdot U_{уск}. \quad (2)$$

В связи с большой скоростью протекающих процессов для построения следящего контура необходимо вычислительное устройство с высоким быстродействием. Ряд западных производителей предпочитают использовать аналоговые следящие контуры с целью получения максимальной производительности. Такой подход позволяет добиться наибольшего быстродействия следящего контура, однако значительно затрудняет его перенастройку для использования катодов другого типа в случае возникновения такой необходимости.

С позиции управления параметры ЭЛП можно разделить на две группы: управляющие и контролируемые (таблица). Управляющие параметры изменяются в процессе обработки, их значения должны задаваться при помощи управляющей программы – по этой причине данные параметры могут быть представлены в системе ЧПУ в виде осей [6, 7]. Значения контролируемых параметров должны поддерживаться постоянными в процессе обработки, в связи с чем они могут быть представлены в системе ЧПУ в виде настроек, изменяемых в зависимости от характеристик используемого оборудования.

Таким образом, одним из вариантов автоматизации ТП электронно-лучевой обработки является реализация вышеописанных следящих контуров и интеграция их в систему ЧПУ. При этом синхронизация управления основными параметрами данного процесса

**Коваленко Артем Валерьевич** – канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского сектора.  
ОАО «Национальный институт авиационных технологий» («НИАТ»).

Контактный телефон (495) 312-03-81.

E-mail: avk@niat.ru

<sup>1</sup> Исследования проводились на триодных прямонакальных ЭЛП производства ОАО «Национальный институт авиационных технологий» (Россия), НПО «Орион» (Россия), Pro-Beam Systems GmbH (Германия).

Таблица. Представление параметров ЭЛП в системе ЧПУ

Параметр ЭЛП	Тип	Влияет на параметры технологического процесса
Ток нагрева катода	Контролируемый	Ток луча
Ускоряющее напряжение	Контролируемый	Ускоряющее напряжение, ток луча
Управляющее напряжение	Управляющий	Ток луча
Ток фокусирующей электромагнитной линзы	Управляющий	Ток фокусирующей электромагнитной линзы
Ток отклоняющей катушки по оси абсцисс	Управляющий	Ток отклоняющей катушки по оси абсцисс
Ток отклоняющей катушки по оси ординат	Управляющий	Ток отклоняющей катушки по оси ординат

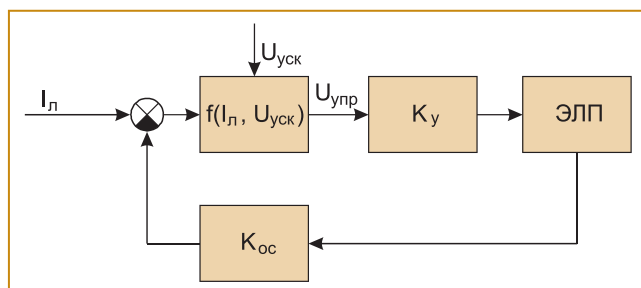


Рис. 3. Следящий контур для управления силой тока луча

осуществляется путем задания их значений в единой управляющей программе, выполняемой системой ЧПУ.

#### Список литературы

1. Шалимов М.П., Панов В.И. Сварка вчера, сегодня, завтра... Под ред. Запария В.В. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2006.
2. Денисов Б.С., Мейлах А.И. Сварка в самолетостроении. Сварные конструкции МИГов. М.: Русавиа, 2007.
3. Глазов С.И., Люшинский А.В., Магнитов В.С., Обознов В.В., Чуклинов С.В. Основы технологии электронно-лучевой и диффузионной сварки. Под ред. Сироткина О.С., Чуклинова С.В. Рыбинск: Рыбинский дом печати. 2001.
4. Иванов В.А., Медведев В.С., Чемоданов Б.К., Ющенко А.С. Математические основы теории автоматического регулирования. Под ред. Чемоданова Б.К. М.: Высшая школа. Т. 1, 2. 1977.
5. Власов Ф.В. Электронные и ионные приборы. М.: Связьиздат. 1960.
6. Мартинов Г.М., Плихунов В.В., Коваленко А.В. Расширение функциональных возможностей системы ЧПУ для управления установкой электронно-лучевой сварки//Авиационная промышленность. 2009. № 1.
7. Коваленко А.В. Концепция универсальной системы ЧПУ для современного технологического оборудования//Авиационная промышленность. 2011. № 4.